THỂ LỆ
VỀ CÔNG BỐ CÔNG TRÌNH KHOA HỌC VÀ ĐĂNG BÀI BÁO KHOA HỌC TRÊN TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM

1. Khái quát về Tạp chí Cơ khí Việt Nam:

Tạp chí Cơ khí Việt Nam là cơ quan báo chí thực hiện ngôn luận - lý luận của Tổng hội Cơ khí Việt Nam, đồng thời là tiếng nói, kênh thông tin chính thống của ngành Cơ khí Việt Nam. Tạp chí cũng còn là diễn đàn nghiên cứu khoa học của các nhà quản lý-khoa học-chuyên gia-nghiên cứu sinh, học viên cao học, … trên cả nước, do đó đã được *Bộ Khoa học và Công nghệ cấp ISSN 2615 - 9910 (mã số chuẩn quốc tế đối với xuất bản phẩm nhiều kỳ) và Hội đồng Chức danh Giáo sư Nhà nước công nhận tính điểm công trình khoa học-bài báo khoa học.*

Tạp chí Cơ khí Việt Nam có nhiệm vụ tuyên truyền, phổ biến chủ trương chính sách của Đảng, pháp luật của Nhà nước và định hướng phát triển, hoạt động của ngành Cơ khí Việt Nam; công bố công trình khoa học, kết quả nghiên cứu và chuyển giao công nghệ, chuyên đề khoa học và công nghệ có hàm lượng khoa học và giá trị thực tiễn cao của nhà quản lý-khoa học-chuyên gia, giảng viên, nghiên cứu sinh, học viên cao học, … trong ngành Cơ khí và liên quan đến lĩnh vực Cơ khí. Ngoài ra, Tạp chí cũng còn là nơi công bố những phát minh, sáng chế, kết quả, thành tích, điển hình tiên tiến trong hoạt động nghiên cứu khoa học, quản lý, đào tạo và sản xuất, kinh doanh lĩnh vực Cơ khí ở trong và ngoài nước tới đông đảo bạn đọc.

2. Việc công bố công trình khoa học/ đăng bài báo khoa học trong ngành Cơ khí và liên quan đến lĩnh vực Cơ khí trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam:

Tạp chí Cơ khí Việt Nam nhận công bố công trình khoa học/ đăng bài báo khoa học trong ngành Cơ khí và liên quan đến lĩnh vực Cơ khí của nhà quản lý-khoa học-chuyên gia-nghiên cứu cứu sinh, học viên cao học,… trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam (bản in giấy), gồm: *[1]Cơ khí Chế tạo máy, [2]Cơ khí Quốc phòng, [3]Cơ khí Giao thông, [4]Cơ khí Nông-lâm nghiệp, [5]Cơ khí Xây dựng, [6]Cơ khí Thủy sản, [7]Cơ khí Địa chất, [8]Cơ khí Hóa chất, [9]Cơ khí Bảo quản chế biến nông lâm thủy sản, [10]Cơ khí Động cơ đốt trong, [11]Cơ khí Ô tô - Máy kéo, [12]Cơ khí Máy thủy khí, [13]Cơ khí Công nghệ nhiệt lạnh, [14]Cơ khí máy năng lượng, [15]Cơ khí Công nghệ dệt, [16]Cơ khí Công nghệ cắt may, [17]Cơ khí Cơ-điện tử, [18]Cơ khí Kỹ thuật hệ thống công nghiệp, [19]Cơ khí đào tạo nguồn nhân lực và nghiên cứu chuyển giao.*

3. Thể lệ về công bố công trình khoa học/ đăng bài báo khoa học trong ngành Cơ khí và liên quan đến lĩnh vực Cơ khí trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam. Do đó, công trình khoa học/ bài báo khoa học khi được đăng trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam phải đảm bảo các yêu cầu, như sau:

3.1. Yêu cầu chung: Công trình khoa học/ bài báo khoa học đăng trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam phải là kết quả nghiên cứu gốc; bài báo tổng quan hoặc bài viết thông tin khoa học *(short communications).*

3.2. Bản thảo: Bài báo đăng trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam, gồm có các phần:

1. Tên bài báo (bằng tiếng Việt và bằng tiếng Anh).
2. Tên tác giả, đồng tác giả (kèm theo ghi chú về chức danh khoa học, học hàm, học vị, tên cơ quan công tác, email).
3. Tóm tắt bài báo bằng tiếng Việt và tiếng Anh không quá 350 từ (bao gồm có từ khóa tiếng Việt và tiếng Anh, đối với cụm từ khóa có khoảng 5 - 15 từ khóa).
4. Đặt vấn đề.
5. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu.
6. Kết quả và thảo luận (có thể tách thành 2 phần riêng biệt: Kết quả, Thảo luận).
7. Kết luận.
8. Tài liệu tham khảo (trích dẫn theo đúng quy định bài báo quốc tế).

Bản thảo được soạn trên máy vi tính, sử dụng Unicode, kiểu chữ Time New Roman, cỡ chữ 14, trên giấy A4 - một mặt, chế độ dãn dòng: "1.5 lines spacing", căn lề trái phải mỗi bên: 3 cm, căn lề trên dưới: 2,5 cm, chế độ lề: "justified". Dung lượng mỗi bài báo khoảng 1.600-2.500 từ. Các đồ thị, hình và ảnh cần trình bày rõ ràng.

Các thuật ngữ khoa học nếu chưa được Việt hóa thì ưu tiên dùng nguyên bản tiếng Anh. Các ký hiệu viết tắt cần phải giải thích khi xuất hiện lần đầu.

Thứ tự bảng và hình được đánh số theo trình tự trong bài, không đánh theo thứ tự đề mục. Không được viết tắt các tiểu mục, tên bảng, hình vẽ. Tên bảng được ghi bên trên bảng, tên hình vẽ được ghi bên dưới hình. Chú thích in nghiêng.

Chỉ có những tài liệu được trích dẫn thực sự trong nội dung bài viết mới đưa vào phần tài liệu tham khảo. Tài liệu tham khảo được sắp xếp theo thứ tự trích dẫn (tài liệu tiếng nước ngoài được sắp xếp theo họ của tác giả, tài liệu tiếng Việt sắp xếp theo tên tác giả) và theo trình tự: tên tác giả, năm xuất bản trong ngoặc đơn (…), tên sách, tên nhà xuất bản, nơi xuất bản (đối với sách), hoặc tên bài báo, tên tạp chí, tập, số (đối với bài báo), trang đầu và trang cuối của tài liệu. Đối với những tài liệu không có tác giả thì xếp theo chữ cái của từ đầu tiên của cơ quan ban hành tài liệu. Trong bản thảo, ở những nội dung tác giả đã tham khảo hoặc sử dụng kết quả nghiên cứu từ các tài liệu khoa học khác, cần đánh dấu bằng số (đặt trong dấu […]) - là số thứ tự của tài liệu xếp trong danh mục các tài liệu tham khảo. Tài liệu tham khảo cần ghi theo ngôn ngữ gốc, không phiên âm, không dịch.

3.3. Gửi hoặc nộp bài: Bản thảo gồm 2 bản in và 1 bản điện tử. Khi đăng kí nộp bài, các tác giả có thể đề xuất 2 phản biện. Việc chọn các phản biện chuyên môn phù hợp thuộc quyền của Hội đồng Biên tập Tạp chí Cơ khí Việt Nam.

3.4. Phản biện: Sau khi nhận bài viết gửi đăng đúng với Thể thức quy định của Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Hội đồng Biên tập sẽ gửi bài viết cho các phản biện.

Những bài viết được chấp nhận đăng, các tác giả sẽ nhận được thư phản hồi của Hội đồng Biên tập với thời gian sửa chữa được yêu cầu tùy theo chất lượng của bài viết. Bản sửa chữa lần cuối của tác giả sẽ được coi là bản gốc.

Bản thảo có thể nộp trực tiếp hoặc gửi qua E-mail của Tạp chí.

Quý tác giả muốn biết thêm thông tin, xin vui lòng liên hệ với **TÒA SOẠN TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM**

Địa chỉ: Số 4 Phạm Văn Đồng (trong Viện Nghiên cứu Cơ khí), P. Phú Diễn, TP. Hà Nội
Điện thoại: (024) 37 920 650 - 0985 696 263 / 0982 254 465
Email: Tcckvn.bbkh@gmail.com * **Website:** cokhivietnam.vn

TỔNG BIÊN TẬP
HÀ DUY KHÁNH

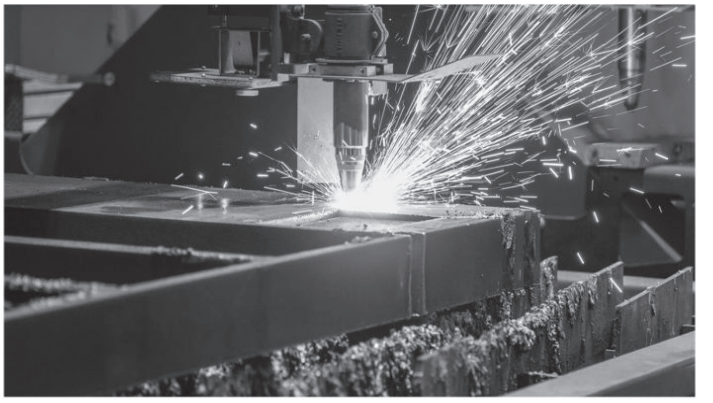
PHÓ TỔNG BIÊN TẬP
ĐẶNG VĂN LONG

HỘI ĐỒNG BIÊN TẬP
PGS,TS. **NGUYỄN NGỌC CHƯƠNG** (Chủ tịch)
GS,TS. **NGUYỄN LẠC HỒNG** (P. Chủ tịch)
GS,TSKH. **BÀNH TIẾN LONG**
TSKH. **PHAN XUÂN DŨNG**
PGS,TS. **HÀ MINH HÙNG**
PGS,TS. **TRƯƠNG VIỆT ANH**
GS,TS. **ĐINH VĂN CHIẾN**
GS,TSKH. **PHẠM VĂN LANG**
GS,TS. **CHU VĂN ĐẠT**
PGS,TS. **TRẦN VĨNH HƯNG**
PGS,TS. **ĐÀO QUANG KẾ**
PGS,TS. **NGUYỄN VĂN BÀY**
PGS,TS. **ĐÀO DUY TRUNG**
PGS,TS. **LÊ THU QUÝ**
PGS,TS. **BÙI TRUNG THÀNH**
PGS,TS. **LÊ VĂN ĐIỂM**
GS,TS. **LÊ ANH TUẤN**
GS,TS. **NGUYỄN HỮU LỘC**
PGS,TS. **DƯƠNG VĂN TÀI**
TS. **PHAN ĐĂNG PHONG**
TS. **TẠ NGỌC HẢI**
PGS,TS. **TRẦN NGỌC HIỀN**
PGS,TS. **TRƯƠNG HOÀNH SƠN**
TS. **HỒ TRẦN ANH NGỌC**
TS. **NGÔ TRỌNG BÍNH**
PhD. **MIKE PHÙNG**

THIẾT KẾ MỸ THUẬT
NGÂN GIANG

*Tạp chí Cơ khí Việt Nam:
- In tại Công ty Cổ phần In Khoa học Công nghệ Hà Nội
- Khuôn khổ 20,5cm x 28,5cm
- 420 trang
- Xuất bản mỗi tháng một kỳ
- Giá bán 120.000 đồng/quyển Tạp chí

TẠP CHÍ
CƠ KHÍ VIỆT NAM
VIETNAM MECHANICAL ENGINEERING JOURNAL
ISSN 2615 - 9910 (bản in)
ISSN 2815 - 5505 (online)
CƠ QUAN CỦA TỔNG HỘI CƠ KHÍ VIỆT NAM
• http://cokhivietnam.vn



❖ Nghiên cứu hệ thống giải nhiệt cho khuôn phun ép nhựa
❖ Xác định nhiệt độ bề mặt ngoài của nòng súng bằng phương pháp đo thực nghiệm
❖ Đặc điểm kết cấu và thiết kế mô hình máy tách bùn phân cấp

Số 335, tháng 11 năm 2025
Tạp chí Cơ khí Việt Nam phát hành ngày 25 tháng 11 năm 2025

TÒA SOẠN TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM
Số 4 Phạm Văn Đồng (trong Viện Nghiên cứu Cơ khí), P. Phú Diễn, TP. Hà Nội
Điện thoại: (024) 3792 0650 **Hotline:** 0985 696 263 - 0982 254 465
Email: tcckvietnam@gmail.com
Website: cokhivietnam.vn

* * *

Giấy phép hoạt động Tạp chí in và Tạp chí Điện tử của Bộ Thông tin và Truyền thông
Số 378/GP-BTTTT, ngày 22 tháng 6 năm 2021

Văn bản chấp thuận tăng trang số 1924/BC-QLBC ngày 24 tháng 11 năm 2025 của Cục Báo chí, Bộ Văn hóa, Thể thao và Du lịch đề xuất bản số 335, tháng 11 năm 2025

Văn phòng đại diện:

1. Tại TP. Hồ Chí Minh:
- PGS,TS. **Bùi Trung Thành**
Phòng T4.0, Nhà T, Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh
Số 12 Nguyễn Văn Bảo, phường Hạnh Thông, TP. Hồ Chí Minh
Điện thoại: 0913 921 407
Email: tcck.tphcm@gmail.com

- GS,TS. **Nguyễn Hữu Lộc**
Phòng 205, Nhà B11, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh,
số 268 Lý Thường Kiệt, phường Diên Hồng, TP. Hồ Chí Minh.
Điện thoại: 0913 603 264
Email: nhloc@hcmut.edu.vn

2. Tại tỉnh Quảng Ninh:
- TS. **Hoàng Minh Thuận**
Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng, Số 54, khu Liên Phương, phường Yên Tử, tỉnh Quảng Ninh
Điện thoại: 0904 116 189
Email: minhthuan.tcckvn@gmail.com

3. Tại Thái Nguyên:
- GS,TS. **Vũ Ngọc Pi**
Số 234 tổ Phú Xá 5, phường Tích Lương, tỉnh Thái Nguyên
Điện thoại: 0974 905 578
Email: vungocpi@tnut.edu.vn

Phóng viên thường trú:

1. Tại Hải Phòng:
- Lê Thế Hiệp
Điện thoại: 0913 063 747
Email: daidientcck@gmail.com

MỤC LỤC
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM SỐ 335, THÁNG 11 NĂM 2025

Trang

NGHIÊN CỨU – TRAO ĐỔI (9 – 413)

1. **Nguyễn Hữu Cường Thịnh, Ngô Xuân Quang, Nguyễn Huy Hùng, Dương Văn Tú, Nguyễn Tấn Tiến:** Thiết kế bộ điều khiển trượt cho hệ truyền động dây mềm dựa trên mô hình mô-men xoắn phi tuyến..... 9
2. **Nguyễn Quý Hưng, Phan Hoàng Long, Nguyễn Huy Hùng, Dương Văn Tú, Nguyễn Tấn Tiến:** Thiết kế cụm tạo ẩm cho buồng thử nghiệm ăn mòn khí SO_2 trong thiết bị báo cháy..... 14
3. **Phan Hoàng Long, Nguyễn Hữu Nhân, Nguyễn Huy Hùng, Dương Văn Tú, Nguyễn Tấn Tiến:** Nghiên cứu thiết kế thiết bị kiểm định độ chịu ăn mòn sulfua dioxit cho sprinkler theo 6305-1:2007..... 20
4. **Nguyễn Hữu Cường Thịnh, Phan Hoàng Long, Nguyễn Huy Hùng, Dương Văn Tú, Nguyễn Tấn Tiến:** Nghiên cứu thiết kế hệ thống tự động kiểm định công suất bình chữa cháy xách tay..... 27
5. **Hứa Nguyễn Đăng Thy, Vũ Ngọc Long, Trần Thanh Hải, Bùi Quang Vinh, Trần Chấn Quốc**: Thiết kế hệ thống đo chỉ số PM10, PM2.5 và UV với công nghệ Lora kết hợp NB-IoT..... 32
6. **Nguyễn Thế Anh, Hà Thanh Hải, Trần Minh Thúy**: Mô hình hóa động lực học robot tác hợp gia công cơ khí..... 38
7. **Vũ Thị Như Quỳnh, Trần Minh Thế Uyên, Phạm Sơn Minh, Bùi Chấn Thạnh**: Nghiên cứu hệ thống giải nhiệt cho khuôn phun ép nhựa..... 46
8. **Dương Hải Nam, Vũ Thị Phượng**: Nghiên cứu chế tạo mô hình mô phỏng bãi đỗ xe xếp hình nhiều tầng sử dụng bộ điều khiển PLC S7-1200 và phần mềm TIA Portal..... 53
9. **Huỳnh Chí Tuyệt**: Nghiên cứu tổng quan về ứng dụng LPG cho động cơ diesel..... 58
10. ThS. **Nguyễn Thị Hòa**: Tổng quan về các phương pháp đánh giá mức độ thoải mái của trang phục bảo hộ..... 63
11. **Bùi Nguyễn Nhật Tài, Bùi Hoàng Gia Bảo, Nguyễn Tuấn Đạt, Phan Thành Nhân**: Nghiên cứu thực nghiệm sấy đậu Hà Lan trên hệ thống sấy bơm nhiệt tầng sôi..... 69
12. **Nguyễn Chí Khanh, Lê Nhật Quang, Đặng Thế Vinh, Phan Thành Nhân**: Thực nghiệm đánh giá các thông số ảnh hưởng đến hiệu quả vận hành của hệ thống Water chiller.. 79
13. **Võ Minh Tiến, Phạm Huy Hoàng**: Thiết kế hệ thống bơm lấy mẫu nước thải thông minh 87
14. **Lê Quang Ngọc**: Hệ thống theo dõi vị trí máy bay không người lái trong nhà sử dụng công nghệ UWB..... 91
15. **Nguyễn Hải Minh, Đoàn Văn Dũng, Nguyễn Quang Tuân, Đinh Đức Mạnh**: Nghiên cứu thiết kế thiết bị bắn tập cho các dòng súng tiểu liên STV do Việt Nam chế tạo..... 97
16. ThS. **Đỗ Thị Tuyết Lan**: Tổng quan ứng dụng công nghệ AI trong dệt may..... 101
17. **Nguyễn Hoàn, Lê Viết Khải, Bành Quốc Nguyên, Trần Anh Sơn, Hồ Minh Tuấn**: Đặc tính lưu lượng và độ nhạy hệ thống đo khí nén: Nghiên cứu CFD..... 106
18. **Dương Hải Nam, Vũ Thị Phượng**: Ứng dụng phần mềm CATIA mô phỏng và kiểm bền piston động cơ đốt trong..... 111
19. **Trần Nguyên Lân**: Nghiên cứu công nghệ dệt kim 3D liền mảnh, ứng dụng và xu hướng phát triển trong sản xuất trang phục thể thao..... 116
20. **Ngô Văn Lực, Nguyễn Thị Loan, Nguyễn Văn Hải, Đầu Văn Kiên, Hà Trí Hùng**: Khử nhiễu trong kết quả thử nghiệm an toàn của nắp ca-pô ô tô đối với đầu người đi bộ..... 121

21. **Nguyễn Nhựt Duy, Dương Thị Vân Anh, Nguyễn Anh Dũng, Nguyễn Anh Hào, Phạm Hùng Anh**: Ứng dụng robot trong việc vận hành và bảo trì hệ thống tủ phân phối điện 127
22. TS. **Đỗ Văn Tá**, ThS. **Huỳnh Văn Nhu**, ThS. **Phạm Tạo**, TS. **Huỳnh Văn Vũ**: Lớp phủ siêu kỵ nước dựa trên polysiloxane – nano silica: Chế tạo và ứng dụng..... 135
23. **Hoàng Trung Quốc, Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Khắc Huỳnh, Vũ Mạnh Hiếu, Hà Trường Sang**: Nghiên cứu đặc tính động lực học của đạn phi tiêu APS chuyển động dưới nước bằng công cụ mô phỏng số..... 142
24. **Lê Quang Hợp, Tô Viết Thành, Dương Thành Công**: Khảo sát động lực học xe thiết giáp xích sản xuất tại Việt Nam..... 150
25. ThS. **Nguyễn Tuấn Hưng**: Nghiên cứu đặc điểm của lực cắt trong gia công phay rãnh micro bằng phương pháp phần tử hữu hạn..... 157
26. **Hà Anh Tùng**: Thiết kế, điều khiển và đánh giá hiệu quả các phương pháp đảo gió khác nhau trong sấy năng lượng mặt trời..... 162
27. **Lê Thị Yến Vy**: Nghiên cứu hoạch định tuyến phân phối máy hỗ trợ thở oxi cho các bệnh viện: Nghiên cứu mô phỏng dựa trên VRPTW tại Thành phố Hồ Chí Minh..... 170
28. **Đào Văn Đoan, Nguyễn Đức Tú**: Tính toán, thiết kế hộp tiếp đạn của súng SHMT-M1..... 177
29. **Lê Ngọc Hà, Mai Anh Quang**: Nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của khâu cơ sở đến làm việc của máy tự động và quá trình khai thác sử dụng pháo phòng không 23 mm ZU23-2..... 181
30. ThS. **Nguyễn Thế Hoàng**, ThS. **Trần Viết Linh**, KS. **Lê Thị Hồng Thắng**: Ứng dụng Simcape trong mô phỏng hệ thống truyền lực xe điện..... 187
31. **Đào Văn Đoan, Nguyễn Văn Dương**: Thuật phóng trong môi trường nước của đạn ĐDN-M1..... 193
32. **Chảo Láo Lở, Triệu Quý Huy, Hoàng Trung Kiên**: Nghiên cứu tiện vật liệu cứng sau nhiệt luyện có hỗ trợ gia nhiệt..... 197
33. TS. **Võ Văn Biên**, ThS. **Lê Văn Dũng**, KS. **Trần Văn Mạnh**: Xác định nhiệt độ bề mặt ngoài của nòng súng bằng phương pháp đo thực nghiệm..... 201
34. KS. **Nguyễn Giang Châu**, ThS. **Tạ Bá Dũng**, ThS. **Nguyễn Xuân Kông**: Cơ sở lý thuyết xây dựng đường cam làm việc của súng máy SM7,62-6N kiểu minigun M134..... 207
35. **Võ Anh Tuấn, Lê Đức Chương**, ThS. **Nguyễn Đức Thịnh**, TS. **Phạm Phương Tùng**, PGS,TS. **Nguyễn Quốc Chí**: Phân tích sự ảnh hưởng của các thông số lên lực cắt trong quá trình gia công phay..... 212
36. **Bùi Xuân Sơn, Đỗ Văn Minh, Bùi Văn Nghĩa, Nguyễn Hoàng Hải, Nguyễn Văn Hường**: Mô hình toán thiết kế thuật phóng cho thiết bị bắn tập sử dụng nguyên lý phản lực..... 220
37. **Đỗ Duy Hà**: Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển PLC cân nước tự động phục vụ pha sơn.. 226
38. **Vũ Thị Hoài Thu**: Kỹ thuật hãm của đoàn tàu tốc độ cao..... 230
39. TS. **Nguyễn Quang Mạnh**, TS. **Nguyễn Dương Phụng**, ThS. **Nguyễn Đức Trọng**: Nghiên cứu thiết kế dao chuốt rãnh xoắn nòng pháo P-25HQ hải quân..... 237
40. **Tưởng Phước Thọ, Phạm Thế Sơn, Nguyễn Phương Nam, Lê Hồng Phúc, Huỳnh Đỗ Song Toàn**: Nghiên cứu chế tạo mô hình máy thử độ bền cho chi tiết nhựa..... 243
41. **Nguyễn Văn Minh, Trần Phước Trung, Huỳnh Đỗ Song Toàn**: Cơ cấu mềm được chế tạo từ phương pháp phun ép nhựa..... 252

42. **Hoàng Văn Hướng, Lê Văn Tú, Trương Đình Trí, Hà Minh Đức, Huỳnh Đỗ Song Toàn**: Nghiên cứu chế tạo máy hàn ống..... 260
43. **Nguyễn Đình Tùng**: Nghiên cứu thiết kế chế tạo hệ thống thiết bị xử lý chất thải chăn nuôi quy mô công nghiệp..... 268
44. ThS. **Nguyễn Đức Trung**, PGS,TS. **Trần Văn Như, Bùi Minh Nghĩa, Nguyễn Việt Hoàng**: Nghiên cứu giảm rung khi điều khiển hệ thống phanh ABS bằng bộ điều khiển trượt..... 274
45. **Nguyễn Trường Sơn, Trương Thị Thùy Trang, Nguyễn Văn Toàn, Nguyễn Trường An, Hà Trường Sang**: Nghiên cứu các thông số ảnh hưởng đến quá trình gia nhiệt của máy hút ép nhựa tấm ứng dụng trong chế tạo vỏ cho các thiết bị vật lý trị liệu..... 282
46. **Nguyễn Duy Dân, Nguyễn Văn Thành, Trần Xuân Thịnh**: Mô hình hóa và mô phỏng quá trình sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng cho vật liệu dạng bột dễ cháy nổ..... 290
47. TS. **Hoàng Văn Thành**: Ứng dụng phần mềm Matlab/Simulink mô phỏng hệ thống truyền động trên ô tô điện Vinfast VF9 Plus..... 297
48. **Bùi Văn Hưng, Lê Thanh Nhàn, Huỳnh Diệp Ngọc Long**: Đề xuất phương pháp thiết kế xe điện 4 bánh thích ứng với đặc thù giao thông đô thị Thành phố Hồ Chí Minh,,,,..... 302
49. **Trần Thế Nghiệp, Nguyễn Xuân Dũng, Đỗ Tùng Lâm, Nguyễn Văn Lâm, Nguyễn Đình Phúc**: Nghiên cứu phương pháp đo thời gian hẹn giờ của thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí HGCK-21 bằng cảm biến AS5048A..... 309
50. **Nguyễn Thanh Tùng**: Đặc điểm kết cấu và thiết kế mô hình máy tách bùn phân cấp..... 319
51. **Chu Hải Long, Nguyễn Văn Ngôn, Phạm Thành Đồng**: Xây dựng và giải bài toán thuật phóng đối với súng cối cỡ nòng 100mm..... 324
52. ThS. **Nguyễn Gia Phong**: Nghiên cứu tình hình ứng dụng công nghệ cơ khí – tự động hóa trong dây chuyền sản xuất may công nghiệp và triển vọng phát triển tại Việt Nam..... 333
53. **Đỗ Minh Chiến, Lê Văn Lợi, Nguyễn Thanh Tuấn, Hoàng Thị Nguyên, Mai Kim Hiếu, Hoàng Minh Thuận**: Thúc đẩy hoạt động nghiên cứu khoa học, sáng kiến và đổi mới sáng tạo trong giảng viên, sinh viên Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng..... 339
54. **Nguyễn Xuân Hòa, Vũ Thế Hòa, Nguyễn Thị Hồng Mến, Trương Văn Toản, Lê Văn Lợi, Đỗ Minh Chiến, Hoàng Minh Thuận**: Sa bàn thực hành điện thân xe ô tô – giải pháp đào tạo hiệu quả cho nghề công nghệ ô tô..... 345
55. **Nguyễn Văn Mễ, Đặng Văn An, Hà Minh Hùng, Nguyễn Hoàng Quân**: Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ hàn Laser-TIG đến hình thái bề mặt và biến dạng liên kết hàn giáp mối vật liệu composite trimetal hợp kim đồng – thép các bon – hợp kim đồng..... 349
56. **Nguyễn Thế Lương, Vũ Công Giang, Phạm Tuấn Dũng, Đinh Ngọc Mạnh, Mạc Văn Huy, Nguyễn Thế Hùng**: Nghiên cứu đánh giá hiệu quả của thuật toán Haar Cascade and Local Binary Patterns Histogram để mở khóa ô tô..... 359
57. **Nguyễn Thị Xuân, Nguyễn Văn Dung, Đỗ Thị Hoa Ngà**: Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ may đến độ giãn đứt đường may trên sản phẩm nội y từ vải dệt kim trong sản xuất may công nghiệp..... 366
58. **Huỳnh Công Lớn, Lương Văn Tới**: Nghiên cứu mô hình động lực học, ổn định và tối ưu hóa quỹ đạo chuyển động của cần cẩu di động và cần cẩu ống lồng: nghiên cứu tổng quan..... 376

59. **Duong V. Nguyen, Khanh P. Nguyen, Tai T. Ngo, Hiep V. Tran, Thinh V. Le, Kien T. Nguyen, Phuong X. Pham**: Influence of coconut oil-based biodiesel-diesel blends on injection timing in mechanical-injection diesel engines..... 381
60. **Tran Huu Danh, Mai Tat Loi, Vu Ngoc Pi, Nguyen Manh Cuong**: Multi-objective optimization and decision-making in ultrasonic vibration-assisted EDM of HARDOX 500 using NSGA-II coupled with SAW, MARCOS, and TOPSIS..... 385
61. **Lai Thanh Tuan**: Dynamic survey of automatic guns when mounted on mobile vehicles.. 394
62. **Nguyen Khac Hai Long, Vu Truong Hy, Pham Huy Hoang**: Dynamic simulation and analysis of bicycle frame using laplace transform and Matlab Simulink..... 399
63. **Le Thuong Hien, To Ngoc Thien**: Optimization and control of braking system for using Arduino and Matlab..... 406
64. **Le Thuong Hien, Hoang Van Luc**: Simulation of waste heat reuse system of electric car using Arduino and Matlab..... 410

DOANH NGHIỆP – DOANH NHÂN (414– 416)

– LILAMA 10 hoàn tất lắp đặt rotor Tổ máy số 2 Nhà máy Thủy điện Hòa Bình mở rộng: Bước tiến quan trọng hướng tới mục tiêu vận hành cuối năm 2025..... 414

DANH SÁCH

NHÀ KHOA HỌC THAM GIA PHẢN BIỆN KHOA HỌC CÁC BÀI BÁO KHOA HỌC ĐĂNG TẢI TRÊN CHUYÊN MỤC NGHIÊN CỨU – TRAO ĐỔI TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, SỐ 335, THÁNG 11 NĂM 2025

TT	HỌC HÀM, HỌC VỊ; HỌ VÀ TÊN	ĐƠN VỊ CÔNG TÁC
1	PGS,TS. **Nguyễn Anh Tú**	Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
2	TS. **Nguyễn Mạnh Dũng**	
3	TS. **Trần Ngọc Tiến**	
4	PGS,TS. **Nguyễn Minh Phú**	Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh
5	PGS,TS. **Nguyễn Thu Quý**	Viện Nghiên cứu Cơ khí, Bộ Công Thương
6	PGS,TS. **Đào Quang Kế**	Trường Đại học Hòa Bình
7	PGS,TS. **Trần Vĩnh Hưng**	Viện Phát triển Kỹ thuật Công nghệ tiên tiến (IDAT)
8	PGS,TS. **Lê Thanh Danh**	Đại học Kinh tế TP. Hồ Chí Minh
9	PGS,TS. **Võ Tường Quân**	Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh
10	PGS,TS. **Lưu Thanh Tùng**	
11	TS. **Phùng Thanh Huy**	
12	TS. **Huỳnh Phước Hiển**	
13	PGS,TS. **Nguyễn Hùng**	Trường Đại học Công nghệ HUTECH
14	PGS,TS. **Ngô Quang Hiếu**	Trường Đại học Cần Thơ
15	TS. **Lưu Trọng Hiếu**	
16	PGS,TS. **Nguyễn Văn Hòa**	Trường Đại học Nha Trang
17	TS.**Trần Minh Thế Uyên**	Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh
18	TS. **Phan Thị Đăng Thư**	
19	TS. **Đặng Hùng Sơn**	
20	TS. **Nguyễn Trần Phú**	
21	TS. **Nguyễn Tường Vi**	Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
22	TS.**Trần Văn Hoàng**	
23	TS. **Nguyễn Văn Mùi**	
24	TS. **Nguyễn Văn Lành**	Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh

25	TS. **Nguyễn Văn Khiển**	Trường Đại học Công Thương TP. Hồ Chí Minh
26	TS. **Đào Văn Dưỡng**	
27	TS. **Lương Quốc Việt**	
28	TS. **Nguyễn Nam Quý**	Học viện Kỹ thuật quân sự
29	TS. **Vũ Đức Quyến**	
30	TS. **Trần Văn Tân**	
31	TS. **Võ Văn Biên**	
32	TS. **Nguyễn Văn Hưng**	
33	TS. **Bùi Minh Tuân**	
34	TS. **Đỗ Mạnh Tùng**	
35	TS. **Nguyễn Mạnh Đức**	
36	TS. **Nguyễn Thế Dũng**	
37	TS. **Nguyễn Vũ Tùng**	
38	TS. **Phạm Văn Thìn**	
39	TS. **Uông Sỹ Quyền**	
40	TS. **Cù Xuân Phong**	
41	TS. **Đặng Văn Hiếu**	Đại học Phenikaa
42	TS. **Kiều Đức Thịnh**	Trường Đại học Thủy lợi
43	TS. **Dương Quang Minh**	Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
44	PGS,TS. **Vũ Tuấn Đạt**	Trường Đại học Giao thông vận tải
45	TS. **Trần Văn Lợi**	
46	TS. **Mai Văn Thắm**	
47	PGS,TS. **Trương Ngọc Tuấn**	Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên
48	PGS,TS. **Nguyễn Quốc Mạnh**	
49	TS. **Cao Thị Kiên Chung**	
50	TS. **Trần Xuân Thế**	Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
51	TS. **Lê Xuân Cam**	Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng
52	PGS,TS. **Nguyễn Văn Xô**	Trường Đại học Mỏ – Địa chất
53	TS. **Trần Đức Huân**	
54	TS. **Lưu Anh Tùng**	Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên
55	TS. **Nguyễn Chung**	Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG DÂY MỀM DỰA TRÊN MÔ HÌNH MÔ-MEN XOẮN PHI TUYẾN

SLIDING MODE CONTROL DESIGN FOR FLEXIBLE SHAFT TRANSMISSION BASED ON NONLINEAR TORQUE MODELING

Nguyễn Hữu Cường Thịnh[1], Ngô Xuân Quang[1, 2], Nguyễn Huy Hùng[4], Dương Văn Tú[1, 2, 3], Nguyễn Tấn Tiến[1, 2, 3]

[1]Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[2]DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[3]Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[4]Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ truyền động dây mềm có ưu điểm nhẹ, linh hoạt và an toàn, nên được ứng dụng rộng rãi trong robot và thiết bị tự động hóa. Tuy nhiên, đặc tính phi tuyến mạnh và trễ lớn của dây mềm khiến việc mô hình hóa và điều khiển trở nên phức tạp. Bài báo này trình bày một phương pháp điều khiển trượt dựa trên mô hình mô-men xoắn phi tuyến được xấp xỉ bằng chuỗi Fourier, nhằm điều khiển góc quay tải bám theo quỹ đạo mong muốn thông qua dây mềm. Mô hình được xây dựng từ dữ liệu thực nghiệm, có xét đến ảnh hưởng của bán kính uốn dây. Kết quả mô phỏng trên MATLAB cho thấy bộ điều khiển trượt duy trì độ bám theo chính xác và ổn định ngay cả khi hệ chịu nhiễu và phi tuyến, đồng thời vượt trội hơn bộ điều khiển PID truyền thống trong các kịch bản thử nghiệm.

Từ khóa: *Hệ truyền động dây mềm; Mô hình phi tuyến; Điều khiển trượt; PID.*

ABSTRACT

Flexible shaft transmissions offer advantages in terms of lightweight design, flexibility, and safety, making them widely used in robotics and automation. However, their strong nonlinearities and significant time delays make modeling and control challenging. This paper presents a sliding mode control approach based on a nonlinear torque model approximated by a Fourier series to control the load angle to track a desired trajectory through a flexible shaft. The model is identified from experimental data, with additional compensation for the shaft's bending radius. MATLAB simulations demonstrate that the proposed sliding mode controller achieves accurate and stable tracking performance even under disturbances and nonlinearities, outperforming a conventional PID controller in various test scenarios.

Keywords: *Flexible shaft transmission; Nonlinear modeling; Sliding mode control; PID.*

1. TỔNG QUAN

Hệ truyền động dây mềm là cơ cấu truyền chuyển động quay giữa hai phần tử cơ khí thông qua một trục hoặc dây có khả năng chịu mô-men xoắn, thay vì sử dụng liên kết cứng trực tiếp giữa động cơ và tải [1]. Cấu trúc này mang lại nhiều ưu điểm nổi bật như khối lượng nhẹ, khả năng bố trí linh hoạt và an toàn hơn khi tương tác với con người, nên được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống robot và thiết bị tự động hóa [2].

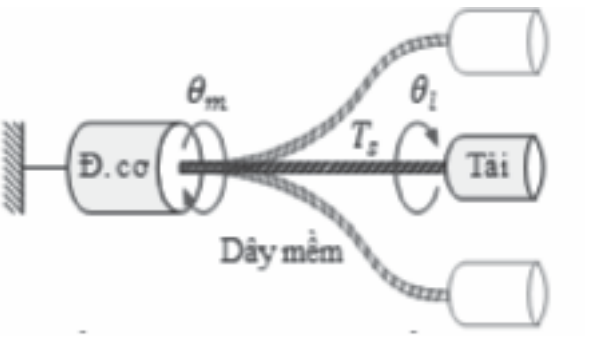
Trong robot tay máy, dây mềm cho phép đặt động cơ ở vị trí cố định trên khung hoặc chân đế, giảm khối lượng và quán tính tại các khâu chuyển động, từ đó nâng cao hiệu suất và khả năng điều khiển chính xác [2]. Ở robot di động phục vụ tìm kiếm và cứu hộ, truyền động dây mềm giúp loại bỏ động cơ và pin ở bộ phận chấp hành, giảm kích thước và trọng lượng tổng thể [3]. Trong thiết bị hỗ trợ phục hồi chức năng, dây mềm cho phép truyền mô-men xoắn từ động cơ đặt ở lưng bệnh nhân đến các khớp chi dưới, hỗ trợ vận động một cách an toàn và thoải mái [4]. Ngoài ra, các nghiên cứu gần đây còn khai thác dây mềm trong robot đeo người và robot y tế, nơi tính đàn hồi và khả năng bố trí linh hoạt đóng vai trò quan trọng [8], [9], [14].

Tuy nhiên, việc tích hợp dây mềm vào hệ truyền động cũng đặt ra những thách thức lớn về mô hình hóa và điều khiển. Đặc tính đàn hồi xoắn, dao động và trễ phi tuyến của dây mềm khiến mô hình động lực học trở nên phức tạp và khó xác định chính xác [5]. Các mô hình tuyến tính đơn giản như lò xo xoắn với độ cứng hằng số [6], [7] thường không phản ánh đầy đủ hành vi động lực học thực tế. Do đó, nhiều nghiên cứu đã đề xuất sử dụng các mô hình phi tuyến dựa trên dữ liệu thực nghiệm để mô tả chính xác hơn quan hệ giữa góc xoắn và mô-men xoắn [2], [8].

Những đặc tính phi tuyến và bất định này đòi hỏi các chiến lược điều khiển tiên tiến nhằm đảm bảo độ chính xác và độ bền vững của hệ thống. Trong đó, điều khiển trượt (Sliding Mode Control) được xem là ứng viên phù hợp nhờ khả năng khử nhiễu và đối phó với bất định tham số [5], [6], [13]. Trên cơ sở đó, bài báo này đề xuất một thuật toán điều khiển trượt dựa trên mô hình mô-men xoắn phi tuyến xấp xỉ bằng chuỗi Fourier, nhằm nâng cao chất lượng bám quỹ đạo và khả năng chống nhiễu của hệ truyền động dây mềm.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC

Hệ truyền động dây mềm được minh họa ở Hình 1, trong đó động cơ tạo ra chuyển động quay tại đầu vào, làm dây mềm bị xoắn. Độ lệch góc giữa đầu vào và đầu ra (góc xoắn) sinh ra mô-men xoắn truyền đến tải, tạo ra chuyển động quay tại đầu ra. Hai encoder được bố trí ở hai đầu để đo góc quay đầu vào và đầu ra, từ đó xác định góc xoắn và tốc độ xoắn của dây mềm [2], [8], [14].



Hình 1. Mô hình truyền động từ động cơ đến tải thông qua dây mềm.

Mô hình động lực học của hệ truyền động dây mềm có thể được biểu diễn bởi phương trình:

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

$$J_l\ddot{\theta}_l = T_s(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta}) \quad (1)$$

Với: - J_l: Mô-men quán tính của tải;

- $\ddot{\theta}_l$: Gia tốc góc của tải;

- $T_s(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta})$: Mô-men xoắn sinh ra từ dây mềm, phụ thuộc vào góc xoắn $\Delta\theta = \theta_m - \theta_l$ và tốc độ xoắn $\Delta\dot{\theta} = \dot{\theta}_m - \dot{\theta}_l$. Trong đó, θ_m là góc quay đầu vào của dây mềm (cũng chính là góc quay của động cơ), còn θ_l là góc quay đầu ra, nối với tải của dây mềm.

Do quan hệ giữa góc xoắn và mô-men xoắn trong dây mềm mang tính phi tuyến và không thể mô hình hóa chính xác bằng độ cứng hằng số [6], [7], nghiên cứu [8] đã đề xuất xấp xỉ mô-men xoắn bằng chuỗi Fourier:

$$\hat{T}_s(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta}) = f_{nl}(\Delta\theta) + c\Delta\dot{\theta} \quad (2)$$

$$f_{nl}(\Delta\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \begin{pmatrix} a_n \cos(n\Delta\theta w) \\ + b_n \sin(n\Delta\theta w) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Với: - a_0, a_n, b_n: Các hệ số Fourier;

- w: Tần số cơ bản;

- n: Bậc của chuỗi;

- c: Hệ số phản ánh ảnh hưởng của vận tốc xoắn.

Các hệ số này được xác định offline từ dữ liệu thực nghiệm thông qua phương pháp bình phương tối thiểu [8], [12].

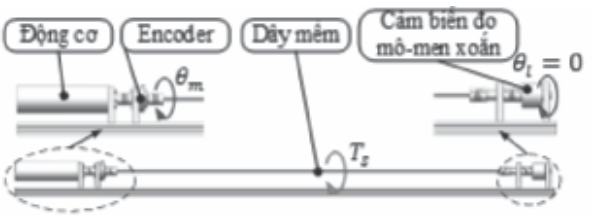
Ngoài ra, để xét đến ảnh hưởng của bán kính uốn R, mô-men xoắn được hiệu chỉnh theo:

$$\hat{T}_s(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta}, R) = \mu(R, \text{sign}(\Delta\theta)) \times \hat{T}_s(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta}) \quad (4)$$

với, μ là hệ số hiệu chỉnh được xác định từ sai số giữa mô hình ước tính và dữ liệu thực nghiệm.

Quy trình thu thập và xử lý dữ liệu để xác định hệ số Fourier trong phương trình (2) và (3) được thực hiện như sau: Dữ liệu về mô-men xoắn và góc xoắn của dây mềm được thu thập từ mô hình thực nghiệm minh họa ở Hình 2. Đầu ra của dây mềm được gắn với cảm biến đo mô-men xoắn, với cảm biến được giữ cố định. Động cơ điều khiển đầu vào của dây mềm theo quỹ đạo tham chiếu dạng đa sin, với nhiều tần số và biên độ khác nhau. Góc xoắn được xác định thông qua encoder đo góc quay đầu vào, kết hợp với điều kiện cố định ở đầu ra. Đồng thời, cảm biến mô-men xoắn ghi nhận mô-men xoắn truyền qua dây mềm.

Hai tập dữ liệu này được xử lý để xác định mối quan hệ giữa mô-men xoắn và góc xoắn. Chuỗi Fourier được xấp xỉ bằng công cụ nội suy đường cong do phần mềm MATLAB cung cấp. Bậc của chuỗi Fourier được lựa chọn offline thông qua quá trình thực nghiệm, dựa trên tiêu chí tối thiểu hóa sai số bình phương, nhằm đảm bảo độ khớp tối ưu giữa mô hình và dữ liệu thực nghiệm.



Hình 2. Mô hình thực nghiệm dùng để nhận diện đặc tính mô-men xoắn phi tuyến của dây mềm.

3. THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

Từ phương trình (1), hệ truyền động dây mềm có thể được viết lại dưới dạng phương trình trạng thái:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{J_l}\left[f_{nl}(\Delta\theta) + c(u_{eq} - x_2)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

với, $x_1 = \theta_l$, $x_2 = \dot{\theta}_l$ là trạng thái của ☞

hệ; $u_{eq} = \dot{\theta}_m$ là tín hiệu điều khiển.

Đặt sai số bám theo là $e = \theta_l^r - x_1$, với θ_l^r là quỹ đạo mong muốn của tải. Mặt trượt được chọn dưới dạng:

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (6)$$

với, λ là hằng số dương.

Luật điều khiển trượt được thiết kế nhằm đảm bảo hệ ổn định tiệm cận theo tiêu chuẩn Lyapunov:

$$u_{eq} = \frac{1}{c}\left[-f_{nl}(\Delta\theta) + J_l \times \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_l^r \\ +\lambda(\dot{\theta}_l^r - x_2) + k\,\mathrm{sgn}(s) \end{pmatrix}\right] + x_2 \quad (7)$$

với, k > 0 là hệ số điều khiển, đảm bảo tính bền vững và khử nhiễu.

Để giảm hiện tượng chattering, trong thực tế sgn(s) thường được thay thế bằng hàm bão hòa sat(s/φ) với φ > 0 là vùng biên của lớp rãnh trượt [6].

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các mô phỏng được thực hiện trong MATLAB/Simulink để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển trượt so với bộ điều khiển PID truyền thống. Mô hình hệ truyền động dây mềm sử dụng các thông số của dây MasterFlex08 được tham khảo từ [8], trong đó các tham số quán tính, độ cứng xoắn và hệ số cản được xác định cho hai trường hợp thử nghiệm:

*Trường hợp 1, $\Delta\theta \geq 0$:
$a_0 = 4.20200$; $a_1 = -4.20100$; $a_2 = 0$; $a_3 = 0$; $b_1 = 0.16220$; $b_2 = 0$; $b_3 = 0$; $c = 0.00003$; $w = 0.03322$.

* Trường hợp 2, $\Delta\theta < 0$:
$a_0 = -3.10700$; $a_1 = 2.33500$; $a_2 = 0.74840$; $a_3 = 0.02559$; $b_1 = -1.48700$; $b_2 = 0.36180$; $b_3 = 0.19760$; $c = 0.00003$; $w = 0.04357$.

Dây mềm được giả thiết là thẳng. Thông số điều khiển của thuật toán điều khiển trượt: λ = 5; k = 2. Thông số điều khiển của thuật toán PID: $k_p = 700$; $k_i = 600$; $k_d = 4$, được tinh chỉnh theo phương pháp Ziegler-Nichols.

Kết quả mô phỏng cho thấy:

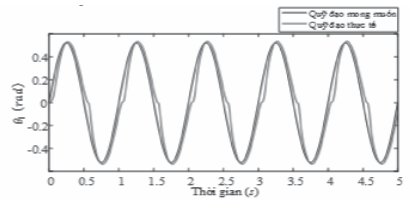
• Về đáp ứng bám quỹ đạo: Cả hai bộ điều khiển đều bám sát quỹ đạo mong muốn trong điều kiện lý tưởng (Hình 3a). Tuy nhiên, với nhiễu và phi tuyến của dây mềm, bộ PID xuất hiện sai số xác lập đáng kể, với biên độ dao động lớn nhất khoảng 0.2 rad (Hình 3b), trong khi bộ điều khiển trượt duy trì sai số thấp hơn rõ rệt, với biên độ dao động tối đa khoảng 0.015 rad (Hình 4b).

• Về tính bền vững: Bộ điều khiển trượt duy trì ổn định trong toàn bộ dải thử nghiệm ngay cả khi thông số hệ thay đổi hoặc có nhiễu xung tác động, điều này phù hợp với các nghiên cứu lý thuyết về khả năng kháng nhiễu của điều khiển trượt [5], [13].

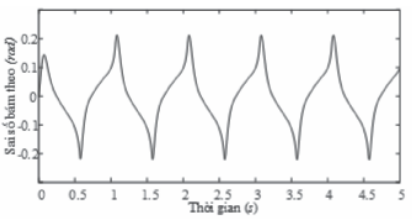
• Về độ trễ và dao động: PID nhạy với độ trễ của dây mềm, dễ gây dao động khi tăng hệ số khuếch đại, trong khi điều khiển trượt ít bị ảnh hưởng do cơ chế ràng buộc quỹ đạo trong không gian trạng thái. Kết quả trong Hình 4b cho thấy, khi tăng các thông số điều khiển lên λ = 10; k = 4 và λ = 25; k = 10, sai số giảm đáng kể, với biên độ dao động lần lượt là 0.01 rad và 0.005 rad. Điều này chứng minh việc tăng thông số điều khiển giúp cải thiện khả năng bám theo và tăng độ kháng nhiễu của hệ thống. Tuy nhiên, nếu các thông số này vượt quá ngưỡng phù hợp, hệ thống có thể mất ổn định.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Kết quả này khẳng định ưu điểm của điều khiển trượt đối với hệ truyền động dây mềm có đặc tính phi tuyến và trễ lớn, đặc biệt trong môi trường thực tế nơi thông số hệ và tải có thể thay đổi bất định.

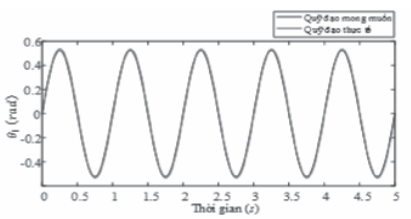


a) Quỹ đạo mong muốn và thực tế

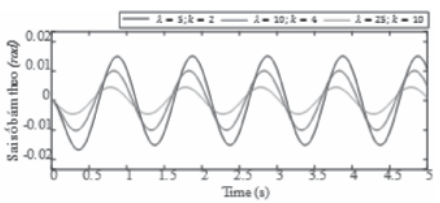


b) Sai số bám theo

Hình 3. Điều khiển bám theo quỹ đạo mong muốn sử dụng thuật toán PID



a) Quỹ đạo mong muốn và thực tế



b) Sai số bám theo với các thông số điều khiển khác nhau

Hình 4. Điều khiển bám theo quỹ đạo mong muốn sử dụng thuật toán điều khiển trượt

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **06/8/2025**
Ngày phản biện: **20/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. M. Usman et al., "*Modeling of flexible shaft for robotics applications*". Mechanism and Machine Theory, vol. 197, p. 105647, 2024.

[2]. M. Usman et al., "*Flexible shaft as remote and elastic transmission for robot arms*". IEEE Robotics Automation Letters, vol. 9, no. 5, pp. 4790-4797, 2024.

[3]. R. Hayashi, K. Nicho, Y. Yu, T. Kinugasa, and H. Amano, "*Small search robot consisting of plural driving wheels connected by flexible shafts*". Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 26, no. 4, pp. 469-476, 2014.

[4]. E. Tanaka, K. Muramatsu, K. Watanuki, S. Saegusa, and L. Yuge, "*Walking assistance apparatus enabled for neuro-rehabilitation of patients and its effectiveness*". Mechanical Engineering Letters, vol. 1, no. 0, pp. 15-00530, 2015.

[5]. H. F. N. Al-Shuka, B. Corves, and E. N. Abbas, "*Cascade position-torque control strategy based on function approximation technique (FAT) for flexible joint robots*". In AIP Conference Proceedings, vol. 2651, no. 1, Mar. 2023.

[6]. P. Korondi, H. Hashimoto, and V. Utkin, "*Direct torsion control of flexible shaft in an observer-based discrete-time sliding mode*". IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 2, pp. 291-296, 1998.

[7]. M. Salehian, S. Sattarzadeh, H. A. Talebi, M. Bayat, and A. Asehabi, "*Vibration suppression of a flexible shaft system using indirect adaptive control*". In 3rd International Conference on Control, Instrumentation, and Automation, pp. 301-306, 2014.

[8]. D. Rodriguez-Cianca, C. Rodriguez-Guerrero, T. Verstraten, R. Jimenez-Fabian, B. Vanderborght, and D. Lefeber, "*A flexible shaft-driven remote and torsionally compliant actuator (RTCA) for wearable robots*". Mechatronics, vol. 59, pp. 178-188, 2019.

THIẾT KẾ CỤM TẠO ẨM CHO BUỒNG THỬ NGHIỆM ĂN MÒN KHÍ SO_2 TRONG THIẾT BỊ BÁO CHÁY

DESIGN OF A HUMIDIFICATION MODULE FOR SO_2 CORROSION TEST CHAMBERS IN FIRE ALARM EQUIPMENT

Nguyễn Quý Hưng[1], Phan Hoàng Long[1, 2], Nguyễn Huy Hùng[4], Dương Văn Tú[1, 2, 3], Nguyễn Tấn Tiến[1, 2, 3]

[1]Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[2]DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[3]Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[4]Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế cụm tạo ẩm cho buồng thử nghiệm ăn mòn khí SO_2 nhằm duy trì độ ẩm theo tiêu chuẩn TCVN 7699-2-42. Hệ thống gồm bể nước inox 304, vỉ rung siêu âm, hộp chứa hơi, quạt cấp và cảm biến nhiệt độ - độ ẩm tại hộp và đường thoát. Bộ điều khiển ON-OFF điều chỉnh công suất vỉ rung dựa trên tín hiệu cảm biến. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy hệ thống đạt độ ẩm mục tiêu và duy trì ổn định, khẳng định tính khả thi của giải pháp.

Từ khóa: *TCVN 7699-2-42; QCVN 03:2023/BCA; ON-OFF; Điều khiển độ ẩm; Thiết bị báo cháy.*

ABSTRACT

This paper presents the design of a humidification module for SO_2 corrosion test chambers to maintain humidity in compliance with TCVN 7699-2-42. The system includes a stainless steel 304 water tank, an ultrasonic mist generator, a humidity box, a supply fan, and sensors at the box and outlet. An ON-OFF controller regulates mist generation based on sensor feedback. Simulation and experimental results show that the target humidity is reached within ~200 seconds and remains stable, confirming the feasibility of an independent humidification unit.

Keywords: *TCVN 7699-2-42; QCVN 03:2023/BCA; ON-OFF; Humidity control; Fire alarm equipment.*

1. TỔNG QUAN

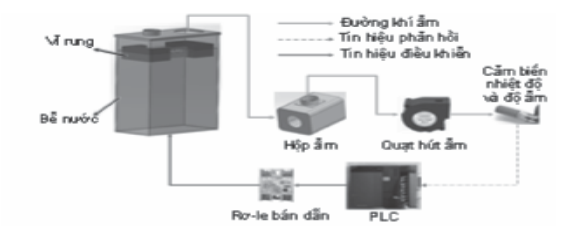
Khí SO_2 là một trong những chất ô nhiễm chính trong môi trường công nghiệp, phát sinh chủ yếu từ hoạt động đốt nhiên liệu hóa thạch và các quá trình luyện kim. Theo Cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa Kỳ (EPA), năm 2020 có đến 27% lượng SO_2 phát thải tại Hoa Kỳ đến từ các quy trình công nghiệp, phần lớn còn lại từ việc đốt than và dầu mỏ [1]. Vì vậy, thiết bị báo cháy trong môi trường công nghiệp cần được kiểm định khả năng chịu ăn mòn SO_2 theo TCVN 7699-2-42 [2] và QCVN 03:2023/BCA [3].

Các buồng thử nghiệm SO_2 hiện nay thường tích hợp điều khiển đồng thời nhiệt độ, độ ẩm và nồng độ khí bằng bộ điều khiển ON-OFF hoặc PID. Tuy nhiên, do tương tác chéo mạnh giữa các biến, việc duy trì ổn định cả ba thông số cùng lúc là rất phức tạp, ví dụ điều khiển độ ẩm có thể ảnh hưởng đến nhiệt độ và ngược lại [4].

Để khắc phục, nghiên cứu này đề xuất thiết kế cụm tạo ẩm riêng biệt, giúp ổn định nhiệt độ tại đường thoát hơi nhờ cơ chế hóa hơi lạnh của vỉ rung và duy trì độ ẩm theo TCVN 7699-2-42. Giải pháp này hướng đến nâng cao tính ổn định và độ chính xác trong kiểm định độ bền ăn mòn SO_2 của thiết bị báo cháy.

2. PHƯƠNG ÁN

2.1. Cấu tạo hệ thống



Hình 1. Sơ đồ bố trí cụm tạo ẩm

Cụm tạo ẩm được thiết kế bao gồm bốn thành phần chính (Hình 1):

- Bể chứa nước làm bằng thép không gỉ 304, đảm bảo độ bền và khả năng chống ăn mòn.
- Vỉ rung siêu âm để tạo sương ẩm từ nước trong bể.
- Hộp chứa hơi ẩm đóng vai trò buồng trung gian, nơi sương ẩm được tích tụ trước khi cấp vào buồng thử nghiệm.
- Quạt hút có nhiệm vụ đưa hơi ẩm từ hộp chứa vào buồng thử.

Để giám sát và điều khiển, hai cảm biến độ ẩm được bố trí: Một trong hộp chứa hơi và một tại đường thoát hơi. Tín hiệu từ cảm biến được đưa về bộ điều khiển để điều chỉnh công suất vỉ rung thông qua rơ-le bán dẫn. Cách bố trí này cho phép duy trì độ ẩm ổn định tại đường thoát hơi theo giá trị mong muốn, trước khi truyền vào buồng kiểm định ăn mòn SO_2.

2.2. Phương pháp

Hệ thống sử dụng bộ điều khiển ON-OFF để duy trì độ ẩm tại ngưỡng mong muốn theo yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 7699-2-42. Nguyên tắc điều khiển dựa trên sai lệch giữa giá trị độ ẩm đặt trước (setpoint) và giá trị đo được từ cảm biến đặt tại đường thoát hơi. Khi độ ẩm thấp hơn ngưỡng, vỉ rung siêu âm được kích hoạt để tạo thêm sương ẩm; ngược lại, khi độ ẩm vượt ngưỡng, vỉ rung sẽ được ngắt.

Để xây dựng mô hình điều khiển, nghiên cứu tiến hành nhận dạng thực nghiệm từ hệ thống cụm tạo ẩm đã chế tạo. Tín hiệu đầu vào là điện áp cấp cho vỉ rung (thay đổi trong khoảng công suất định mức), trong khi tín hiệu đầu ra là giá trị độ ẩm tương đối đo được tại đường thoát hơi. Mô hình thực nghiệm thu ☞

được đóng vai trò cơ sở cho thiết kế và kiểm chứng bộ điều khiển.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

3.1. Mô hình quá trình truyền hơi ẩm

Bảng 1. Định nghĩa các đại lượng trong mô hình

Ký hiệu	Ý nghĩa
ρ	Mật độ không khí trong hộp ẩm, kg/L
V	Thể tích của hộp ẩm, L
ω_n	Độ ẩm tuyệt đối trong hộp ẩm, g hơi nước/kg không khí khô
ω_c	Độ ẩm tuyệt đối ở đường khí vào, g hơi nước/kg không khí khô
F	Lưu lượng mà quạt hút không khí ẩm trong hộp ẩm ra ngoài, L/s
D_n	Lượng ẩm cung cấp bởi vỉ rung, g hơi nước/s
$P_{sat}(T)$	Áp suất bão hòa của hơi nước tại T°C, kPa
P_a	Áp suất riêng phần của không khí khô, kPa
ϕ_n	Độ ẩm tương đối trong hộp ẩm, %
ϕ_c	Độ ẩm tương đối ở đường khí vào, %
ϕ_o	Độ ẩm tương đối ở đường thoát khí, %
Q	Tín hiệu công suất đầu vào vỉ rung, %
θ_n	Hằng số độ trễ tại hộp ẩm
τ_n	Hằng số thời gian trong hộp ẩm
θ_c	Hằng số độ trễ tại đường khí vào
τ_c	Hằng số thời gian tại đường khí vào
K_c	Tham số khuếch đại tại đường khí vào
θ_o	Hằng số độ trễ tại đường thoát khí
τ_o	Hằng số thời gian tại đường thoát khí
K_o	Tham số khuếch đại tại đường thoát khí

Dựa theo [5], quá trình truyền hơi nước từ hộp ẩm ra bên ngoài được mô tả bởi phương trình cân bằng khối lượng hơi nước diễn ra trong hộp ẩm như sau:

$$\rho V \frac{d\omega_n(t)}{dt} = F\rho\omega_c + D_n - F\rho\omega_n \quad (1)$$

Từ (1), hàm truyền đạt thu được bằng cách biến đổi Laplace cho hai vế:

$$G_1(s) = \frac{\omega_n(s)}{\omega_c(s)} = \frac{1}{1 + \frac{V}{F}s} \quad (2)$$

Theo [6], độ ẩm tương đối và độ ẩm tuyệt đối trong hộp có mối liên hệ được thể hiện bởi phương trình:

$$\omega_n = \frac{0.622 \times \phi_n \times P_{sat}(T)}{P_a} \quad (3)$$

Trong điều kiện ổn định nhiệt độ tương ứng với nhiệt độ môi trường khoảng 26°C, hàm truyền mô tả quan hệ giữa độ ẩm tương đối tại đường cấp hơi và độ ẩm tương đối trong hộp có dạng là hàm bậc nhất với trễ thời gian:

$$G_1(s) = \frac{\phi_n(s)}{\phi_c(s)} = \frac{e^{-\theta_n s}}{1 + \tau_n s} \quad (4)$$

Với: $\tau_n = \frac{V}{F}$

Hàm truyền mô tả quan hệ giữa công suất cấp vào vỉ rung và độ ẩm tương đối tại đường khí vào là:

$$G_2(s) = \frac{\phi_c(s)}{Q(s)} = \frac{K_c e^{-\theta_c s}}{1 + \tau_c s} \quad (5)$$

Hàm truyền mô tả quan hệ giữa độ ẩm tương đối trong hộp ẩm và độ ẩm tương đối tại đường thoát khí là:

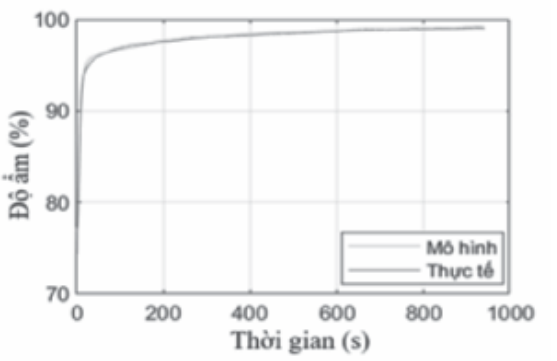
$$G_3(s) = \frac{\phi_o(s)}{\phi_n(s)} = \frac{K_o e^{-\theta_o s}}{1 + \tau_o s} \quad (6)$$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

3.2. Hàm truyền thực nghiệm

Hàm truyền thực nghiệm của hệ thống tạo ẩm được xây dựng dựa trên mô hình thực tế. Đầu vào là xung điện áp cấp cho vỉ rung được điều chỉnh trong khoảng 0 ÷ 48V (tương ứng với 0 ÷ 100% công suất) và đầu ra là giá trị độ ẩm tương đối ϕ_o (%) tại đường thoát hơi.

Trước tiên, quạt được bật ở điện áp không đổi, giá trị ổn định của ϕ_o được ghi lại. Sau đó, vỉ rung được bật 100% công suất và giá trị độ ẩm tại đường thoát được ghi lại mỗi giây. Dùng MATLAB Identification Toolbox để nhận diện hàm truyền giữa độ ẩm đầu ra và công suất cấp vào vỉ rung.



Hình 2. Đường đặc tính của độ ẩm

Hình 2 thể hiện đường đặc tính của độ ẩm tại đường thoát hơi trong suốt quá trình vỉ rung được cấp 100% công suất.

Hàm truyền diễn tả mối quan hệ giữa độ ẩm tương đối tại đường thoát hơi của cụm tạo ẩm với công suất cung cấp cho vỉ rung là một hàm bậc ba có trễ thời gian được nhận diện từ MATLAB với độ ăn khớp dữ liệu đạt 90% như sau:

$$G(s) = \frac{\phi_o(s)}{Q(s)} = \frac{0.21731e^{-1.443s}}{(1 + 217.51s)(1 + 5.09s)(1 + 0.19s)} \quad (7)$$

3.3. Thiết kế bộ điều khiển ON-OFF

Sai số độ ẩm:

$$e(t) = \phi_{o,ref}(t) - \phi_o(t) \quad (8)$$

với, $\phi_{o,ref}$ là độ ẩm tương đối mong muốn (%); ϕ_o là độ ẩm tương đối (%).

Tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển chỉ có hai giá trị như sau:

$$u(t) = \begin{cases} u_{max} \text{ khi } e \geq 0 \\ u_{min} \text{ khi } e < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó, u_{max} là tín hiệu điện áp điều khiển lớn nhất do PLC xuất ra, tương ứng với 12V và u_{min} là tín hiệu điện áp điều khiển nhỏ nhất, tương ứng với 0V.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

4.1. Mục tiêu đánh giá

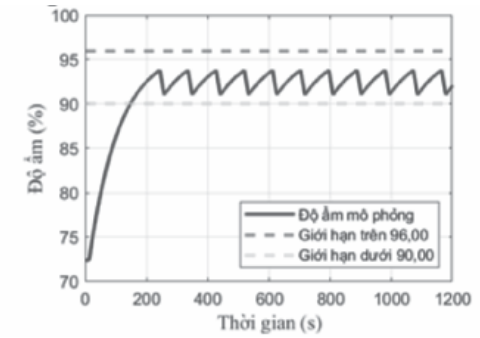
Mô phỏng được thực hiện để kiểm tra khả năng duy trì độ ẩm tương đối trong ngưỡng mong muốn (93 ± 3%) theo TCVN 7699-2-42 tại đường thoát hơi với bộ điều khiển ON-OFF. Do đó, tiêu chí đánh giá chủ yếu là sự ổn định của độ ẩm tương đối trong ngưỡng sai số cho phép ±Δϕ.

4.2. Tham số mô phỏng

Điều kiện ban đầu:

- Nhiệt độ môi trường 25 ÷ 26°C;
- Độ ẩm ổn định trong khi quạt đang hút là 72.4%;
- Thời gian 1200s, bước thời gian 1s.

4.3. Kết quả mô phỏng



Hình 3. Đáp ứng độ ẩm tương đối dưới tác động của điều khiển ON-OFF

Kết quả mô phỏng từ hình 3 cho thấy:

- Độ ẩm tại đường thoát hơi tăng nhanh, đạt ngưỡng mục tiêu sau khoảng gần 200s;

- Sau khi đã đạt ngưỡng yêu cầu, độ ẩm có dao động trong vùng ±Δϕ, tuy nhiên vẫn nằm trong khoảng giá trị cho phép.

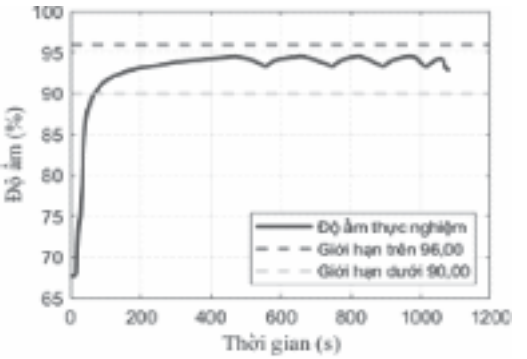
4.4. Kết quả thực nghiệm

Hình 4 thể hiện một cụm tạo ẩm thực tế được xây dựng để kiểm tra kết quả duy trì độ ẩm tại đường thoát hơi của bộ điều khiển ON-OFF.



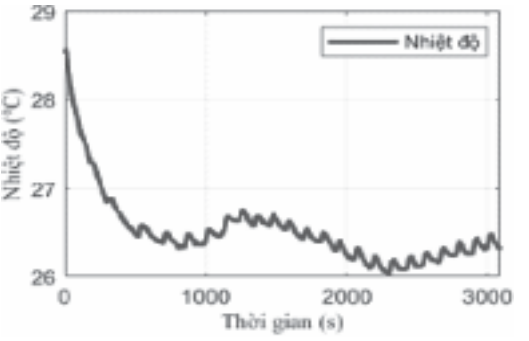
Hình 4. Cụm tạo ẩm

Cụm tạo ẩm được thực nghiệm trong điều kiện ổn định nhiệt độ tại 25 ÷ 26°C trong thời gian 20 phút. Với độ ẩm ban đầu của môi trường khoảng 68%, giá trị điểm đặt mong muốn của độ ẩm đầu ra đã đạt được trong khoảng 200 giây, và duy trì quanh ngưỡng (93 ± 3%) trong suốt thời gian sau đó, được thể hiện ở hình 5.



Hình 5. Thực nghiệm độ ẩm tại đường thoát hơi

Trong quá trình điều khiển độ ẩm, biến nhiệt độ luôn được ổn định nhờ sự hóa hơi lạnh của vỉ rung. Hình 6 cho thấy ổn định nhiệt độ luôn đạt giá trị trong ngưỡng yêu cầu của TCVN 7699-2-42.



Hình 6. Đồ thị ổn định nhiệt độ

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày thiết kế và chế tạo cụm tạo ẩm độc lập cho buồng thử nghiệm ăn mòn khí SO_2 trong thiết bị báo cháy, tuân theo yêu cầu của TCVN 7699-2-42. Mô hình truyền khối hơi nước được xây dựng và bộ điều khiển ON-OFF đơn giản đã được áp dụng để duy trì độ ẩm đầu ra.

Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy hệ thống đạt được giá trị độ ẩm mục tiêu sau khoảng 200 giây và duy trì ổn định trong giới hạn cho phép. Ngoài ra, nhiệt độ tại đường thoát hơi luôn ổn định nhờ cơ chế hóa hơi của vỉ rung siêu âm. Những kết quả này khẳng định tính khả thi của giải pháp, góp phần nâng cao độ chính xác và độ tin cậy của buồng kiểm định khả năng chịu ăn mòn SO_2 của các thiết bị báo cháy.

Hướng nghiên cứu tiếp theo: Phát triển bộ điều khiển nâng cao hơn, có khả năng thích nghi với sự thay đổi nhiệt độ môi trường để điều chỉnh độ ẩm tương ứng.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **06/8/2025**
Ngày phản biện: **27/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. U.S. EPA., "*Overview of Sulfur Dioxide (SO_2) Air Quality in the United States*". U.S. Environmental Protection Agency, pp. 3, Aug. 2024. [Online]. Available: www.epa.gov

[2]. TCVN 7699-2-42:2014, "*Thử nghiệm môi trường – Phần 2-42: Các thử nghiệm - Thử nghiệm Kc: Thử nghiệm bằng lưu huỳnh đioxit đối với các tiếp điểm và mối nối*". Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, 2014.

[3]. QCVN 03:2023/BCA, "*Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về phương tiện phòng cháy và chữa cháy*". Bộ Công an, Việt Nam, 2023.

[4]. Y. Mitani, R. Ishida, and K. Baba, "*Design of Temperature and Humidity Control System for Environmental Testing Apparatus*". In The 11th International Conference on Industrial Application Engineering 2023 (ICIAE2023), pp. 1-2, Mar. 2023, doi: 10.12792/iciae2023.018.

[5]. M. Matamoros et al., "*Temperature and Humidity PID Controller for a Bioprinter Atmospheric Enclosure System*". Micromachines, vol. 11, no. 11, art. 999, pp. 5-6, Nov. 2020, doi: 10.3390/mi11110999.

[6]. Y. A. Çengel, M. A. Boles, and M. Kanoğlu, "*Gas-Vapour Mixtures and Air-Conditioning*". In Thermodynamics: An Engineering Approach, 10th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2023, ch. 15, pp. 679-681.

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ THIẾT BỊ KIỂM ĐỊNH ĐỘ CHỊU ĂN MÒN SULFUA DIOXIT CHO SPRINKLER THEO 6305-1:2007

STUDY ON DESIGN OF A CORROSION TESTING APPARATUS FOR SULFUR DIOXIDE RESISTANCE OF SPRINKLER UNDER TCVN 6305-1:2007

Phan Hoàng Long[1, 2], Nguyễn Hữu Nhân[1], Nguyễn Huy Hùng[4], Dương Văn Tú[1, 2, 3], Nguyễn Tấn Tiến[1, 2, 3]

[1]Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[2]DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[3]Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[4]Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế thiết bị kiểm định độ chịu ăn mòn của đầu phun chữa cháy (sprinkler) trong môi trường khí SO_2 theo TCVN 6305-1:2007. Thiết bị gồm bể thủy tinh borosilicate, chi tiết tiếp xúc SO_2 bằng teflon, khung thép không gỉ, và hệ thống gia nhiệt đèn halogen được giám sát kép trong buồng thử và tại nguồn. Trên cơ sở mô hình truyền nhiệt bậc nhất có tổn thất, cấu trúc điều khiển cascade kết hợp bộ điều khiển trượt được áp dụng để duy trì nhiệt độ ổn định. Mô phỏng cho thấy hệ thống đạt nhanh điểm đặt, ổn định trong dải yêu cầu, đáp ứng điều kiện khắc nghiệt và phù hợp để tự động hóa.

Từ khóa: *Đầu phun chữa cháy; Sulfua dioxit; TCVN 6305-1:2007; Điều khiển trượt; Kiểm định tự động.*

ABSTRACT

This paper presents the design of a corrosion testing apparatus for fire sprinklers in a sulfur dioxide (SO_2) environment in compliance with TCVN 6305-1:2007. The apparatus consists of a borosilicate glass chamber, SO_2-exposed parts made of Teflon, a stainless steel frame, and a halogen heating system with dual temperature monitoring-inside the test chamber and at the heating source. Based on a first-order heat-transfer model with losses, a cascade control structure combined with a sliding-mode controller is applied to maintain stable temperature. Simulation results show that the system rapidly reaches the setpoint and remains within the required tolerance range, meeting stringent testing conditions and being suitable for automation.

Keywords: *Fire sprinkler; Sulfur dioxide; TCVN 6305-1:2007; Sliding mode control; Automated testing.*

1. TỔNG QUAN

Đầu phun chữa cháy (sprinkler) là một trong những thiết bị phòng cháy chữa cháy (PCCC) quan trọng, có khả năng kích hoạt sớm nhằm kiểm soát và dập tắt đám cháy ngay từ giai đoạn đầu, hạn chế tối đa thiệt hại về người và tài sản. Tại Việt Nam, trước khi được lắp đặt và đưa vào sử dụng, sprinkler bắt buộc phải đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật quy định trong QCVN 03:2021/BCA và TCVN 6305-1:2007.

Các yêu cầu và quy trình thử nghiệm tương ứng đã được hệ thống hóa trong các nghiên cứu [1], [2]. Trong đó, [2] đề xuất phương pháp phân nhóm các bài kiểm tra dựa trên đặc tính hóa – lý và sự tương đồng về quy trình thực hiện. Nhóm 4 gồm bốn phép thử:

(6) Nhiệt độ làm việc của sprinkler;
(7) Khả năng chịu nhiệt của bầu thủy tinh;
(8) Sốc nhiệt;
(14) Độ chịu ăn mòn bởi khí sulfua dioxit (SO_2).

Trong các phép thử này, bài kiểm tra (14) đòi hỏi yêu cầu kỹ thuật khắt khe hơn cả, không chỉ về điều kiện môi trường thử nghiệm (độ ẩm và khí SO_2 ở nhiệt độ được điều khiển chính xác) mà còn về thời gian duy trì liên tục (từ 24 đến 48 giờ), dài hơn đáng kể so với ba phép thử còn lại (thường dưới 1 giờ). Do đó, một thiết bị kiểm định được thiết kế đáp ứng yêu cầu của bài kiểm tra (14) hoàn toàn có thể sử dụng để thực hiện các phép thử khác trong nhóm, vừa đảm bảo tính chính xác vừa nâng cao hiệu quả vận hành.

Thực tế cho thấy, trong các môi trường khắc nghiệt như nhà máy hóa chất hoặc kho chứa vật liệu dễ cháy, sự hiện diện của khí SO_2 kết hợp với độ ẩm cao có thể tạo thành dung dịch axit yếu, gây ăn mòn dần các chi tiết kim loại của sprinkler. Hiện tượng này làm suy giảm hiệu suất hoạt động và có thể dẫn tới hỏng hóc, làm chậm hoặc mất khả năng kích hoạt khi có cháy. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết phải kiểm định và đánh giá độ chịu ăn mòn của sprinkler theo tiêu chuẩn trước khi lắp đặt, cũng như trong quá trình khai thác.

Xuất phát từ yêu cầu thực tiễn đó và định hướng thúc đẩy tự động hóa trong kiểm định PCCC, bài báo này đề xuất phương án thiết kế một thiết bị kiểm định độ chịu ăn mòn bởi khí SO_2 cho sprinkler. Thiết bị vừa đảm bảo đáp ứng đầy đủ các tiêu chuẩn kỹ thuật của TCVN 6305-1:2007, vừa có khả năng mở rộng để thực hiện các phép thử khác thuộc cùng nhóm, góp phần nâng cao độ tin cậy, an toàn và hiệu quả trong công tác kiểm định thiết bị PCCC.

2. PHƯƠNG ÁN

Mặc dù các thông số kỹ thuật và cấu trúc cơ khí của bể kiểm nghiệm đã được xác định rõ ràng dựa trên yêu cầu của TCVN 6305-1:2007, thách thức chính trong thiết kế là đảm bảo duy trì ổn định nhiệt độ bên trong buồng thử ở mức quy định trong suốt thời gian kiểm định.

Trong cấu hình đề xuất, bộ phận gia nhiệt được đặt ngoài không khí và truyền nhiệt gián tiếp vào buồng thử thông qua thành bể thủy tinh và lớp dung dịch muối. Do đó, tốc độ gia nhiệt của nguồn nhiệt cao hơn đáng kể so với tốc độ tăng nhiệt của không khí bên trong buồng. Quá trình truyền nhiệt diễn ra theo nhiều giai đoạn:

- Nhiệt bức xạ từ đèn halogen truyền vào thành bể thủy tinh; ☞

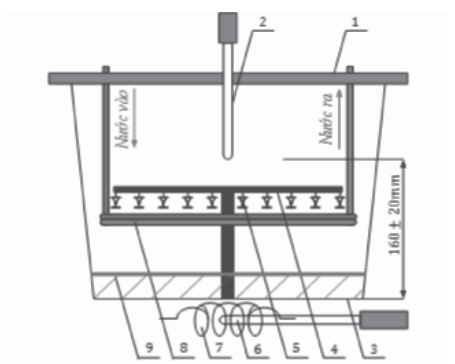
- Nhiệt lan truyền qua dung dịch muối;
- Nhiệt đối lưu từ dung dịch sang không khí bên trong bể thử.

Hiệu suất truyền nhiệt bị giới hạn bởi:

- Độ dẫn nhiệt thấp của chất lỏng;
- Đối lưu tự nhiên kém trong môi trường không khí tĩnh;
- Tổn thất nhiệt lớn qua thành bể thủy tinh (do không có lớp cách nhiệt nhằm phục vụ quan sát).

Các yếu tố này khiến quá trình gia nhiệt trở nên chậm và khó ổn định, gây khó khăn trong việc đạt và giữ nhiệt độ mục tiêu trong thời gian dài.

*Giải pháp khắc phục: Nhằm khắc phục hiện tượng chênh lệch lớn giữa tốc độ gia nhiệt của nguồn và tốc độ tăng nhiệt trong buồng thử, nhóm tác giả đề xuất tích hợp thêm cảm biến nhiệt độ tại bộ phận gia nhiệt. Cảm biến này có vai trò giám sát và giới hạn nhiệt độ tại nguồn, đảm bảo không vượt quá ngưỡng an toàn trong suốt quá trình vận hành.



Hình 1. Phương án thiết kế bể kiểm định SO_2 cho sprinkler theo TCVN 6305-1:
1 - Nắp bể; 2 - Cảm biến nhiệt độ trong bể;
3 - Bể thủy tinh; 4 - Gá đỡ sprinkler; 5 - Sprinkler;
6 - Cảm biến nhiệt độ tại bộ gia nhiệt;
7 - Bộ gia nhiệt; 8 - Ống sinh hàn;
9 - Dung dịch muối $Na_2S_2O_3$.

Giải pháp này đặc biệt quan trọng vì nhiệt độ đèn halogen có thể tăng lên hàng trăm °C chỉ sau vài phút nếu hoạt động liên tục, trong khi nhiệt độ bên trong buồng thử tăng chậm do quán tính nhiệt lớn. Nếu không kiểm soát, tình trạng quá nhiệt cục bộ có thể xảy ra, làm giảm tuổi thọ hoặc gây hỏng hóc thành bể thủy tinh, thậm chí dẫn tới nứt vỡ, gián đoạn quá trình kiểm nghiệm.

Như vậy, việc bổ sung cảm biến tại vị trí gia nhiệt không chỉ bảo vệ an toàn cho thiết bị mà còn giúp duy trì quá trình gia nhiệt hiệu quả, ổn định, đáp ứng yêu cầu nghiêm ngặt của tiêu chuẩn.

3. THIẾT KẾ CƠ KHÍ

Thiết kế cơ khí của bể kiểm nghiệm SO_2 được xây dựng dựa trên các yêu cầu kỹ thuật của TCVN 6305-1:2007, đảm bảo khả năng vận hành an toàn và đáp ứng các bài kiểm tra độ chịu ăn mòn của sprinkler trong môi trường khí SO_2.

3.1. Cấu tạo bể kiểm nghiệm

Thân bể được chế tạo từ thủy tinh borosilicate, có khả năng chịu nhiệt độ đến 500°C, hệ số giãn nở nhiệt thấp và khả năng chịu sốc nhiệt tốt. Vật liệu này cho phép quan sát trực tiếp bên trong bể trong quá trình kiểm nghiệm, đồng thời bảo đảm độ bền cơ học và tính ổn định khi chịu tác động nhiệt.

Các chi tiết tiếp xúc trực tiếp với khí SO_2 như nắp bể, tấm gá và nắp đậy sprinkler được làm từ Teflon do đặc tính chịu nhiệt cao, kháng hóa chất tốt và không phản ứng với môi trường thử nghiệm. Khung đỡ, chốt khóa và ống sinh hàn được chế tạo từ thép không gỉ 304 nhằm bảo đảm độ bền cơ học, chống ăn mòn và đáp ứng điều kiện vận hành dài hạn.

3.2. Kết cấu tổng thể

Bể kiểm nghiệm và tủ điều khiển được bố trí đồng bộ trên cùng một khung đế bằng thép sơn tĩnh điện, đảm bảo tính ổn định, thuận tiện khi di chuyển và giảm độ phức tạp trong lắp đặt. Cách bố trí này cũng giúp rút ngắn đường kết nối tín hiệu và nguồn, nâng cao độ tin cậy vận hành.

3.3. Hỗ trợ tự động hóa

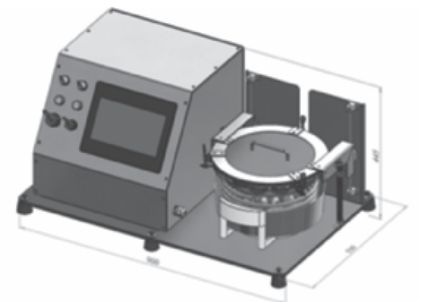
Hệ thống được tích hợp các cơ cấu hỗ trợ thao tác tự động, bao gồm:

- Cơ cấu đóng/mở nắp bể bằng tay quay hoặc cơ cấu nâng hạ tự động;
- Van xả dung dịch muối sau khi hoàn tất thử nghiệm;
- Các gá lắp tháo nhanh để thay thế hoặc kiểm tra sprinkler.

Những cải tiến này giúp giảm thời gian thao tác, nâng cao hiệu suất và hướng tới mục tiêu tự động hóa toàn bộ quy trình kiểm định.

3.4. Minh họa thiết kế

Hình 2 trình bày thiết kế tổng thể của hệ thống, bao gồm khung đỡ, tủ điều khiển và bể kiểm nghiệm, cho thấy cách bố trí đồng bộ và gọn gàng.



Hình 2. Thiết kế tổng thể hệ thống kiểm định độ chịu ăn mòn SO_2 cho sprinkler.

4. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

4.1. Mô hình quá trình truyền nhiệt

Bảng 1. Bảng định nghĩa mô hình hóa hệ thống

Ký hiệu	Ý nghĩa
T	Nhiệt độ trung bình của không khí trong bể thử, °C
m_{air}	Khối lượng hỗn hợp khí bên trong bể thử, Kg
c_p	Nhiệt dung riêng của hỗn hợp khí bên trong bể thử, $JKg^{-1}K^{-1}$
Q_{in}	Công suất gia nhiệt do đèn nhiệt cấp cho bể thử, W
Q_{conv}	Tổn thất nhiệt do đối lưu qua thành bể, W
h_{conv}	Hệ số truyền nhiệt đối lưu, $Wm^{-2}K^{-1}$
A	Diện tích bề mặt trao đổi nhiệt, m^2
T_{amb}	Nhiệt độ môi trường bên ngoài, °C
Q_{rad}	Tổn thất bức xạ nhiệt giữa bể và môi trường, W
ε	Hệ số bức xạ của vật liệu thành bể, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ $(Wm^{-2}K^{-4})$ là hằng số Stefan Boltzmann.
Q	Tín hiệu công suất đầu vào, kW
T_h	Nhiệt độ tại cảm biến nguồn, °C
K_H	Tham số khuếch đại tại nguồn
τ_h	Hằng số thời gian tại nguồn
τ_{0h}	Hằng số độ trễ tại nguồn
T_c	Nhiệt đầu ra tại cảm biến bể, °C
K_C	Tham số khuếch đại tại đầu ra
τ_C	Hằng số thời gian tại đầu ra
τ_{0C}	Hằng số độ trễ tại đầu ra

Quá trình truyền và mất nhiệt của bể kiểm nghiệm được mô tả bởi phương trình cân bằng năng lượng:

$$m_{air} cp \frac{dT(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{conv}(t) - Q_{rad}(t) \quad (1)$$

$$Q_{conv}(t) = h_{conv}A(T(t) - T_{amb}) \quad (2)$$

$$Q_{rad}(t) = \varepsilon\sigma A(T(t)^4 - T_{amb}^4) \quad (3)$$

4.2. Mô hình hóa hệ thống

Kết quả thí nghiệm đáp ứng bậc (step response) tại cả hai điểm đo – cảm biến nguồn (đèn halogen) và cảm biến bể – cho phép xấp xỉ hệ thống dưới dạng hàm truyền bậc nhất có trễ thời gian:

$$G(s) = \frac{T_h(s)}{Q(s)} = \frac{K_h e^{-t_{0h}s}}{1 + \tau_h s} \quad (4)$$

Dữ liệu đáp ứng thay đổi từ T_h đến T_c được dùng để ước lượng:

$$\frac{T_c(s)}{T_h(s)} = \frac{K_c e^{-t_{0c}s}}{1 + \tau_c s} \quad (5)$$

Để thuận tiện tính toán, độ trễ của mỗi vòng được thế bằng xấp xỉ Pade bậc 1:

$$e^{-t_0 s} \approx \frac{1 - 0{,}5t_0 s}{1 + 0{,}5t_0 s} \quad (6)$$

4.3. Cấu trúc điều khiển

Do sự khác biệt lớn về động học giữa nguồn nhiệt và nhiệt độ bể, hệ thống sử dụng cấu trúc điều khiển cascade hai vòng:

Vòng trong bù trừ nhiệt của đèn halogen, điều khiển sai số $e_i = T^*_h - T_h$ để ra được tín hiệu Q.

Vòng ngoài dùng tham chiếu $T_{c,ref}$, so sánh với T_c để sinh ra T^*_h, giúp đảm bảo độ chính xác nhiệt độ bể.

4.4. Thiết kế bộ điều khiển trượt

Để nâng cao khả năng kháng nhiễu và giảm ảnh hưởng của biến động tải, vòng ngoài được thiết kế bằng luật điều khiển trượt.

Sai số bám:

$$e(t) = T_{c,ref}(t) - T_c(t) \quad (7)$$

Chọn hàm mặt trượt có dạng:

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \quad (8)$$

Trong đó, hệ số $c > 0$ được xác định để hàm đặc trưng của mặt trượt là Hurwitz.

$$c = \frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau} \quad (9)$$

Chọn luật tiếp cận tuyến tính:

$$\dot{s}(t) = -k\,sgn(s(t)) - \eta s(t) \quad (10)$$

Với $k > 0$ điều khiển tốc độ hội tụ và $\eta > 0$ hạn chế dao động khi s đủ nhỏ.

Kết hợp luật điều khiển (8) và (10) với mô hình (5), (6), ta có luật điều khiển:

$$u(t) = u_{eq}(t) - \frac{1}{b}[k\,sgn(s(t)) + \eta s(t)] \quad (11)$$

Trong đó, $u_{eq}(t)$ tìm được bằng cách đặt $\dot{s} = 0$ và giải ngược $G_{pade}(s)$; b là hệ số khuếch đại của tín hiệu đầu vào.

5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

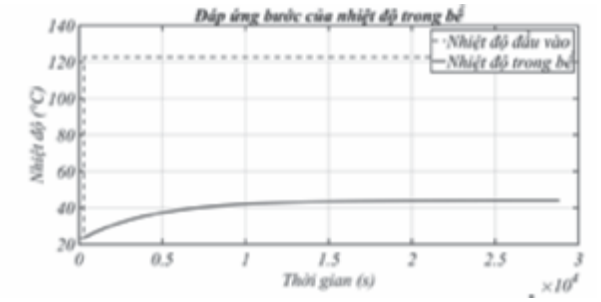
5.1. Mục tiêu đánh giá

Các mô phỏng được thực hiện nhằm kiểm chứng khả năng đáp ứng của hệ thống điều khiển nhiệt độ bể kiểm nghiệm SO_2 khi áp dụng cấu trúc điều khiển cascade kết hợp bộ điều khiển trượt (SMC) ở vòng ngoài. Các tiêu chí đánh giá gồm:

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

- Thời gian đạt nhiệt độ mục tiêu T_{ref};
- Mức độ ổn định nhiệt độ trong vùng sai số cho phép ±ΔT;
- Khả năng kháng nhiễu khi tải nhiệt thay đổi hoặc môi trường xung quanh biến động.

Từ số liệu nhiệt độ đáp ứng bước của bể, ta tính được hàm truyền của hệ như sau:



Hình 3. Đáp ứng bước của hệ thống

$$G(s) = \frac{T_h(s)}{Q(s)} = \frac{1{,}92}{1 + 150s} \qquad (12)$$

5.2. Cấu hình mô phỏng

Điều kiện ban đầu: Nhiệt độ môi trường 25°C.

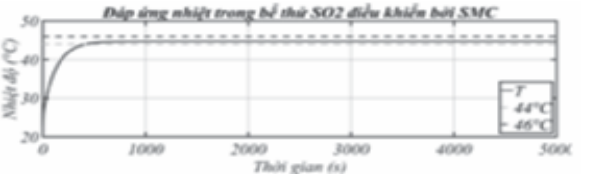
- Nhiệt độ đặt: T_{ref} = 25°C ÷ 150°C (theo TCVN 6305-1:2007).

- Thời gian mô phỏng: 5000s, bước thời gian 1s.

Bộ điều khiển: (i) Vòng trong: PID điều khiển nhiệt độ nguồn (đèn halogen); (ii) Vòng ngoài: SMC điều khiển nhiệt độ bể.

Thông số SMC: k = 300; λ = 0,2; ϕ = 0,03 (hiệu chỉnh qua thử nghiệm mô phỏng).

5.3. Kết quả mô phỏng



Hình 4. Mô phỏng đáp ứng nhiệt trong bể SO_2 điều khiển bởi bộ điều khiển mặt trượt với thời gian mô phỏng 5000 giây

Kết quả cho thấy:

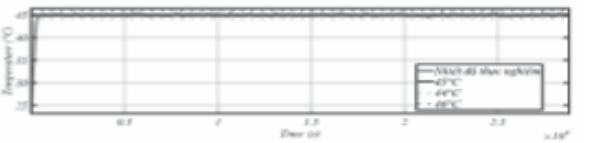
- Nhiệt độ bể tăng nhanh, đạt giá trị mục tiêu sau khoảng 500s;
- Sau khi đạt điểm đặt, nhiệt độ duy trì ổn định trong vùng ±ΔT, không xuất hiện dao động đáng kể;
- Hệ thống phản ứng tốt với nhiễu mô phỏng (thay đổi tải nhiệt 10% và dao động nhiệt môi trường ±2°C).

5.4. Kết quả thực nghiệm

Một máy kiểm định được chế tạo dựa theo thiết kế đề ra được thực hiện để kiểm tra tính khả thi của phương án.



Hình 5. Hệ thống kiểm nghiệm độ ăn mòn SO_2 cho sprinkler theo TCVN 6305-1:2007



Hình 6. Nhiệt độ thực nghiệm với bể SO_2

Một thực nghiệm được thực hiện với nhiệt độ mong 45°C bằng bể kiểm nghiệm SO_2 trong thời gian khoảng 8 giờ. Kết quả thực nghiệm cho thấy nhiệt độ đạt được mức mong muốn trong khoảng 375 giây, nhiệt độ được duy trì ổn định trong khoảng 45 ± 1°C trong suốt thời gian sau đó, hoàn toàn đáp ứng nhu cầu kiểm nghiệm theo TCVN 6305-1:2007.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất và thiết kế thiết bị kiểm định độ chịu ăn mòn SO_2 cho sprinkler theo TCVN 6305-1:2007, xây dựng mô hình truyền nhiệt bậc nhất có tổn thất và kiến trúc điều khiển cascade với SMC. Mô phỏng/ thử nghiệm ban đầu cho thấy hệ đạt nhiệt độ đặt khoảng 500s, duy trì ổn định trong dải ±ΔT và vận hành an toàn tại nguồn gia nhiệt. Giải pháp đáp ứng yêu cầu bài thử (14) và có thể mở rộng sang các phép thử cùng nhóm. Hướng tới: Hoàn thiện nguyên mẫu quy mô thực, tích hợp thị giác máy tính và tối ưu hóa năng lượng/ thời gian kiểm định.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **06/8/2025**
Ngày phản biện: **22/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Hữu Nhân, Phan Hoàng Long, Dương Văn Tú, Nguyễn Huy Hùng, Nguyễn Tấn Tiến, "*Study on automation of sprinkler testing system part 1 – Study on assessment criteria of TCVN 6350-1:2007*". Vietnam Mechanical Engineering Journal, Tập 309, tr. 162-167, 2023.

[2]. Nguyễn Hữu Nhân, Phan Hoàng Long, Dương Văn Tú, Nguyễn Huy Hùng, Nguyễn Tấn Tiến, "*Study on automation of sprinkler testing system part 2 – Proposed solution of auto sprinkler testing*". Vietnam Mechanical Engineering Journal, Tập 309, tr. 187-192, 2023.

[3]. TCVN 6305-1:2007, "*Phòng cháy chữa cháy – Hệ thống sprinkler tự động – Phần 1: Yêu cầu và phương pháp thử đối với sprinkler*". Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, 2007.

[4]. QCVN 03:2021/BCA, "*Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về phương tiện phòng cháy và chữa cháy*". Bộ Công an, Việt Nam, 2021.

[5]. Nguyễn Huy Hùng, Dương Chí Tuấn, Phan Hoàng Long, Nguyễn Trọng Trung, Dương Văn Tú, Nguyễn Tấn Tiến, "*Model identification of gas-fired industrial furnace*". The 7th International Conference on Advanced Engineering – Theory and Applications 2022 (AETA2022), tr. 42-51, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam, 12-2022.

[6]. Nguyễn Quốc Bảo, Hồ Hải Đăng, Nguyễn Đức Tài, Dương Văn Tú, Nguyễn Huy Hùng, Nguyễn Tấn Tiến, "*Design and Calibration of Multi-Channel Thermocouple Signal Converter*". 2023 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE), tr. 1-6, 2023.

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG KIỂM ĐỊNH CÔNG SUẤT BÌNH CHỮA CHÁY XÁCH TAY

STUDY ON DESIGN OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR TESTING THE CAPACITY OF PORTABLE FIRE EXTINGUISHERS

Nguyễn Hữu Cường Thịnh[1], Phan Hoàng Long[1, 2, 3], Nguyễn Huy Hùng[4], Dương Văn Tú[1, 2, 3], Nguyễn Tấn Tiến[1, 2, 3]

[1]Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[2]DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[3]Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[4]Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày giải pháp thiết kế và chế tạo hệ thống robot tự động kiểm định công suất bình chữa cháy xách tay nhằm thay thế quy trình thủ công tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn cho người vận hành. Hệ thống robot được đề xuất có 5 bậc tự do, gồm 3 bậc định vị và 2 bậc định hướng vòi phun, sử dụng cơ cấu tay máy tọa độ trụ kết hợp đế di chuyển trên đường ray để đảm bảo tốc độ và quỹ đạo dập lửa ổn định. Kiến trúc điều khiển phân tán gồm bộ điều khiển trung tâm và các driver servo AC tích hợp điều khiển vòng kín PID, cho phép định vị vòi chính xác và điều chỉnh tốc độ phun linh hoạt. Hệ thống đáp ứng yêu cầu kiểm định theo tiêu chuẩn TCVN 7026:2013 đối với đám cháy loại A và B, đảm bảo độ chính xác, tăng tốc độ thao tác, giảm rủi ro, và nâng cao hiệu quả kiểm định.

Từ khóa: *Robot kiểm định bình chữa cháy; Tự động hóa kiểm định; Tiêu chuẩn TCVN 7026:2013.*

ABSTRACT

This paper presents the design and development of an automated robotic system for testing the capacity of portable fire extinguishers, replacing the hazardous manual process and improving operator safety. The proposed system features 5 degrees of freedom, consisting of 3 for nozzle positioning and 2 for nozzle orientation, utilizing a cylindrical-coordinate robotic arm combined with a rail-guided mobile base to ensure stable extinguishing trajectories and high-speed operation. The distributed control architecture comprises a central controller and AC servo drivers with integrated closed-loop PID control, enabling precise nozzle positioning and flexible spray speed adjustment. The system meets the testing requirements of TCVN 7026:2013 for Class A and Class B fires, ensuring accuracy, improved operation speed, reduced risk, and enhanced testing efficiency.

Keywords: *Fire extinguisher testing robot; Automated testing; TCVN 7026:2013 standard.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cháy là một trong những tai nạn nguy hiểm nhất, gây thiệt hại nghiêm trọng về người và tài sản. Theo thống kê của Báo Nhân dân, số vụ cháy tại hộ gia đình chiếm tỷ lệ đáng kể [1]. Do đó, việc trang bị và kiểm định định kỳ bình chữa cháy đạt chuẩn là yêu cầu bắt buộc để đảm bảo an toàn.

Bình chữa cháy xách tay được phân loại theo chất chữa cháy thành bột khô, khí, gốc nước và chất chữa cháy sạch. Theo TCVN 7026:2013 [2], để được chứng nhận đạt chuẩn, bình phải vượt qua nhiều phép thử, trong đó phép thử công suất dập tắt đám cháy loại A (chất rắn tạo than hồng) và loại B (chất lỏng) là quan trọng và nguy hiểm nhất. Quy trình này đòi hỏi người thực hiện phải tiếp cận gần ngọn lửa ở nhiệt độ cao, khói và khí độc, tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn.

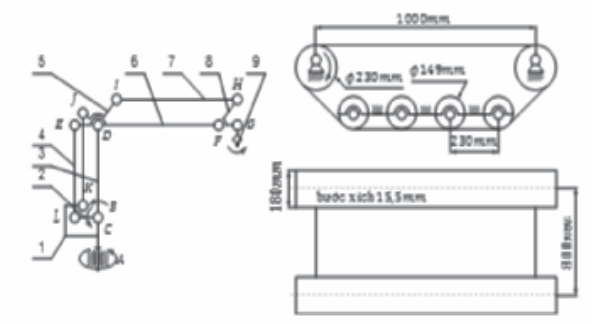
Phương pháp kiểm định hiện hành áp dụng kỹ thuật "dập và tiến" (progressive extinguishing), kết hợp điều chỉnh hướng phun để bao phủ toàn bộ đám cháy. Mặc dù phản ánh được điều kiện thực tế, cách làm thủ công này khó đảm bảo tính lặp lại và độ chính xác, đồng thời ảnh hưởng đến sức khỏe và an toàn người kiểm định.

Vì vậy, việc nghiên cứu và phát triển giải pháp tự động hóa quy trình kiểm định công suất bình chữa cháy xách tay là cần thiết, nhằm giảm rủi ro, nâng cao hiệu suất và bảo đảm kết quả kiểm định ổn định, phù hợp tiêu chuẩn TCVN 7026:2013.

2. TỔNG QUAN

Theo TCVN 7026:2013 [1], bình chữa cháy xách tay phải trải qua quy trình kiểm định nghiêm ngặt trước khi được đưa ra thị trường, nhằm đảm bảo khả năng làm việc và an toàn vận hành. Trong đó, phép thử công suất đối với đám cháy loại A và B là quan trọng nhất nhưng tiềm ẩn nhiều nguy hiểm cho người thực hiện, do yêu cầu tiếp cận gần nguồn lửa ở nhiệt độ cao, khói và khí độc. Điều này cho thấy nhu cầu cấp thiết về việc tự động hóa quy trình kiểm định để giảm rủi ro và nâng cao hiệu quả.

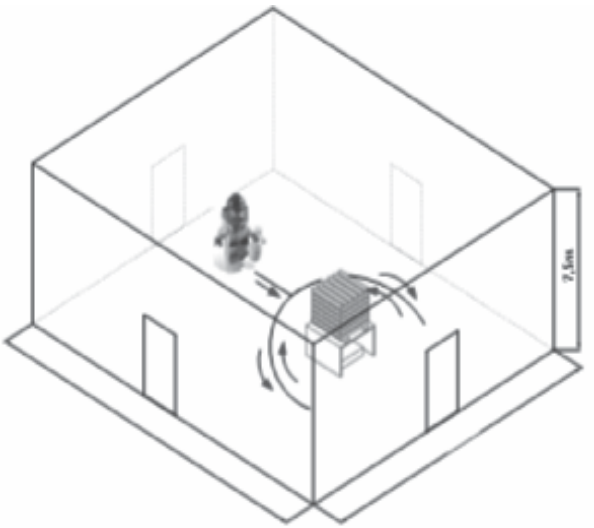
Một số nghiên cứu [2-4] đã tập trung vào việc lượng hóa các tiêu chí kiểm định, xây dựng lưu đồ thuật toán và nhóm các phép thử theo chức năng, phục vụ thiết kế hệ thống kiểm định tự động. Nghiên cứu [4] đề xuất mô hình robot tay máy 4 bậc tự do gắn trên đế bánh xích để mô phỏng thao tác (Hình 1). Tuy nhiên, hệ thống này còn hạn chế về tốc độ, khả năng định vị và độ phức tạp khi điều khiển do cấu trúc cơ khí.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý phương án cũ [2-4]

Các công trình [5], [6] đã phát triển tay máy 5 bậc tự do trên đế bánh xích, đáp ứng tiêu chuẩn quốc tế ISO 7165:2009 và ISO 11601:2008. Hệ thống sử dụng servo AC điều khiển vòng kín, kết hợp chiến lược bám quỹ đạo và thị giác máy tính, cho phép hoàn thành bài kiểm định loại 20A nhanh hơn thời gian phun của bình. Mặc dù kết quả mô phỏng cho thấy độ chính xác và ổn định cao, cấu hình di động tự do vẫn dễ bị ảnh hưởng bởi bề mặt sàn và yêu cầu định vị phức tạp.

Bài kiểm định sẽ được thực hiện ở trong phòng thử với yêu cầu sử dụng sàn xi măng nhẵn, có các lỗ thông gió ở 4 góc và kích thước như Hình 2.



Hình 2. Kích thước phòng kiểm định [1]

Từ những phân tích trên, bài báo này kế thừa và cải tiến các mô hình trước, đề xuất cấu hình robot tay máy tọa độ trụ trên đế di chuyển đường ray (Hình 3), giúp cố định bán kính quỹ đạo, tăng tốc độ di chuyển, đơn giản hóa điều khiển và đảm bảo đáp ứng đầy đủ yêu cầu kiểm định loại A và B theo TCVN 7026:2013.

3. PHƯƠNG ÁN GIẢI QUYẾT

Dựa trên các hạn chế được chỉ ra trong phần Tổng quan, bài báo đề xuất một hệ thống robot kiểm định công suất bình chữa cháy xách tay với cấu hình tay máy tọa độ trụ gắn trên đế di chuyển đường ray. Thiết kế này giúp cố định bán kính quỹ đạo di chuyển, đảm bảo tốc độ ổn định, loại bỏ các sai số do di động tự do, đồng thời đơn giản hóa bài toán điều khiển so với mô hình tay máy trên nền bánh xích.

Hệ thống được chia thành ba nhóm giải pháp chính:

Giải pháp cơ khí – Thiết kế tay máy 5 bậc tự do gồm 3 bậc định vị và 2 bậc định hướng vòi phun, đảm bảo khả năng bao phủ toàn bộ vùng đám cháy thử theo tiêu chuẩn TCVN 7026:2013. Đế di chuyển sử dụng ray dẫn hướng cho phép robot di chuyển chính xác quanh đám cháy với tốc độ điều khiển được.

Giải pháp điều khiển – Ứng dụng kiến trúc điều khiển phân tán, bộ điều khiển trung tâm phối hợp với các driver servo AC tích hợp điều khiển vòng kín PID, giúp điều chỉnh đồng thời vị trí, tốc độ và góc phun của vòi chữa cháy.

Giải pháp điện và an toàn – Hệ thống cấp nguồn bằng pin kết hợp biến tần, bảo đảm tính cơ động và an toàn cho người vận hành. Cảm biến phản hồi từ encoder tuyệt đối được sử dụng để loại bỏ nhu cầu lắp đặt thêm cảm biến phức tạp, đồng thời tích hợp giới hạn hành trình mềm và cứng nhằm ngăn chặn sự cố.

Các phần tiếp theo của bài báo sẽ trình bày chi tiết từng giải pháp, bao gồm thiết kế cơ khí, chiến lược điều khiển và cấu hình hệ thống điện, nhằm chứng minh tính khả thi và hiệu quả của phương án đề xuất.

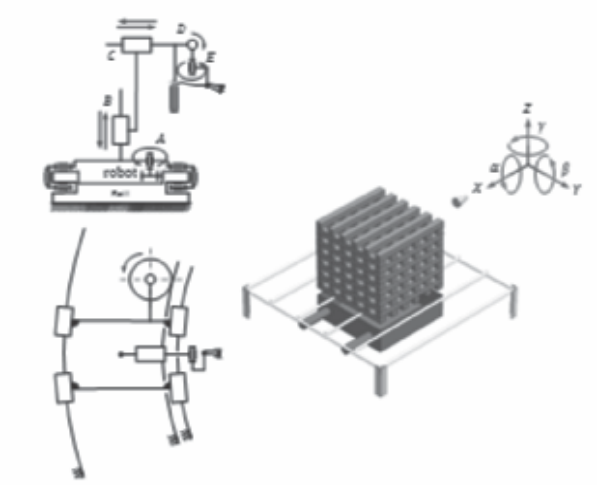
3.1. Giải pháp cơ khí

Hệ thống cơ khí được thiết kế dưới dạng tay máy tọa độ trụ (cylindrical coordinate robot) gồm 5 bậc tự do:

• 3 bậc định vị: Quay quanh trục thẳng đứng (R-rotation), di chuyển tịnh tiến theo phương ngang (R-linear), và nâng/hạ theo phương thẳng đứng (Z-axis).

• 2 bậc định hướng: Gật lên/xuống (pitch) và quét trái/phải (yaw) của vòi phun. ☞

Cấu trúc này cho phép tay máy bao phủ toàn bộ vùng đám cháy thử loại A và B theo yêu cầu TCVN 7026:2013, đồng thời giữ khoảng cách phun ổn định. Để robot chạy trên đường ray tròn giúp cố định bán kính quỹ đạo, tăng độ chính xác khi di chuyển và giảm tải cho bộ điều khiển.



Hình 3. Phương án cơ khí

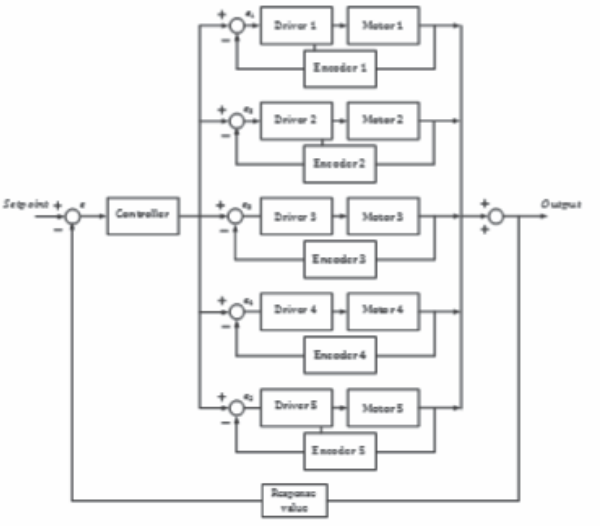
3.2. Giải pháp điều khiển

Kiến trúc điều khiển phân tán gồm:

• Bộ điều khiển trung tâm (PLC hoặc máy tính công nghiệp) đảm nhận lập kế hoạch quỹ đạo, đồng bộ hóa các chuyển động.

• 05 driver servo AC tích hợp vòng kín PID, đảm bảo điều khiển vị trí, tốc độ và mô-men độc lập cho từng trục.

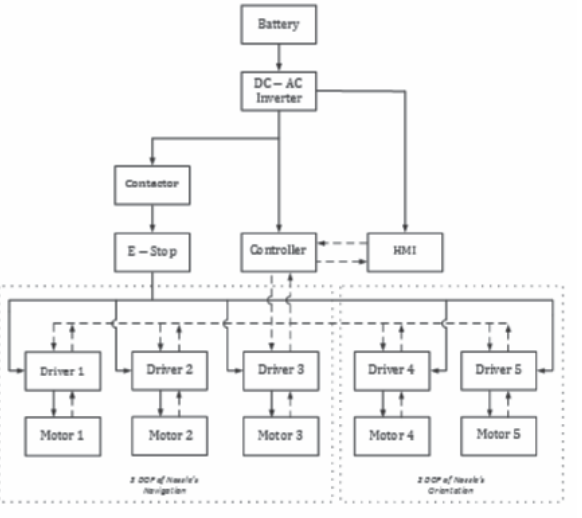
Hệ thống có khả năng lưu trữ và gọi lại các quỹ đạo tiêu chuẩn cho từng loại bình và loại đám cháy thử, giúp kiểm định nhanh chóng và lặp lại chính xác.



Hình 4. Sơ đồ điều khiển

3.3. Giải pháp điện và an toàn

Nguồn cấp gồm pin dung lượng cao kết hợp biến tần, bảo đảm tính cơ động và tránh kéo dây điện gần khu vực cháy. Tất cả động cơ đều sử dụng encoder tuyệt đối để phản hồi vị trí, loại bỏ nhu cầu sử dụng thêm cảm biến bên ngoài.



Hình 5. Sơ đồ điện

Hệ thống an toàn gồm:

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

• Giới hạn mềm qua phần mềm (soft limit) để ngăn tay máy vượt quá phạm vi làm việc.

• Chặn cứng cơ khí (hard stop) ở các vị trí nguy hiểm.

• Nút dừng khẩn (E-stop) bố trí thuận tiện.

Ngoài ra, HMI (Human Machine Interface) cho phép người vận hành chọn loại đám cháy, loại bình, giám sát trạng thái, và nhận cảnh báo.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích các hạn chế của phương pháp kiểm định công suất bình chữa cháy xách tay hiện hành và tổng hợp các nghiên cứu liên quan, từ đó đề xuất giải pháp tự động hóa quy trình kiểm định dựa trên robot tay máy tọa độ trụ gắn trên đế di chuyển đường ray. Cấu hình này cho phép cố định bán kính quỹ đạo, tăng tốc độ di chuyển, đơn giản hóa điều khiển, đồng thời đảm bảo bao phủ toàn bộ vùng đám cháy thử loại A và B theo TCVN 7026:2013.

Hệ thống được thiết kế với ba nhóm giải pháp chính:

• Cơ khí: Tay máy 5 bậc tự do, đế di chuyển ray dẫn hướng.

• Điều khiển: Kiến trúc phân tán với servo AC tích hợp vòng kín PID.

• Điện và an toàn: Nguồn pin – biến tần, encoder tuyệt đối, giới hạn hành trình mềm và cứng.

Giải pháp này hứa hẹn nâng cao hiệu suất, độ chính xác và an toàn cho quá trình kiểm định, đồng thời giảm sự phụ thuộc vào thao tác thủ công của con người.

Hướng phát triển tiếp theo sẽ tập trung vào: Hoàn thiện chế tạo nguyên mẫu và thử nghiệm thực tế; Tích hợp thị giác máy tính để nhận dạng và định vị đám cháy thử tự động; và Nghiên cứu tối ưu quỹ đạo để rút ngắn thời gian kiểm định và tiết kiệm chất chữa cháy.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **06/8/2025**
Ngày phản biện: **14/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. TCVN 7026:2013, "*Chữa cháy – Bình chữa cháy xách tay – Tính năng và cấu tạo*".

[2]. Đặng Trung Kiên, Nguyễn Hữu Cường Thịnh, Ngô Xuân Quang, "*Nghiên cứu tự động hóa kiểm định bình chữa cháy xách tay. Phần 1 – Nghiên cứu tiêu chí kiểm định theo TCVN 7026:2013*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 314, tr. 387-397, 4.2024.

[3]. Đặng Trung Kiên, Nguyễn Hữu Cường Thịnh, Ngô Xuân Quang, "*Nghiên cứu tự động hóa kiểm định bình chữa cháy xách tay. Phần 2 – Đề xuất giải pháp kiểm định bình chữa cháy xách tay tự động*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 314, tr. 398-407, 4.2024.

[4]. Ngô Xuân Quang, Nguyễn Tấn Tiến, Nguyễn Hữu Cường Thịnh, "*Nghiên cứu tự động hóa kiểm định bình chữa cháy*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 299-300, tr. 5-10, 2.2023.

[5]. Xuan Quang Ngo, Huu Cuong Thinh Nguyen, Tan Tien Nguyen, "*Design of Mobile Manipulator for Fire Extinguisher Testing. Part I: Key Specifications and Conceptual Design*". Proceedings of AETA 2022, tr. 1-10, Dec. 2022, Vietnam.

[6]. Xuan Quang Ngo, Huu Cuong Thinh Nguyen, Tan Tien Nguyen, "*Design of Mobile Manipulator for Fire Extinguisher Testing. Part II: Design and Simulation*". Proceedings of AETA 2022, tr. 11-20, Dec. 2022, Vietnam.

THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐO CHỈ SỐ PM10, PM2.5 VÀ UV VỚI CÔNG NGHỆ LORA KẾT HỢP NB-IoT

DESIGN OF PM10, PM2.5 AND UV INDEX MONITORING SYSTEM USING LORA COMBINED WITH NB-IoT TECHNOLOGY

Hứa Nguyễn Đăng Thy[1], Vũ Ngọc Long[1], Trần Thanh Hải[1], Bùi Quang Vinh[1,*], Trần Chấn Quốc[2]

[1]Trung tâm Nghiên cứu triển khai Khu Công nghệ cao Thành phố Hồ Chí Minh

[2]Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: hndthy.shtp@tphcm.gov.vn; vnlong.shtp@tphcm.gov.vn; tthai.shtp@tphcm.gov.vn;*bqvinh.shtp@tphcm.gov.vn; rayngu2005@gmail.com*

TÓM TẮT

Ô nhiễm không khí và bức xạ tử ngoại (UV) đang ngày càng trở thành mối nguy hại nghiêm trọng đối với sức khỏe cộng đồng và môi trường, đặc biệt tại các thành phố lớn và khu vực đô thị đông dân. Nghiên cứu này trình bày việc thiết kế và triển khai một hệ thống giám sát bụi mịn (PM2.5/PM10) và chỉ số UV theo thời gian thực, tiêu thụ năng lượng thấp, sử dụng công nghệ Internet vạn vật băng hẹp (LoRa kết hợp NB-IoT) tại Khu Công nghệ cao và được hiển thị trên giao diện web. Hệ được thiết kế để chạy trên Raspberry Pi, sử dụng ngôn ngữ Python để xử lý dữ liệu nhận từ vi điều khiển STM32 thông qua giao thức truyền sóng Lora, dữ liệu sau khi thu thập sẽ được xử lý và gửi đến một máy chủ MQTT (broker) thông qua sóng băng tần hẹp NB-IoT để phục vụ mục đích giám sát từ xa, từ đó tiến hành phát triển hệ thống phần mềm và ứng dụng hiển thị dữ liệu các thông số đo theo thời gian thực.

Từ khóa: *Mô-đun Internet vạn vật băng tần hẹp; Mạng diện rộng công suất thấp; Hệ thống quan trắc môi trường; Công nghệ truyền thông tầm xa; Vi điều khiển STM32.*

ABSTRACT

Air pollution and ultraviolet (UV) radiation are becoming increasingly serious threats to public health and the environment, especially in densely populated urban areas. This study presents the design and implementation of a real-time, low-power monitoring system for fine particulate matter (PM2.5/PM10) and UV index using Narrowband Internet of Things (NB-IoT) technology at the High-Tech Park. The system is designed to operate on a Raspberry Pi platform and utilizes Python to process data received from an STM32 microcontroller via the LoRa wireless communication protocol. After data acquisition, the information is processed and transmitted to an MQTT broker using NB-IoT communication, enabling remote monitoring. The system also includes the development of supporting software and a real-time data visualization application for end-users.

Keywords: *NB-IOT (Narrowband Internet of Things); LPWAN; Environmental Monitoring* system; LORAWAN; MCU STM32.

1. TỔNG QUAN

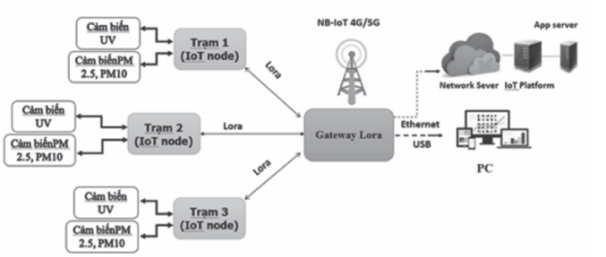
Trong những năm gần đây, nhu cầu giám sát môi trường theo thời gian thực ngày càng tăng cao, đặc biệt trong bối cảnh ô nhiễm không khí và bức xạ tử ngoại (UV) ngày càng ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe cộng đồng. Việc xây dựng các hệ thống quan trắc sử dụng công nghệ Internet vạn vật (IoT) không những giúp cải thiện khả năng cảnh báo sớm mà còn hỗ trợ quá trình ra quyết định trong quản lý đô thị và quy hoạch môi trường.

Trong số các công nghệ truyền thông IoT hiện nay, NB-IoT (Narrowband Internet of Things) nổi lên như một giải pháp lý tưởng cho các ứng dụng yêu cầu truyền dữ liệu tầm xa, tiêu thụ năng lượng thấp và độ tin cậy cao. NB-IoT là một công nghệ LPWAN (Low Power Wide Area Network) được tiêu chuẩn hóa bởi tổ chức 3GPP, hoạt động trên nền hạ tầng mạng di động hiện có (LTE/GSM), cho phép các thiết bị IoT hoạt động với thời gian sử dụng pin lên đến 10 năm và vùng phủ sóng rộng hơn so với các chuẩn truyền thống như Wi-Fi hay Zigbee [1]. Một ưu điểm nổi bật của NB-IoT là khả năng hỗ trợ hàng chục nghìn thiết bị trong cùng một khu vực phủ sóng, rất phù hợp với các hệ thống giám sát phân tán như cảm biến bụi mịn (PM2.5/PM10), cảm biến UV, cảm biến chất lượng đất hoặc nước. Việc kết hợp NB-IoT với các giao thức truyền thông nhẹ như MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) giúp tối ưu hóa băng thông và giảm thiểu độ trễ truyền thông trong các ứng dụng giám sát từ xa [2]. Song song với đó, giao thức LoRa (Long Range) cũng được sử dụng rộng rãi trong việc thu thập dữ liệu ở tầng cảm biến nhờ đặc tính tiêu thụ năng lượng thấp, phù hợp với các thiết bị chạy bằng pin đặt ở nơi khó tiếp cận. Việc sử dụng vi điều khiển STM32 để xử lý tín hiệu từ cảm biến, kết hợp với nền tảng vi máy tính Raspberry Pi làm trung tâm điều phối và xử lý dữ liệu cục bộ, đang là mô hình được triển khai nhiều trong các hệ thống IoT hiện đại [3].

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đề xuất một hệ thống giám sát bụi mịn và chỉ số UV theo thời gian thực, áp dụng công nghệ NB-IoT để truyền dữ liệu về máy chủ trung tâm thông qua giao thức MQTT. Dữ liệu được thu thập từ các cảm biến được truyền lên Raspberry Pi bằng giao thức LoRa, xử lý và hiển thị trên phần mềm theo thời gian thực [4]. Hệ thống được xây dựng hướng đến mục tiêu tiết kiệm năng lượng, chi phí thấp và dễ mở rộng, phù hợp cho triển khai tại các khu công nghệ cao, khu công nghiệp hoặc khu đô thị thông minh.

2. NỘI DUNG THỰC HIỆN

Với quy mô thử nghiệm của nghiên cứu này, nhóm đã tiến hành khảo sát vị trí lắp đặt, bố trí triển khai xây dựng hệ thống; lựa chọn thiết bị phù hợp đạt chuẩn để thi công; xác định vị trí lắp đặt tại 3 vị trí trong Khu Công nghệ cao, các trạm cách nhau trong phạm vi bán kính 3km.



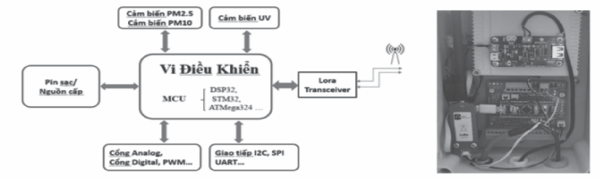
Hình 1. Mô hình kết nối, hoạt động của hệ thống

2.1. Tích hợp module Lora cho các trạm và phát triển phần mềm giao thức mạng cho phép truyền dữ liệu thông suốt đến máy chủ dữ liệu thông qua NB-IoT Gateway

Công nghệ LoRa với ưu điểm về tầm phủ sóng xa, tiêu thụ năng lượng thấp và khả ☞

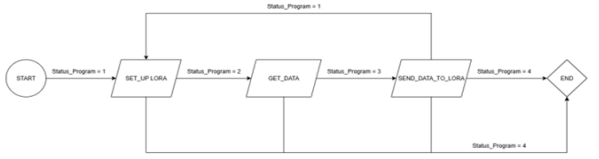
năng hoạt động ổn định trong môi trường đô thị phức tạp cho thấy tiềm năng lớn trong việc triển khai các trạm giám sát môi trường quy mô rộng. Bên cạnh đó, việc phát triển Gateway NB-IoT thế hệ mới tích hợp module LoRa đã góp phần tạo nên một kiến trúc mạng thông suốt, cho phép dữ liệu từ các trạm cảm biến được truyền tải nhanh chóng và ổn định về máy chủ dữ liệu, qua đó hỗ trợ hiệu quả cho công tác giám sát, phân tích và đưa ra các cảnh báo kịp thời.

Từ mô hình kết nối 3 trạm và bộ truyền nhận Gateway LoRa NB-IOT 4G, nhóm nghiên cứu xây dựng sơ đồ nguyên lý trạm (IoT node) như hình 2. Trạm IoT Node thiết kế bao gồm MCU chính là STM32 chạy tiết kiệm điện năng, nhưng vẫn đáp ứng được thu thập và truyền dẫn. Chuẩn truyền dữ liệu được chọn ở đây là Lora. Vi điều khiển sẽ có các kết nối cơ bản để kết nối các loại cảm biến và dữ liệu đầu vào cơ bản: UART, I2C, SPI, I/O, CAN BUS, PWM, ADC, và USB.



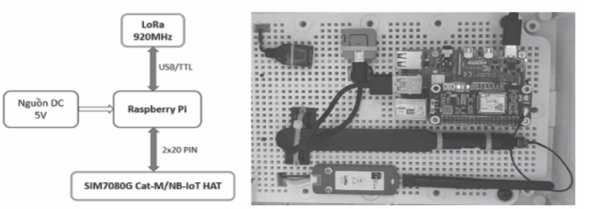
Hình 2. Sơ đồ nguyên lý IoT node

Chương trình trên STM32 được thiết kế dựa trên mô hình Finite State Machine (FSM) như sơ đồ dưới đây:



Hệ thống tập trung thu thập dữ liệu từ các cảm biến UV, bụi mịn (PM2.5/PM10) và $V_{Battery}$, sử dụng kiến trúc software timer 100ms dựa trên hardware timer STM32 để cân bằng giữa hiệu suất và tiết kiệm năng lượng. Về kiến trúc timer, chúng tôi áp dụng mô hình software timer dựa trên hardware timer của STM32. Tần số clock đầu vào là 8MHz, được chia bởi prescaler = 7999 và Auto-Reload Register (ARR) = 99, dẫn đến tần số interrupt thực tế là 10Hz – tương đương với chu kỳ 100ms cho mỗi tick. Dữ liệu sau xử lý được truyền qua giao thức LoRa đến gateway, đảm bảo kết nối ổn định và tiêu thụ điện thấp trong môi trường IoT [5], [6].

Thiết kế sử dụng mô hình FSM giúp quản lý trạng thái rõ ràng, tăng độ tin cậy, dễ mở rộng và hỗ trợ chế độ tiết kiệm năng lượng của vi điều khiển. Giao thức LoRa mang lại hiệu suất truyền xa, chống nhiễu tốt và phù hợp với các ứng dụng giám sát môi trường hoặc nông nghiệp [7]. Hệ thống có chi phí thấp, linh hoạt cao, dễ triển khai trên quy mô lớn nhờ nền tảng STM32 giá rẻ phù hợp khi mở rộng ra đối với nhiều trạm.



Hình 3. Sơ đồ Gateway tích hợp NB-IoT

Trên Raspberry Pi – trung tâm xử lý của IoT Gateway – chương trình sử dụng ngôn ngữ Python để giao tiếp với module NB-IoT (SIM7080) và đồng bộ dữ liệu nhận từ LoRa qua UART (AtomLite ESP32). NB-IoT dùng mạng Viettel đảm bảo phủ sóng mạnh, cho phép reset kết nối khi mạng không ổn định.

Kiến trúc chương trình sử dụng đa luồng (thread) [8], mỗi luồng có hàng đợi riêng để xử lý dữ liệu từ LoRa và chuyển tiếp qua NB-IoT bằng giao thức MQTT [9] lên CoreIoT, thay vì

gửi trực tiếp đến backend để tránh tiêu tốn tài nguyên do NB-IoT có băng thông thấp. Dữ liệu được gửi định kỳ mỗi 5 phút, với hàng đợi vừa đủ để chống tràn và cơ chế dự phòng khi gặp lỗi mạng, đảm bảo tính ổn định và đáng tin cậy cho hệ thống trong điều kiện IoT thực tế.

***Tự động hóa tác vụ với Shell Script:**

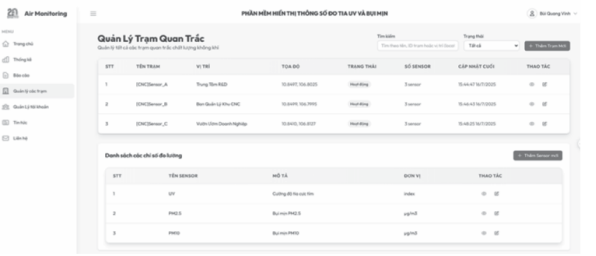
Chương trình run.sh được thiết kế để tự động kiểm tra và cài đặt các môi trường cần thiết, tạo môi trường ảo và khởi động ứng dụng một cách ổn định, giúp giảm lỗi do môi trường không đồng nhất và dễ triển khai trên nhiều thiết bị Raspberry Pi.

Để đảm bảo kết nối NB-IoT luôn sẵn sàng, script tích hợp cơ chế giám sát định kỳ 30 phút/lần. Khi phát hiện sự cố kết nối, hệ thống sẽ tự động ngắt MQTT, chờ và thử kết nối lại, đồng thời reset module. Nếu lỗi kéo dài quá 3 lần thử, chương trình sẽ ngắt hoàn toàn để bảo vệ dữ liệu và thiết bị. Thiết kế này tối ưu hiệu suất và tăng độ bền trong môi trường IoT không ổn định.

2.2. Hiển thị dữ liệu thông số đo được lên web/app

Web/app hoạt động theo nguyên lý thu thập, xử lý và hiển thị dữ liệu thời gian thực từ các trạm quan trắc, hệ thống tự động thu nhận các chỉ số UV, PM2.5 và PM10, truyền về trung tâm qua giao thức bảo mật và ổn định. Dữ liệu được xử lý để lọc nhiễu, chuẩn hóa và tính toán theo tiêu chuẩn, sau đó hiển thị qua giao diện component-based tối ưu theo thời gian thực, giúp người dùng dễ dàng theo dõi xu hướng và đánh giá chất lượng thông tin đo được.

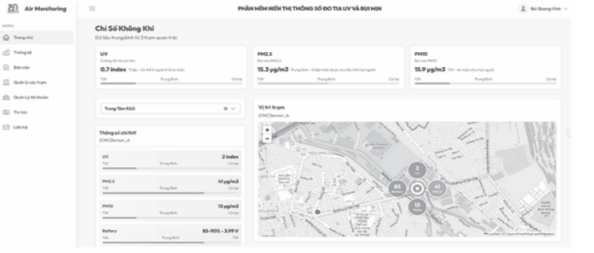
Hệ thống cảnh báo khi phát hiện chỉ số vượt ngưỡng an toàn và hỗ trợ nhiều kênh thông báo. Nhằm đảm bảo tính liên tục và ổn định, phần mềm tích hợp cơ chế tự phục hồi, ghi log lỗi và có kiến trúc phân tán dễ mở rộng thêm trạm mới mà không ảnh hưởng hiệu suất tổng thể.



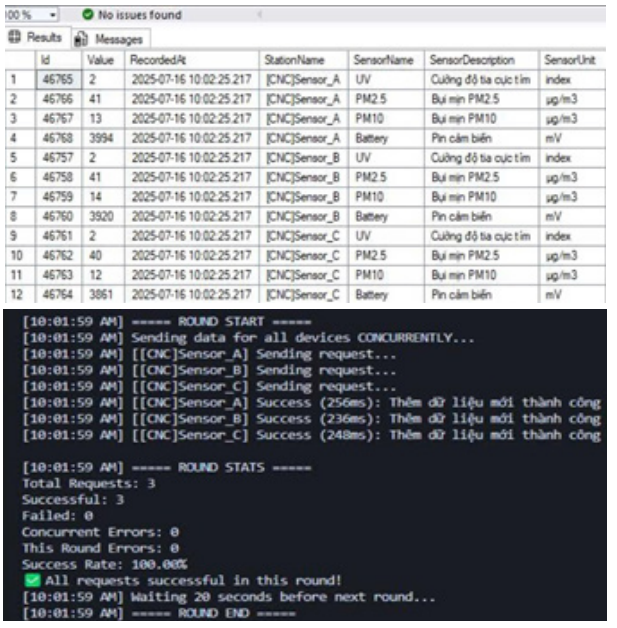
Hình 4. Giao diện tác vụ quản lý thông tin các trạm quan trắc

3. ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Việc lựa chọn công nghệ mạng cảm biến không dây phù hợp phụ thuộc vào nhiều yếu tố như phạm vi triển khai, yêu cầu về năng lượng, chi phí, độ tin cậy và tốc độ truyền dữ liệu. Trong các ứng dụng giám sát môi trường, các công nghệ như IEEE 802.15.4 và LoRa/LoRaWAN thường được ưu tiên nhờ khả năng tiết kiệm năng lượng và phạm vi phủ sóng linh hoạt. Tuy nhiên, trong các tình huống yêu cầu tốc độ cao hoặc truyền dữ liệu từ xa, 3G/4G và WiFi vẫn là lựa chọn khả thi. Việc kết hợp nhiều công nghệ trong cùng một hệ thống (Mạng cảm biến không dây thông suốt) là xu hướng phát triển trong tương lai nhằm tối ưu hóa hiệu suất (tốc độ dữ liệu) và độ tin cậy (khoảng cách truyền sóng, vùng phủ sóng) của hệ thống giám sát môi trường.



Hình 5. Giao diện hiển thị thông số các trạm quan trắc



	Id	Value	RecordedAt	StationName	SensorName	SensorDescription	SensorUnit
1	46765	2	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_A	UV	Cường độ tia cực tím	index
2	46766	41	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_A	PM2.5	Bụi mịn PM2.5	µg/m3
3	46767	13	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_A	PM10	Bụi mịn PM10	µg/m3
4	46768	3994	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_A	Battery	Pin cảm biến	mV
5	46757	2	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_B	UV	Cường độ tia cực tím	index
6	46758	41	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_B	PM2.5	Bụi mịn PM2.5	µg/m3
7	46759	14	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_B	PM10	Bụi mịn PM10	µg/m3
8	46760	3920	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_B	Battery	Pin cảm biến	mV
9	46761	2	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_C	UV	Cường độ tia cực tím	index
10	46762	40	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_C	PM2.5	Bụi mịn PM2.5	µg/m3
11	46763	12	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_C	PM10	Bụi mịn PM10	µg/m3
12	46764	3861	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_C	Battery	Pin cảm biến	mV

Hình 6. Kết quả dữ liệu từ hệ thống

Các giá trị đo của cảm biến được cập nhật hoạt động liên tục và ổn định, mỗi chu kỳ đều có đủ 4 loại dữ liệu, điều này cho thấy hệ thống đã tối ưu hóa đồng bộ thu thập các dữ liệu, các trạm hoạt động song song, không bị xung đột hoặc thiếu dữ liệu.

Thông qua quá trình nghiên cứu và đánh giá, việc ứng dụng công nghệ mạng cảm biến không dây hiện đại, đặc biệt là công nghệ LoRa thế hệ mới kết hợp với Gateway NB-IoT trên nền tảng mạng 4G/5G, là một hướng đi khả thi và hiệu quả trong xây dựng hệ thống IoT phục vụ giám sát môi trường tại Khu Công nghệ cao Thành phố Hồ Chí Minh.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế và triển khai thành công một hệ thống giám sát môi trường tích hợp các cảm biến đo bụi mịn (PM2.5, PM10) và chỉ số bức xạ tử ngoại (UV) sử dụng sự kết hợp giữa công nghệ LoRa và NB-IoT. Hệ thống được xây dựng với kiến trúc phần cứng dựa trên vi điều khiển STM32, nền tảng Raspberry Pi và gateway tích hợp, đồng thời ứng dụng giao thức truyền thông MQTT để đảm bảo việc thu thập, xử lý và truyền tải dữ liệu ổn định theo thời gian thực. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, duy trì kết nối liên tục và cung cấp dữ liệu đo đáng tin cậy, đồng bộ từ nhiều trạm quan trắc trong phạm vi triển khai.

Điểm mạnh nổi bật của nghiên cứu là sự kết hợp giữa hai công nghệ truyền thông hiện đại: LoRa với ưu thế truyền xa, tiêu thụ năng lượng thấp, phù hợp cho các nút cảm biến phân tán; và NB-IoT với khả năng phủ sóng rộng, băng thông ổn định, thích hợp cho truyền dữ liệu tập trung về máy chủ. Sự tích hợp này không chỉ tăng tính linh hoạt và khả năng mở rộng mà còn giảm thiểu chi phí vận hành, hứa hẹn áp dụng hiệu quả trong các khu công nghệ cao, khu công nghiệp và các đô thị thông minh. Ngoài ra, việc phát triển giao diện web/app hiển thị dữ liệu trực quan theo thời gian thực giúp nâng cao tính ứng dụng, hỗ trợ người dân và cơ quan quản lý trong việc theo dõi và đưa ra quyết định kịp thời.

Tuy nhiên, nghiên cứu cũng mở ra những hướng phát triển tiếp theo, bao gồm: mở rộng quy mô thử nghiệm ở các khu vực đô thị có mật độ dân cư cao, đánh giá độ chính xác của cảm biến theo chuẩn quốc tế, đồng thời phân tích hiệu quả kinh tế so với các hệ thống quan trắc truyền thống. Với những cải tiến này, hệ thống có thể trở thành một giải pháp công nghệ bền vững, góp phần nâng cao chất lượng giám sát môi trường và hỗ trợ các chính sách quản lý đô thị hiện đại trong tương lai.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Hứa Nguyễn Đăng Thy;

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Vũ Ngọc Long, Trần Thanh Hải, Trần Chấn Quốc, Bùi Quang Vinh.

Lời cảm ơn:

Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH theo Hợp đồng Số: 97/2024/HĐ-QKHCN.❖

Ngày nhận bài: **06/8/2025**
Ngày phản biện: **21/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Ratasuk, R., Mangalvedhe, N., & Ghosh, A. (2016), "*Overview of LTE enhancements for cellular IoT*". In IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), pp. 1-5.

[2]. Banks, A., & Gupta, R. (2014), "*MQTT Version 3.1.1*". OASIS Standard.

[3]. Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, "*A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things"*, W. M. (2016), Sensors, 16(9), 1466.

[4]. Zhenxin Wang, Zhi Deng, Ke Xu, Ping Zhang & Tao Liu, "*Based on Internet of Things Platform Using NB-IoT Communication Low-Power Weather Station System*". 13 July 2022, International Conference on Wireless Communications, Networking and Applications, Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9_65

[5]. H. Kumarage, S. Ilayperuma, M. Calcuttawala, H. Jayathilaka, and U. Nawinne, "*LoRa Sensor Node Implementation for IoT Applications*". In: Proc. of IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Peradeniya, 2017, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICIINFS.2017.8300384

[6]. R. Li, B. Li, Z. Yang, and R. Yu, "*A LoRa-based Low-Power Wide-Area Network Gateway for Industrial IoT*". In: Proc. of 13th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), Hong Kong, 2017, pp. 497-501. DOI: 10.1109/CIS.2017.00114

[7]. Vanessa Alvear-Puertas, Paul D. Rosero-Montalvo, Jaime R. Michilena-Calderón, Ricardo P. Arciniega-Rocha & Vanessa C. Erazo-Chamorro, "*Urban Air Pollution Monitoring by Neural Networks and Wireless Sensor Networks Based on LoRa*". 01 November 2020, Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2020, Volume 2, Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63089-8_59

[8]. Ehis, A. T, "*Analysis of Multi Threading and Cache Memory Latency in Multithreaded Architecture*". Brazilian Journal of Science, Vol. 3 No. 1, 2024. https://doi.org/10.14295/bjs.v3i1.458

[9]. Ahmed Samy Moursi, Nawal El-Fishawy, Soufiene Djahel & Marwa Ahmed Shouman, "*An IoT enabled system for enhanced air quality monitoring and prediction on the edge*". Complex & Intelligent Systems, Volume 7, pages 2923-2947, 2021, Springer nature Link. DOI: https://doi.org/10.1007/s40747-021-00476-w

[10].Google map: Sensor Nodes Location (google.com).

MÔ HÌNH HÓA ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT TÁC HỢP GIA CÔNG CƠ KHÍ

DYNAMIC MODELING OF A COLLABORATIVE ROBOT IN MECHANICAL PROCESSING

Nguyễn Thế Anh[1], Hà Thanh Hải[2], Trần Minh Thúy[3,*]
[1]Trường Cao đẳng Xây dựng Công trình đô thị
[2]Trường Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
[3]Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội
**Email:thuy.tranminh@hust.edu.vn*

TÓM TẮT

Các hệ thống gia công bằng robot mang lại nhiều lợi ích đáng kể, chẳng hạn như sự linh hoạt cao trong việc lập chương trình gia công, dễ dàng điều chỉnh cấu hình robot để đáp ứng sự thay đổi của đối tượng hoặc chi tiết cần chế tạo, cùng với đó là không gian hoạt động rộng và điều chỉnh linh hoạt. Với các chi tiết có hình dạng bề mặt gia công phức tạp, thao tác gia công được thực hiện bởi chuyển động tạo hình phức tạp giữa dụng cụ gia công và chi tiết gia công. Robot tác hợp là một hệ thống gồm các robot phối hợp sẽ là phương án phụ cho các thao tác công nghệ như vậy.

Để robot tác hợp có thể hoàn thành các thao tác công nghệ tạo hình phức tạp, bên cạnh việc thiết kế quỹ đạo chuyển động để lập chương trình gia công thì việc tính toán động lực học là một bài toán khó bởi robot tác hợp có cấu trúc phức tạp. Đã có các công trình về tính toán động lực học của robot tác hợp, song cấu trúc robot tác hợp là đa dạng. Trong bài báo này trình bày tính toán động lực học cho mô hình robot tác hợp gồm hai cánh tay robot chuỗi hở ba bậc tự do (Mechanism of Relative Manipulator 3+3 degree of freedom) MRM33. Các cánh tay robot thực hiện chuyển động tương đối giữa dụng cụ và chi tiết để thực hiện thao tác gia công. Thuật toán và chương trình cho kết quả mô phỏng số và áp dụng thuận lợi cho lớp robot tác hợp MRM33.

Từ khóa: *Robot tác hợp MRM33; Mô hình hóa động lực học; Gia công cơ khí.*

ABSTRACT

Robotic machining systems offer many significant benefits, such as high flexibility in machining programming, easy adjustment of robot configuration to accommodate changes in the object or part to be manufactured, and a vast operating space and flexible adjustment. For parts with complex machined surface shapes, the machining operation is performed by complex forming motions between the machining tool and the machined workpieces. Collaborative robots are a system of coordinated robots that will be a suitable solution for such technological operations. To enable collaborative robots to complete complex forming operations, in addition to designing the motion trajectory for programming the machining, calculating the dynamics is a difficult problem because these robots have complex structures. There have been studies on the dynamics

of collaborative robots, but their structures are diverse. In this paper, the dynamics calculation for the collaborative robot model consisting of two open-chain robot arms with three degrees of freedom (Mechanism of Relative Manipulator 3+3 degrees of freedom, MRM33) is presented. The robot arms' relative motion moves the tool with respect to the workpieces to perform the machining operation. The algorithm and program give numerical simulation results and are conveniently applied to the MRM33 collaborative robot class.

Keywords: *Collaborative robots MRM33; Dynamics modelling; Mechanical processing.*

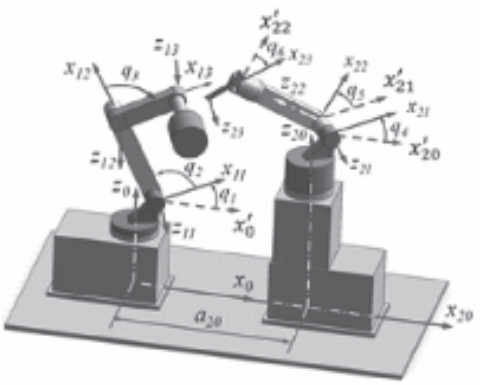
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ sản xuất thông minh đã mở ra kỷ nguyên mới cho việc triển khai robot vào các quy trình cơ khí tự động hóa. Việc ứng dụng robot trong gia công cơ khí ngày càng được quan tâm nghiên cứu và phát triển [1-6]. Nhiều nghiên cứu về các thành tựu gần đây trong lĩnh vực gia công phay sử dụng robot, đặc biệt là đối với các chi tiết có hình dạng phức tạp được trình bày trong bài tổng quan [1]. Ứng dụng đa dạng của robot công nghiệp trong gia công cắt gọt, đặc biệt trong các lĩnh vực như mài, phay, đánh bóng và xử lý bề mặt được phân tích và tổng hợp trong [2]. Một trong các ưu điểm của gia công tạo hình bằng robot là khả năng linh hoạt về định vị, định hướng của dụng cụ gia công để thực hiện các thao tác công nghệ phức tạp lên đối tượng gia công. Song điều đó dẫn đến vấn đề quan trọng là thiết kế quỹ đạo chuyển động cho robot để tạo chương trình gia công cho robot thực hiện thao tác công nghệ. Đã có các công trình nghiên cứu các phương pháp thiết kế đường dụng cụ cho robot, chẳng hạn trong các công trình [7-9]. Dựa trên đường dụng cụ, quỹ đạo chuyển động của robot được tính toán bằng việc giải bài toán động học robot để tạo chương trình cho robot thực hiện thao tác công nghệ. Trong các công trình [10,11] đã trình bày việc thiết kế quỹ đạo chuyển động cho robot gia công tạo hình bề mặt. Trong [12] đã trình bày việc tính toán động học, thiết kế quỹ đạo chuyển động cho robot tác hợp MRM33 thực hiện gia công tạo hình bề mặt chi tiết có hình dạng phức tạp. Song song với việc thiết kế quỹ đạo chuyển động, lập chương trình thao tác, bài toán động lực học đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp mô hình động lực học cho việc điều khiển hoạt động của robot cũng như các số liệu cần thiết cho việc tính toán, thiết kế robot. Trong [13, 14] đã dẫn ra phương pháp chung khảo sát tính toán động lực học robot tác hợp. Trong [15] cũng chỉ ra việc khảo sát động lực học của một mô hình robot tác hợp, trong đó, một trong hai robot thành phần có cấu trúc bàn máy với các khớp chuyển động tịnh tiến. Bài báo này trình bày phương pháp mô hình hóa, thực hiện theo một quy trình để nhận được hệ phương trình động lực học robot tác hợp MRM33. Với robot tác hợp nói chung, thông thường tồn tại cấu trúc vòng kín. Với robot MRM33, các cánh tay robot có cấu trúc chuỗi hở, trong quá trình thực hiện thao tác công nghệ sẽ tạo thành chuỗi động học kín. Một cách tổng quát, hệ phương trình động lực học sẽ bao gồm các phương trình vi phân chuyển động của robot và các phương trình ràng buộc bởi cấu trúc vòng kín đảm bảo chuyển động thao tác gia công. Trong dạng đó, việc khảo sát tính toán động lực học là khá khó khăn. Trong trường hợp, với loại hình gia công xác định, các thông số về vật liệu, thông số công nghệ, cho phép áp dụng công thức thực nghiệm để xác định lực tương tác (gọi là lực cắt) giữa dụng cụ và chi tiết gia công, thì có thể tách cấu trúc để thiết lập phương trình vi phân chuyển động cho từng cánh tay robot. Bài ☞

báo dẫn ra phương pháp thiết lập phương trình động lực học cho robot tác hợp MRM33 dựa trên cách thứ hai này. Bài báo trình bày một ví dụ áp dụng để minh họa.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC ROBOT TÁC HỢP

Mô hình robot tác hợp MRM33 là hệ gồm hai cánh tay robot ba bậc tự do cấu trúc nối tiếp chuỗi hở được biểu diễn trên Hình 1, a. Trong MRM33, một robot kẹp chặt và di chuyển chi tiết gia công. Robot này được gọi là robot bàn máy (A), đóng vai trò giống như bàn máy trong các máy công cụ, hoặc máy CNC. Robot thứ hai kẹp chặt và di chuyển dụng cụ gia công, gọi là robot dụng cụ (B).



Hình 1. Robot tác hợp gia công cơ khí

Từ yêu cầu kỹ thuật gia công, các robot được điều khiển chuyển động sao cho dụng cụ chuyển động tương đối đối với chi tiết gia công, tiếp cận và tương tác thao tác công nghệ lên bề mặt chi tiết gia công.

Mỗi cánh tay robot đều có ba bậc tự do, ba khâu động, toàn khớp quay, tạo thành chuỗi động học hở. Ký hiệu các khâu động của robot bàn máy là L11, L12, L13; của robot dụng cụ là L21, L22, L23.

Gọi hệ tọa độ cơ sở vừa là hệ tọa độ gốc robot bàn máy là $R_0 = x_0y_0z_0$ đặt tại gốc robot bàn máy. Gọi các hệ tọa độ khâu của robot bàn máy lần lượt là $R_{11} = x_{11}y_{11}z_{11}$, $R_{12} = x_{12}y_{12}z_{12}$, với khâu cuối là $R_{13} = x_{13}y_{13}z_{13}$. Tương tự, gọi các hệ tọa độ khâu của robot dụng cụ lần lượt là $R_{21} = x_{21}y_{21}z_{21}$, $R_{22} = x_{22}y_{22}z_{22}$, với khâu cuối là $R_{23} = x_{23}y_{23}z_{23}$. Hệ tọa độ gốc của robot dụng cụ ký hiệu $R_{20} = x_{20}y_{20}z_{20}$.

Mặc dù có một số phương pháp xây dựng các hệ tọa độ, ở đây áp dụng quy tắc Denavit-Hartenberg (DH) bởi cấu trúc các khớp quay hoặc tịnh tiến là phù hợp nhất với phương pháp DH.

Dưới đây trình bày việc khảo sát, tính toán động học và động lực học robot tác hợp nói chung cũng như cho mô hình MRM33.

3. BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC ROBOT TÁC HỢP

Với việc áp dụng quy tắc DH để gắn các hệ tọa độ cho các khâu, các tham số động học được biểu diễn trong bảng 1.

Bảng 1. Các tham số động học DH của robot tác hợp

Robot bàn máy					**Robot dụng cụ**				
i-1/i	θ_i	d_i	a_i	α_i	i-1/i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1	d_{11}	0	$\pi/2$	R_{20}/R_0	0	0	a_{20}	0
2	q_2	0	a_{22}	0	1	q_4	d_{21}	0	$\pi/2$
3	q_3	0	a_{23}	0	2	q_5	0	0	$-\pi/2$
4(A)	$\pi/2$	0	0	0	3(B)	q_6	d_{23}	a_{23}	$\pi/2$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Đối với robot bàn máy, hệ tọa độ khâu L13 sau khi thực hiện các phép chuyển theo quy tắc DH, thực hiện thêm bước 4(A) để đưa hệ R_{13} đến hệ tọa độ $R_D = x_D y_D z_D$, đặt tại tâm bàn kẹp. Hệ tọa độ R_D vừa biểu diễn vị trí và hướng khâu L13 đối với hệ tọa độ cơ sở, đồng thời được dùng để biểu diễn đối tượng gia công, tức biểu diễn dạng hình học của đối tượng gia công trong R_D.

Các ma trận truyền biến đổi tọa độ thuần nhất của robot bàn máy lần lượt là ${}^0A_{11}$, ${}^{11}A_{12}$, ${}^{12}A_{13}$, ${}^{13}A_D$, được tính theo công thức ma trận DH với các tham số của robot bàn máy được chỉ ra ở Bảng 1.

Để tiện trình bày, gọi hệ R_D là hệ tọa độ bàn kẹp hoặc hệ tọa đồ gá, tương ứng, ma trận biểu diễn hệ tọa độ bàn kẹp đối với hệ tọa độ cơ sở là:

$$ {}^0A_D = {}^0A_{11}\,{}^{11}A_{12}\,{}^{12}A_{13}\,{}^{13}A_D \quad (1) $$

Các ma trận truyền biến đổi tọa độ thuần nhất của robot dụng cụ lần lượt là ${}^0B_{20}$, ${}^{20}B_{21}$, ${}^{21}B_{22}$, ${}^{22}B_E$, được tính theo công thức ma trận D_H với các tham số của robot dụng cụ ở Bảng 1.

Để tiện trình bày, ở đây hệ $R_{23} = x_{23}y_{23}z_{23}$ là hệ tọa độ khâu cuối của robot dụng cụ nên gọi là $R_E = x_E y_E z_E$, tương ứng, ma trận biểu diễn hệ tọa độ dụng cụ đối với hệ tọa độ cơ sở theo chuỗi động học robot dụng cụ là:

$$ {}^0B_E = {}^0B_{20}\,{}^{20}B_{21}\,{}^{21}B_{22}\,{}^{22}B_E \quad (2) $$

Hệ tọa độ dụng cụ thường gắn tại lưỡi cắt. Giả sử robot thực hiện quá trình gia công bề mặt cong bằng phay tinh. Hệ tọa độ dụng cụ được xác định sao cho: gốc tọa độ tại điểm cắt trên lưỡi cắt của dụng cụ; trục x_E pháp tuyến lưỡi cắt, trục z_E tiếp tuyến, trục y_E tạo thành hệ tọa độ thuận, xem Hình 1, b.

Gọi các thông số định vị hệ tọa độ dụng cụ $R_E = x_E y_E z_E$ đối với hệ tọa độ bàn kẹp $R_D = x_D y_D z_D$ là các tọa độ thao tác x, y, z, α, β, η, ký hiệu [12]:

$$ \begin{cases} p = [x, y, z, \alpha, \beta, \eta]^T \\ \dot{p} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\eta}]^T \\ \ddot{p} = [\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \ddot{\alpha}, \ddot{\beta}, \ddot{\eta}]^T \end{cases} \quad (3) $$

Ma trận biểu diễn hệ tọa độ R_E đối với hệ tọa độ bàn kẹp R_D bởi các tọa độ thao tác được ký hiệu là:

$$ {}^D A_E(p) = \begin{bmatrix} c_{11}(\alpha,\beta,\eta) & c_{12}(\alpha,\beta,\eta) & c_{13}(\alpha,\beta,\eta) & x \\ c_{21}(\alpha,\beta,\eta) & c_{22}(\alpha,\beta,\eta) & c_{23}(\alpha,\beta,\eta) & y \\ c_{31}(\alpha,\beta,\eta) & c_{32}(\alpha,\beta,\eta) & c_{33}(\alpha,\beta,\eta) & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4) $$

Ma trận biểu diễn hệ tọa độ dụng cụ đối với hệ tọa độ cơ sở theo chuỗi động học robot bàn máy là:

$$ {}^0A_E = {}^0A_{11}\,{}^{11}A_{12}\,{}^{12}A_{13}\,{}^{13}A_D\,{}^D A_E \quad (5) $$

Từ các phương trình (2) và (5), ta có phương trình động học robot dạng ma trận như sau [12]:

$$ {}^0A_{11}\,{}^{11}A_{12}\,{}^{12}A_{13}\,{}^{13}A_D\,{}^D A_E = {}^0B_{20}\,{}^{20}B_{21}\,{}^{21}B_{22}\,{}^{22}B_E \quad (6) $$

Hoặc, ký hiệu (7):

$$ \begin{cases} q = [q_1, q_2, \ldots, q_6]^T \\ \dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \ldots, \dot{q}_6]^T \\ \ddot{q} = [\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ldots, \ddot{q}_6]^T \end{cases} \quad (7) $$

(6) đưa về dạng (8):

$$ {}^D A_E(q) = {}^{13}A_D^{-1}\,{}^{12}A_{13}^{-1}(q_3)\,{}^{11}A_{12}^{-1}(q_2)\,{}^0A_{11}^{-1}(q_1)\,{}^0B_{20}\,{}^{20}B_{21}(q_4)\,{}^{21}B_{22}(q_5)\,{}^{22}B_E(q_6) \quad (8) $$

Từ (8), ma trận biểu diễn hệ tọa độ R_E đối với hệ tọa độ bàn kẹp R_D bởi các tọa độ khớp được ký hiệu là:

$$ {}^D A_E(q) = \begin{bmatrix} c_{11}(q) & c_{12}(q) & c_{13}(q) & x(q) \\ c_{21}(q) & c_{22}(q) & c_{23}(q) & y(q) \\ c_{31}(q) & c_{32}(q) & c_{33}(q) & z(q) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9) $$

Từ (4) và (9) nhận được phương trình động học robot dạng ma trận:

$$ {}^{D}A_{E}(q) = {}^{D}A_{E}(p) \tag{10} $$

Một cách tổng quát, đưa phương trình ma trận (10) về hệ phương trình động học độc lập là hệ các phương trình đại số phi tuyến [12]:

$$ \begin{cases} f_1 = x(q) - x = 0 \\ f_2 = y(q) - y = 0 \\ f_3 = z(q) - z = 0 \\ f_4 = c_{11}(q) - c_{11}(\alpha,\beta,\eta) = 0 \\ f_5 = c_{22}(q) - c_{22}(\alpha,\beta,\eta) = 0 \\ f_6 = c_{33}(q) - c_{33}(\alpha,\beta,\eta) = 0 \end{cases} \tag{11} $$

Các phương trình động học robot dạng ma trận (10) hoặc dạng độc lập (11) cho phép giải bài toán động học, thiết kế quỹ đạo chuyển động và lập chương trình gia công cho robot.

Từ các cảm biến có thể nhận được quy luật chuyển động của các khâu của robot biểu diễn qua các tọa độ khớp và đạo hàm các cấp q, q̇, q̈ của chúng theo thời gian. Giải hệ (11) để nhận được quy luật chuyển động của dụng cụ tức chuyển động của hệ tọa độ R_E đối với hệ tọa độ bàn kẹp R_D, xác định bởi p, ṗ, p̈.

Ngược lại, từ yêu cầu robot thực hiện thao tác công nghệ, chuyển động thao tác của dụng cụ đối với chi tiết gia công xác định bởi các p, ṗ, p̈, giải hệ (11) để nhận được chuyển động của các khâu của robot.

4. ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT TÁC HỢP

Khi hai cánh tay robot MRM33 thực hiện thao tác sẽ tạo thành chuỗi động học kín. Tuy vậy, trong công trình này, lực tác dụng tương hỗ giữa dụng cụ và chi tiết gia công được giả thiết có thể xác định dựa trên công thức thực nghiệm. Khi đó có thể áp dụng phương pháp tách cấu trúc, đưa mô hình động lực học về hệ hai robot chuỗi hở, với ngoại lực tác dụng lên các robot chính là các lực tác dụng tương hỗ giữa dụng cụ và chi tiết. Áp dụng phương trình Lagrange loại hai, hệ phương trình vi phân chuyển động của robot MRM33 có dạng [13-15]:

$$ M(q)\ddot{q} + \psi(q,\dot{q}) + G(q) + Q = \tau \tag{12} $$

$M(q)_{6x6}$ là ma trận khối lượng của robot, được tính theo công thức sau:

$$ M(q)_{6\times6} = \left[\sum_{i=1}^{6} \left(J_{Ti}^{T} m_i J_{Ti} + {}^{ci}J_{Ri}^{T}\, {}^{ci}\Theta_{ci}\, {}^{ci}J_{Ri} \right) \right]_{6\times6} \tag{13} $$

Ở đây, m_i là khối lượng khâu thứ i, ${}^{ci}\Theta_{ci}$ là tensor quán tính của khâu i đối với khối tâm C_i, xác định trong hệ tọa độ khối tâm của khâu; ${}^{ci}J_{Ti}$ là ma trận Jacobi của vector tọa độ khối tâm khâu i theo vector tọa độ khớp q; ${}^{ci}J_{Ri}$ là ma trận Jacobi của vector vận tốc góc của khâu i theo vector đạo hàm của các tọa độ khớp q̇ (14).

$$ {}^{ci}J_{Ti} = \frac{\partial\, {}^{0}r_{ci}}{\partial q}; \qquad {}^{ci}J_{Ri} = \frac{\partial\, {}^{ci}\omega_i}{\partial \dot{q}} \tag{14} $$

$\psi(q,\dot{q})_{6\times1}$ là vector lực suy rộng của các lực quán tính ly tâm và quán tính Coriolis, xác định dựa trên ma trận khối như sau:

$$ \psi = [\psi_1, \cdots, \psi_6]^T; \quad \psi_j(q,\dot{q}) = \sum_{k,\ell=1}^{6} (k,\ell;j)\dot{q}_k\dot{q}_\ell; $$

$$ (k,\ell;j) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial m_{kj}}{\partial q_\ell} + \frac{\partial m_{\ell j}}{\partial q_k} - \frac{\partial m_{k\ell}}{\partial q_j} \right) \tag{15} $$

$G(q)_{6\times1}$ là vector lực suy rộng của các lực bảo toàn, xác định dựa trên ma trận khối lượng M(q) như sau:

$$ G = [G_1, \cdots, G_6]^T; \quad G_i = \frac{\partial \Pi}{\partial q_i}; \quad i = \overline{1,6} \tag{16} $$

Π là thế năng của hệ robot.

τ_{6x1} là vector lực suy rộng của các lực dẫn

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

động, được tạo bởi các động cơ, của robot.

Q_{6x1} là vector lực suy rộng của các lực không bảo toàn. Có thể có nhiều thành phần ngoại lực tác dụng lên robot. Tuy vậy, với robot gia công cơ khí như MRM33 thì lực cắt là đáng kể so với các loại lực khác. Do vậy, ở đây chỉ xét đến lực cắt mà dụng cụ tác động lên bề mặt gia công để bóc tách lớp vật liệu trên bề mặt chi tiết gia công, bỏ qua các lực ma sát trong các khớp, ma sát giữa dụng cụ cắt và bề mặt chi tiết gia công, cũng như các lực có thể có khác.

Như đã chỉ ra, ở đây giả thiết lực cắt được xác định dựa trên công thức thực nghiệm, ký hiệu vector F là lực dụng cụ cắt tác dụng lên chi tiết gia công tại điểm cắt, thì lực tác dụng lên dụng cụ là -F:

$$F = \left[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z \right]^T \qquad (17)$$

Gọi các vector r_{fi}, r_E là các vector định vị điểm tiếp xúc giữa dụng cụ và chi tiết gia công, xác định lần lượt theo chuỗi động học robot bàn máy, và robot dụng cụ một cách tương ứng. Như vậy, các ma trận Jacobi của các vector này được xác định:

$$J_{T1} = \frac{\partial r_{fi}}{\partial q}; \;\; J_{T2} = \frac{\partial r_E}{\partial q}; \qquad (18)$$

Một cách tương tự, gọi các vector ω_d, ω_E lần lượt là các vector vận tốc góc của chi tiết gia công (của khâu cuối robot bàn máy) và của dụng cụ (của khâu cuối robot dụng cụ), nhận được các ma trận Jacobi:

$$J_{R1} = \frac{\partial \omega_d}{\partial \dot{q}}; \;\; J_{R2} = \frac{\partial \omega_E}{\partial \dot{q}}; \qquad (19)$$

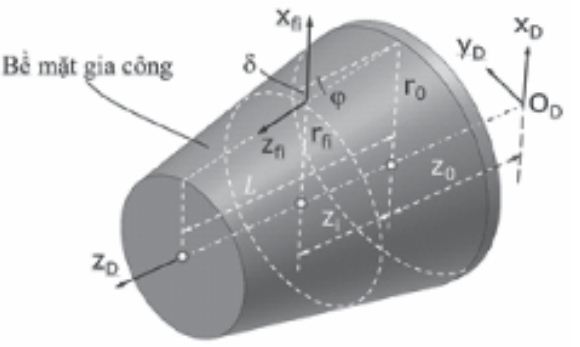
Từ đó, vector lực suy rộng Q của các lực không thế được xác định theo:

$$J_T = J_{T1} - J_{T2}; \;\; J_R = J_{R1} - J_{R2}; \;\; J = \left[J_T, J_R \right]^T; \qquad (20)$$
$$Q = J^T F;$$

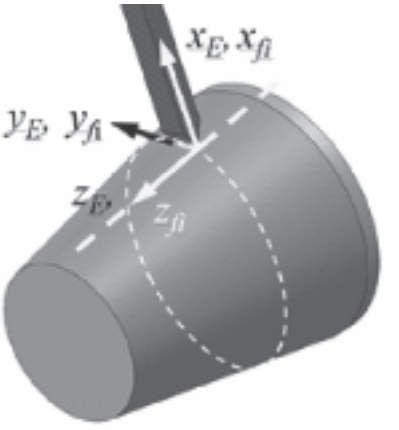
Các phương trình (12)-(20) cho phép giải bài toán động lực học robot MRM33.

5. ÁP DỤNG

Một ví dụ được thực hiện là robot tiện tinh bề mặt cong hình côn, Hình 2.



Hình 2. Bề mặt gia công bởi MRM33



Hình 3. Tiếp xúc dụng cụ - Bề mặt gia công

Bảng 2. Các thông số cấu trúc chi tiết gia công và thông số công nghệ

z_0	r_0	L	φ	v_c	s_t	b
25mm	40mm	120mm	10°	25m/s	60mm/s	0.01mm

Các thông số cấu trúc chi tiết gia công và thông số công nghệ được dẫn ra trong Bảng 2. Trong đó, các thông số cấu trúc được chỉ ra tương ứng trên Hình 2. Các thông số chế độ công nghệ gồm v_c là vận tốc cắt, b là chiều sâu cắt và lượng chạy dao vòng được quy ra lượng chạy dao theo thời gian là s_t.

Quá trình gia công tiện tinh được thực hiện bởi mũi dao di chuyển dọc theo đường dụng cụ là đường sinh của bề mặt gia công sao cho mũi dao tiếp xúc với bề mặt hình côn của chi tiết gia công.

Đặc trưng hình học của bề mặt gia công tại mỗi điểm trên đường dụng cụ có thể biểu diễn bởi một hệ tọa độ $x_{fi}y_{fi}z_{fi}$ sao cho trục x_{fi} pháp tuyến với bề mặt gia công tại điểm fi trên đường dụng cụ. Trục z_{fi} nằm dọc theo đường sinh, trục y_{fi} tạo thành hệ tọa độ thuận.

Hệ tọa độ dụng cụ $R_E = x_E y_E z_E$ đặt tại mũi dao xác định bởi trục x_E pháp tuyến với lưỡi cắt, trục z_E vuông góc trục x_E và cạnh lưỡi cắt, trục y_E tạo thành hệ tọa độ thuận. Điều kiện kỹ thuật gia công là hệ tọa độ R_E và hệ tọa độ bề mặt gia công $x_{fi}\, y_{fi}\, z_{fi}$ trùng nhau, Hình 3:

$$x_B y_B z_B = x_{fi} y_{fi} z_{fi} \tag{21}$$

Từ các thông số đã cho, có thể tính quy luật chuyển động trong không gian thao tác, tức là chuyển động của dụng cụ trong hệ tọa độ bàn kẹp $R_D = x_D y_D z_D$.

Áp dụng phương pháp tính toán đã trình bày cũng như dựa trên phương pháp tính toán với chi tiết gia công đã tính toán trong [12] và nhận được kết quả về quy luật chuyển động của robot.

Trong phần này chỉ đưa ra các thông số động lực học và kết quả tính toán lực dẫn động dựa trên quy luật chuyển động đã biết. Bảng thông số động lực học của MRM33 và chi tiết (được tính cùng khâu L_{13}) được dẫn ra trong Bảng 3.

Bảng 3. Các thông số động lực học robot MRM33 và chi tiết

TT	Vị trí khối tâm, trong hệ tọa độ khâu (m)			Khối lượng (kg)	Mômen quán tính khối lượng, trong hệ tọa độ gắn với trọng tâm (kg.m²)					
	x_{Ci}	y_{Ci}	z_{Ci}		I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	I_{xy}	I_{yz}	I_{zx}
Thông số động lực học của robot bàn máy										
L_{11}	-0.03041	-0.03812	0	3.63992	0.003604	0.004955	0.004984	0.001443	0	0
L_{12}	-0.11474	0	0	3.21316	0.000705	0.020394	0.020506	0	0	0
L_{14}	-0.02487	0	0.10412	7.86931	0.050525	0.067348	0.021537	0	0	0.020374
Thông số động lực học của robot dụng cụ										
L_{21}	-0.03041	-0.03812	0	3.63992	0.003604	0.004955	0.004984	0.001443	0	0
L_{22}	0	0.005723	0.072543	3.24218	0.014628	0.014122	0.001339	0	-0.001346	0
L_{23}	0.10703	-0.01944	0.003997	2.11990	0.000901	0.001094	0.001332	-0.000148	0	0.000001

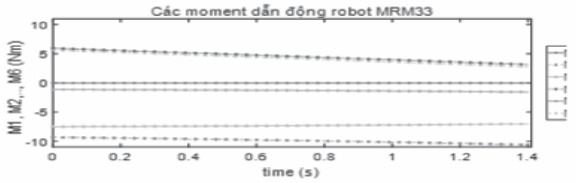
Không giảm tổng quát, quá trình tiện tinh lực cắt sinh ra khá nhỏ và lượng vật liệu bóc tách (phoi) từ bề mặt gia công được cho là đồng đều nên ta tính sơ bộ lực cắt như sau:

$$F = \left[10, 20, 20, 0, 0, 0\right]^T \tag{22}$$

Ở đây, thành phần lực cắt theo hướng xé vật liệu tách từ bề mặt gia công và theo phương pháp tuyến thường lớn hơn so với thành phần theo hướng tiến dao. Các thành phần moment không đáng kể nên cho bằng không.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Hình 4 là các đồ thị biểu diễn kết quả tính toán lực dẫn động các khâu theo thời gian. Hình 5 là hình ảnh từ chương trình mô phỏng quá trình gia công.



Hình 4. Đồ thị lực dẫn động các khâu theo thời gian t.



Hình 5. Mô phỏng robot tác hợp gia công tiện tinh bề mặt chi tiết hình côn; https://studio.youtube.com/video/hn0daUFb4lk/edit

6. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày bài toán động học, động lực học robot tác hợp gồm hai cách tay robot chuỗi hở 3+3 bậc tự do, MRM33. Phương pháp kết hợp phép biến đổi tọa độ và ma trận truyền biến đổi tọa độ thuần nhất cho phép nhận được phương trình động học, tạo thuận lợi cho việc thiết kế quỹ đạo chuyển động, lập chương trình gia công. Phương pháp thiết lập phương trình vi phân chuyển động được trình bày thuận lợi cho việc lập trình tự động và giải bài toán động lực học MRM33. Kết quả tính toán động học, thiết kế quỹ đạo chuyển động cung cấp dữ liệu cho bài toán tính lực dẫn động cho robot. Kết quả mô phỏng hoạt động cung cấp hình ảnh trực quan, củng cố độ tin cậy của kết quả nghiên cứu và tạo cơ sở cho nghiên cứu phát triển.❖

Ngày nhận bài: **10/11/2025**
Ngày phản biện: **15/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Wang Wenbo, Guo Qiang, Yang Zhibo, Jiang Yan, Xu Jinting, "*A state-of-the-art review on robotic milling of complex parts with high efficiency and precision*". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 79 (2023) Article 102436, DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102436.

[2]. Wei Ji, Lihui Wang, "*Industrial robotic machining: a review*". Int. J. Adv. Manuf. Technol. 103 (2019) 1239-1255, DOI: 10.1007/s00170-019-03403-z.

[3]. John Pandremenos, Christos Doukas, Panagiotis Stavropoulos, Giorgos Chryssolouris "*Machining with robots: A critical review*". In Proceedings of the DET 2011, Athens, Greece, 28-30 September 2011 1-8.

[4]. Wei Ji, Lihui Wang, "*Industrial robotic machining: a review*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 103 (2019) 1239-1255, DOI: 10.1007/s00170-019-03403-z.

[5]. André F.V. Pedroso, Naiara P.V. Sebbe, Rita C.M. Sales-Contini, Francisco J.G. Silva, Rúben D.F.S. Costa, Iván I. Sánchez, Raul D.S.G. Campilho, "*An overview on the recent advances in robot-assisted compensation methods used in machining lightweight materials*". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 91 (2025) Article 102844, DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102844.

[6]. Alexander Verl, Anna Valente, Shreyes Melkote, Christian Brecher, Erdem Ozturk, Lutfi Taner Tunc, "*Robots in machining*". CIRP Annals. 68 (2) (2019) 799-822, DOI: 10.1016/j.cirp.2019.05.009

[7]. Javad Jahanpour, Mehdi Motallebi, Mojtaba Porghoveh, "*A Novel Trajectory Planning Scheme for Parallel Machining Robots Enhanced with NURBS Curves*". Journal of Intelligent & Robotic Systems 82 (2016) 257-275, DOI: 10.1007/s10846-015-0239-6

[8]. Michal Petko, Grzegorz Karpiel, Krzysztof Gac, Grzegorz Góra, Krzysztof Kobus, Janusz Ochoński, "*Trajectory tracking controller of the hybrid robot for milling*". Mechatronics 37 (2016) 100-111.

[9]. Souflas, Thanassis; Gerontas, Christos; Bikas, Harry; Stavropoulos, Panagiotis, "*On the Optimization of Robot Machining: A Simulation-Based*". Process Planning Approach Machines 12 (2024) Article 521, DOI: 10.3390/machines12080521.

[10]. Hà Thanh Hải, Đỗ Thị Kim Liên, Phan Bùi Khôi, "*Thiết kế quỹ đạo và mô phỏng hoạt động của robot tác hợp gia công tạo hình bề mặt cong phức tạp*". Hội nghị Cơ học Kỹ thuật toàn quốc kỷ niệm 40 năm thành lập Viện Cơ học, Hà Nội 09/4/2019 211-219.

[11]. Phan Bùi Khôi, Hà Thanh Hải, Trần Minh Thúy (2020), "*Phân tích động học cho robot gia công phay*". Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI, Hà Nội, 02-03/12/2022 648-656.

[12]. Trần Minh Thúy, "*Mô hình hóa động học robot tác hợp gia công cơ khí*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, tháng 6/2025.

[13]. Phan Bui Khoi (1997), "*Applying Principle of Compatibility for Analyzing Forces of Mechanism of Relative Manipulation Robot*". Thesis of PhD. IMASH. RAS, Moscow.

[14]. Phan Bui Khoi, "*Dynamical Investigation of Relation Manipulation Mechanism in Mechanical Processing*". Proceeding of National Conference on Mechanics, vol. 1, pp. 181-190, 2004.

[15]. Phan Bùi Khôi, Hà Thanh Hải, Trần Minh Thúy, "*Mô hình hóa động lực học robot gia công cơ khí*". Tuyển tập công trình khoa học, Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ 11; NXB. Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 12/2022, trang 657-665.

[16]. Ha Thanh Hai, "*Inverse dynamic analysis of miling machining robot: application in calibration of cutting force*". Vietnam Journal of Science and Technology, 57 (6), 2019, pp. 773-787.

NGHIÊN CỨU HỆ THỐNG GIẢI NHIỆT CHO KHUÔN PHUN ÉP NHỰA

STUDY ON THE COOLING SYSTEM FOR INJECTION MOLD

Vũ Thị Như Quỳnh, Trần Minh Thế Uyên, Phạm Sơn Minh, Bùi Chấn Thạnh*
Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: 2390414@student.hcmute.edu.vn; uyentmt@hcmute.edu.vn; minhps@hcmute.edu.vn; *thanhbc.ncs@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc ứng dụng hệ thống lớp giải nhiệt (cooling layer) nhằm kiểm soát phân bố nhiệt trong quá trình gia nhiệt khuôn ép phun, đặc biệt đối với sản phẩm nhựa thành mỏng. Một mô hình nghiên cứu đã được xây dựng và phân tích thông qua mô phỏng số và thực nghiệm. Phần mô phỏng được thực hiện bằng ANSYS CFX để đánh giá sự truyền nhiệt và dòng chảy trong lớp giải nhiệt, trong khi thực nghiệm sử dụng camera hồng ngoại để ghi nhận phân bố nhiệt trên bề mặt khuôn. Các thông số công nghệ quan trọng như nhiệt độ nước vào, lưu lượng dòng chảy và chiều dày lớp giải nhiệt được khảo sát để đánh giá ảnh hưởng đến sự đồng đều nhiệt và hiệu suất gia nhiệt. Kết quả cho thấy lớp giải nhiệt giúp cải thiện đáng kể sự phân bố nhiệt, rút ngắn thời gian gia nhiệt và giảm sai lệch nhiệt so với kênh giải nhiệt truyền thống. Sai số giữa mô phỏng và thực nghiệm dưới 5%, khẳng định tính chính xác và tiềm năng ứng dụng của phương pháp trong nâng cao chất lượng sản phẩm và tối ưu hóa quy trình ép phun.

Từ khóa: *Khuôn phun ép nhựa; Phân bố nhiệt độ; Gia nhiệt khuôn; Giải nhiệt khuôn; Dòng chảy nhựa; Tỉ lệ điền đầy.*

ABSTRACT

This study investigates the application of a cooling layer system for thermal control in injection mold heating, focusing on thin-walled plastic products. A research model was developed and analyzed using both numerical simulations and experimental validation. The simulation, performed with ANSYS CFX, evaluated heat transfer and fluid flow inside the cooling layer, while infrared thermography was employed to capture temperature distribution on the mold surface during experiments. Key process parameters, including inlet water temperature, flow rate, and cooling layer thickness, were varied to assess their effects on thermal uniformity and heating efficiency. Results indicated that the cooling layer significantly improved temperature distribution across the mold cavity, reduced heating time, and minimized thermal gradients compared with conventional straight-drilled channels. The close agreement between simulation and experimental data (error <5%) confirmed the reliability of the model. These findings highlight the potential of cooling-layer-integrated molds for enhancing product quality and optimizing industrial injection molding processes.

Keywords: *Injection molding; Temperature distribution; Mold heating; Mold cooling; Melt flow; Filling percent.*

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh công nghiệp chế tạo sản phẩm nhựa ngày càng phát triển, công nghệ ép phun (injection molding) đã trở thành một trong những phương pháp phổ biến và hiệu quả nhất để sản xuất hàng loạt các chi tiết nhựa có hình dạng phức tạp và độ chính xác cao. Đặc biệt, các sản phẩm nhựa thành mỏng (thin-walled plastic parts) ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực điện tử, y tế, ô tô và hàng tiêu dùng. Tuy nhiên, việc sản xuất các sản phẩm này đối mặt với nhiều thách thức, trong đó nổi bật là các khuyết tật như short-shot, cong vênh, và đường hàn, chủ yếu bắt nguồn từ sự không đồng đều nhiệt độ khuôn và hiện tượng đông đặc nhanh của vật liệu khi tiếp xúc với thành khuôn [1-4].

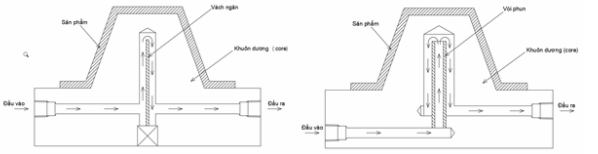
Hệ thống làm mát khuôn truyền thống sử dụng các kênh khoan thẳng thường không đáp ứng được yêu cầu kiểm soát nhiệt độ chính xác, dẫn đến phân bố nhiệt không đồng đều và chu kỳ làm mát kéo dài, vốn chiếm đến 60-80% tổng chu kỳ ép [5-8]. Để khắc phục nhược điểm này, nhiều hướng nghiên cứu đã được triển khai như kênh làm mát đồng hình (conformal cooling channel – CCC) chế tạo bằng in 3D kim loại, hệ thống gia nhiệt chủ động bằng khí nóng, hoặc tích hợp lớp giải nhiệt (cooling layer) trong cấu trúc khuôn. Các giải pháp này không chỉ giúp cải thiện phân bố nhiệt mà còn rút ngắn thời gian chu kỳ, nâng cao chất lượng và tính ổn định của sản phẩm [9-12].

Trên thế giới, các nghiên cứu gần đây tập trung vào việc tối ưu hóa thiết kế kênh làm mát bằng các phương pháp số như FEM và CFD, kết hợp với trí tuệ nhân tạo để kiểm soát nhiệt độ thời gian thực. Trong nước, nhiều công trình đã bước đầu ứng dụng mô phỏng số và công nghệ in 3D kim loại để phát triển các cấu trúc làm mát mới, mang lại hiệu quả rõ rệt trong cải thiện hiệu suất truyền nhiệt.

Từ cơ sở trên, nghiên cứu ứng dụng lớp giải nhiệt (cooling layer) trong gia nhiệt khuôn ép phun nhựa thành mỏng được xem là hướng đi tiềm năng, vừa có ý nghĩa khoa học trong việc làm rõ cơ chế truyền nhiệt trong khuôn, vừa mang giá trị thực tiễn trong cải tiến quy trình sản xuất công nghiệp [13-20].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Các giai đoạn chính trong chu kỳ ép phun bao gồm thời gian đóng khuôn, làm đầy, giữ áp suất, làm mát và mở khuôn [21, 22]. Hình 1 cho thấy sự phân bố thời gian của từng giai đoạn trong một chu kỳ ép [23], trong đó, thời gian làm mát đóng vai trò quan trọng nhất, chiếm từ 60% đến 80% trên tổng thời gian của một chu kỳ ép phun đối với sản phẩm nhựa [24]. Vì vậy, thời gian chu kỳ ép phun và năng suất sản phẩm nhựa có sự liên kết chặt chẽ với quá trình làm mát, việc giảm thời gian làm mát là yếu tố quan trọng trong việc nâng cao hiệu quả sản xuất.



Hình 1. Một số hệ thống giải nhiệt

Thời gian làm mát chủ yếu phụ thuộc vào hiệu quả làm mát của hệ thống kênh làm mát trong khuôn. Tuy nhiên, trong các phương pháp sản xuất truyền thống, kênh làm mát thường được thiết kế theo dạng các lỗ khoan, điều này gây ra sự không đồng đều về khoảng cách giữa kênh làm mát và lòng khuôn [25]. Kết quả là, các khu vực gần kênh làm mát sẽ có tốc độ làm mát nhanh hơn, trong khi các khu vực xa sẽ ☞

làm mát chậm hơn. Những khu vực có tốc độ làm mát chậm sẽ kéo dài thời gian làm mát của toàn bộ sản phẩm, từ đó, làm tăng thời gian chu kỳ ép phun và giảm năng suất [26]. Việc ứng dụng hệ thống lớp giải nhiệt (cooling layer) cho sản phẩm 2D có thành mỏng sẽ giúp tối ưu hóa sự phân bố nhiệt của hệ thống mát, giúp nhiệt được loại bỏ nhanh chóng khỏi khuôn và rút ngắn thời gian làm mát, qua đó, cải thiện hiệu quả sản xuất và mang lại lợi ích kinh tế lớn hơn cho doanh nghiệp.

Bảng 1. Một số chất làm làm mát thường được sử dụng

Chất làm mát thông dụng	
Chất làm nguội	Nhiệt độ làm việc °C
Nước	5°C đến 90°C
Dầu khoáng	40°C đến 120°C
Glycol và nước	30°C đến 100°C
Propylene Glycol	-30°C đến 120°C
Ethylene Glycol	-30°C đến 100°C

3. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU VÀ MÔ PHỎNG

3.1. Sản phẩm

Nghiên cứu này đã sử dụng chi tiết có kích thước bao 98,5 mm × 71,9 mm × 1 mm. Tấm insert có kích thước bao là 301 mm × 252 mm × 1 mm như hình 2.



Hình 2. Sản phẩm thiết kế và Tấm lòng khuôn thiết kế

3.2. Hệ thống giải nhiệt Cooling layer

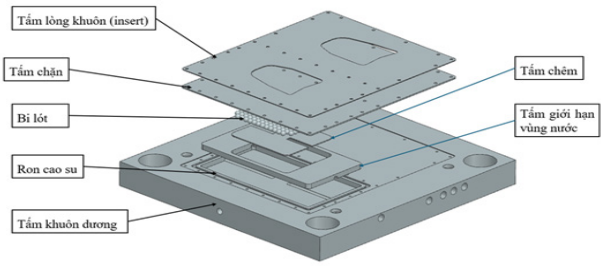
Trong nghiên cứu này, việc xây dựng mô hình nghiên cứu đóng vai trò then chốt nhằm làm rõ sự ảnh hưởng của lớp giải nhiệt (cooling layer) đến quá trình gia nhiệt khuôn ép phun sản phẩm nhựa thành mỏng. Mô hình được phát triển dựa trên cơ sở lý thuyết truyền nhiệt và động lực học chất lỏng, đồng thời được kiểm chứng bằng mô phỏng số và thực nghiệm.

Trước hết, hệ thống khuôn thí nghiệm được thiết kế với cấu trúc đặc thù bao gồm lớp giải nhiệt đặt xen kẽ trong tấm khuôn. Lớp này có nhiệm vụ duy trì sự phân bố nhiệt độ đồng đều, giảm thiểu gradient nhiệt và rút ngắn thời gian gia nhiệt. Các thông số chính của mô hình gồm: nhiệt độ nước đầu vào từ 50°C đến 90°C, chiều dày tấm chặn nước từ 1 đến 3 mm, chiều dày hốc nước từ 2 đến 8 mm, cùng với lưu lượng dòng chảy từ 27,7 đến 122,5 g/s. Việc lựa chọn phạm vi thông số này nhằm mô phỏng các điều kiện công nghiệp thực tế, đồng thời cung cấp cơ sở dữ liệu cho phân tích tối ưu hóa.

Trong giai đoạn mô phỏng, phần mềm ANSYS Fluent được sử dụng để giải bài toán truyền nhiệt và dòng chảy bên trong hệ thống cooling layer. Quá trình mô phỏng tập trung vào việc xác định sự phân bố trường nhiệt trong lòng khuôn, tốc độ ổn định nhiệt độ theo thời gian, và sự thay đổi của gradient nhiệt tại các vị trí quan trọng. Dữ liệu nhiệt độ được trích xuất tại các điểm đặc trưng dọc theo tâm sản phẩm để đánh giá sự đồng đều nhiệt. Ngoài ra, phân tích so sánh được thực hiện giữa trường hợp khuôn có lớp giải nhiệt và khuôn truyền thống sử dụng kênh làm mát khoan thẳng.

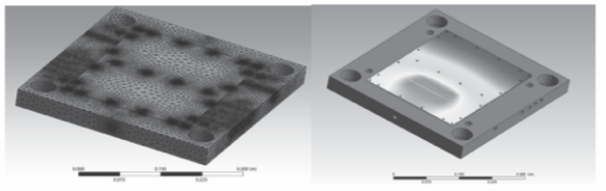
Song song với mô phỏng, một bộ khuôn thực nghiệm được chế tạo, trang bị lớp giải nhiệt và hệ thống gia nhiệt bằng nước nóng

tuần hoàn. Camera hồng ngoại Fluke Ti20 được sử dụng để ghi nhận nhiệt độ bề mặt khuôn, trong khi phần mềm Smartview hỗ trợ xử lý và trực quan hóa dữ liệu. Các thí nghiệm được tiến hành trong khoảng thời gian 600 giây, tương ứng với chu kỳ gia nhiệt điển hình trong công nghiệp. Dữ liệu đo được bao gồm sự thay đổi nhiệt độ tại nhiều vùng trên lòng khuôn, từ đó đánh giá khả năng điều khiển nhiệt độ của lớp giải nhiệt trong điều kiện vận hành thực tế.



Hình 3. Kết cấu khuôn

Kết quả phân tích cho thấy, mô hình nghiên cứu này có khả năng phản ánh chính xác cơ chế truyền nhiệt trong khuôn ép phun có tích hợp cooling layer. Đặc biệt, sự kết hợp giữa mô phỏng và thực nghiệm giúp nâng cao độ tin cậy, đồng thời chỉ ra được sự chênh lệch nhỏ giữa dữ liệu lý thuyết và thực nghiệm (sai số < 5%). Điều này chứng minh tính hợp lý của mô hình cũng như tiềm năng áp dụng rộng rãi trong sản xuất.



Hình 4. Mô hình lưới và kết quả mô phỏng

Nhìn chung, việc xây dựng mô hình nghiên cứu trong mục 3.3 không chỉ cung cấp công cụ hữu hiệu để dự đoán và phân tích ảnh hưởng của lớp giải nhiệt, mà còn tạo nền tảng khoa học cho các nghiên cứu mở rộng về tối ưu hóa thiết kế khuôn và cải thiện chất lượng sản phẩm nhựa thành mỏng.

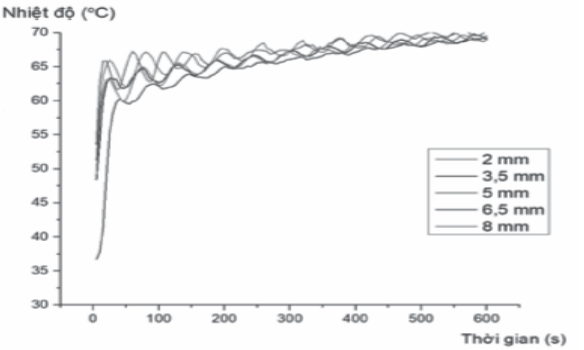
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mục tiêu chính của việc phân tích kết quả mô phỏng là kiểm nghiệm và đánh giá mức độ tương quan giữa các thông số thu được từ mô phỏng lý thuyết với dữ liệu thực nghiệm, nhằm xác định độ chính xác của mô hình thực nghiệm.

Kết quả mô phỏng được phân tích dựa trên sự phân bố nhiệt độ tại bề mặt sản phẩm, trong đó nghiên cứu tập trung vào khu vực biên dạng sản phẩm, cụ thể là vùng hốc nước. Nhằm nâng cao độ chính xác và tính trực quan trong quá trình đánh giá, nhiệt độ được trích xuất dọc theo một đường thẳng đi qua tâm sản phẩm với tọa độ là X = -57 mm đến 57 mm, Y = -75 mm, Z = 0, tại các thời điểm 300 s.

Kết quả được thể hiện qua biểu đồ tốc độ gia nhiệt (hình 5) với các thông số:

- Nhiệt độ nước đầu vào: 70°C;
- Chiều dày tấm chặn: 2 mm;
- Chiều dày hốc nước: 2 mm, 3,5 mm, 5 mm, 6,5 mm, 8 mm;
- Lưu lượng: 75,1 g/s.



Hình 5. Biểu đồ thể hiện tốc độ gia nhiệt theo thời gian khi thay đổi chiều dày hốc nước

***Nhận xét:**

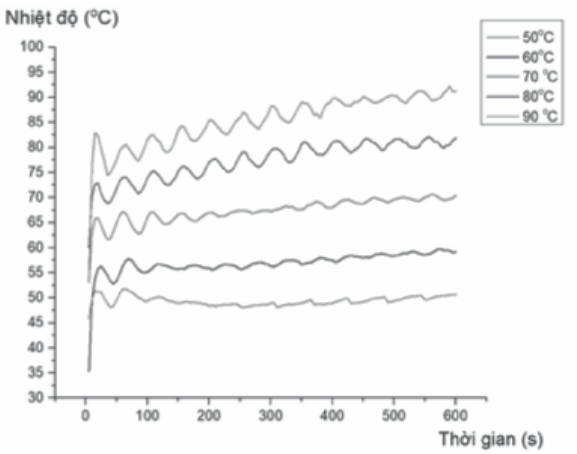
Biểu đồ cho thấy sự ảnh hưởng của chiều dày hốc nước đến tốc độ gia nhiệt. Các đường cong đại diện cho các chiều dày khác nhau cho thấy rằng chiều dày hốc nước có ảnh hưởng đến thời gian cần thiết để nước đạt đến nhiệt độ ổn định.

• Có thể thấy rằng các đường cong sau một khoảng thời gian nhất định sẽ tiến tới giá trị nhiệt độ nước đầu vào là 70°C.

• Chiều dày 2 mm và 3.5 mm cho thấy tốc độ gia nhiệt nhanh hơn so với độ dày lớn hơn như 6,5 mm và 8 mm. Điều này chứng minh rằng chiều dày hốc nước mỏng hơn giúp tăng cường khả năng truyền nhiệt và tốc độ gia nhiệt.

Kết quả được thể hiện qua biểu đồ tốc độ gia nhiệt (hình 6) với các thông số:

- Nhiệt độ nước đầu vào: 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C;
- Chiều dày tấm chặn: 2 mm;
- Chiều dày hốc nước: 5 mm;
- Lưu lượng nước: 75,1 g/s.



Hình 6. Biểu đồ thể hiện tốc độ gia nhiệt theo thời gian khi thay đổi nhiệt độ nước

***Nhận xét:**

Nhiệt độ khuôn ảnh hưởng lớn đến quá trình ép phun. Nước ở nhiệt độ cao như 90°C cho phép gia nhiệt khuôn nhanh chóng, giúp nhựa dễ dàng điền đầy khuôn, nhưng cần thời gian lâu hơn để nước đạt đến nhiệt độ ổn định ở mức 90°C. Ngược lại, nhiệt độ nước đầu vào ở mức 50°C lại dễ dàng đạt được nhiệt độ ổn định. Điều này cho thấy rằng sự lựa chọn nhiệt độ nước cần phải cân nhắc kỹ lưỡng dựa trên mục đích sản xuất và tính chất của từng loại nhựa, nhằm tối ưu hóa cả hiệu suất sản xuất lẫn chất lượng sản phẩm cuối.

5. KẾT LUẬN

Qua kết quả thực nghiệm và phân tích, có thể khẳng định rằng việc ứng dụng lớp giải nhiệt (cooling layer) trong gia nhiệt khuôn ép phun đã mang lại những cải thiện đáng kể về khả năng kiểm soát và phân bố nhiệt độ. Các thí nghiệm cho thấy hệ thống cooling layer giúp duy trì nhiệt độ khuôn ổn định và đồng đều hơn so với phương pháp truyền thống, đồng thời rút ngắn thời gian gia nhiệt và giảm thiểu sai lệch nhiệt giữa các vùng của lòng khuôn. Điều này góp phần hạn chế các khuyết tật thường gặp ở sản phẩm thành mỏng như cong vênh, đường hàn và co ngót.

So sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm cũng cho thấy sự tương quan cao, với sai số nhỏ hơn 5%, chứng tỏ tính chính xác và độ tin cậy của mô hình nghiên cứu. Các kết quả đạt được không chỉ khẳng định hiệu quả của lớp giải nhiệt trong nâng cao chất lượng sản phẩm mà còn mở ra hướng phát triển cho các giải pháp tối ưu hóa khuôn ép nhựa trong công nghiệp. Nhìn chung, chương 4 đã chứng minh giá trị thực tiễn của hệ thống cooling layer, làm nền tảng vững chắc cho việc phát triển các nghiên cứu ứng dụng và cải tiến tiếp theo.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phạm Sơn Minh, Trần Minh Thế Uyên, Bùi Chấn Thạnh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Vũ Thị Như Quỳnh, Bùi Chấn Thạnh.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện và hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **09/8/2025**
Ngày phản biện: **21/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. M.-L. Wang, R.-Y. Chang, và C.-H. Hsu, "*Molding Simulation: Theory and Practice*". Carl Hanser Verlag, 2018.

[2]. H. P. Kale và U. V. Hambire, "*Optimization of Injection Moulding Process Parameter for Reducing Shrinkage of High Density Polyethylene (HDPE) Material*". Proceedings of the 69th IRF International Conference, Pune, India, Mar. 2017.

[3]. SS. Saxena, M. S. Khidiya, B. L. Salvi, và M. A. Saloda, "*An Experimental Study of Effects of Injection Molding Parameters on Shrinkage and Plastic Fill*". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 7, no. 10, 2020.

[4]. P. Chinchkhede và K. M. Ashtankar, "*Determining Appropriate Cooling System for Plastic Injection Molding Through Computer Simulation*". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 3, no. 6, Jun. 2016.

[5]. S. Arman và I. Lazoglu, "*A comprehensive review of injection mold cooling by using conformal cooling channels and thermally enhanced molds*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 127, pp. 2035-2106, Jun. 2023.

[6]. T. Lucyshyn, L.-V. D. Enffans d'Avernas, và C. Holzer, "*Influence of the Mold Material on the Injection Molding Cycle Time and Warpage Depending on the Polymer Processed*". Polymers, vol. 13, no. 18, Art. no. 3196, Sep. 2021.

[7]. M. Koli, "*Cycle Time Optimization in Injection Moulding*". International Journal of Scientific Research & Engineering Trends, vol. 4, no. 6, Nov.-Dec. 2018.

[8]. Zhongde, "*Injection Molding Cooling Systems, Cooling Methods and Design*". Zhongde Knowledge Hub, Oct. 12, 2023.

[9]. D. E. Dimla, M. Camilotto, và F. Miani, "*Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools*". Journal of Materials Processing Technology, vol. 164-165, pp. 1294-1300, May 2005.

[10]. P. D. Nam, P. L. Bac, và P. V. Sang, "*Nghiên cứu hiệu quả làm mát khuôn ép nhựa sử dụng phương pháp mô phỏng số*". Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, 2022.

[11]. Đ. X. Phương, "*Tối đa hóa hiệu năng của hệ thống làm mát khuôn đúc ép phun nhựa chế tạo bằng công nghệ in 3D kim loại*". Hội nghị Khoa học và Công nghệ Toàn quốc về Cơ khí lần thứ V, 2018.

[12]. T. M. T. Uyên, "*Nghiên cứu ảnh hưởng của gia nhiệt khuôn phun ép bằng khí nóng đến độ bền sản phẩm nhựa dạng thành mỏng*". Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, 2020.

[13]. G. K. P. Kumar, P. R. P. Singh, and D. A. Raj, "*Active Heating Technology for Injection Molding: A Review*". Journal of Materials Processing Technology, vol. 255, pp. 152-167, 2018.

[14]. S. Jagadeesan and K. Annamalai, "*The Impact of Thermal Conductivity Mold Material in the Injection Molding Process*". SSRG International Journal of Mechanical ☞

Engineering, vol. 12, no. 5, pp. 27-40, May 2025.

[15]. C. E. Mgbemena and F. N. Okeagu, "*Development of an IoT-based real-time remote monitoring device for the maintenance of injection moulding machines in plastic industries*". UNIZIK Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 260-278, Jun. 2023.

[16]. A. Torres-Alba, J. M. Mercado-Colmenero, J. A. Amate-Teva, and C. Martín-Doñate, "*Application of New Conformal Cooling Systems for Sustainable Injection Molds*". In: Proc. XV Ibero-American Congress of Mechanical Engineering, pp. 284-290, Aug. 2023.

[17]. A. Torres-Alba, J. M. Mercado-Colmenero, D. Diaz-Perete, and C. Martin-Doñate, "*A New Conformal Cooling Design Procedure for Injection Molding Based on Temperature Clusters and Multidimensional Discrete Models*". Polymers, vol. 12, no. 1, p. 154, 2020.

[18]. D. C. J. Chalicheemalapalli, T. Tröster, and T. Marten, "*Optimizing Injection Molding Tool Design with Additive Manufacturing: A Focus on Thermal Performance and Process Efficiency*". Materials, vol. 18, no. 3, p. 571, 2025.

[19]. A. Gnatowski, M. Golas, and R. Gnatowska, "*Numeric modelling of the temperature distribution of moulded piece in the simulation of injection molding process*". AIP Conference Proceedings, vol. 1648, p. 850126, Mar. 2015.

[20]. G. Wagner and J. M. Nóbrega, "*Conformal Cooling Channels in Injection Molding and Heat Transfer Performance Analysis Through CFD – A Review*". Energies, vol. 18, no. 8, Art. no. 1972, Apr. 2025.

[21]. D. V. Rosato, D. V. Rosato, and M. G. Rosato, "*Injection Molding Handbook*", 3rd ed.. Springer, 2000.

[22]. I. Adam, W. B. du Preez, and J. Combrinck, "*Design considerations for additive manufacturing of conformal cooling channels in injection moulding tools*". Central University of Technology, 2016.

[23]. J. Li, Y. C. Ong, and W. M. W. Muhamad, "*Optimization design of injection mold conformal cooling channel for improving cooling rate*". Processes, 2024.

[24]. D. E. Dimla, M. Camilotto, and F. Miani, "*Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools*". J. Mater. Process. Technol., vol. 164-165, pp. 1294-1300, May 2005.

[25]. G. Venkatesh, Y. R. Kumar, and G. Raghavendra, "*Comparison of straight line to conformal cooling channel in injection molding*". Mater. Today Proc., vol. 4, no. 2, pt. A, pp. 1167-1173, 2017.

[26]. J. Li, Y. C. Ong, and W. M. W. Muhamad, "*Optimization design of injection mold conformal cooling channel for improving cooling rate*". Processes, 2024.

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO MÔ HÌNH MÔ PHỎNG BÃI ĐỖ XE XẾP HÌNH NHIỀU TẦNG SỬ DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PLC S7-1200 VÀ PHẦN MỀM TIA PORTAL

RESEARCH ON MANUFACTURE OF SIMULATING MODEL OF MULTI-STOREY PARKING LOT USING PLC S7-1200 CONTROLLER AND TIA PORTAL SOFTWARE

Dương Hải Nam*, Vũ Thị Phượng
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
**Email: dhnam@uneti.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu, thiết kế và chế tạo mô hình mô phỏng bãi đỗ xe xếp hình nhiều tầng. Nhóm tác giả sử dụng bộ điều khiển lập trình PLC Siemens S7-1200 kết hợp phần mềm TIA Portal để lập trình và mô phỏng thuật toán điều khiển. Bãi đỗ xe được thiết kế dạng tòa nhà vuông với cơ cấu nâng – hạ tự động, tích hợp các cảm biến, công tắc hành trình và giao diện giám sát HMI nhằm tối ưu hóa quá trình gửi và lấy xe. Quá trình lập trình và mô phỏng cho phép hệ thống hoạt động theo chế độ tự động hoặc bằng tay, đảm bảo độ chính xác vị trí, an toàn, và tiết kiệm năng lượng. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình bãi đỗ xe hoạt động ổn định, đáp ứng tốt nhu cầu thực tế về bãi đỗ xe thông minh tại các đô thị lớn.

Từ khóa: *TIA Portal; Bãi đỗ xe xếp hình; PLC.*

ABSTRACT

This paper presents the results of research, design and fabrication of a multi-storey car park simulation model. The authors use the Siemens S7-1200 PLC programmable controller combined with TIA Portal software to program and simulate the control algorithm. The car park is designed in the form of a square building with an automatic lifting and lowering mechanism, integrating sensors, limit switches and HMI monitoring interface to optimize the process of sending and retrieving cars. The programming and simulation process allows the system to operate in automatic or manual mode, ensuring position accuracy, safety and energy saving. The research results show that the car park model operates stably, meeting the actual needs of smart parking in large cities.

Keywords: *TIA Portal; Puzzle Parking; PLC.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng tại Việt Nam, số lượng phương tiện cá nhân, đặc biệt là ô tô, đã gia tăng mạnh mẽ. Tuy nhiên, không gian dành cho bãi đỗ xe trở nên ngày càng eo hẹp, nhất là tại các thành phố lớn như Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh. Điều này dẫn đến tình trạng ùn tắc giao thông, tràn lấn lề đường và mất mỹ quan đô thị, đặt ra yêu cầu cấp thiết về giải pháp quản lý và tối ưu không gian đỗ xe thông minh [1].

Hệ thống bãi đỗ xe tự động, sử dụng các thiết bị điều khiển lập trình (PLC), giao diện người-máy (HMI) và công nghệ xử lý hình ảnh, được coi là phương án khả thi để giải quyết các vấn nêu trên. Ví dụ, đề tài tại Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã nghiên cứu hệ thống điều khiển bãi đỗ xe thông minh sử dụng PLC S7-1500 kết hợp xử lý ảnh, bao gồm việc phân tích ưu và nhược điểm của bãi đỗ truyền thống, thiết kế khối điều khiển, điều khiển bằng PLC cùng giao diện HMI vận hành hiệu quả [2].

Tương tự, một đề tài khác tập trung vào mô hình điều khiển, giám sát bãi giữ xe ô tô tự động, sử dụng PLC làm bộ xử lý trung tâm, tích hợp công nghệ RFID và nhận diện biển số qua C# để nâng cao độ chính xác và an toàn. Hệ thống vận hành hoàn toàn tự động trong quá trình gửi và trả xe, đồng thời có chế độ chạy tay dự phòng để xử lý sự cố [3].

Ở tầm quốc tế, các nghiên cứu cũng ghi nhận xu hướng ứng dụng PLC và SCADA/HMI trong các hệ thống bãi đỗ xe tự động. Một công trình tận dụng PLC Siemens Step 7 kết hợp phần mềm WinCC Flexible Advanced để thiết kế bãi đỗ xe hoàn toàn tự động, cho phép giám sát từ xa và điều khiển hiệu quả mô hình đỗ 6 chiếc xe qua các khoảng thời gian khác nhau, thể hiện tính linh hoạt và giảm thiểu thao tác thủ công [4].

Tại Việt Nam, thị trường hệ thống bãi đỗ xe thông minh đang trên đà tăng trưởng nhanh chóng với tốc độ dự kiến gần 19% và giá trị thị trường ước đạt gần 100 triệu USD vào năm 2029. Những công nghệ như cảm biến siêu âm, nhận diện biển số và hệ thống hướng dẫn đỗ xe được dự đoán sẽ đóng vai trò then chốt trong tương lai gần [5].

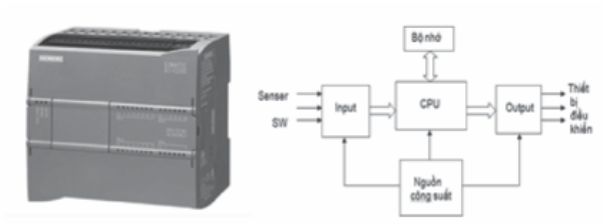
Từ thực trạng trên, việc thiết kế và xây dựng hệ thống bãi đỗ xe tự động, tối ưu không gian, an toàn, linh hoạt và dễ vận hành không chỉ đáp ứng nhu cầu hiện hữu mà còn góp phần tích cực vào mục tiêu xây dựng đô thị thông minh. Do đó, việc nghiên cứu, thiết kế và chế tạo mô hình mô phỏng bãi đỗ xe xếp hình nhiều tầng là phù hợp và cấp thiết trong tình hình hiện nay.

2. BỘ ĐIỀU KHIỂN PLC S7-1200 VÀ PHẦN MỀM TIA PORTAL

Sơ đồ mô phỏng hoạt động của hệ thống bãi đỗ xe xếp hình hai tầng được thực hiện trên phần mềm TIA Portal V16. Hệ thống này sử dụng một số khối chính như: bộ điều khiển lập trình PLC Siemens S7-1200, giao diện giám sát HMI KTP700 Basic, các cảm biến quang – từ, công tắc hành trình và cơ cấu chấp hành là động cơ điện [6, 7].

Trong điều khiển tự động có thể sử dụng nhiều loại PLC khác nhau (S7-200, S7-300, S7-400, S7-1200, S7-1500…), mỗi loại có ưu – nhược điểm riêng tùy ứng dụng. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả lựa chọn PLC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/Rly (hình 1). Đây là dòng PLC thế hệ mới, có chi phí hợp lý, khả năng mở rộng linh hoạt và được tích hợp cổng

truyền thông Profinet. Thông số kỹ thuật chính của PLC S7-1200 CPU 1214C được trình bày trong bảng 1.

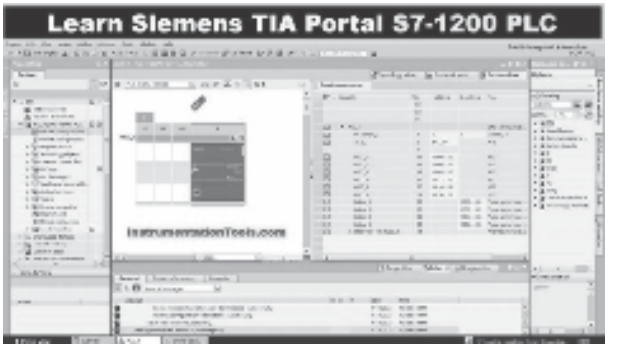


Hình 1. Bộ PLC S7-1200

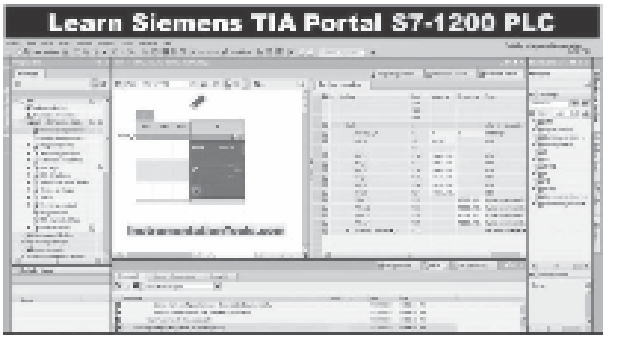
Bảng 1. Thông số kỹ thuật chính của PLC S7-1200 CPU 1214C

Thông số	Giá trị
Nguồn cung cấp	24 VDC
Bộ nhớ chương trình	100 KB
Bộ nhớ dữ liệu	50 KB
Tích hợp I/O	14 ngõ vào số, 10 ngõ ra số, 2 ngõ vào analog
Cổng truyền thông	PROFINET (Ethernet)
Số lượng module mở rộng	8 module tín hiệu, 3 module truyền thông
Chu kỳ quét	1 µs/lệnh logic cơ bản

TIA Portal là nền tảng phần mềm tích hợp của Siemens dùng để lập trình, cấu hình và giám sát các thiết bị tự động hóa. Phần mềm bao gồm các công cụ như STEP 7 (lập trình PLC), WinCC (thiết kế HMI/SCADA) và Startdrive (cấu hình biến tần) trong một môi trường thống nhất. TIA Portal cho phép thiết kế, mô phỏng và kiểm thử chương trình PLC, giao diện HMI ngay trên máy tính, giúp giảm thiểu lỗi và tiết kiệm thời gian triển khai. Ưu điểm nổi bật của TIA Portal là giao diện trực quan, đồng bộ cao, dễ mở rộng và hỗ trợ nhiều thiết bị Siemens từ S7-1200, S7-1500 đến các hệ thống công nghiệp lớn. Trong đề tài bãi đỗ xe xếp hình, TIA Portal được sử dụng để lập trình PLC S7-1200, thiết kế HMI KTP700 và mô phỏng toàn bộ hoạt động hệ thống. Giao diện của phần mềm được trình bày ở hình 2 và hình 3.



Hình 2. Giao diện chính



Hình 3. Giao diện mô phỏng

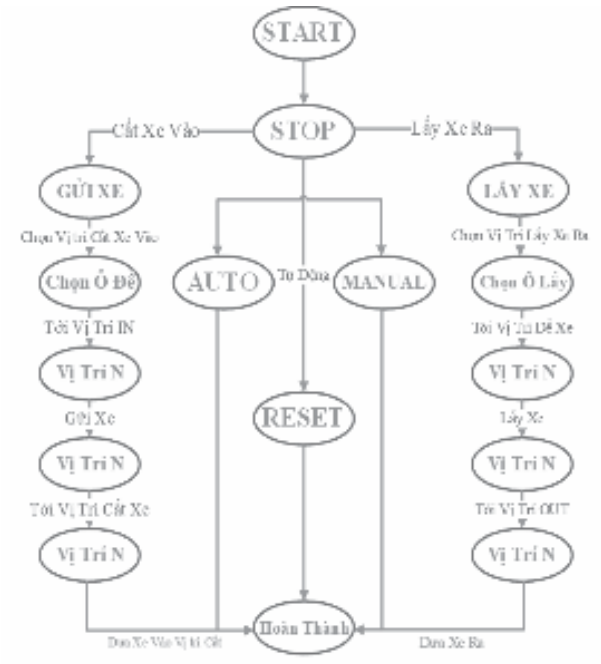
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Thuật toán điều khiển

Thuật toán điều khiển PLC bắt đầu khi hệ thống nhận lệnh gửi hoặc lấy xe. Ở chế độ Auto, PLC tự động chọn ô trống hoặc ô cần lấy, điều khiển cơ cấu nâng – hạ di chuyển đến đúng vị trí. Ở chế độ Manual, người vận hành có thể thao tác thủ công các bước đưa xe vào hoặc ra. Khi xe đã đến vị trí cất/lấy, PLC xác nhận trạng thái và hoàn tất chu trình. Trong mọi trường hợp, chức năng Reset đảm bảo hệ thống trở về trạng thái ban đầu an toàn.

Để giám sát và thao tác điều khiển, hệ thống sử dụng màn hình HMI KTP700 Basic. ☞

Thiết bị này có màn hình cảm ứng trực quan, cho phép hiển thị trạng thái ô gửi xe, số vị trí trống, chế độ vận hành Auto/Manual, đồng thời cho phép nhập lệnh trực tiếp từ người dùng. Các thông số chính của màn hình HMI KTP700 được trình bày trong bảng 2.



Hình 3. Thuật toán điều khiển PLC

Bảng 2. Các thông số chính của màn hình HMI KTP700 Basic

Thông số	Giá trị
Kích thước màn hình	7 inch, độ phân giải 800×480
Kiểu màn hình	TFT, cảm ứng
Số lượng phím cứng	8 phím điều hướng
Giao diện truyền thông	PROFINET/Ethernet
Bộ nhớ dự án	12 MB
Nguồn cung cấp	24 VDC

3.2. Chế tạo mô hình

Sau khi hoàn thành quá trình mô phỏng trên phần mềm TIA Portal và kiểm chứng logic điều khiển, nhóm tiến hành chế tạo mô hình thực tế. Các bước chính gồm:

• Lắp ráp phần cứng: Lắp PLC S7-1200, HMI KTP700 Basic, cảm biến, động cơ nâng – hạ, nguồn cấp và khung cơ khí phù hợp.

• Thiết kế và gia công cơ khí: Chế tạo khung bãi đỗ xe xếp hình nhiều tầng, bố trí cơ cấu di chuyển ngang và nâng hạ theo đúng kích thước và mô hình đã mô phỏng.

• Lắp đặt và đi dây hệ thống: Kết nối PLC với các cảm biến, động cơ và HMI, đảm bảo an toàn điện và tính thẩm mỹ.

• Nạp chương trình và kiểm thử: Tải chương trình đã mô phỏng vào PLC, kiểm tra từng chế độ hoạt động (tự động và tay), hiệu chỉnh tham số cho phù hợp thực tế.

3.3. Quy trình hoạt động

Cấp nguồn cho mô hình với bộ nguồn 24V và nguồn bộ điều khiển được hiện màn HMI. Trên màn HMI có nút ấn On và Off; ta đi ấn On, nút On sáng, bãi đỗ xe bắt hoạt động, khi đó các khung đang ở vị trí gốc mặc định. Quy trình hoạt động tự động như sau:

Bước 1: Xe di chuyển đến vị trí IN/OUT, người vận hành chọn chức năng gửi xe hoặc lấy xe trên màn hình HMI.

Bước 2: PLC kiểm tra trạng thái các ô đỗ; nếu gửi xe, hệ thống tự động tìm ô trống gần nhất; nếu lấy xe, xác định đúng vị trí xe cần lấy.

Bước 3: PLC phát lệnh điều khiển cơ cấu nâng – hạ và di chuyển khung chứa xe đến đúng vị trí đã xác định.

Bước 4: Xe được đưa vào/ra ô đỗ; cảm biến và công tắc hành trình xác nhận vị trí và trạng thái xe.

Bước 5: PLC cập nhật thông tin lên HMI, hiển thị trạng thái ô (trống/đang có xe), vị trí khung nâng và quá trình hoàn tất.

Bước 6: Trong suốt quá trình, hệ thống có cơ chế dừng khẩn cấp để đảm bảo an toàn và chế độ vận hành tay dự phòng khi xảy ra sự cố.

Bước 7: Sau khi hoàn tất chu trình gửi/lấy xe, hệ thống trở về trạng thái sẵn sàng cho yêu cầu tiếp theo.

Ngoài ra, hệ thống còn có chế độ điều khiển tay, chế độ này được sử dụng khi hệ thống gặp sự cố hoặc cần bảo trì. Trong chế độ này, người vận hành trực tiếp điều khiển các cơ cấu như nâng – hạ, tịnh tiến khung xe, ra/vào xe thông qua các nút nhấn hoặc giao diện HMI thay vì chương trình tự động. Các thao tác được thực hiện thủ công theo từng bước, có giám sát trạng thái cảm biến để đảm bảo an toàn. Chế độ này giúp kỹ thuật viên chủ động xử lý sự cố, đưa hệ thống về vị trí an toàn và sẵn sàng khởi động lại chế độ tự động khi hệ thống ổn định.

4. KẾT LUẬN

Đã mô phỏng thành công hệ thống bãi đỗ xe xếp hình nhiều tầng trên phần mềm TIA Portal, hoạt động ổn định theo các chế độ gửi và lấy xe tự động. Đồng thời xây dựng được thuật toán điều khiển, lập trình PLC S7-1200 và giao diện giám sát HMI KTP700 Basic.

Đã thiết kế và chế tạo thành công mô hình mô phỏng hệ thống bãi đỗ xe hoạt động theo trình tự: kiểm tra vị trí trống, điều khiển cơ cấu nâng – hạ và di chuyển đến đúng ô chứa xe; xe vào/ra được xác nhận qua cảm biến và trạng thái hiển thị chính xác trên HMI.❖

Ngày nhận bài: **12/8/2025**
Ngày phản biện: **28/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Vietnam Express (2024), "*The problem of cars parked on roadway across Vietnam cities*", [Trực tuyến], truy cập từ: https://e.vnexpress.net/news/perspectives/readers-views/the-problem-of-cars-parked-on-roadway-across-vietnam-cities-4909826.html

[2]. Report Ocean & BlueWeave Consulting (2024), "*Vietnam Smart Parking Systems Market Size and Growth Report 2023-2029*", [Trực tuyến], truy cập từ: https://www.blueweaveconsulting.com/report/vietnam-smart-parking-systems-market

[3]. ETEK Parking (2023), "*Top 3 Popular Automated and Semi-automated Parking Systems in Vietnam*", [Trực tuyến], truy cập từ: https://etekparking.com/top-3-popular-automated-and-semi-automated-parking-systems-in-vietnam

[4]. N. T. Vu, T. T. Nguyen, T. P. Tran (2023), "*Investigating Parking Choice Behavior in Binh Duong Province: Implications for Sustainable Urban Transport*". Sustainability, MDPI, 15(24), [Trực tuyến], truy cập từ: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/24/16936

[5]. The Saigon Times (2024), "*Solving Car Parking Problems in Urban Areas of Vietnam*", [Trực tuyến], truy cập từ: https://english.thesaigontimes.vn/solving-car-parking-problems

[6]. Siemens AG, "*SIMATIC S7-1200 Programmable Controller System Manual*". Siemens, 2021.

[7]. Siemens AG, "*TIA Portal V16 – Totally Integrated Automation Portal User Guide*". Siemens, 2020.

NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ ỨNG DỤNG LPG CHO ĐỘNG CƠ DIESEL

OVERVIEW RESEARCH ON LPG APPLICATION FOR DIESEL ENGINES

Huỳnh Chí Tuyệt
Khoa Cơ khí, Trường Cao đẳng Kỹ thuật Công nghệ Nha Trang
Email: chituyet3000@gmail.com

TÓM TẮT

Khí dầu mỏ hóa lỏng (LPG) ngày càng được quan tâm như một giải pháp thay thế một phần nhiên liệu diesel truyền thống trong động cơ đốt trong, đặc biệt ở phương pháp sử dụng hệ thống nhiên liệu kép (lưỡng nhiên liệu). LPG có các ưu điểm như đặc tính cháy sạch, sẵn có và giá thành cạnh tranh, giúp giảm đáng kể phát thải trong khi vẫn duy trì hoặc thậm chí cải thiện hiệu suất động cơ. Nội dung bài báo đi sâu phân tích nguyên lý hệ thống, kết quả thực nghiệm của các nghiên cứu tiêu biểu về LPG cho động cơ diesel trên thế giới và cập nhật các xu hướng công nghệ mới và triển vọng tương lai của LPG trong lĩnh vực động cơ diesel. Các kết quả nghiên cứu cho thấy, khi sử dụng LPG cho động cơ diesel, giúp giảm đáng kể phát thải PM, CO và HC, trong khi vẫn duy trì hoặc cải thiện hiệu suất động cơ. Tuy nhiên, khó khăn lớn là việc kiểm soát phát thải NO_x, cần phải thiết kế hệ thống phun phù hợp và xây dựng cơ sở hạ tầng.

Từ khóa: *Nhiên liệu kép diesel/LPG; Phát thải; Động cơ diesel.*

ABSTRACT

Liquefied petroleum gas (LPG) is increasingly being considered as a partial alternative to traditional diesel fuel in internal combustion engines, especially in the dual fuel system. LPG has advantages such as clean combustion, availability and competitive price, helping to significantly reduce emissions while maintaining or even improving engine performance. The article analyzes in depth the system principles, experimental results of typical studies on LPG for diesel engines in the world and updates new technology trends and future prospects of LPG in the field of diesel engines. The research results show that when using LPG for diesel engines, it helps to significantly reduce PM, CO and HC emissions, while maintaining or improving engine performance. However, the major difficulty is the control of NO_x emissions, which requires the design of appropriate injection systems and the construction of infrastructure.

Keywords: *Dual fuel diesel/LPG; Emissions; Diesel engine.*

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Việc sử dụng nhiên liệu sạch được coi là một trong những giải pháp để giải quyết vấn đề ô nhiễm môi trường và góp phần giảm sự phụ thuộc vào nguồn nhiên liệu truyền thống như xăng và dầu diesel đang cạn kiệt và ngày càng đắt đỏ [1, 10].

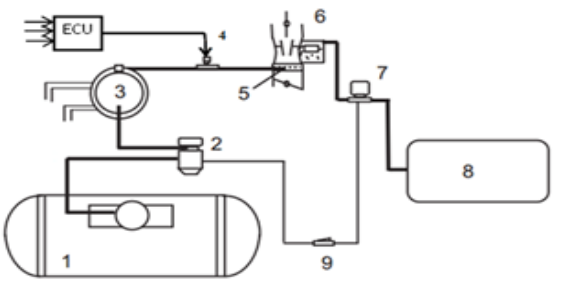
Động cơ diesel được sử dụng nhiều trên các phương tiện vận tải với hiệu suất nhiệt cao và khả năng chịu tải tốt, nhưng phát thải PM, NO_x và CO_2 cao gây ô nhiễm lớn về môi trường làm ảnh hưởng đến sức khoẻ con người.

Trong khi các quy định về khí thải ngày càng nghiêm ngặt thúc đẩy các giải pháp giảm phát thải mà vẫn đảm bảo hiệu suất. Trong số các nhiên liệu thay thế, LPG nổi bật nhờ trữ lượng dồi dào, cơ sở hạ tầng sẵn có, khả năng hóa hơi tốt và giá thành rẻ hơn diesel tại nhiều quốc gia [1, 10].

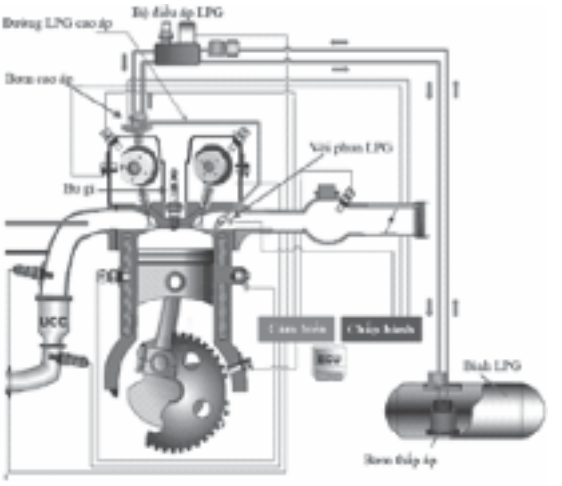
Vì vậy, nghiên cứu về LPG như một giải pháp nhiên liệu thay thế tiềm năng, vừa đáp ứng được yêu cầu về hiệu suất của động cơ diesel vừa giúp giảm phát thải, mở ra hướng nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong bối cảnh các quy định khí thải ngày càng nghiêm ngặt nhằm cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho các nghiên cứu về LPG cho động cơ diesel.

2. NGUYÊN LÝ VÀ SƠ ĐỒ HỆ THỐNG LPG-DIESEL

Có hai phương pháp chính: hệ thống hòa trộn hoặc phun LPG vào đường nạp và hệ thống phun LPG trực tiếp áp suất cao. Ở hệ thống hòa trộn hoặc phun LPG vào đường nạp, LPG hóa hơi được trộn với không khí nạp trước khi vào buồng đốt (Hình 1). Diesel được phun trực tiếp như bình thường để mồi cháy. Phương pháp này có ưu điểm là đơn giản, chi phí thấp nhưng khó kiểm soát chính xác tỷ lệ LPG, nguy cơ cháy kích nổ. Ở hệ thống phun LPG trực tiếp (Hình 2), LPG được nén ở áp suất cao và phun vào buồng cháy đồng bộ với phun diesel. Phương pháp này có ưu điểm là kiểm soát chính xác tỉ lệ LPG/diesel, hiệu suất cao hơn, phát thải thấp hơn. Nhưng chi phí cao, yêu cầu kim phun chuyên dụng với hệ thống điều khiển điện tử phức tạp [1, 2, 12].



Hình 1. Sơ đồ cung cấp LPG trên động cơ dùng bộ trộn và điều khiển điện tử [12]



Hình 2. Sơ đồ hệ thống phun trực tiếp LPG vào trong xilanh động cơ [12]

3. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VÀ HIỆU QUẢ ỨNG DỤNG

Các nghiên cứu quốc tế cho thấy tiềm năng rất lớn của LPG, nghiên cứu của tác giả ☞

Ashok chỉ ra rằng khi sử dụng LPG cho động cơ diesel thì PM khoảng 40% và tăng NO_x khoảng 8% khi tỷ lệ LPG là 30% [1]. Tác giả Saleh và cộng sự nghiên cứu với thành phần LPG giàu propane giúp giảm CO khoảng 25% và PM khoảng 30% nhưng NO_x có thể tăng khoảng 10% ở tải cao [2]. Tác giả Lee và cộng sự thử nghiệm bổ sung propane, PM giảm khoảng 35%, khói giảm khoảng 50% [3]. Tác giả Aydin nghiên cứu trên máy phát điện đơn xy-lanh giảm tiêu hao diesel khoảng 20% và PM khoảng 45% [4]. Toledo-Guerrero và cộng sự thực nghiệm phát thải hạt siêu mịn, giảm số lượng hạt khoảng 60% khi LPG thay thế 40% năng lượng [5]. Nhìn chung, hiệu suất nhiệt duy trì hoặc tăng 2-5%, tiêu hao diesel giảm 20-40%, PM và khói muội giảm 15-50%, CO và HC giảm 10-30%, NO_x có xu hướng tăng nhẹ nếu tỷ lệ LPG cao [1-5].

Nguyên nhân PM và khói muội giảm 15-50% là do PM (nhân hạt muội bồ hóng) hình thành chủ yếu từ các vùng quá giàu nhiên liệu khi diesel phun trực tiếp. Khi dùng LPG (cháy dạng hỗn hợp khí-không khí), vùng quá giàu giảm đi, do đó ít hạt muội hình thành hơn.

Ngoài ra, LPG hầu như không chứa lưu huỳnh và các hợp chất nặng, nên không tạo nhân muội bồ hóng. Vì vậy, PM giảm đáng kể, đồng thời khói đen cũng giảm rõ rệt.

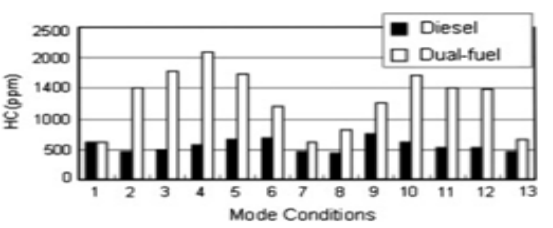
Nguyên nhân CO và HC giảm 10-30% tuỳ điều kiện là do CO (Carbon monoxide) và HC (hydrocarbon chưa cháy) hình thành do cháy không hoàn toàn. LPG giúp hỗn hợp cháy đồng đều hơn, thời gian cháy đủ lâu hơn, nên quá trình oxy hóa CO và HC hiệu quả hơn nên giảm CO và HC. Tuy nhiên, nếu ở tải thấp hoặc tỷ lệ LPG quá cao, đôi khi CO/HC có thể tăng vì LPG có thể không cháy hoàn toàn khi nhiệt độ cháy thấp (Hình 3, 4, 6, 7).

Nguyên nhân hiệu suất nhiệt duy trì hoặc tăng 2-5% là do LPG có chỉ số octan cao và khả năng bay hơi tốt, khi được trộn với diesel sẽ giúp cháy đồng đều hơn trong buồng đốt, giảm các vùng nhiên liệu-không khí quá giàu hoặc quá nghèo. Quá trình cháy hoàn thiện hơn dẫn tới áp suất cháy tối đa gần điểm tối ưu hơn, cải thiện hiệu suất nhiệt. Ở tải cao, nếu tỷ lệ LPG hợp lý, hiện tượng cháy mát hơn và tốc độ lan truyền ngọn lửa ổn định hơn, cũng giúp hiệu suất tăng. Tuy nhiên, nếu tỷ lệ LPG quá cao, nguy cơ cháy chậm hơn hoặc hiện.

Nguyên nhân tiêu hao diesel giảm 20-40% là do trong chế độ lưỡng nhiên liệu, một phần năng lượng cung cấp từ LPG thay thế cho diesel, diesel vẫn cần phun để làm mồi cháy, nhưng lượng diesel giảm đáng kể nhờ năng lượng từ LPG (vì LPG cháy trong hỗn hợp khí-không khí) nên kết quả giảm tiêu hao diesel, đặc biệt có lợi về chi phí nhiên liệu.

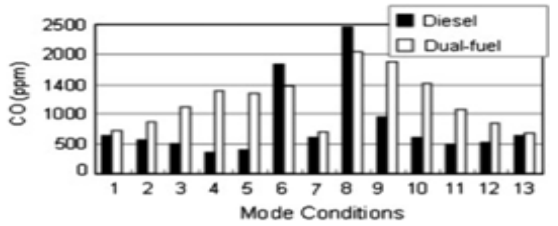
Tuy nhiên, thành phần NO_x có xu hướng tăng nhẹ nếu tỷ lệ LPG cao là do NO_x hình thành mạnh ở nhiệt độ cháy cao và dư oxy, LPG có tốc độ cháy nhanh, và hỗn hợp thường nghèo hơn so với diesel thuần, làm nhiệt độ cháy cục bộ tăng lên, do đó NO_x tăng nhẹ. Khi tỷ lệ LPG vừa phải, NO_x có thể giữ ổn định hoặc tăng rất ít; khi tỷ lệ quá cao và nhiệt độ cháy cao, NO_x tăng đáng kể (Hình 5, 8).

Một số nghiên cứu dùng EGR (hồi lưu khí thải) hoặc điều khiển phun để khắc phục hiện tượng này [1, 11, 12].

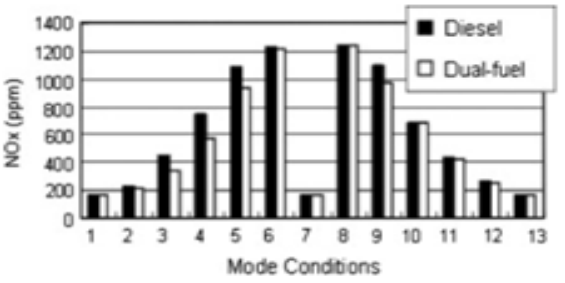


Hình 3. Ảnh hưởng của tải trọng đến phát thải HC [1]

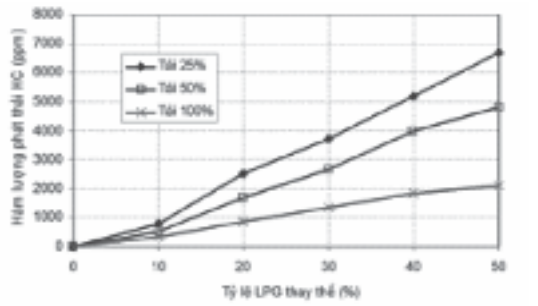
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn



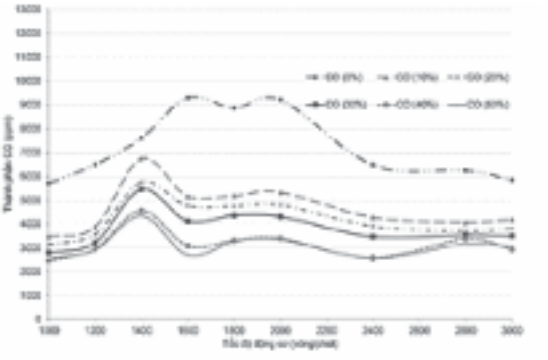
Hình 4. Ảnh hưởng của tải trọng đến phát thải CO [1]



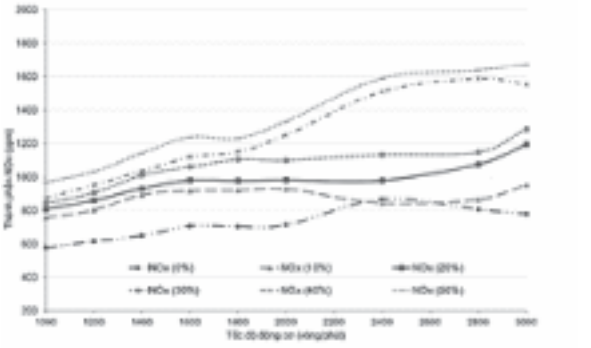
Hình 5. Ảnh hưởng của tải trọng đến phát thải NO_x [1]



Hình 6. Ảnh hưởng của tỷ lệ LPG thay thế đến phát thải H_C [12]



Hình 7. Ảnh hưởng của tỷ lệ LPG thay thế đến phát thải CO [12]



Hình 8. Ảnh hưởng của tỷ lệ LPG thay thế đến NO_x [12]

4. XU HƯỚNG VÀ CÔNG NGHỆ SỬ DỤNG LPG

Đến nay, nhiều xu hướng mới đã xuất hiện như công nghệ phun LPG trực tiếp áp suất cao; ứng dụng trí tuệ nhân tạo và IoT; kết hợp diesel-LPG; xu hướng dùng bio-LPG giúp giảm CO_2.

+ Phun LPG trực tiếp (DI-LPG) ở pha lỏng, áp lực cao:

Dịch chuyển từ hòa trộn đường nạp sang phun trực tiếp để kiểm soát chính xác tỉ lệ thay thế, thời điểm và lượng phun, hạn chế kích nổ và cải thiện độ đồng đều nhiên liệu theo xy-lanh. Đồng thời tăng cường làm mát khi LPG hóa hơi trong buồng cháy giúp tăng mật độ nạp, cải thiện suất điền đầy và giảm xu hướng tạo muội.

Sử dụng kim phun chuyên dụng (chống sôi bọt, chịu áp lực, vật liệu tương thích LPG) và chiến lược phun mồi giúp mở rộng vùng vận hành ổn định ở tỉ lệ LPG cao [6], [8].

+ Điều khiển thông minh dựa trên cảm biến và mô hình (AI, IoT, MPC):

ECU thế hệ mới dùng tín hiệu phản hồi ☞

áp suất xy-lanh/lambda và điều khiển dự đoán (MPC) để tối ưu đồng thời NO_x – PM – hiệu suất theo tải/tốc độ nhằm tự động thích nghi thành phần LPG và điều kiện môi trường; sử dụng các thuật toán để bảo vệ động cơ. Ngoài ra, có thể cho phép hiệu chỉnh từ xa, cập nhật hiệu chuẩn theo chu kỳ vận hành thực tế (RDE) [8, 9].

+ Quản lý NO_x:

EGR làm mát phối hợp với hệ thống SCR kiểm soát NO_x khi dùng tỉ lệ LPG cao; cân bằng giữa nhiệt độ đỉnh cháy và độ đồng nhất hỗn hợp. Đồng thời, tối ưu thời điểm phun dầu mồi, áp suất phun diesel, và phối hợp tăng áp, EGR để duy trì hiệu suất mà không làm NO_x vượt ngưỡng cho phép [6, 7, 8].

+ Chẩn đoán OBD và tiêu chuẩn hóa lưỡng nhiên liệu:

Tích hợp OBD lưỡng nhiên liệu để giám sát hiệu suất bộ xử lý khí thải, rò rỉ LPG, và sai lệch tỉ lệ thay thế theo thời gian.

Quy trình thử chuẩn hóa cho chế độ lưỡng nhiên liệu (chọn chu trình tải, tỉ lệ thay thế, nhiên liệu LPG đại diện) giúp kết quả giữa phòng thí nghiệm và phát thải trong điều kiện lái xe thực tế tương thích hơn [6-9].

+ Đối tượng ứng dụng và triển khai:

Tập trung nghiên cứu cho xe tải hạng nặng, xe buýt, máy nông – công trình, máy phát – nơi tải vận hành tương đối ổn định, có lợi cho tỉ lệ LPG cao và chi phí thấp.

Thiết kế và chế tạo Bộ kit chuyển đổi cho đội xe chạy cố định lộ trình (đô thị/liên tỉnh) mang lại thời gian hoàn vốn ngắn hơn nhờ tiết kiệm diesel và giảm chi phí khí thải [6-9].

5. KẾT LUẬN

Các nghiên cứu cho thấy LPG là nhiên liệu thay thế tiềm năng cho động cơ diesel, giúp giảm PM và khói muội 15-50%, CO và HC 10-30%, đồng thời tiết kiệm 20-40% lượng diesel và duy trì hoặc tăng nhẹ hiệu suất. NO_x có thể tăng, nhưng có thể kiểm soát nhờ điều khiển điện tử và xử lý khí thải.

Xu hướng phát triển sử dụng LPG trên động cơ tập trung vào phun LPG trực tiếp, điều khiển thông minh, lưỡng nhiên liệu và bio-LPG, cùng các giải pháp an toàn và tiêu chuẩn hoá phát thải trong điều kiện lái xe thực tế. Với công nghệ và chính sách hỗ trợ, LPG hứa hẹn là giải pháp bền vững cho động cơ diesel.❖

Ngày nhận bài: **15/8/2025**
Ngày phản biện: **25/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Ashok, B.; Ashok, S.D.; Ramesh Kumar, C. (2015), "*Review on LPG-diesel dual fuel engines*".
[2]. Saleh, H.E. (2008), "*Effect of LPG composition on diesel engine performance and emissions*".
[3]. Lee, J.; Choi, S.; Kim, H. (2013), "*Propane addition effects on diesel emissions*".
[4]. Aydin, M.; Irgin, A.; Çelik, M.B. (2018), "*Conversion of generator to LPG/diesel*".
[5]. Toledo-Guerrero, V. et al. (2022), "*Particle emissions of diesel-LPG engines*".
[6]. Polk, A.C. et al. (2014, ASME), "*Low-temperature combustion diesel-propane*".
[7]. Polk, A.C. et al. (2014, Fuel), "*Knock and pressure oscillations in diesel-propane*".
[8]. Krishnan, S.R. et al. (2016), "*Effects of injection and boost on lưỡng nhiên liệu engines*".
[9]. Mohsen, M.J.; Al-Dawody, M.F. (2023), "*Simulation and experimental optimization*".
[10]. Alam, M.; Goto, S.; et al. (2001), "*Early studies on diesel-LPG with cetane improvers*".
[11]. Phạm Minh Tuấn (2008), "*Khí thải động cơ và ô nhiễm môi trường*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
[12]. Nguyễn Tường Vi (2014), "*Nghiên cứu sử dụng LPG làm nhiên liệu thay thế trên các động cơ diesel hiện hành*". Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Bách Khoa Hà Nội.

TỔNG QUAN VỀ CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐÁNH GIÁ MỨC ĐỘ THOẢI MÁI CỦA TRANG PHỤC BẢO HỘ

OVERVIEW OF EVALUATION METHODS FOR ASSESSING THE COMFORT LEVEL OF PROTECTIVE CLOTHING

ThS. **Nguyễn Thị Hòa**
Khoa Dệt may Thời trang, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
Email: nthoa@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Quần áo bảo hộ cần đáp ứng yêu cầu bảo vệ, hiệu suất và sự thoải mái. Sự thoải mái thường được đánh giá cả khách quan lẫn chủ quan, trong đó mỗi cách tiếp cận có ưu và nhược điểm riêng. Bài viết tổng quan các phương pháp đo lường hiện đại, gồm: đánh giá chủ quan, đo lường khách quan, kết hợp hai phương pháp, và mô hình hóa da. Kết quả cho thấy đo lường khách quan cho dữ liệu lặp lại và định lượng tốt, nhưng đôi khi khác biệt với cảm nhận thực tế; trong khi đánh giá chủ quan lại kém tin cậy do khác biệt giữa cá nhân. Do đó, việc kết hợp cả hai cách tiếp cận được xem là giải pháp hợp lý để mô hình hóa sự thoải mái của vật liệu dệt may.

Từ khóa: *Sự thoải mái công thái học khi mặc; Quần áo bảo hộ; Chuyển động cơ thể người; Phương pháp đánh giá.*

ABSTRACT

Protective clothing must meet requirements of protection, performance, and wearer comfort. Comfort is commonly evaluated through both subjective and objective methods, each with its own strengths and limitations. This review summarizes modern assessment approaches, including subjective evaluation, objective measurement, combined methods, and skin modeling. Findings indicate that objective methods provide repeatable and quantitative data but may deviate from actual human perception, while subjective assessments are less reliable due to individual variability. Therefore, combining subjective and objective approaches is considered a reasonable solution for modeling comfort in textile materials.

Keywords: *Ergonomic wear comfort; Protective clothing; Human body movements; Evaluation methods.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đảm bảo sự thoải mái cho con người (HC) là một nhiệm vụ phức tạp, phụ thuộc vào trạng thái tâm lý, sinh lý, điều kiện môi trường và đặc biệt là trang phục, vốn vừa bảo vệ vừa ảnh hưởng đến cơ thể và tinh thần. Việc đánh giá tác động của trang phục đến HC càng khó khăn với quần áo bảo hộ (PC), do sự phức tạp trong tương tác giữa cơ thể và quần áo. Trong nhiều thập kỷ, đã có nhiều nghiên cứu chuyên sâu về sự thoải mái của quần áo, trong đó thoải mái nhiệt – sinh lý nhận được sự quan tâm lớn nhất [1].

Phát triển quần áo cần tính đến nhân trắc học, đặc điểm cơ sinh học và nhu cầu chức năng của người dùng, vốn có thể liên quan chặt chẽ đến đánh giá chủ quan về khả năng sử dụng, độ vừa vặn và an toàn. Khác với quần áo thường, thiết kế quần áo chức năng dựa trên các yêu cầu cụ thể của người dùng và được xác định bằng đánh giá khách quan [2]. Tuy nhiên, loại quần áo này có thể gây căng thẳng nhiệt, hạn chế chuyển động và giảm hiệu quả công việc [3]. Do đó, quy trình thiết kế phải kết hợp các yếu tố công thái học như lựa chọn vật liệu, kích thước, tạo mẫu và hoàn thiện.

Gần đây, sự quan tâm đến HC trong dệt may ngày càng tăng, đặc biệt về các khía cạnh nhiệt, xúc giác và độ vừa vặn [4]. Ngoài ra, giải phẫu học và chuyển động cơ thể cũng cần được tính đến để tối ưu sự thích ứng và thoải mái [5].

Bài viết này tổng quan các kỹ thuật đánh giá sự thoải mái khi mặc PC và quần áo thể thao theo công thái học (Hình 1), nhấn mạnh vai trò của tự do di chuyển, phòng ngừa chấn thương và nâng cao hiệu suất. Trọng tâm là xác định yêu cầu chính, giảm khó chịu và đảm bảo an toàn, nhằm đạt được sự thoải mái "lý tưởng" trong khi vẫn duy trì hiệu quả hoạt động [6].

2. CÔNG THÁI HỌC QUẦN ÁO

2.1. Tại sao cần có sự thoải mái khi mặc theo công thái học

Đảm bảo sự thoải mái khi mặc trong điều kiện cơ thể vận động là nhiệm vụ phức tạp, do sự kết hợp giữa kích thước – hình dạng cơ thể, biến thể sinh lý, đặc tính vật liệu, thiết kế trang phục, môi trường và hoạt động. Tác động của quần áo đến sự thoải mái và hiệu suất lao động hoặc thể thao đặc biệt quan trọng. Quần áo bảo hộ công nghiệp được thiết kế để bảo vệ, nhưng hiệu suất của người mặc còn phụ thuộc vào đặc thù công việc, tốc độ trao đổi chất, môi trường và đặc điểm trang phục. Các yêu cầu công thái học chính gồm: (1) độ vừa vặn; (2) giảm nhiệt, tăng thông gió thông qua thiết kế và vật liệu; (3) giảm trọng lượng, hạn chế cản trở khi làm việc; và (4) dễ dàng vận động. Người lao động phải cân bằng hiệu suất với các yêu cầu bảo hộ. Trong nhiều ngành như cứu hỏa, hóa chất, kho lạnh, quân đội, thép và lâm nghiệp, PPE giúp bảo vệ khỏi nhiệt hoặc hóa chất nhưng lại gây ra các vấn đề công thái học [7]. Nhiều tiêu chuẩn PPE đã cải thiện chất lượng và an toàn, song khi mức bảo vệ tăng, sự bất tiện công thái học cũng tăng theo.

Ở lính cứu hỏa, nhiệt và ẩm từ cơ thể gây căng thẳng nhiệt và mệt mỏi, làm giảm hiệu suất công việc. Do đó, thiết kế quần áo và lớp vật liệu cần cân bằng giữa bảo vệ và thoải mái, ưu tiên hệ thống nhẹ, thoáng khí, nhưng vẫn đảm bảo cách nhiệt. Quần áo mỏng, nhẹ và mềm dẻo giúp tăng thoải mái, khả năng chịu nhiệt và thoát hơi, song có nguy cơ giảm khả năng chống lửa. Kết cấu vải mở có thể hỗ trợ làm mát bay hơi, nhưng đồng thời làm tăng mất nhiệt tổng thể [8].

2.2. Các đặc tính của trang phục PC

Tự do vận động: Trang phục co giãn, nhẹ, ít cứng và có khả năng phục hồi giúp cải thiện chuyển động và tăng sự thoải mái theo công thái học.

Giảm tải/căng thẳng: Tránh phân bổ trọng lượng không đều và tải trọng nặng để giảm áp lực lên hệ cơ xương, duy trì sự thoải mái và công thái học [9].

Duy trì hình dáng cơ thể: Trang phục thiết kế phù hợp với độ cong, chuyển động cơ thể vừa tăng tính dễ mặc vừa tạo giá trị thẩm mỹ, thu hút người dùng [10].

Tính chất cơ học: Độ cứng và các đặc tính cơ học của vải ảnh hưởng trực tiếp đến tính linh hoạt và sự thoải mái của trang phục bảo hộ.

Độ thoáng khí: Khả năng quản lý ẩm, thoát mồ hôi tốt là yếu tố then chốt quyết định sự thoải mái khi mặc [11].

3. ĐO LƯỜNG SỰ THOẢI MÁI KHI MẶC THEO CÔNG THÁI HỌC

3.1. Đo lường mức độ tự do vận động

Hiệu suất con người có thể bị ảnh hưởng khi trang phục không vừa vặn, làm hạn chế phạm vi chuyển động (ROM), tầm với và sự khéo léo của bàn tay. Các nguyên tắc công thái học tập trung vào việc tối ưu độ vừa vặn, giảm trọng lượng và áp lực của trang phục thông qua thiết kế sáng tạo. Trang phục phải thoải mái, không gây trầy xước, và phù hợp với cơ học chuyển động, lực cũng như mô-men tại khớp xương.

Trong ngành may mặc, việc thử nghiệm mẫu quần áo trên người mẫu thử nghiệm là phổ biến để tinh chỉnh trước sản xuất [12]. Người mẫu có thể ngồi, đi bộ, hoặc tham gia hoạt động thể thao phù hợp với thiết kế. Các thử nghiệm kiểm soát về độ vừa vặn và độ bền trong điều kiện thực tế, cùng với nghiên cứu sử dụng ma-nơ-canh có gắn thiết bị, cũng được áp dụng rộng rãi.

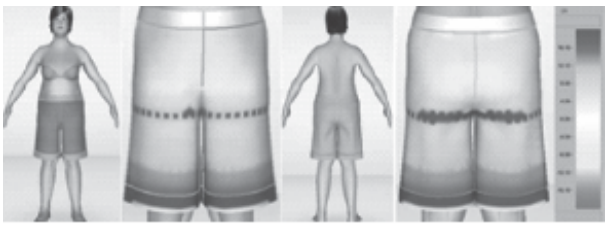
Sự phát triển của thiết bị robot mô phỏng chuyển động khớp và ROM giúp đánh giá hiệu quả quần áo trong phòng thí nghiệm. ROM là chỉ số quan trọng để so sánh thiết kế và đánh giá khả năng di chuyển của người lao động. Nghiên cứu thường đo khả năng lặp lại động tác, phạm vi với tay hoặc góc khớp, sử dụng các công cụ như máy đo góc, máy đo độ cong Leighton, hệ thống vi máy tính với chiết áp, và máy đo độ nghiêng [13].

ROM có hai ưu điểm nổi bật: (1) dễ định lượng khách quan bằng góc khớp hoặc khoảng cách với, (2) có thể đo bằng các dụng cụ đơn giản, dễ sử dụng. Khả năng vận động cũng được đánh giá thông qua các thử nghiệm thực tế với người mặc. Ví dụ, hệ thống máy đo điện góc gắn cảm biến biến dạng trong lò xo bảo vệ vào da đối tượng, kết nối với bộ ghi dữ liệu để thu thập thông tin chuyển động [14].

3.2. Ảnh hưởng của sự thoải mái khi mặc theo công thái học đến sự thoải mái khi mặc theo nhiệt độ cơ thể

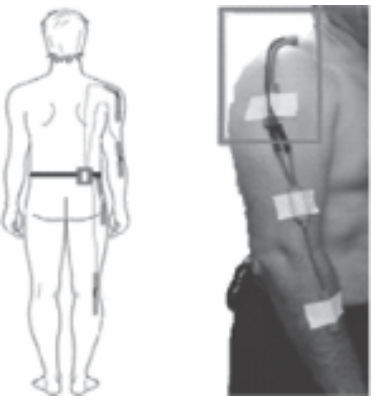
Những thay đổi nhằm cải thiện sự thoải mái công thái học có thể ảnh hưởng đến sự thoải mái nhiệt, do đó cần đo lường các đặc tính nhiệt để kiểm chứng [15]. Việc này có thể thực hiện thông qua thử nghiệm trên người hoặc trên ma-nơ-canh, đặc biệt quan trọng với PPE như trang phục lính cứu hỏa, nơi công thái học liên quan mật thiết đến cân bằng nhiệt. ☞

Sự thoải mái nhiệt phụ thuộc vào khả năng phục hồi độ ẩm, độ xốp, mật độ và độ thoáng khí của vải, những yếu tố cũng tác động đến sự thoải mái công thái học. Khi mật độ sợi tăng, không khí lưu thông giảm, làm tăng dẫn nhiệt và ảnh hưởng đến cân bằng nhiệt [16]. Do đó, cấu trúc vải quyết định cả tính chất nhiệt và công thái học. Các đặc tính như cản bay hơi và cách nhiệt có thể đo trực tiếp trên người; ví dụ, Taylor và cộng sự phát triển phương pháp xác định cản bay hơi hiệu quả, kết hợp với đo nhiệt lượng phân bố để đánh giá sự mất nhiệt khô và ướt.



Hình 1. Phân bố điện kế trên cơ thể của đối tượng [14]

Nhiều loại ma-nơ-canh nhiệt được phát triển: loại đổ mồ hôi thực sự như "Taro" [17], "Coppelius" [18], "Sam". Các hệ thống này phù hợp để thử nghiệm quần áo trong nhiều môi trường, mặc dù việc so sánh kết quả vẫn phức tạp do sự khác biệt về ma-nơ-canh và trang phục.



Hình 2. Sự phân bố của các điện kế trên cơ thể của đối tượng [14]

Tổng truyền nhiệt thường được coi là tổng của truyền nhiệt khô và bay hơi, thường đo bằng ma-nơ-canh khô trong điều kiện cơ thể đổ mồ hôi [19]. Tuy nhiên, sai số có thể xảy ra trong đo cản hơi nước. Để khắc phục, mô hình nhiệt vải đổ mồ hôi đã được sử dụng để đánh giá khả năng cách nhiệt của quần áo trong cả điều kiện ít và nhiều mồ hôi.

3.3. Đo lường vật lý vải thông qua thử nghiệm người mặc

Các sản phẩm dệt may hiện đại mang lại giá trị lớn cho sức khỏe con người, nhưng mức độ chấp nhận phụ thuộc vào sự thoải mái về nhiệt và cảm giác tiếp xúc giữa vải và da. Phương pháp này đánh giá quần áo trong điều kiện sử dụng thực tế, giúp cung cấp dữ liệu khách quan hơn, thường kết hợp bảng câu hỏi và một số chỉ số sinh lý.

Mặc dù tốn kém, mất thời gian và kết quả đôi khi thiếu ổn định, thử nghiệm người mặc vẫn là kỹ thuật quan trọng trong nghiên cứu sự thoải mái, được áp dụng cho các yếu tố như độ ẩm, công thái học, nhiệt, xúc giác và thẩm mỹ. Phương pháp này cũng có thể đo lường cảm quan khách quan trong điều kiện mặc khác nhau, đặc biệt với đồ lót dệt kim.

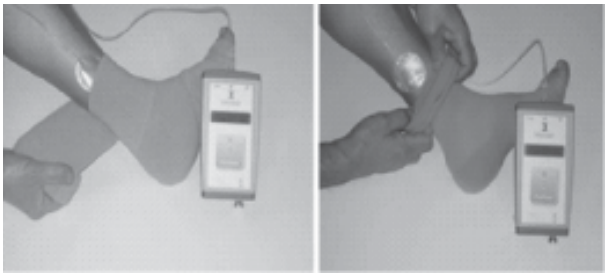
Trong thử nghiệm, đối tượng mặc quần áo nghiên cứu và đánh giá dựa trên cảm giác thoải mái. Phản hồi này tạo ra nhiều mô tả cảm quan, được phân tích theo các giao thức đã định. Dữ liệu sinh lý thu thập trực tiếp từ quá trình thử nghiệm giúp cung cấp cái nhìn sâu hơn về thiết kế công thái học của quần áo.

3.4. Đo lường sự thoải mái do áp lực, mô phỏng số áp lực lên quần áo

Mô hình hóa và mô phỏng vải dệt là

lĩnh vực nghiên cứu quan trọng, đòi hỏi sự hợp tác liên ngành giữa vật lý, cơ học, toán học và tin học. Các công cụ mô hình hóa hỗ trợ ước tính sự thoải mái cảm giác da, song vẫn cần nhiều nghiên cứu bổ sung.

Một mô hình toán học phi tuyến dựa trên lý thuyết cơ học tiếp xúc đã được phát triển để mô phỏng sự phân bố áp lực động của quần áo trên cơ thể 3D trong quá trình mặc. Kết quả cho thấy mô hình có thể dự đoán biến dạng, áp lực, ứng suất bên trong vải, cũng như ảnh hưởng của trọng lượng và lực quán tính mà không cần sản xuất thực tế.



Hình 3. Thực hiện phép đo, kết nối cảm biến với PicoPress

Tuy nhiên, do giả thiết cơ thể người là cứng nhắc, mô hình chưa thể mô phỏng chính xác biến dạng cơ thể và sự phân bố áp lực dưới da, đặc biệt với các mô mềm.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tổng quan các phương pháp tiếp cận hiện đại trong đo lường sự thoải mái khi mặc theo công thái học, bao gồm cả kỹ thuật khách quan và chủ quan. Hiện chưa có phương pháp chuẩn để đánh giá sự thoải mái, độ vừa vặn và tính năng của từng loại trang phục trong các điều kiện hoạt động khác nhau. Để đạt được mục tiêu này, cần xem xét các yếu tố liên quan đến tự do vận động, phân bố tải/căng thẳng, khả năng duy trì hình dáng cơ thể, cũng như đặc tính cơ học, độ thoáng khí, độ mịn và độ mềm của vật liệu. Điều này đòi hỏi một cách tiếp cận đa ngành.

Có bốn kỹ thuật chính trong đánh giá sự thoải mái khi mặc: (i) đo lường khách quan, (ii) đánh giá chủ quan, (iii) kết hợp hai phương pháp, và (iv) mô hình hóa bằng máy tính sự tương tác giữa cơ thể và vải. Trong đó, đo lường khách quan có ưu điểm về tính lặp lại và độ tin cậy định lượng, song kết quả đôi khi khác biệt đáng kể so với cảm nhận thực tế. Ngược lại, đánh giá chủ quan phản ánh trực tiếp cảm giác người mặc thông qua các kỹ thuật tâm lý học, nhưng thường thiếu ổn định do phụ thuộc vào điều kiện thử nghiệm và đối tượng nghiên cứu.

Nhận thức chủ quan về sự thoải mái là kết quả của quá trình xử lý phức tạp, trong đó các kích thích từ quần áo và môi trường được truyền qua hệ thần kinh cảm giác lên não. Các thử nghiệm có thể tiến hành ở cả cấp độ vải và trang phục, với nhiều dạng thang đo và phương pháp, như thử nghiệm mặc thực tế. Tuy nhiên, độ tin cậy của phương pháp chủ quan kém hơn so với đo lường khách quan. Do vậy, việc kết hợp hai phương pháp cùng với các mô hình dự đoán là giải pháp tối ưu để nâng cao hiệu quả đánh giá.❖

Ngày nhận bài: **06/8/2025**
Ngày phản biện: **20/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bhatia, D., Malhotra, U. (2016), "*Thermophysiological wear comfort of clothing: An overview*". Journal of Textile Science and Engineering, 6(2), 250.

[2]. Kilinc-Balci, F. S. (2011), "*Testing, analyzing and predicting the comfort properties of textiles*". In: Song, G. (Ed.). Improving comfort in clothing. (1st ed.). Woodhead Publishing Limited (Cambridge), pp. 138-162. ☞

[3]. Goonetilleke, R., Karwowski, W. (2016), "*Advances in physical ergonomics and human factors*". In: International Conference on Physical Ergonomics and Human Factors, Florida, USA, July 27-31, 2016, p. 489.

[4]. Wang, J., Agarwal, T.-K., Liu, K., Kamalha, E. (2016), "*Optimization design of cycling clothes' patterns based on digital clothing pressures*". Fibers and Polymers, 17(9), 1522-1529.

[5]. Patricia Dolez, V. I., Olivier, V. (2018), "*Advanced characterization and testing of textiles*". Elsevier Ltd. (Cambridge).

[6]. Colovic, G. (2014), "*Ergonomics in the garment industry (1st ed.)*". Woodhead Publishing Limited (Cambridge).

[7]. Williams, W. J., Roberge, R. J., Kim, J.-H., Coca, A. (2011). "*Subjective perceptions and ergonomics evaluation of a liquid cooled garment worn under protective ensemble during an intermittent treadmill exercise*". Ergonomics, 54(7), 626-635.

[8]. Wang, F. (2014), "*Clothing evaporative resistance : its measurements and application in prediction of heat strain*". Department of Design Sciences, Lund University (Sweden).

[9]. Ibrahim, F., Usman, J., Yazed, M., Norhamizan, A. (2018), "*2nd International Conference for Innovation in Biomedical Engineering and Life Sciences*". In: 2nd International Conference for Innovation in Biomedical Engineering and Life Sciences, 2018, vol. 67, pp. 10-13.

[10]. Belbasis, A., Fuss, F. K. (2015), "*Development of next- generation compression apparel*". Procedia Technology, 20(July), 85-90.

[11]. Onofrei, E., Rocha, A. M., Catarino, A. (2012), "*Investigating the effect of moisture on the thermal comfort properties of functional elastic fabrics*". Journal of Industrial Textiles, 42(1), 34-51.

[12]. Harrison, D., Fan, Y., Larionov, E., Pai, D. K. (2018), "*Fitting close-to-body garments with 3D soft body avatars VitalFit*". In: 9th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies, 2018, pp. 184-189.

[13]. Sadeghi, R., Mosallanezhad, Z., Nodehi-Moghadam, A., Nourbakhsh, M. R., Biglarian, A., et al. (2015), "*The reliability of bubble inclinometer and tape measure in determining lumbar spine range of motion in healthy individuals and patients*". Physical Treatment Journal, 5(3), 137-144.

[14]. Ciesielska-wróbel, I., Denhartog, E., and Barker, R. (2017), "*Measuring the effects of structural turnout suits on firefighter range of motion and comfort*". Ergonomics, 60(7), 997-1007.

[15]. Li, Y. (2011), "*Computer aided clothing ergonomic design for thermal comfort*". Sigurnost, 53(1), 29-41.

[16]. Gidik, H., Ducept, S., Marolleau, A., Salaün, F., Dupont, D. (2017), "*Influence of textile physical properties and thermo- hydric behaviour on comfort*". Journal of Ergonomics, 7(6), 2-9.

[17]. Mohamad, G. A. (2015), "*The role of tests and manikin in defining fabrics thermal characteristics*". International Des. Journal, 5(3), 995-1001.

[18]. Jie, Y., Wenguo, W., Ming, F. U. (2014), "*Coupling of a thermal sweating manikin and a thermal model for simulating human thermal response*". Procedia Engineering, 84, 893-897.

[19]. Nayak, R., Padhye, R. (2017), "*Manikins for textile evaluation*". Elsevier Ltd (Cambridge).

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM SẤY ĐẬU HÀ LAN TRÊN HỆ THỐNG SẤY BƠM NHIỆT TẦNG SÔI

EXPERIMENTAL STUDY ON DRYING OF PISUM SATIVUM ON A FLUIDIZED BED HEAT PUMP DRYING SYSTEM

Bùi Nguyễn Nhật Tài[1,2], Bùi Hoàng Gia Bảo[1,2], Nguyễn Tuấn Đạt[1,2], Phan Thành Nhân[1,2,*]
[1]Bộ môn Công nghệ Nhiệt Lạnh, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
[2]Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
**Email tác giả liên hệ: phannhan@hcmut.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu thực nghiệm quá trình sấy đậu Hà Lan trên hệ thống bơm nhiệt tầng sôi nhằm xác định các thông số kỹ thuật tối ưu. Kết quả cho thấy chiều cao lớp hạt 3 cm là lựa chọn phù hợp để cân bằng tốc độ giảm ẩm và độ ổn định của quá trình sấy. Phương pháp sấy bơm nhiệt tầng sôi vượt trội hơn so với sấy bơm nhiệt truyền thống về hiệu quả truyền nhiệt và truyền ẩm, nhờ đó có thể rút ngắn thời gian sấy 60 đến 90 phút tại cùng mức nhiệt độ. Nhiệt độ sấy 50°C được xác định là tối ưu để đảm bảo tốc độ sấy phù hợp và duy trì cấu trúc. Nghiên cứu chỉ ra mô hình Wen-Yu và Leva cho kết quả tính toán vận tốc tối thiểu rất gần với thực nghiệm (sai số lần lượt là 4.8% và 0.96%), phù hợp để tính toán cho đậu Hà Lan (hạt nhóm D). Mô hình Sheed cho kết quả tổn thất áp suất tốt nhất. Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu cung cấp thông số kỹ thuật tối ưu, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm sấy và thúc đẩy ứng dụng công nghệ hiện đại trong chế biến nông sản.

Từ khóa: *Chế độ sôi; Sấy bơm nhiệt; Sấy đậu Hà Lan; Sấy tầng sôi.*

ABSTRACT

This study experimentally determined the drying process of Pisum Sativumin a fluidized bed heat pump system. The results show that a 3 cm bed height optimally balances the moisture-removal rate and system stability. Fluidized-bed heat-pump drying outperforms conventional drying, reducing drying time by 60-90 minutes thanks to its superior heat- and mass-transfer efficiency. A 50°C drying temperature proved optimal for achieving an appropriate drying rate while preserving the product's structure and color. The Wen-Yu and Leva models yielded minimum-fluidization velocity predictions that closely matched the experimental values, with errors of 4.8% and 0.96%, respectively, making them suitable for green peas (group D particles). The Sheed model provided the most accurate pressure-drop predictions. This research supplies optimal technical parameters, contributing to improved dried-product quality and encouraging the adoption of advanced technologies in agricultural processing.

Keywords: *Fluidization regime; Heat-pump drying; Green pea drying; Fluidized-bed drying.*

1. GIỚI THIỆU

Đậu Hà Lan (Pisum sativum L.) là một trong những thực phẩm thiết yếu trong chế độ ăn của con người và được trồng ở hầu hết các quốc gia trên thế giới. Đậu Hà Lan xanh có giá trị cao về mặt dinh dưỡng và đặc biệt là nguồn protein giá rẻ giàu axit amin thiết yếu – tryptophan và lysin – mà cơ thể con người không tự tổng hợp được [1]. Đậu Hà Lan có ít yếu tố phản dinh dưỡng và giống như các cây họ đậu khác, đóng vai trò quan trọng trong dinh dưỡng cho người và động vật [2], [3]. Chúng được sử dụng rộng rãi trong súp, ngũ cốc ăn sáng, thịt chế biến, thực phẩm chức năng, mì ống, bột đậu hoặc chế biến thành tinh bột đậu và protein cô đặc [4].

Tuy nhiên, độ ẩm của đậu Hà Lan tươi rất cao từ 60 đến 75 %, điều này dẫn đến thời gian sử dụng sản phẩm rất ngắn nếu không bảo quản đúng cách. Để bảo quản sản phẩm trong thời gian dài, sấy là một trong những phương pháp có thể đáp ứng được nhiệm vụ này. Sấy có nhiều phương pháp khác nhau, nhiều chế độ khác nhau, từ đó sẽ dẫn đến sản phẩm sau khi sấy sẽ có chất lượng khác nhau. Chế độ sấy như nhiệt độ, ẩm độ, tốc độ gió là các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của sản phẩm sau khi sấy, trong đó nhiệt độ là yếu tố chính và tác động lớn nhất đến màu sắc, mùi vị của sản phẩm. Theo phân tích của nhóm tác giả Nguyễn Minh Hạ, Hà Anh Tùng [5] đã đánh giá thực nghiệm về sấy chanh bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại và đã đưa ra các thông số ảnh hưởng của quá trình sấy đến kết quả sấy này. Năm 2023, nhóm tác giả Dương Ngọc Khánh và Phan Thành Nhân [6] đã có công bố về nghiên cứu sấy trà hoa Lavender trên hệ thống sấy bơm nhiệt tầng sôi với kết luận đánh giá sự ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến tốc độ giảm ẩm của vật liệu sấy cũng như là so sánh hiệu quả sấy trên hệ thống sấy bơm nhiệt và hệ thống sấy bơm nhiệt tầng sôi. Với sản phẩm sấy đậu Hà Lan, tác giả Phạm Thị Hằng [7] đã thực nghiệm công nghệ sấy tầng sôi bơm nhiệt trên sản phẩm này và nghiên cứu cho thấy sấy bơm nhiệt tầng sôi đã cho kết quả tốt hơn so với sấy bơm nhiệt đơn thuần, đặc biệt về sự đồng đều trong giảm độ ẩm và chất lượng sản phẩm cuối cùng.

Bên cạnh đó, các nghiên cứu về hệ thống sấy cũng như là nghiên cứu chế độ ảnh hưởng của quá trình sấy trực tiếp trên sản phẩm cũng đã được thực hiện bởi nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới. Mohammadi, Z và cộng sự [8] đã so sánh hiệu quả của sấy tầng sôi bơm nhiệt với sấy tầng sôi truyền thống trên đậu Hà Lan, kết luận rằng sấy bơm nhiệt tầng sôi giảm được đáng kể thời gian và năng lượng tiêu thụ, đồng thời giữ chất lượng sản phẩm tốt hơn. Chen, X., [9] nghiên cứu tổng hợp các lợi ích của sấy bơm nhiệt trên nhiều loại nông sản xanh, đặc biệt là đậu Hà Lan, cho thấy khả năng giữ màu sắc và thành phần dinh dưỡng vượt trội. Kumar, A [10] đã khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của đậu Hà Lan sấy bằng bơm nhiệt, và nhận thấy rằng sản phẩm này có tỷ lệ chất dinh dưỡng cao hơn và thời gian bảo quản tốt hơn so với các sản phẩm sấy khác. Năm 2016, nhóm tác giả Folasayo Fayose, Zhongjie Huan [11] công bố nghiên cứu về sấy bơm nhiệt cho sản phẩm trái cây và rau quả: nguyên lý và tiềm năng cho Khu vực châu Phi cận Sahara.

Tại Hội nghị COP28 về biến đổi khí hậu, Thủ tướng Chính phủ Việt Nam đã tái khẳng định cam kết đạt mức phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050, đồng thời đặt mục tiêu giảm 43,5% lượng phát thải khí nhà kính vào năm 2030. Ứng dụng sấy bơm nhiệt tầng sôi hoàn toàn phù hợp với định hướng của Việt Nam tại COP28 thúc đẩy mô hình sản xuất xanh, giúp ngành chế biến nông sản chuyển đổi theo hướng phát triển bền vững.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về máy

sấy bơm nhiệt nhưng việc nghiên cứu sấy bơm nhiệt tầng sôi cho đậu Hà Lan chưa được rộng rãi tại Việt Nam. Bài báo này sẽ góp phần tìm ra các thông số kỹ thuật tối ưu để nâng cao chất lượng sản phẩm sấy, giúp các doanh nghiệp ứng dụng công nghệ này hiệu quả hơn để phù hợp với xu hướng sản xuất hiện đại và chính sách phát triển xanh của Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết

2.1.1. Xác định trở lực qua lớp hạt tiền sôi

Mô hình Sheed [12]:

$$\frac{\Delta P}{H_0} = A_1 \times V^{B_1} \quad (1)$$

Trong đó: A_1, B_1 là hằng số thực nghiệm được xác định qua thí nghiệm.

Hukill & Ives [13] đề xuất công thức thực nghiệm nhằm mở rộng mô hình Shedd cho dải tốc độ khí rộng hơn. Hukill và Ives đã đề xuất phương trình thực nghiệm như sau:

$$\frac{\Delta P}{H_0} = \frac{A_2 \times V^2}{\ln(1 + B_2 \times V)} \quad (2)$$

Trong đó: A_2, B_2 là hằng số đặc trưng cho từng loại hạt.

Hunter và Bajer-Arkema [14] đã cải tiến phương trình Ergun:

$$\frac{\Delta P}{H_0} = A_3 \times V + B_3 \times V^2 \quad (3)$$

Trong đó: A_3, B_3 là các hằng số thực nghiệm đã bao gồm ảnh hưởng của tính chất dòng khí.

2.1.2. Xác định vận tốc sôi tối thiểu

Vận tốc sôi tối thiểu nhằm xác định và đề xuất mô hình toán phù hợp trong các tính toán và để xác định vận tốc thấp nhất đi qua lớp hạt làm cho lớp hạt sôi. Trong các nghiên cứu đã công bố, nhiều mô hình tính toán đã được đề xuất nhằm xác định vận tốc sôi tối thiểu của dòng khí đi vào lớp hạt. Tiêu biểu có thể kể đến các mô hình Reynolds và Archimedes, Wen và Yu, Goroshko, Leva, Kunii-Levenspiel, Kozeny-Carman, Bena được tổng hợp trong Bảng 1.

Theo [15], nghiên cứu này đã chỉ ra rằng nhóm hạt Geldart loại D khó sôi do kích thước lớn và khối lượng riêng cao. Nên chọn bề dày lớp hạt là 3 cm nhằm tạo điều kiện cho việc hình thành cấu trúc tầng sôi rõ ràng hơn. Ở điều kiện này sẽ ít bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng thành và dòng khí cục bộ, từ đó phản ánh tốt hơn vận tốc sôi tối thiểu của hệ.

Bảng 1. Các công thức tính toán vận tốc sôi tối thiểu của đậu Hà Lan

Renold và Archimedes [17]	$Ar = 150 \times \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\phi^2 \times \varepsilon_{mf}^3} \times Re_{mf} + \frac{1.75}{\phi \times \varepsilon_{mf}^3} \times Re_{mf}^2$	(4)
	$Ar = \frac{g \times (d_m \times \phi)^3 \times (\rho_v - \rho_g) \times \rho_g}{\mu_k^2}$	(5)
Wen và Yu [17] (d_p > 100μm)	$V_{mf} = 7.9 \times 10^{-3} \times \phi \times d_p^{1.82} \times (\rho_v - \rho_g) \times 0.94 \times \mu_k^{-0.83}$	(6)

Goroshko [17]	$Re_{mf} = \frac{Ar}{150 \times \frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} + \sqrt{\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3} \times Ar}}$	(7)
Leva [18]	$V_{mf} = \frac{7.169 \times 10^{-4} \times (\phi \times d_m)^{1.82} \times (\rho_v - \rho_k)^{0.94} \times g}{\mu_k^{0.88} \times \rho_k^{0.006}}$	(8)
Kunii- Levenspiel [18]	$\frac{1.75}{\phi \times \varepsilon_{mf}^3} \times \frac{(d_p \times V_{mf} \times \rho_k)^2}{\mu_k} + \frac{150 \times (1-\varepsilon_{mf})}{\phi^2 \times \varepsilon_{mf}^3} \times \frac{d_p \times V_{mf} \times \rho_k}{\mu_k} = \frac{d_p^3 \times \rho_k \times (\rho_s - \rho_k) \times g}{\mu_k^2}$	(9)
Kozeny-Carman [19]	$V_{mf} = \frac{g \times (\rho_v - \rho_g)}{150 \times \mu_k} \times \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \times \phi^2 \times d_p^2$	(10)
Bena [19]	$V_{mf} = \frac{\mu_k}{\rho_k \times d_p} \times \left(\frac{1.38 \times 10^{-3} \times Ar}{(Ar+19)^{0.11}} \right)$	(11)

2.2. Vật liệu sấy

Đậu Hà Lan sử dụng trong nghiên cứu này, được trồng tại huyện Đơn Dương, tỉnh Lâm Đồng. Sau khi tách vả quả, chọn hạt với đường kính 7±0.5 mm. Lượng đậu Hà Lan mỗi mẻ sấy phụ thuộc vào chiều cao lớp hạt. Độ ẩm ban đầu của đậu Hà Lan được xác định bằng máy cân sấy ẩm MX 50, xác định được ẩm độ ban đầu của mẫu là 69%. Khối lượng riêng thực của đậu Hà Lan p_v = 1088 kg/m³, độ xốp của hạt ε = 42%, độ cầu tròn của hạt ϕ = 86 % [16].

2.3. Phương pháp lấy số liệu

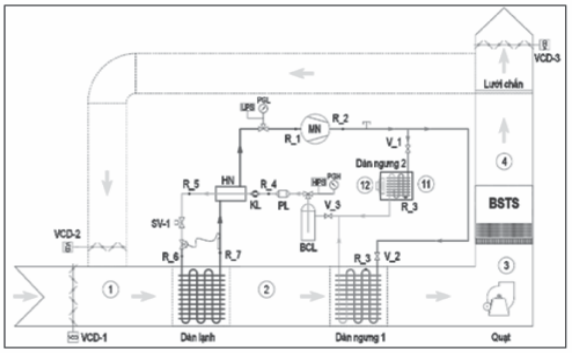
Độ ẩm vật liệu sấy theo cơ sở ướt:

$$\omega_a = \frac{G_a}{G}.100\% = \frac{G_a}{G_k + G_a}.100\% \quad (12)$$

Độ ẩm của mẫu được đo sau mỗi 30 phút cho đến khi kết thúc quá trình sấy.

2.4. Mô hình thực nghiệm

Sơ đồ nguyên lý bơm nhiệt tầng sôi được bố trí như trong hình 1. Với công suất máy nén 0,532kW, năng suất dàn lạnh 2,37kW, hai dàn nóng năng suất lần lượt là 2,37kW và 0,472kW, tác nhân R134A được sử dụng trong hệ thống.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống bơm nhiệt tầng sôi

Nguyên lý hoạt động: Tác nhân sấy (TNS) được đưa qua dàn lạnh giảm nhiệt độ để

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

tách ẩm, sau đó đưa qua dàn nóng chính tăng nhiệt độ đến nhiệt độ sấy sau đó được dẫn qua quạt cao áp để tạo chế độ sôi cho vật liệu sấy (VLS) và thực hiện quá trình sấy tại buồng sấy. Một lưới chắn được bố trí ở đầu ra của buồng sấy để ngăn VLS bay theo TNS. Hệ thống có các chế độ hồi lưu: hồi lưu hoàn toàn (VCD-2 mở, VCD-1, 3 đóng), hồi lưu một phần (VCD-1, 3 mở tùy lưu lượng TNS hồi lưu, VCD-2 mở hoàn toàn), và không hồi lưu (VCD-1,3 mở hoàn toàn, VCD-2 đóng). Khi bơm nhiệt hoạt động, van V_1, 2, 3 mở hoàn toàn. Van V_1 được dùng để điều chỉnh môi chất lạnh vào dàn ngưng 2 nhằm điều chỉnh nhiệt độ TNS vào buồng sấy, có thể điều chỉnh nhiệt độ TNS từ 33°C đến 60°C.

2.5. Bố trí thí nghiệm và dụng cụ đo

Thực nghiệm được bố trí với ba biến đầu vào:

- Chiều cao lớp hạt: 2cm; 3cm; 4 cm;
- Nhiệt độ sấy: 45°C; 50°C; 55°C;
- Tốc độ sấy: 6÷20 m/s.

Dụng cụ đo sử dụng trong nghiên cứu được liệu kê trong bảng 2.

Bảng 2. dụng cụ đo

Dụng cụ đo	Mã	Sai số
Ẩm vật liệu	AND MX-50	± 0,1%
Khối lượng	AND FEH-1000	± 0.1 g
Tốc độ gió	Testo 425	± 0,3 m/s
Tổn thất áp suất	TSI 9565	± 1 Pa
Nhiệt độ	Extech 4 kênh	± 0.1°C
Chiều cao	Thước 20 cm	± 1 mm

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tính toán vận tốc sôi tối thiểu và so sánh với thực nghiệm

Vận tốc sôi tối thiểu cục bộ đo được ở bề dày lớp hạt tươi 3 cm là 15.8 m/s với đường kính hạt 7.5 mm và nhiệt độ sấy là nhiệt độ môi trường. Mối quan hệ giữa vận tốc thực tế và vận tốc biểu kiến là:

$$V_t = \frac{Q}{A_{rỗng}} = \frac{Q}{\varepsilon \times A} = \frac{V}{\varepsilon} \quad (13)$$

Với độ xốp lớp hạt là 0.42 và độ xốp khi sôi là 0.462. Vậy vận tốc biểu kiến của lớp hạt khi sôi theo thực nghiệm là 7.3 m/s. Kết quả được giải thích do đối với hạt nhóm D, khí thường đi tắt qua vùng trung tâm thay vì phân bố đều, đòi hỏi vận tốc khí phải đủ mạnh để nâng toàn bộ hạt, gần bằng vận tốc cuốn trôi hạt. Bảng 3 tóm tắt kết quả tính toán vận tốc sôi tối thiểu V_{mf} từ các mô hình và sai số so với thực nghiệm. Dựa trên kết quả trên, có thể thấy các mô hình của Wen và Yu có độ tương thích cao với thực nghiệm với sai số dưới 5%.

Bảng 3. Kết quả tính toán V_{mf} từ các mô hình khác nhau và sai số so với giá trị thực nghiệm

Phương pháp lý thuyết	V_{mf}	Chênh lệch so với thực nghiệm
Thực nghiệm (d_m = 0.0075, H_0 = 3 cm)	7.3	Tham chiếu
Re và Ar	1.54	79%
Wen và Yu	7.65	4.8%
Goro	1.652	77%
Leva	7.23	0.96%
Kunni và Levenspiel	26.27	259.9%
Kozeny-Carman	19.4	168.8%
Bena	4.68	36%

3.2. Tính toán tổn áp lý thuyết và so sánh với thực nghiệm

Kết quả được thể hiện trong Bảng 4, cho thấy mô hình Sheed cho ra kết quả tốt nhất tại các mức chiều cao lớp hạt tĩnh. Mối quan hệ giữa tổn áp và vận tốc biểu kiến được biểu diễn như sau:

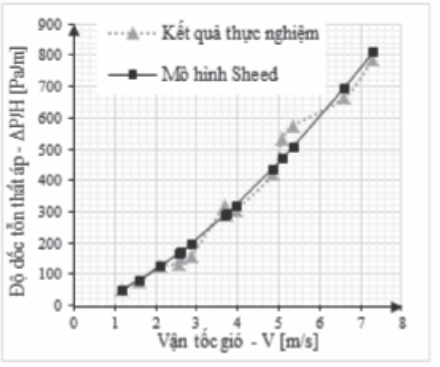
$$\frac{\Delta P}{H_0} = 40.84 \times V^{1.503} \quad (14)$$

Với hệ số xác định $R^2 = 0.979$ và sai số phần trăm trung bình e = 9.08%, mô hình được xem là có khả năng ứng dụng tốt trong thực tế.

Bảng 4. Mô hình tính toán tổn áp tiền sôi

Mô hình toán	A	B	R^2	e
Sheed	40.84	1.503	0.979	9.08
Hukill và Ives	31.83	0.953	0.976	10.37
Ergun cải tiến	42.54	9.55	0.974	12.01

So sánh độ dốc tổn áp lý thuyết và thực nghiệm theo vận tốc được thể hiện qua Hình 2.

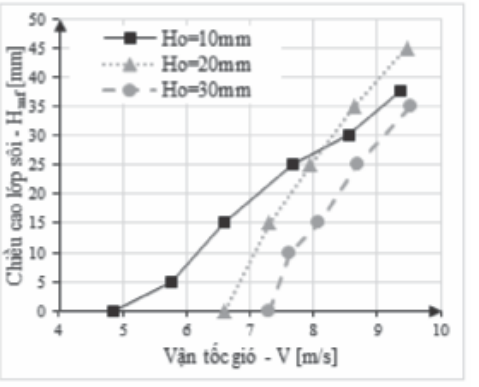


Hình 2. So sánh tổn áp qua lớp hạt giữa lý thuyết và thực nghiệm theo vận tốc

3.3. Mối quan hệ tổn áp – vận tốc gió – chiều cao lớp hạt

Các thí nghiệm sau đây được thực hiện khi không mở bộ sấy bơm nhiệt mà chỉ có quạt ly tâm hoạt động để khảo sát mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào (chiều cao lớp hạt tĩnh H_o, vận tốc gió V) đối với các yếu tố đầu ra (chiều cao lớp sôi H_{mf}, tổn thất áp suất Δp).

3.3.1. Mối quan hệ vận tốc sôi tối thiểu và chiều cao lớp sôi của hạt đậu tươi



Hình 3. Chiều cao lớp sôi của hạt đậu tươi theo vận tốc gió

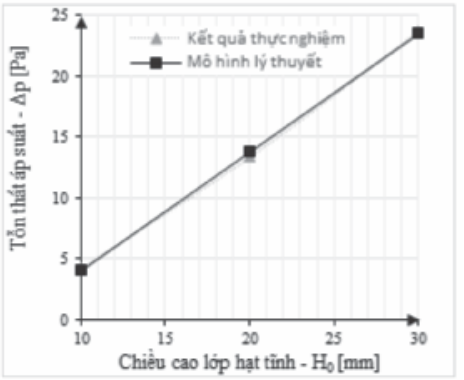
Thực nghiệm sấy đậu Hà Lan tươi ở ba mức chiều cao lớp hạt tĩnh là 1, 2, 3 cm, lần lượt thu được vận tốc sôi tối thiểu V_{mf} là 4.85; 6.61; 7.30 m/s. Dựa vào kết quả thực nghiệm được trình bày trên Hình 3, ta có thể thấy chiều cao lớp hạt tĩnh (H_o) càng lớn thì vận tốc tối thiểu để lớp hạt bắt đầu sôi càng cao.

3.3.2. Mối quan hệ giữa tổn áp và chiều cao lớp hạt

Tổn thất áp suất qua lớp hạt tươi đo được thể hiện trên Hình 4. Qua kết quả thực nghiệm ta có thể thấy, tổn thất áp suất dòng khí qua lớp hạt đậu tươi phụ thuộc theo chiều cao lớp hạt tĩnh và chúng có quan hệ tuyến tính như sau:

$$\Delta P = 972.5 \times H_0 - 5.73 \quad (15)$$

Với hệ số xác định $R^2 = 0.9987$ giải thích trong 100% sự biến động của ΔP so với trung bình của nó thì có 99.87% là do H_0 gây ra. Trong mô hình hồi quy tuyến tính đơn $r^2 = R^2$, ta được hệ số tương quan mẫu $|r| > 0.9993$ do đó, ΔP và H_0 có quan hệ tuyến tính mạnh.



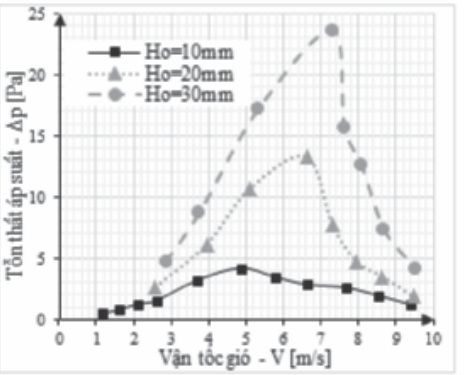
Hình 4. So sánh tổn thất áp suất qua lớp hạt tươi theo chiều cao lớp hạt

3.3.3. Mối quan hệ giữa tổn áp và vận tốc gió

Theo kết quả trong Hình 5, tại đỉnh của các đường cong thể hiện sự biến đổi của tổn áp theo vận tốc gió, tổn thất áp suất đạt giá trị lớn nhất ứng với giá trị vận tốc sôi tối thiểu. Theo chiều tăng của vận tốc, tổn áp có thể tăng hoặc giảm, chia làm hai giai đoạn.

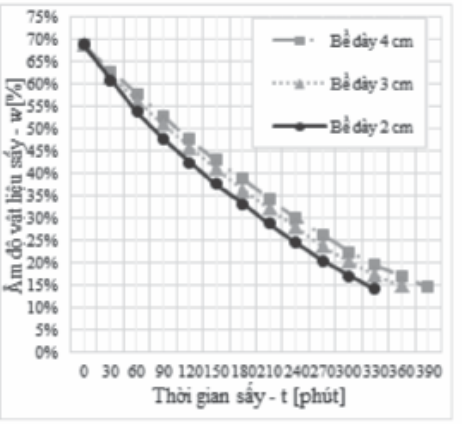
- Giai đoạn chưa sôi ($V < V_{mf}$): Theo lý thuyết, tổn áp tăng theo bình phương vận tốc. Tuy nhiên, thực nghiệm cho thấy tổn áp thấp hơn và đường cong có dạng đa thức bậc hai, có thể do các yếu tố như phân bố khí không đều, ma sát thành, sai số đo, hạt không đồng đều hoặc một số hạt đã sôi nhẹ làm giảm sức cản.

- Giai đoạn sau khi sôi ($V > V_{mf}$): Vận tốc tăng làm lớp hạt dao động mạnh, chiều cao lớp sôi tăng, mật độ hạt giảm, khí lưu thông dễ hơn nên tổn áp giảm dần.



Hình 5. Đồ thị tổn thất áp suất theo vận tốc gió.

3.4. Ảnh hưởng của bề dày lớp hạt đến quá trình sấy



Hình 6. Sấy bơm nhiệt tầng sôi khi thay đổi bề dày lớp hạt ban đầu.

Thực nghiệm xác định ảnh hưởng của bề dày lớp hạt đến quá trình sấy được thực hiện ở nhiệt độ 50°C với bề dày 2 cm, 3 cm, 4 cm. Kết quả Hình 6 cho thấy, bề dày lớp hạt 2 cm cho tốc độ tách ẩm nhanh nhất do lớp hạt mỏng giúp không khí nóng dễ dàng xuyên qua. Tuy nhiên, sự ổn định của quá trình sấy bị ảnh hưởng bởi điều kiện lưu lượng gió do chiều cao vật liệu sấy thấp. Ở bề dày lớp hạt 4 cm, thời gian tách ẩm chậm nhất do bề dày vật liệu lớn cản trở luồng không khí nóng, làm giảm hiệu quả tách ẩm. Chiều cao lớp hạt 3 cm cho kết quả cân bằng giữa tốc độ giảm ẩm và độ ☞

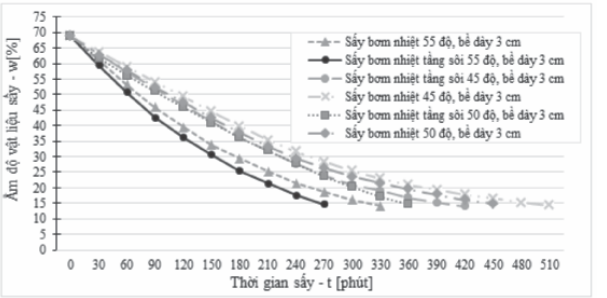
ổn định cao. Chiều cao này đảm bảo hiệu quả truyền nhiệt và trạng thái tầng sôi ổn định trong suốt quá trình sấy.

3.5. So sánh quá trình sấy trên hệ thống bơm nhiệt tầng sôi và hệ thống bơm nhiệt

Đường cong tốc độ sấy khi sử dụng máy sấy bơm nhiệt tầng sôi luôn nằm dưới và giảm nhanh hơn so với máy sấy bơm nhiệt thể hiện trong Hình 7, chứng tỏ hiệu quả truyền nhiệt – truyền ẩm vượt trội của phương pháp này. Cụ thể, việc sử dụng phương pháp sấy bơm nhiệt tầng sôi giúp sản phẩm giảm độ ẩm nhanh hơn và đạt độ ẩm mong muốn sớm hơn khoảng 60-90 phút so với sấy bơm nhiệt truyền thống tại cùng một mức nhiệt. Điều này khẳng định bơm nhiệt tầng sôi là phương pháp sấy hiệu quả hơn.

3.6. Ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến quá trình sấy

Với chiều cao lớp hạt cố định 3 cm, khi tăng nhiệt độ từ 45°C, 50°C, 55°C, tốc độ sấy tăng rõ rệt. Mẫu sấy ở 55°C luôn cho độ giảm ẩm thấp hơn so với 45°C và 50°C, cho thấy nhiệt độ cao giúp quá trình bay hơi diễn ra nhanh hơn và rút ngắn thời gian sấy. Tuy nhiên, sấy ở nhiệt độ 55°C gây ra một số vấn đề về chất lượng sản phẩm, bao gồm hiện tượng nứt, biến dạng bề mặt và màu sắc không tươi ở một vài hạt. Nguyên nhân là do quá trình bốc tách ẩm bề mặt diễn ra quá nhanh, trong khi độ ẩm bên trong chưa kịp khuếch tán ra ngoài, gây ra lực căng lớn và hư hại sản phẩm. Vì vậy, mặc dù 55°C rút ngắn thời gian sấy, nhưng nó ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng. 50°C được xác định là mức nhiệt độ tối ưu cho quá trình sấy bơm nhiệt tầng sôi.



Hình 7. Tốc độ sấy của máy sấy bơm nhiệt tầng sôi và máy sấy bơm nhiệt tại các mức nhiệt độ khác nhau

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thành công trong việc làm rõ các thông số vận hành tối ưu cho quá trình sấy đậu Hà Lan bằng hệ thống sấy bơm nhiệt tầng sôi. Cụ thể, chiều cao lớp hạt 3 cm và nhiệt độ sấy 50°C được xác định là tối ưu nhất, đảm bảo tốc độ sấy phù hợp, giữ gìn cấu trúc và tránh các vấn đề chất lượng do sấy ở nhiệt độ cao. So với phương pháp sấy bơm nhiệt truyền thống, sấy bơm nhiệt tầng sôi cho thấy hiệu quả truyền nhiệt và truyền ẩm cao hơn, rút ngắn khoảng 60-90 phút khi sử dụng cùng mức nhiệt. Mô hình Leva và Wen-Yu dự đoán kết quả vận tốc sôi tối thiểu sát với thực nghiệm, trong khi mô hình Sheed cho kết quả tổn thất áp suất tốt nhất. Những kết quả này cung cấp cơ sở dữ liệu cho thiết kế và vận hành máy sấy, góp phần giảm tiêu thụ năng lượng và thúc đẩy ứng dụng công nghệ hiện đại trong chế biến nông sản.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số SVTC-2024-CK-103. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

• Danh mục viết tắt:

A (m^2): Diện tích phân phối khí;
Ar (-): Chuẩn động dạng Archimedes;
d_p (m): Đường kính trung bình của hạt;
ε (-): Độ xốp của lớp hạt;
ε_{mf} (-): Độ xốp của lớp hạt khi sôi;
G_a (kg): Khối lượng nước chứa trong vật liệu ẩm;
G (kg): Khối lượng của toàn bộ vật liệu ẩm;
H_0 (m): Chiều cao lớp hạt tĩnh;
H_{mf} (m): Chiều cao lớp hạt sôi;
m (kg): Khối lượng hạt trong bộ phân phối khí;
ρ_v (kg/m^3): Khối lượng riêng thực của hạt;
ρ_k (kg/m^3): Khối lượng riêng của không khí trong buồng;
μ_k (Ns/m^2): Độ nhớt động học của không khí trong buồng;
ΔP (Pa): Tổn thất áp suất dòng khí qua lớp hạt;
ϕ (%): Độ cầu tròn của hạt;
Re (-): Chuẩn động dạng Reynolds;
V ($m^3/m^2.s$): Vận tốc khí biểu kiến;
V_t (m/s): Vận tốc khí thực tế.

• Xung đột lợi ích:

Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

• Đóng góp của các tác giả:

Phan Thành Nhân đề xuất ý tưởng nghiên cứu, xây dựng kế hoạch thí nghiệm, thảo luận phương pháp, chỉnh sửa và kiểm tra các mô hình toán và đồng thời chịu trách nhiệm về nội dung bài báo.

Bùi Nguyễn Nhật Tài, Bùi Hoàng Gia Bảo, Nguyễn Tuấn Đạt tham gia thực hiện thí nghiệm, thu thập dữ liệu, phân tích kết quả và đề xuất mô hình toán học phù hợp.❖

Ngày nhận bài: **21/7/2025**
Ngày phản biện: **06/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Tiwari, B.K. and Singh, N. (2012), "*Pulse chemistry and technology*". Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry.
[2]. Wang, N., Hatcher, D.W. and Gawalko, E.J. (2008), "*Effect of variety and processing on nutrients and certain anti-nutrients in field peas (Pisum sativum L.)*. Food Chemistry 111: 132-138.
[3]. Nguyen, G.T., Gidley, M.J. and Sopade, P.A. (2015), "*Dependence of in-vitro starch and protein digestions on particle size of field peas (Pisum sativum L.)*. LWT - Food Science and Technology 63: 541-549.
[4]. Sharma, S., Singh, N., Singh Virdi, A. and Chand Rana, J. (2015), "*Quality traits analysis and protein profiling of field pea (Pisum sativum L.) germplasm from Himalayan region*". Food Chemistry 172: 528-536.
[5]. Nguyễn Minh Hạ và Hà Anh Tùng, "*Nghiên cứu thực nghiệm sấy chanh bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại*", Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật, số 66, 2021.
[6]. Dương Ngọc Khánh và Phan Thành Nhân, "*Nghiên cứu sấy trà hoa Lavender trên hệ thống sấy bơm nhiệt tầng sôi*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 309, 2023.
[7]. Phạm Thị Hằng (2021), "*Nghiên cứu ứng dụng công nghệ sấy tầng sôi bơm nhiệt cho đậu Hà Lan*". Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, 21(5): 85-90.
[8]. Mohammadi, Z., et al. (2019), "*Fluidized bed drying: A comparative study on heat pump and conventional drying methods*". Food Processing and Preservation Journal. Link truy cập: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218324654
[9]. Chen, X., et al. (2020), "*Advances in heat pump drying technology for green vegetables and legumes*". Food Science & Technology International. Link truy cập: https://www.intechopen.com/chapters/73182#B35

[10]. Kumar, A., et al. (2018), "*Drying of pulses using advanced techniques*". Journal of Food Science and Technology, 55(10): 3711-3720.
[11]. Folasayo Fayose, Zhongjie Huan, "*Heat Pump Drying of Fruits and Vegetables: Principles and Potentials for Sub-Saharan Africa*". International Journal of Food Science, vol. 2016, Article. ID 9673029, 8 pages, 2016.
[12]. Shedd, C. K. (1953), "*Resistance of Grains and Seeds to Airflow*". Agric. Eng., 34(9): 616-619.
[13]. Hukill, W. V., & Ives, S. J. (1955), "*Resistance of Grain and Seeds to Airflow*". Transactions of the ASAE, 1(1), 61-64.
[14]. Hunter, J. E., & Bajer-Arkema, B. (1986), "*Airflow resistance of wheat and barley as affected by airflow direction, moisture content, and bulk density*". Transactions of the ASAE, 29(6), 1745-1750.
[15]. Mohd Faizal Mohideen, Suzairin Md Seri and Vijay R. Raghavan (2011), "*Fluidization of Geldart Type-D Particles in a Swirling Fluidized Bed*". Applied Mechanics and Materials, vol. 110-116, pp. 3720-3727.
[16]. Ganjloo, A và cộng sự, (2018), "*Moisture-dependent physical properties of green peas (Pisum sativum L.)*". International Food Research Journal 25(3): pp. 1246-1252.
[17]. Bui T. T., "*Determination on Fluidization Velocity Types of the Continuous Refined Salt Fluidized Bed Drying", 2009.*
[18]. Phan T. N., *"Nghiên cứu thực nghiệm xác định chế độ sôi của hạt tiêu trong quá trình sấy tầng sôi*", 2021.
[19]. X. S. Wang and M. J. Rhodes (2005), "*Pulsed fluidization – A DEM study of a 144 fascinating phenomenon*". Powder Technology, vol. 159, pp. 142-149.

THỰC NGHIỆM ĐÁNH GIÁ CÁC THÔNG SỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN HIỆU QUẢ VẬN HÀNH CỦA HỆ THỐNG WATER CHILLER

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE PARAMETERS AFFECTING THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF A WATER CHILLER SYSTEM

Nguyễn Chí Khanh[1,2], Lê Nhật Quang[1,2], Đặng Thế Vinh[1,2], Phan Thành Nhân[1,2,*]
[1]Bộ môn Công nghệ Nhiệt Lạnh, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
[2]Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
**Email tác giả liên hệ: phannhan@hcmut.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của các thông số vận hành như tần số bơm và tốc độ quạt AHU đến hiệu suất hệ thống chiller, nhằm tối ưu hóa hệ số hiệu quả COP. Đồng thời, nghiên cứu xem xét tác động môi trường bằng cách cưỡng bức thay đổi điều kiện xung quanh dàn ngưng thông qua phương pháp phun sương trực tiếp. Quy trình thực nghiệm bao gồm: giảm tần số bơm từ 50 Hz xuống 30 Hz, hạ lưu lượng gió qua AHU từ 2000 L/s xuống 1600 L/s bằng cách giảm tốc độ quạt, và phun sương vào không khí trước dàn ngưng. Kết quả cho thấy khi giảm tần số bơm sẽ làm tăng độ chênh nhiệt độ tại dàn bay hơi, qua đó cải thiện COP. Tuy nhiên, giảm tốc độ quạt làm giảm hiệu suất trao đổi nhiệt, khiến nước lạnh hồi về nóng hơn, dẫn đến chiller vận hành ở chế độ giảm tải và COP giảm nhẹ. Ngoài ra, phương án phun sương trước dàn ngưng giúp giảm nhiệt độ không khí sau dàn, từ đó hạn chế tác động tiêu cực đến môi trường. Kết quả thực nghiệm phù hợp với xu hướng của mô phỏng lý thuyết, dù giá trị thực tế thấp hơn do điều kiện thực không lý tưởng. Nghiên cứu cho thấy tiềm năng tiết kiệm năng lượng đáng kể khi điều chỉnh hợp lý các thông số vận hành chiller. Phương pháp này được đề xuất như một giải pháp khả thi nhằm nâng cao hiệu quả năng lượng cho các hệ thống HVAC trong tương lai.

Từ khóa: *Water chiller; COP; Tần số bơm; Tốc độ quạt AHU; Giải nhiệt phun sương.*

ABSTRACT

The study evaluates the impact of operating parameters such as pump frequency and AHU fan speed on the performance of a chiller system, intending to optimize the coefficient of performance (COP). At the same time, it considers environmental effects by actively altering the conditions around the condenser through a direct water-spray method. The experimental procedure included reducing the pump frequency from 50 Hz to 30 Hz, lowering the airflow rate through the AHU from 2000 L/s to 1600 L/s by decreasing fan speed, and spraying water mist into the air before the condenser. Results show that lowering the pump frequency increases the temperature difference across the evaporator, thereby improving COP. However, reducing fan speed decreases heat transfer efficiency, causing higher chilled-water return temperature and leading the chiller ☞

to operate under partial load, slightly reducing COP. In addition, spraying water mist before the condenser lowers the air temperature after the coil, thus mitigating negative environmental impacts. The experimental results align with theoretical simulation trends, although actual values are lower due to non-ideal conditions. The study demonstrates significant energy-saving potential when chiller operating parameters are properly adjusted and proposes this method as a feasible solution for improving energy efficiency in future HVAC systems.

Keywords: *Water chiller; Coefficient of Performance (COP); Pump frequency; AHU fan speed; Spray cooling (condenser mist cooling).*

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh nhu cầu năng lượng và lượng khí thải carbon toàn cầu, các tòa nhà chiếm tỉ lệ khá lớn, trong đó hệ thống HVAC đóng góp một nửa lượng tiêu thụ này. So với việc trang bị thêm hệ thống trên diện rộng, việc dự đoán chính xác nhu cầu năng lượng và xây dựng chiến lược vận hành hợp lý cho hệ thống làm mát dựa trên thiết bị hiện có có thể tiết kiệm năng lượng với chi phí hiệu quả hơn. Trong hệ thống làm mát của các tòa nhà thương mại hoặc căn hộ lớn, chiller thường tiêu thụ nhiều năng lượng hơn so với các thiết bị khác như tháp giải nhiệt và bơm, chiếm trên 40% tổng năng lượng tiêu thụ của nhà máy làm mát. Do đó, các nghiên cứu gần đây ngày càng tập trung vào việc tối ưu hóa khả năng vận hành để tìm ra các thông số hoạt động phù hợp và tối ưu thiết bị làm lạnh để cải thiện hiệu quả cũng như tiết kiệm năng lượng. Nguyễn Đình Vịnh cùng các cộng sự đã có những nghiên cứu giải pháp tiết kiệm năng lượng cho hệ thống điều hòa không khí chiller bằng phương pháp phân phối phụ tải tối ưu [1], phương pháp tối ưu hóa để vận hành hệ thống lạnh trung tâm chiller [2] và tối ưu hóa chế độ vận hành hệ thống lạnh trung tâm chiller có lưu lượng nước thay đổi [3].

Yixing Chen nghiên cứu tối ưu hóa hoạt động của nhà máy làm lạnh đa chức năng dựa trên mô phỏng hiệu suất năng lượng [4]. Zhiyang Jia và các cộng sự đã đưa ra phương pháp lựa chọn cấu hình công suất mạnh mẽ của hệ thống nhiều máy làm lạnh liên quan đến sự không chắc chắn của hồ sơ tải hàng giờ, hàng năm [5]. Yiqun Zhu tìm hiểu và đưa ra chiến lược kiểm soát tiên tiến để tối ưu hóa trạng thái hoạt động của máy làm lạnh với công nghệ lưu trữ lạnh trong trung tâm dữ liệu [6]. Shaobo Sun đưa ra một chiến lược kiểm soát trình tự mạnh mẽ trực tuyến cho các máy làm lạnh giống hệt nhau sử dụng phương pháp xác suất liên quan đến sự không chắc chắn về phép đo lưu lượng [7]. Si Wu đánh giá hiệu suất làm lạnh theo mùa bằng cách sử dụng dữ liệu vận hành [8]. Pawel Olszewski phân tích thực nghiệm về máy làm lạnh công nghiệp điều khiển bằng biến tần và ON/OFF hướng tới hoạt động tiết kiệm năng lượng [9]. Syed A. Tirmizi phân tích hiệu suất của hệ thống nước lạnh với nhiều sơ đồ bơm khác nhau [10]. J.A. Borja-Conde đã nghiên cứu quản lý hiệu quả các hệ thống HVAC thông qua hoạt động phối hợp của các đơn vị làm lạnh song song: một phương pháp kiểm soát dự đoán kinh tế [11]. Kun He tối ưu hóa kiểm soát dự đoán của nhà máy làm lạnh dựa trên học tăng cường sâu [12]. F.W. Yu tối ưu hóa hệ thống làm lạnh nước với điều khiển tốc độ dựa trên tải [13].

Qua các nghiên cứu trên cho thấy việc tối ưu hóa khả năng vận hành để tiết kiệm năng lượng cho hệ thống lạnh nhận được sự quan

tâm rất lớn của các nhà nghiên cứu. Do đó, bài báo này tập trung nghiên cứu đánh giá thực nghiệm dựa trên sự thay đổi tần số bơm nước lạnh cũng như thay đổi tốc độ quay của quạt AHU để đánh giá hiệu quả năng lượng, cũng như thời gian vận hành ổn định của hệ thống water chiller thực tế.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết

2.1.1. Thời gian vận hành ổn định của water chiller giải nhiệt gió

Chế độ vận hành ổn định của water chiller giải nhiệt gió là trạng thái mà các thông số vận hành chính là nhiệt độ không khí cấp, nhiệt độ đọng sương, nhiệt độ nước ra khỏi water chiller duy trì ở mức ổn định và ít biến động. Thời gian để đạt trạng thái này được gọi là thời gian ổn định, là một chỉ số quan trọng đánh giá hiệu quả khởi động và khả năng phản ứng của hệ thống trước các thay đổi về điều kiện không khí bên ngoài.

2.1.2. Xác định hiệu quả vận hành của hệ thống water chiller khi thay đổi biến tần bơm

Năng suất lạnh:

$$Q = G_n \times C_{pn} \times \Delta T_n \quad (1)$$

Hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống:

$$EER = \frac{Q}{P} \quad (2)$$

Năng suất giải nhiệt của dàn ngưng:

$$Q_k = G_{kk} \times \Delta I_{kk} \quad (3)$$

COP của chiller:

$$COP = \frac{Q_0}{W} \quad (4)$$

2.1.3. Xác định sự tác động khi thay đổi lưu lượng gió qua AHU đến hệ thống water chiller

Nhiệt độ không khí trong buồng hòa trộn:

$$t_{hòa\ trộn} = t_{OA} \times a + (1 - a) \times t_{phòng} \quad (5)$$

Enthalpy của không khí trong buồng hòa trộn:

$$I_{mix} = \frac{L_{OA} \times I_{OA} + L_{hồi} \times I_{hồi}}{L} \quad (6)$$

Năng suất lạnh AHU:

$$Q_{AHU} = G \times (I_{hòa\ trộn} - I_{SA}) \quad (7)$$

2.2. Mô hình thực nghiệm

Hệ thống water chiller giải nhiệt gió model CGAT085 như hình 1 với năng suất lạnh 25,3 kW, sử dụng môi chất lạnh R407C và nguồn điện 380-450/3/50 do hãng Trane sản xuất, được lắp đặt tại Bộ môn Công nghệ Nhiệt Lạnh, Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG TP. Hồ Chí Minh. Máy nén là loại xoắn ốc kín, dàn bay hơi dạng tấm, dàn ngưng tụ ống cánh kết hợp van tiết lưu nhiệt. Quạt dàn ngưng là loại hướng trục với lưu lượng gió 5768 cfm (≈2722 l/s), công suất động cơ 320 W. Toàn bộ hệ thống có kích thước 1050×950×1080 mm và khối lượng 204 kg, đáp ứng cơ bản các tiêu chuẩn để tiến hành thí nghiệm.



Hình 1. Hệ thống water chiller

Dụng cụ đo:

- Máy đo tốc độ gió Testo 416 ± 0,1 m/s;

- Máy đo nhiệt độ dataloger Extech SDL200, ± 0,1°C;

- Thiết bị Airflow TSI EBT721: Đo lưu lượng, áp suất, nhiệt độ, ẩm độ, ± 3%;

- Hệ thống đo lường tích hợp trên hệ thống (bao gồm cảm biến và phần mềm giám sát).

Cỡ mẫu và phương pháp thu thập dữ liệu: Mỗi trường hợp thử nghiệm được lặp lại 3 lần để đảm bảo tính lặp lại và độ tin cậy của dữ liệu.

Phạm vi thí nghiệm:

• Chế độ cài đặt:

- Nhiệt độ gió cấp: 22°C;
- Nhiệt độ đọng sương: 18°C.

• Khảo sát thời gian vận hành ổn định của hệ thống qua 3 chế độ làm việc:

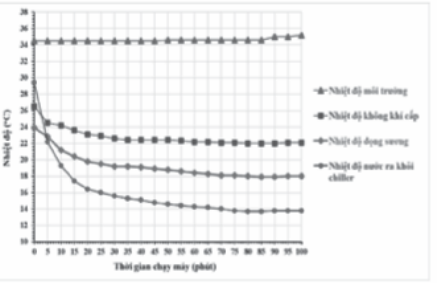
- Chế độ 1: Giải nhiệt bằng không khí tần số bơm 50 Hz;
- Chế độ 2: Giải nhiệt bằng không khí tần số bơm 40 Hz;
- Chế độ 3: Giải nhiệt bằng không khí phun sương tần số bơm 50 Hz.

• Thay đổi tần số bơm nước cấp: 50Hz, 45hz, 40Hz, 35Hz, 30Hz.

• Lưu lượng gió cấp qua AHU: 2000 m³/h, 1800 m³/h, 1700 m³/h, 1600 m³/h.

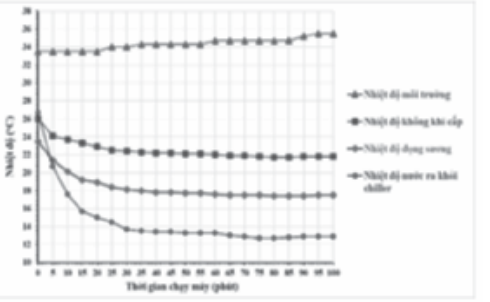
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xác định thời gian vận hành ổn định của hệ thống

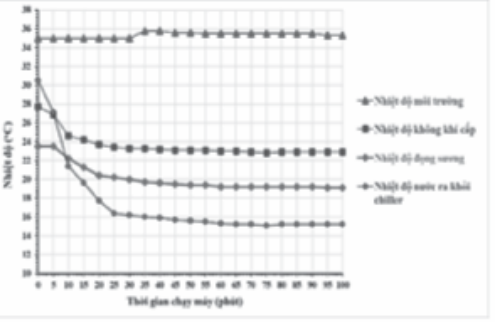


Hình 2. Thông số thực nghiệm chế độ 1

Hình 2 trình bày sự thay đổi của các thông số vận hành của chế độ 1, với môi trường bên ngoài ban đầu có nhiệt độ 34,5°C và độ ẩm 58,8%, nhiệt độ nước ra khỏi chiller giảm từ 29,4°C xuống 15,6°C sau 30 phút vận hành và ổn định ở 15,6-13,7°C. Nhiệt độ không khí cấp giảm từ 26,5°C xuống 22°C.



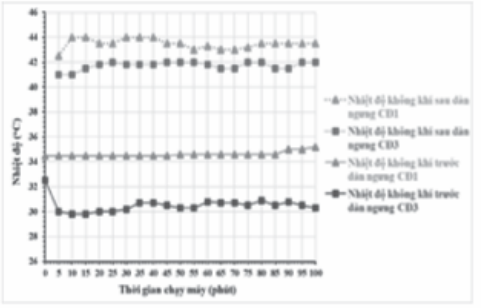
Hình 3. Thông số thực nghiệm chế độ 2



Hình 4. Thông số thực nghiệm chế độ 3

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Ở chế độ 2 trên hình 3 cho thấy nước ra khỏi chiller giảm từ 26,7°C xuống 12,7°C sau 30 phút; không khí cấp giảm từ 26°C xuống 21,7°C sau 25 phút; Trên hình 4, sự thay đổi của các thông số vận hành của chế độ 3, nước ra khỏi chiller giảm từ 30,5°C xuống 15,1°C và ổn định sau 25 phút; không khí cấp giảm từ 27,7°C xuống 22,8°C và ổn định ở 23,4-22,8°C sau 25 phút.



Hình 5. So sánh nhiệt độ không khí trước và sau dàn ngưng của chế độ 1 và 3

Hình 5 cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của phun sương đến hiệu quả vận hành của water chiller. Khi giải nhiệt dàn ngưng bằng không khí khô, nhiệt độ trước và sau đều cao hơn so với khi phun sương, buộc hệ thống làm việc ở áp suất ngưng tụ lớn, dẫn đến tiêu thụ năng lượng và phát thải nhiệt nhiều hơn. Ngược lại, khi phun sương làm giảm nhiệt độ không khí khoảng 5°C so với môi trường, hệ thống đạt hiệu suất cao hơn, giảm tải cho máy nén và giảm lượng nhiệt thải ra môi trường. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng ở chế độ 3, dù nhiệt độ ngoài trời cao nhất (35°C), hệ thống vẫn đạt trạng thái ổn định sau 20-25 phút, nhanh hơn 5-10 phút so với chế độ 1 (50 Hz) và chế độ 2 (40 Hz). Phun sương đã chứng minh hiệu quả trong việc tăng cường trao đổi nhiệt cưỡng bức tại dàn ngưng, rút ngắn thời gian ổn định và tiết kiệm năng lượng cho hệ thống.

3.2. Ảnh hưởng của bơm biến tần đến hệ thống

Dựa vào Bảng 1 có thể thấy, khi giảm tần số bơm từ 50 Hz xuống 30 Hz, nhiệt độ nước ra có xu hướng giảm từ 15,3°C xuống còn 12,8°C, cho thấy khả năng làm lạnh được cải thiện. Tuy nhiên, lưu lượng nước cũng giảm mạnh từ 101,9 lít/phút xuống 68,6 lít/phút, kéo theo năng suất lạnh từ 17,1 kW lên mức cao nhất 23,4 kW ở 35 Hz rồi giảm nhẹ còn 20,3 kW ở 30 Hz. Điện năng tiêu thụ giảm đáng kể từ 11,25 kW (50 Hz) xuống 9,46 kW (30 Hz), phản ánh xu hướng tiết kiệm năng lượng khi vận hành ở tần số thấp hơn. Hiệu quả năng lượng EER tăng từ 1,71 ở 50 Hz lên 2,15 ở 30 Hz, chứng minh hệ thống hoạt động hiệu quả hơn khi tối ưu tần số bơm. Nhìn chung, dữ liệu bảng cho thấy giảm tần số bơm không chỉ tiết kiệm điện mà còn nâng cao hiệu quả trao đổi nhiệt.

Bảng 1. Hiệu quả sử dụng năng lượng hệ thống chiller sử dụng bơm biến tần

Tần số bơm	Nhiệt độ nước vào	Nhiệt độ nước ra	ΔT Nước	Lưu lượng nước	Năng suất lạnh	Điện năng tiêu thụ	Hiệu quả năng lượng EER
(hz)	(°C)	(°C)	(°C)	(l/ph)	kW)	(kW)	
50	18	15,3	2,7	101,9	19,17	11,227	1,71
45	17,8	14,6	3,2	91,5	20,41	10,168	2,01
40	17,6	14,1	3,5	80,6	19,66	9,912	1,98
35	17,5	13,4	4,1	71,3	20,38	9,735	2,09
30	17,4	12,6	4,8	60,8	20,34	9,476	2,15

Kết quả phân tích trên bảng 2 cho thấy, COP của chiller được cải thiện. Khi thay đổi tần số bơm từ 50 Hz xuống 45 Hz, COP của chiller tăng từ 2,13 lên 2,41, tương ứng mức cải thiện +13,3%, cho thấy hiệu suất hệ thống được nâng cao rõ rệt. Ở 40 Hz, COP giảm nhẹ xuống 2,15, gần như không thay đổi nhiều so với mức ban đầu (+0,9%). Tại 35 Hz, COP đạt 2,23, tăng 4,7% so với 50 Hz, còn ở 30 Hz COP đạt 2,21, tăng 3,8%. Như vậy, dữ liệu chứng minh rằng việc điều chỉnh tần số bơm hợp lý, đặc biệt ở 45 Hz, có thể tối ưu hiệu quả năng lượng cho chiller.

Bảng 2. Kết quả tính toán COP của chiller sử dụng bơm biến tần

Tần số bơm	Entanpi vào	Entanpi ra	Năng suất giải nhiệt	Công nén	COP Chiller	% COP thay đổi
(hz)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kW)	(kW)		
50	89,545	99,229	28,17	9	2,13	0%
45	89,569	99,178	28,87	8,46	2,41	+13,3%
40	89,521	99,178	29,93	9,06	2,15	+0,9%
35	89,569	99,204	29,53	9,15	2,23	+4,7%
30	89,569	99,204	29,53	9,19	2,21	+3,8%

3.3. Ảnh hưởng của lưu lượng gió qua AHU đến hệ thống

Bảng 3. Kết quả tính toán năng suất lạnh AHU theo từng mức lưu lượng gió

Lưu lượng gió qua AHU	Lưu lượng gió hồi	Nhiệt độ hòa trộn	Entanpi hòa trộn	Năng suất lạnh AHU
(m^3/h)	(m^3/h)	(°C)	(kJ/kg)	(kW)
2000	1300	30,2	74,35	7,434
1800	1320	29,2	72,41	7,05
1700	1502	27,4	68,92	6,618
1600	1467	27	68,14	6,474

Từ kết quả tính toán trong bảng 3 trên, có thể thấy khi giảm lưu lượng gió qua coil lạnh, hiệu quả trao đổi nhiệt tăng do vận tốc gió giảm, làm tăng thời gian tiếp xúc giữa không khí và bề mặt coil. Điều này dẫn đến nhiệt độ gió sau coil giảm dần khi lưu lượng gió giảm từ 2000 m^3/h xuống 1600 m^3/h, năng suất lạnh AHU cũng giảm từ 7,434 kW xuống còn 6,474 kW. Sự thay đổi này cho thấy năng suất lạnh tỷ lệ thuận với lưu lượng gió cấp, đồng thời nhiệt độ và entanpi hòa trộn cũng giảm nhẹ theo xu hướng tương ứng. Như vậy, việc điều chỉnh lưu lượng gió ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả làm lạnh của AHU.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chỉ ra các thông số vận hành như nhiệt độ môi trường, gió cấp và điểm đọng sương đều ảnh hưởng rõ rệt đến thời gian hệ thống Water Chiller đạt trạng thái ổn định. Trong đó, chế độ phun sương (chế độ 3) cho thấy ưu thế khi rút ngắn thời gian ổn định xuống còn 20-25 phút nhờ tăng cường trao đổi nhiệt cưỡng bức, ngay cả khi nhiệt độ môi trường cao. Ngoài ra, việc điều chỉnh tần số bơm cũng tạo ra sự khác biệt: giảm từ 50 Hz xuống 40 Hz giúp cải thiện hiệu suất trao đổi nhiệt nhưng kéo dài thời gian ổn định, trong khi dải tần số tối ưu từ 30-50 Hz có thể nâng cao COP, tránh tình trạng thiếu lưu lượng khi dưới 30 Hz.

Bên cạnh đó, lưu lượng gió qua AHU được điều chỉnh bằng biến tần giúp cải thiện hiệu suất làm lạnh và tiết kiệm điện, tuy nhiên nếu giảm quá mức sẽ ảnh hưởng đến chất lượng vi khí hậu trong phòng. Do đó, giải pháp tối ưu là kết hợp linh hoạt giữa việc tận dụng nước ngưng từ dàn lạnh và điều chỉnh tần số bơm, lưu lượng gió bằng hệ thống điều khiển thông minh. Cách tiếp cận này vừa đảm bảo hiệu quả năng lượng, vừa duy trì sự thoải mái cho người sử dụng, qua đó tối ưu hóa hoạt động của hệ thống chiller giải nhiệt gió.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số SVTC-2024-CK-107. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

• Danh mục viết tắt:

G_n: Lưu lượng nước chảy qua chiller, kg/s;
C_{pn}: Nhiệt dung riêng của nước, kJ/kg,K;
ΔT_n: Độ nhiệt độ nước vào và ra khỏi chiller, °C;
P: Điện năng tiêu thụ;
G_{kk}: Lưu lượng không khí qua dàn ngưng;
ΔI_{kk}: Chênh lệch entanpi trước và sau dàn ngưng;
W: Công của máy nén;
t_{OA}: Nhiệt độ ngoài trời, đơn vị °C;
a: Tỉ lệ gió tươi đối với lưu lượng gió qua AHU;
$I_{hòa\ trộn}$: Entanpi của không khí hòa trộn, kJ/kg;
L_{OA}: Lưu lượng gió tươi, đơn vị m³/s;
$I_{hồi}$: Entanpi của không khí hồi về, kJ/kg;
$L_{hồi}$: Lưu lượng gió hồi về, m³/s;
L: Lưu lượng gió qua AHU, m³/s;
Q_{AHU}: Năng suất lạnh AHU, kW;
G: Lưu lượng không khí qua AHU (m³/s);
I_{SA}: Entanpi của không khí cấp, kJ/kg.

• Xung đột lợi ích:

Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

• Đóng góp của các tác giả:

Phan Thành Nhân đề xuất ý tưởng nghiên cứu, xây dựng kế hoạch thí nghiệm, thảo luận phương pháp, chỉnh sửa và kiểm tra các mô hình toán và đồng thời chịu trách nhiệm về nội dung bài báo.

Nguyễn Chí Khanh, Lê Nhật Quang, Đặng Thế Vinh tham gia thực hiện thí nghiệm, thu thập dữ liệu, phân tích kết quả và đề xuất các phương án tối ưu hệ thống năng lượng phù hợp.❖

Ngày nhận bài: **26/8/2025**
Ngày phản biện: **08/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Đình Vịnh, "*Giải pháp tiết kiệm năng lượng cho hệ thống điều hòa không khí chiller bằng phương pháp phân phối phụ tải tối ưu*". Luận án tiến sĩ, Đại học Bách Khoa Hà Nội, 2015.

[2]. Nguyễn Đình Vịnh, Nguyễn Văn Mạnh, Nguyễn Văn Chung, Tạ Quốc Huy (2013), "*Phương pháp tối ưu hóa để vận hành hệ thống lạnh trung tâm chiller*". Tạp chí Năng lượng Nhiệt, số 114 - 11/2013, trang 7~10.

[3]. Nguyễn Đình Vịnh, Nguyễn Văn Mạnh (2014), "*Tối ưu hóa chế độ vận hành hệ thống lạnh trung tâm chiller có lưu lượng nước thay đổi*". Tạp chí Năng lượng Nhiệt, số 119 - 9/2014, trang 18~23.

[4]. Yixing Chen, "*A robust capacity configuration selection method of multiple-chiller system concerned with the uncertainty of annual hourly load profile*". Energy Build, 2023. ☞

[5]. Zhiyang Jia, "*A robust capacity configuration selection method of multiple-chiller system concerned with the uncertainty of annual hourly load profile*". Energy Build, 2023.
[6]. Yiqun Zhu, "*An advanced control strategy for optimizing the operation state of chillers with cold storage technology in data center*". Energy Build, 2023.
[7]. Shaobo Sun, "*An online robust sequencing control strategy for identical chillers using a probabilistic approach concerning flow measurement uncertainties*". Applied Energy, 2022.
[8]. Si Wu, "*Evaluating seasonal chiller performance using operational data*". Applied Energy, 2024.
[9]. Pawel Olszewski, "*Experimental analysis of ON/OFF and variable speed drive controlled industrial chiller towards energy efficient operation*". Applied Energy, 2022.
[10]. Syed A, Tirmizi, "*Performance analysis of a chilled water system with various pumping schemes*". Applied Energy, 2012.
[11]. J,A, Borja-Conde, "*Efficient management of HVAC systems through coordinated operation of parallel chiller units: an economic predictive control approach*". Energy and Building, 2024.
[12]. Kun He, "*Predictive control optimization of chiller plants based on deep reinforcement learning*". Journal of Building Engineering, 2023.
[13]. F,W, Yu, "*Optimization of water-cooled chiller system with load-based speed control*". Applied Energy, 2008.

THIẾT KẾ HỆ THỐNG BƠM LẤY MẪU NƯỚC THẢI THÔNG MINH

DESIGN OF SMART WASTEWATER SAMPLING PUMP SYSTEM

Võ Minh Tiến, Phạm Huy Hoàng*
Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh
**Email tác giả liên hệ: hoangph@huit.edu.vn*

TÓM TẮT

Phân tích nước thải để giám sát dịch tễ học (Wastewater-Based Epidemiology – WBE) đã chứng minh tính hiệu quả trong việc phát hiện sớm các nguy cơ sức khỏe cộng đồng như bệnh truyền nhiễm hoặc chất gây nghiện. Tuy nhiên, tại Việt Nam, điều kiện cơ sở hạ tầng nước thải chưa hoàn chỉnh đặt ra nhu cầu phát triển các giải pháp lấy mẫu phù hợp. Bài báo này trình bày thiết kế một hệ thống bơm lấy mẫu nước thải thông minh có khả năng hoạt động tự động, chịu điều kiện môi trường khắc nghiệt, chi phí thấp và có khả năng mở rộng. Hệ thống sử dụng vi điều khiển ESP32, bơm màng DC, cảm biến nhiệt độ và lưu lượng, cùng thuật toán điều khiển PID. Kết quả mô phỏng và thử nghiệm thực tế chứng minh hiệu quả và độ tin cậy của giải pháp.

Từ khoá: *Nước thải; Bơm; Lấy mẫu; Điều khiển.*

ABSTRACT

Wastewater-Based Epidemiology (WBE) has proven to be an effective tool for the early detection of public health threats, such as infectious diseases or illicit drug use. To perform this, the incomplete wastewater infrastructure in Vietnam necessitates the development of suitable sampling pumping solutions. This paper presents the design of a smart wastewater sampling pump system that is capable of automated operation, can withstand harsh environmental conditions, is low-cost, and scalable. The sampling pumping system utilizes an ESP32 microcontroller, a DC diaphragm pump, temperature and flow sensors, and is controled by a PID control algorithm. Simulation and real-world testing results demonstrate the effectiveness and reliability of this solution.

Keywords: *Wastwater; Pump; Sampling; Control.*

1. GIỚI THIỆU

Phương pháp WBE đã được chứng minh là công cụ hiệu quả trong việc giám sát dịch bệnh (SARS-CoV-2, poliovirus, v.v.) và hành vi sử dụng chất gây nghiện trong cộng đồng [1-3]. Tuy nhiên, để đảm bảo tính đại diện của mẫu, quá trình lấy mẫu phải đáp ứng được các tiêu chí: liên tục, chính xác, thích nghi với điều kiện dòng chảy và môi trường khắc nghiệt.

Ở Việt Nam, nơi có nhiều kênh mương hở và hệ thống xử lý nước thải chưa đồng bộ, việc lấy mẫu theo cách thủ công là phổ biến nhưng không hiệu quả. Do đó, cần một hệ thống bơm lấy mẫu có tính tự động, độ tin cậy cao, giá thành thấp, dễ triển khai đại trà.

2. CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ CÁC NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN

Các hệ thống lấy mẫu tiêu chuẩn quốc tế như ISCO 6712 hoặc HACH AS950 được thiết kế cho hạ tầng kín, giá thành cao (trên 3000 USD), và yêu cầu điều kiện nguồn ổn định. Trong khi đó, các nghiên cứu trong nước mới chỉ dừng lại ở cấp độ phòng thí nghiệm hoặc thử nghiệm hạn chế.

Bài báo này kế thừa những nguyên lý cơ học cam-phẳng vi mô, kỹ thuật điều khiển actuator piezo, đồng thời tích hợp khả năng hoạt động độc lập thông qua các công nghệ nhúng hiện đại như ESP32, cảm biến DS18B20, module bơm màng.

3. THIẾT KẾ VÀ TÍNH TOÁN HỆ THỐNG

3.1. Cấu hình phần cứng

Thành phần	Mô tả
Bộ xử lý chính	ESP32
Cảm biến nhiệt độ	DS18B20
Bơm màng DC	12V, 50ml/min
Pin nguồn	Acquy 9Ah
Lọc cơ học đầu hút	Inox 300 mesh
Flow sensor (tùy chọn)	YF-S201 (1-300 ml/min)



Hình 3.1. Giao diện điều khiển hệ thống bơm lấy mẫu nước thải thông minh

3.2. Tính toán chu kỳ lấy mẫu

- Yêu cầu lấy mẫu: $V_{ngày}$ = 3000ml trong 24 giờ.

- Chọn chu kỳ lấy mẫu mỗi 20 phút → n = 72 lần/ngày.

- Dung tích mỗi mẫu:

$$V_m = \frac{3000ml}{72} \approx 41.67ml$$

- Thời gian bơm mỗi lần, nếu Q = 50 ml/min = 0.83 ml/s:

$$t = \frac{V_m}{Q} = \frac{41.67}{0.83} \approx 50.2s$$

3.3. Tính công suất tiêu thụ

- Bơm: P = U · I = 12 V · 0.5 A = 6 W.

- Tổng thời gian hoạt động mỗi ngày: T = 72 · 50.2 ≈ 3614.4 s.

- Năng lượng:

$$E = P \cdot \frac{T}{3600} = 6 \cdot \frac{3614.4}{3600} = 6.024Wh$$

- Dung lượng pin: E_{pin} = 12V · 9 Ah = 108 Wh » E.

- Đảm bảo 24-48 giờ hoạt động liên tục.

4. ĐIỀU KHIỂN THÔNG MINH VỚI PID

4.1 Mô hình điều khiển PID

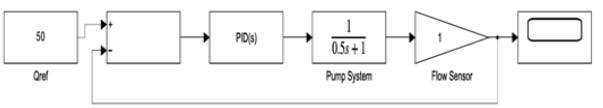
Để ổn định lưu lượng trong điều kiện môi trường thay đổi, tín hiệu điều khiển được tính theo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Với: $e(t) = Q_{ref} - Q_{actual}(t)$

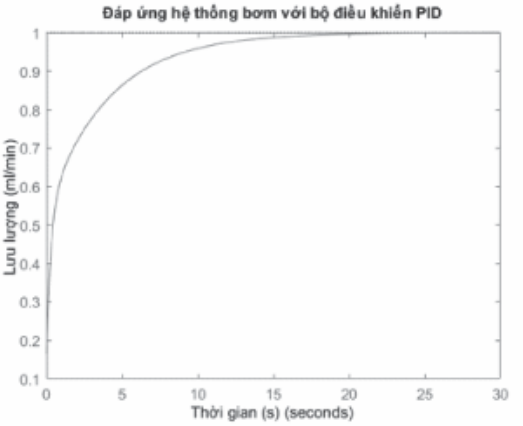
- Q_{actual} đo bằng cảm biến lưu lượng.
- u(t) được chuyển thành mức PWM (0-255) điều khiển bơm.

Cấu trúc điều khiển vòng kín của hệ thống bơm, trong đó tín hiệu đặt (Q_{ref}) được so sánh với tín hiệu phản hồi từ cảm biến lưu lượng. Sai lệch được đưa vào bộ điều khiển PID để tính toán tín hiệu điều khiển cho bơm. Khối Pump System được mô tả bằng hàm truyền $\frac{1}{0.5s+1}$, thể hiện động học bậc nhất của hệ thống. Cảm biến lưu lượng được mô hình hóa với hệ số khuếch đại 1.



Hình 4.1. Mô hình điều khiển PID cho hệ thống bơm

Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống đạt giá trị lưu lượng mong muốn (1 ml/min) sau khoảng 15 giây, với độ quá điều chỉnh gần như bằng 0 và thời gian quá độ ngắn. Điều này chứng tỏ bộ điều khiển PID đã được điều chỉnh hiệu quả, đảm bảo lưu lượng ổn định ngay cả khi có thay đổi ban đầu hoặc nhiễu nhỏ.



Hình 4.2. Đáp ứng lưu lượng của hệ thống bơm với bộ điều khiển PID

4.2. Cài đặt hệ số

Hệ số	Giá trị
Kp	1.2
Ki	0.5
Kd	0.1

- Hệ thống tự động điều chỉnh dòng bơm phù hợp với lưu lượng đầu vào.

5. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

- Vị trí thử nghiệm: Mương nước thải.
- Điều kiện: Dòng chảy 0.5 m/s, độ sâu 1.2 m.
- Kết quả:

• Hoạt động liên tục 24 giờ.
• Mẫu thu được đạt đủ thể tích (3L/ ☞

ngày), không nhiễm bẩn tạp chất lớn.

• Ghi nhận nhiệt độ môi trường 27-34°C.

• Sai số lưu lượng dưới 3%.



Hình 5.1. Nguyên mẫu thiết bị lấy mẫu nước thải trong nghiên cứu

6. KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Bài báo đã trình bày thiết kế, phân tích và đánh giá một hệ thống bơm lấy mẫu nước thải thông minh, hoạt động ổn định trong môi trường thực tế tại Việt Nam. So với các hệ thống thương mại hiện tại, giải pháp này có chi phí thấp (< 2 triệu VND), dễ triển khai, và có khả năng mở rộng.

Hệ thống này sẽ được phát triển trong tương lai nhằm nâng cao khả năng làm việc tự động và đưa ra kết luận nhanh và chính xác nhờ thực hiện tích hợp truyền dữ liệu Wi-Fi hoặc GSM về máy chủ trung tâm và sử dụng AI (TinyML) để đánh giá chất lượng mẫu tại chỗ.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công Thương thành phố Hồ Chí Minh theo Hợp đồng số 95/HĐ-DCT ký ngày 17 tháng 01 năm 2025.❖

Ngày nhận bài: **18/8/2025**
Ngày phản biện: **27/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. WHO, "*Status of Wastewater-based Epidemiology for COVID-19 Monitoring*", 2020.

[2]. Thomas, K. V. et al., "*Monitoring Illicit Drug Use Using Wastewater Analysis*", 2012.

[3]. Gerrity, D. et al., "*Early Detection of SARS-CoV-2 in Wastewater*", 2020.

[4]. T.A. Larsen et al., "*Sampling Technologies for WBE*", 2016.

HỆ THỐNG THEO DÕI VỊ TRÍ MÁY BAY KHÔNG NGƯỜI LÁI TRONG NHÀ SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ UWB

INDOOR DRONE LOCATION TRACKING SYSTEM USING UWB TECHNOLOGY

Lê Quang Ngọc
Bộ môn Quản lý và Kỹ thuật Bảo trì, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
Email: lqngoc@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất và phát triển hệ thống định vị drone trong nhà dựa trên công nghệ Ultra-Wideband (UWB), gồm hai điểm neo UWB cố định và một thẻ gắn trên drone, vị trí được xác định bằng phương pháp đo thời gian truyền sóng (Time of Flight) và giải thuật lượng giác kết hợp bình phương tối thiểu. Thí nghiệm được tiến hành trong không gian 10 × 10 m, với quỹ đạo bay theo đường zigzag. Kết quả cho thấy sai số tuyệt đối trung bình (MAE) đạt 0.19 m và sai số bình phương trung bình (MSE) đạt 0.038 m², thấp hơn 30 cm tại hầu hết các vị trí. Hệ thống có khả năng phân biệt chính xác các vị trí gần nhau và hoạt động ổn định trong môi trường có tín hiệu GPS hạn chế. Nghiên cứu khẳng định tính khả thi của UWB trong việc theo dõi drone trong nhà, đồng thời mở ra hướng tích hợp với các cảm biến khác để nâng cao độ chính xác trong các ứng dụng thực tiễn.

Từ khóa: *UWB; Định vị trong nhà; Drone; Theo dõi vị trí.*

ABSTRACT

This study proposes and develops an indoor drone localization system based on Ultra-Wideband (UWB) technology that includes of two fixed anchors and a tag mounted on the drone. Drone position estimation obtained through Time-of-Flight measurement and a trigonometric approach combined with the least squares method. Experiments conducted in a 10 × 10 m area with zigzag flight trajectories. The results show that the mean absolute error (MAE) reaches 0.19 m, and the mean squared error (MSE) 0.038 m², with positioning errors kept below 30 cm in most cases. The system demonstrates the ability to accurately distinguish closely spaced positions and operates stably in environments with limited GPS signals. The study confirms the feasibility of UWB for indoor drone tracking and opens the potential for integration with other sensors to enhance accuracy in practical applications.

Keywords: *UWB; Indoor localization; Drone; Position tracking.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, công nghệ máy bay không người lái (drone) đã phát triển nhanh và ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau [1], [2]. Drone được sử dụng trong quân sự [3], trong nông nghiệp chính xác [4], giám sát môi trường [5], kiểm tra cơ sở hạ tầng [6], vận chuyển hàng hóa [7], cứu trợ và cứu hộ trong thiên tai [8]. Một trong những yêu cầu cốt lõi để khai thác tối đa tiềm năng của drone với khả năng định vị và điều khiển chính xác trong không gian, đặc biệt là trong các môi trường phức tạp như trong nhà, nơi tín hiệu định vị toàn cầu (GPS) không còn hiệu quả.

Để đáp ứng nhu cầu định vị, nhiều phương pháp đã được nghiên cứu như GPS [9], Wi-Fi [10], BLE [11] và Visual SLAM [12]. GPS có độ chính xác cao ngoài trời nhưng không hiệu quả trong nhà; Wi-Fi và BLE chi phí thấp nhưng sai số lớn; còn Visual SLAM đạt độ chính xác tốt nhưng phức tạp và phụ thuộc điều kiện ánh sáng. Trong bối cảnh đó [13], UWB nổi bật nhờ khả năng đo khoảng cách chính xác ở mức cm, song vẫn hạn chế về phạm vi hoạt động, chi phí và cần triển khai hệ thống anchor.

Trong nghiên cứu này tập trung vào việc ứng dụng UWB cho bài toán định vị drone trong không gian hai chiều (2D) với cấu hình chỉ gồm hai anchor. Mục tiêu là kiểm chứng tính khả thi và hiệu quả của UWB khi sử dụng trong môi trường trong nhà, nơi mà các giải pháp định vị truyền thống thường gặp nhiều hạn chế.

2. NGUYÊN LÝ VÀ CÔNG NGHỆ SỬ DỤNG

Nguyên lý hoạt động của UWB dựa trên khả năng truyền và thu các xung vô tuyến có băng thông siêu rộng (>500 MHz). Bằng cách đo chính xác thời gian truyền sóng (Time of Flight – ToF), hệ thống có thể xác định khoảng cách giữa thiết bị gắn trên drone (UWB tag) và các điểm neo cố định (UWB anchors).

Trong mô hình nghiên cứu này, hệ thống chỉ sử dụng hai anchor để đo đạc, nhằm đánh giá độ chính xác của công nghệ UWB khi số lượng điểm tham chiếu hạn chế. Khi đó, vị trí của drone không được xác định tuyệt đối trong không gian 3D như các hệ thống có ≥4 anchor, mà chủ yếu được tính toán khoảng cách tương đối và sự thay đổi vị trí theo trục tọa độ được thiết lập. Kết quả này cho phép kiểm chứng khả năng đo khoảng cách và đánh giá sai số định vị trong các kịch bản tối giản.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Mô tả phần cứng

Drone nghiên cứu được thiết kế dưới dạng quadcopter, khung chữ X, với các thành phần chính như Hình 1. Khung của Drone được thiết kế bằng khung nhựa và càng đáp bằng carbon fiber chắc chắn, nhẹ, có khả năng chịu tải tốt để mang theo các cảm biến và module phụ trợ. Nguồn pin LiPo 6 cell dung lượng 5200 mAh, đảm bảo thời gian bay thực nghiệm từ 12-15 phút. Một UWB tag được gắn lên thân drone.

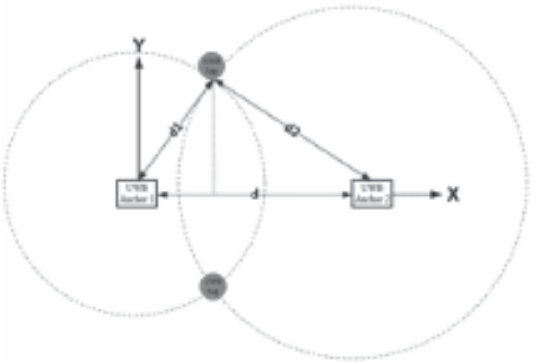


Hình 1. Cấu tạo hệ thống máy bay không người lái sử dụng UWB

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

3.2. Giải thuật định vị

Để xác định vị trí của x và y của UWB tag trong ko gian 2D, chúng tôi sử dụng phương pháp lượng giác. Để đơn giản hóa bài toán, ta đặt hệ tọa độ anchor 1 nằm ở gốc tọa độ (0,0), anchor 2 nằm trên trục x của hệ tọa độ cách gốc tọa độ một khoảng d, nên có tọa độ (d,0). Tọa độ của tag UWB cần tìm là (x_T, y_T). Hình 2 thể hiện vị trí của tag và các anchor UWB trong không gian hai chiều.



Hình 2. Sơ đồ bố trí vị trí của các UWB anchor và UWB tag

Áp dụng định lý Pythagoras cho cả hai tam giác vuông tưởng tượng được tạo bởi tag và hai anchor:

Từ anchor 1:

$$x_T^2 + y_T^2 = d_1^2 \quad (1)$$

Từ anchor 2:

$$\left(x_T - d\right)^2 + y_T^2 = d_2^2 \quad (2)$$

Khai triển phương trình 2:

$$x_T^2 - 2x_T d + d^2 + y_T^2 = d_2^2 \quad (3)$$

Thay phương trình (1) vào phương trình (3), ta có:

$$d_1^2 - 2x_T d + d^2 = d_2^2 \quad (4)$$

Giải phương trình (4), ta xác định được vị trí x của UWB tag:

$$x_T = -\frac{\left(d_2^2 - d_1^2 - d^2\right)}{2d} \quad (5)$$

Sau khi đã có x_T, ta chỉ cần thay giá trị này vào phương trình (1) để tìm y_T. Ta chỉ lấy nghiệm dương của y_T theo hình 2:

$$y_T = \sqrt{d^2 - x_T^2} \quad (6)$$

Trong thực tế, do tồn tại nhiễu và sai số trong các phép đo khoảng cách d_1, d_2, hệ phương trình xác định vị trí đôi khi không có nghiệm chính xác. Để khắc phục, nghiệm gần đúng của vị trí (x,y) được ước lượng bằng phương pháp bình phương tối thiểu (Least Squares), tức là tìm nghiệm sao cho sai số bình phương giữa khoảng cách đo và khoảng cách tính toán từ tọa độ (x,y) là nhỏ nhất:

$$\min_{x,y} \sum_{i=1}^{2} \left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - d_i \right)^2 \quad (7)$$

3.3. Phương pháp đánh giá

Trong nghiên cứu này, độ chính xác định vị của hệ thống UWB được đánh giá theo bố trí thí nghiệm ở Hình 3, với hai anchor đặt tại góc khu vực thí nghiệm (cao 1 m, cách nhau 10 m). UWB tag được gắn gần trọng tâm drone để giảm ảnh hưởng rung lắc. Tại mỗi nút lưới, drone giữ ổn định 60 giây để thu thập ít nhất 600 mẫu ở tần số 10 Hz. Dữ liệu sau đó được xử lý để tính MAE và MSE, trong đó MAE ở phương trình (8) phản ánh sai số trung bình còn MSE ở phương trình (9) nhạy hơn với sai số lớn, giúp đánh giá toàn diện độ chính xác hệ thống:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left[\left| x_{UWB,i} - x_{True,i} \right| + \left| y_{UWB,i} - y_{True,i} \right| \right] \quad (8)$$

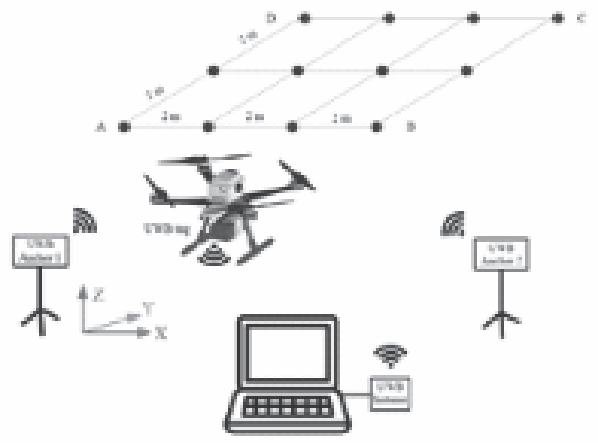
$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[x_{UWB,i} - x_{True,i}\right]^2 + \left[y_{UWB,i} - y_{True,i}\right]^2 \quad (9)$$

Trong đó:

• N: Tổng số điểm dữ liệu.

• (x_{UWB}, i, y_{UWB}, i): Tọa độ đo được từ hệ thống UWB.

• (x_{True}, i, y_{True}, i): Tọa độ thực tế.



Hình 3. Mô hình đánh giá độ chính xác của UWB tag được gắn trên drone

4. THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ

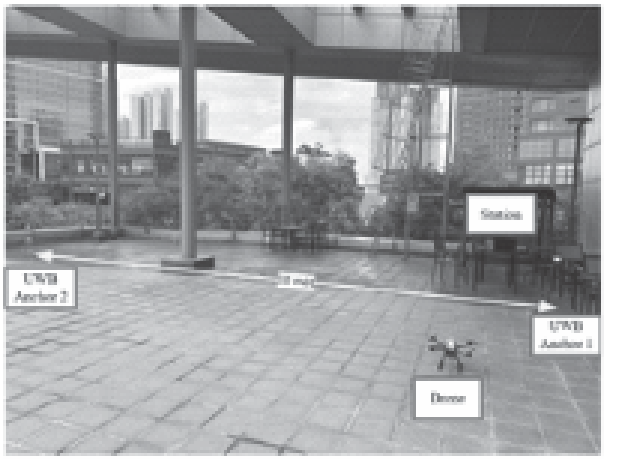
Phần này trình bày chi tiết về quy trình thí nghiệm định vị drone sử dụng công nghệ UWB (Ultra-Wideband). Mục tiêu của thí nghiệm là đo và ghi lại vị trí của một UWB tag được gắn trên drone trong một không gian xác định.

4.1. Bố trí thí nghiệm

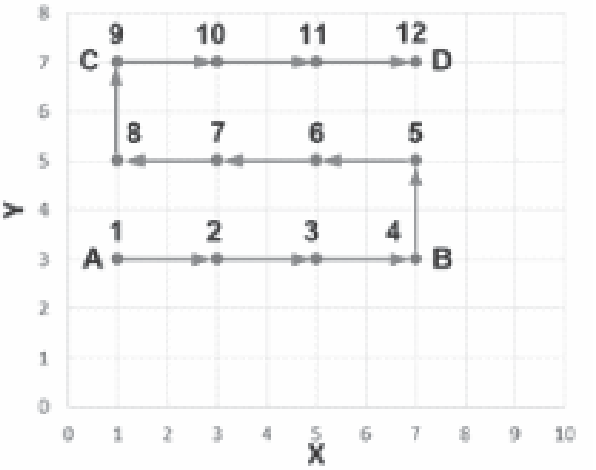
Mô hình thí nghiệm bao gồm một hệ thống định vị với hai UWB anchor được đặt cố định, cách nhau một khoảng 10 mét. Để đo vị trí ban đầu của drone, chúng tôi sử dụng tọa độ tuyệt đối trong hệ thống UWB. Vị trí khởi đầu của drone, được ký hiệu là điểm A, được xác định tại tọa độ (x = 1 m, y = 3 m) so với hệ trục tọa độ của hệ thống UWB.

4.2. Quy trình di chuyển của drone

Drone thực hiện lộ trình bay zigzag như minh họa ở Hình 5. Từ điểm A, drone di chuyển ngang sang phải theo từng bước 2 m, dừng 1 phút ở mỗi vị trí để ghi dữ liệu. Sau đó, tại điểm B, drone dịch chuyển 2 m theo phương dọc rồi tiếp tục di chuyển ngang sang trái theo cùng cách. Đến điểm D, drone lại tiến thêm 2 m theo phương dọc và cuối cùng bay ngang sang phải đến điểm C, lặp lại quy trình dừng và ghi dữ liệu tại mỗi vị trí.



Hình 4. Mô hình thí nghiệm để đo vị trí của drone ở môi trường trong nhà



Hình 5. Mô hình thí nghiệm để đo vị trí của drone ở môi trường trong nhà

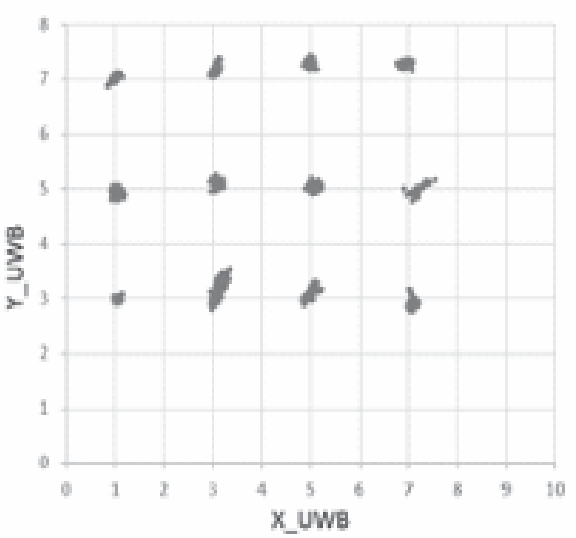
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

4.3. Kết quả thí nghiệm

Bảng 1 trình bày giá trị MAE và MSE tại 12 vị trí lưới trong khu vực khảo sát. Có thể thấy sai số tuyệt đối trung bình (MAE) dao động từ 0.08 m đến 0.29 m, trong khi MSE tương ứng nằm trong khoảng 0.005-0.077 m². Giá trị trung bình toàn hệ thống đạt MAE = 0.19 m và MSE = 0.038 m², chứng tỏ độ chính xác định vị UWB ổn định ở mức dưới 0.2 m.

Một số vị trí có sai số thấp đáng kể, như (1,3) với MAE = 0.08 m, cho thấy điều kiện đo tại khu vực này ít chịu ảnh hưởng của nhiễu tín hiệu. Ngược lại, các vị trí như (3,3), (5,7) và (7,7) có MAE lớn hơn (0.25-0.29 m), nhiều khả năng do bố trí anchor chưa tối ưu.

Nhìn chung, hệ thống UWB thể hiện khả năng phân biệt chính xác các vị trí cách nhau chỉ khoảng 1 m, vượt xa giới hạn của GPS standalone (1-3 m). Điều này khẳng định UWB hoàn toàn khả thi cho các ứng dụng theo dõi vị trí trong không gian hẹp, chẳng hạn giám sát chuyển động phương tiện hoặc robot trong kho bãi và nhà xưởng.



Hình 6. Vị trí của UWB tag gắn trên drone khi bay

Bảng 1. Sai số phép đo của UWB theo phương pháp MAE, MSE

Vị trí (X,Y) [m]	MAE [m]	MSE [m²]
(1,3)	0.08	0.005
(3,3)	0.27	0.061
(5,3)	0.22	0.034
(7,3)	0.16	0.015
(1,5)	0.19	0.07
(3,5)	0.21	0.026
(5,5)	0.1	0.007
(7,5)	0.14	0.056
(1,7)	0.2	0.03
(3,7)	0.18	0.023
(5,7)	0.29	0.07
(7,7)	0.25	0.077
Trung bình	0.19	0.038

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đưa ra tính khả thi của ứng dụng công nghệ UWB cho định vị và theo dõi máy bay không người lái trong môi trường không có GPS. Với cấu hình tối giản chỉ hai anchor, hệ thống vẫn đạt được độ chính xác dưới 0.3 m, đủ để phục vụ nhiều ứng dụng thực tiễn. Kết quả mở ra tiềm năng tích hợp UWB với các cảm biến khác như IMU hay camera nhằm nâng cao hiệu suất định vị, nhằm định hướng nghiên cứu tiếp theo về tối ưu bố trí anchor để mở rộng sang môi trường 3D. Nhờ vậy, UWB có thể trở thành nền tảng quan trọng hỗ trợ điều khiển chính xác drone trong tình huống không có tín hiệu GPS.❖

Ngày nhận bài: **26/8/2025**
Ngày phản biện: **09/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. N. Al-lQubaydhi et al., "*Deep learning for unmanned aerial vehicles detection: A review*". Comput. Sci. Rev., vol. 51, p. 100614, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.cosrev.2023.100614.

[2]. P. S. Agrawal, P. S. Jawarkar, K. M. Dhakate, K. M. Parthani, and A. S. Agnihotri, "*Advancements and Challenges in Drone Technology: A Comprehensive Review*". In 2024 4th International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN), Salem, India: IEEE, May 2024, pp. 638-644. doi: 10.1109/ICPCSN62568.2024.00106.

[3]. M. Lee et al., "*A Study on the Advancement of Intelligent Military Drones: Focusing on Reconnaissance Operations*". IEEE Access, vol. 12, pp. 55964-55975, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3390035.

[4]. 3School of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Sains Malaysia Engineering Campus, 14300 Nibong Tebal, Penang, Malaysia, M. H. M. Ghazali, A. Azmin, and W. Rahiman, "*Drone Implementation in Precision Agriculture – A Survey*". Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng., vol. 12, no. 4, pp. 67-77, Apr. 2022, doi: 10.46338/ijetae0422_10.

[5]. H. A. Silva-Neto, D. Da Silva Sousa, L. C. Duarte, J. F. Da Silveira Petruci, and W. K. T. Coltro, "*Recent developments on aerial lab-on-a-drone platforms for remote environmental monitoring: A review*". Anal. Chim. Acta, vol. 1337, p. 343544, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.aca.2024.343544.

[6]. N. Ejaz and S. Choudhury, "*Computer vision in drone imagery for infrastructure management*". Autom. Constr., vol. 163, p. 105418, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105418.

[7]. O. Dukkanci, J. F. Campbell, and B. Y. Kara, "*Facility location decisions for drone delivery: A literature review*". Eur. J. Oper. Res., vol. 316, no. 2, pp. 397-418, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ejor.2023.10.036.

[8]. V. G. Nair and J. M. D'Souza, "*A Scoping Review on Unmanned Aerial Vehicles in Disaster Management: Challenges and Opportunities*".

[9]. N. Rajiv Gandhi, D. Kumar, E. Arunkumar, S. Parameshwari, Mohd. Sadim, and R. R. Al-Fatlawy, "*A Detailed Review Analysis of GPS used in Drone Technology and its Challenges*". In 2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE), Greater Noida, India: IEEE, May 2024, pp. 363-367. doi: 10.1109/ICACITE60783.2024.10616508.

[10]. H. Esmaeili Gorjan and V. P. Gil Jiménez, "*Improving Indoor WiFi Localization by Using Machine Learning Techniques*". Sensors, vol. 24, no. 19, p. 6293, Sep. 2024, doi: 10.3390/s24196293.

[11]. F. Milano et al., "*BLE-Based Indoor Localization: Analysis of Some Solutions for Performance Improvement*". Sensors, vol. 24, no. 2, p. 376, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24020376.

[12]. L. Zhuang, X. Zhong, L. Xu, C. Tian, and W. Yu, "*Visual SLAM for Unmanned Aerial Vehicles: Localization and Perception*". Sensors, vol. 24, no. 10, p. 2980, May 2024, doi: 10.3390/s24102980.

[13]. A. Benouakta, F. Ferrero, L. Lizzi, and R. Staraj, "*Advancements in Industrial RTLSs: A Technical Review of UWB Localization Devices Emphasizing Antennas for Enhanced Accuracy and Range*". Electronics, vol. 13, no. 4, p. 751, Feb. 2024, doi: 10.3390/electronics13040751.

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ THIẾT BỊ BẮN TẬP CHO CÁC DÒNG SÚNG TIỂU LIÊN STV DO VIỆT NAM CHẾ TẠO

PROPOSED DESIGN SOLUTIONS FOR TRAINING SIMULATOR SYSTEMS FOR THE VIETNAM-MANUFACTURED STV ASSAULT RIFLE SERIES

Nguyễn Hải Minh*, Đoàn Văn Dũng, Nguyễn Quang Tuân, Đinh Đức Mạnh
Học viện Kỹ thuật quân sự
**Email: nguyenhaiminhtb2013@gmail.com*

TÓM TẮT

Huấn luyện bắn các loại súng bộ binh luôn là nhu cầu cấp thiết trong thực tế huấn luyện của các đơn vị trong cũng như ngoài quân đội. Cũng đã có một số hệ thống thiết bị trong và ngoài nước được thiết kế chế tạo để giải quyết vấn đề này, tuy nhiên hiện nay vẫn chưa có thiết bị nào dùng được cho việc huấn luyện bắn các dòng súng tiểu liên STV do Việt Nam chế tạo. Bài báo này giới thiệu giải pháp thiết kế chế tạo thiết bị bắn tập cho các dòng súng tiểu liên STV do Việt Nam chế tạo. Đây là vấn đề mới, trong nước hiện nay chưa có công trình nào đề cập đến.

Từ khóa: *Thiết bị bắn tập; Súng STV; Ma trận cảm biến laser; Lực giật của súng.*

ABSTRACT

Shooting training with infantry weapons remains an urgent requirement in the practical training of both military and civilian units. Although several training systems have been developed domestically and abroad, there is currently no systems suitable for training with the STV series submachine guns manufactured in Vietnam. This paper presents a design and fabrication solution for a training simulator tailored to the Vietnamese-made STV submachine-gun series. The topic is novel and no prior domestic study has addressed it so far.

Keywords: *Shooting training systems; STV guns; Laser sensor matrix; Gun recoil.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

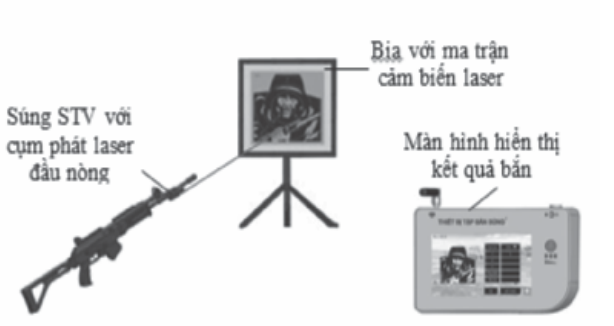
Huấn luyện bắn súng tiểu liên luôn được coi là một nội dung quan trọng không chỉ đối với các đơn vị thuộc lực lượng vũ trang mà còn cả đối với các cơ sở giáo dục đào tạo dân sự khi triển khai nội dung giáo dục quốc phòng an ninh [1]. Thực tế cho thấy, việc tổ chức bắn đạn thật tuy đánh giá được toàn diện nhất kỹ năng sử dụng vũ khí trang bị của người tập, song cũng tồn tại những hạn chế nhất định như: chi phí đạn dược và thao trường cao, tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn, khó khăn trong công tác tổ chức và bảo đảm, hạn chế trong việc phân tích chỉ ra điểm yếu cần khắc phục của từng cá nhân,... Trong bối cảnh hiện nay, xuất phát từ yêu cầu nâng cao năng lực trình độ sử dụng vũ khí trang bị nói chung, vũ khí bộ binh nói riêng của cán bộ chiến sĩ đòi hỏi phải đẩy mạnh ứng dụng các phương tiện huấn luyện mô phỏng và thiết bị ☞

tập bắn chuyên dụng [2]. Những năm gần đây, dòng súng tiểu liên STV (STV 215, STV 022, STV 380, STV 410) do Việt Nam sản xuất đã được đưa vào trang bị, đòi hỏi cũng cần phải có các phương tiện thiết bị hỗ trợ huấn luyện bắn tương thích với các mẫu súng này [3].

Xuất phát từ yêu cầu thực tiễn đó, bài báo này đề xuất giải pháp thiết kế, chế tạo thiết bị bắn tập cho dòng súng tiểu liên STV, với mục tiêu đưa ra được một thiết bị có khả năng mô phỏng sát nhất hiện tượng bắn cũng như quá trình thực hiện phát bắn của dòng súng STV: từ việc cấp đạn; lên đạn; lượng đạn tiêu thụ; có thể bắn phát một, liên thanh; không thể bắn khi hết đạn; có hiệu ứng lực giật, tiếng nổ đầu nòng và quan trọng là đánh giá được chính xác, khách quan trình độ ngắm bắn của người tập.

2. GIẢI QUYẾT VẤN ĐỀ

Một thiết bị tập bắn súng muốn đáp ứng tốt được nhu cầu của người dùng cần phải giải quyết được hai vấn đề quan trọng, đó là đánh giá chính xác, khách quan kết quả ngắm bắn và mô phỏng được sát nhất các hiệu ứng của một phát bắn đạn thật để tạo cho người tập có được tâm lý gần như bắn đạn thật. Trên nền tảng thiết kế thiết bị bắn tập TBS-19 của nhóm tác giả, mô hình tổng thể của thiết bị bắn tập cho dòng súng tiểu liên STV được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Mô hình thiết bị bắn tập cho dòng súng tiểu liên STV

Để giải quyết vấn đề thứ nhất, nhóm tác giả sử dụng giải pháp gắn laser ở đầu nòng súng, kết hợp với ma trận cảm biến laser gắn trên bia để đánh giá, chấm điểm người tập. Đây là giải pháp đã được áp dụng thành công trên Thiết bị bắn tập TBS-19 cũng do nhóm tác giả nghiên cứu thiết kế, chế tạo – hiện đang được rất nhiều đơn vị trong và ngoài quân đội sử dụng. Nguyên lý đánh giá điểm của thiết bị như sau [4]: Khi người tập thực hiện động tác bóp cò sau khi đã đưa được đường ngắm cơ bản vào điểm ngắm trên bia, cảm biến tín hiệu cò kích hoạt bộ phát laser gắn trên nòng súng (trước đó đã phải quy không cho bộ phát laser này), vết laser sẽ được ma trận cảm biến laser gắn trên bia nhận diện, tính điểm theo thuật toán cài đặt sẵn và truyền không dây kết quả bắn về màn hình hiển thị kết quả bắn. Cảm biến laser trên bia và đầu phát laser gắn trên súng phải được tính toán lựa chọn đảm bảo tương thích với nhau nhằm loại bỏ ảnh hưởng của điều kiện chiếu sáng của môi trường. Về nguyên tắc, khi cố định kích thước bia và đường kính vết laser, ma trận cảm biến laser càng dày thì độ chính xác của việc đánh giá kết quả bắn càng cao. Phụ thuộc vào yêu cầu của người sử dụng, cự ly đặt bia để bắn tập có thể khác nhau (phù hợp với điều kiện thao trường bãi tập của từng đơn vị), do đó kích thước bia sẽ khác nhau với từng cự ly dẫn đến số lượng cảm biến laser tương ứng sẽ khác nhau. Giả sử đã chọn được đầu phát laser và cảm biến laser phù hợp (đảm bảo tính năng, nguồn cung, độ bền, chỉ tiêu an toàn, giá cả hợp lý,…), bài toán xác định số lượng các cảm biến laser tối ưu trên bia sẽ được giải khi biết kích thước bia và sai số xác định điểm chạm của vết laser trên bia. Số lượng này xác định theo công thức (1):

$$N = (N_x + 2).(N_y + 2) \quad (1)$$

Ở đây: N – Số lượng cảm biến trên toàn bộ bia; N_x – Số lượng cảm biến trên 1 hàng

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

(tính theo chiều rộng phần hình người của mặt bia đang xét); N_y – Số lượng cảm biến trên 1 cột (tính theo chiều cao phần hình người của mặt bia đang xét).

Coi cảm biến là hình vuông có cạnh là C (cm).

Gọi sai số xác định điểm chạm của vết laser trên bia là k (cm).

Giá trị N_x tính được dựa vào phương trình (2):

$$x = N_x C + (N_x - 1)k \quad (2)$$

Ở đây x: Chiều rộng mặt bia ở cự ly đang xét.

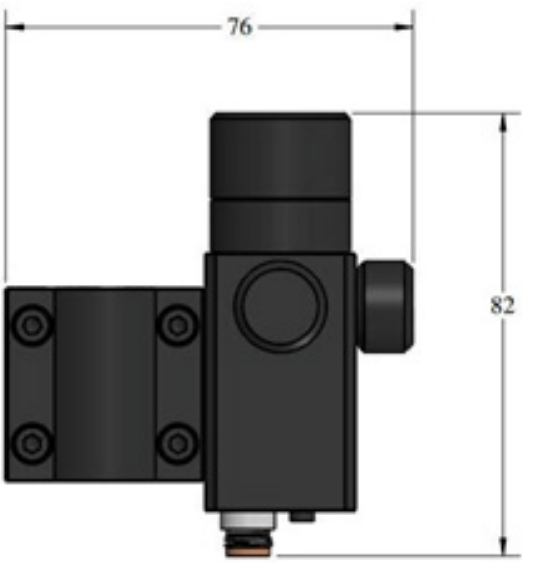
Giá trị N_y tính được dựa vào phương trình (3):

$$y = N_y C + (N_y - 1)k \quad (3)$$

Ở đây y: Chiều rộng mặt bia ở cự ly đang xét.

Cụ thể, với bia số 4 dùng cho bắn tập ở cự ly thu gọn 50m, lúc này kích thước mặt bia sẽ là x = 21cm, y = 21cm; sai số xác định tọa độ điểm chạm trên bia (chính là vết laser) k = 1cm; kích thước cảm biến C = 0,5cm. Dựa vào các công thức (1) ÷ (3), ta tìm được N = 289 cảm biến.

Với đầu phát laser, các thiết kế cơ bản bám theo đầu phát laser của Thiết bị bắn tập TBS-19/AK mà nhóm tác giả là chủ sản phẩm. Tuy nhiên, do kết cấu nòng của dòng súng tiểu liên STV khác so với nòng súng tiểu liên AK47 nên vẫn có những điều chỉnh nhất định để phù hợp với trang bị mới này (Hình 2 thể hiện kích thước bao của đầu phát laser gắn trên nòng dòng súng STV).



Hình 2. Đầu phát laser gắn trên nòng dòng súng STV

Để giải quyết vấn đề tạo hiệu ứng tiệm cận với phát bắn đạn thật, nhóm tác giả cũng sử dụng giải pháp tích hợp loa với mạch âm thanh kỹ thuật số lên súng để tạo tiếng nổ đầu nòng và sử dụng năng lượng điện từ để tạo hiệu ứng lực giật mô phỏng cho dòng súng STV. Khi người tập thực hiện động tác bóp cò, tín hiệu điện được cấp để kích hoạt mạch phát âm thanh của loại súng STV tương ứng đã thu từ trước để phát tiếng nổ ra loa nén đi kèm thiết bị. Đồng thời lúc này dòng điện cũng được cấp cho cuộn dây dẫn bên trong có đặt thanh trượt làm bằng vật liệu từ, lực từ do cuộn dây sinh ra sẽ tác động lên thanh trượt làm nó dịch chuyển tạo nên lực giật cho súng. Để thiết kế được thanh trượt phù hợp với mỗi loại súng của dòng súng STV và đánh giá hiệu ứng lực giật mô phỏng so với phát bắn đạn thật của chúng, cần sử dụng công thức tính xung lực giật mô phỏng khi thanh trượt va chạm với cơ cấu hạn chế trước và sau [5] :

$$J = Q_t V_c / g \quad (4)$$

Ở đây:
- Q_t: Trọng lượng thanh trượt;
- V_c: Vận tốc thanh trượt trước va chạm;
- g: Gia tốc trọng trường.

Dựa trên kích thước cụ thể của mỗi loại súng, căn cứ dung lượng pin cần đảm bảo thời gian luyện tập cho một buổi tập theo yêu cầu của người dùng, nhóm đề tài đã đưa ra được kết cấu cụ thể của cơ cấu tạo lực giật điện từ cho từng loại súng của dòng súng STV (Hình 3 thể hiện kích thước bao của cơ cấu tạo lực giật cho súng tiểu liên STV 380).



Hình 3. Cơ cấu tạo lực giật điện từ cho súng STV 380

3. KẾT LUẬN

Xuất phát từ yêu cầu thực tiễn, kết hợp với các kinh nghiệm của nhóm tác giả trong nghiên cứu thiết kế, chế tạo các thiết bị hỗ trợ huấn luyện, bài báo đã đề xuất được một giải pháp thiết kế – chế tạo thiết bị tập bắn cho cho dòng súng tiểu liên STV do Việt Nam chế tạo.

Thiết bị được thiết kế trên nguyên tắc mô phỏng thao tác bắn; ghi nhận kết quả thông qua các mô-đun cảm biến và xử lý tín hiệu; bảo đảm sự liên kết phù hợp về cơ khí, điện tử và phần mềm. Thiết bị cho phép triển khai cơ động, nhanh chóng, đơn giản; có khả năng đánh giá cho điểm chính xác, khách quan; mở ra triển vọng triển khai ở nhiều cấp độ huấn luyện, từ cá nhân đến tổ đội, trong mọi điều kiện thao trường, thời tiết.

Định hướng phát triển trong thời gian tới sẽ theo hướng tối ưu hóa thuật toán chấm điểm, nâng cao độ chính xác trong các điều kiện ánh sáng và môi trường khác nhau, đồng thời tích hợp thêm một số chức năng huấn luyện nâng cao (bắn mục tiêu di động, bắn phục vụ huấn luyện chiến thuật, sử dụng trí tuệ nhân tạo trong phân tích, đánh giá kết quả và đề ra lộ trình luyện tập phù hợp cho người tập,…).

Giải pháp thiết kế, chế tạo thiết bị tập bắn cho dòng súng tiểu liên STV được đề xuất trong bài báo không chỉ mang ý nghĩa khoa học, công nghệ mà còn có giá trị thực tiễn cao, góp phần hiện đại hóa công tác huấn luyện trong Quân đội nhân dân Việt Nam.❖

Ngày nhận bài: **12/9/2025**
Ngày phản biện: **29/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Costella, J., "*A progressive approach to basic rifle marksmanship (Fort Benning)*". U.S. Army Infantry School, 2016.
[2]. Fan Y.C., Wen C.Y., "*A virtual reality soldier simulator with body area networks for team training*". Sensors, 19(3), 2019.
[3]. https://www.israeldefense.co.il/ennode/54507.
[4]. Đoàn Văn Dũng, "*Báo cáo tổng kết đề tài Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo thiết bị tập bắn súng TBS-19 dùng cho huấn luyện bắn súng bộ binh*". Học viện Kỹ thuật quân sự, 2023.
[5]. Phạm Huy Chương, "*Động lực học vũ khí tự động*". Học viện Kỹ thuật quân sự, 2002.

TỔNG QUAN ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ AI TRONG DỆT MAY

OVERVIEW OF AI TECHNOLOGY APPLICATIONS IN THE TEXTILE AND APPAREL INDUSTRY

ThS. **Đỗ Thị Tuyết Lan**
Khoa Dệt may Thời trang, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
Email: dttlan@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Trí tuệ nhân tạo (AI) hiện đại đang được ứng dụng rộng rãi trong ngành dệt may nhằm nâng cao độ chính xác, tốc độ và hiệu quả sản xuất. Thông qua việc thu thập và phân tích dữ liệu lớn, các hệ thống AI hỗ trợ tối ưu hóa quy trình, giảm chi phí, cải thiện chất lượng và tăng năng suất. Các thuật toán học máy, học sâu và thị giác máy tính đã chứng minh hiệu quả vượt trội trong nhận dạng hình ảnh, xử lý vật liệu và phân tích dữ liệu. Bài báo này tập trung tổng quan các phương pháp AI được ứng dụng trong quy trình kỹ thuật đảo ngược, mở ra hướng tiếp cận mới cho sản xuất dệt may hiện đại.

Từ khóa: *Trí tuệ nhân tạo (AI); Ngành dệt may; Xử lý ảnh.*

ABSTRACT

Modern artificial intelligence (AI) has been increasingly applied in the textile industry to enhance accuracy, speed, and production efficiency. By collecting and analyzing big data, AI systems support process optimization, cost reduction, quality improvement, and productivity enhancement. Machine learning, deep learning, and computer vision algorithms have demonstrated outstanding performance in image recognition, material processing, and data analysis. This paper provides a comprehensive review of AI techniques applied in reverse engineering processes, offering new approaches for modern textile manufacturing.

Keywords: *Artificial intelligence (AI); Textile industry; Image processing.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trí tuệ nhân tạo (AI), một lĩnh vực rộng của khoa học máy tính, hướng tới việc tạo ra các máy thông minh có khả năng thực hiện những nhiệm vụ vốn đòi hỏi trí tuệ con người [1]. Với tính chất liên ngành và nhiều ứng dụng, đặc biệt là sự phát triển của học máy và học sâu, AI đang cách mạng hóa hầu hết các lĩnh vực công nghiệp, nâng cao năng suất, giảm công việc lặp lại và cải thiện trải nghiệm khách hàng [2]. AI cho phép máy móc mô phỏng hoặc vượt qua khả năng trí tuệ của con người thông qua việc kết hợp dữ liệu lớn, xử lý nhanh và các thuật toán thông minh [3, 4]. Thuật toán AI là dạng nâng cao của học máy, giúp máy tính tự học, cải thiện quy trình và thực hiện công việc nhanh hơn con người [4]. Trí tuệ bao gồm các ☞

thành phần như học tập, tri giác, giải quyết vấn đề, suy luận và ngôn ngữ.

Ngành dệt may có ảnh hưởng lớn đến chất lượng cuộc sống, trong đó quần áo là nhu cầu thiết yếu. Đổi mới là chiến lược quan trọng để duy trì cạnh tranh, thể hiện qua việc áp dụng trí tuệ máy tính, vật liệu bền vững và kỹ thuật sản xuất hiện đại. Sự tiến bộ công nghệ trong sản xuất vải đã cải thiện từ khâu chọn nguyên liệu đến quy trình chế tạo [5]. Trong lĩnh vực này, kỹ thuật đảo ngược đặc biệt hữu ích nhờ khả năng phân tích thành phần và cấu trúc vải để nâng cao chất lượng, tái tạo sản phẩm và tối ưu hóa quy trình. Sự kết hợp AI với kỹ thuật đảo ngược giúp tăng tốc độ, tự động hóa, giảm kiểm tra thủ công và phân tích chính xác đặc tính vật liệu, từ đó thúc đẩy ngành dệt may hướng tới tương lai hiệu quả và hiện đại hơn [6].

2. ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG NGÀNH DỆT MAY

2.1. Thị giác máy tính trong đặc tính sợi

Một hệ thống AI hiệu năng cao đã được phát triển để phân tích nhanh và chính xác các đặc tính của sợi, bao gồm:



Hình 1. Quy trình phân tích hình thái sợi [7]

- Xác định tỷ lệ thành phần của các loại sợi trong hỗn hợp và phân tích tỷ lệ cấu trúc;
- Đánh giá độ bền của vải không dệt;
- Đếm số lượng sợi và sợi dệt theo đơn vị Dtex hoặc Denier.



Hình 2. Nhận dạng hình thái sợi [8]

Thị giác máy tính còn cho phép nhận diện và đánh giá đặc tính sợi như chiều dài, đường kính, độ xoăn, cũng như hình dạng tổng thể [8].

2.2. Ứng dụng Machine Learning trong quá trình kéo sợi

Để duy trì quy trình sản xuất ổn định và đảm bảo chất lượng cho bán thành phẩm và thành phẩm, cần áp dụng các hệ thống thông tin máy tính hiện đại trong toàn bộ quy trình kéo sợi [9]. Trí tuệ nhân tạo (AI) và Machine Learning hỗ trợ tối ưu hóa phối trộn sợi bông, qua đó nâng cao chất lượng, độ đồng nhất, hiệu suất sản xuất và giảm lãng phí. Các mô hình học máy khai thác dữ liệu về đặc tính vật lý của sợi (chiều dài, độ mảnh, độ bền), thành phần, môi trường và phương pháp sản xuất để dự đoán tỷ lệ phối trộn tối ưu. Trong đó, thuật toán di truyền là một kỹ thuật quan trọng nhằm tìm ra sự kết hợp phù hợp giữa sợi bông ngắn và dài. Sau khi huấn luyện, các mô hình này có khả năng xử lý dữ liệu mới để dự đoán chất lượng và hiệu suất của các phối trộn khác nhau [10].

2.3. Thị giác máy tính và xử lý ảnh trong đánh giá chất lượng và phát hiện lỗi sợi

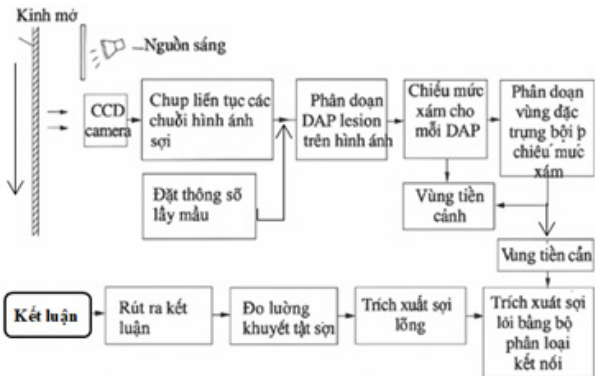
Một phương pháp mới đánh giá chất lượng sợi dựa trên đường kính, độ xù và khuyết tật, sử dụng thị giác máy tính và xử lý ảnh,

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

mang lại ưu điểm vượt trội so với phương pháp cũ.

Quy trình gồm: tiền xử lý ảnh (biến đổi ảnh màu sang ảnh xám, lọc nhiễu), trong đó Tập Neutrosophic (NS) được áp dụng để xử lý thông tin mơ hồ. Hệ thống cho phép đo đường kính, độ xù và khuyết tật sợi với độ chính xác cao.

Để loại bỏ ánh sáng lạc và bóng đổ, nền chụp ảnh được thiết kế khép kín, sử dụng kính mờ khuếch tán trắng sữa. Hệ thống còn tích hợp bộ điều khiển chuyển động và lực căng sợi để tăng tính ổn định khi đo. Hình 3 trình bày sơ đồ khối phương pháp [11].



Hình 3. Sơ đồ khối phương pháp phát hiện các thông số và đánh giá chất lượng sợi

2.4. Trí tuệ nhân tạo trong quá trình dệt

Mặc dù các nhà sản xuất máy dệt đã đạt được tiến bộ trong việc phát triển máy kỹ thuật số hướng tới Industry 4.0, nhưng vẫn cần nhiều cải tiến hơn. Người dệt mong muốn các máy có khả năng thay đổi kiểu dáng hoàn toàn tự động, hình thành mạch tích hợp linh hoạt cho e-textiles, tự động sửa đứt sợi dọc, máy dệt đa pha cho dobby và jacquard, cũng như dệt jacquard với mật độ sợi dọc/thay đổi chiều rộng để vượt qua giới hạn tốc độ của máy dệt đơn pha hiện nay [12].

Việc phát triển robot để tự động hóa hoàn toàn, áp dụng IoT cho phép nhà sản xuất truy cập và xử lý dữ liệu lớn bằng AI và phân tích để chẩn đoán, dự đoán sự cố, cùng với hệ thống thu thập và lưu trữ dữ liệu số lượng lớn là những bước cần thiết. Lưu ý rằng vì tất cả dữ liệu có sự liên kết từ sợi đến thị trường, nên các công đoạn thượng nguồn (sản xuất sợi) và hạ nguồn (hoàn thiện vải, sản phẩm, tiếp thị) cần được tích hợp với quy trình dệt [13].

2.5. Xử lý ảnh số và thị giác máy tính trong đánh giá chất lượng và phát hiện lỗi vải

"Cấu trúc vải" mô tả cảm giác khi chạm vào như: bóng, mượt, mềm, nhung, thô, v.v. Các kiểu dệt khác nhau quyết định đến cấu trúc bề mặt vải. Chất liệu dệt có thể từ sợi tự nhiên (lanh, bông, lụa, len, da) hoặc sợi tổng hợp. Các lỗi vải có thể do lỗi máy, lỗ thủng, lem màu, lỗi sợi, trầy xước hoặc hoàn thiện kém [14].

Xử lý ảnh số và thị giác máy tính được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất tự động và các lĩnh vực liên quan. Phát hiện lỗi vải là một thách thức lớn trong ngành dệt vì hiệu quả của việc phát hiện tự động quyết định chất lượng và giá thành sản phẩm. Trước đây, ngành dệt chủ yếu dùng thủ công để kiểm tra lỗi trong quá trình sản xuất. Hiện nay, các ứng dụng xử lý ảnh số và thị giác máy tính để giải quyết hạn chế này.

2.6. Deep Learning trong phối màu dệt may

Mô hình DLE4FC cải thiện độ chính xác nhận diện màu trong ảnh vải bằng kỹ thuật deep learning. Bộ dữ liệu thử nghiệm gồm 2.000 ảnh dệt dưới nhiều điều kiện ánh sáng, tạo ra 7.757 ảnh. Sau khi gán nhãn thủ công, thu được 1.200 ảnh cân bằng thuộc 12 nhóm màu. Mỗi ảnh được 11 người đánh giá để xác ☞

định màu chuẩn, với nhãn cuối cùng chọn theo đa số. Kết quả cho thấy DLE4FC cải thiện đáng kể độ chính xác nhận diện màu [15].

Màu sản phẩm có thể được đánh giá ở mức tổng quát là "chấp nhận được/không chấp nhận được" hoặc cụ thể hơn như "quá nhạt", "quá đỏ", "quá xanh". Những quyết định này dựa trên sự sai lệch đáng kể so với tiêu chuẩn lý tưởng và có thể thực hiện bằng trực quan hoặc phân tích [16].

Có thể nâng cao độ chính xác và hiệu quả kiểm tra tự động bằng việc phát triển nền tảng AI với chức năng pass/fail (P/F), hoạt động tương tự hệ thống phát hiện lỗi, như minh họa trong Hình 5 [8].



Hình 4. Ứng dụng AI trong phối màu dệt may

3. KẾT LUẬN

Ngay cả ở các quốc gia công nghiệp phát triển, ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) trong dệt may vẫn còn mới mẻ; ở các nước đang phát triển, AI càng hứa hẹn mang lại nhiều lợi ích trong sản xuất và kiểm soát chất lượng. Ngành dệt may ứng dụng AI ngày càng nhiều nhờ khả năng xử lý nhanh, chính xác các vấn đề phức tạp – yếu tố then chốt để duy trì năng lực cạnh tranh.

Trong sản xuất vải, vốn thâm dụng lao động, AI đã hỗ trợ các công đoạn như kiểm tra, phát hiện, dự đoán và nhận dạng bằng công nghệ thị giác máy tính và xử lý ảnh. Tuy nhiên, một số ứng dụng như kỹ thuật đảo ngược (Reverse Engineering) vẫn gặp hạn chế về độ chính xác với các loại vải phức tạp.

Các nghiên cứu cho thấy AI có tiềm năng nâng cao chất lượng, rút ngắn thời gian và giảm sai sót so với phân tích thủ công, nhưng vẫn tồn tại thách thức về quy mô và chất lượng dữ liệu. Dữ liệu đầy đủ, đa dạng và đáng tin cậy là điều kiện tiên quyết để huấn luyện mô hình AI hiệu quả.

Bên cạnh đó, sự kết hợp chặt chẽ giữa chuyên môn dệt may và công nghệ AI là cần thiết, song đội ngũ liên ngành đáp ứng yêu cầu này chưa thực sự sẵn có.❖

Ngày nhận bài: **15/9/2025**
Ngày phản biện: **29/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Dwivedi, Yogesh K, Laurie Hughes, Elvira Ismagilova, Gert Aarts, Crispin Coombs, Tom Crick, Yanqing Duan et al., "*Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy*". International Journal of Information Management 57, 2021.

[2]. Valavanidis, Athanasios, "*Artificial Intelligence (AI) Applications*". Department of Chemistry, National and Kapodistrian University of Athens, University Campus Zografou 15784, 2023.

[3]. Xu, Yongjun, Xin Liu, Xin Cao, Changping Huang, Enke Liu, Sen Qian, Xingchen Liu et al., "*Artificial intelligence: A powerful paradigm for scientific research*". The Innovation 2, no. 4, 2021.

[4]. Wan, Jiafu, Xiaomin Li, Hong-Ning Dai, Andrew Kusiak, Miguel Martinez-Garcia, and Di Li, "*Artificial-intelligence-driven*

customized manufacturing factory: key technologies, applications, and challenges". Proceedings of the IEEE 109, no. 4, 377-398, 2020.

[5]. Bullon, Juan, María Angélica González Arrieta, María Ascensión Hernández Encinas, and María Araceli Queiruga Dios, "*Manufacturing processes in the textile industry. Expert Systems for fabrics production*", 2017.

[6]. Servi, Michaela, Roberto Magherini, Francesco Buonamici, Yary Volpe, and Rocco Furferi, "*Integration of artificial intelligence and augmented reality for assisted detection of textile defects*". Journal of Engineered Fibers and Fabrics 19, 2024.

[7]. Rahman, Md Fashiar, Jianguo Wu, and Tzu Liang Bill Tseng, "*Automatic morphological extraction of fibers from SEM images for quality control of short fiber-reinforced composites manufacturing*". CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 33: 176-187, 2021.

[8]. Mr. Tesfay welamo1, Professor Deng1 Sanpeng, "*Application of Artificial Intelligence in Textile Industry*". Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), 8(10), 49-64, 2021.

[9]. M.J. Abghary, M.S. Johari, and S. Hassanzadeh, "*Effects of OE spinning parameters on cotton rotorspun yarn hairiness*". Indian J. Fibre Text. Res, vol. 41, no. 2, pp. 129-137, 2016.

[10]. Stjepanovic, Zoran, and Anton Jezernik, "*Optimisation of cotton fibre blends using AI machine learning techniques*". Springer, 2020.

[11]. Li, Zhisong, Ping Zhong, Xin Tang, Yu Chen, Shu Su, and Tianbao Zhai, "*A new method to evaluate yarn appearance qualities based on machine vision and image processing*". IEEE Access 8, 2020.

[12]. Marco Vinicio Cevallos Bravo, "*William Marcelo Ponce Iturralde. Artificial Intelligence in the Management of Textile Companies: A Contextual Analysis*". Open Journal of Business and Management. 12, 945-960, 2024.

[13]. Li, C., Li, J., Li, Y., He, L., Fu, X., & Chen, J., "*Fabric defect detection in textile manufacturing: a survey of the state of the art*". Security and Communication Networks, 2021.

[14]. Deageon Kim and Dongoun Lee, "*Fabric Defect Detection Based on Artificial Intelligence*". International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 11(5s), 01-07, 2024.

[15]. Amelio, Alessia, Gianluca Bonifazi, Francesco Cauteruccio, Enrico Corradini, Michele Marchetti, Domenico Ursino, and Luca Virgili, "*DLE4FC: a Deep Learning Ensemble to Identify Fabric Colors*". In SEBD, pp. 13-21, 2023.

[16]. Senbiao Liu, Yaohui Keane Liu, Kwan-yu Chris Lo and Chi-wai Kan, "*Intelligent techniques and optimization algorithms in textile colour management: a systematic review of applications and prediction accuracy*". Fashion and Textiles. 11:13, 1-38, 2024.

ĐẶC TÍNH LƯU LƯỢNG VÀ ĐỘ NHẠY HỆ THỐNG ĐO KHÍ NÉN: NGHIÊN CỨU CFD

FLOW RATE AND SENSITIVITY CHARACTERISTICS OF PNEUMATIC GAUGES: A CFD STUDY

Nguyễn Hoàn, Lê Viết Khải, Bành Quốc Nguyên*, Trần Anh Sơn, Hồ Minh Tuấn
Bộ môn Chế tạo máy, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa,
Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
**Email: bqnguyen@hcmut.edu.vn*

TÓM TẮT

Hệ thống đo khí nén đóng vai trò thiết yếu trong đo không tiếp xúc, chuyển đổi kết quả biến thiên theo khoảng cách thành thay đổi lưu lượng thể tích. Nghiên cứu này sử dụng Động lực học chất lỏng tính toán (CFD) để khảo sát độ nhạy của hệ thống, tập trung vào ảnh hưởng của khoảng cách đầu phun đến bề mặt và ba tỷ lệ đường kính D/d (0.25, 0.5, 0.705) lên phản ứng lưu lượng thể tích. Mô hình CFD được xây dựng với mô hình tính toán dòng chảy rối SST k – ω (SST k – omega). Kết quả mô phỏng sẽ làm rõ mối quan hệ phi tuyến tính giữa lưu lượng thể tích và chiều cao khe hở cho từng tỷ lệ D/d, từ đó xác định phạm vi đo tuyến tính và vùng hoạt động tối ưu của hệ thống. Việc đánh giá có hệ thống này cung cấp cái nhìn chi tiết để cải thiện thiết kế hệ thống đo khí nén, góp phần nâng cao độ nhạy, độ ổn định và khả năng lặp lại trong các ứng dụng công nghiệp đòi hỏi độ chính xác cao.

Từ khóa: *Đo khí nén; Lưu lượng thể tích; Mô phỏng CFD; Mô hình dòng chảy rối; Chiều cao khe hở; Phân tích độ nhạy.*

ABSTRACT

Pneumatic measuring devices are essential for non-contact dimensional measurement, converting dimensional variations into volume flow rate changes. This study utilizes Computational Fluid Dynamics (CFD) to investigate system sensitivity, focusing on the influence of nozzle-to-plate distance and three D/d diameter ratios (0.25, 0.5, 0.705) on the volume flow rate response. A CFD model was developed using the SST k – ω (SST k – omega) turbulence model. Simulation results will clarify the nonlinear relationship between volume flow rate and gap height for each D/d ratio, thereby identifying the linear measurement range and optimal operating zone of the system. This systematic evaluation provides valuable insight for improving air gauge design, contributing to enhanced sensitivity, stability, and repeatability in high-precision industrial applications.

Keywords: *Air gauging; Volume flow rate; CFD simulation; Turbulence modeling; Gap height; Sensitivity analysis.*

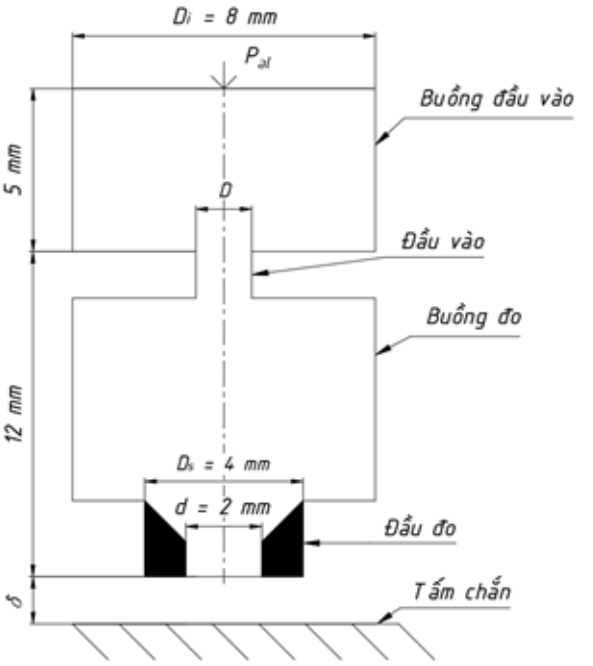
1. TỔNG QUAN

Hệ thống đo khí nén được sử dụng rộng rãi trong đo lường kích thước không tiếp xúc, nhưng việc cải thiện độ chính xác gặp nhiều thách thức do mối quan hệ phụ thuộc giữa phạm vi đo và độ nhạy [1-8]. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng ảnh hưởng của biên dạng hệ thống đo, đặc biệt là tỷ lệ đường kính đầu phun (D/d), ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất [8-10]. Nghiên cứu này sử dụng mô phỏng Động lực học chất lỏng tính toán (CFD) để khảo sát độ nhạy của hệ thống đo khí nén. Cụ thể, chúng tôi phân tích ảnh hưởng của khoảng cách giữa đầu phun và bề mặt đo, cùng với ba tỷ lệ D/d khác nhau (0.25, 0.5, 0.705), đến phản ứng lưu lượng thể tích. Mô hình CFD được xây dựng dựa trên các kích thước đã được xác thực [7, 9], nhằm cung cấp cái nhìn sâu sắc phục vụ cho việc cải tiến thiết kế và nâng cao hiệu suất tổng thể của hệ thống.

2. PHƯƠNG PHÁP

2.1. Đặt vấn đề

Mô hình mô phỏng được thực hiện dựa trên mô hình hệ thống đo khí nén từ các nghiên cứu trước [7, 9], nhằm khảo sát ảnh hưởng của ba tỷ lệ đường kính đầu phun D/d khác nhau (0.25, 0.5 và 0.705) đến đặc tính đo lường của hệ thống. Trong mô hình, khí nén được cấp vào hệ thống ở áp suất không đổi 3 bar. Đầu đo có đường kính ngoài D_s là 4 mm và đường kính trong d là 2 mm, đường kính đầu vào D (0.25; 0.5; 0.705) trong khi buồng vào có đường kính D_i là 8 mm. Để đảm bảo độ tin cậy của mô hình CFD, kết quả mô phỏng ban đầu được xác thực bằng dữ liệu thực nghiệm về lưu lượng thể tích thu được ở cùng điều kiện áp suất (3 bar) và khoảng cách từ 0 đến 1000 µm [7]. Sau bước xác thực, các đặc tính lưu lượng thể tích tĩnh sẽ được phân tích trong dải khoảng cách từ đầu phun đến bề mặt đo δ từ 0 đến 1000 µm, nhằm đánh giá độ nhạy của hệ thống ứng với từng tỷ lệ D/d. Phân tích này hướng tới việc cung cấp các hiểu biết chuyên sâu để tối ưu hóa thiết kế và nâng cao độ chính xác trong đo lường của hệ thống khí nén.



Hình 1. Biên dạng hình học

2.2. Phương pháp số

Trong nghiên cứu này, mô hình dòng chảy rối SST k – ω của Menter [11] được lựa chọn nhờ khả năng kết hợp ưu điểm của mô hình k – ω trong vùng gần tường và mô hình k – ε trong vùng xa tường. Nhờ tính ổn định cao và độ chính xác trong các bài toán dòng chảy phức tạp, mô hình SST k – ω được xem là lựa chọn phù hợp cho mô phỏng hệ thống đo khí nén trong nghiên cứu này.

2.3. Cài đặt mô phỏng

Quy trình phân tích CFD bắt đầu với ☞

việc xây dựng hình học và tạo lưới. Hình học của mô hình máy đo khí nén được thiết kế bằng phần mềm CAD, đảm bảo chính xác các thông số kích thước của đầu phun tương ứng với từng tỷ lệ đường kính D/d được khảo sát. Toàn bộ miền tính toán được chia lưới bằng lưới cấu trúc, trong đó lưới được tinh chỉnh rất mịn tại các vùng giữa đầu phun và bề mặt đo (tấm phẳng) nhằm nắm bắt đầy đủ các hiện tượng gần tường, thỏa mãn $y^+ \sim 1$ đảm bảo yêu cầu tính toán cho mô hình dòng chảy rối được lựa chọn. Không khí được giả định là khí lý tưởng, với độ nhớt động học được lấy là $\mu = 1.752\times10^{-5}$ kg/m•s. Các điều kiện biên được thiết lập như sau: đầu vào áp suất tổng không đổi 3 bar (BC1), điều kiện tường không trượt áp dụng cho cả tường của hệ thống đo và tấm phẳng (BC2, BC4), và đầu ra (BC3). Để giảm chi phí tính toán, mô hình được giả định đối xứng trục (BC5), như trình bày trong Hình 2. Dòng khí trong buồng là khí nén, tuân theo định luật khí lý tưởng và ổn định theo thời gian (steady-state).



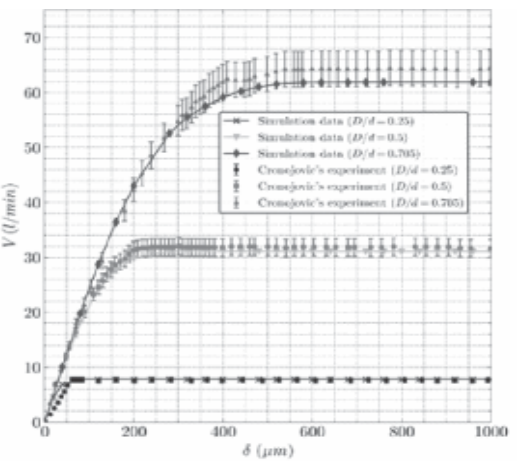
Hình 2. Miền tính toán

Bộ giải CFD thực hiện giải các phương trình chi phối thông qua quy trình lặp hội tụ, với quá trình hội tụ được giám sát thông qua biểu đồ phần dư. Giai đoạn xử lý hậu kỳ bao gồm việc trích xuất các biến dòng chảy quan trọng như lưu lượng thể tích và phân bố vận tốc để phục vụ phân tích. Các mô phỏng được thực hiện trên máy trạm HP Z6 G4 với bộ xử lý Intel Xeon Gold 6146 và bộ nhớ RAM 128 GB. Thời gian tính toán trung bình cho mỗi trường hợp khoảng 2 giờ 30 phút với kích thước lưới gần 800,000 điểm cho trường hợp D/d = 0.25, nhưng đối với trường hợp D/d = 0.5 và 0.705 cần tính toán gradient của sóng xung kích (shock wave) tại vị trí đầu vào nên cần chia lưới mịn, do đó tổng số lưới cần là xấp xỉ 3,600,000 điểm, với thời gian giải gần 8 giờ 30 phút. Tất cả điểm lưới gần tường trong các mô phỏng đều đạt $y^+ \sim (1 – 5)$ tại những điểm có gradient lớn.

Độ tin cậy của mô hình được đảm bảo thông qua xác minh và xác thực. Xác minh bao gồm kiểm tra chất lượng lưới và đánh giá hợp lý các điều kiện biên. Xác thực được thực hiện bằng cách so sánh kết quả mô phỏng (lưu lượng thể tích) với dữ liệu thực nghiệm từ tài liệu [7] trong điều kiện cấp áp suất 3 bar và khoảng cách đầu phun – bề mặt từ 0 đến 1000 µm. Phân tích sâu hơn chỉ được tiến hành khi kết quả mô phỏng thể hiện độ tin cậy thỏa đáng với dữ liệu tham chiếu và đạt được nghiệm hội tụ ổn định.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xác thực

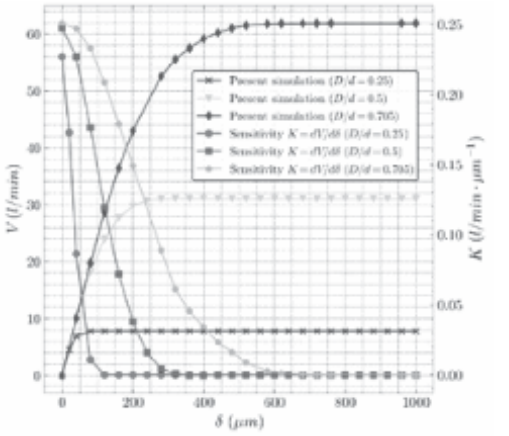


Hình 3. Xác thực kết quả mô phỏng về lưu lượng dòng chảy V với kết quả thực nghiệm của Crnojevic [7]

Độ tin cậy của mô hình được đảm bảo thông qua quá trình xác thực kỹ lưỡng. Mô hình CFD hiện tại đã được xác thực bằng cách so sánh lưu lượng thể tích V từ mô phỏng với dữ liệu thực nghiệm từ nghiên cứu của Crnojevic [7]. Hình 3 thể hiện sự tương đồng tốt giữa kết quả mô phỏng CFD hiện tại và dữ liệu thực nghiệm trên toàn bộ dải khoảng cách từ đầu phun đến bề mặt (δ) cho cả ba tỷ lệ đường kính D/d (0.25, 0.5, 0.705). Mô phỏng đã phản ánh đúng mối quan hệ phi tuyến đặc trưng giữa lưu lượng thể tích và khoảng cách, bao gồm cả giai đoạn tăng nhanh ban đầu và sau đó là giai đoạn ổn định. Sự tương quan chặt chẽ này khẳng định độ tin cậy của mô hình CFD hiện tại trong việc tái tạo đặc tính thực nghiệm của hệ thống đo khí, xác nhận tính phù hợp của nó cho các phân tích sâu hơn về đặc tính lưu lượng và độ nhạy. Ước tính độ không chắc chắn đo lường 5% của dữ liệu thực nghiệm [7] có thể giải thích cho các sai lệch nhỏ quan sát được.

3.2. Độ nhạy

Hình 4 minh họa đồng thời đặc tính tĩnh và độ nhạy K = dV/dδ của hệ thống đo khí nén đối với ba tỷ lệ đường kính khác nhau (D/d = 0.25, 0.5, 0.705). Đối với lưu lượng thể tích, tất cả các tỷ lệ D/d đều cho thấy V tăng nhanh khi khoảng cách δ tăng từ 0, sau đó đạt đến một giá trị bão hòa. Lưu lượng bão hòa tăng lên đáng kể khi tỷ lệ D/d tăng. Về độ nhạy, K đạt giá trị cao nhất tại khoảng cách rất nhỏ và giảm dần khi δ tăng lên. Phân tích cho thấy tỷ lệ D/d ảnh hưởng rõ rệt đến đặc tính độ nhạy: các tỷ lệ D/d nhỏ hơn (ví dụ: 0.25) mang lại độ nhạy đỉnh cao hơn nhưng có dải đo hiệu quả hẹp hơn (độ nhạy giảm nhanh về 0). Ngược lại, các tỷ lệ D/d lớn hơn (ví dụ: 0.705) có độ nhạy đỉnh thấp hơn nhưng duy trì khả năng đo lường hiệu quả trên một dải khoảng cách rộng hơn. Kết quả này cung cấp những hiểu biết chuyên sâu có giá trị cho quá trình tối ưu hóa thiết kế máy đo khí nén, hướng tới sự cân bằng giữa độ nhạy và phạm vi đo.



Hình 4. Đặc tính lưu lượng và độ nhạy theo khoảng cách đầu phun bề mặt cho đường kính D/d khác nhau

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã ứng dụng mô phỏng Động lực học chất lỏng tính toán CFD với mô hình dòng chảy rối SST k – ω để khảo sát độ nhạy của hệ thống đo khí nén, tập trung vào ảnh hưởng của khoảng cách đầu phun đến bề mặt δ và ba tỷ lệ đường kính (D/d = 0.25, 0.5, 0.705) đến lưu lượng thể tích. Kết quả mô phỏng đã tái hiện chính xác dữ liệu thực nghiệm thu được từ nghiên cứu đã công bố trước đó. Bên cạnh đó, mô phỏng đã cho thấy rõ mối quan hệ phi tuyến tính giữa lưu lượng thể tích và chiều cao khe hở cho từng tỷ lệ D/d. Phân tích độ nhạy chỉ ra rằng tỷ lệ D/d nhỏ hơn mang lại độ nhạy cao hơn nhưng dải đo hiệu quả hẹp hơn, trong khi tỷ lệ D/d lớn hơn duy trì khả năng đo trên một dải với khoảng cách rộng hơn. Việc đánh giá này cung cấp cái nhìn chuyên sâu để cải thiện thiết kế hệ thống đo khí nén, góp phần nâng cao độ nhạy, độ ổn định và khả năng lặp lại trong các ứng dụng công nghiệp đòi hỏi độ chính xác cao. ☞

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số To-CK-2024-02. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **12/9/2025**
Ngày phản biện: **01/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. M. Rucki, "*Recent Development of Air Gauging in Industry 4.0 Context*". Sensors 23 (2023) 2122. https://doi.org/10.3390/s23042122.

[2]. R. Thomson, "*In-Process Inspection with Air Gauges*". In: S. Murphy (Ed.), In-Process Measurement and Control, 1st ed., Routledge, New York, 1990.

[3]. P. Koshy, D. Grandy, F. Klocke, "*Pneumatic non-contact topography characterization of finish-ground surfaces using multivariate projection methods*". Precis Eng 35 (2011) 282-288. https://doi.org/10.1016/J.PRECISIONENG.2010.11.001.

[4]. D. Grandy, P. Koshy, F. Klocke, "*Pneumatic non-contact roughness assessment of moving surfaces*". CIRP Annals 58 (2009) 515-518. https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2009.03.121.

[5]. C.J. Jermak, M. Jakubowicz, M. Wieczorowski, M. Rucki, "*Fast and Precise Non-Contact Measurement of Cylindrical Surfaces with Air Gauges*". Materials 14 (2021) 3728. https://doi.org/10.3390/ma14133728.

[6]. K. Khawaja, L. Seneviratne, K. Althoefer, "*Wheel-tooling gap measurement system for ConformTM extrusion machinery based on a capacitive sensor*". J. Manuf. Sci. Eng. 127 (2005). https://doi.org/10.1115/1.1870004.

[7]. C. Crnojevic, G. Roy, A. Bettahar, P. Florent, "*The Influence of the Regulator Diameter and Injection Nozzle Geometry on the Flow Structure in Pneumatic Dimensional Control Systems*". J. Fluids Eng. 119 (1997) 609-615. https://doi.org/10.1115/1.2819288.

[8]. M. Jakubowicz, "*Accuracy of roundness assessment using air gauge with the slot-shaped measuring nozzle*". Measurement 155 (2020) 107558. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107558.

[9]. S.C.M. Yu, H.J. Poh, C.P. Tso, "*Numerical simulation on the flow structure around the injection nozzles for pneumatic dimensional control systems*". J. Fluids Eng. 122 (2000) 735-742. https://doi.org/10.1115/1.1319497.

[10]. M. Rucki, "*Step response of the air gauge*". Metrology and Measurement Systems 14 (2007) 429.

[11]. F.R. Menter, R. Sechner, A. Matyushenko, "*Best Practice: RANS Turbulence Modeling in ANSYS CFD*", 2021. https://www.ansys.com/resource-center/technical-paper/best-practice-rans-turbulence-modeling-in-ansys-cfd.

ỨNG DỤNG PHẦN MỀM CATIA MÔ PHỎNG VÀ KIỂM BỀN PISTON ĐỘNG CƠ ĐỐT TRONG

CATIA SOFTWARE APPLICATION TO SIMULATE AND TEST PISTON DURABILITY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Dương Hải Nam*, Vũ Thị Phượng
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp
**Email: dhnam@uneti.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày việc ứng dụng phần mềm CATIA V5-R21 trong thiết kế 3D, mô phỏng và kiểm nghiệm bền cho piston động cơ đốt trong. Phương pháp nghiên cứu bao gồm: (i) xây dựng mô hình 3D piston dựa trên thông số kỹ thuật động cơ thực tế; (ii) sử dụng các mô-đun Part Design, Assembly Design để thiết kế và lắp ghép; (iii) áp dụng Generative Structural Analysis để tính toán và phân tích phân bố ứng suất, biến dạng của piston dưới các điều kiện tải thực tế. Kết quả mô phỏng thể hiện các vị trí tập trung ứng suất và biến dạng lớn nhất, từ đó đánh giá độ bền và đề xuất các cải tiến thiết kế phù hợp. Nghiên cứu cho thấy việc ứng dụng CATIA giúp nâng cao độ chính xác thiết kế, giảm thời gian thử nghiệm, góp phần tối ưu hóa quy trình phát triển sản phẩm cơ khí và nâng cao chất lượng đào tạo kỹ sư ngành cơ khí.

Từ khóa: *CATIA V5; Piston; Động cơ đốt trong; Mô phỏng; Kiểm nghiệm bền.*

ABSTRACT

The paper presents the application of CATIA V5-R21 software in 3D design, simulation and durability testing for internal combustion engine pistons. The research method includes: (i) building a 3D piston model based on actual engine specifications; (ii) using Part Design and Assembly Design modules for design and assembly; (iii) applying Generative Structural Analysis to calculate and analyze the stress and deformation distribution of the piston under actual load conditions. The simulation results show the locations of the largest stress and deformation concentrations, thereby evaluating the durability and proposing appropriate design improvements. The study shows that the application of CATIA helps to improve design accuracy, reduce testing time, contribute to optimizing the mechanical product development process and improving the quality of mechanical engineering training.

Keywords: *CATIA V5; Piston; Internal combustion engine; Simulation; Durability testing.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh khoa học – công nghệ phát triển mạnh mẽ, đặc biệt là lĩnh vực thiết kế cơ khí và công nghệ thông tin, việc ứng dụng các công cụ CAD/CAE hiện đại để thiết kế và kiểm nghiệm chi tiết máy trở nên ngày càng cấp thiết. Đối với động cơ đốt trong, piston là một chi tiết chịu tải trọng cơ – nhiệt rất lớn, đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo hiệu suất, độ bền và tuổi thọ của động cơ [1, 4, 5]. Vì vậy, việc tính toán, mô phỏng và kiểm nghiệm bền piston trước khi chế tạo là yêu cầu bắt buộc nhằm tối ưu hóa thiết kế, giảm chi phí và thời gian thử nghiệm thực tế [1, 2].

Trên thế giới, các phần mềm thiết kế và mô phỏng 3D như CATIA, SolidWorks, ANSYS đã được áp dụng rộng rãi trong công nghiệp chế tạo. CATIA V5-R21, với khả năng thiết kế 3D, mô phỏng động học và phân tích bền chi tiết, được đánh giá là công cụ mạnh mẽ trong lĩnh vực cơ khí – động lực [2, 3]. Tuy nhiên, tại Việt Nam, việc sử dụng CATIA trong đào tạo và nghiên cứu vẫn chưa phổ biến, sinh viên và kỹ sư trẻ còn hạn chế trong việc khai thác hết các tính năng của phần mềm [3].

Xuất phát từ thực tiễn đó, bài báo này tập trung vào "Ứng dụng phần mềm CATIA mô phỏng và kiểm bền piston động cơ đốt trong". Nghiên cứu sử dụng thông số thực tế của động cơ xăng 1NZ-FE, tiến hành thiết kế 3D, phân tích bền bằng mô-đun Generative Structural Analysis của CATIA, từ đó đánh giá sự phân bố ứng suất và biến dạng của piston. Kết quả nghiên cứu không chỉ giúp nâng cao độ chính xác và tính khoa học trong thiết kế mà còn có giá trị ứng dụng trong đào tạo sinh viên ngành cơ khí và sản xuất thực tế.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đặc điểm làm việc của piston và sự cần thiết phải kiểm bền

Piston là chi tiết chuyển động tịnh tiến trong xi lanh, làm việc trực tiếp trong điều kiện áp suất và nhiệt độ cao. Cùng với nắp máy và xilanh, piston tạo thành buồng cháy, thực hiện chức năng nén hòa khí và tiếp nhận lực khí cháy truyền đến trục khuỷu thông qua thanh truyền [1].

Trong quá trình làm việc, piston chịu các dạng tải trọng chính: Áp suất khí cháy tác dụng lên đỉnh piston; tải trọng quán tính do chuyển động tịnh tiến qua lại ở tốc độ cao; tải nhiệt từ quá trình cháy, dẫn đến giãn nở không đồng đều trên thân piston.

Để đảm bảo tuổi thọ và hiệu suất, thiết kế piston cần tối ưu các thông số: chiều dày đỉnh, chiều cao, đường kính chốt, kết cấu rãnh xéc-măng,… Các công thức tính toán kích thước piston thường dựa trên các tiêu chuẩn về động cơ đốt trong [1, 4, 5].

Kiểm nghiệm bền là bước quan trọng trong thiết kế cơ khí nhằm đảm bảo chi tiết không bị phá hỏng dưới tác dụng của tải trọng làm việc. Một trong những tiêu chí phổ biến để đánh giá bền là ứng suất, giúp xác định vị trí tập trung ứng suất nguy hiểm nhất [1].

Với sự phát triển của công nghệ tính toán, phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (Finite Element Analysis – FEA) được sử dụng rộng rãi để dự đoán ứng suất, biến dạng, và chuyển vị của chi tiết trong điều kiện tải thực tế mà không cần chế tạo mẫu thử [2].

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

2.2. Giới thiệu về phần mềm CATIA

CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) là phần mềm CAD/CAE/CAM do hãng Dassault Systèmes phát triển, hỗ trợ toàn diện cho việc thiết kế sản phẩm 3D, mô phỏng và lập trình gia công CNC [2, 3]. Trong lĩnh vực thiết kế cơ khí, phiên bản CATIA V5-R21 cung cấp nhiều công cụ mạnh mẽ, nổi bật là các module Part Design dùng để xây dựng mô hình 3D của chi tiết piston, Assembly Design phục vụ lắp ráp cụm cơ cấu khuỷu – thanh truyền – piston, và Generative Structural Analysis hỗ trợ mô phỏng, kiểm nghiệm bền bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm xác định ứng suất, biến dạng và độ bền chi tiết. Việc ứng dụng CATIA trong quá trình thiết kế và phân tích bền mang lại nhiều lợi ích, giúp rút ngắn thời gian phát triển và thử nghiệm sản phẩm, giảm chi phí chế tạo mẫu, đồng thời nâng cao độ chính xác cũng như khả năng tối ưu hóa thiết kế.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

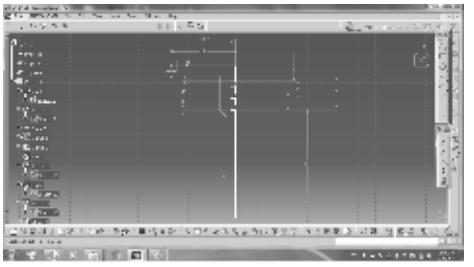
Trong nghiên cứu này, mô hình piston được xây dựng và kiểm nghiệm bền thông qua chuỗi bước thiết kế – mô phỏng – phân tích trên phần mềm CATIA V5-R21. Trước hết, các thông số hình học và tải trọng của piston được thu thập từ động cơ xăng 1NZ-FE, bao gồm đường kính xi lanh, chiều cao piston, đường kính chốt, vị trí rãnh xéc-măng và các dữ liệu liên quan đến áp suất buồng cháy [1]. Dựa trên các thông số này, mô hình 3D piston được tạo lập trong CATIA thông qua module Part Design bằng cách dựng biên dạng 2D (Sketch), sau đó sử dụng các lệnh Pad, Pocket, Shaft để tạo khối và gia công các chi tiết như rãnh xéc-măng và lỗ chốt piston. Tiếp theo, module Assembly Design được sử dụng để lắp ráp cụm cơ cấu khuỷu – thanh truyền – piston nhằm kiểm tra tính đồng bộ hình học và chuẩn bị cho quá trình phân tích [2, 3].

Sau khi hoàn thiện mô hình, bước kiểm nghiệm bền được thực hiện trong module Generative Structural Analysis. Quá trình này bao gồm: (i) lựa chọn vật liệu hợp kim nhôm cho piston từ thư viện của CATIA; (ii) định nghĩa điều kiện biên bằng cách cố định các bề mặt tiếp xúc phù hợp và áp dụng lực phân bố trên đỉnh piston theo giá trị áp suất cực đại trong chu trình công tác; (iii) chia lưới phần tử hữu hạn với kích thước mắt lưới tối ưu để đảm bảo độ chính xác và thời gian tính toán hợp lý; và (iv) chạy mô phỏng để thu được kết quả phân bố ứng suất, biến dạng và chuyển vị của piston. Các kết quả này được đánh giá dựa trên tiêu chí ứng suất và so sánh với giới hạn bền của vật liệu để xác định độ an toàn thiết kế [1, 2]. Phương pháp trên giúp mô phỏng chính xác điều kiện làm việc của piston mà không cần chế tạo mẫu thử, qua đó giảm thời gian và chi phí phát triển sản phẩm, đồng thời nâng cao khả năng ứng dụng CATIA trong đào tạo và nghiên cứu cơ khí.

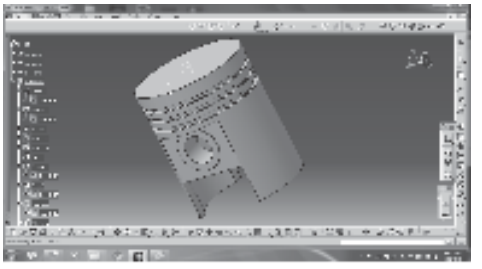
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Kết quả thiết kế mô hình 3D piston

Từ các thông số piston động cơ xăng 1NZ-FE được tính toán và so sánh với chi tiết thực [6], mô hình 3D piston được thiết kế hoàn chỉnh trong CATIA V5-R21 (bảng 1). Quá trình xây dựng mô hình sử dụng các lệnh Sketch để vẽ biên dạng, Pad và Shaft để tạo khối, Pocket để gia công rãnh xéc-măng và lỗ chốt piston. Kích thước các phần liên quan như chốt piston, phanh hãm chốt cũng được thiết kế đảm bảo sự tương thích hình học và đồng bộ kích thước. Kết quả mô hình đạt yêu cầu hình học, phục vụ tốt cho phân tích bền và mô phỏng động học [2, 3] (hình 1 và hình 2). ☞



Hình 1. Vẽ sketch profile



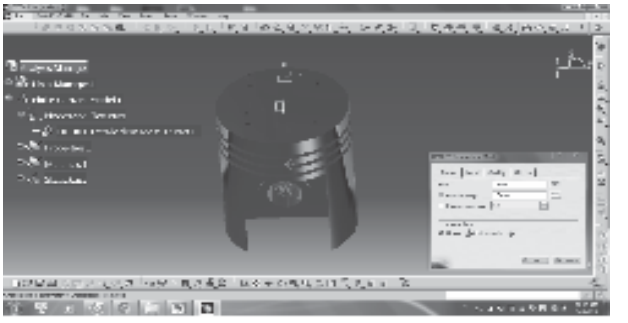
Hình 2. Piston hoàn thiện

Bảng 1. Thông số piston động cơ 1NZ-FE

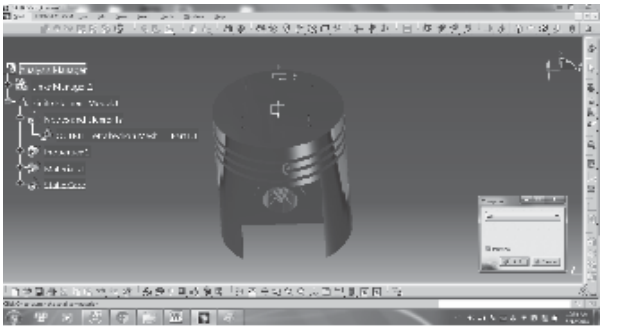
Thông số	Thông số	Đơn vị
Chiều dày đỉnh piston	$\delta = 6$	mm
Khoảng cách c từ đỉnh đến xéc măng khí thứ nhất	$c = 9$	mm
Chiều dày s của phần đầu	$s = 6$	mm
Chiều cao H của piston	$H = 90$	mm
Vị trí của chốt piston	$h = 45$	mm
Đường kính chốt piston, d_{cp}	$d_{cp} = 20$	mm
Đường kính bệ chốt, d_b	$d_b = 30$	mm
Đường kính lỗ trên chốt piston, d_0	$d_0 = 14$	mm
Chiều dày thân, S_1	$t = 5$	mm
Số xéc măng khí	2	
Chiều dày hướng kính t của xéc măng khí	$t = 3$	mm
Chiều cao a của xéc măng khí	$a = 3$	mm
Số xéc măng dầu	1	
Chiều dài bờ rãnh xéc măng	$a_1 = 4$	mm
Chiều dài thân piston	$l_{th} = 64$	mm

3.2. Chia lưới phần tử hữu hạn (FEA)

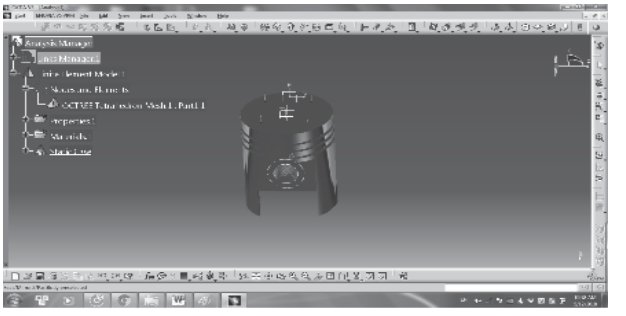
Sau khi hoàn thiện mô hình, quá trình chia lưới phần tử hữu hạn được thực hiện trong Generative Structural Analysis. Lưới được chia bằng phần tử Tetrahedron với kích thước mắt lưới khoảng 1 mm nhằm đảm bảo độ chính xác và thời gian tính toán hợp lý. Kết quả cho thấy lưới phân bố đều trên toàn bộ chi tiết, các vùng có hình dạng phức tạp như rãnh xéc-măng và lỗ chốt vẫn đảm bảo độ mịn cần thiết để thu được kết quả mô phỏng chính xác [2] (hình 3, 4, 5).



Hình 3. Chia lưới



Hình 4. Chạy chia lưới

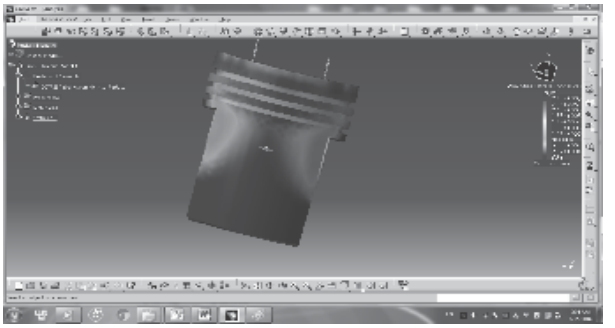


Hình 5. Hiển thị chia lưới

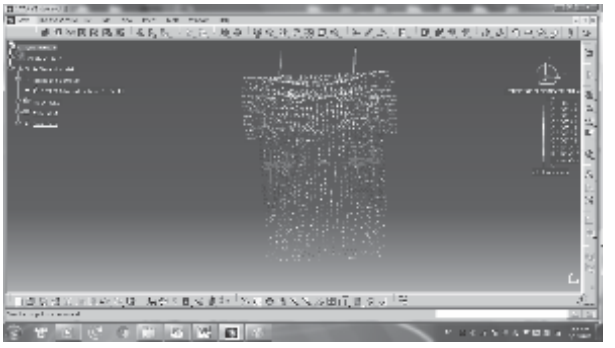
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

3.3. Kết quả phân tích ứng suất và biến dạng

Khi áp dụng tải trọng áp suất khí cháy cực đại và điều kiện biên cố định theo đúng chế độ làm việc [6], phần mềm CATIA cung cấp kết quả phân bố ứng suất Von Mises và biến dạng dịch chuyển trên piston. Kết quả cho thấy vùng tập trung ứng suất lớn nhất nằm tại các vị trí lỗ chốt piston và rãnh xéc-măng – đây là các vùng chịu tổ hợp tải trọng cơ và nhiệt cao, phù hợp với lý thuyết thiết kế piston [1]. Biến dạng dịch chuyển lớn nhất xuất hiện ở phần đỉnh piston dưới tác dụng áp suất buồng cháy. Tuy nhiên, giá trị ứng suất cực đại vẫn nằm trong giới hạn bền của hợp kim nhôm được lựa chọn, đảm bảo an toàn thiết kế (hình 6 và hình 7).



Hình 6. Hiển thị ứng suất trên piston



Hình 7. Hiển thị chuyển vị trên piston

Kết quả nghiên cứu chứng minh rằng mô hình thiết kế đáp ứng yêu cầu độ bền, các giá trị ứng suất và biến dạng đều trong giới hạn an toàn. Việc ứng dụng CATIA giúp trực quan hóa quá trình làm việc, xác định các vị trí nguy hiểm để cải tiến thiết kế nếu cần. Điều này có ý nghĩa lớn trong việc giảm thiểu thời gian thử nghiệm, tiết kiệm chi phí chế tạo mẫu, đồng thời nâng cao hiệu quả đào tạo và nghiên cứu trong lĩnh vực cơ khí [2, 3].

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế, mô phỏng và kiểm bền piston động cơ xăng 1NZ-FE bằng CATIA V5-R21. Mô hình 3D được xây dựng chính xác, kết quả phân tích FEA cho thấy ứng suất tập trung tại lỗ chốt và rãnh xéc-măng nhưng vẫn trong giới hạn bền của vật liệu, đảm bảo an toàn làm việc.

Kết quả chứng minh CATIA là công cụ hiệu quả trong thiết kế và kiểm nghiệm chi tiết động cơ, giúp giảm chi phí, thời gian thử nghiệm và tăng độ trực quan. Trong tương lai, nên mở rộng nghiên cứu tối ưu hình dạng piston và áp dụng cho các chi tiết chịu tải khác để nâng cao hiệu quả thiết kế.❖

Ngày nhận bài: **05/9/2025**
Ngày phản biện: **12/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Tất Tiến (2004), "*Thiết kế và tính toán động cơ đốt trong*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
[2]. Nguyễn Hữu Phước (2006), "*Hướng dẫn sử dụng CATIA V5*". NXB. Giao thông Vận tải.
[3]. HarmonySoft (2009), "*Giáo trình CATIA V5*". Phòng Công nghệ Ứng dụng.
[4]. Lê Xuân Phương (2006), "*Nguyên lý động cơ đốt trong*". NXB. Giao thông Vận tải, Hà Nội.
[5]. Nguyễn Tấn Dũng (2010), "*Sức bền vật liệu – Ứng dụng trong thiết kế cơ khí*". NXB. Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.
[6]. Quách Hoàng Anh (2021), "*Nghiên cứu thiết kế, kiểm nghiệm và mô phỏng piston trên ứng dụng phần mềm Catia*". Khóa luận tốt nghiệp.

NGHIÊN CỨU CÔNG NGHỆ DỆT KIM 3D LIỀN MẢNH, ỨNG DỤNG VÀ XU HƯỚNG PHÁT TRIỂN TRONG SẢN XUẤT TRANG PHỤC THỂ THAO

RESEARCH ON 3D SEAMLESS KNITTING TECHNOLOGY, APPLICATIONS AND DEVELOPMENT TRENDS IN SPORTSWEAR PRODUCTION

Trần Nguyên Lân
Khoa Dệt may và Thời trang, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp
Email: tnlan@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày tổng quan về công nghệ dệt kim 3D liền mảnh (seamless knitting) và các ứng dụng trong sản xuất trang phục thể thao. Nội dung tập trung phân tích nguyên lý công nghệ, đặc tính cấu trúc vải, ưu nhược điểm so với phương pháp may truyền thống, đồng thời tổng hợp các nghiên cứu tiêu biểu trên thế giới. Công nghệ seamless knitting cho phép tạo ra sản phẩm không đường may với độ co giãn đa chiều, giảm phế liệu và cải thiện đáng kể sự thoải mái, thẩm mỹ cũng như tính bền vững của sản phẩm. Bên cạnh đó, bài báo cũng thảo luận về xu hướng tích hợp sợi chức năng (kháng khuẩn, điều hòa nhiệt, dẫn điện) nhằm đáp ứng nhu cầu ngày càng cao của thị trường thể thao hiện đại. Kết quả tổng quan cho thấy công nghệ dệt kim 3D liền mảnh có tiềm năng lớn trong phát triển sản phẩm thể thao chất lượng cao và thân thiện môi trường, nhưng vẫn đối mặt với thách thức về chi phí đầu tư và nguồn nhân lực kỹ thuật.

Từ khóa: *Dệt kim 3D liền mảnh; Seamless knitting; Trang phục thể thao; Công nghệ dệt may; Phát triển bền vững.*

ABSTRACT

This article presents an overview of seamless 3D knitting technology and its applications in the production of sportswear. The content focuses on analyzing the technological principles, fabric structural characteristics, advantages and disadvantages compared to traditional sewing methods, and summarizes typical studies in the world. Seamless knitting technology allows the creation of seamless products with multi-dimensional stretch, reducing waste and significantly improving the comfort, aesthetics and sustainability of the product. In addition, the article also discusses the trend of integrating functional fibers (antibacterial, thermoregulating, conductive) to meet the increasing demands of the modern sports market. The overview results show that seamless 3D knitting technology has great potential in developing high-quality and environmentally friendly sports products, but still faces challenges in investment costs and technical human resources.

Keywords: *3D seamless knitting; Sportswear; Textile technology; Sustainable development.*

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Ngành công nghiệp dệt may toàn cầu đang trải qua những thay đổi sâu sắc, đặc biệt với sự phát triển của các công nghệ sản xuất tiên tiến hướng đến mục tiêu bền vững và nâng cao trải nghiệm người mặc. Trong đó, công nghệ dệt kim 3D liền mảnh (seamless knitting) đã trở thành một xu hướng nổi bật nhờ khả năng tạo ra các sản phẩm không có đường may, co giãn đa chiều, giảm phế liệu và nâng cao thẩm mỹ [1], [2].

Khác với phương pháp may truyền thống, trong đó các mảnh vải được cắt và ghép lại, seamless knitting sử dụng máy dệt kim tròn hoặc máy dệt nguyên khối để đan trực tiếp sản phẩm hoàn chỉnh hoặc gần hoàn chỉnh. Kỹ thuật này không chỉ giảm thời gian và công đoạn sản xuất, mà còn mang lại sự thoải mái vượt trội cho người mặc, nhờ hạn chế ma sát và chà xát do đường may [3], [4].

Thị trường trang phục thể thao ngày càng đòi hỏi cao về tính năng: thoáng khí, nhẹ, co giãn, bền và mang lại sự tự do trong vận động. Công nghệ seamless đáp ứng tốt các yêu cầu này nhờ khả năng thiết kế body-mapping (phân vùng co giãn và thông thoáng khác nhau trên cùng một sản phẩm), kết hợp các sợi chức năng như elastane, sợi kháng khuẩn, sợi hút ẩm nhanh [5]. Nhiều thương hiệu lớn như Nike, Adidas, Lululemon đã ứng dụng rộng rãi seamless knitting trong các dòng sản phẩm áo thể thao, quần yoga và đồ lót hiệu năng cao [6].

Bên cạnh các lợi ích vượt trội, seamless knitting vẫn đối mặt với một số thách thức như: chi phí đầu tư máy móc cao, yêu cầu kỹ thuật viên chuyên môn sâu, và sự hạn chế trong việc thay đổi kiểu dáng đối với các sản phẩm phức tạp [7]. Tuy nhiên, với xu hướng sản xuất xanh và giảm thiểu chất thải trong ngành thời trang, công nghệ dệt kim 3D liền mảnh được kỳ vọng sẽ tiếp tục mở rộng và đóng vai trò quan trọng trong chiến lược phát triển bền vững của ngành công nghiệp dệt may [8], [9].

Do đó, việc nghiên cứu và tổng hợp các ứng dụng của seamless knitting trong sản xuất trang phục thể thao là cần thiết, nhằm cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho các doanh nghiệp và nhà nghiên cứu trong quá trình đổi mới công nghệ và phát triển sản phẩm.

2. NGUYÊN LÝ VÀ ỨNG DỤNG TRONG TRANG PHỤC THỂ THAO

2.1. Nguyên lý và công nghệ dệt kim liền mảnh

Công nghệ seamless knitting vận hành trên cơ sở lập trình bằng CAD/CAM để thiết kế mẫu dệt. Máy dệt có khả năng dệt liền các bộ phận của sản phẩm như thân, tay áo, viền eo theo hình dạng 3D [4]. Kỹ thuật này thực hiện thường dựa trên 4 bước, đó chính là thiết kế, dệt kim, kết hợp và hoàn thiện.

• Thiết kế: Đầu tiên các sản phẩm sẽ được thiết kế trên máy tính. Sau khi hoàn thành những thông số về kích thước cũng như chi tiết cần thiết, trang phục sẽ chuyển sang máy dệt để bắt đầu quá trình sản xuất.

• Dệt kim hoặc dệt vòng: Các sản phẩm may mặc seamless thường được sản xuất dựa trên kỹ thuật dệt kim hoặc dệt vòng. Những máy này sẽ tạo ra nhiều mảng vải có kích thước và chi tiết được chỉ định sẵn trong bước thiết kế.

• Kết hợp: Các mảng vải sau khi sản xuất sẽ được kết hợp với nhau để tạo ra trang phục ☞

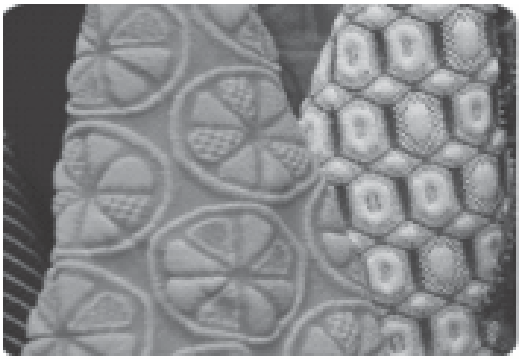
hoàn chỉnh. Việc kết hợp có thể thực hiện bằng nhiều phương pháp khác nhau như kỹ thuật ép và liên kết hay kỹ thuật cắt và xếp chồng.

• Hoàn thiện: Cuối cùng bằng cách cắt và may các chi tiết như cổ, tay áo hoặc khóa kéo mà sản phẩm sẽ được hoàn thiện.

Các nhà sản xuất lớn như Shima Seiki hay Santoni đã phát triển nhiều dòng máy chuyên dụng. Công nghệ này cho phép tích hợp nhiều loại sợi với chức năng khác nhau trong cùng sản phẩm như co giãn, kháng khuẩn, hút ẩm nhanh [5]. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh tính ưu việt của seamless knitting. Nayak và cộng sự (2017) đã phát triển cấu trúc dệt 3D có khả năng hấp thụ lực, phù hợp cho trang phục bảo hộ thể thao [3]. Zhang và cộng sự (2023) phân tích khả năng truyền sáng của vải dệt weft-knit, cho thấy độ co giãn và độ che phủ có thể điều chỉnh được thông qua cấu trúc dệt [5].

2.2. Ứng dụng trong trang phục thể thao

Trang phục thể thao đòi hỏi cao về tính năng: co giãn, thoáng khí, bền, nhẹ và thẩm mỹ. Seamless knitting đáp ứng những yêu cầu này nhờ khả năng tạo các vùng body-mapping trên cùng sản phẩm: vùng cần thoáng khí (mesh), vùng cần nén ép (compression) và vùng cần co giãn linh hoạt [6].



Hình 1.1. Chi tiết cấu trúc vải 3D



Hình 1.2. Thiết kế áo khoác thể thao không đường may, phối màu trực tiếp trên máy dệt

Hình 1.1 mô tả cấu trúc sợi spacer 3D giúp tăng độ đàn hồi và khả năng đệm, ứng dụng trong đồ thể thao và đồ bảo hộ. Hình 1.2 thể hiện thiết kế áo khoác thể thao không đường may, phối màu trực tiếp trên máy dệt, thể hiện tính linh hoạt của công nghệ seamless. Các thương hiệu quốc tế như Nike, Adidas, Lululemon đã áp dụng rộng rãi seamless knitting trong quần áo thể thao, quần yoga, đồ lót thể thao [4], [6].

Karl Mayer Group (2023) đã phát triển công nghệ warp knitting cho sản phẩm thể thao 3D seamless, cho phép sản xuất các váy, áo thể thao với tính năng khô nhanh, thoáng khí [6]. ITA Aachen (2021) cũng ghi nhận khả năng sản xuất áo ngực thể thao bằng công nghệ 3D-knit trên máy dệt tròn lớn chỉ trong vài phút [7]. Điều này mở ra tiềm năng sản xuất nhanh, ít phế liệu và thân thiện môi trường.

3. ƯU ĐIỂM, THÁCH THỨC VÀ XU HƯỚNG PHÁT TRIỂN

3.1. Ưu điểm

+ Không có hoặc rất ít đường may – Tăng sự thoải mái và thẩm mỹ:

Seamless knitting loại bỏ hầu hết các đường nối, nhờ đó hạn chế cọ xát và giảm nguy cơ kích ứng da khi vận động, đặc biệt trong

các môn thể thao cường độ cao. Việc không có đường may cũng giúp sản phẩm có bề mặt liền lạc, tạo nên vẻ ngoài thanh thoát, hiện đại và thời trang hơn so với các sản phẩm may truyền thống [1], [2].

+ Thiết kế thông minh (Body-Mapping) – Tăng hiệu năng vận động:

Công nghệ seamless cho phép dệt trực tiếp các vùng chức năng khác nhau trên cùng một sản phẩm: vùng thoáng khí (mesh) tại các khu vực đổ mồ hôi nhiều; vùng nén ép (compression) để hỗ trợ cơ bắp; vùng đàn hồi để tăng độ co giãn khi vận động [3], [6]. Các thương hiệu như Nike, Adidas đã ứng dụng để tạo ra trang phục giúp vận động viên tăng hiệu suất, giảm mệt mỏi cơ và hồi phục nhanh hơn.

+ Giảm phế liệu và thân thiện môi trường – Hướng đến phát triển bền vững:

So với may truyền thống (phế liệu từ vải cắt bỏ có thể lên tới 15-30%), seamless knitting chỉ phát sinh <5% phế liệu vì sản phẩm được dệt theo hình dáng gần như hoàn chỉnh [4], [8]. Giảm tiêu hao nguyên liệu đồng nghĩa với giảm tác động môi trường, phù hợp xu hướng thời trang xanh và bền vững.

+ Tích hợp nhiều loại sợi chức năng – Tăng tính tiện ích:

Có thể kết hợp sợi co giãn (elastane), sợi kháng khuẩn, hút ẩm nhanh, chống tia UV hoặc sợi dẫn điện cho smart textiles [5], [9]. Điều này giúp sản phẩm không chỉ phục vụ nhu cầu thẩm mỹ mà còn mang lại giá trị gia tăng về sức khỏe và tiện nghi cho người dùng.

+ Tăng năng suất sản xuất – Tiết kiệm thời gian và nhân lực: Quy trình seamless knitting rút ngắn công đoạn: thiết kế trên CAD/CAM → dệt trực tiếp → hoàn thiện nhẹ, bỏ qua nhiều bước cắt may thủ công [4].

Một số nghiên cứu cho thấy có thể tiết kiệm 20-30% thời gian sản xuất so với phương pháp truyền thống [7].

Công nghệ seamless knitting không chỉ mang lại sự thoải mái, tính thẩm mỹ, và hiệu suất vận động cao hơn cho người mặc mà còn góp phần bảo vệ môi trường và tối ưu chi phí sản xuất. Đây là lý do tại sao seamless knitting đang trở thành xu hướng tất yếu trong ngành thời trang thể thao và phát triển bền vững toàn cầu.

3.2. Xu hướng và tiềm năng phát triển

Với xu hướng sản xuất xanh và phát triển bền vững, seamless knitting đang trở thành một giải pháp trọng tâm trong ngành dệt may toàn cầu [8], [9].

Textile Technicals (2022) chỉ ra rằng công nghệ 3D knitting giúp tiết kiệm nguyên liệu và phù hợp với các yêu cầu thời trang bền vững [8].

Pavlos (2020) nhấn mạnh sự đổi mới trong seamless knitting có thể đáp ứng nhu cầu thời trang thân thiện môi trường và tích hợp công nghệ thông minh [9].



Hình 1.3. Ưu điểm của seamless knitting



Hình 1.4. Xu hướng và tiềm năng phát triển của seamless knitting

Công nghệ dệt kim 3D liền mảnh (seamless knitting) đang trở thành một xu thế tất yếu trong ngành công nghiệp dệt may nhờ đáp ứng nhu cầu phát triển bền vững, cá nhân hóa và thời trang thông minh. Trên thế giới, nhiều thương hiệu lớn đã áp dụng công nghệ này để tăng hiệu quả sản xuất, giảm phế liệu và tích hợp sợi chức năng như kháng khuẩn, chống UV, dẫn điện cho smart textiles. Xu hướng nổi bật gồm:

+ Sản xuất xanh: Sử dụng vật liệu tái chế, giảm phát thải CO_2 và chất thải dệt.

+ Tích hợp công nghệ thông minh: Kết hợp cảm biến theo dõi sức khỏe và hiệu suất vận động.

+ Thiết kế cá nhân hóa: Sản xuất theo đơn đặt hàng (on-demand), giảm tồn kho và đáp ứng xu hướng thời trang nhanh.

Các nghiên cứu quốc tế cho thấy seamless knitting có tiềm năng mở rộng mạnh mẽ trong tương lai nhờ lợi thế về thẩm mỹ, công năng và khả năng thân thiện môi trường. Tuy nhiên, để khai thác hiệu quả, các doanh nghiệp cần đầu tư máy móc hiện đại và đào tạo nhân lực kỹ thuật cao.

4. KẾT LUẬN

Công nghệ dệt kim 3D liền mảnh (seamless knitting) mang lại nhiều lợi thế nổi bật cho ngành trang phục thể thao, đặc biệt về tính thẩm mỹ, sự thoải mái và hiệu quả sản xuất.

Kỹ thuật này giúp tạo các vùng chức năng ngay trên cùng sản phẩm, loại bỏ hầu hết đường may, đồng thời giảm đáng kể phế liệu và thời gian sản xuất.

Xu hướng tích hợp sợi chức năng (kháng khuẩn, chống UV, dẫn điện) cùng định hướng sản xuất xanh và cá nhân hóa đang mở ra tiềm năng phát triển lớn cho công nghệ này.

Tuy còn thách thức về chi phí đầu tư và nhân lực kỹ thuật, seamless knitting vẫn được dự báo sẽ đóng vai trò quan trọng trong chiến lược đổi mới và phát triển bền vững của ngành dệt may hiện đại.❖

Ngày nhận bài: **05/9/2025**
Ngày phản biện: **12/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Spinelli, R. (2022), "*Seamless Knitting Technology: An Overview*". Textile Research Journal.
[2]. Matsumoto, S. (2021), "*3D Knitting for Sportswear"*. Journal of Fashion Technology.
[3]. Nayak, R., & Padhye, R. (2017), "*Design of 3D knitted structures for impact absorption in sportswear*". KnE Engineering 2(2):127.
[4]. Sansan Sports (2025), "*Seamless Knitting Technology: The Future of Performance Apparel*", April 15.
[5]. Zhang, J. et al. (2023), "*Light transmission of weft-knitted fabrics for seamless garments*". Textile Research Journal.
[6]. Karl Mayer Group (2023), "*Warp knitting for 3D seamless sportswear*". Knitting Trade Journal.
[7]. ITA Aachen (2021), "*3D-Knit technology on large circular machines for functional sportswear*".
[8]. Textile Technicals (2022), "*Advancements in 3D knitting in textiles*".
[9]. Pavlos, D. (2020), "*Innovations in seamless knitting for sustainable fashion*".

KHỬ NHIỄU TRONG KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM AN TOÀN CỦA NẮP CA-PÔ Ô TÔ ĐỐI VỚI ĐẦU NGƯỜI ĐI BỘ

NOISE REDUCTION IN HEADFORM IMPACTOR TO BONNET TOP TEST

Ngô Văn Lực[1,*], Nguyễn Thị Loan[2], Nguyễn Văn Hải[1], Đầu Văn Kiên[1], Hà Trí Hùng[1]
[1]Khoa Cơ khí - Cơ điện tử, Trường Kỹ thuật Phenikaa, Đại học Phenikaa
[2]Khoa Khoa học Cơ bản, Đại học Phenikaa
**Email: luc.ngovan@phenikaa-uni.edu.vn*

TÓM TẮT

Thử nghiệm an toàn của nắp ca-pô ô tô đối với đầu người đi bộ (headform impactor to bonnet top test) là một trong những thử nghiệm rất quan trọng và bắt buộc phải thực hiện trong quá trình kiểm định an toàn của xe ô tô trước khi bán ra thị trường các nước thuộc Liên minh Châu Âu. Thử nghiệm này được đề xuất bởi Ủy ban an toàn Châu Âu năm 1998 và được cập nhật vào năm 2002. Một số nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, thử nghiệm này tiềm ẩn khả năng gây ra sai số cho kết quả thử nghiệm. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu nào đưa ra phương pháp để loại bỏ những khả năng gây ra sai số cho thử nghiệm này. Trên cơ sở phân tích nguyên nhân gây ra sai số, nghiên cứu này sẽ đề xuất một giải pháp để loại bỏ sai số trong kết quả thử nghiệm an toàn của nắp ca-pô ô tô với đầu người đi bộ. Nghiên cứu này rất có ý nghĩa trong khoa học và thực tiễn, giúp tăng độ tin cậy của kết quả thử nghiệm trong nghiên cứu và kết luận chính xác trong kiểm định an toàn của ô tô với người đi bộ.

Từ khóa: *Headform impactor; Độ tin cậy thử nghiệm nắp ca-pô; An toàn của nắp ca-pô tô tô; Chấn thương đầu người đi bộ; Nâng cao độ tin cậy.*

ABSTRACT

The pedestrian headform to bonnet top test is one of the most important and mandatory safety tests that must be performed during automobile certification before vehicles are marketed in European Union countries. This test procedure was proposed by the European Safety Commission in 1998 and updated in 2002. Previous studies have indicated that this test may lead to potential errors in the test results. However, no previous study has proposed a method to eliminate the possible sources of such errors. Based on an analysis of the causes of error, this study proposes a solution to eliminate errors in pedestrian headform impactor to bonnet top tests. This research is highly significant both scientifically and practically, as it helps improve the reliability of test results in automotive research and certification.

Keywords: *Headform impactor; Bonnet top test reliability; Automobile bonnet safety; Pedestrian head injury; Increase reliability.*

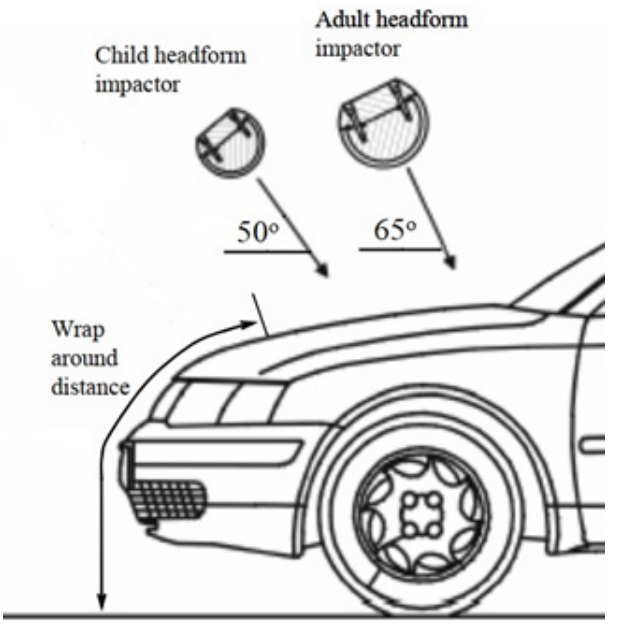
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kể từ năm 2003, theo quy định của Liên minh Châu Âu (EU) tất cả các xe ô tô bán trên thị trường EU đều phải qua kiểm định an toàn đối với người đi bộ khi chạm [1]. Một trong những thử nghiệm bắt buộc phải thực hiện trong quá trình kiểm định đó là thử nghiệm an toàn của nắp ca-pô ô tô đối với đầu người đi bộ. Thử nghiệm này được đề xuất bởi Ủy ban an toàn Châu Âu và được mô tả tóm tắt như trên Hình 1 [2]. Theo đó, có hai mô hình riêng phần đầu (headform) người đi bộ được sử dụng là mô hình đầu người lớn và mô hình đầu trẻ em. Hai mô hình này có cấu tạo giống nhau nhưng khác nhau về kích thước và khối lượng. Mô hình đầu trẻ em (child headform impactor) được sử dụng để kiểm định ở vùng trước nắp ca-pô, khu vực có khoảng cách vòng (wrap around distance) nhỏ hơn 1.500 mm. Mô hình đầu người lớn (adult headform impactor) được sử dụng để kiểm định ở vùng sau của nắp ca-pô, khu vực có khoảng cách vòng từ 1.500 mm đến 2.100 mm. Các mô hình này được sử dụng để bắn vào vị trí cần được thử nghiệm với vận tốc ban đầu là 40 Km/h. Mô hình đầu trẻ em và mô hình đầu người lớn được bắn theo phương nghiêng các góc lần lượt là 50° và 65° so với phương ngang. Tại điểm trọng tâm của các mô hình đầu có một gia tốc kế để đo gia tốc điểm trọng tâm của các mô hình riêng phần đầu trong quá trình va chạm. Mức độ an toàn đối với đầu người đi bộ được đánh giá thông qua chỉ số HIC (Head Injury Criterion), được tính căn cứ vào đặc điểm biến thiên của giá trị gia tốc tổng hợp điểm trọng tâm các mô hình riêng phần đầu thu được từ các gia tốc kế. Công thức tính toán giá trị HIC như sau:

$$\mathrm{HIC} = Max\left[\frac{1}{T_2 - T_1}\int_{T_1}^{T_2} \mathrm{AdT}\right]^{2.5} (\mathrm{T}_2 - T_1)$$

Với điều kiện:

$\Delta T = T_2 - T_1 \leq 15$ (ms = mili giây)



Hình 1. Mô tả quy trình thử nghiệm an toàn của nắp ca-pô đối với đầu người đi bộ [2]

Trong đó, A là gia tốc của điểm trọng tâm các mô hình riêng phần đầu người đi bộ trong quá trình va chạm, đơn vị tính là [G] (1G = 9,81m/s²). T_1 và T_2 là hai thời điểm bất kỳ trong quá trình va chạm và T_1 nhỏ hơn T_2. Giá trị HIC thu được càng lớn thì mức độ nguy hiểm đối với đầu người đi bộ càng cao. Giá trị HIC nhỏ hơn 1000 được coi là an toàn, chỉ có thể gây ra chấn thương nhẹ như choáng váng. Giá trị HIC ở mức từ 1000 đến 2000 là mức có thể gây ra chấn thương nặng như nứt hộp sọ, vỡ hộp sọ hay chấn thương sọ não. Giá trị HIC ở mức lớn hơn 2000 là mức độ nguy hiểm, có thể gây tử vong.

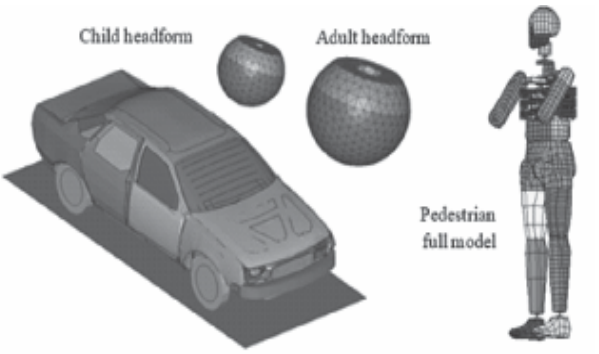
Mức độ tin cậy của thử nghiệm này là rất quan trọng vì nó ảnh hưởng đến một mẫu xe có thể được cấp phép hoặc không được cấp phép bán trên thị trường EU cũng như một số nước phát triển khác. Tuy nhiên, một số nghiên

cứu gần đây của nhóm tác giả đã chỉ ra rằng, thử nghiệm này tiềm ẩn nhiều sai số. Do đó, cần thiết phải có một giải pháp để khử sai số cho những thử nghiệm này. Trên cơ sở phân tích nguyên nhân gây ra sai số, nghiên cứu này sẽ đưa ra một số giải pháp để khử nhiễu làm tăng độ tin cậy cho các thử nghiệm này. Kết quả của nghiên cứu này không chỉ có ý nghĩa về mặt khoa học mà rất cần thiết đối với thực tiễn. Góp phần vào việc đưa ra quyết định liên quan đến kiểm định an toàn của ô tô với người đi bộ một cách chính xác.

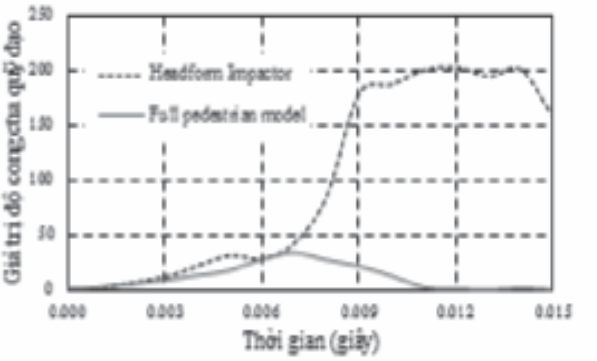
2. PHÂN TÍCH VÀ ĐỀ XUẤT PHƯƠNG ÁN

2.1. Phân tích nguyên nhân gây ra sai số

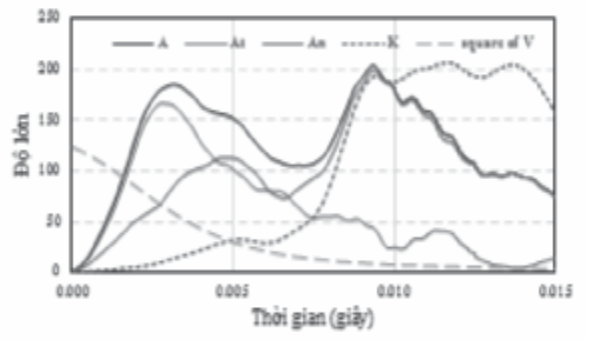
Các nghiên cứu trước đây của nhóm tác giả đã chỉ ra rằng, kết quả thử nghiệm tiềm ẩn nhiều khả năng chứa sai số [3, 4]. Xuất phát từ công thức tính giá trị HIC như đã trình bày ở trên, thành phần quan trọng nhất trong công thức này là gia tốc tổng hợp. Trên cơ sở phân tích, so sánh sự biến thiên các thành phần cấu thành gia tốc tổng hợp khi thử nghiệm với mô hình người đi bộ đầy đủ [5] và mô hình riêng phần đầu [6] như trong thử nghiệm an toàn của nắp ca-pô với đầu người đi bộ. Trong các nghiên cứu trước đây, nhóm tác giả đã chỉ ra rằng các thành phần như gia tốc tiếp tuyến, vận tốc tổng hợp thu được khi mô phỏng va chạm với hai mô hình có đặc điểm biến thiên tương đối khác nhau. Tuy nhiên, thành phần độ cong của quỹ đạo thì có giai đoạn biến thiên rất khác nhau, như chỉ ra trên Hình 3. Sự khác nhau nằm ở giai đoạn cuối của quá trình va chạm, trong khi thử nghiệm với mô hình đầu đủ độ cong quỹ đạo giảm xuống giá trị rất nhỏ gần như bằng không thì độ cong của quỹ đạo thử nghiệm với mô hình riêng phần đầu lại tăng lên rất cao. Sự tăng lên của độ cong quỹ đạo này là nguyên nhân gây ra đỉnh thứ hai của gia tốc tổng hợp như thể hiện trên Hình 4. Với việc gia tốc tổng hợp xuất hiện đỉnh thứ hai ngay cạnh đỉnh thứ nhất sẽ làm cho khoảng thời gian tính giá trị HIC rộng ra và chứa cả phần nhiễu trong kết quả tính giá trị HIC.



Hình 2. Mô hình sử dụng để mô phỏng va chạm giữa ô tô và đầu người đi bộ [5, 6]



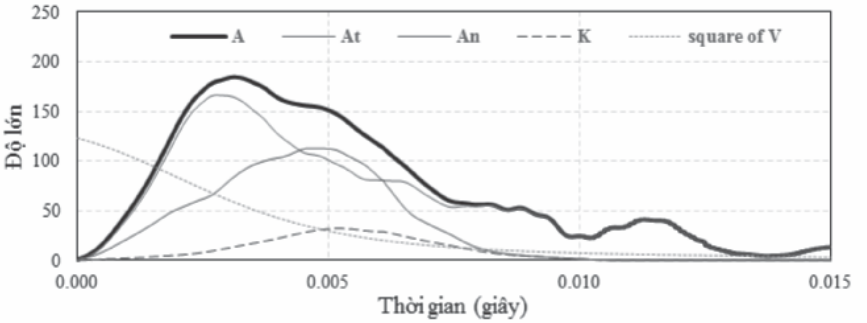
Hình 3. Đặc điểm biến thiên của độ cong quỹ đạo điểm trọng tâm phần đầu



Hình 4. Ảnh hưởng của độ cong quỹ đạo đến gia tốc tổng hợp (A)

2.2. Phương án khử nhiễu trong kết quả thử nghiệm

Như trong phân tích trên, đỉnh thứ hai của gia tốc tổng hợp như biểu diễn trên Hình 4 là do sự tăng lên của độ cong quỹ đạo. Với gia tốc tổng hợp như vậy, áp dụng công thức tính giá trị HIC ở trên sẽ tính được giá trị HIC là 3034 với T_1 = 1,15 ms và T_2 = 14,6 ms. Với khoảng thời gian tính giá trị HIC như vậy thì đỉnh thứ hai của gia tốc cũng nằm trong vùng tính toán, hay nói cách khác là nhiễu có nằm trong kết quả thử nghiệm. Để loại bỏ phần nhiễu trong kết quả tính toán giá trị HIC, nghiên cứu này đề xuất điều chỉnh sự biến thiên của độ cong quỹ đạo trong đoạn nhiễu đồng dạng với sự biến thiên độ cong quỹ đạo của điểm trọng tâm phần đầu người đi bộ đầy đủ khi va chạm với nắp ca-pô ô tô. Như biểu diễn trên Hình 3, độ cong quỹ đạo của điểm trọng tâm phần đầu của mô hình người đi bộ đầy đủ chỉ có một đỉnh duy nhất và gần như đối xứng, khi hết va chạm độ cong của quỹ đạo gần như bằng không. Độ cong quỹ đạo của điểm trọng tâm mô hình riêng phần đầu cũng đạt đến cực đại và sau đó có xu hướng giảm xuống nhưng sau đó lại tăng lên đột ngột. Để khử nhiễu, phần tăng lên đột biến của độ cong quỹ đạo sẽ bỏ đi và lấy dữ liệu đối xứng qua đỉnh thứ nhất. Hình 5 mô tả sự biến thiên của độ cong quỹ đạo và gia tốc tổng hợp cũng như các thành phần của gia tốc tổng hợp sau khi khử nhiễu. Khi điều chỉnh độ cong của quỹ đạo thì đỉnh thứ hai của gia tốc tổng hợp không còn nữa.



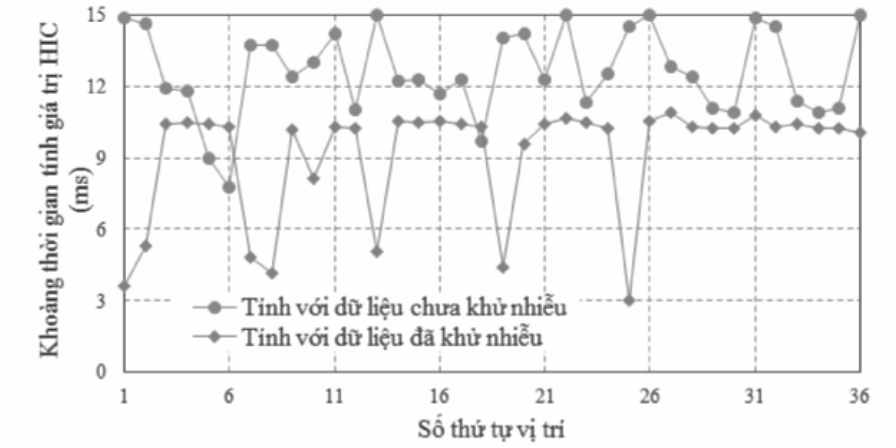
Hình 5. Đặc điểm biến thiên của các thành phần gia tốc sau khử nhiễu

Khi tính giá trị HIC với gia tốc tổng hợp sau khi khử nhiễu thì được giá trị là 1362 với T_1 = 1,5 ms và T_2 = 6,7 ms. Như vậy, khoảng tính giá trị HIC đã nằm gọn trong khoảng thời gian va chạm và không còn chứa nhiễu nữa và giá trị HIC cũng giảm đi rất nhiều.

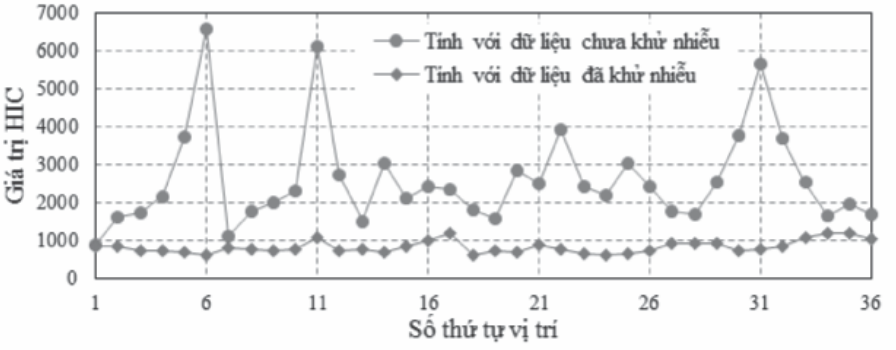
3. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM VÀ BÀN LUẬN

Để kiểm nghiệm phương pháp đề xuất, nghiên cứu này thực hiện thử nghiệm và khử nhiễu cho 36 điểm phân bố đều trên bề mặt nắp ca-pô ô tô. Hình 6 so sánh khoảng thời gian tính giá trị HIC với dữ liệu gốc thu được từ thử nghiệm và khoảng thời gian tính giá trị HIC với dữ liệu sau khi đã được khử nhiễu. Kết quả cho thấy, khi tính với dữ liệu gốc khoảng thời gian tính giá trị HIC lớn hơn, đa số xấp xỉ giới hạn 15 ms. Điều này tiềm ẩn nhiều khả năng chứa dữ liệu nhiễu trong kết quả tính toán vì nhiễu thường nằm ở giai đoạn cuối. Khi tính với dữ liệu đã qua khử nhiễu, khoảng thời gian tính giá trị HIC đa số đều giảm xuống và tất cả các điểm đều từ ngưỡng khoảng 10ms trở xuống.

Kết quả này nói lên rằng phần nhiễu tương ứng do sự tăng lên đột biến của độ cong quỹ đạo sau giai đoạn đã bị loại ra khỏi kết quả tính toán giá trị HIC. Hình 7 so sánh kết quả giá trị HIC tính với dữ liệu gốc thu được từ thử nghiệm và tính với dữ liệu sau khi đã được khử nhiễu. Kết quả cho thấy, sau khi khử nhiễu chỉ có một điểm duy nhất giá trị HIC không bị giảm xuống, một vài điểm giảm ít còn hầu hết là giảm nhiều. Kết quả này chứng tỏ một điều, tỷ lệ nhiễu trong các kết quả thử nghiệm là rất lớn và việc khử nhiễu là cần thiết.



Hình 6. So sánh khoảng thời gian tính giá trị HIC với dữ liệu gốc và với dữ liệu đã được khử nhiễu



Hình 7. So sánh giá trị HIC tính với dữ liệu gốc và dữ liệu đã được khử nhiễu

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, độ cong của quỹ đạo là nguyên nhân gây ra sai số trong kết quả thử nghiệm an toàn của nắp ca-pô ô tô đối với đầu người đi bộ. Nghiên cứu này đã đưa ra phương pháp khử nhiễu bằng cách đồng dạng hóa sự biến thiên độ cong quỹ đạo điểm trọng tâm mô hình riêng phần đầu với sự biến thiên độ cong quỹ đạo điểm trọng tâm phần đầu của mô hình người đi bộ đầy đủ. Kết quả cho thấy, sau khi khử phần nhiễu thì kết khoảng tính giá trị HIC đã thu hẹp lại và không bao gồm phần chứa nhiễu do sự biến thiên bất thường của độ cong quỹ đạo ở giai đoạn sau của va chạm. Thử nghiệm với 36 vị trí khác nhau trên bề mặt nắp ca-pô cũng cho kết quả khoảng thời gian tính giá trị HIC đã thu hẹp lại, ☞

không bao gồm phần biến thiên bất thường của độ cong của quỹ đạo điểm trọng tâm mô hình riêng phần đầu. Giá trị HIC thu được khi tính với dữ liệu đã khử nhiễu cũng giảm rất mạnh. Tính cho 36 vị trí thử nghiệm chỉ có 01 vị trí giá trị HIC không đổi, một số vị trí giảm nhẹ còn đa số giảm rất nhiều. Kết quả này cho thấy, nhiễu trong kết quả thử nghiệm an toàn của nắp ca-pô ô tô đối với đầu người đi bộ là rất lớn và việc khử nhiễu trong kết quả thử nghiệm này là rất quan trọng. Qua đó sẽ góp phần làm kết quả thử nghiệm được tin cậy hơn, những kết luận trong kiểm định an toàn của ô tô đối với người đi bộ chính xác và thuyết phục hơn.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Phenikaa cho đề tài mã số: PU2024-4-A-04.❖

Ngày nhận bài: **10/9/2025**
Ngày phản biện: **06/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Directive 2003/102/EC of the European Parliament and of the Council of 17 November 2003.

[2]. EEVC/WG 17 Report (1998, updated 2002), "*Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars*". European Enhanced Vehicle-safety Committee.

[3]. Van-Luc Ngo (2022), "*Analysis of Headform Impactor Kinematics during the Collision Process*". Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp 389-395.

[4]. Van-Luc Ngo; Ngoc-An Tran; Van-Hai Nguyen (2024), "*Analysis of pedestrian head kinematics during impact to car process using a full deformable pedestrian model*". Lecture Notes in Mechanical Engineering, Volume, pp219-225.

[5]. Tso-Liang Teng and Trung-Kien Le (2009), "*Development and validation of a pedestrian deformable finite element model*". Journal of Mechanical Science and Technology, 23, 2268-2276.

[6]. Teng, T. L., and Nguyen, T. H. (2008), "*Development and Validation of FE Models of Impactor for Pedestrian Testing*". Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.22, No.9, 1660-1667.

ỨNG DỤNG ROBOT TRONG VIỆC VẬN HÀNH VÀ BẢO TRÌ HỆ THỐNG TỦ PHÂN PHỐI ĐIỆN

ROBOTIC APPLICATION FOR OPERATION AND MAINTENANCE OF ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS

Nguyễn Nhựt Duy, Dương Thị Vân Anh, Nguyễn Anh Dũng, Nguyễn Anh Hào, Phạm Hùng Anh
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 21143044@student.hcmute.edu.vn; anhdtv@hcmute.edu.vn; 21143045@student.hcmute.edu.vn; 21143343@student.hcmute.edu.vn; phamhunganh@cdnpy.edu.vn.

TÓM TẮT

Trong bối cảnh phát triển khoa học kỹ thuật và trí tuệ nhân tạo, việc ứng dụng robot thay thế con người trong nhiều lĩnh vực đang trở thành xu hướng tại các quốc gia phát triển. Bài báo này tập trung nghiên cứu, tính toán và thiết kế mô hình robot có khả năng kiểm tra, giám sát và phát hiện sự cố tại tủ phân phối điện trong nhà máy. Robot được thiết kế với cơ cấu di chuyển trên đường ray, tích hợp camera, cảm biến và xi lanh điện để quan sát, đo đạc khu vực tủ điện. Nghiên cứu xuất phát từ nhu cầu thực tiễn trong doanh nghiệp, nhằm nâng cao an toàn lao động, giảm rủi ro cho con người và cải thiện hiệu quả công tác bảo trì hệ thống phân phối điện công nghiệp.

Từ khóa: *Robot; Robot dẫn hướng theo ray; Vận hành và bảo trì; Tủ điện phân phối; Tự động hóa công nghiệp; Phát hiện sự cố.*

ABSTRACT

With the rapid advancement of science, technology, and artificial intelligence, the deployment of robots in industrial applications has become an emerging trend. This paper presents the conceptual design of a rail-guided robotic system integrated with a camera, sensors, and an electric actuator for monitoring, measurement, and fault detection in electrical distribution cabinets within manufacturing facilities. The proposed approach addresses practical industrial demands by enhancing workplace safety, mitigating human risks, and improving the efficiency and reliability of electrical maintenance operations.

Keywords: *Robotics; Rail-guided robot; Operation and maintenance; Electrical distribution cabinet; Industrial automation; Fault detection.*

❖ GIỚI THIỆU

Ở các nước phát triển, robot được sử dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực như trong sản xuất, y tế, dịch vụ. Góp phần đem lại nhiều lợi ích to lớn cho đời sống con người. Tại Việt Nam, việc phát triển robot vẫn còn mới mẻ và chưa phát triển mạnh. Ngày nay, tại các nhà máy công nghiệp lớn không ngừng được mở rộng và đòi hỏi các thiết bị, máy móc phải được vận hành liên tục và đảm bảo sự ổn định. Cho nên việc giám sát và bảo trì tủ phân phối điện đóng vai trò lớn trong việc vận hành nhà máy. Ngoài ra, các công việc bảo trì tủ điện phân phối thường được kiểm tra trực tiếp từ con người. Điều này gây nguy cơ tiềm ẩn về vấn đề điện giật, cháy nổ ảnh hưởng đến con người. Robot vận hành và bảo trì tủ phân phối điện ở các nước phát triển đã được sử dụng trong các nhà máy công nghiệp và đem lại hiệu quả cao. Tuy nhiên đối với nước ta thì robot này vẫn chưa được áp dụng nhiều trong các nhà máy. Nắm bắt được xu hướng và tình hình trên, nhóm đã tiến hành nghiên cứu thiết kế mô hình robot vận hành và bảo trì tủ phân phối điện với kết cấu đơn giản và tối ưu chi phí, góp phần phát triển cho ngành công nghiệp nước ta.

(*) Thực trạng và thách thức

Trong các hệ thống điện công nghiệp và tòa nhà, tủ phân phối điện đóng vai trò then chốt trong việc cung cấp và bảo vệ dòng điện. Tuy nhiên, hiện nay việc vận hành và bảo trì vẫn chủ yếu dựa vào con người, tiềm ẩn nhiều rủi ro như điện giật, cháy nổ, hoặc gián đoạn hệ thống [1]. Các sự cố thường gặp bao gồm quá nhiệt tại điểm đấu nối, hỏng hóc thiết bị đóng cắt, và suy giảm hiệu suất do bụi, độ ẩm hoặc lão hóa vật liệu [2].

Một thách thức lớn là việc kiểm tra định kỳ thường mang tính thủ công, tốn nhiều thời gian và khó phát hiện kịp thời các hư hỏng tiềm ẩn [3]. Ngoài ra, xu hướng phụ tải ngày càng tăng, cùng với yêu cầu vận hành liên tục 24/7, khiến công tác bảo trì thủ công trở nên kém hiệu quả và rủi ro cao [4]. Do đó, cần giải pháp tự động hóa việc vận hành nhằm nâng cao độ an toàn, tin cậy và tối ưu chi phí.

(*) Giải pháp và mục tiêu nghiên cứu

Một trong những giải pháp khả thi là ứng dụng robot di động tích hợp hệ thống camera và cảm biến, có khả năng giám sát môi trường và phát hiện bất thường trong tủ điện. Robot có thể thực hiện các nhiệm vụ như đo nhiệt độ – độ ẩm, phát hiện điểm nóng bằng cảm biến hồng ngoại, giám sát tình trạng hoạt động của thiết bị đóng cắt, và cảnh báo sớm sự cố [5].

Mục tiêu nghiên cứu tập trung vào:

- Thiết kế robot giám sát có khả năng vận hành trong môi trường tủ phân phối điện;

- Tích hợp IoT để truyền dữ liệu giám sát theo thời gian thực, phục vụ cho việc phân tích và dự báo hỏng hóc;

- Nâng cao độ chính xác giám sát, giảm thiểu rủi ro cho con người, đồng thời tối ưu hóa chi phí vận hành và bảo trì [6].

1. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

1.1. Thiết kế mô hình và nguyên lý hoạt động

Mô hình có 3 phần chính: thanh ray di chuyển, phần thân trên và phần thân dưới robot. Mô hình được tính toán và thiết kế để đảm bảo robot di chuyển được trên thanh ray mà không

bị rung lắc. Ngoài ra, mô hình được thiết kế phù hợp với chiều cao của các tủ điện trong nhà máy.

Thanh ray có dạng đoạn thẳng được làm bằng hai đoạn sắt ống Ø27mm được liên kết lại với nhau bằng các thanh sắt vuông 10×10mm bằng các mối hàn. Kích thước đường ray 1400×150mm.

Robot di chuyển trên thanh ray nhờ hệ thống bánh xe chữ V, gồm hai bánh chính dẫn động và bốn bánh phụ giữ ổn định. Động cơ bước truyền động qua bánh răng côn và bộ đai đến trục bánh chính, tạo chuyển động chính xác và êm. Thân robot tích hợp cảm biến, camera và còi – đèn cảnh báo để giám sát nhiệt độ - độ ẩm môi trường, các điểm nóng trong tủ điện và phát hiện sự cố.

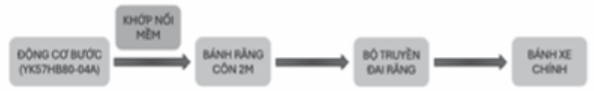


Hình 1. Sơ đồ khối nguyên lý hoạt động của robot

1.2. Các thiết bị chính

1.2.1. Khối động cơ và truyền động

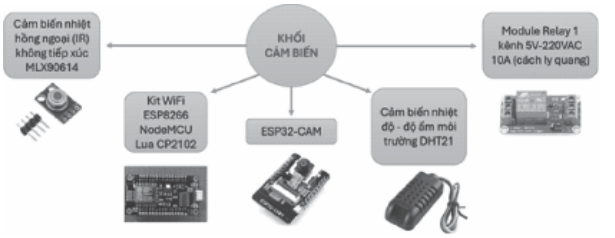
Bộ truyền động của robot gồm: Động cơ bước, bánh răng côn, bộ truyền đai, bánh xe di chuyển chính.



Hình 2. Sơ đồ khối truyền động của robot

1.2.2. Khối cảm biến

Robot thực hiện các tác vụ gồm: Camera giám sát, đo nhiệt độ - độ ẩm môi trường, đo nhiệt độ bên trong tủ.



Hình 3. Các cảm biến trên robot

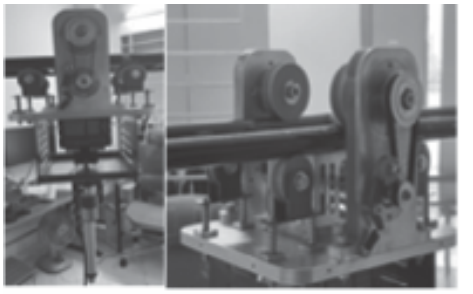
1.2.3. Các thiết bị khác

Ngoài các cơ cấu truyền động và cảm biến, robot còn được tích hợp thêm các thiết bị thực hiện các tác vụ hiển thị, cảnh báo,…



Hình 4. Các tác vụ khác trên robot

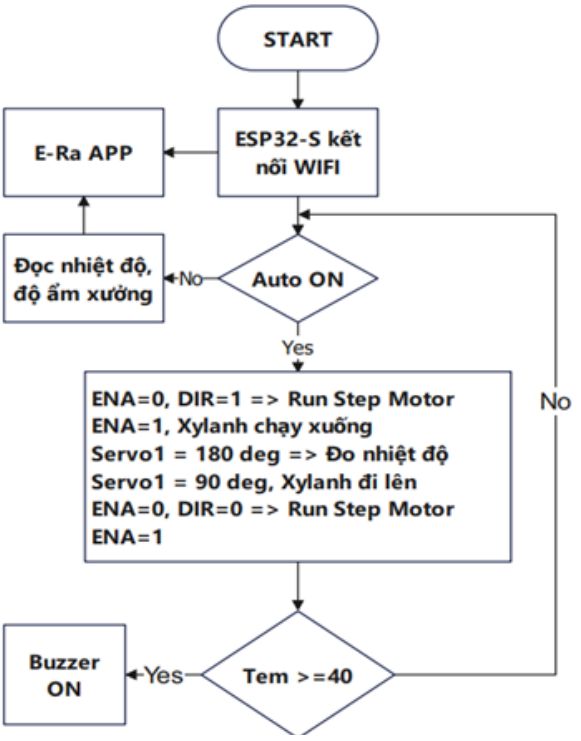
2. MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM



Hình 5. Lắp mô hình cơ khí



Hình 6. Tủ điện và mô hình robot thực tế



Hình 7. Sơ đồ thuật toán

3. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

3.1. Đặc điểm công nghệ

Robot khởi động tại vị trí xuất phát, di chuyển trên đường ray đến các tủ điện đã định sẵn. Tại mỗi vị trí, camera và cảm biến thực hiện quan sát, đo nhiệt độ – độ ẩm và quét hồng ngoại bên trong tủ.

Dữ liệu được truyền về máy chủ để giám sát. Nếu chỉ số vượt ngưỡng an toàn, robot phát cảnh báo bằng còi và đèn; ngược lại, robot tiếp tục di chuyển đến tủ kế tiếp và lặp lại quy trình.

3.2. Liên kết màn hình điều khiển và robot

Robot được điều khiển từ xa thông qua phần mềm E-Ra trên máy chủ từ phòng điều khiển bởi người vận hành hoặc trên điện thoại thông minh có cài đặt phần mềm E-Ra.



Hình 8. Giao diện trên máy chủ vận hành trên laptop và điện thoại

3.3. Thực nghiệm robot

Quá trình thử nghiệm là quá trình kiểm chứng và để đánh giá tính ổn định, độ tin cậy và chế độ làm việc hợp lý robot vận hành. Yếu tố đầu vào, nhóm tác giả xây dựng dựa theo các tình huống mô phỏng sau: cho robot vận hành và mô phỏng đo chỉ số nhiệt độ - độ ẩm môi trường của tủ điện tại phòng PTN CAD/CAM CNC cơ bản 1 của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh với:

- Nhiệt độ phòng: 27°C;

- Nhiệt độ tủ điện: 25°C;

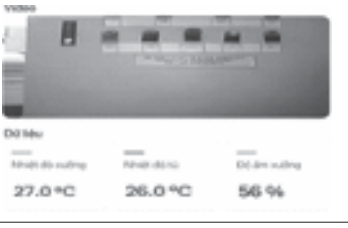
- Độ ẩm xưởng: 56%;

- Khoảng cách lý tưởng đo nhiệt độ của cảm biến theo nhà sản xuất là 15-30cm [8]. Nhóm lựa chọn khoảng cách robot cách mặt tủ 25cm để tiến hành thực nghiệm.

3.4. Kết quả thực nghiệm

Robot dừng lại trước vị trí cần đo kiểm, các cảm biến và camera tiến hành đo, quan sát, thu thập dữ liệu và gửi về máy chủ.

Bảng 1. Tổng hợp kết quả thực nghiệm

Lần kiểm tra	Nhiệt độ xưởng (°C)	Nhiệt độ tủ (°C)	Độ ẩm xưởng (%)	Sai lệch (xưởng / tủ) (%)	Màn hình giá trị đo	Đánh giá
1	27.0	26.0	56	0.0 / 0.0		Đạt
2	27.0	26.0	55	0.0 / 0.0		Đạt
3	27.0	26.0	56	0.0 / 0.0		Đạt
4	26.9	26.0	56	0.1 / 0.0		Đạt
5	27.0	26.1	56	0.0 / 0.1		Đạt
6	27.0	26.0	57	0.0 / 0.0		Đạt

7	27.0	25.9	56	0.0 / 0.1		Đạt
8	27.0	26.0	56	0.0 / 0.0		Đạt
9	26.9	26.0	56	0.1 / 0.0		Đạt
10	27.0	26.0	55	0.0 / 0.0		Đạt

*Nhận xét số lần thử nghiệm các khoảng, ta được dữ liệu kết quả như sau:

- Kết quả đo ở khoảng cách 10cm so với mặt tủ: Sai lệch trung bình tại xưởng là 0.43 % và tủ là 0.46 % → Cảm biến có xu hướng đo cao hơn giá trị chuẩn nhẹ, nhưng sai lệch nhỏ hơn 0.5% nên vẫn đảm bảo độ chính xác và ổn định tốt trong điều kiện phòng điều hòa.

- Kết quả đo ở khoảng cách 25cm so với mặt tủ: Sai lệch giữa các lần đo đều 0.1%, cho thấy cảm biến hoạt động cực kỳ ổn định trong môi trường có điều hòa. Trung bình sai lệch của xưởng là 0.05% và tủ là 0.03% → Hệ thống đạt độ chính xác cao, sai số gần như không đáng kể, phù hợp cho ứng dụng giám sát nhiệt độ tủ điện.

- Kết quả đo ở khoảng cách 40cm so với mặt tủ: Sai lệch trung bình của xưởng là 0.43 % và của tủ là 0.46 % → Cảm biến có xu hướng đo thấp hơn thực tế một chút, nhưng vẫn trong giới hạn cho phép (0.5 %), chứng tỏ vẫn đảm bảo độ tin cậy khi sử dụng trong tủ điện có điều hòa ổn định.

- Kết quả thực nghiệm cảnh báo an ninh ở khoảng cách 25cm cho thấy: Số lần đạt yêu cầu: Có 4/10 lần (lần 1, 3, 6, 8) nằm hoàn toàn trong ngưỡng cho phép, hệ thống hoạt động ổn định; Số lần vượt ngưỡng so với mức đã cài đặt: Có 6/10 lần xuất hiện cảnh báo (2, 4, 5, 7, 9, 10); Số lần vượt ngưỡng so với mức đã cài đặt: Có 6/10 lần xuất hiện cảnh báo (2, 4, 5, 7, 9, 10).

➔ Qua các lần thực nghiệm, hai cảm biến MLX90614 (đo nhiệt độ hồng ngoại) và DHT21 (đo nhiệt độ – độ ẩm môi trường) đều cho thấy độ ổn định và độ chính xác cao trong quá trình hoạt động.

Sai lệch trung bình giữa các lần đo chỉ nằm trong khoảng ±0.5%, hoàn toàn không ảnh hưởng đến khả năng giám sát và cảnh báo nhiệt độ của hệ thống.

Trong điều kiện lắp đặt bên trong không gian hẹp của tủ điện, cảm biến hoạt động hiệu quả trong phạm vi 0-50 cm, với khoảng cách tối ưu 25cm. Ở khoảng cách này, tín hiệu đo ổn định, phản ánh chính xác sự thay đổi của nhiệt độ và độ ẩm bên trong tủ. Cho tín hiệu đo ổn định và tin cậy. Kết quả chứng minh hệ thống đáp ứng tốt yêu cầu giám sát tự động, giúp cảnh báo sớm và đảm bảo an toàn thiết bị điện.

Đặc biệt, khi tủ điện được bố trí trong phòng có điều hòa nhiệt độ ổn định (26-27°C, độ ẩm 50-60%), sai lệch đo của cảm biến được giữ dưới ±0.5°C, đáp ứng tốt yêu cầu về độ chính xác trong môi trường công nghiệp.

Các cảm biến và hệ thống cảnh báo an ninh đáp ứng tốt chức năng phát hiện giá trị vượt ngưỡng và phát cảnh báo an ninh.

4. KẾT LUẬN

Thực nghiệm cho thấy cảm biến hoàn toàn đáp ứng tiêu chuẩn sử dụng trong hệ thống giám sát tự động tủ điện, giúp nâng cao độ tin cậy, cảnh báo sớm sự cố nhiệt và đảm bảo an toàn thiết bị điện.

Nghiên cứu thiết kế mô hình robot vận hành và bảo trì ứng dụng trong phòng phân phối điện đã bước đầu hoàn thiện. Ngoài ra, robot còn đáp ứng được các yêu cầu cơ bản đã đề ra như:

- Ứng dụng các phần mềm chuyên dụng như AutoCAD, Creo Parametric, Solidworks để xây dựng mô hình 3D, mô phỏng và tính toán kiểm bền tốc độ quay của động cơ, chọn thiết bị truyền động step, pully và xy lanh điện.

- Hệ thống cơ khí di chuyển trên thanh ray ổn định. Có khả năng tự động giám sát nhờ trang bị camera.

- Các cảm biến phát hiện điều bất thường từ tủ điện trong phòng phân phối điện, phòng chuyển mạch, phòng phân phối nhà máy điện và các tình huống về cảnh báo điện thông qua các thiết bị thông minh.

- Chế tạo, lắp ráp, vận hành và kiểm tra thực nghiệm robot, đạt được hiệu quả trong phạm vi 0-50 cm, tối ưu 15-30 cm, độ chính xác cao, phù hợp cho giám sát nhiệt độ – độ ẩm tủ điện trong môi trường công nghiệp có điều hòa ổn định.

- Mô hình này rất phù hợp trong việc đẩy mạnh số hóa: Là công nghệ cốt lõi thúc đẩy quá trình số hóa trong các ngành công nghiệp, tạo ra các hệ thống thông minh hơn và khả năng phản ứng nhanh với nhu cầu thay đổi môi trường trong công tác cảnh báo nhanh.

Qua thời gian nghiên cứu và thực hiện đề tài, nhóm đã thấy được tầm quan trọng của IoT trong nhiều khía cạnh cuộc sống hiện đại: Giúp tự động hóa các quy trình, từ quản lý sản xuất đến vận hành thông minh, giảm thiểu sự can thiệp của con người và tối ưu hóa nguồn lực.

Tuy nhiên, vẫn còn một số hạn chế trong quá trình thử nghiệm máy chẳng hạn như: ☞

Cơ cấu cơ khí sử dụng động cơ và bánh răng chỉ cho phép robot di chuyển qua lại trên đoạn thẳng. Nếu di chuyển trên đoạn thanh ray cong thì robot sẽ không di chuyển được. Để khắc phục hạn chế trên, việc sử dụng bộ vi sai thay thế cho cơ cấu truyền động bánh răng côn.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Dương Thị Vân Anh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Nhựt Duy, Nguyễn Anh Dũng, Nguyễn Anh Hào, Phạm Hùng Anh.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-333.❖

Ngày nhận bài: **26/9/2025**
Ngày phản biện: **09/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn A., Trần B. (2022), "*Ứng dụng công nghệ robot trong công tác bảo trì hệ thống điện*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ.
[2]. IEC Standard 61439 (2020), "*Low-voltage switchgear and controlgear assemblies*". International Electrotechnical Commission.
[3]. Lê H. (2021), "*Quản lý vận hành hệ thống phân phối điện hiện đại*". NXB. Bách Khoa.
[4]. Li, X., et al. (2020), "*Challenges in power distribution system maintenance*". IEEE Transactions on Power Delivery, 35(2): 654-662.
[5]. Pham C., Le D., Tran E. (2023), "*Smart robotic maintenance in electrical distribution systems*". Journal of Electrical Engineering Research.
[6]. Chen, Y., et al. (2021), "*Mobile robots for intelligent inspection of electrical equipment*". IEEE Access, 9: 12245-12257.
[7]. Zhang, L., et al. (2019), "*IoT-enabled predictive maintenance for electrical cabinets*". Journal of Industrial Information Integration, 15: 100-110.
[8]. Datasheet chính thức Melexis của MLX90614.
[9]. Wang, P. et al. (2022), "*Environment Understanding Algorithm for Substation Inspection Robot Based on Improved DeepLab V3+*".
[10]. ESP32 Series Datasheet (Espressif Systems).
[11]. Egi Muhamad Rifki, Achmad Rizal, Ade Gafar Abdullah, and Asep Bayu Dani Nandiyanto, "*Optimization of Electrospinning Temperature Control System IoT-Based with DHT21*".

LỚP PHỦ SIÊU KỴ NƯỚC DỰA TRÊN POLYSILOXANE – NANO SILICA: CHẾ TẠO VÀ ỨNG DỤNG

SUPERHYDROPHOBIC COATING BASED ON POLYSILOXANE – NANO SILICA: FABRICATION AND APPLICATIONS

TS. **Đỗ Văn Tá**, ThS. **Huỳnh Văn Nhu**, ThS. **Phạm Tạo**, TS. **Huỳnh Văn Vũ***
Trường Đại học Nha Trang
Email: tadv@ntu.edu.vn

TÓM TẮT

Vật liệu siêu kỵ nước (SH) có nhiều ứng dụng trong thực tế như tự làm sạch, giảm sức cản, phân tách hỗn hợp dầu-nước. Tuy nhiên, hiện nay quy trình chế tạo vật liệu SH còn khá phức tạp, yêu cầu máy móc hiện đại, giá thành cao dẫn tới sự hạn chế của vật liệu SH khi được ứng dụng trong thực tế. Do đó, việc phát triển một phương pháp chế tạo vật liệu SH mới, đơn giản, thân thiện với môi trường, giá thành thấp là thực sự cần thiết. Trong nghiên cứu này chúng tôi đã chế tạo thành công lớp phủ siêu kỵ nước dựa trên vật liệu polysiloxane và hạt nano-silica với góc tiếp xúc (CA) > 150° và góc trượt (SA) < 10°. Độ bền của lớp phủ được đánh giá thông qua thử nghiệm bóc tách bằng băng dính, kết quả cho thấy với bề mặt vật liệu nền có độ nhám cao như giấy nhám thì lớp phủ giữ được góc CA > 150° sau 15 lần bóc băng dính. Bên cạnh đó, lớp phủ siêu kỵ nước cũng được đánh giá về khả năng làm giảm sức cản, phân tách hỗn hợp dầu-nước, kết quả cho thấy lớp phủ được chế tạo trong nghiên cứu này đáp ứng được yêu cầu trong các ứng dụng thực tế.

Từ khóa: *Lớp phủ siêu kỵ nước; Phân tách hỗn hợp dầu-nước; Giảm sức cản; Tự làm sạch; Polysiloxan; Nano-silicas.*

ABSTRACT

Superhydrophobic (SH) materials have attracted considerable attention due to their wide range of practical applications, such as self-cleaning, drag reduction, and oil–water separation. However, current fabrication processes for SH materials are often complex, requiring advanced equipment and high costs, which significantly limit their large-scale applications. Therefore, developing a novel, simple, environmentally friendly, and low-cost fabrication method is highly desirable. In this study, we successfully fabricated a superhydrophobic coating based on polysiloxane and nano-silica particles, achieving a water contact angle (CA) > 150° and a sliding angle (SA) < 10°. The durability of the coating was evaluated using the tape peeling test, and the results showed that on rough substrates such as sandpaper, the coating maintained a CA > 150° after 15 peeling cycles. In addition, the superhydrophobic coating was assessed for self-cleaning, drag reduction, and oil–water separation properties. The obtained results demonstrate that the fabricated coating meets the requirements for practical applications.

Keywords: *Superhydrophobic coating; Oil-water separation; Drag reduction; Self-cleaning; Nano-silica.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vật liệu siêu kỵ nước (SH) là vật liệu có đặc tính chống thấm nước với góc tiếp xúc giữa giọt nước và bề mặt vật rắn lớn hơn 150°, và góc trượt của giọt nước khỏi bề mặt nhỏ hơn 10°. Đặc tính này có được do lớp không khí bị giữ lại giữa bề mặt siêu kỵ nước và nước khi chúng tiếp xúc với nhau. Trong những năm gần đây, vật liệu siêu kỵ nước được phát triển theo hướng ứng dụng vào các lĩnh vực trong thực tế như: tự làm sạch, giảm sức cản, phân tách hỗn hợp dầu-nước [1-2]. Ngày nay, nhiều phương pháp chế tạo vật liệu SH đã được phát triển. Tuy nhiên, quy trình chế tạo còn khá phức tạp, sử dụng hóa chất độc hại, yêu cầu máy móc hiện đại, độ bền của bề mặt SH còn yếu [3]. Chính những điều này đã làm hạn chế khả năng ứng dụng của vật liệu SH vào thực tế. Từ đó, việc phát triển những phương pháp mới với dụng cụ đơn giản, không sử dụng hóa chất độc hại, hiệu quả về kinh tế, độ bền cao, đang là hướng nghiên cứu của các nhà khoa học. Việc kết hợp vật liệu polymer với năng lượng bề mặt thấp và các hạt có kích thước nano để chế tạo vật liệu SH đang được sự quan tâm của các nhà khoa học [4-5]. Vật liệu Polymer được sử dụng như vật liệu kết dính trong khi đó các chất độn nano như hạt silica, titan, carbon soot đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành cấu trúc của bề mặt SH [6-9].

Đã có nhiều phương pháp khác nhau để chế tạo vật liệu SH từ polymer và hạt nano được các nhà khoa học công bố như lithography, thermal templating, plasma etching, coatings, tuy nhiên hầu hết các phương pháp này còn khá phức tạp, khó chế tạo với diện tích lớn, bề mặt cong. Thêm vào đó, lớp phủ bề mặt với tính chất siêu kỵ nước còn yếu, có thể dễ dàng bị phá hủy bởi những tác động cơ học, hóa học. Ví dụ, Yonghao Xiu et al.[10] chế tạo thành công bề mặt SH bằng nhựa epoxy và hạt nano silica. Đầu tiên, nhựa epoxy và hạt silica được sử dụng để tạo thành một lớp composite phủ nên bề mặt chất nền; sau đó, bề mặt composite được xử lý bằng O_2 plasma để tạo độ nhám bề mặt; cuối cùng, bề mặt tiếp tục được xử lý bằng hóa chất silan fluoroalkyl để tạo ra bề mặt SH. Phương pháp này không chỉ phức tạp, không thân thiện với môi trường mà còn khó sản xuất với quy mô lớn. Ở Việt Nam, một báo cáo trong nước tiêu biểu về vật liệu này được công bố bởi tác giả Tường-Vũ Mạnh et al. [11]. Nghiên cứu này áp dụng công nghệ nano để tạo ra lớp phủ TiO_2 và ZnO siêu kỵ nước. Tuy nhiên, độ bền cũng như khả năng ứng dụng của lớp phủ cũng chưa được đánh giá.

Việc phát triển một phương pháp chế tạo mới để tạo ra lớp phủ SH đơn giản, thân thiện với môi trường, giá thành thấp là thực sự cần thiết, từ đó cho phép nâng cao khả năng ứng dụng vật liệu SH vào thực tiễn. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã chế tạo thành công lớp phủ siêu kỵ nước thông qua phương pháp phun dung dịch gồm acetone, silica, toluene và polysiloxane lên bề mặt vật liệu nền. Lớp phủ thể hiện tính năng siêu kỵ nước với góc tiếp xúc (CA) > 150° và góc trượt (SA) < 10°. Độ bám dính của lớp phủ được đánh giá thông qua phép thử bóc tách bằng băng dính. Kết quả cho thấy trên bề mặt vật liệu nền có độ nhám cao như giấy nhám, lớp phủ có độ bám dính tốt hơn và duy trì được CA > 150° sau 15 chu kỳ bóc. Ngoài ra, lớp phủ siêu kỵ nước cũng thể hiện tốt các tính năng như giảm sức cản và phân tách dầu-nước, qua đó thể hiện tiềm năng ứng dụng thực tế của phương pháp chế tạo được đề xuất trong nghiên cứu này.

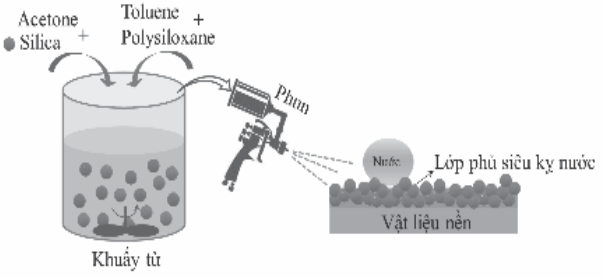
2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Vật liệu dùng trong nghiên cứu bao gồm: Polysiloxane (Soft AB Glue 8808) được cung cấp bởi Công ty Hóa chất Long Vũ, Việt Nam. Aceton (C_3H_6O, độ tinh khiết ≥ 99%) và toluene (C_7H_8, độ tinh khiết ≥ 99%) được cung cấp bởi Công ty Việt Mỹ Chemistry, Việt Nam. Hạt nano-silica kỵ nước (SiO_2, diện tích bề mặt riêng ~120 m²/g) được cung cấp bởi Công ty Hubei Huifu Nanomaterial, Trung Quốc.

2.2. Quy trình chế tạo lớp phủ siêu kỵ nước

Quy trình chế tạo lớp phủ siêu kỵ nước được thể hiện như hình 1. Trước tiên, dung dịch gồm Polysiloxane/Toluene được hòa trộn theo tỷ lệ về khối lượng là 1/4 và được khuấy gia nhiệt bằng máy khuấy từ tại 50°C trong thời gian 45 phút. Tiếp theo, dung dịch gồm Silica/Acetone được hòa trộn theo tỷ lệ về khối lượng là 1/15 và được khuấy bằng tay trong 5 phút sao cho silica hòa tan hoàn toàn trong Aceton. Sau đó, hai dung dịch này được pha trộn với nhau và thêm chất đông rắn của Polysiloxane vào với tỷ lệ về khối lượng là 1:10. Tiếp theo đó, hỗn hợp dung dịch trên tiếp tục được khuấy đều bằng máy khuấy từ ở nhiệt độ 50°C trong thời gian 5 phút. Dung dịch thu được sau khi khuấy đều sẽ được phun lên bề mặt vật liệu Polyethylene (PE), gỗ, composite và giấy nhám có kích thước 40 × 40 mm dưới áp suất phun khoảng 0.3 MPa trong thời gian 20 giây, khoảng cách từ đầu phun tới vật bề mặt phủ khoảng 25 cm.



Hình 1. Quy trình chế tạo lớp phủ siêu kỵ nước

2.3. Phương pháp đánh giá tính siêu kỵ nước

Cấu trúc bề mặt lớp phủ được quan sát bằng Kính hiển vi kim tương K40M-F200 microscope. Thành phần hóa học của lớp phủ được xác định bằng phương pháp Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (Bruker Tensor 27 FT-IR Spectrometer). Góc CA của bề mặt phủ được xác định như sau: Nhỏ giọt nước có kích thước khoảng 10µl lên bề mặt vật liệu nền. Sau đó, chụp ảnh giọt nước sau khi tiếp xúc ổn định với bề mặt. Sử dụng phần mềm ImageJ để đo góc tiếp xúc giọt nước trên ảnh chụp được. Đối với góc SA, sử dụng phần mềm ImageJ để phân tích hình ảnh tại thời điểm giọt nước bắt đầu lăn khỏi bề mặt sau khi bị nghiêng. Giá trị của góc CA và SA là giá trị trung bình của 5 mẫu đo.

2.4. Phương pháp đánh giá độ bền

Độ bền của lớp phủ được đánh giá thông qua thử nghiệm bóc tách bằng băng dính (Acrylic, 2.5 N/cm²). Băng dính sẽ được dính lên bề mặt lớp phủ sao cho đảm bảo tiếp xúc hoàn toàn với bề mặt, sau đó băng dính được bóc ra. Thao tác này được lặp lại cho tới khi kết thúc quá trình kiểm tra. Giá trị góc CA sẽ được ghi lại trong quá trình kiểm tra.

2.5. Ứng dụng của lớp phủ siêu kỵ nước

2.5.1. Khả năng giảm sức cản

Khả năng giảm sức cản của lớp phủ siêu kỵ nước được đánh giá dựa trên mô hình trượt Navier:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = \frac{\mu u_s}{\lambda}$$

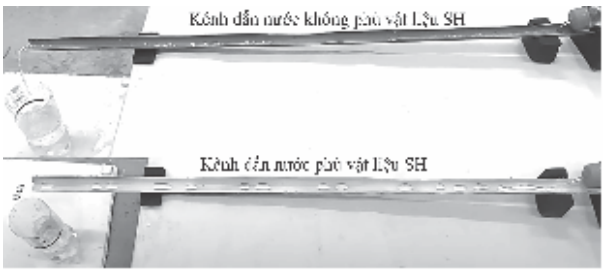
Trong đó:

- τ_w (Pa) là ứng suất cắt tại thành ống (wall shear stress) - là lực cản mà thành ống tác ☞

động lên dòng chất lỏng do độ nhớt;

- μ (Pa.s) là độ nhớt động lực học (dynamic viscosity) của chất lỏng;
- u_s (m/s) là vận tốc trượt tại bề mặt;
- λ (m) là độ dài trượt (slip length).

Theo mô hình Navier, bề mặt có lực cản thấp cho phép tăng lưu lượng dòng chảy. Từ đó, thí nghiệm kiểm tra khả năng giảm sức cản được thực hiện như hình 2: Trước tiên, một chai đựng nước được đặt nghiêng một góc 15° so với mặt phẳng ngang và một kênh dẫn nước được đặt nghiêng một góc 10°, chai nước sẽ cấp nước chảy qua kênh dẫn trong một khoảng thời gian cố định, nước sẽ được thu lại tại bình chứa. Tiếp theo, phủ lớp vật liệu SH lên kênh dẫn nước. Lượng nước thu lại được trong trường hợp kênh nước được phủ vật liệu SH và kênh nước không được phủ sẽ được đánh giá. Kết quả thu được sẽ thể hiện khả năng giảm sức cản của lớp phủ SH.



Hình 2. Dòng chảy qua kênh dẫn nước phủ và không phủ vật liệu siêu kỵ nước

2.5.2. Khả năng phân tách hỗn hợp dầu-nước

Để đánh giá khả năng phân tách hỗn hợp dầu-nước của lớp phủ SH, lưới nhôm kỵ nước sẽ được chế tạo bằng cách phủ lớp vật liệu SH lên bề mặt lưới. Lưới nhôm kỵ nước có khả năng chặn nước trên bề mặt lưới trong khi vẫn cho dầu đi qua. Trong nghiên cứu này, lưới nhôm kỵ nước được gấp thành dạng "thuyền vuông" (40 × 40 mm) và kết hợp với một khối foam có khả năng hấp thụ dầu được đặt bên trong lưới, thiết kế này cho phép hấp thụ dầu tràn trên mặt nước một cách hiệu quả, tăng hiệu suất tách dầu-nước.

Hiệu suất tách dầu-nước được tính bằng công thức sau:

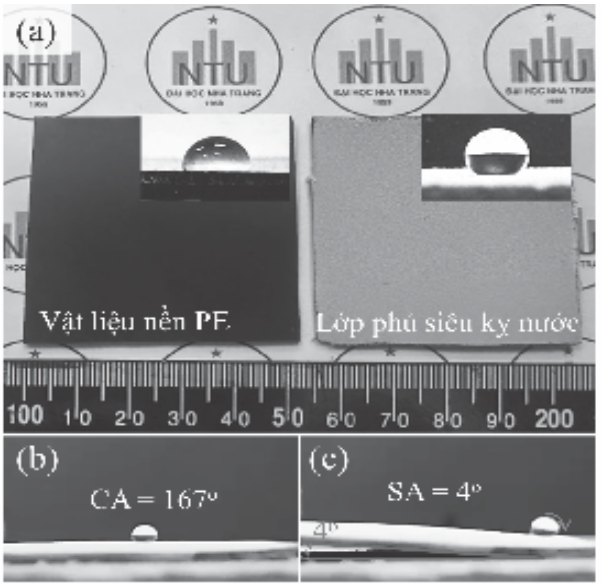
$$E = V_1/V_0 \times 100\%$$

Trong đó: E là hiệu suất tách dầu-nước, V_1 biểu thị thể tích dầu ban đầu và V_0 biểu thị thể tích dầu sau khi tách.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Khả năng siêu kỵ nước của lớp phủ

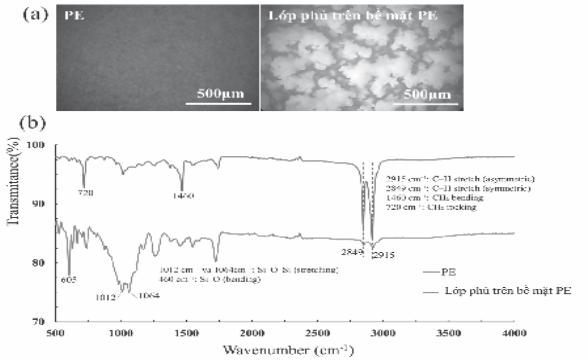
Lớp phủ trên vật liệu nền PE thể hiện tính siêu kỵ nước với góc CA = 167° và góc SA = 4° như Hình 3.



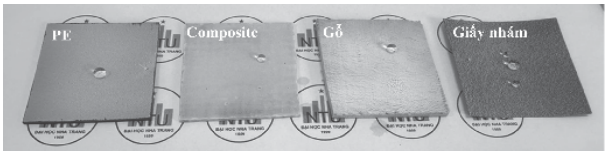
Hình 3. (a) Bề mặt vật liệu PE trước và sau khi phủ lớp siêu kỵ nước; (b), (c) lần lượt thể hiện giá trị của góc CA và SA

Đặc tính siêu kỵ nước của lớp phủ đạt được do cấu trúc nhám của bề mặt và năng

lượng bề mặt thấp, được thể hiện trong Hình 4. Hình 4a cho thấy các hạt nano-silica liên kết chặt chẽ với vật liệu Polysiloxane hình thành nên các cấu trúc có kích thước micromet. Phổ FTIR của PE và PE sau khi được phủ lớp vật liệu kỵ nước được thể hiện trong Hình 4b. Đối với PE, các đỉnh hấp thụ đặc trưng được quan sát tại 2915 cm^{-1} và 2849 cm^{-1}, tương ứng với dao động kéo giãn bất đối xứng và đối xứng của liên kết C-H; tại 1460 cm^{-1}và 720 cm^{-1}, lần lượt liên quan đến dao động uốn của nhóm CH_2 và dao động lắc của CH_2. Trong khi đó, phổ của PE sau khi phủ xuất hiện thêm các đỉnh mới tại 1012 cm^{-1} và 1064 cm^{-1}, đặc trưng cho dao động kéo giãn Si-O-Si, và tại 460 cm^{-1} liên quan đến dao động uốn Si-O [12-14]. Sự xuất hiện của các đỉnh này chứng tỏ rằng lớp polysiloxane/ nano-silica đã được phủ thành công trên bề mặt PE, góp phần hình thành bề mặt kỵ nước. Ngoài ra, lớp vật liệu siêu kỵ nước cũng được phủ thành công trên nhiều loại vật liệu khác nhau như gỗ, composites, giấy nhám (Hình 5).



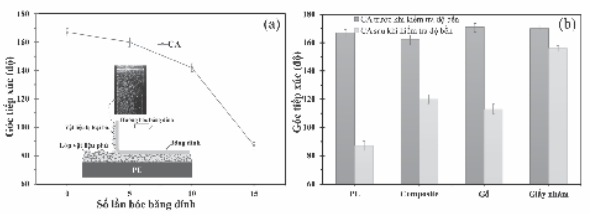
Hình 4. (a) Cấu trúc bề mặt của vật liệu PE trước và sau khi phủ lớp siêu kỵ nước, (b) thành phần hóa học của bề mặt của vật liệu PE trước và sau khi phủ lớp siêu kỵ nước.



Hình 5. Phủ lớp siêu kỵ nước trên nhiều loại vật liệu khác nhau

3.2. Độ bền của lớp phủ

Độ bền cơ học của lớp phủ siêu kỵ nước được đánh giá thông qua phép thử bóc tách bằng băng dính, kết quả được trình bày trong Hình 6. Hình 6a cho thấy giá trị góc CA của lớp phủ trên bề mặt PE giảm dần khi số lần bóc băng dính tăng lên. Sau 15 lần thử, CA giảm xuống còn 87°. Bên cạnh đó, Hình 6b so sánh sự thay đổi giá trị CA của lớp phủ sau 15 lần bóc băng dính trên các loại nền khác nhau. Kết quả chỉ ra rằng trên bề mặt có độ nhám cao như giấy nhám, lớp phủ duy trì CA > 150° ngay cả sau kiểm tra độ bền, trong khi trên nền PE, composite và gỗ, giá trị CA giảm đáng kể. Điều này cho thấy độ nhám bề mặt đóng vai trò quan trọng trong việc gia tăng độ bám dính và duy trì tính siêu kỵ nước của lớp phủ. Như vậy, kết quả thử nghiệm khẳng định rằng lớp phủ siêu kỵ nước chế tạo trong nghiên cứu không chỉ đạt được đặc tính kỵ nước cao mà còn thể hiện độ bền cơ học tốt đối với vật liệu nền có độ nhám bề mặt lớn.



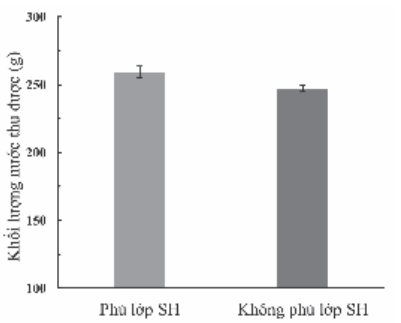
Hình 6. (a) Sự thay đổi giá trị góc CA của lớp phủ trên bề mặt PE sau nhiều lần bóc băng dính, (b) sự thay đổi giá trị góc CA của lớp phủ trên sau 15 lần bóc băng dính trên những loại vật liệu khác nhau.

3.3. Khả năng giảm sức cản của lớp phủ

Theo Hình 2, sự khác biệt về dòng chảy trong hai trường hợp kênh dẫn nước không phủ và phủ vật liệu SH được thể hiện rõ ràng. Trên kênh dẫn nước được phủ vật liệu SH, nước không thấm hay lan ra mà co lại thành các giọt tròn. Điều này là do góc tiếp xúc giữa giọt nước ☞

và bề mặt lớn hơn 150°. Nghĩa là phần lớn thể tích giọt nước không dính vào bề mặt, mà gần như "ngồi" trên nó. Không chỉ có góc tiếp xúc lớn, mà sự chênh lệch giữa góc tiếp xúc tiến và lùi (tức là khi giọt nước bắt đầu chuyển động và dừng lại) cũng rất nhỏ. Điều này đồng nghĩa với việc giọt nước rất dễ lăn trên bề mặt. Khi tiếp xúc với nước, bề mặt SH giữ lại các túi khí giữa các cấu trúc micro-nano tạo thành một lớp đệm không khí. Nhờ đó, nước không thực sự tiếp xúc hoàn toàn với vật liệu rắn, mà chỉ nằm trên lớp không khí này, hiện tượng này tuân theo mô hình Cassie-Baxter, điều này giúp giọt nước dễ lăn hơn là chảy thành dòng.

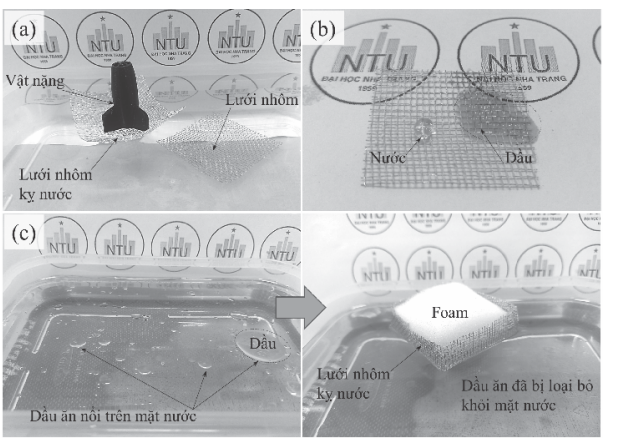
Theo Mô hình trượt Navier, lớp đệm không khí sẽ làm tăng giá trị độ dài trượt (λ), từ đó làm giảm lực ma sát (τ_w) và lực dính giữa nước và bề mặt. Điều này cũng được chứng minh thông qua lượng nước thu được của hai trường hợp trong cùng một khoảng thời gian 50 giây như hình 7. Lượng nước thu được trong trường hợp kênh dẫn có lớp phủ vật liệu SH lớn hơn đáng kể so với trường hợp không có lớp phủ, điều này có được là do lực cản thấp của lớp SH dẫn tới dòng chảy nhanh hơn và thu được lượng nước nhiều hơn.



Hình 7. Khối lượng nước thu được trong trường hợp có lớp phủ và không có lớp phủ siêu kỵ nước.

3.4. Khả năng phân tách hỗn hợp dầu-nước

Hình 8 thể hiện rõ ràng các đặc tính siêu kỵ nước và khả năng tách dầu-nước của lưới nhôm sau khi được phủ lớp vật liệu kỵ nước. Cụ thể, ở Hình 8a, lưới nhôm phủ lớp kỵ nước vẫn nổi trên bề mặt nước ngay cả khi chịu tác động của vật nặng, cho thấy bề mặt đã đạt được tính kỵ nước vượt trội. Hình 8b chứng minh tính chọn lọc pha của lưới: dầu dễ dàng thấm qua trong khi nước hoàn toàn bị ngăn lại. Lưới siêu kỵ nước phủ Polysiloxane/silica hoạt động dựa trên sự kết hợp giữa cấu trúc nano của silica và lớp phủ năng lượng bề mặt thấp từ Polysiloxane. Lớp phủ tạo ra mạng Si-O-Si nhám vi mô và các nhóm kỵ nước $-CH_3$, $-CH_2$ giúp bề mặt có năng lượng thấp. Khi tiếp xúc với hỗn hợp dầu-nước, nước bị đẩy lùi do hiệu ứng Cassie-Baxter, trong khi dầu với sức căng bề mặt thấp dễ dàng thấm qua lưới nhờ tính ưa dầu và cơ chế Wenzel. Nhờ đó, lưới thể hiện khả năng siêu kỵ nước, siêu ưa dầu, cho phép tách dầu hiệu quả và ổn định [15, 16]. Hình 8c mô tả ứng dụng thực tiễn, khi lưới nhôm kỵ nước kết hợp với foam loại bỏ hiệu quả lớp dầu ăn nổi trên mặt nước, kết quả thu được cho thấy hiệu suất tách dầu-nước đạt 85%. Điều này mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong việc tách dầu khỏi môi trường nước của lớp phủ siêu kỵ nước.



Hình 8. (a) Lưới nhôm nổi trên mặt nước sau khi được phủ lớp kỵ nước, (b) Lưới nhôm phủ lớp kỵ nước cho dầu đi qua và chặn không cho nước đi qua, (c) Quá trình lọc dầu thực vật nổi trên mặt nước

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, lớp phủ siêu kỵ nước dựa trên polysiloxane và hạt nano-silica đã được chế tạo thành công bằng phương pháp đơn giản và không đòi hỏi trang thiết bị phức tạp. Độ bền cơ học của lớp phủ được đánh giá trên nhiều loại bề mặt nền khác nhau, kết quả cho thấy độ bền phụ thuộc đáng kể vào độ nhám bề mặt. Cụ thể, trên giấy nhám, lớp phủ duy trì được góc tiếp xúc nước lớn hơn 150° ngay cả sau 15 lần thử bóc tách bằng băng dính. Ngoài ra, lớp phủ siêu kỵ nước trên kênh dẫn nước thể hiện khả năng giảm sức cản, với lượng nước thu được đạt 259,25 g so với 247,14 g ở kênh không phủ. Trên lưới nhôm, lớp phủ cũng cho thấy hiệu quả cao trong tách dầu-nước, đạt hiệu suất khoảng 85%. Những kết quả này khẳng định tiềm năng của phương pháp chế tạo được đề xuất, đồng thời mở ra triển vọng ứng dụng lớp phủ siêu kỵ nước trong thực tiễn, đặc biệt là trong kiểm soát và xử lý sự cố tràn dầu trên mặt nước.

***Ghi nhận hỗ trợ:**

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Nha Trang theo mã số đề tài TR2023-13-37. ❖

Ngày nhận bài: **16/9/2025**
Ngày phản biện: **01/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Zhang S., Huang J., Chen Z., Lai Y., "*Bioinspired special wettability surfaces: from fundamental research to water harvesting applications*". Small, Vol. 13, pp. 1-28, 2017.

[2]. Xu C.L., Song F., Wang X.L., Wang Y.Z., "*Surface modification with hierarchical CuO arrays toward a flexible, durable superhydrophobic and self-cleaning material*". Chemical Engineering Journal, Vol. 313, pp. 1328-1334, 2017.

[3]. Chun D.M., Ngo C.V., Lee K.M., "*Fast fabrication of superhydrophobic metallic surface using nanosecond laser texturing and low-temperature annealing*". CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 65, pp. 519-522, 2016.

[4]. Cao M., Jin X., Peng Y., Yu C., Li K., Liu K., Jiang L., "*Unidirectional wetting properties on multi-bioinspired magnetocontrollable slippery microcilia*". Advanced Materials, Vol. 29, pp. 1-6, 2017.

[5]. Dinh T.H., Ngo C.V., Chun D.M., "*Controlling the wetting properties of superhydrophobic titanium surface fabricated by UV nanosecond-pulsed laser and heat treatment*". Nanomaterials, Vol. 8, 2018.

[6]. Do V.T., Tran N.G., Chun D.M., "*Fabrication of robust superhydrophobic micro-nano hierarchical surface structure using compression molding with carbon soot nanoparticles and thermoplastic polymer*". Polymer, Vol. 251, pp. 124893, 2022.

[7]. Do V.T., Chun D.M., "*Fabrication of large-scale, flexible, and robust superhydrophobic composite films using hydrophobic fumed silica nanoparticles and polydimethylsiloxane*". Polymer, Vol. 244, pp. 124630, 2022.

[8]. Do V.T., Chun D.M., "*Facile fabrication of extreme-wettability contrast surfaces for efficient water harvesting using hydrophilic and hydrophobic silica nanoparticles*". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 671, pp. 131664, 2023.

[9]. Erdene-Ochir O., Do V.T., Chun D.M., "*Facile fabrication of durable and flexible superhydrophobic surface with polydimethylsiloxane and silica nanoparticle coating on a polyethylene terephthalate film by hot-roll lamination*". Polymer, Vol. 255, pp. 125158, 2022.

[10]. Xiu Y., Liu Y., Balu B., Hess D.W., Wong C., "*Robust superhydrophobic surfaces prepared with epoxy resin and silica nanoparticles*". IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 2, pp. 395-401, 2012.

[11]. Tuong V.M., et al., "*Fabrication of superhydrophobic surface on wood by micro/nano composite coating technology*". TNU Journal of Science and Technology, Vol. 189, No. 13, pp. 3-8, 2018.

[12]. Wang L., Zhang J., Li Y., "*Facile fabrication of superhydrophobic silica coatings for self-cleaning applications*". Applied Surface Science, Vol. 478, pp. 601-610, 2019.

[13] Xue C.H., Jia S.T., Zhang J., Ma J.Z., "*Large-area fabrication of superhydrophobic surfaces for practical applications: An overview*". Langmuir, Vol. 28, pp. 10552-10559, 2012.

[14]. Latthe S.S., Terashima C., Nakata K., Fujishima A., "*Self-cleaning superhydrophobic coatings: potential industrial applications*". Progress in Organic Coatings, Vol. 128, pp. 52-78, 2019.

[15]. Xu J., Chen Y., Shen L., et al., "*Fabrication of superhydrophobic stainless-steel mesh for oil-water separation by jet electrodeposition*". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 649, pp. 129434, 2022.

[16]. Luo Q., et al., "*Continuous separation of oil-water mixture by a double-layer corrugated channel structure with superhydrophobicity and superoleophilicity*". Separation and Purification Technology, Vol. 269, pp. 118647, 2021.

NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA ĐẠN PHI TIÊU APS CHUYỂN ĐỘNG DƯỚI NƯỚC BẰNG CÔNG CỤ MÔ PHỎNG SỐ

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE HYDRODYNAMIC OF APS DART PROJECTILES IN WATER USING CFD

Hoàng Trung Quốc[1], Nguyễn Đức Mạnh[1], Nguyễn Khắc Huỳnh[2], Vũ Mạnh Hiếu[1], Hà Trường Sang[1,*]

[1]Học viện Kỹ thuật quân sự

[2]Viện Kỹ thuật Phòng không - Không quân, Bộ Quốc Phòng

**Email: sanght.st@lqdtu.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo này tập trung nghiên cứu đặc tính động lực học của đạn phi tiêu từ súng trường bắn dưới nước (APS) khi chuyển động trong môi trường nước với vận tốc cao bằng công cụ mô phỏng số CFD. Do tính đối xứng trục của bài toán, mô hình 2D trục đối xứng được xây dựng từ kích thước thực tế của đạn và rời rạc bằng lưới phi cấu trúc trong ICEM-CFD để tối ưu chi phí tính toán. Phương trình Navier-Stokes được giải bằng phương pháp thể tích hữu hạn trong ANSYS Fluent, kết hợp mô hình dòng rối k-ε và mô hình xâm thực Singhal nhằm mô tả quá trình hình thành khoang hơi. Nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của hình dạng đầu đạn và vận tốc ban đầu đến sự phát triển của khoang xâm thực và lực cản thủy động. Các thông số thủy động lực học và lực cản lên đạn được nghiên cứu, qua đó có thể dự đoán quỹ đạo chuyển động của đạn. Kết quả mô phỏng chỉ ra khả năng của phương pháp đề xuất trong việc mô tả chính xác sự thay đổi trường dòng chảy và hiện tượng siêu xâm thực quanh đạn, cung cấp cơ sở khoa học hữu ích cho công tác thiết kế, cải tiến đạn phi tiêu dưới nước trong lĩnh vực quân sự và công nghệ biển.

Từ khóa: *Đạn phi tiêu APS; Xâm thực; Vật thể chuyển động dưới nước; Mô phỏng CFD; Phương pháp thể tích hữu hạn; Mô hình đa pha.*

ABSTRACT

This paper investigates the hydrodynamic behaviour of APS dart projectiles fired underwater at high speed using computational fluid dynamics (CFD). Exploiting geometric axial symmetry, a two-dimensional axisymmetric model was created from the projectile's actual dimensions and discretized with an unstructured mesh in ICEM-CFD to reduce computational cost. The incompressible Navier-Stokes equations were solved using the finite volume method in ANSYS Fluent, with the standard k-ε turbulence model and the Singhal cavitation model to capture vapor-cavity formation. We examine the influence of nose geometry and initial velocity on cavity development and hydrodynamic drag. Key hydrodynamic quantities and drag forces were quantified to enable trajectory prediction. The results demonstrate that the proposed approach can accurately describe flow-field variations and supercavitation phenomena around the projectile, providing a sound basis for the design and optimization of underwater dart projectiles in military and marine engineering applications.

Keywords: *APS dart projectile; Cavitation; Underwater moving objects; CFD simulation; Finite volume method; Multiphase models.*

1. GIỚI THIỆU

Trong nhiều ứng dụng quân sự và kỹ thuật biển, việc nghiên cứu đặc tính thủy động học của vật thể chuyển động trong nước với vận tốc cao đóng vai trò then chốt, đặc biệt đối với các khí tài như ngư lôi, đạn phi tiêu, phương tiện lặn không người lái. So với chuyển động trong không khí, môi trường nước có mật độ và độ nhớt lớn hơn nhiều, khiến lực cản thủy động tác dụng lên vật thể tăng mạnh, từ đó làm hạn chế phạm vi hoạt động và hiệu quả tác chiến.

Một hiện tượng đặc biệt thường xuất hiện khi vận tốc tăng cao là xâm thực. Đây là quá trình hình thành các bọt hơi do áp suất cục bộ của chất lỏng giảm xuống thấp hơn áp suất hơi bão hòa. Khi xảy ra trên bề mặt vật thể chuyển động nhanh, khoang xâm thực có thể mở rộng và bao phủ phần lớn hoặc toàn bộ chiều dài vật thể, dẫn đến hiện tượng siêu xâm thực. Trong trạng thái này, lực cản tác dụng giảm đi đáng kể nhờ việc vật thể di chuyển chủ yếu trong môi trường khí thay vì nước [1-3].

Các công trình lý thuyết nền tảng của Garabedian, Tulin và Logvinovich từ giữa thế kỷ 20 đã mô tả sự phát triển của siêu khoang trong điều kiện lý tưởng [1-3]. Tuy vậy, những mô hình này còn hạn chế khi áp dụng cho các vật thể thực tế có biên dạng phức tạp. Gần đây, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của tính toán hiệu năng cao (HPC) và các phần mềm mô phỏng số, các phương pháp CFD (Computational Fluid Dynamics) đã trở thành công cụ hiệu quả để nghiên cứu quá trình xâm thực trong điều kiện hình học và biên phức tạp [4-6]. Các mô hình này cho phép khảo sát chi tiết sự hình thành, phát triển và biến dạng của khoang xâm thực, đồng thời xét đến các yếu tố quan trọng như dòng rối, chuyển pha và hiệu ứng hình học.

Trong số các mô hình xâm thực, mô hình Singhal và Zwart-Gerber-Belamri thường được áp dụng rộng rãi do khả năng mô tả tốt cơ chế hóa hơi – ngưng tụ dựa trên chênh áp suất. Về dòng rối, mô hình k-ε và k-ω được lựa chọn nhờ tính ổn định và khả năng cho kết quả tin cậy trong các bài toán xâm thực quy mô lớn [7]. Ngoài ra, một số nghiên cứu gần đây cũng đã khai thác các mô hình dòng rối tiên tiến hơn như SST k-ω hoặc LES, nhằm mô tả chính xác hơn cấu trúc xoáy trong điều kiện phi tuyến mạnh [8].

Nghiên cứu này sẽ tập trung vào việc mô phỏng quá trình xâm thực quanh đạn phi tiêu APS chuyển động trong nước với vận tốc cao. Mô hình đối xứng trục được xây dựng từ hình học thực tế của đầu đạn, lưới tính toán được tạo bằng công cụ ICEM-CFD, và mô phỏng tiến hành trong ANSYS Fluent dựa trên phương pháp thể tích hữu hạn. Các khảo sát sẽ phân tích ảnh hưởng của vận tốc và hình dạng đầu đạn đến sự phát triển của khoang xâm thực cũng như lực cản thủy động, từ đó góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế và tối ưu các loại đạn phi tiêu dưới nước.

2. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

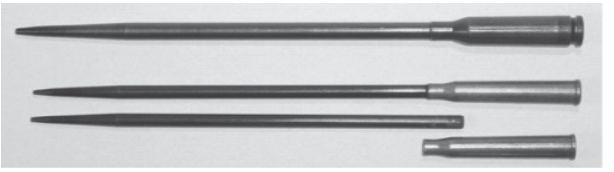
2.1. Mô tả vấn đề

Nghiên cứu tập trung vào phân tích đặc tính thủy động học của một đầu đạn thực tế chuyển động trong nước ở vận tốc cao. Do đối xứng trục của hình học đầu đạn, bài toán được giảm thành mô hình 2D trục đối xứng nhằm tiết kiệm chi phí tính toán trong khi vẫn bảo toàn các đặc trưng dòng chảy quan trọng. Miền tính toán được xác định đủ lớn để bao phủ toàn bộ vùng hình thành và phát triển khoang xâm thực ở vùng sau đầu đạn; kích thước điển hình sử dụng trong bài là L × R = 425 mm × 100 ☞

mm (hình 1 mô tả kích thước đầu đạn và vị trí tương đối trong miền). Lưới phi cấu trúc được tạo bằng ICEM-CFD và được kiểm soát để đảm bảo độ mịn tại các vùng biên cầu và quanh cổ đầu đạn, nơi tồn tại gradient vận tốc lớn.

Các điều kiện biên áp dụng trong mô phỏng gồm: inlet với vận tốc đồng nhất, outlet đặt ở áp suất môi trường (ambient pressure), và bề mặt vỏ đạn được thiết lập no-slip. Đối với các biên bên (far-field), khoảng cách được chọn đủ xa để giảm thiểu ảnh hưởng tới trường trong gần đầu đạn.

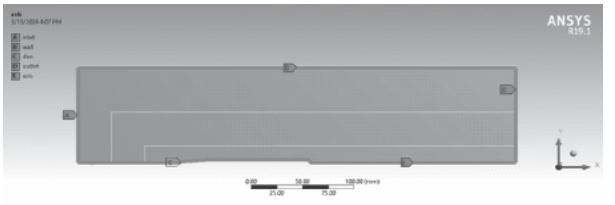
Mô phỏng sử dụng mô hình đa pha (liquid + vapor) để bắt được sự hình thành và tiến triển của khoang hơi do xâm thực. Cụ thể, bài toán giải hệ phương trình Navier-Stokes cho trường pha hỗn hợp, kết hợp mô hình mô tả chuyển pha (cavitation source terms) để xử lý quá trình hóa hơi – ngưng tụ, đồng thời áp dụng mô hình dòng rối phù hợp để mô tả tương tác giữa xoáy và khoang xâm thực.



(a) Đạn phi tiêu APS



(b) Mô hình 3D



(c) Vùng mô phỏng trên phần mềm ANSYS

Hình 1. Mô hình đạn và vùng tính toán mô phỏng số

2.2. Các phương trình mô tả

2.2.1. Phương trình chuyển động của chất lưu

Quá trình chuyển động của đạn có thể được phân chia ra thành ba giai đoạn: Giai đoạn đạn được gia tốc trong nòng phóng, giai đoạn đạn chuyển động trong tiếp xúc với môi trường bên ngoài và giai đoạn tiếp cận mục tiêu. Nội dung nghiên cứu này tập trung tính toán giai đoạn đạn chuyển động trong nước tức là bài toán thuật phóng ngoài.

Chuyển động của đạn trong nước sẽ chịu lực tác dụng của nước lên đạn F. Trong trường hợp tổng quát, F phụ thuộc vào vận tốc chuyển động của đạn, hình dạng vật thể cũng như tính chất vật lý của không khí. Thông thường, F được biểu diễn thông qua đại lượng không thứ nguyên là hệ số lực cản C_D:

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 S \quad (1)$$

Trong đó, ρ là khối lượng riêng của không khí, S là diện tích tiết diện của đạn chiếu theo phương chuyển động. Theo phương pháp truyền thống, hệ số lực cản C_D được xem là hằng số đối với một vật thể có hình dạng cố định. Hệ số này được xác định bằng thực nghiệm và được sử dụng để tính toán lực cản theo các trường hợp khác nhau. Điều này làm giảm độ chính xác của phương pháp tính toán bởi vì thực tế hệ số lực cản này có thể phụ thuộc vào các yếu tố khác trong đó có vận tốc V. Điều này làm cho phương pháp truyền thống rất khó khăn trong việc tính được lực cản trong trường hợp này.

Để giải quyết vấn đề trên bằng phương pháp mô phỏng số, việc tính toán với độ chính xác cao hệ số lực cản C_D, hay lực cản F yêu cầu sử dụng công cụ tính toán CFD. Trong đó, lực

cản sẽ tính đến các yếu tố ảnh hưởng như chế độ chuyển động, đặc tính hình học cũng như môi trường làm việc. Phương pháp mô phỏng số để phân tích đặc tính khí động lực học này dựa trên việc giải số hệ phương trình Navier-Stokes sau [9, 10]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$
$$\rho\left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V}\right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \frac{1}{3}\nabla(\nabla \cdot V) + \rho g \quad (2)$$

Từ phân bố vận tốc và áp suất lên bề mặt đạn, lực cản và mô men cản của không khí tác dụng lên đầu đạn trong quá trình chuyển động sẽ được tính cụ thể.

2.2.2. Mô hình dòng rối k-ε

Việc giải phương trình Navier-Stokes (2) ở trên nhằm xác định các thông số lực của không khí tác dụng lên đầu đạn chuyển động là nội dung phức tạp và tốn thời gian nhất. Việc này càng đòi hỏi nhiều tài nguyên tính toán bằng máy tính đối với chuyển động vận tốc cao. Trong nghiên cứu đặc tính khí động dòng rối, phương pháp trung bình theo Reynolds (RANS) thường được sử dụng. Phương pháp này dựa trên trung bình hóa phương trình Navier-Stokes và bỏ qua ảnh hưởng của thời gian lên đặc tính của dòng chảy. Mặc dù RANS có giới hạn nhất định về kết quả nhưng chúng làm giảm thời gian tính toán đáng kể [11]. Mô hình k-ε tiêu chuẩn được sử dụng để đóng hệ phương trình RANS, với hai phương trình phụ:

Phương trình năng lượng động học dòng rối k:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] + G_k - \rho\varepsilon \quad (3)$$

Phương trình tỉ lệ tiêu tán năng lượng

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

Trong đó: G_k là tỷ lệ sản sinh năng lượng dòng rối do gradient vận tốc; các hằng số mô hình được dùng theo giá trị tiêu chuẩn: $C_{1\varepsilon}$ = 1,44; $C_{2\varepsilon}$ = 1,92; σ_k = 1,0; σ_ε = 1,3.

2.2.3. Mô hình xâm thực Singhal

Hiện tượng xâm thực được mô phỏng bằng mô hình Singhal, dựa trên phương trình chuyển pha giữa nước lỏng và hơi nước. Tỷ lệ hóa hơi và ngưng tụ được mô tả như sau:

Tốc độ hóa hơi (nếu $p < p_{vapor}$):

$$\dot{m}_{evap} = C_v \rho_l \frac{p_{vap} - p}{p_{vap}} \sqrt{\frac{2(p_{vap} - p)}{\rho_l}}$$

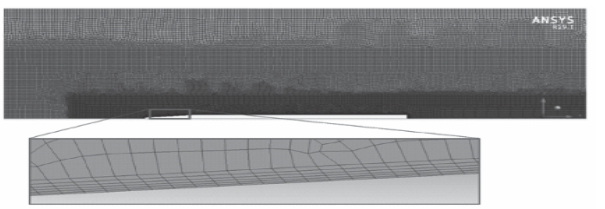
Tốc độ ngưng tụ (nếu $p > p_{vapor}$):

$$\dot{m}_{cond} = C_c \rho_v \frac{p - p_{vap}}{p} \sqrt{\frac{2(p - p_{vap})}{\rho_v}}$$

Trong đó: ρ_l, ρ_v là mật độ của nước và hơi; p_{vapor} là áp suất hơi bão hòa; C_v, C_c là các hệ số điều chỉnh (chọn theo đề xuất của Singhal: C_v = 50, C_c = 0.01).

2.3. Lưới tính toán

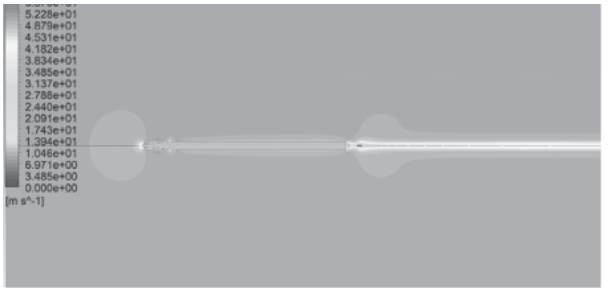
Hình 2 mô tả lưới tính toán của đạn chuyển động trong môi trường nước. Lưới được chia theo phi cấu trúc với mô hình lưới chữ nhật là chủ đạo, với độ mịn tại vùng đạn và thưa dần về phía xa. Quá trình kiểm tra độc lập lưới đã được thực hiện đảm bảo kết quả đạt độ chính xác cần thiết.



Hình 2. Lưới tính toán với 80,236 nút và 79,362 phần tử

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc tính động lực học và hệ số lực cản C_d



Hình 3. Trường vận tốc tại trường hợp vận tốc đạn 50 m/s



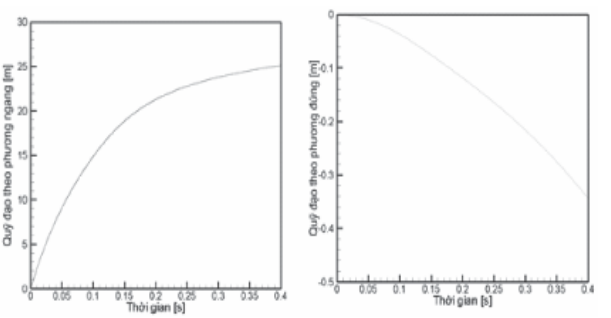
Hình 4. Trường áp suất tại trường hợp vận tốc đạn 50 m/s

Sau khi đạt trạng thái ổn định, trường vận tốc và áp suất xung quanh đạn được tính toán. Hình 3 thể hiện trường vận tốc chất lỏng xung quanh đạn với trường hợp đạn có v = 50 m/s và áp suất tương ứng với vận tốc này thể hiện trên hình 4. Tại mũi đạn, vận tốc thấp nhất khi áp dụng điều kiện không trượt, đồng thời áp suất đạt giá trị cực đại. Đây cũng là nguyên nhân chính của lực cản lên đạn. Hệ số lực cản C_d được xác định từ kết quả mô phỏng với các vận tốc khác nhau. Bảng 1 trình bày giá trị C_d theo vận tốc. Nhận thấy rằng hệ số lực cản giảm khi vận tốc đạn tăng lên và đạt giá trị gần như không đổi khi vận tốc đạt trên 100 m/s. Điều này có thể giải thích bằng sự xuất hiện hiện tượng xâm thực (khoang rỗng) được đề cập ở phần sau.

Bảng 1. Hệ số lực cản phụ thuộc vào vận tốc

Vận tốc (m/s)	1	5	10	20	40
C_d	1.545	0.945	0.805	0.67	0.481
Vận tốc (m/s)	60	80	100	200	300
C_d	0.353	0.247	0.1289	0.1254	0.1251

Từ đặc tính C_d phụ thuộc vào vận tốc ở trên, sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu để đưa ra mối liên hệ của C_d theo vận tốc. Từ đó, ta có thể giải hệ phương trình chuyển động để tìm ra quỹ đạo của đạn. Với điều kiện ban đầu V_0 = 245 m/s thì kết quả quỹ đạo được thể hiện trên hình 5. Từ kết quả có thể nhận thấy đạn chuyển động khoảng 0.25s đầu có vận tốc lớn, sau đó giảm nhanh và gần như dừng lại sau 0.4s tương ứng với quãng đường theo phương ngang khoảng 25m và phương thẳng khoảng 0.35m.



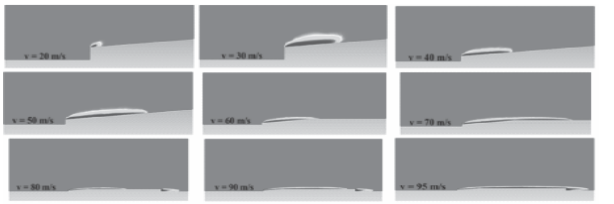
Hình 5. Quỹ đạo của đạn chuyển động theo thời gian với V_0 = 245 m/s

3.2. Hiện tượng xâm thực

Khi chuyển động với tốc độ cao dưới nước, do áp suất giảm dưới ngưỡng bão hòa nên hiện tượng xâm thực xảy ra. Để nghiên cứu trạng thái không ổn định của siêu khoang xâm thực, nghiên cứu tiến hành khảo sát sự chuyển động của nước với vận tốc từ 20m/s đến 90m/s quan sát thấy bọt khí bắt đầu xuất hiện ở mũi đạn. Khi tăng vận tốc nước, khoang khí biến dạng và di chuyển dọc đường biên đạn. Qua mô phỏng, ta kết luận khoang khí bắt đầu xuất hiện khi đạn chuyển động vận tốc 20m/s và trở thành siêu khoang khí bao quanh thân đạn ở vận tốc ~ 95m/s. Kết quả mô phỏng cho thấy khi vận tốc tăng, khoang xâm thực mở rộng và hình thành rõ rệt hơn. Ở vận tốc 50 m/s, khoang hẹp và chưa ổn định. Khi vận tốc đạt trên 95 m/s, siêu khoang bắt đầu hình thành, giúp giảm lực cản rõ rệt. Bảng 2 thể hiện kích thước khoang xâm thức theo các dải vận tốc khác nhau. Hình 5 thể hiện bọt khí xuất hiện tại một số trường hợp vận tốc nhất định.

Bảng 2. Tổng hợp tỉ lệ kích thước khoang theo vận tốc.

Vận tốc (m/s)	Bán kính khoang (mm)	Chiều dài khoang (mm)	Ghi chú
50	8	100	Khoang nhỏ, chưa ổn định
100	15	300	Khoang rõ, siêu khoang bắt đầu
150	20	500	Khoang lớn, ổn định

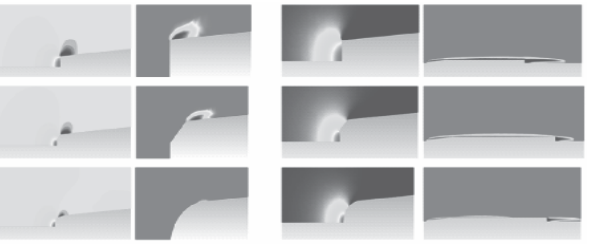


Hình 6. Sự hình thành bọt khí xâm thực tại một số vận tốc của đạn

3.3. Đặc tính động lực học của các loại mũi đầu đạn

Hiện tượng xuất hiện siêu khoang (bóng xâm thực) xuất phát từ sự giảm áp suất tại đó. Để khảo sát chi tiết hiện tượng sẽ rất phức tạp vì nó phụ thuộc rất nhiều yếu tố. Ảnh hưởng của vận tốc đạn đã được trình bày ở mục trước 3.2. Ở mục này sẽ khảo sát túi xâm thực theo các hình dạng đạn khác nhau.

Ba loại hình dạng đầu đạn được khảo sát: đầu đĩa phẳng (như kết quả các mục trước), đầu vát trụ và đầu cầu. Kết quả cho thấy đầu đĩa phẳng dễ hình thành siêu khoang nhất, lực cản thấp nhất ở vận tốc cao. Đầu cầu có lực cản lớn nhất. Hình 7 biểu diễn khoang xâm thực theo từng loại đầu đạn với vận tốc đầu đạn là 20 m/s và 100 m/s. Từ đặc điểm khoang rỗng, hệ số lực cản cũng sẽ khác nhau như thể hiện trong bảng 3. Kết quả cho thấy với vận tốc nhỏ và trung bình, mũi vát trụ có hệ số lực cản nhỏ nhất, sau đó với vận tốc cao thì mũi cầu sẽ có hệ số C_d nhỏ nhất do đó làm giảm lực cản nhất.



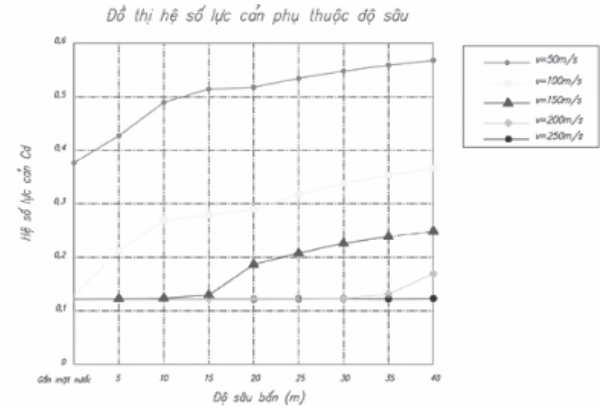
Hình 7. Áp suất tại mũi đạn (bên trái mỗi hình) và khoang xâm thực (bên phải mỗi hình) tại vận tốc của đạn bằng 20 m/s (bên trái) và 100 m/s (bên phải). ☞

Bảng 3. Hệ số lực cản đối với các mô hình khác nhau

Vận tốc (m/s)	Mũi đạn đĩa phẳng	Mũi vát trụ	Mũi cầu
20	0.668427	0.583515	0.621686
100	0.127596	0.092472	0.170725
170	0.125581	0.085196	0.069348

3.4. Ảnh hưởng của độ sâu phát bắn

Ngoài ảnh hưởng của vận tốc hay hình dạng đầu đạn. Độ sâu phát bắn có ảnh hưởng đáng kể đến chuyển động của đạn dưới nước. Việc hiểu rõ những ảnh hưởng này là rất quan trọng để đảm bảo an toàn và hiệu quả khi bắn súng dưới nước. Độ sâu phát bắn ảnh hưởng đến chuyển động của đạn dưới nước theo nhiều cách. Qua đồ thị trên có thể thấy ở độ sâu càng lớn càng gây ảnh hưởng xấu đối với những vật thể chuyển động với tốc độ cao do khó có thể hình thành khoang rỗng để giảm lực cản tác dụng. Hình 8 thể hiện hệ số lực cản C_d theo các độ sâu phát bắn. Nhận thấy rằng sự xuất hiện siêu khoang cũng ảnh hưởng lớn đến lực cản do khi xuất hiện bọt khí thì các lực nhớt và lực áp suất sẽ thay đổi. Kết quả hình 8 cho thấy rằng khi vận tốc đạn chưa đủ lớn thì ảnh hưởng đến độ sâu phát bắn khá lớn. Ngược lại, với vận tốc lớn thì ảnh hưởng của độ sâu bắn không nhiều.



Hình 8. Đồ thị thay đổi lực cản theo độ sâu bắn

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình mô phỏng số quá trình chuyển động của đạn phi tiêu APS trong môi trường nước. Nghiên cứu đặc tính động lực của đạn phi tiêu sử dụng phần mềm mô phỏng ANSYS FLUENT. Kết quả cho thấy vận tốc, hình dạng đầu đạn sẽ có ảnh hưởng lớn đến lực cản và sự hình thành khoang xâm thực. Ngoài ra, độ sâu phát bắn cũng có ảnh hưởng đến siêu khoang và do đó hệ số lực cản C_d. Việc hình thành siêu khoang giúp giảm lực cản đáng kể do nhớt, kéo dài quãng đường di chuyển của đạn. Các kết quả này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc thiết kế và tối ưu hóa đạn bắn dưới nước trong tương lai.❖

Ngày nhận bài: **23/9/2025**
Ngày phản biện: **09/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Garabedian, P.R. (1956), "*Calculation of axially symmetric cavities and jets*". Pacific J. Math., 6(4), 611-684.

[2]. TuLin, M.P. (1964), "*Supercavitating flow - small perturbation theory"*. Journal of Ship Research, 7:16-37.

[3]. Logvinovich, G.V. (1969), "*Hydrodynamics of flows with free boundaries*". Kiev: Naukova dumka.

[4]. Korkut, E., & Atlar, M. (2003), "*An experimental study into the effect of cavitation on marine propeller performance*". Ocean Engineering.

[5]. Fluent Inc. (2021), "*ANSYS Fluent Theory Guide*".

[6]. Singhal, A. K. et al. (2002), "*Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model*". Journal of Fluids Engineering.

[7]. Lee, H., Lee, C., Kim, M. S., & Seok, W. (2025), "*Numerical Investigation of Cavitation Models Combined with RANS and*

PANS Turbulence Models for Cavitating Flow Around a Hemispherical Head-Form Body". Journal of Marine Science and Engineering, 13(4), 821.

[8]. Yin, T. Y., Pavesi, G., Pei, J., Yuan, S. Q., & Gan, X. C. (2022), "*Large eddy simulation of cloud cavitation and wake vortex cavitation around a trailing-truncated hydrofoil*". Journal of Hydrodynamics, 34(5), 893-903.

[9]. Nguyen, T.V., Doan, M.T., Vu, M.H., Vu, V.C., Luu, D.L., Ha, S.T. (2025), "*Numerical Study on the Aerodynamic Characteristics of a Wings-Stabilized Moving Projectile*". In: Long, B.T., et al. Proceedings of the 4th Annual International Conference on Material, Machines, and Methods for Sustainable Development (MMMS2024). MMMS 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-93816-0_72

[10]. Nguyen, D. Q., Tran, T. H., Le, D. A., Hieu, N. T., Pham, V. K., & Ha, T. S. (2024), "*Drag reduction for axisymmetric boattail model by longitudinal groove cavity under low-speed conditions*". Journal of Mechanical Science and Technology, 38(8), 4209-4220.

[11]. D.C, Wilcox (1998), "*Turbulence Modeling for CFD*".

KHẢO SÁT ĐỘNG LỰC HỌC XE THIẾT GIÁP XÍCH SẢN XUẤT TẠI VIỆT NAM

DYNAMIC SURVEY OF TRACKED ARMORED VEHICLES PRODUCED IN VIETNAM

Lê Quang Hợp[1], Tô Viết Thành[2,*], Dương Thành Công[2]

[1]Nhà máy Z189, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng

[2]Viện Cơ khí Động lực, Học viện Kỹ thuật quân sự

**Email: tovietthanh179@gmail.com*

TÓM TẮT

Hiện nay, quân đội ta đã nghiên cứu thiết kế, chế tạo thành công mẫu xe thiết giáp xích và đã tiến hành thử nghiệm. Bên cạnh kết quả thử nghiệm, cần thiết phải có những tính toán, khảo sát khả năng làm việc của các cụm hệ thống và của xe để đối chứng nhằm hoàn thiện thiết kế, hoàn thiện công nghệ chế tạo và xây dựng tính năng chiến kỹ thuật phù hợp. Bài báo trình bày kết quả khảo sát động lực học chuyển động thẳng lý thuyết và so sánh khả năng tăng tốc lý thuyết với thực tế để đánh giá chất lượng động lực học của xe theo phương án thiết kế, chế tạo đã thực hiện.

Từ khóa: *Xe thiết giáp; Động lực học; Tăng tốc.*

ABSTRACT

Currently, our army has successfully researched, designed, manufactured a tracked armored vehicle model and has conducted testing. In addition to the testing results, it is necessary to have calculations and surveys of the working capacity of the system clusters and the vehicle for comparison in order to perfect the design, perfect the manufacturing technology and build appropriate technical features. The article presents the results of the theoretical straight motion dynamics survey and compares the theoretical acceleration capacity with reality to evaluate the dynamic quality of the vehicle according to the design and manufacturing plan that has been implemented.

Keywords: *Armored vehicle; Dynamics; Acceleration.*

1. TỔNG QUAN

Xe thiết giáp xích do Tổng cục Công nghiệp quốc phòng (CNQP) thiết kế, chế tạo là xe thiết giáp chạy bằng xích, bọc thép, xe có hỏa lực mạnh, khả năng cơ động cao trên các địa hình phức tạp, khả năng bảo vệ tốt, được sử dụng trong chiến đấu hiệp đồng binh chủng của quân đội ta.

Bài báo đưa ra cơ sở lý thuyết sau đó khảo sát động lực học chuyển động thẳng lý thuyết gồm đặc tính kéo lý thuyết và tính năng tăng tốc theo lý thuyết của xe thiết giáp xích sản xuất tại Việt Nam, sau đó so sánh với kết quả thực tế xe chạy để đưa ra các nhận xét, đánh giá về chất lượng động lực học của xe đã thiết kế, chế tạo.

Trong đó, đặc tính kéo của xe thể hiện: Ứng với mỗi loại đường cho trước, xe có thể chuyển động phù hợp với tay số nào và vận tốc lớn nhất mà xe có thể đạt được ở tay số đó là bao nhiêu; Góc dốc lớn nhất mà xe có thể khắc phục được ở tốc độ và tay số đã cho; Xác định được lực kéo moóc mà xe có thể kéo được ở tốc độ và tay số đã cho; Đánh giá được việc phân chia tỷ số truyền ở tay số thấp nhất và cao nhất có hợp lý hay không. Còn tính năng tăng tốc đánh giá khả năng tăng tốc thông qua gia tốc khi tăng tốc, thời gian tăng tốc và độ dài quãng đường tăng tốc.



Hình 1. Xe thiết giáp xích do Tổng cục CNQP thiết kế và chế tạo tại Việt Nam

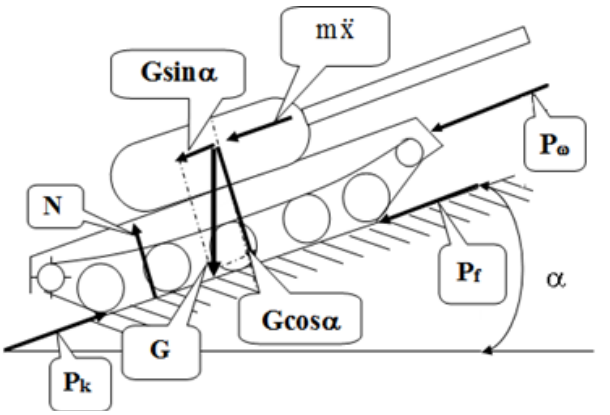
2. KHẢO SÁT ĐỘNG LỰC HỌC CHUYỂN ĐỘNG THẲNG LÝ THUYẾT

Để có thể tính toán, khảo sát động lực học chuyển động thẳng của xe, ta cần có các thông số đầu vào, cụ thể trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số đầu vào

Thông số xe	Số liệu
Công suất lớn nhất của động cơ (KW)	225
Mômen xoắn lớn nhất của động cơ (N.m)	1000
Số vòng quay của động cơ ở công suất lớn nhất (vg/phút)	2600
Số vòng quay lớn nhất của động cơ (vg/phút)	2850
Số vòng quay nhỏ nhất của động cơ (vg/phút)	700
Tỷ số truyền số I	5,25
Tỷ số truyền số II	2,842
Tỷ số truyền số III	1,912
Tỷ số truyền số IV	1,284
Tỷ số truyền số V	0,858

Mô hình khảo sát động lực học chuyển động thẳng của xe thể hiện trên Hình 2 [1].



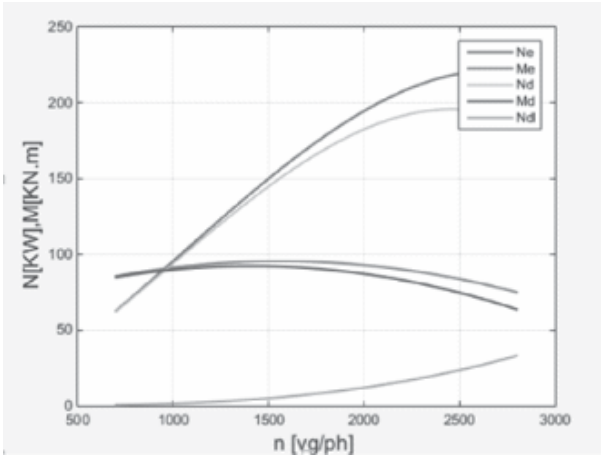
Hình 2. Mô hình khảo sát động lực học chuyển động thẳng.

Trong đó: G - Trọng lượng xe; N - Phản lực pháp tuyến; P_k - Lực kéo; P_ω - Lực cản không khí; P_f - Lực cản chuyển động; α - Góc dốc; mẍ - Lực quán tính.

Phương trình vi phân chuyển động của xe:

$$P_k = P_f + G.\sin\alpha + m\ddot{x} \quad (1)$$

Sử dụng công thức thực nghiệm Lây-Đéc-Man để xây dựng đồ thị đặc tính ngoài động cơ trên Hình 3 [1].



Hình 3. Đặc tính ngoài động cơ УТД -20

*** Xác định đặc tính kéo chuyển động thẳng của xe:**

Đặc tính kéo chuyển động thẳng của xe phụ thuộc vào các yếu tố:

- Đặc tính ngoài của động cơ;
- Số lượng số truyền của hộp số và các tỷ số truyền của nó;
- Tỷ số truyền hệ thống truyền lực của xe;
- Hiệu suất của hệ thống truyền lực (η_{tl});
- Hiệu suất truyền động xích (η_x);
- Tốc độ chuyển động lớn nhất của xe (v_{max});
- Tốc độ chuyển động lớn nhất của số truyền thứ i (v_{imax});
- Khối lượng xe (G);
- Bán kính bánh sao chủ động (r_{cd}).

Vận tốc ở các vòng quay của động cơ ứng với từng tay số:

$$v_i = \frac{0,377 r_{cd} n}{i_{tli}} \quad (2)$$

Trong đó: n là số vòng quay của trục khuỷu [v/ph], r_{cd} là bán kính bánh sao chủ động [m], i_{tli} là tỷ số truyền của hệ thống truyền lực ở tay số thứ i và bằng:

$$i_{tli} = i_{hi}.i_{qv}.i_{tdc} \quad (3)$$

Với: i_{hi} là tỷ số truyền của hộp số ở tay số thứ i, i_{qv} là tỷ số truyền của cơ cấu quay vòng, ở đây xét $i_{qv} = 1$, i_{tdc} là tỷ số truyền của truyền động cạnh, $i_{tdc} = 5,5$.

Lực kéo đơn vị trên bánh sao chủ động:

$$f_{cd} = \frac{3,6.N_d.\eta_{tl}}{G.V_i} \quad (4)$$

Trong đó, η_{tl} là hiệu suất của hệ thống truyền lực:

$$\eta_{tl} = \eta_n^{m1}.\eta_{tr}^{m2} \quad (5)$$

Với: η_n là hiệu suất bánh răng nón, $\eta_n = 0,97$; η_{tr} là hiệu suất bánh răng trụ, $\eta_{tr} = 0,98$; m_1 là số cặp bánh răng nón, $m_1 = 1$; m_2 là số cặp bánh răng trụ, $m_2 = 3$.

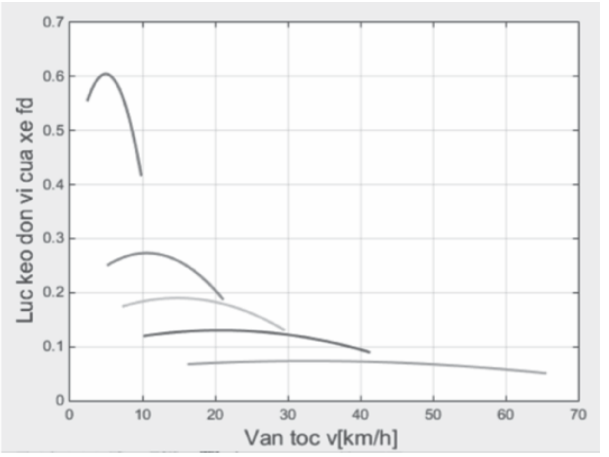
Hiệu suất của bộ dẫn tiến xích:

$$\eta_x = 0,95 - \frac{1}{f_{cd}}(0,013 + 0,0000013 v_i^2) \quad (6)$$

Lực kéo đơn vị của xe:

$$f_d = f_{cd}.\eta_x \quad (7)$$

Kết quả đưa ra được đồ thị đặc tính kéo chuyển động thẳng của xe trước và sau khi thay thế động cơ thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. Đặc tính kéo chuyển động thẳng của xe

* Giả thiết khi tính toán tính năng tăng tốc:

Để loại trừ ảnh hưởng cá tính của người lái thể hiện khi đóng ly hợp chính hoặc cung cấp nhiên liệu cho động cơ, khi xây dựng đồ thị tăng tốc, người ta chấp nhận các giả thiết sau đây:

- Việc đóng ly hợp xảy ra tức thời;
- Số vòng quay tính toán của động cơ ở thời điểm đóng ly hợp bằng số vòng quay ở chế độ công suất cực đại, tức là n_N;
- Mô men truyền qua khi ly hợp đóng hoàn toàn không thay đổi giá trị khi các đĩa ma sát bị trượt và bằng:

$$M_{ms} = \beta.M_{đmax}$$

Trong đó: $M_{đmax}$ là mô men xoắn lớn nhất của động cơ; β là hệ số dự trữ của ly hợp.

- Trong quá trình ly hợp trượt, mô men động cơ coi như không đổi và luôn bằng $M_{đmax}$.

Khi xe khởi hành, quá trình tăng tốc tại tay số đó sẽ được chia thành ba giai đoạn:

• Giai đoạn tăng tốc thứ nhất: Từ thời điểm khởi xe bắt đầu chuyển động đến khi vận tốc góc phần chủ động và bị động của ly hợp chính bằng nhau [1].

Gia tốc của xe ở giai đoạn tăng tốc thứ nhất:

$$\ddot{x}_1 = \frac{g}{\delta_0}.(\beta.f_{d\max} - f_c) \quad (8)$$

Trong đó: $\ddot{x}_1$ là gia tốc tăng tốc ở giai đoạn thứ nhất; f_{dmax} là lực kéo đơn vị lớn nhất của xe tăng ở tay số khởi hành; δ_0 là hệ số tăng khối lượng giả định khi ly hợp chính mở; β là hệ số dự trữ của ly hợp; f_c là hệ số cản tổng cộng của đường.

Vận tốc chuyển động của xe trong giai đoạn thứ nhất được xác định:

$$v_1 = 3{,}6.\ddot{x}_1.t_1 \quad (9)$$

Trong đó, t_1 là giá trị thời gian tức thời ở giai đoạn thứ nhất.

• Giai đoạn tăng tốc thứ hai: Từ thời điểm kết thúc sự trượt các đĩa ma sát của ly hợp chính đến khi đạt số vòng quay tính toán của động cơ [1].

Gia tốc ở giai đoạn tăng tốc thứ hai:

$$\ddot{x}_2 = \frac{g}{\delta}(f_d - f_c) \quad (10)$$

Vận tốc xe ở cuối đoạn thứ nhất xác định qua biểu thức:

$$v_2 = v_1 + 3{,}6.\ddot{x}_2.t_2 \quad (11)$$

Trong đó: v_1 là vận tốc xe ở cuối giai ☞

đoạn thứ hai ở số vòng quay tính toán của động cơ n_N; t_2 là giá trị thời gian tức thời ở giai đoạn thứ hai.

• Giai đoạn tăng tốc thứ ba: Từ thời điểm cắt ly hợp chính sau khi đạt số vòng quay tính toán của động cơ n_N đến khi đóng ly hợp để chuyển sang số tiếp theo [1].

Gia tốc của xe tăng ở giai đoạn thứ ba:

$$\ddot{x}_3 = -f_c \frac{g}{\delta_0} \quad (12)$$

Trên cơ sở đó, vận tốc xe ở giai đoạn thứ ba xác định theo biểu thức:

$$v_3 = v_2 - 3{,}6.\ddot{x}_3 t_3 \quad (13)$$

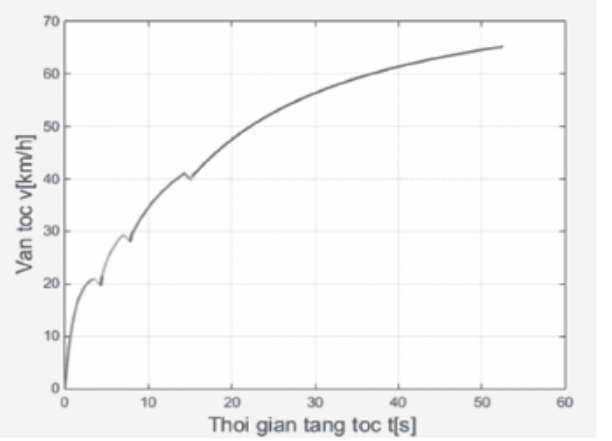
Ở đây, v_2 là vận tốc xe ở cuối giai đoạn thứ hai ở số vòng quay tính toán của động cơ n_N, t_3 là giá trị thời gian tức thời ở giai đoạn thứ ba.

Quá trình tăng tốc ở số truyền tiếp theo xảy ra tương tự như đã trình bày ở trên, chỉ khác là trong tường hợp này, ở giai đoạn thứ nhất các chi tiết bị động của ly hợp ngay từ đầu đã quay với vận tốc góc ứng với vận tốc v_3 của xe ở cuối giai đoạn tăng tốc thứ ba ở số truyền trước [1].

Vận tốc của xe ở giai đoạn thứ nhất ở số truyền tiếp theo được xác định bằng phương trình:

$$v' = v_3 + 3{,}6.\ddot{x}'_1 t \quad (14)$$

Kết quả đưa ra được đồ thị tăng tốc chuyển động thẳng của xe trước và sau khi thay thế động cơ thể hiện trên Hình 5.



Hình 5. Đặc tính tăng tốc xe

Kết quả khảo sát cho thấy: theo lý thuyết vận tốc tối đa xe đạt được là 65,5 km/h trong thời gian 52s.

3. KHẢO SÁT KHẢ NĂNG TĂNG TỐC THỰC TẾ

* Điều kiện tiến hành đo khả năng tăng tốc:

- Xe đảm bảo hoạt động tốt và điều kiện kỹ thuật, an toàn;

- Thiết bị thử nghiệm phải được kiểm định và đảm bảo độ tin cậy, sai số. Các thiết bị được đặt vững chắc, ổn định nhưng không ảnh hưởng tới quá trình thử nghiệm và không bị ảnh hưởng của các yếu tố chấn động bên ngoài;

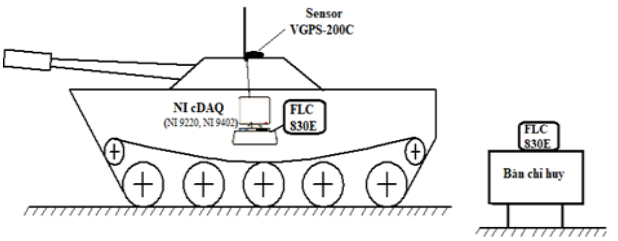
- Người tham gia thử nghiệm, sử dụng thiết bị đo phải được đào tạo, huấn luyện thành thạo và đã được cấp chứng chỉ.

* Thực hiện việc kết nối hệ thống đo, kiểm tra như trong Hình 6:

+ Máy tính nhúng NI cDAQ-9137 được đặt trên xe trong khoang chiến đấu làm nhiệm vụ nhận (qua các modul NI 9220, NI 9402) và xử lý dữ liệu đo thông qua phần mềm.

+ Sensor VGPS-200C (được cung cấp nguồn điện một chiều 12V DC trực tiếp từ ắc-quy trên xe) ăng ten đặt trên nóc tháp pháo xe làm việc theo nguyên lý định vị vệ tinh, trực tiếp nhận, xử lý, hiệu chuẩn và chuyển đổi tín hiệu từ vệ tinh thành thông số đo với hai dạng tín hiệu là: Dạng số (Digital) và dạng tương tự (Analog).

+ Bộ thu phát wifi FLC-830E làm việc theo nguyên lý thu phát sóng vô tuyến trong dải tần số: 2,412-2,462 GHz. Một bộ FLC-830E được lắp trên xe cùng máy tính nhúng NI cDAQ-9137, một bộ được lắp vào máy tính tại bàn chỉ huy. Quá trình thí nghiệm được điều khiển tại bàn chỉ huy mà không cần cán bộ thí nghiệm ngồi trên xe.



Hình 6. Sơ đồ kết nối hệ thống đo

Thực hiện việc khởi động các thiết bị, lựa chọn cài đặt các tham số chờ lệnh để tiến hành đo theo thứ tự sau:

- Kiểm tra khả năng đảm bảo an toàn cho thiết bị trước khi cấp nguồn;

- Kiểm tra các giắc nối (giắc nguồn, cáp tín hiệu, giá lắp đặt Sensor VGPS-200C trên tháp pháo, giắc nối giữa Sensor VGPS-200C với máy tính nhúng NI cDAQ và giữa FLC-830E với máy tính nhúng) phải đảm bảo chắc chắn, ổn định và tin cậy;

- Kiểm tra nhiệt độ, độ ẩm môi trường và ghi lưu;

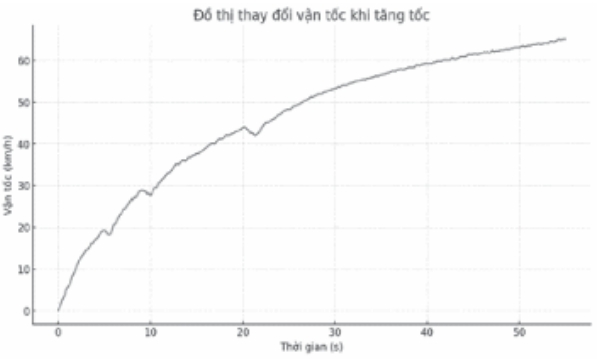
- Bật công tắc nguồn của cDAQ, thực hiện việc hiệu chuẩn thiết bị và thiết lập tham số phù hợp đối tượng cần đo:

+ Dải tần số phân tích tương ứng với dải tần số cần đo, kiểm tra;

+ Chọn kênh đo phù hợp;

+ Gia công tín hiệu để đưa vào cDAQ (khuyếch đại, lọc, tuyến tính hoá, v.v.).

* Kết quả đo tính năng tăng tốc của xe thực, trên địa hình là đường bê tông được thể hiện trên Hình 7:



Hình 7. Đồ thị tính năng tăng tốc thực tế của xe

Kết quả đo thực tế cho thấy: xe khởi hành ở số 2 trên đường bằng được làm từ bê tông và đạt vận tốc tối đa là 65,2 km/h trong thời gian 55s.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã khảo sát chất lượng động lực học chuyển động thẳng của xe thiết giáp xích theo lý thuyết và tiến hành đo khả năng tăng tốc của xe, từ đó so sánh và đưa ra nhận xét về sự khác nhau của tính năng tăng tốc lý thuyết với thực tế.

Kết quả cho thấy, vận tốc tối đa theo lý thuyết đạt 65,5 km/h, cao hơn so với vận tốc tối đa thực tế đạt 65,2 km/h. Thời gian tăng tốc đến ☞

vận tốc tối đa lý thuyết đạt chỉ cần 52s trong khi thực tế là 55s. Nguyên nhân chính là do khi tính toán lý thuyết cần đặt ra các giả thiết, việc này dẫn đến kết quả sẽ có sai số so với thực tế. Ngoài ra, còn có ảnh hưởng của hiệu suất truyền lực, hiệu suất xích, các thông số liên quan đến điều kiện đường làm kết quả đo tăng tốc thực tế của xe thấp hơn so với tính toán lý thuyết.❖

Ngày nhận bài: **09/9/2025**
Ngày phản biện: **24/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Lê Trung Dũng, Nguyễn Minh Tân, Cù Xuân Phong, "*Lý thuyết xe xích quân sự*". Lần 1, NXB. Quân đội nhân dân, Hà Nội, 2023.
[2]. Binh chủng Tăng thiết giáp, "*Cấu tạo và sử dụng xe chiến đấu bộ binh BMP-1*". NXB. Quân đội nhân dân, 2003.
[3]. Vũ Quốc Bảo, "*Cấu tạo xe tăng – Tập 4*". Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội, 2003.
[4]. Nguyễn Phùng Quang, "*MatLab & Simulink*". NXB. Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội, 2004.

NGHIÊN CỨU ĐẶC ĐIỂM CỦA LỰC CẮT TRONG GIA CÔNG PHAY RÃNH MICRO BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

RESEARCH CHARACTERISTICS OF CUTTING FORCE IN MICRO TRENCH MILLING BY FINITE ELEMENT METHOD

ThS. **Nguyễn Tuấn Hưng**
Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp
Email: nthung@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Trong gia công vi mô, lực cắt quyết định chất lượng bề mặt, độ chính xác và tuổi thọ dụng cụ. Hiện tượng gãy dụng cụ thường xảy ra khi lực cắt biến đổi bất thường, làm gián đoạn quá trình. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để phân tích lực cắt trong quá trình gia công rãnh vi mô, với các thông số gồm tốc độ cắt, lượng ăn dao và chiều sâu cắt. Kết quả cho thấy lực cắt phụ thuộc mạnh vào thông số công nghệ, từ đó hỗ trợ lựa chọn chế độ cắt hợp lý, tối ưu hóa quá trình và nâng cao chất lượng gia công.

Từ khóa: *Gia công vi mô; Phương pháp phần tử hữu hạn; Thông số công nghệ; Lực cắt.*

ABSTRACT

In micro-machining, cutting force determines the surface quality, accuracy and tool life. Tool breakage often occurs when the cutting force changes abnormally, interrupting the process. This study uses the finite element method (FEM) to analyze the cutting force during micro-groove machining, with parameters including cutting speed, feed rate and depth of cut. The results show that the cutting force strongly depends on the process parameters, thereby supporting the selection of reasonable cutting mode, optimizing the process and improving the machining quality.

Keywords: *Micro milling; Finite element method; Technological parameters; Cutting force.*

1. GIỚI THIỆU

Nguyên lý gia công vi mô cơ bản tương tự như gia công vĩ mô, nhưng không đơn thuần chỉ là việc thu nhỏ kích thước của công cụ và phôi. Khi thu nhỏ, vấn đề cứng vững của dụng cụ trở nên khó đảm bảo, đòi hỏi thiết kế và chế tạo dụng cụ có độ bền và độ cứng cao, phù hợp với tốc độ cắt lớn [1]. Ngoài ra, các thông số công nghệ ảnh hưởng mạnh đến lực cắt, từ đó quyết định chất lượng bề mặt, độ chính xác và tuổi thọ dụng cụ [2].

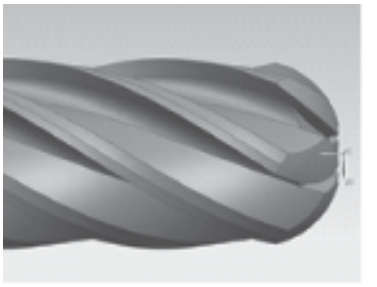
Trong gia công vi mô, một số thách thức lớn như nhiệt sinh ra trong vùng cắt, quá trình mòn dụng cụ, biến cứng bề mặt phôi và rung động có thể ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả và độ tin cậy gia công [3]. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để phân tích ảnh hưởng của lớp phủ dụng cụ và cơ chế hỏng hóc khi phay vật liệu khó gia công như Inconel 718 [3], cũng như vai trò của thông số cắt đối với ứng suất dư trong quá trình phay [2, 5]. Bên cạnh đó, các nghiên cứu gần đây còn tập trung mô phỏng lực cắt bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), kết hợp mô hình vật liệu như Johnson-Cook, nhằm làm rõ mối quan hệ giữa thông số cắt và sự hình thành ứng suất dư trong phay vi mô [4, 5].

Xuất phát từ yêu cầu ứng dụng trong các chi tiết vi mô như mao dẫn thủy lực, nghiên cứu này xây dựng mô hình FEM để mô phỏng lực cắt trong quá trình phay rãnh vi mô. Các thông số cắt được thay đổi và so sánh với kết quả từ các nghiên cứu trước, từ đó rút ra kết luận về ảnh hưởng của thông số công nghệ đến lực cắt và khả năng tối ưu hóa quá trình gia công [1-5].

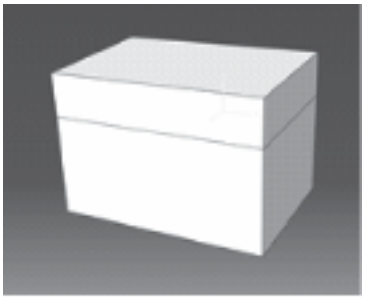
2. MÔ HÌNH HÓA QUÁ TRÌNH PHAY MICRO

2.1. Mô hình hình học của dụng cụ và phôi

Đầu tiên, mô hình hình học của công cụ và phôi được thiết lập bằng cách sử dụng phần mềm NX. Sau đó, các mô hình được nhập vào phần mềm Abaqus. Đường kính của dao cắt là 500μm, bán kính cạnh của dao cắt là 2μm, vật liệu của dụng cụ là cacbua vonfram. Kích thước của phôi là 50mm × 50mm × 3mm. Để cải thiện hiệu quả mô phỏng, giảm thời gian chạy mô phỏng và đảm bảo tính chính xác của kết quả mô phỏng, các mô hình công cụ và phôi được đơn giản hóa trong mô hình. Mô hình công cụ được hiển thị trong Hình 1a và mô hình phôi được hiển thị trong Hình 1b.



(a)



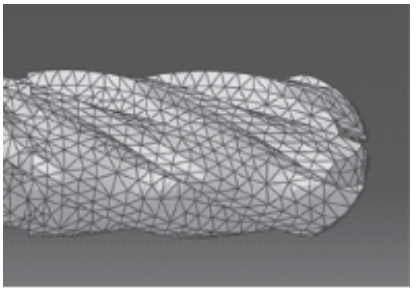
(b)

Hình 1. Mô hình hóa công cụ và phôi bằng phần mềm NX: (a) Công cụ; (b) Phôi.

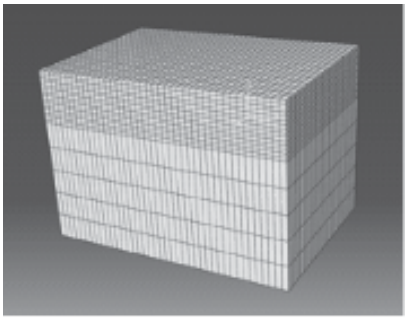
2.2. Chia lưới

Việc chia lưới hợp lý có thể đảm bảo chất lượng của mô phỏng và cũng có thể giảm thời gian chạy mô phỏng. Phôi có hình dạng khối lập phương, chia phôi thành những phần

tử lưới hình dạng nút tứ giác. Công cụ có hình dạng phức tạp, ta nên chia lưới công cụ theo dạng phần tử nút tam giác. Cách chia này sẽ làm quá trình mô phỏng lâu hơn do các phần tử dạng tam giác và tứ giác không cùng dạng ma trận. Nhưng nó sẽ hạn chế được sai số do việc chia lưới, từ đó hạn chế sai số kết quả mô phỏng. Để rút ngắn quá trình mô phỏng, ta chỉ lấy phần đầu công cụ để tiến hành quá trình cắt gọt. Lưới của dao được thể hiện trong hình 2a, lưới của phôi được thể hiện trong hình 2b.



(a)



(b)

Hình 2. Tạo lưới của dụng cụ và phôi: (a) Lưới dụng cụ; (b) Lưới phôi.

2.3. Các thông số gia công

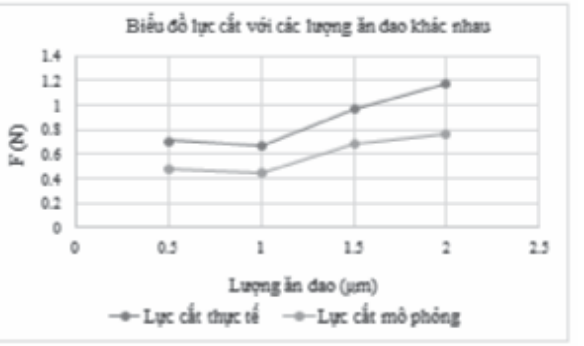
Tốc độ trục chính thay đổi qua các lần mô phỏng giống nhau. Chiều sâu cắt ae không đổi. Nghiên cứu phân tích sự hình thành phoi và lực phay bằng cách chọn các lượng ăn dao khác nhau fz. Việc lựa chọn tham số phay được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số phay micro

Số lần mô phỏng	Tốc độ trục chính (v/ph)	Lượng ăn dao (µm/răng)	Chiều sâu cắt (µm)
1	30,000 (v/ph)	0.5 µm/răng	50 µm
2	30,000 (v/ph)	1 µm/răng	50 µm
3	30,000 (v/ph)	1.5 µm/răng	50 µm
4	30,000 (v/ph)	2 µm/răng	50 µm

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Từ số liệu mô phỏng ứng suất và biến dạng của phần mềm, ta đưa ra được đồ thị về mối quan hệ giữa giá trị lực cắt và lượng ăn dao trong quá trình gia công rãnh vi mô và so sánh lực cắt mô phỏng với lực cắt thực tế từ kết quả của các bài báo quốc tế. Như chúng ta thấy trong biểu đồ, lực cắt mô phỏng khoảng 0.48N khi cắt ở lượng ăn dao là 0.5µm/răng. Lực cắt có chiều hướng giảm đi khi cắt với lượng ăn dao là 1µm/răng. Điều này cho ta thấy, ở lượng ăn dao 0.5µm/răng không có phoi được tạo ra, hoàn toàn xảy ra hiện tượng chèn, cày, chính vì vậy lực cắt cao hơn. Khi lượng ăn dao tăng lên 1µm/răng, bắt đầu có quá trình thoát phoi xảy ra nên lực cắt có phần giảm đi một chút, khoảng 0.45N.



Hình 3. Giá trị lực cắt với lượng ăn dao.

Với lượng ăn dao là 1.5µm/răng, quá trình thoát phoi xảy ra, lực cắt tiếp tục tăng lên mức 0.68 N. Điều này chứng tỏ đã xảy ra quá trình thoát phoi, nhưng vẫn còn hiện tượng chèn, cày, thoát phoi chưa hoàn toàn, vì vậy lực cắt vẫn tăng cao.

Với lượng ăn dao là 2µm/răng, quá trình hình thành phoi xảy ra rõ rệt hơn, lực cắt có phần tăng chậm từ 0.68N lên 0.75N. Điều này cho thấy khi tăng lượng ăn dao trong quá trình gia công, đồng nghĩa với việc tăng lực cắt.

Khi xảy ra hiện tượng mòn dao, lực cắt sẽ theo đó mà tăng đều theo hàm tuyến tính, từ đó đưa ra được đường lối công nghệ cụ thể cho người vận hành máy và kiểm tra dao cụ với từng loại phôi liệu cụ thể.

Quá trình mô phỏng lực cắt trong gia công vi mô bằng phương pháp phần tử hữu hạn có phần thấp hơn so với lực cắt thực tế trong các số liệu ở các bài báo quốc tế. Nguyên nhân được cho là trong quá trình mô phỏng, nhiệt độ trong quá trình gia công được để cố định, hệ số ma sát trong quá trình gia công cũng để cố định. Phôi và dao được mô hình hóa ở dạng lý tưởng, tức là vật liệu là đồng nhất và đẳng hướng, ngoài ra, để quá trình mô phỏng được diễn ra nhanh chóng, thí nghiệm này đã hóa cứng công cụ, coi như công cụ là vật liệu cứng tuyệt đối và không có quá trình mòn cạnh công cụ trong gia công. Các nguyên nhân này đã làm cho lực cắt mô phỏng có phần thấp hơn so với lực cắt gia công thực tế. Tuy nhiên, nó vẫn tăng và giảm theo đúng hàm tuyến tính với lực cắt thực tế. Từ đó có thể thấy kết quả mô phỏng có thể chấp nhận được và có tính đúng đắn trong việc phân tích lực cắt và quá trình hình thành phoi sau gia công.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bài báo này nhằm nhấn mạnh lợi thế của việc sử dụng phần mềm mô phỏng lực cắt trong quá trình gia công vi mô ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn, từ đó giảm thời gian thí nghiệm, tiết kiệm được kinh phí thí nghiệm và kết quả có thể sử dụng được để phân tích các thông số gia công, nhằm đưa ra các thông số công nghệ phù hợp cho quá trình gia công. Từ quá trình hình thành phoi đến việc thay đổi lượng ăn dao dẫn tới sự thay đổi lực cắt. Việc nghiên cứu đặc điểm của lực cắt đóng vai trò quan trọng trong việc gia công vi mô nhằm hạn chế việc gãy công cụ đột ngột, giảm thời gian thí nghiệm và kinh phí thí nghiệm, đưa ra được bộ thông số công nghệ phù hợp đảm bảo chất lượng bề mặt gia công ngay trong quá trình gia công. Các kết luận sau có thể được rút ra sau khi nghiên cứu có kết quả:

1) Bài báo cung cấp một phương pháp gia công mới, ứng dụng những ưu điểm từ phương pháp gia công truyền thống, sử dụng lợi thế hình dáng hình học của công cụ và phương pháp lập trình gia công CNC có thể gia công hầu hết các dạng bề mặt.

2) Các hệ số ma sát, hệ số nhiệt không đổi được sử dụng trong FE phần nào làm kết quả mô phỏng không sát với thí nghiệm thực tế.

3) Việc mô phỏng giúp theo dõi lực cắt trong quá trình gia công, tránh được sự cố công cụ gãy đột ngột, tăng hiệu suất gia công, chất lượng bề mặt ổn định.

4) Kích thước của rãnh vi mô cho thấy rằng quá trình phay vi có khả năng tạo ra các biên dạng vi mô một cách chính xác.

5) Các vấn đề như chất lượng bề mặt,

nhiệt độ trong gia công,... cần được nghiên cứu một cách kết hợp để cho ra mô hình mô phỏng FE sát với thực tế, vẫn đang là một đề tài mở để nghiên cứu sâu hơn.❖

Ngày nhận bài: **05/9/2025**
Ngày phản biện: **15/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. I. Ucun, K. Aslantas, F. Bedir, "*An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy*". Wear, 300(1-2), 8-19, 2013.

[2]. H. Chengming, Y. Shaohua, L. Gang, "*Influence of cutting parameters on residual stresses in face milling*". Applied Mechanics and Materials, 44-47, 3017-3021, 2011.

[3]. W. Zheng, "*Cutting Performance and Failure Mechanisms of Coated Tools when Milling Inconel 718*". Thesis, Shandong University, 2012.

[4]. X. Chen, S. Liu, Y. Chen, "*Influence of micro-milling machining parameters on residual stresses in alumina bioceramics – a three-dimensional finite element simulation study*". Ceramics International, 50(2), 2637-2648, 2024.

[5]. C. Zhang, J. Sun, J. Guo, "*Simulation analysis and experimental study of milling surface residual stress of Ti-10V-2Fe-3Al*". Chinese Journal of Aeronautics, 31(4), 798-806, 2018.

THIẾT KẾ, ĐIỀU KHIỂN VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐẢO GIÓ KHÁC NHAU TRONG SẤY NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

DESIGN, CONTROL, AND EFFECTIVENESS ASSESSMENT OF VARIOUS AIRFLOW REVERSAL TECHNIQUES IN SOLAR DRYING

Hà Anh Tùng
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh
Email: ha-tung@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Sấy năng lượng mặt trời là một giải pháp bền vững và tiết kiệm chi phí để bảo quản nông sản, tuy nhiên, các hệ thống sấy tĩnh truyền thống thường gặp phải vấn đề sấy không đồng đều, dẫn đến giảm chất lượng sản phẩm và hiệu quả sấy thấp. Kỹ thuật đảo gió được xem là một giải pháp hiệu quả để khắc phục nhược điểm này. Bài báo này trình bày chi tiết về việc thiết kế, chế tạo hệ thống sấy năng lượng mặt trời kết hợp bộ điều khiển và đánh giá hiệu quả của 4 phương pháp đảo gió bao gồm: (1)Thổi từ dưới lên; (2) Thổi ngang; (3) Đảo gió tự động theo chiều đứng và (4) Đảo gió tự động theo chiều ngang. Kết quả thực nghiệm trên sản phẩm xoài cắt lát cho thấy phương pháp phân phối dòng không khí sấy tự động đảo chiều theo phương ngang đạt được độ ẩm và chất lượng đồng đều tốt nhất của sản phẩm trên toàn bộ các khay. Nghiên cứu khẳng định tiềm năng của việc thiết kế các hệ thống điều khiển đảo gió trong việc nâng cao hiệu quả và chất lượng của công nghệ sấy năng lượng mặt trời trong thực tế.

Từ khoá: *Sấy năng lượng mặt trời; Collector tấm phẳng; Tấm hấp thụ chéo; Điều khiển tự động; Hiệu quả sấy; Phương pháp đảo gió.*

ABSTRACT

Solar drying is a sustainable and cost-effective solution for agro-product preservation; however, traditional static drying systems often suffer from non-uniform drying, leading to reduced product quality and low drying efficiency. The airflow reversal technique is considered an effective solution to overcome this drawback. This paper presents the design and fabrication of a solar drying system integrated with a controller, and evaluates the effectiveness of four airflow strategies: (1) Upward flow; (2) Horizontal flow; (3) Automatic vertical airflow reversal; and (4) Automatic horizontal airflow reversal. Experimental results on sliced mango showed that the automatic horizontal airflow reversal method achieved the best uniformity in moisture content and product quality across all trays. The study confirms the potential of designing airflow reversal control systems to enhance the efficiency and quality of solar drying technology in practice.

Keywords: *Solar drying; Flat plate collector; Cross-flow absorber plate; Automatic control; Drying efficiency; Airflow reversal method.*

1. TỔNG QUAN

Tổn thất sau thu hoạch là một trong những thách thức nghiêm trọng nhất đối với an ninh lương thực toàn cầu, đặc biệt là ở các nước đang phát triển nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới. Ước tính có tới 20-40% sản lượng nông sản, đặc biệt là trái cây và rau quả, bị hư hỏng trước khi đến tay người tiêu dùng do hàm lượng ẩm cao, tạo điều kiện cho vi sinh vật phát triển và các phản ứng enzyme không mong muốn [1]. Sấy là phương pháp bảo quản truyền thống và hiệu quả nhất để giảm thiểu tổn thất này bằng cách làm giảm lượng nước trong vật liệu, qua đó ức chế sự phát triển của vi sinh vật và kéo dài thời gian bảo quản [2].

Trong nhiều thập kỷ, phơi nắng là phương pháp phổ biến nhất do chi phí đầu tư bằng không. Tuy nhiên, phương pháp này tồn tại nhiều nhược điểm chí mạng: thời gian sấy kéo dài, phụ thuộc hoàn toàn vào thời tiết, và sản phẩm dễ bị ô nhiễm bởi bụi bẩn, côn trùng và động vật [3]. Các hệ thống sấy công nghiệp sử dụng nhiên liệu hóa thạch hoặc điện lưới, tuy khắc phục được các vấn đề về vệ sinh và thời gian sấy, nhưng lại tạo ra gánh nặng lớn về chi phí năng lượng và phát thải khí nhà kính, đi ngược lại xu hướng phát triển bền vững. Trong bối cảnh đó, sấy năng lượng mặt trời nổi lên như một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn. Công nghệ này kết hợp các ưu điểm của sấy tự nhiên (chi phí vận hành thấp, thân thiện môi trường) và sấy công nghiệp, đặc biệt là loại đối lưu cưỡng bức gián tiếp, đã được chứng minh là cải thiện đáng kể tốc độ sấy và chất lượng sản phẩm so với phơi nắng [4].

Mặc dù có nhiều ưu điểm, các hệ thống sấy năng lượng mặt trời kiểu buồng hoặc kiểu khay truyền thống vẫn đối mặt với một tồn đọng kỹ thuật lớn: sự không đồng đều trong quá trình sấy [5]. Trong một hệ thống sấy tĩnh điển hình, không khí nóng được thổi qua các khay chứa vật liệu. Các lớp vật liệu ở gần lối vào của không khí nóng sẽ tiếp xúc với không khí có nhiệt độ cao nhất và độ ẩm tương đối thấp nhất, dẫn đến tốc độ sấy nhanh hơn đáng kể. Ngược lại, khi không khí di chuyển qua các lớp vật liệu, nó bị nguội dần và bão hòa hơi nước, làm giảm khả năng nhận ẩm ở các lớp vật liệu phía sau [6]. Hậu quả của việc sấy không đồng đều là rất rõ ràng: một phần sản phẩm bị sấy quá khô, dẫn đến hao hụt dinh dưỡng, biến màu và lãng phí năng lượng, trong khi một phần khác vẫn còn ẩm, dễ bị nấm mốc và hư hỏng trong quá trình bảo quản [7].

Để giải quyết vấn đề này, các nhà nghiên cứu đã đề xuất nhiều giải pháp. Một số nghiên cứu tập trung vào việc tối ưu hóa thiết kế khí động học của buồng sấy, chẳng hạn như sử dụng các tấm hướng dòng hoặc thiết kế lại khoang phân phối khí để đạt được sự phân bố không khí đồng đều hơn [8, 9]. Tuy nhiên, các giải pháp thiết kế cơ khí tĩnh này thường phức tạp và chỉ hiệu quả ở một mức độ nhất định, vì đặc tính của vật liệu sấy (ví dụ: độ co ngót, độ rỗng) liên tục thay đổi trong quá trình sấy.

Một phương pháp linh hoạt và hiệu quả hơn là chủ động thay đổi hướng dòng chảy của không khí sấy, hay còn gọi là kỹ thuật đảo gió. Nguyên lý của phương pháp này là đảo ngược định kỳ hướng của luồng không khí nóng, khiến cho các lớp vật liệu "nóng" và "lạnh" (hay "khô" và "ẩm") luân phiên đổi vai trò cho nhau, từ đó làm giảm chênh lệch nhiệt độ và độ ẩm trong toàn bộ buồng sấy [10]. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện có về đảo gió vẫn còn nhiều hạn chế. Hầu hết các công trình chỉ so sánh sấy một chiều với một phương pháp đảo gió duy nhất, thường là đảo gió theo chu kỳ thời gian cố định [11]. Có rất ít nghiên cứu thực hiện một ☞

so sánh đối chứng trực tiếp hiệu quả của các phương pháp đảo gió khác nhau (ví dụ: đảo gió theo chiều đứng so với đảo gió theo chiều ngang) trong cùng một điều kiện vận hành. Hơn nữa, việc xác định chu kỳ đảo gió tối ưu còn mang tính thử nghiệm và chưa có các hệ thống điều khiển "thông minh" thực sự, có khả năng tự động ra quyết định đảo gió dựa trên trạng thái thực của vật liệu sấy.

Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm lấp đầy khoảng trống đó. Mục tiêu của bài báo là (1) Thiết kế và chế tạo một hệ thống sấy năng lượng mặt trời linh hoạt, được trang bị bộ điều khiển tự động cho phép thực hiện nhiều phương pháp đảo gió khác nhau; (2) Đánh giá và so sánh một cách có hệ thống hiệu quả của bốn phương pháp phân phối và đảo gió (Thổi từ dưới lên, Thổi ngang, Đảo gió tự động theo chiều đứng, và Đảo gió tự động theo chiều ngang); và (3) Xác định phương pháp tối ưu nhất dựa trên các tiêu chí về độ đồng đều của sản phẩm, tốc độ sấy và chất lượng sản phẩm sấy. Kết quả của nghiên cứu này sẽ cung cấp một cơ sở khoa học và kỹ thuật quan trọng cho việc thiết kế các hệ thống sấy năng lượng mặt trời thế hệ mới, hiệu quả và chất lượng cao hơn.

2. QUÁ TRÌNH THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO HỆ THỐNG SẤY NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

Bước đầu tiên của quá trình thiết kế hệ thống sấy là xác định kích thước buồng sấy dựa trên yêu cầu từ khối lượng, thời gian sấy, độ ẩm... của sản phẩm sấy, như trình bày trong Bảng 1.

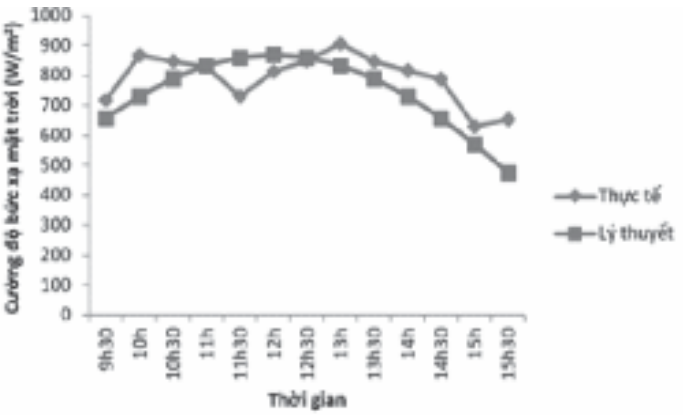
Bảng 1. Thông số thiết kế ban đầu cho hệ thống sấy

STT	Thông số thiết kế	Giá trị
1	Khối lượng xoài keo	0.5 kg/mẻ
2	Bề dày lát xoài trước khi sấy	2 mm
3	Thời gian sấy	6 giờ
4	Độ ẩm ban đầu	83.5%
5	Độ ẩm sau cùng	20%
6	Tốc độ tác nhân sấy	0.5 m/s
7	Nhiệt độ trung bình của không khí vào buồng sấy (dựa vào thử nghiệm sơ bộ)	50°C

Từ các giá trị yêu cầu này, kích thước buồng sấy được xác định như sau:

- Chiều rộng buồng sấy: W = 0.28 m;
- Chiều dài buồng sấy: L = 0.45 m;
- Chiều cao buồng sấy: H = 0.9 m;
- Số khay sấy: 5 khay;
- Vật liệu chế tạo: Gỗ.

Các tính toán lý thuyết về cường độ bức xạ mặt trời lên mặt phẳng ngang [12] cho địa điểm thử nghiệm tại Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia thành phố Hồ Chí Minh với thời gian trong khoảng tháng 6 và tháng 7 cũng cho thấy sự tương đồng với kết quả đo đạc tại chỗ, như thể hiện trong Hình 1.

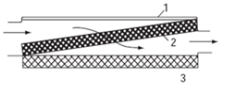


Hình 1. Đồ thị so sánh cường độ bức xạ mặt trời theo tính toán lý thuyết và đo thực tế

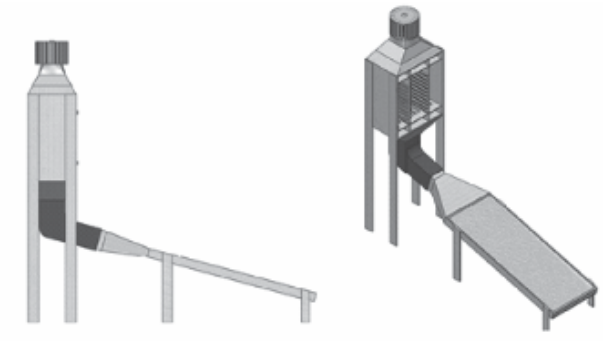
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Với kích thước buồng sấy đã có, kết hợp với điều kiện ngoài trời chọn tại địa điểm thí nghiệm có nhiệt độ ngoài trời 34°C, độ ẩm 70%, bức xạ nhiệt trung bình 700 W/m² như xác định trong khoảng thời gian thử nghiệm, kích thước bộ thu năng lượng mặt trời kiểu tấm phẳng với tấm hấp thụ dạng chéo cũng được tính toán từ các phương trình truyền nhiệt và cân bằng năng lượng [12] và trình bày trong Bảng 2.

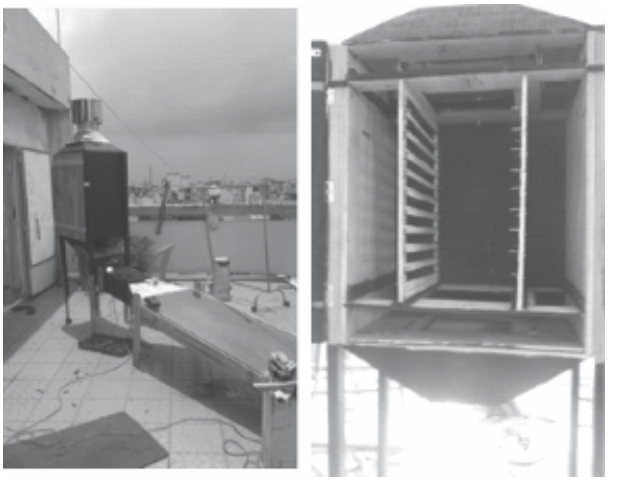
Bảng 2. Thông số tính toán của bộ thu năng lượng mặt trời dạng tấm phẳng

STT	Thông số thiết kế	Giá trị
1	Chiều dài collector	1.6 m
2	Chiều rộng collector	0.6 m
3	Chiều cao	0.2 m
4	Tấm hấp thụ có lỗ và đặt chéo như hình bên	

Từ các thông số thiết kế buồng sấy và collector đã xác định, hệ thống sấy năng lượng mặt trời cho xoài keo cắt lát được mô phỏng 3D như Hình 2 và sau đó được chế tạo như Hình 3.



Hình 2. Mô phỏng 3D của hệ thống sấy năng lượng mặt trời.

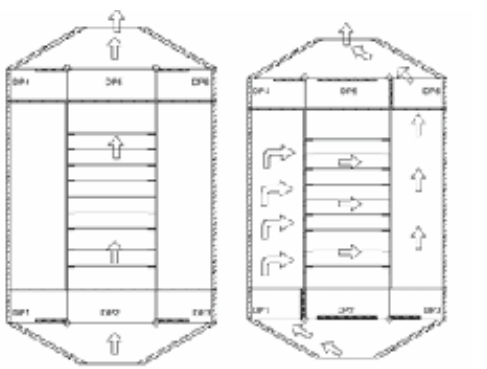


Hình 3. Hình ảnh thực tế của hệ thống sấy năng lượng mặt trời.

3. THIẾT KẾ HỆ THỐNG PHÂN PHỐI GIÓ TỰ ĐỘNG VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN

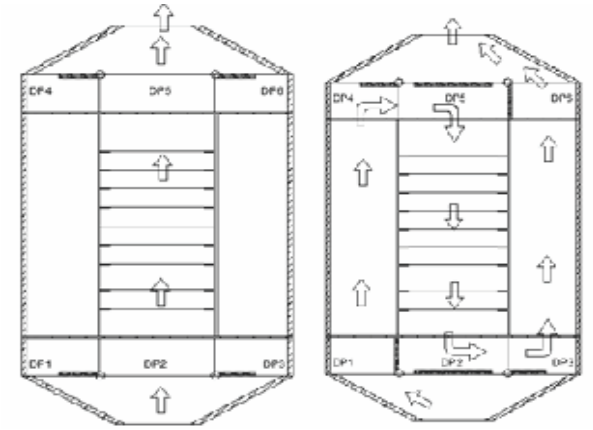
Để khảo sát ảnh hưởng của kiểu phân phối gió đến chất lượng sấy, buồng sấy được thiết kế bố trí các vách ngăn dòng, kết hợp với 6 van gió để tạo thành 4 phương án phân phối gió khác nhau như sau:

- Phương án 1: Dòng tác nhân sấy đi theo kiểu từ dưới buồng sấy đi qua các khay sấy rồi ra khỏi buồng sấy từ phía trên. Để thực hiện phương án này, khi vận hành damper 1, 3, 4, 6 đóng; damper 2, 5 mở, đồng thời sử dụng 2 tấm đỡ khay không có rãnh (Hình 4).

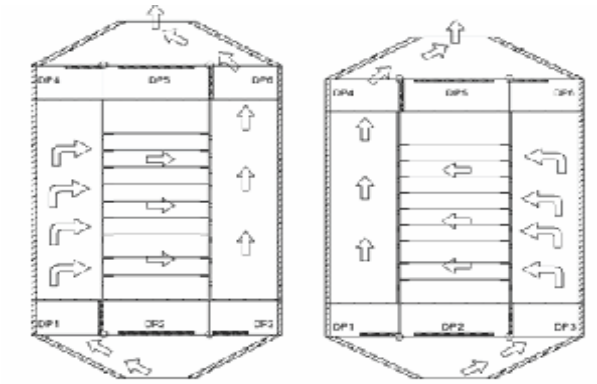


a) Thổi từ dưới lên b) Thổi ngang

Hình 4. Hai phương pháp phân phối gió truyền thống ☞



Hình 5. Phương pháp c) Đảo gió lên và xuống theo chu kỳ



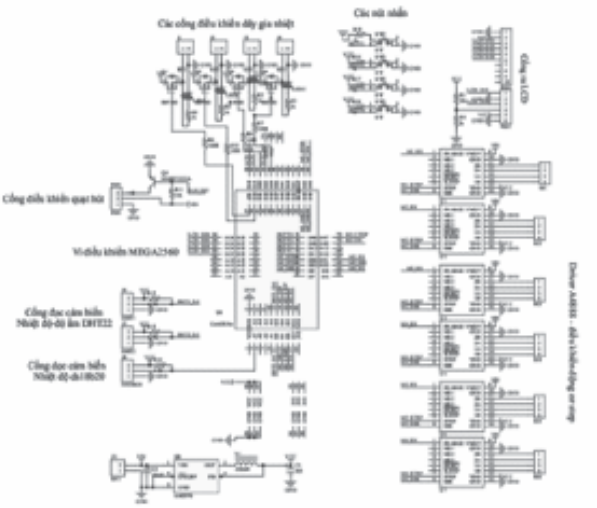
Hình 6. Phương pháp d) Đảo gió ngang theo hai chiều trái và phải theo chu kỳ

- Phương án 2: Dòng tác nhân sấy đi theo kiểu từ trái buồng sấy đi qua các khay sấy, qua phải rồi ra khỏi buồng sấy. Để thực hiện phương án này, cách điều khiển của damper như sau: damper 2, 3, 4, 5 đóng, damper 1, 6 mở và sử dụng tấm đỡ khay có rãnh (Hình 4).

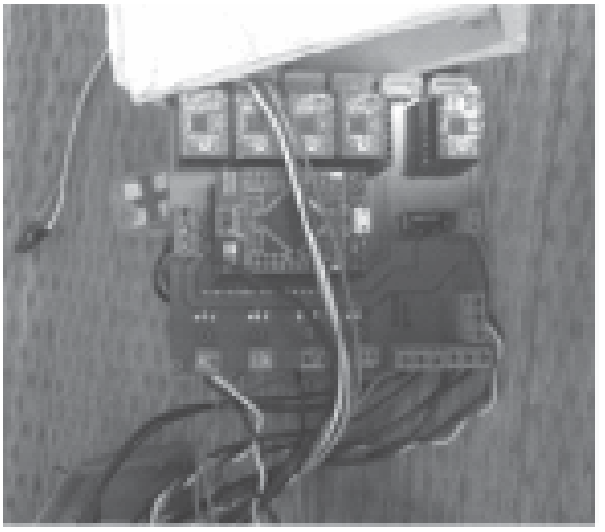
- Phương án 3: Dòng tác nhân sấy đi theo kiểu từ dưới lên kết hợp trên xuống (có luân phiên đảo chiều). Để thực hiện phương án này, các damper 1, 3, 4, 6 đóng, trong khi đó damper 2, 5 mở. Sau thời gian nhất định đảo chiều damper 2, 3, 4, 5 đóng, damper 1, 6 mở (và cần sử dụng tấm đỡ khay không có rãnh) (Hình 5).

- Phương án 4: Dòng tác nhân sấy đi theo kiểu từ trái qua phải và phải qua trái (có luân phiên đổi chiều). Để thực hiện phương án 4, cách điều khiển của damper như sau: damper 2, 3, 4, 5 đóng, damper 1, 6 mở. Sau thời gian nhất định đảo chiều damper 1, 2, 5, 6 đóng, damper 3, 4 mở (trường hợp này sẽ sử dụng tấm đỡ khay không có rãnh) (Hình 6).

Ngoài ra, để việc so sánh và đánh giá bốn phương pháp phân phối gió trên trong điều kiện sấy như nhau, cần duy trì quá trình cấp nhiệt ổn định cho buồng sấy. Do nhiệt độ không khí vào buồng sấy không ổn định vì ảnh hưởng bởi điều kiện thay đổi liên tục từ bức xạ mặt trời, thời tiết… gió trước khi vào buồng sấy sẽ được điều chỉnh nhiệt độ không đổi 50°C nhờ việc gia nhiệt thêm từ một điện trở lắp trên đường gió vào buồng sấy. Các giá trị tín hiệu từ cảm biến nhiệt độ lắp trên đường gió vào sẽ được truyền về bộ điều khiển trung tâm và tùy theo giá trị mà điều khiển điện trở để kiểm soát nhiệt độ vào buồng sấy. Bộ điều khiển trung tâm cũng được kết nối với màn hình Led để hiển thị các giá trị đo đạc, cũng như điều khiển tốc độ quạt và 6 động cơ bước giúp đóng, mở 6 dampers phân phối dòng không khí theo bốn phương pháp đã đề xuất.



ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

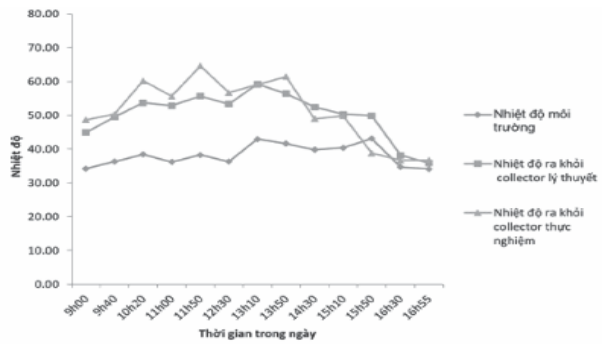


Hình 7. Hình ảnh bản thiết kế và mạch điều khiển trung tâm thực tế sau khi lắp ráp.

Hình 7 thể hiện Board điều khiển tổng Arduino Mega A2560 được kết nối đến các cảm biến nhiệt độ, độ ẩm, màn hình hiển thị và 6 động cơ bước thông qua driver bước A4988.

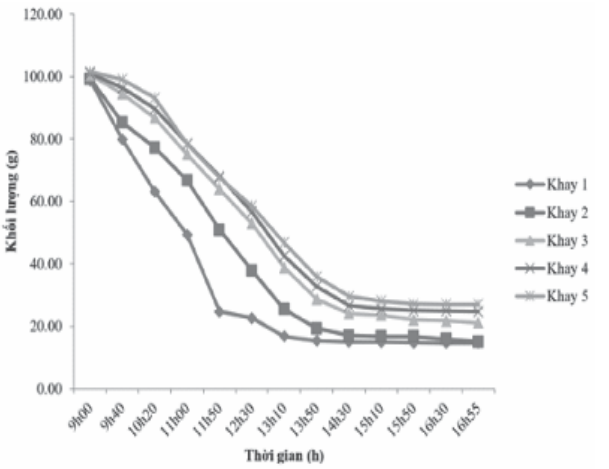
4. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

Hình 8 trình bày biểu đồ so sánh nhiệt độ ra khỏi collector lý thuyết với đo đạc thực tế trong thí nghiệm. Kết quả cho thấy có sự tương đồng giữa tính toán lý thuyết và dữ liệu đo đạc thực tế, chứng tỏ tính hợp lý trong các thông số tính toán của hệ thống sấy năng lượng mặt trời đã thiết kế.



Hình 8. Biểu đồ so sánh nhiệt độ ra khỏi collector lý thuyết với thực tế thí nghiệm.

Khi tiến hành sấy theo phương pháp truyền thống thổi gió nóng vào buồng sấy theo hướng từ dưới lên, kết quả thực nghiệm cho thấy có sự khác biệt khá lớn giữa tốc độ giảm ẩm trên các khay. Theo chiều từ dưới lên, các miếng xoài đặt trên khay số 1 (thấp nhất) sẽ khô nhanh nhất, tiếp theo đó lần lượt là khay số 2, 3, 4 và 5 (lắp trên cùng).

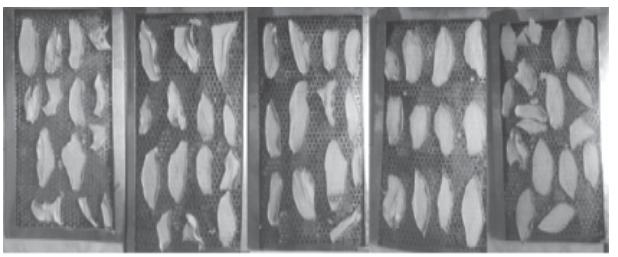


Hình 9. Sự giảm ẩm không đều của 5 khay khi thổi gió theo phương pháp truyền thống từ dưới lên (Phương pháp 1).

Để đánh giá sự khác biệt giữa bốn phương pháp phân phối gió, thực nghiệm sấy được tiến hành cho bốn phương pháp trên với nhiệt độ không khí cấp vào buồng sấy được duy trì gần như không đổi ở 50°C, tốc độ gió 0.5 m/s thông qua bộ điều khiển trung tâm kết nối với quạt, các cảm biến nhiệt độ, độ ẩm và 6 động cơ bước giúp đóng, mở các dampers một cách tự động theo phương pháp phân bố gió đã chọn. Bảng 2 cho thấy trong bốn phương pháp phân phối gió, phương pháp thổi ngang có đảo chiều giúp vật liệu sấy trên các khay đạt độ ẩm đồng đều tốt nhất, tiếp theo là phương án thổi ngang không đảo chiều, còn hai phương án còn lại rõ ràng không hiệu quả vì độ ẩm giữa các khay chênh nhau quá nhiều. ☞

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm xác định độ ẩm vật liệu sấy trên từng khay cho bốn phương án phân phối gió (sau 3 giờ sấy).

	Thời điểm	Độ ẩm khay (%)					% Sai lệch
		Khay 1	Khay 2	Khay 3	Khay 4	Khay 5	
	Ban đầu	**83.50**	**83.50**	**83.50**	**83.50**	**83.50**	
Phương án 1	Kết thúc	10.63	26.88	26.88	35.73	56.42	81
Phương án 2		27.14	39.82	39.82	33.13	42.48	36
Phương án 3		18.31	30.53	30.53	48.35	38.49	62
Phương án 4		27.70	33.27	33.27	33.20	39.92	31



Hình 10. Sản phẩm sấy trên 5 khay với phương pháp phân phối gió kiểu 4.

Hình 10 chụp ảnh sản phẩm sau khi sấy trên 5 khay theo phương pháp phân phối gió kiểu thổi ngang có đảo dòng theo chu kỳ. Màu sắc và hương vị của các miếng xoài sau khi sấy cho thấy chất lượng sản phẩm trên các khay là khá tương đồng, thể hiện tính ưu việt của phương pháp phân bố gió kiểu thổi ngang có đảo dòng so với các phương pháp còn lại.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày chi tiết quá trình thiết kế, chế tạo và đánh giá hiệu quả hệ thống sấy năng lượng mặt trời được tích hợp bộ điều khiển tự động. Hệ thống được thiết kế linh hoạt để có thể thực hiện và so sánh bốn phương pháp phân phối và đảo gió khác nhau, nhằm khắc phục nhược điểm sấy không đồng đều của các hệ thống sấy tĩnh truyền thống. Kết quả thực nghiệm sấy xoài cắt lát trong điều kiện nhiệt độ không khí vào buồng sấy được duy trì ổn định đã cho thấy trong số bốn phương pháp được so sánh, phương pháp phân phối dòng không khí sấy tự động đảo chiều theo phương ngang (Phương án 4) đạt được độ đồng đều về độ ẩm, màu sắc và hương vị của vật liệu sấy trên cả 5 khay là tốt nhất. Nghiên cứu đã khẳng định rõ ràng tiềm năng và hiệu quả của việc áp dụng kỹ thuật đảo gió tự động, có thể xem xét như một giải pháp hiệu quả để nâng cao đáng kể độ đồng đều và chất lượng sản phẩm cho công nghệ sấy năng lượng mặt trời trong thực tế.

Lời cảm ơn:

Tác giả trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ về thời gian và cơ sở vật chất từ Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh (HCMUT-VNU) cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **14/10/2025**
Ngày phản biện: **28/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Calín-Sánchez Á., Lipan L., Cano-Lamadrid M., Kharaghani A., Masztalerz K., Carbonell-Barrachina Á.A. and Figiel A., "*Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits*". Vegetables and Aromatic Herbs, Foods, 9(9), 2020.

[2]. Surendra P., Jain D., Santra P., and Singh, A. K., "*Use of solar energy in agricultural production and processing*". Indian Farming, 68, No. 9, 2018.

[3]. Kimaro D., Nyangarika A. and Kivevele T., "*Uncovering socioeconomic insights of solar dryers for sustainable agricultural product preservation: A systematic review*". Heliyon, 10(23), 2024.

[4]. Rizalman, M.K., Moung, E.G., Dargham, J.A., Jamain, Z., Yaakub, N.A.M. and Farzamnia, A., "*A review of solar drying technology for agricultural produce*". Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 30(3), 2023.

[5]. Singh, P. and Gaur, M.K., "*Review on development, recent advancement and applications of various types of solar dryers*". Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 46(1), 2024.

[6]. Kidane, H., Farkas, I. and Buzás, J., "*Enhancing the drying uniformity in solar drying systems: computational and experimental study*". International Journal of Thermofluids, 2025.

[7]. Precoppe M., Janjai S., Mahayothee B. and Müller J., "*Batch uniformity and energy efficiency improvements on a cabinet dryer suitable for smallholder farmers*". J. Food Sci. Technol., 52(8), 2015.

[8]. Misha, S., Mat, S., Ruslan, M.H., Sopian, K. and Salleh, E., "*The prediction of drying uniformity in tray dryer system using CFD simulation*". International Journal of Machine Learning and Computing, 3(5), 2013.

[9]. Kidane, H., Farkas, I. and Buzás, J., "*Enhancing the drying uniformity in solar drying systems: computational and experimental study*". International Journal of Thermofluids, 2025.

[10]. Tchaya, G.B., Kamta, M. and Kapseu, C., "*Improvement of an indirect solar dryer with forced convection by variation of airflow mode*". International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 4(1), 2014.

[11]. Senger, M.K.S., Dewangan, A.K., Dutt, N. and Yadav, A.K., "*Research advances in solar dryer technologies integrated with solar air heater: a state-of-the art review on design variations, performance and feasibility assessments*". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 149(22), 2024.

[12]. Nguyễn, T. B., "*Năng lượng tái tạo và sự phát triển bền vững*". NXB. Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh, 2016.

NGHIÊN CỨU HOẠCH ĐỊNH TUYẾN PHÂN PHỐI MÁY HỖ TRỢ THỞ OXI CHO CÁC BỆNH VIỆN: NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG DỰA TRÊN VRPTW TẠI THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

A CASE STUDY OF ROUTING OXYGEN CONCENTRATOR FOR HOSPITAL: A VRPTW-BASED PLANNING AND SIMULATION STUDY AT HO CHI MINH CITY

Lê Thị Yến Vy
Khoa Kỹ thuật và Quản lý Công nghiệp, Trường Đại học Quốc tế,
Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
Email: levy.vt294@gmail.com

TÓM TẮT

Máy hỗ trợ thở oxi là một trong những sản phẩm cơ khí đóng vai trò quan trọng trong trang thiết bị y tế tại các bệnh viện, kho phân phối máy hỗ trợ thở oxi giữ vai trò then chốt để giao đúng hạn và sử dụng hiệu quả nguồn lực khan hiếm. Chương trình phân phối máy hỗ trợ thở cho các bệnh viện thuộc khu vực Thành phố Hồ Chí Minh được mô hình hóa dưới dạng Bài toán Định tuyến Xe có ràng buộc tải (VRP) với nhu cầu hằng ngày và một kho trung tâm. Việc điều phối thủ công qua điện thoại dễ dẫn đến giao trễ, sử dụng xe không đồng đều và phát sinh quãng đường dư thừa.

Bài báo xây dựng mô hình Mixed Integer Linear Programming (MILP) gọn để tạo tuyến khả thi tối thiểu hóa quãng đường, cùng một luồng dữ liệu đơn giản chuyển danh sách trạm (địa chỉ/ tọa độ và nhu cầu) thành ma trận khoảng cách. Tuyến tối ưu được xuất lên bản đồ web nhẹ, hỗ trợ triển khai hiện trường và giám sát. Trên ca thực tế với một xe và nhóm trạm thuộc Quận 5, Quận 10, mô hình giải trong vài giây trên máy tính phổ thông, cho tuyến ngắn và rõ ràng hơn so với lập kế hoạch cảm tính, đồng thời trực quan hóa giúp điều hành.

Kết quả cho thấy tính khả thi của quy trình "tối ưu hoá và trực quan hoá" cho phân phối máy hỗ trợ thở oxi trong tình huống khan hiếm và khẩn cấp. Hướng phát triển gồm mở rộng sang cửa sổ thời gian (VRPTW), đa xe, thời gian di chuyển theo mạng đường thực, và tái hoạch định động từ dữ liệu tồn kho gần thời gian thực.

Từ khóa: *VRPTW; MILP; VRP; Máy hỗ trợ thở oxi; Bệnh viện.*

ABSTRACT

Oxygen ventilator is one of the mechanical products that plays an important role in medical equipment in hospitals, oxygen ventilator distribution warehouse plays a role then lock to timely transaction and efficient use of scarce energy resources. The Time Attendance Machine support distributor for hospitals in Ho Chi Minh City area is modeled as a Vehicle Routing Problem with load function (VRP) required for regular day and central warehouse. Manual control via phone

easily leads to silly learning, uneven vehicle utilization and generation of redundant road bowl.

The paper builds a compact Mixed Integer Linear Programming (MILP) model to create the minimum route, along with a simple data flow that converts the list of points (address/to speed and demand) into matrix distances. The optimized route is exported to a lightweight web map, supporting field development and monitoring. In a real case with a vehicle and a group of stations in District 5 and District 10, the model solved in seconds on a general computer the information, giving a shorter and clearer than the intuitive planning, and directly transforming it to help the operation.

The results show the feasibility of the "optimization and direct" process for the ventilator dispenser in the situation of scarcity and emergency. Development directions include expansion to time windows (VRPTW), multiple vehicles, real-time network transfer times and dynamic sustainability from data that exists in near real time.

Keywords: *VRPTW; MILP; VRP; Oxygen ventilator; Hospital.*

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh phân phối máy hỗ trợ thở oxi thời dịch, hoạch định tuyến là mắt xích kết nối kế hoạch cung-cầu với vận hành giao nhận hằng ngày. Trường hợp Máy hỗ trợ thở tại Thành phố Hồ Chí Minh có một kho trung tâm cấp máy hỗ trợ thở oxi cho mạng lưới trạm bệnh viện ở nội đô, nhu cầu biến động theo ngày và thời gian phục vụ tại điểm nhận. Nếu điều phối thủ công dựa vào điện thoại và kinh nghiệm, hệ thống dễ phát sinh giao trễ, quãng đường dư thừa và sử dụng phương tiện không đồng đều. Để khắc phục, nghiên cứu tiếp cận bài toán dưới dạng VRP có ràng buộc tải: mỗi trạm có nhu cầu, thời gian phục vụ; xe xuất phát từ một kho, mục tiêu là tối thiểu hóa tổng quãng đường đi kèm các ràng buộc luồng và năng lực.

Thực tế vận hành cho thấy nhiều hạn chế của cách làm cũ: tồn kho trạm theo dõi bằng Excel/Drive nên thiếu đồng bộ, tuyến đường được cắt theo phản ứng khi trạm báo thiếu máy hỗ trợ thở oxi, chưa tối ưu hành trình nhiều điểm. Một số đợt phải huy động nhiều xe tải nhỏ để phục vụ ít trạm, làm tăng chi phí và rủi ro kẹt xe giờ cao điểm. Hơn nữa, việc không có mốc giao cố định khiến điều độ phân tán, khó gom nhu cầu theo lộ trình hợp lý. Những vấn đề này đặt ra nhu cầu chuẩn hóa quy trình lập kế hoạch dựa trên tối ưu hóa, đồng thời trực quan hóa kết quả để hỗ trợ triển khai hiện trường.

Nghiên cứu xây dựng mô hình MILP cho VRP nhằm tạo tuyến khả thi, rút ngắn tổng quãng đường, với dữ liệu đầu vào gồm tọa độ, nhu cầu và thời gian phục vụ. Ma trận khoảng cách được tính tự động từ tọa độ; lời giải được xuất lên bản đồ web để đội vận hành dễ theo dõi lộ trình. Thiết kế vận hành áp dụng hai mốc cắt lệnh trong ngày (08:00 và 16:00) để gom đơn và tái lập lịch nhanh khi dữ liệu cập nhật. Kết quả thí điểm cho thấy thời gian tính toán ngắn, tuyến rõ ràng và giảm chi phí so với điều phối cảm tính; đồng thời làm nền cho mở rộng đa xe, tích hợp thời gian di chuyển theo mạng đường và tái hoạch định động.



Hình 1. Sơ đồ mô tả về quy trình vận chuyển của kho máy hỗ trợ thở oxi.

2. ĐỀ XUẤT NGUYÊN LÝ HOẠCH ĐỊNH TUYẾN CỦA VRPTW

2.1. Nguyên lý làm việc

VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows) mô tả việc tổ chức lộ trình giao nhận từ một kho đến nhiều điểm phục vụ, khi mỗi điểm có nhu cầu, thời gian phục vụ tại chỗ và một khoảng thời gian cho phép đến – phục vụ. Xe có thể đến sớm và chờ đến lúc cửa sổ mở, nhưng không được phục vụ trễ sau thời điểm đóng [1]. Đồng thời phải tôn trọng giới hạn tải của phương tiện và quy định ca làm việc/tổng thời gian hành trình.

Dữ liệu đầu vào điển hình gồm: danh sách điểm phục vụ với nhu cầu và cửa sổ thời gian, thời gian phục vụ tại điểm, thông tin đội xe (sức chứa, khung giờ làm việc), cùng ma trận thời gian/ khoảng cách giữa các điểm và kho (từ tọa độ hoặc mạng đường). Mục tiêu phổ biến là tối thiểu hóa tổng quãng đường hoặc tổng thời gian di chuyển, đồng thời bảo đảm tất cả các điểm được phục vụ đúng cửa sổ [4].

Nguyên lý vận hành thực hiện theo chu trình: [2] (1) gom nhu cầu theo đợt cắt lệnh trong ngày để có tập đơn ổn định; (2) tạo ma trận thời gian/ khoảng cách; (3) kiểm tra khả thi sơ bộ theo cửa sổ thời gian và tải xe; (4) lập kế hoạch tuyến cho đội xe, sắp xếp thứ tự thăm các điểm sao cho khi cộng dồn di chuyển và thời gian phục vụ, thời điểm đến mỗi điểm vẫn nằm trong cửa sổ cho phép; (5) xuất kế hoạch dưới dạng danh sách lộ trình kèm ETA từng điểm và trực quan hóa trên bản đồ để dễ triển khai; (6) khi dữ liệu cập nhật (nhu cầu thay đổi, phát sinh điểm mới), lặp lại quy trình cho đợt kế tiếp. Cách tiếp cận này giúp cân bằng giữa tính đúng hạn (tuân thủ cửa sổ) và hiệu quả vận hành (giảm quãng đường/chi phí), phù hợp cho các tình huống giao nhận y tế cần phản ứng nhanh.



Hình 2. Sơ đồ miêu tả về nguyên lý làm việc của VRPTW

2.2. Các thông số cơ bản của hoạch định tuyến của VRPTW

Để làm rõ đặc điểm của hai cách tiếp cận, nghiên cứu trình bày các thông số cơ bản khi áp dụng mô hình MILP cho VRPTW và (nếu cần mở rộng) khung heuristics dùng cho vận hành hằng ngày [3].

Trong khi đó, heuristics (khung tham chiếu khi cần mở rộng quy mô/đáp ứng tái hoạch định nhanh) sử dụng các tham số đầu vào tương tự: danh sách điểm với nhu cầu và cửa sổ thời gian, ma trận thời gian/khoảng cách, thời gian phục vụ và thông tin đội xe. Nguyên tắc vận hành điển hình là kiến tạo tuyến theo ưu tiên động: ở mỗi bước, lập "tập ứng viên khả thi" thỏa đồng thời ba điều kiện (còn tải, đến kịp trước b_i, chi phí di chuyển thấp), chèn điểm kế tiếp vào vị trí hợp lệ nhất, rồi tinh chỉnh cục bộ để rút ngắn hành trình nhưng vẫn tuân thủ cửa sổ. Cơ chế này giảm đáng kể độ phức tạp tính toán, cho phép sinh tuyến khả thi rất nhanh phục vụ các đợt cắt lệnh trong ngày; phần MILP vẫn đóng vai trò chuẩn tham chiếu và kiểm chứng chất lượng khi so sánh.

Bảng 1. Các thông số cơ bản của bài toán VRPTW

k	Đại diện cho phương tiện là xe tải
i,j	Những điểm đầu
C	Sức chứa của xe k
s i	Thời gian phục vụ của khách hàng i
c ij	Khoảng cách di chuyển từ đỉnh i đến đỉnh j
t ij	Thời gian di chuyển từ đỉnh i đến đỉnh j
d i	Nhu cầu của khách hàng i
[ai,bi]	Khoảng thời gian khách hàng i cần được phục vụ
M	Hằng số lớn
E	Thời gian khởi hành sớm nhất có thể từ kho
L	Thời gian đến muộn nhất có thể
X ijk	Bằng 1 nếu cung (i, j) được xe k sử dụng; và bằng 0 nếu ngược lại
T ik	Thời điểm xe k bắt đầu phục vụ khách hàng i; 0 nếu xe không đến đón khách hàng i

3. MÔ PHỎNG

3.1. Xây dựng mô hình mô phỏng

Bài toán VRPTW được mô hình hóa và giải bằng CPLEX với mục tiêu tối thiểu hóa tổng quãng đường dưới các ràng buộc thăm một lần, bảo toàn luồng depot-trạm-depot, không vượt tải và tuân thủ cửa sổ thời gian (đến sớm chờ, không phục vụ trễ). Dữ liệu đầu vào (danh sách trạm, nhu cầu, thời gian phục vụ, cửa sổ, ma trận khoảng cách/thời gian) được chuẩn hóa trong Excel và nạp vào mô hình; vận hành theo hai mốc cut-off 08:00 và 16:00 để gom nhu cầu và chạy tối ưu theo đợt. Kết quả trả về là chuỗi ghé thăm kèm ETA/ETD cho triển khai hiện trường [3]. ☞

Bảng 2. Mô hình VRPTW được lập trình khi giải bằng phần mềm CPLEX

No.	Equation	Constraint
1	$\sum_{k\in K}\sum_{i\in V}\sum_{j\in V} c_{ij}x_{ijk}$	Giảm thiểu tổng quãng đường di chuyển
2	$\sum_{k\in K}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n+1} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in D,$	Áp đặt rằng chỉ có một xe k rời khỏi khách hàng i và khách hàng i được ghé thăm đúng một lần.
3	$\sum_{j\in D} x_{o,i,k} = 1 \quad \forall k \in K,$	Nêu rằng mỗi xe được vận hành theo một lộ trình liên tục, bắt đầu từ một kho, ghé thăm khách hàng, sau đó quay trở lại kho.
4	$\sum_{\substack{i=0\\ i\neq j}}^{n} x_{ijk} - \sum_{\substack{i=1\\ j\neq i}}^{n+1} x_{ijk} = 0 \quad \forall k \in K, \forall j \in D$	
5	$\sum_{i\in D} x_{i,(n+1),k} = 1 \quad \forall k \in K$	
6	$\sum_{i\in D}(d_i \sum_{\substack{j=1\\ i\neq i}}^{n+1} x_{ijk}) \leq c \quad \forall k \in K$	Đảm bảo rằng năng lực của xe phải được đúng giờ
7	$a_i \sum_{\substack{j=1\\ i\neq i}}^{n+1} x_{ijk} \leq T_{ik} \leq b_i \sum_{\substack{j=1\\ i\neq i}}^{n+1} x_{ijk} \quad \forall k \in K, \forall i \in D,$	Đảm bảo tính khả thi của lộ trình xe, tính khả thi này nằm trong khung thời gian của khách hàng và áp dụng bất cứ khi nào khách hàng i không được xe k ghé thăm trong một khoảng thời gian k nhất định.
8	$(T_{ik} + s_i + t_{ij} - T_{ij}) \leq (1 - x_{ijk}) * M \; \forall k \in K, \forall i \in D, j \in V\backslash\{0\}$	Đảm bảo tính khả thi của lịch trình về mặt ràng buộc thời gian.
9	$(E + t_{oi} - T_{ik}) \leq (1 - x_{oik}) * M \; \forall k \in K, \forall i \in D$	Biểu diễn biến thời gian cho nút đầu tiên mà xe đến.
10	$(T_{ik} - L) \leq (1 - x_{i(n+1)k}) * M \; \forall k \in K, \forall i \in D$	Xét đến thời gian giới hạn của xe, xe k phải đến khách hàng cuối cùng, người đến trước thời điểm L khi kết thúc hành trình.
11	$T_{ik} \geq 0 \; \forall k \in K, \forall i \in V$	Cung cấp các yêu cầu không âm và nhị phân tương ứng. Đối với mỗi phương tiện k ϵ K
12	$x_{ijk} \in \{0,1\} \; \forall k \in K, (i,j) \in A$	

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Sau khi có lộ trình, hệ thống tái sử dụng đúng "data matrix" đã cấp cho CPLEX cùng bảng tọa độ (kinh/vĩ độ) của depot và các trạm. Python nạp các tệp này, ghép thứ tự ghé thăm với lat–lon từng điểm, tính lũy kế quãng đường và ETA/ETD (Haversine/Euclid nội đô), đồng thời cập nhật tải còn lại sau mỗi điểm. Kết quả được chuẩn hóa thành CSV/GeoJSON (order, name, lat, lon, ETA, ETD, remaining_load).

Từ dữ liệu đã ghép, Python sinh polyline theo thứ tự lộ trình và marker có nhãn thứ tự/ETA; depot được tô màu khác biệt, có thể bật/tắt tuyến khi nhiều xe/đợt. Google Maps JavaScript API (hoặc Leaflet) được dùng để hiển thị trên trình duyệt và chia sẻ cho tài xế/điều phối. Chu trình lặp mỗi cut-off: cập nhật số liệu → CPLEX → xuất tuyến → vẽ bản đồ → theo dõi và tái hoạch định nhanh.

$$(T_{ik} + s_i + t_{ij} - T_{jk}) \le (1 - x_{ijk}) * M \;\; \forall k \in K, \forall i \in D, j \in V \backslash \{0\},$$

3.2. Phân tích kết quả mô phỏng

Bộ mô phỏng thí điểm một xe – chín trạm cho thấy mô hình VRPTW giải bằng CPLEX tạo được lộ trình tối ưu trong vài giây, thỏa tất cả cửa sổ thời gian và ràng buộc tải, đồng thời tổ chức tuyến liên tục từ kho đến các trạm rồi quay về. Kết quả được xuất dưới dạng chuỗi ghé thăm kèm ETA/ETD, phù hợp để triển khai ngay ở hiện trường; việc vận hành theo hai mốc cut-off 08:00 và 16:00 giúp gom nhu cầu theo đợt và kiểm soát luồng giao trong ngày. Tổng quãng đường và số xe sử dụng đều giảm so với trước khi áp dụng tối ưu hóa.

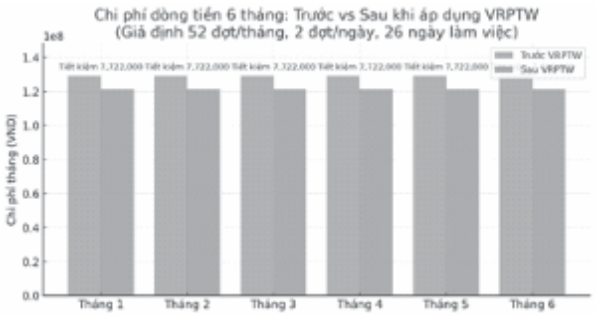
0	2	3	4	1	6	9	8	7	5	10
Thanh Thai	Nguyen Trai	Le Hong Phong	Tran Phu	Nguyen Bieu	Hai Thuong Lan Ong	Ngo Gia Tu	Ly Thai To	Nguyen Chi Thanh	Bui Huu Nghia	Thanh Thai



Hình 3. Hoạch định tuyến tọa độ tối ưu được thể hiện trên Google Maps

3.3. Khả năng ứng dụng vào thực tế

Hình 4 là kết quả mô tả chỉ số nên theo dõi theo đợt: tổng km, chi phí, % giao đúng cửa sổ, số điểm vi phạm. Với mức tiết kiệm trung bình ~148.500 VND/đợt, nếu chạy 2 đợt/ngày trong 300 ngày thì lợi ích khoảng 89,1 triệu VND/năm; quy đổi theo 6 tháng (giả định 52 đợt/tháng) tiết kiệm xấp xỉ 46,33 triệu VND. Khi cần mở rộng, bổ sung đa xe và thời gian di chuyển theo mạng đường (traffic API); trong điều kiện ngân sách hạn chế, có thể dùng vận tốc đô thị hiệu chỉnh và đệm phục vụ để giữ độ tin cậy ETA.



Hình 4. Chi phí dòng tiền 6 tháng trước và sau khi áp dụng VRPTW vào kho máy hỗ trợ thở oxi.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này cung cấp một khung hoạch định tuyến chặng cuối có thể triển khai ngay, gắn chặt giữa mô hình VRPTW-MILP và vận hành thực tế: dữ liệu chuẩn hóa → tối ưu → bản đồ hóa lộ trình. Nhờ chuẩn hóa cửa sổ thời gian và thiết kế cut-off theo đợt, hệ thống chuyển đổi điều phối từ "phản ứng" sang "chủ động", minh bạch hóa kế hoạch, giảm mơ hồ phối hợp và tạo nền tảng cho giám sát – ra quyết định theo thời gian gần thực. Về học thuật, nghiên cứu chuẩn hóa bộ ký hiệu, quy trình dữ liệu và quy tắc vận hành, làm cơ sở tái lập và so sánh các biến thể mô hình. Về thực tiễn, giải pháp có chi phí tích hợp thấp, dễ mở rộng sang đa xe, ưu tiên dịch vụ, và tích hợp thời gian mạng đường, qua đó tăng khả năng chống chịu của chuỗi cung ứng y tế trong bối cảnh khẩn cấp.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được hướng dẫn bởi thầy Phan Nguyễn Kỳ Phúc và sự giúp đỡ bộ phận hải quan và quản lý kho bãi nội địa Công ty Green Global Transport đã hỗ trợ cung cấp dữ liệu và đóng góp ý kiến trong quá trình nghiên cứu. Lời cảm ơn cũng xin được gửi đến các đồng nghiệp đã tham gia góp ý và giúp hoàn thiện bài báo này.❖

Ngày nhận bài: **23/9/2025**
Ngày phản biện: **06/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Toth, P., et al., "*Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*". Journal of SIAM (2014).

[2]. Azi, N., et al., "*An exact algorithm for the vehicle routing problem with time windows*". European Journal of Operational Research (2010).

[3]. Le Thi Yen Vy, "*Vehicles routing problems: Ventilator distribution case study*". International University – VNU HCMC, Thesis (2022)

[4]. Solomon, M.M., "*Algorithms for vehicle routing and scheduling with time window constraints*". European Journal of Operations Research (1987).

TÍNH TOÁN, THIẾT KẾ HỘP TIẾP ĐẠN CỦA SÚNG SHMT-M1

COMPUTATION AND DESIGN OF THE SHMT-M1 MAGAZINE

Đào Văn Đoan[1,*], Nguyễn Đức Tú[2]
[1]Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự
[2]Tiểu đoàn 2, Học viện Kỹ thuật quân sự
**Email: doandv@lqdtu.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo đã trình bày phương pháp tính toán, thiết kế hộp tiếp đạn của súng SHMT-M1, trong đó tập trung vào tính toán, thiết kế miệng hộp tiếp đạn và lò xo với điều kiện tiếp đạn kịp thời có tính đến ảnh hưởng của nước khi tiếp đạn trong môi trường nước. Kết quả bài báo làm cơ sở tính toán, thiết kế hộp tiếp đạn của súng bắn hai môi trường.

Từ khóa: *Súng bắn hai môi trường; Hộp tiếp đạn; Độ sâu phát bắn.*

ABSTRACT

This paper presents a computational method and the design of the SHMT-M1 Amphibious firearm's magazine, with emphasis on calculating and designing the magazine feed opening and the spring to ensure timely feeding while accounting for the effects of water during underwater feeding. The results provide a basis for the calculation and design of the magazine for Amphibious firearm.

Keywords: *Amphibious firearm; Magazine; Firing depth.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc nghiên cứu tính toán thiết kế, chế tạo hộp tiếp đạn cho súng SHMT-M1 khi bắn ở dưới nước là một vấn đề mới, cấp thiết để phục vụ cho việc nghiên cứu chế tạo thành công súng bắn hai môi trường. Hộp tiếp đạn của súng SHMT-M1 dùng chung cho hai loại đạn vừa bắn trong không khí vừa bắn dưới nước. Khi bắn dưới nước, các điều kiện về khối lượng cột đạn, ma sát và lực cản môi trường thay đổi đáng kể. Do đó, trong bài báo tập trung thiết kế hộp tiếp đạn với mô hình tính toán tiếp đạn kịp thời trong cả hai môi trường không khí và nước ở các độ sâu khác nhau tránh quá cứng (gây mài mòn, kẹt) hoặc quá mềm (trễ nhịp, hụt viên).

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN

Súng bắn hai môi trường dùng chung một hộp tiếp đạn sử dụng hai loại đạn bắn trong không khí và đạn chuyên dụng bắn dưới nước ĐDN – M1 có cùng kích thước bao ngoài nhưng có khối lượng viên đạn là 12g và 20g. Trong thiết kế, hộp tiếp đạn sẽ tiếp đạn tối đa 30 viên đối với đạn bắn trong không khí và 20 viên đối với đạn bắn dưới nước. ☞

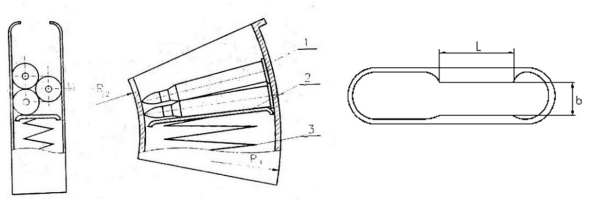
Để thiết kế được hộp tiếp đạn với yêu cầu cùng dung lượng xếp được nhiều đạn nhất, bài báo chọn cách xếp đạn theo 2 hàng (Hình 1). Hình dáng và kích thước bên ngoài được thiết kế theo hình dạng đạn đã được sắp xếp.

Quá trình tính toán thiết kế còn lại chỉ tập trung vào thiết kế miệng hộp tiếp đạn và lò xo hộp tiếp đạn để đảm bảo mỗi lần chỉ tiếp đạn được một viên và đảm bảo điều kiện tiếp đạn kịp thời.

Kích thước miệng hộp tiếp đạn được xếp theo hai hàng, theo [1], ta có:

$$b = (1,1 \div 1,3)d_v;\ L = (0,4 \div 0,6)l_{vd} \quad (1)$$

Trong đó: d_v - Đường kính lớn nhất vỏ đạn; l_{vd} - Chiều dài viên đạn.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý kết cấu của hộp tiếp đạn: 1. Thân hộp; 2. Bàn nâng đạn; 3. Lò xo hộp tiếp đạn

Để tính toán lò xo hộp tiếp đạn theo [1], ta chọn sơ bộ lực nén của lò xo như sau:

$$\begin{cases} \Pi_\lambda = (1,5 \div 2)(nq_{vd} + q_{bn}) \\ \Pi_0 = (2,5 \div 3)(q_{vd} + q_{bn}) \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó: n - Số đạn lớn nhất chứa trong hộp tiếp đạn; q_{bn} - Trọng lượng bàn nâng đạn; q_{vd} - Trọng lượng một viên đạn; λ: Độ dài nén của lò xo.

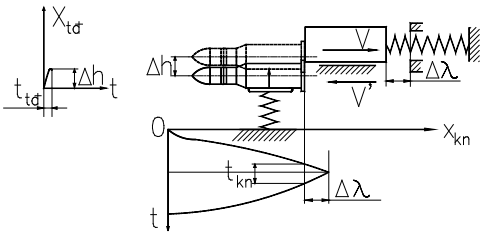
Độ cứng của lò xo hộp tiếp đạn:

$$C = \frac{\Pi_\lambda - \Pi_0}{\lambda}$$

Tính toán trong hai trường hợp, ta chọn được giá trị độ cứng của lò xo là: C = 105 N/m. Để đảm bảo tiếp đạn mỗi lần 1 viên kịp thời và tin cậy, sử dụng sơ đồ nguyên lý như hình 2 và theo [1], ta có:

$$\Delta t_{td} \le \frac{1}{2}\Delta t_{kn} \quad (3)$$

Trong đó: Δt_{td} - Thời gian tiếp đạn; Δt_{kn} - Thời gian khóa nòng đi qua vị trí đáy viên đạn đang chờ tiếp đạn khi khóa nòng lùi đến khi nó đẩy lên tới vị trí này.



Hình 2. Sơ đồ tính toán lò xo hộp tiếp đạn

Thời gian tiếp đạn theo [1]:

$$\Delta t_{td} = \frac{\Delta h}{V_{tb}} \quad (4)$$

Trong đó: Δh - Bước tiếp đạn; $V_{tb} = \frac{1}{2}V_m$ - Tốc độ tiếp đạn trung bình, V_m - Tốc độ tiếp đạn lớn nhất.

Áp dụng định luật bảo toàn năng lượng, ta có:

$$\frac{1}{2}MV_m^2 = F.\Delta h \quad (5)$$

Trong đó: M - Khối lượng phần chuyển động; F - Ngoại lực tác dụng lên phần chuyển động theo phương thẳng đứng (bàn nâng đạn, các viên đạn).

*Khi bắn trong môi trường nước:

$$F = \Pi + F_A - Q - F_{cn}$$

Trong đó: F_A, Q, F_{cn} - Lực đẩy Acsimet, trọng lượng, lực cản của nước tác dụng lên phần chuyển động [2].

$$F_{cn} = \rho.g.h.S + \frac{1}{2}.S.\rho.V_m^{\ 2} + \frac{1}{2}.S.\rho.V_m^{\ 2}.C_f.S_{xq} \quad (6)$$

Trong đó: h, S, v, S_{xq}, C_f - Độ sâu phát bắn, diện tích, vận tốc, diện tích xung quanh hệ số cản (khi tính toán có thể bỏ qua áp suất thủy tĩnh do kích thước và quãng đường chuyển động nhỏ).

Kết hợp các phương trình (4), (5), (6), ta được:

- Thời gian tiếp đạn khi bắn trong nước:

$$\Delta t_{td(n)} = \sqrt{\frac{2.\Delta h.\left[M + (S + C_f.S_{xq}).\rho.\Delta h\right]}{\Pi - Q + F_A}} \quad (7)$$

- Thời gian tiếp đạn khi bắn trong không khí:

$$\Delta t_{td(kk)} = \sqrt{\frac{2.\Delta h.M}{\Pi - Q}} \quad (8)$$

Kiểm tra điều kiện tiếp đạn kịp thời theo công thức (3), ta phải tính toán cho trường hợp hộp tiếp đạn khi còn một viên và khi chứa đầy đạn theo thiết kế. Theo (7) và (9), ta có:

- Trường hợp có 1 viên đạn:

+ Khi bắn trong môi trường không khí:

$$\Delta t_{td(kk)} = \sqrt{\frac{2.\Delta h.(m_{bn} + 1.m_{vdkk})}{C.(h_o + h_d) - (m_{bn} + 1.m_{vdkk}).g}} \quad (9)$$

+ Khi bắn trong môi trường nước:

$$\Delta t_{td(nc)} = \sqrt{\frac{2.\Delta h.\left\{m_{bn} + 1.m_{vdnc} + \rho_n.\Delta h[S + C_f.(S_{xqbn} + 1.S_{xqvd})]\right\}}{C.(h_o + h_d) - (m_{bn} + 1.m_{vdnc}).g + \rho_n.g.(1.V_{cc} + V_{bn})}} \quad (10)$$

- Trường hợp nạp tối đa số viên đạn:

+ Khi bắn trong môi trường không khí:

$$\Delta t_{td(kk)} = \sqrt{\frac{2.\Delta h.(m_{bn} + 30.m_{vdkk})}{C.\lambda_{30} - (m_{bn} + 30.m_{vdkk}).g}} \quad (11)$$

+ Khi bắn trong môi trường nước:

$$\Delta t_{td(nc)} = \sqrt{\frac{2.\Delta h.\left\{m_{bn} + 20.m_{vdnc} + \rho_n.\Delta h\left[S + (S_{xqbn} + 20.S_{xqvd})\right]\right\}}{C.\lambda_{20} - (m_{bn} + 20.m_{vdnc}).g + \rho_n.g.(20.V_{cc} + V_{bn})}} \quad (12)$$

Căn cứ vào tài liệu thiết kế và tính toán động lực học súng hai môi trường [3, 4], ta tính toán được thời gian khóa nòng từ khi lùi qua đáy vỏ đạn đến khi lùi hết về sau và chuyển động ngược lại cho đến khi chạm vào đáy vỏ viên đạn chờ tống đạn Δt_{kn} ở trong không khí là: Δt_{knkk} = 24,35ms, còn khi bắn ở dưới nước thì Δt_{knnc} còn phụ thuộc vào độ sâu bắn. Tính toán và khảo sát ở các độ sâu 1m; 5m; 10m; 15m; 20m; 25m; 40m kết hợp với kiểm tra điều kiện tiếp đạn kịp thời (3), ta tính được giá trị nhỏ nhất của độ cứng lò xo tống đạn. Kết quả theo Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả độ cứng nhỏ nhất của lò xo tiếp đạn theo độ sâu

STT	Độ sâu (m)	$\Delta t_{td1vien}$ (ms)	$\Delta t_{td20vien}$ (ms)	$\frac{\Delta t_{knnc}}{2}$ (ms)	Độ cứng nhỏ nhất (N/m)
1	1	4,21	16,24	17,28	158,8
2	5	4,21	16,24	17,33	158,4
3	10	4,21	16,24	17,41	157,9
4	15	4,21	16,24	17,47	157,3
5	20	4,21	16,24	17,53	157,0
6	25	4,21	16,24	17,56	156,6
7	40	4,21	16,24	17,82	155,2

Kết quả cho thấy càng xuống sâu, tốc độ bắn của súng càng giảm do lực cản tăng lên và thời gian tiếp đạn kịp thời sẽ giảm và do đó yêu cầu độ cứng của lò xo tiếp đạn sẽ giảm, tuy nhiên mức độ thay đổi là không đáng kể. Giá trị độ cứng nhỏ nhất thỏa mãn tiếp đạn kịp thời trong cả không khí và nước là 158,8 N/m, tuy nhiên thực tế để đảm bảo tin cậy hoạt động trong mọi tình huống, chống bụi bẩn, kẹt trong quá trình tiếp đạn thì thường chọn độ tin cậy từ 1,8 đến 2 lần, và căn cứ vào các loại lò xo đặc chủng hiện đang sản xuất cho các loại hộp tiếp đạn của các loại súng khác nhau thì ta chọn độ cứng của lò xo hộp tiếp đạn súng bắn hai môi trường là 300N/m vừa đảm bảo tin cậy, vừa thuận lợi trong quá trình sản xuất. Kết quả với tính toán lựa chọn này, hộp tiếp đạn đã được chế tạo và thử nghiệm cùng súng hai môi trường ở độ sâu 25m đã hoạt động bình thường, tiếp đạn tin cậy, không vướng kẹt.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày thứ tự, phương pháp tính toán, thiết kế hộp tiếp đạn của súng SHMT-M1, trong đó tập trung vào tính toán, thiết kế miệng hộp tiếp đạn và lò xo với điều kiện tiếp đạn kịp thời có tính đến ảnh hưởng của nước khi tiếp đạn trong môi trường nước. Kết quả đã thiết kế được hộp tiếp đạn súng bắn hai môi trường với độ cứng của lò xo hộp tiếp đạn là 300N/m vừa đảm bảo tin cậy, vừa thuận lợi trong quá trình sản xuất. Hộp tiếp đạn được thiết kế, chế tạo theo thiết kế này đã được thử nghiệm cùng súng hai môi trường ở độ sâu đến 25m hoạt động bình thường, tiếp đạn tin cậy góp phần hoàn thiện đồng bộ súng hai môi trường và đạn bắn dưới nước trang bị cho lực lượng đặc công nước, người nhái.❖

Ngày nhận bài: **15/10/2025**
Ngày phản biện: **27/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Phạm Huy Chương (1998), "*Giáo trình Cơ sở kết cấu và tính toán thiết kế máy tự động*". Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội.
[2]. Hoerner S. F. (1965), "*Fluid Dynamic Drag*". Published by the author, Midland Park.
[3]. Van, H. N., Dao, D., Zenkour, A. M., Minh, P. V., & Thom, D. V. (2022), "*Movement of amphibious rifles fixed on the mount when shooting and operating underwater*". Waves in Random and Complex Media.
[4]. Nguyễn Văn Hưng (2021), "*Nghiên cứu ảnh hưởng của một số tham số kết cấu thiết bị trích khí đến hoạt động của máy tự động súng bắn hai môi trường*". Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự.

NGHIÊN CỨU KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA KHÂU CƠ SỞ ĐẾN LÀM VIỆC CỦA MÁY TỰ ĐỘNG VÀ QUÁ TRÌNH KHAI THÁC SỬ DỤNG PHÁO PHÒNG KHÔNG 23 mm ZU23-2

STUDY ON THE INFLUENCE OF THE BASE ASSEMBLY OF THE 23 mm ZU23-2 ANTI-AIRCRAFT GUN ON THE OPERATION OF THE AUTOMATIC MECHANISM AND THE GUN'S OPERATIONAL PERFORMANCE

Lê Ngọc Hà[1], Mai Anh Quang[2]

[1]Hệ Quản lý học viên Sau đại học, Học viện Kỹ thuật quân sự

[2]Khoa Vũ khí, Trường Sĩ quan Kỹ thuật quân sự

Email: maianhquang.vhp@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo phân tích động lực học của pháo phòng không 23 mm ZU23-2, tính toán các quy luật chuyển động, vận tốc, lực tác dụng và chu kỳ phát bắn. Trên cơ sở các kết quả tính toán, nghiên cứu xác định quy luật chuyển động và phân bố lực lên khâu cơ sở, từ đó đề xuất điều chỉnh một số thông số của khâu cơ sở và máy tự động. Mục tiêu là nâng cao chất lượng huấn luyện, hỗ trợ khai thác an toàn, tối ưu hóa công tác bảo dưỡng và tiết kiệm trong quá trình sử dụng.

Từ khóa: *Khâu cơ sở; Máy tự động; Pháo phòng không 23 mm ZU23-2; Khai thác sử dụng.*

ABSTRACT

This study analyzes the dynamics of the 23 mm ZU23-2 anti-aircraft gun by computing motion laws, velocities, applied forces, and the firing cycle. Based on these calculations, the motion patterns and force distribution acting on the base assembly are characterized. Recommendations are then proposed to modify certain parameters of the base assembly and the automatic mechanism to improve training quality, support safe operation, optimize maintenance, and reduce operational costs.

Keywords: *Base assembly; Automatic mechanism; 23 mm ZU23-2 anti-aircraft gun; Operation and exploitation.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh hiện nay, khi các phương tiện bay không người lái (UAV), tên lửa hành trình và các phương tiện chiến đấu tầm thấp phát triển nhanh chóng, việc duy trì và khai thác hiệu quả hệ thống pháo phòng không tầm thấp trở thành một yêu cầu cấp thiết. Một trong những vũ khí được sử dụng rộng rãi trong Quân đội Nhân dân Việt Nam cũng như nhiều quốc gia khác là pháo phòng không 23 mm ZU-23-2. Loại pháo này có khả năng bắn mục tiêu bay ở cự ly đến 2500 m, độ cao đến 1500 m với tốc độ mục tiêu khoảng 300 m/s, đồng thời còn có thể sử dụng để tiêu diệt các mục tiêu mặt đất hoặc mặt nước nhờ độ cơ động cao và tốc độ bắn lớn, lên tới 400 phát/phút.

Tuy nhiên, máy tự động của pháo có kết cấu cơ khí rất phức tạp. Việc nghiên cứu, khai thác, sửa chữa, huấn luyện và cải tiến máy tự động của pháo gặp nhiều khó khăn. Vì vậy, nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của khâu cơ sở pháo phòng không 23 mm ZU-23-2 đến làm việc của máy tự động và quá trình khai thác sử dụng pháo. Nghiên cứu này đặc biệt có thể tạo điều kiện thuận lợi cho công tác huấn luyện, khai thác vũ khí, cải tiến kỹ thuật và nâng cao hiệu quả, an toàn, tiết kiệm trong sử dụng pháo.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Nguyên lý hoạt động của máy tự động pháo phòng không 23 mm ZU-23-2

Pháo 23 mm ZU-23-2 làm việc theo nguyên lý trích khí thuốc, buồng khí hở, piston lùi dài. Chu trình làm việc của máy tự động bao gồm [4]:

1. Mở khóa nòng.
2. Rút và hất vỏ đạn.
3. Giương búa.
4. Tiếp đạn và tống đạn.
5. Đóng khóa nòng.
6. Giải phóng kim hỏa để phát hỏa phát bắn tiếp theo.

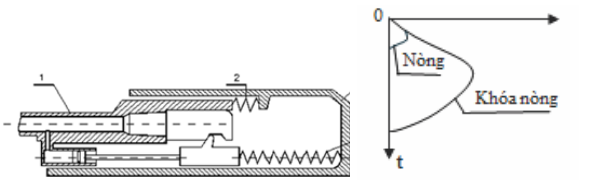
Cơ chế làm việc có thể được giải thích như sau:

• Khi viên đạn đầu tiên được phát hỏa, khí thuốc sinh công đẩy đầu đạn đi trong nòng.

• Khi đầu đạn đi qua lỗ trích khí, một phần khí thuốc theo lỗ trích khí đi vào buồng khí, tác động lên piston.

• Piston chuyển động ra sau, kéo theo bệ khóa nòng, kích hoạt chu trình mở khóa, rút vỏ đạn, tiếp đạn, tống đạn, rồi lại đóng khóa nòng và phát hỏa.

Quá trình này diễn ra liên tục, nhờ đó pháo đạt tốc độ bắn cao.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của máy tự động pháo 23 mm ZU-23-2

2.2. Giả thiết và sơ đồ nguyên lý

Như đã phân tích ở phần cơ sở lý thuyết, máy tự động pháo 23 mm được coi là một hệ cơ học phức tạp gồm nhiều khâu chuyển động song phẳng, chịu tác động của các lực trong thời gian rất ngắn. Để đơn giản hóa việc tính toán, các giả thiết chính được đưa ra gồm:

• Các khâu (bệ khóa, piston, cần tống đạn, cần gia tốc…) được coi là vật rắn tuyệt đối;

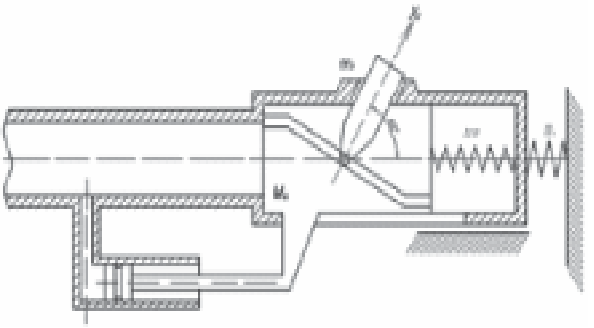
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

• Lò xo khóa nòng, lò xo giảm giật coi như đàn hồi tuyến tính với hệ số đàn hồi k;

• Khối lượng phân bố thay bằng khối lượng thu gọn;

• Các va chạm cơ học được mô hình hóa bằng lực tức thời có giá trị cực đại.

Trên cơ sở đó, sơ đồ nguyên lý hoạt động của máy tự động được xây dựng.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý máy tự động pháo 23 mm

2.3. Hệ phương trình thuật phóng trong [2]

Để mô tả quá trình cháy thuốc phóng trong nòng súng, sử dụng hệ phương trình thuật phóng trong [2]. Một dạng rút gọn của phương trình có thể viết:

$$p=\frac{\varphi \cdot \varepsilon \cdot N}{V+\gamma \cdot x}$$

Trong đó:
p: Áp suất khí thuốc trong nòng;
φ: Hệ số tăng nặng;
ε: Khối lượng thuốc phóng;
N: Đương lượng công của nhiệt;
V: Thể tích buồng cháy;
γ: Hệ số đặc trưng hình học thuốc phóng;
x: Quãng đường chuyển động của đầu đạn.

2.4. Hệ phương trình trích khí

Khi đạn đi qua lỗ trích khí, một phần khí thuốc được đưa vào buồng khí. Áp suất trong buồng khí p_b tác động trực tiếp lên piston và bệ khóa. Phương trình nhiệt động lực học trong buồng khí [5]:

$$\frac{dp_b}{dt}=\frac{1}{V_b}(G_b \cdot R \cdot T_n - G_\Delta \cdot R \cdot T_b)$$

Trong đó:
V_b: Thể tích buồng khí;
G_b: Lưu lượng khí qua lỗ trích;
G_Δ: Lưu lượng khí rò qua khe hở piston;
T_n, T_b: Nhiệt độ khí trong nòng và buồng khí;
R: Hằng số khí.

2.5. Hệ phương trình chuyển động của bệ khóa

Áp dụng phương trình Lagrange loại II, hệ phương trình chuyển động của bệ khóa và các khâu liên kết có dạng tổng quát:

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = P(t)$$

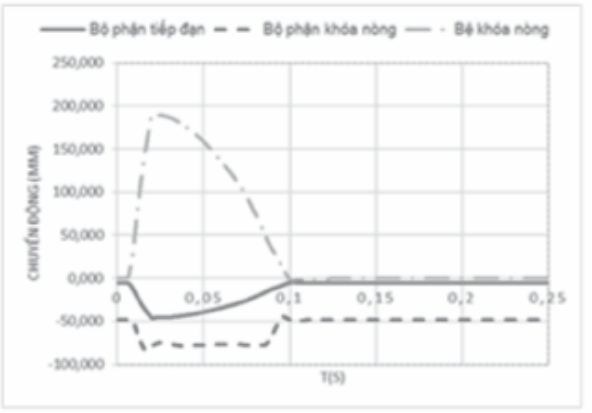
Trong đó:
M: Ma trận khối lượng (khối lượng thu gọn);
C: Ma trận ma sát và giảm chấn;
K: Ma trận độ cứng (do lò xo);
x: Vector tọa độ suy rộng;
P(t): Vector lực ngoài (áp suất khí thuốc, lực cản tiếp đạn, lực tống đạn…).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bằng lập trình Matlab, thu được một loạt kết quả quan trọng về quy luật chuyển động, vận tốc, lực tác dụng và chu kỳ phát bắn của máy tự động pháo phòng không 23 mm ZU23-2.

3.1. Quy luật chuyển động của khâu cơ sở (Bệ khóa nòng)

Kết quả khảo sát là quỹ đạo dịch chuyển của bệ khóa trong một chu kỳ phát bắn.



Hình 3. Đồ thị quy luật chuyển động của bệ khóa

*Nhận xét:

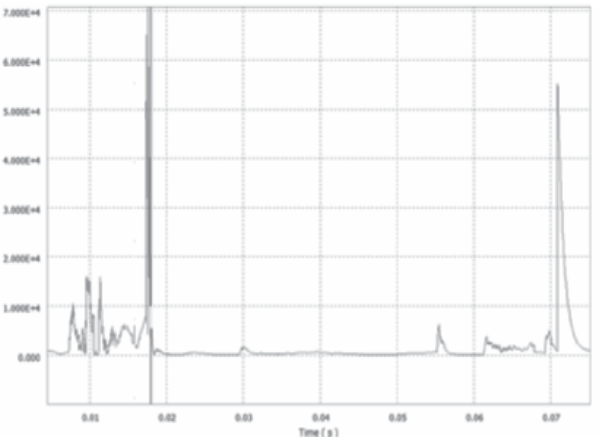
Đồ thị thể hiện quy luật chuyển động các cơ cấu của pháo khi nòng lùi xác định được chu kỳ của một phát bắn t = 0,105 s. Kết quả khảo sát thuận lợi cho việc thay đổi các tham số của pháo, góp phần nâng cao tốc độ bắn và nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến một phát bắn của pháo 23 mm ZU23-2.

3.2. Quy luật lực tác dụng lên khâu cơ sở

3.2.1. Lực tác dụng lên liên kết bệ khóa - hộp khóa nòng

Hình 4 thể hiện dưới tác dụng của áp suất khí thuốc, bệ khóa nòng trượt trong hộp khóa nòng. Khi va chạm xảy ra, lực tác dụng lên hộp khóa nòng tăng vọt đến giá trị cực đại.

Ý nghĩa: Phân tích này giúp xác định khả năng chịu lực của hộp khóa nòng, từ đó đánh giá độ bền và đề xuất cải tiến vật liệu hoặc kết cấu khi cần.

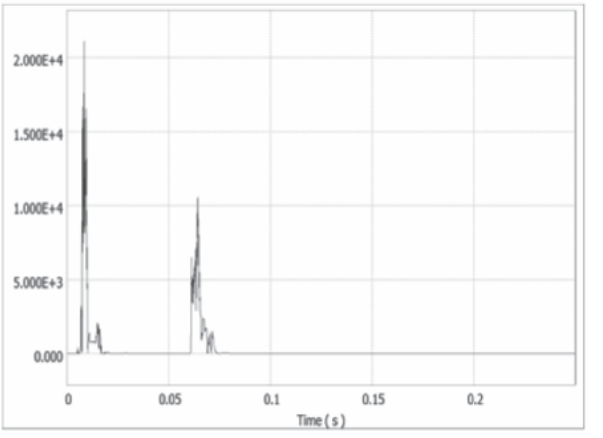


Hình 4. Đồ thị lực liên kết giữa bệ khóa nòng và hộp khóa nòng

3.2.2. Lực tác dụng lên liên kết bệ khóa – khóa nòng

Khi bệ khóa lùi, mặt nghiêng của nó tác động làm khóa nòng chuyển động đi lên, đồng thời nén lò xo búa. Khi khóa nòng gần vị trí trên cùng, lực đột ngột tăng do va chạm và giải phóng búa.

Ý nghĩa: Xác định giá trị cực đại của lực này có thể giúp thiết kế lại hình học mặt nghiêng hoặc cải tiến lò xo búa để giảm mài mòn, tăng độ bền.



Hình 5. Đồ thị lực liên kết giữa bệ khóa và khóa nòng

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

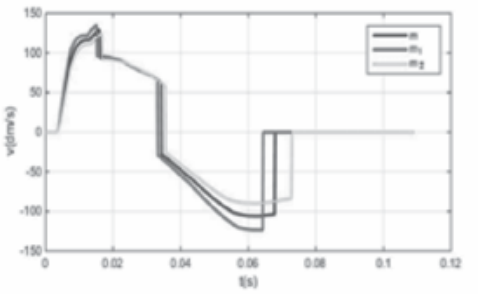
3.3. Khảo sát ảnh hưởng của khâu cơ sở đến làm việc máy tự động

Kết quả khảo sát được thể hiện ở bảng 1 và hình 6, 7. Qua kết quả nhận thấy rằng, khối lượng bệ khóa m_1 = 0.0625 kg tương ứng với áp suất buồng khí lớn nhất 376.48 kg/cm²; Tốc độ bắn: 882 phát/phút; Vận tốc bệ khóa lớn nhất: 129.379 dm/s.

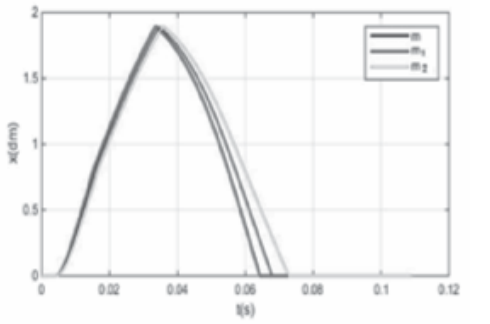
Bảng 1. Ảnh hưởng của khối lượng bệ khóa nòng đến hoạt động máy tự động

Khối lượng bệ khóa (kg)	m = 0.05	m_1 = 0.0625	m_2 = 0.075
Áp suất buồng khí lớn nhất (kg/cm²)	372.27	376.48	379.74
Tốc độ bắn (phát/phút)	931	882	823
Vận tốc bệ khóa lớn nhất (dm/s)	135.24	129.379	124.56
Chu kỳ (s)	0.0644	0.068	0.073

Khi thay đổi khối lượng m = 0.05 kg, áp suất lớn nhất trong buồng khí: 372.27 kg/cm² (giảm 4.21 kg/cm²); Tốc độ bắn: 931 phát/phút (tăng 49 phát/phút); Vận tốc bệ khóa lớn nhất 135.24 dm/s (tăng 5.861 dm/s). Khi thay đổi khối lượng m = 0.075 kg thì áp suất lớn nhất trong buồng khí: 379.74 kg/cm² (giảm 4.21 kg/cm²); Tốc độ bắn: 931 phát/phút (tăng 49 phát/phút); Vận tốc bệ khóa lớn nhất 135.24 dm/s (tăng 5.861 dm/s).



Hình 6. Đồ thị vận tốc bệ khóa khi thay đổi khối lượng bệ khóa



Hình 7. Đồ thị vận tốc bệ khóa khi thay đổi khối lượng bệ khóa

*Nhận xét:

Khi giảm khối lượng bệ khóa nòng thì tốc độ của bệ khóa tăng nhanh hơn và giá trị lớn nhất V_{bkmax} tăng lên đồng thời tốc độ bắn tăng lên, do đó chu kỳ làm việc của máy tự động nhanh hơn.

Khi tăng khối lượng bệ khóa nòng thì tốc độ của bệ khóa tăng chậm hơn và giá trị lớn nhất V_{bkmax} giảm đi đồng thời tốc độ bắn cũng giảm đi, do đó chu kỳ làm việc của máy tự động chậm hơn.

Dễ thấy khi khối lượng của bệ khóa nòng càng nhỏ thì trọng lượng của nó càng nhẹ, dưới tác dụng của áp suất khí thuốc sẽ đẩy bệ khóa lùi với một tốc độ nhanh hơn. Khi bệ khóa lùi cùng với tốc độ nhanh hơn thì sau va chạm với khâu làm việc, bệ khóa sẽ đạt giá trị V_{max} ☞

lớn hơn so với khi chưa thay đổi khối lượng của nó. Đồng thời, khi lùi với tốc độ nhanh và lớn hơn sẽ nén lò xo đẩy về mạnh hơn và sinh ra lực đẩy lớn đẩy bệ khóa trở về vị trí trên cùng với tốc độ nhanh hơn và lớn hơn. Do đó, chu kỳ làm việc của máy tự động sẽ diễn ra nhanh hơn hay với thời gian ít hơn.

3.4. Đánh giá kết quả

Từ các kết quả trên, có thể rút ra một số ý nghĩa ứng dụng quan trọng:

• Trong khai thác và bảo dưỡng: Dữ liệu về lực và vận tốc hỗ trợ dự báo mòn, hỏng của các chi tiết chịu tải lớn (như hộp khóa nòng, bệ khóa, cần gia tốc). Điều này giúp lên kế hoạch bảo dưỡng hợp lý, tăng tuổi thọ trang bị.

• Trong cải tiến kỹ thuật: Mô hình có thể dùng để thử nghiệm các phương án thay đổi thông số (lò xo, hình dạng cam, khe hở piston, đường kính lỗ trích khí…) trước khi áp dụng thực tế, tiết kiệm chi phí và thời gian.

4. KẾT LUẬN

Bài báo có ý nghĩa lý luận và thực tiễn khi đã đưa ra cơ sở lý thuyết, kết quả khảo sát ảnh hưởng của khối lượng bệ khóa nòng đến quá trình làm việc của máy tự động pháo phòng không 23 mm. Phương pháp khảo sát đảm bảo độ tin cậy phù hợp với tài liệu sản xuất, chế tạo. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để đề xuất các giải pháp nâng cao chất lượng huấn luyện, hỗ trợ khai thác an toàn, tối ưu bảo dưỡng và tiết kiệm trong quá trình sử dụng.❖

Ngày nhận bài: **03/10/2025**
Ngày phản biện: **15/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Phạm Huy Chương, "*Cơ sở kết cấu và tính toán thiết kế máy tự động*". NXB. Học viện Kỹ thuật quân sự (1998), Hà Nội.
[2]. Nguyễn Ngọc Du, Đỗ Văn Thọ, "*Thuật phóng của súng pháo; Bài tập thuật phóng trong*". Đại học Kỹ thuật quân sự (1976).
[3]. Lê Bá Hạnh, "*Phân tích động lực học máy tự động pháo 23 mm ZU-23-2 bằng ứng dụng Dynamic Simulation Inventor*". Tạp chí Khoa học Kỹ thuật quân sự, ISSN 2354-1288 (2020).
[4]. Nguyễn Mạnh Hùng, Mai Anh Quang, Lê Bá Hạnh, & Nguyễn Đinh Anh Vũ, "*Nghiên cứu khảo sát giải bài toán động lực học máy tự động pháo phòng không 23 mm ZU-23-2 bằng lập trình và phần mềm mô phỏng*". Tạp chí Khoa học Kỹ thuật quân sự, Số 17 (2020).
[5]. Trần Hồng Thanh, "*Cơ sở kết cấu và tính toán máy tự động*". NXB. Trường Sĩ quan Kỹ thuật quân sự (2017).

ỨNG DỤNG SIMCAPE TRONG MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TRUYỀN LỰC XE ĐIỆN

APPLICATION OF SIMSCAPE IN ELECTRIC VEHICLE POWERTRAIN SIMULATION

ThS. **Nguyễn Thế Hoàng***, ThS. **Trần Viết Linh**, KS. **Lê Thị Hồng Thắng**
Khoa Cơ - Điện, Trường Đại học Mỏ - Địa chất
**Email: nguyenthehoang@humg.edu.vn*

TÓM TẮT

Việc nghiên cứu mô phỏng hệ thống truyền lực ô tô điện đóng vai trò quan trọng nhằm tối ưu hiệu suất và mở rộng quãng đường di chuyển sau mỗi lần sạc. Nghiên cứu tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng hoàn chỉnh hệ thống truyền lực ô tô điện trong môi trường Matlab/Simscape, qua đó đánh giá khả năng hoạt động của hệ thống khi động cơ làm việc ở cả vùng công suất định mức và vùng từ thông yếu. Kết quả chứng minh hiệu quả của điều khiển véc-tơ có bù yếu từ, giúp hệ thống duy trì công suất định mức trong vùng tốc độ cao trên ô tô điện. Hệ số trượt trên bánh xe chủ động của ô tô điện có sự dao động trong biên độ hẹp với tần số cao, tuy nhiên vẫn nằm trong vùng hệ số bám cao. Kết quả nghiên cứu mở ra hướng phát triển mới thông qua tích hợp mô hình pin thực tế và hệ thống phanh tái sinh nhằm nâng cao hiệu suất năng lượng tổng thể.

Từ khóa: *Ô tô điện; Ô tô Hybrid; Hệ thống truyền lực ô tô điện; Phương pháp điều khiển véc-tơ; Động cơ PMSM; Pin Lithium ion; Hệ thống truyền lực; Vùng từ thông yếu; Hệ thống phanh tái sinh.*

ABSTRACT

The simulation study of the powertrain system plays a crucial role in optimizing efficiency and extending the driving range per charge. This research undertakes the development of a comprehensive electric vehicle (EV) powertrain simulation model within the Matlab/Simscape environment, enabling the evaluation of the system's operational capability when the Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) operates across both the rated power region and the flux-weakening region. The results demonstrate the effectiveness of vector control with flux-weakening compensation, which successfully allows the system to sustain rated power output in the EV's high-speed range. Furthermore, the slip ratio on the EV's driving wheels exhibits high-frequency oscillations within a narrow amplitude, yet consistently remains within the region of high adhesion coefficient. These findings pave the way for a new development trajectory, specifically through the integration of a realistic battery model and a regenerative braking system to enhance overall energy efficiency.

Keywords: *Electrical Vehicle; Hybrid vehicle; Transpose system; Battery Lithium ion; FOC; PMSM; Powertrain system; Flux-weakening region; Regenerative braking system.*

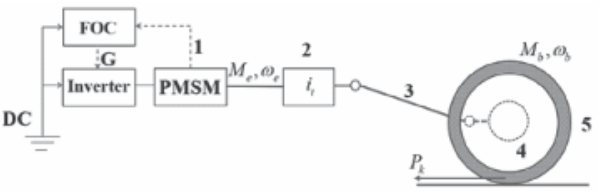
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, xu hướng chuyển đổi từ phương tiện chạy nhiên liệu hóa thạch sang ô tô điện diễn ra mạnh mẽ. Việc nghiên cứu hoàn thiện hệ thống truyền lực ô tô điện nhằm nâng cao hiệu quả tổng thể của hệ thống truyền lực, từ đó kéo dài quãng đường di chuyển của xe trong một lần sạc đang là trọng tâm nghiên cứu.

Các nghiên cứu trước đây của Pillay và Krishnan [1] hay Emadi [2], đã khẳng định hiệu quả của phương pháp điều khiển véc-tơ đối với động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM). Tuy nhiên, nội dung nghiên cứu tập trung vào mô hình điện hoặc quá trình điều khiển động cơ độc lập. Mô hình mô phỏng chuỗi truyền và biến đổi năng lượng từ pin, bộ nghịch lưu, động cơ PMSM đến bánh xe chưa được xem xét. Tính đến nay, chưa có đánh giá đầy đủ nào về các tương tác giữa phần điện và phần cơ học của xe, cũng như các ảnh hưởng từ yếu tố bên ngoài đến hệ thống. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm xây dựng mô hình mô phỏng hoàn chỉnh của hệ thống truyền lực ô tô điện trong môi trường Matlab/Simscape nhằm kiểm chứng khả năng hoạt động của hệ thống, đặc biệt khi động cơ hoạt động ở vùng từ thông yếu với tốc độ làm việc cao hơn tốc độ định mức. Kết quả nghiên cứu sẽ làm rõ đặc tính biến đổi mô men, tốc độ, công suất và các tham số động lực học của xe, từ đó xây dựng cơ sở cho việc thiết kế, tối ưu hệ thống truyền động trên ô tô điện.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Đối tượng chính trong nghiên cứu này là hệ thống truyền lực của ô tô điện cầu sau chủ động trang bị động cơ đồng bộ rô to nam châm vĩnh cửu (PMSM) có điện áp 360V, công suất 100 kW tại tốc độ góc 4700 vòng/phút. Động cơ được điều khiển theo phương pháp véc-tơ kết hợp với bộ nghịch lưu IGBT lý tưởng. Hệ thống truyền lực sử dụng hộp số 1 cấp. Sơ đồ nguyên lý được mô tả như trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống truyền lực ô tô điện: (1) Động cơ PMSM công suất 100 kW; (2) Hệ thống truyền lực ô tô điện; (3) Các đăng; (4) Vi sai – truyền lực chính; (5) Bánh xe

Mô hình hệ thống truyền lực ô tô bằng phần mềm Matlab – Simulink phiên bản 2022. Với bộ tham số đầu vào giả định vào như trong bảng 1.

Bảng 1. Bảng tham số dữ liệu đầu vào

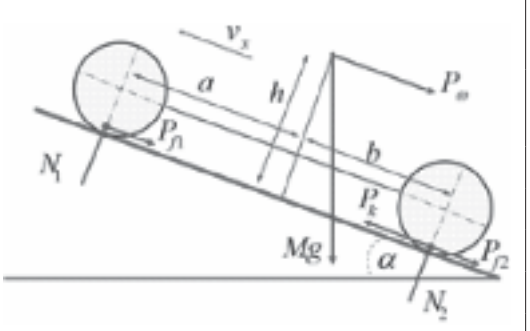
STT	Tên tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	**Tham số động cơ điện**			
1.1	Công suất định mức	P	100	kW
1.2	Điện áp định mức	V	360	V
1.3	Tốc độ định mức	n	4700	Vòng/phút
1.4	Số đôi cực	p	4	-
1.5	Điện trở pha stato	Rs	0,007	Ω
1.6	Cảm kháng trục d	L_d	0,00028	H

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

1.7	Cảm kháng trục q	L_q	0,00042	H
1.8	Từ thông nam châm vĩnh cửu	ψ	0.085	Wb
1.9	Mô men cực đại	T_{max}	230	N.m
1.10	Mô men quán tính rotor	J	0.08	kg•m²
1.11	Hệ số ma sát nhớt	B	0.001	N.m.s/rad
2	**Tham số bộ nghịch lưu (Inverter)**			
2.1	Điện áp rơi thuận IGBT	$IGBT_{Vf}$	1,5	V
2.2	Điện trở dẫn IGBT	$IGBT_{Ron}$	0,0007	Ω
2.3	Thời gian ngắt IGBT	$IGBT_{Goff}$	1×10^{-6}	s
2.4	Ngưỡng kích hoạt IGBT	$IGBT_{Vth}$	0,5	V
2.5	Điện áp rơi thuận diode	$DIODE_{Vf}$	1,1	V
2.6	Điện trở dẫn diode	$DIODE_{Ron}$	0,0007	Ω
2.7	Thời gian ngắt diode	$DIODE_{Goff}$	1×10^{-6}	s
2.8	Tần số chuyển mạch PWM	PWM_{fsw}	10	kHz
2.9	Thời gian chết PWM	$PWM_{deadtime}$	2×10^{-6}	s
3	**Tham số điều khiển theo phương pháp véc-tơ**			
3.1	Tần số băng thông vòng tốc độ	f_w	60	Hz
3.2	Hệ số tỷ lệ vòng tốc độ	Kp_w	10	
3.3	Hệ số tích phân vòng tốc độ	Ki_w	600	
3.4	Hệ số chống bão hòa vòng tốc độ	Kaw_w	6000	
3.5	Hệ số tỷ lệ dòng d	Kp_d	4	
3.6	Hệ số tích phân dòng d	Ki_d	240	
3.7	Hệ số chống bão hòa dòng d	Kaw_d	1920	
3.8	Hệ số tỷ lệ dòng q	Kp_q	5,8	
3.9	Hệ số tích phân dòng q	Ki_q	348	
3.10	Hệ số chống bão hòa dòng q	Kaw_q	2784	

Bảng 2. Bộ tham số động lực học giả định của của ô tô điện

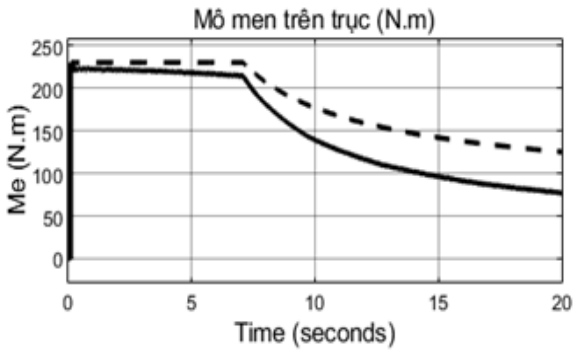
4.1	Khối lượng toàn xe	M	2060	kg
4.2	Khoảng cách từ CG đến trục trước	a	1,3	m
4.3	Khoảng cách từ CG đến trục sau	b	1,3	m
4.4	Diện tích cản khí động	A	2,5	m²
4.5	Hệ số cản không khí	C_d	0,2	
4.6	Bán kính bánh xe	r_b	0,345	m
4.7	Tỷ số truyền toàn hệ thống	i_t	9	
4.8	Góc dốc	α	0°	
4.9	Hệ số cản lăn	f	0.02	



Quá trình mô phỏng được thực hiện trong 20 giây với thời gian lấy mẫu $T_s = 2.10^{-6}$ s, thời gian điều khiển $T_{sc} = 5.10^{-5}$ s. Tín hiệu điều khiển do khối Step tạo ra mô phỏng trạng thái xe tăng tốc nhanh nhất với bước thời gian (Step time) là 0,1 giây. Giá trị ban đầu (Initial Value) là 0, giá trị cuối (Final Value) là 9000 vòng/phút. Các tín hiệu ghi nhận gồm các đường đặc tính làm việc của động cơ PMSM và đường đặc tính động lực học của ô tô.

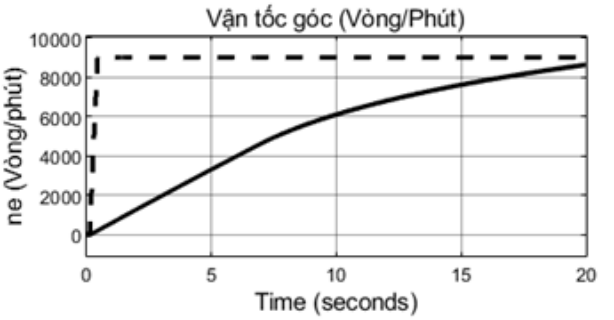
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng đặc tính đặc tính làm việc của động cơ PMSM công suất 100 kW được thể hiện trong các Hình 2, Hình 3, Hình 4. Về tổng thể, các đường đặc tính này phù hợp với thực tế. Điều này khẳng định tính đúng đắn của các tham số đầu vào của chương trình mô phỏng, đồng thời cũng cho thấy bộ điều khiển gồm khối FOC (Field Oriented Control) và Inverter đã hoạt động tốt.



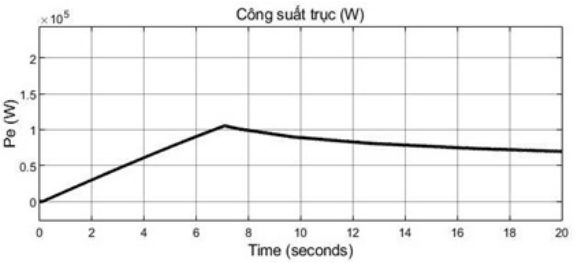
Hình 2. Đồ thị đặc tính mô men của động cơ PMSM 100 kW

Hình 2 mô tả đặc tính mô men trên trục của động cơ. Đường đặc tính mô men của động cơ (nét liền) đã bám sát đường đặc tính điều khiển (nét đứt). Từ thời điểm có tín hiệu điều khiển, mô men động cơ nhanh chóng đạt giá trị lớn nhất T_{max} = 229,8 Nm. Mô men dao động trong biên độ hẹp và giảm nhẹ xuống 219.6 Nm ở giây thứ 7. Sau đó, giá trị mô men giảm theo đường cong với độ dốc giảm dần.



Hình 3. Đồ thị đặc tính vận tốc góc của động cơ PMSM 100 kW

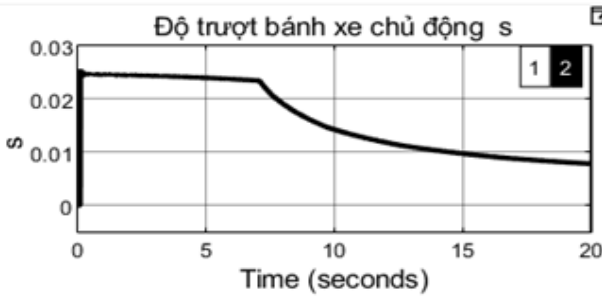
Kết quả mô phỏng quy luật thay đổi tốc độ của động cơ (Hình 3) có thể được chia thành hai giai đoạn làm việc của động cơ: vùng vận tốc trục dưới 4700 vòng/phút, và vùng từ thông yếu khi vận tốc trục trong khoảng từ 4700 đến 9000 vòng/phút. Ở vùng vận tốc thấp, tốc độ góc tăng tuyến tính do mô men động cơ tạo ra được duy trì ổn định, trong khi vận tốc xe (Hình 7) còn nhỏ nên ảnh hưởng của sức cản không khí chưa đáng kể. Động cơ làm việc trong vùng từ thông yếu, tốc độ góc của động cơ vẫn tiếp tục tăng nhưng với gia tốc giảm.



Hình 4. Đặc tính công suất của động cơ PMSM công suất 100 kW

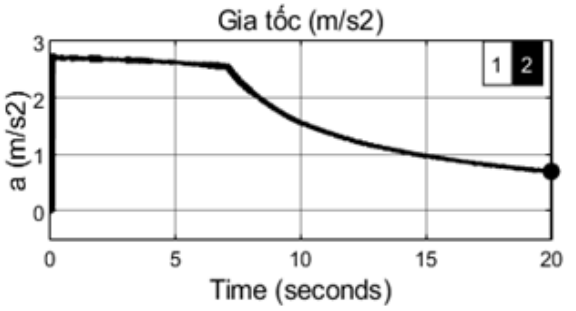
Trong giai đoạn đầu, công suất động cơ tăng tốc gần như tuyến tính (Hình 4). Do công suất động cơ tỷ lệ thuận với tốc độ trên trục, nó đạt giá trị lớn nhất 100,9 kW tại tốc độ 4664 vòng/phút. Dòng điện lớn nhất đạt 460 A. So

sánh với nghiên cứu của K. Zhou và cộng sự [7], hệ thống hiện tại cho thời gian đạt công suất định mức nhanh hơn khoảng 3 giây.



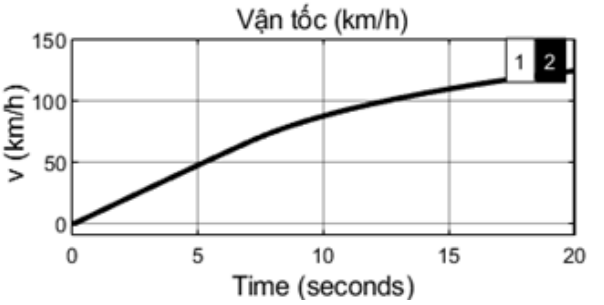
Hình 5. Đặc tính trượt của bánh xe chủ động

Độ trượt của bánh xe chủ động về cơ bản là biến đổi ổn định từ 0,025 xuống 0,005. Đây là vùng trượt bánh xe bám đường tốt, không xảy ra hiện tượng trượt quay. Độ trượt dao động trong biên độ hẹp do ảnh hưởng từ mô men động cơ.

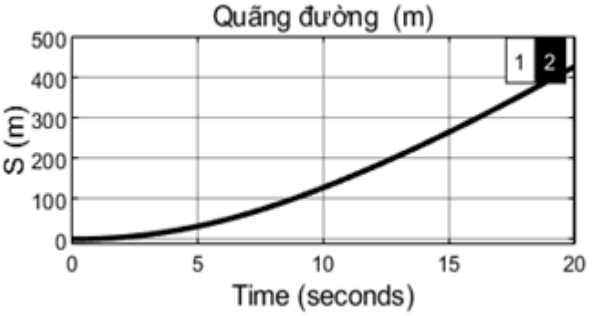


Hình 6. Đặc tính gia tốc dọc của ô tô

Xe đạt vận tốc 100 km/h sau 12,65 giây (Hình 7) với quãng đường di chuyển là 197 m (Hình 8). Kết quả này đang thấp hơn khoảng 3 giây so với mức dưới 9 giây là thời gian tăng tốc từ 0 đến 100 km/h của mẫu xe VinFast VF 34e được một số đại lý chính hãng công bố. Trong giai đoạn đầu gia tốc đạt 2,5 m/s² sau đó giảm xuống 0,7 m/s².



Hình 7. Đặc tính vận tốc của ô tô



Hình 8. Quãng đường tăng tốc của ô tô trong 20 giây.

Về tổng thể, mô hình đã mô tả chính xác các mối quan hệ giữa mô men, tốc độ và công suất của động cơ PMSM trong quá trình tăng tốc. Khả năng duy trì công suất ổn định ở vùng tốc độ cao thể hiện rõ ưu thế của phương pháp điều khiển véc-tơ có bù yếu từ. Ngoài ra, đặc tính động lực học của xe cho thấy hệ thống truyền lực được thiết kế có thể đáp ứng yêu cầu vận hành thực tế của các dòng xe điện tầm trung như VinFast VF e34.

4. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình mô phỏng hoàn chỉnh hệ thống truyền lực ô tô điện trang bị động cơ điện PMSM công suất 100 kW. Kết quả mô phỏng đánh giá các đặc tính điện, cơ học của hệ thống phù hợp thực tế và các nghiên cứu trước đó. Hệ thống đã duy trì được công suất định mức 100 kW trong toàn bộ vùng tốc độ cao nhờ phương pháp điều ☞

khiển véc-tơ giúp động cơ PMSM hoạt động trong vùng từ thông yếu.

Trong tương lai, mô hình có thể tích hợp thêm mô hình pin thực tế với các đặc tính nhiệt, suy giảm tuổi thọ của pin hoặc kết hợp hệ thống phanh tái sinh để làm tăng hiệu quả thu hồi năng lượng.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài nghiên cứu cấp Trường Đại học Mỏ - Địa chất, trong khuôn khổ đề tài cấp cơ sở mã số T25-04. Nhóm tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Mỏ - Địa chất đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **14/10/2025**
Ngày phản biện: **28/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. P. Pillay and R. Krishnan, "*Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives. Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive*". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no. 2, pp. 265-273, Mar./Apr. 1989. SCIRP

[2]. M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, "*Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*", 2nd ed.. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017. doi:10.1201/9781420054002. Taylor & Francis

[3]. X. Men, H. Xu, Y. Zhu, and Y. Li, "*Implementation of an Improved Motor Control for Electric Vehicles as Industrial Applications*". Energies, vol. 15, no. 13, art. 4833, 2022. doi:10.3390/en15134833. MDPI

[4]. G. Sieklucki and D. Kara, "*Design and Modelling of Energy Conversion with the Two-Region Torque Control of a PMSM in an EV Powertrain*". Energies, vol. 15, no. 13, art. 4887, 2022. doi:10.3390/en15134887. MDPI

[5]. J. Medina, "*Utility of Field Weakening and Field-Oriented Control in PMSM Drives: Simulation Case Study*". Proceedings, vol. 47, no. 1, art. 17, 2023. doi:10.3390/proceedings2023047017. MDPI

[6]. H. Wei, Z. Xu, and Y. Jiang, "*High-Speed Control Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor in Flux-Weakening Field*". Energy Reports, 2020 (online first).

[7]. K. Zhou, M. Ai, D. Sun, N. Jin, và X. Wu, "*Field Weakening Operation Control Strategies of PMSM Based on Feedback Linearization*". Energies, vol. 12, no. 23, p. 4526, 2019, doi: 10.3390/en12234526mdpi.com.

[8]. Y. Zhang, C. Zhao, B. Dai, và Z. Li, "*Dynamic Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Electric Vehicle Based on Simulink*.". Energies, vol. 15, no. 3, p. 1134, 2022, doi: 10.3390/en15031134.

THUẬT PHÓNG TRONG MÔI TRƯỜNG NƯỚC CỦA ĐẠN ĐDN-M1

INTERNAL BALLISTICS OF THE ĐDN-M1 PROJECTILE IN UNDERWATER ENVIRONMENT

Đào Văn Đoan[1,*], Nguyễn Văn Dương[2]
[1]Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự
[2]Tiểu đoàn 2, Học viện Kỹ thuật quân sự
**Email: doandv@lqdtu.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo đã trình bày phương pháp xác định quy luật áp suất, vận tốc của đầu đạn ĐDN-M1 trong nòng súng khi bắn dưới nước có tính đến hiện tượng phá hủy chi tiết bịt kín và dẫn hướng ban đầu cho đầu đạn khi chuyển động trong nòng. Kết quả bài báo chính là cơ sở để tính toán thiết kế đạn bắn dưới nước ĐDN-M1 dùng cho súng bắn hai môi trường trang bị cho lực lượng đặc công nước, người nhái.

Từ khóa: *Súng bắn hai môi trường; Đạn bắn dưới nước.*

ABSTRACT

The paper presents a method for determining the pressure and velocity laws of the DDN-M1 bullet in the amphibious firearm barrel when fired underwater, taking into account the destruction of the sealing details and the initial guidance of the projectile when moving in the barrel. The results of the article are the basis for calculating the design of underwater projectiles DDN-M1 for amphibious firearm equipped for water special forces and frogmen.

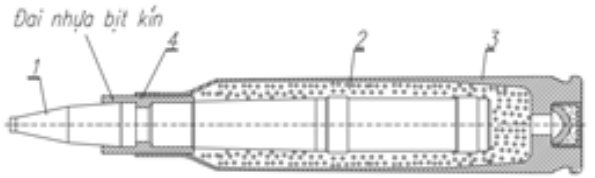
Keywords: *Amphibious firearm; Projectile in underwater environment.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nghiên cứu bài toán thuật phóng trong của đạn bắn dưới nước dùng cho súng bắn hai môi trường là một trong các bài toán cơ bản và quan trọng trong nghiên cứu thiết kế, chế tạo đồng bộ súng bắn hai môi trường và đạn bắn dưới nước trang bị cho lực lượng đặc công nước, người nhái. Trong bài báo này tập trung vào nghiên cứu quy luật áp suất và chuyển động của đầu đạn bắn dưới nước khi chuyển động trong nòng có tính đến sự phá hủy của chi tiết bịt kín và dẫn hướng ban đầu gây ra hiện tượng thoát khí qua khe hở giữa đầu đạn và thành nòng. Đây chính là điểm mới trong bài báo này.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN

Khi thực hiện phát bắn đạn ĐDN-M1 (Hình 1) dưới nước, quá trình xảy ra như sau: ☞



Hình 1. Đạn chuyên dụng bắn dưới nước ĐDN-M1:
1. Đầu đạn, 2. Thuốc phóng, 3. Vỏ liều, 4. Đai nhựa

Sau khi phát hỏa, dưới tác dụng của áp suất khí thuốc, đạn và đai nhựa cùng được tống vào nòng. Đai nhựa trên đầu đạn có tác dụng miết vào lòng nòng, bịt kín không cho khí thuốc thoát ra và vừa bảo đảm đạn không có chuyển động quay. Tuy nhiên, do đai nhựa làm bằng vật liệu nhựa chịu lực kém, dưới tác dụng của áp suất khí thuốc và ma sát với lòng nòng, đai nhựa sẽ bị phá hủy trước khi đạn ra khỏi nòng và làm khí thuốc thoát ra khỏi khe hở giữa đầu đạn và thành nòng, gây ra hiện tượng giảm áp suất khí thuốc trong nòng. Quá trình bắn đạn dưới nước có thể chia làm hai giai đoạn:

- Giai đoạn 1: Từ khi đạn bắt đầu chuyển động tới khi đai nhựa bị phá hủy.

- Giai đoạn 2: Từ khi đai nhựa bị phá hủy đến khi đáy đầu đạn ra khỏi mặt cắt miệng nòng.

2.1. Các giả thiết

Từ mô hình chuyển động của đầu đạn khi bắn dưới nước (Hình 2), để đơn giản và thuận lợi trong quá trình tính toán, ngoài các giả thiết về thuật phóng trong thông thường, mô hình chuyển động của đạn bắn dưới nước được bổ sung thêm một số giả thiết sau:

- Thuốc phóng cháy theo quy luật hình học [1, 2, 3];

- Toàn bộ liều thuốc phóng cháy trong điều kiện môi trường có áp suất như nhau và bằng áp suất thuật phóng p;

- Quy luật tốc độ cháy: $u = u_1.p$;

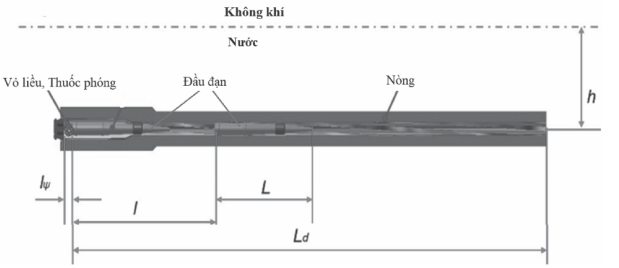
- Khối lượng đầu đạn tính bằng khối lượng thực của đầu đạn và khối lượng nước trong lòng nòng phía trước đạn [2];

- Vận tốc nước trong lòng nòng phía trước đầu đạn bằng vận tốc của đầu đạn [1, 5];

- Sự phá hủy đai nhựa diễn ra đột ngột và hoàn toàn khi áp suất trong nòng đạt đến áp suất phá hủy của nhựa;

- Lượng khí phụt qua khe hở không làm thay đổi khối lượng cột nước trong lòng nòng;

- Bỏ qua ảnh hưởng của bọt khí do hiện tượng phụt khí trong lòng nòng.



Hình 2. Mô hình chuyển động của đầu đạn trong nòng khi bắn dưới nước (L_d - Chiều dài nòng, L - Chiều dài đầu đạn, l - Quãng đường chuyển động của đầu đạn)

2.2. Thành lập hệ phương trình vi phân thuật phóng khi bắn dưới nước

Từ các giải thiết trên, ta xây dựng được hệ phương trình vi phân thuật phóng trong [1, 2, 3, 4, 5] cho đạn ĐDN-M1 bắn dưới nước trên súng hai môi trường như sau:

$$\begin{cases} \dfrac{dl}{dt} = \xi_1 \xi_3 . v \\ \dfrac{dv}{dt} = \xi_1 \xi_3 \dfrac{S.\left(\dfrac{p + \dfrac{\omega . D}{3.m.S}}{1 + \dfrac{\omega}{3.m}} \right) - D}{m} \\ D = \left(p_{atm} + \rho . g . h \right) . S + \dfrac{1}{2} . \rho . v_d^2 . S + \dfrac{1}{2} . C_f . \rho . v_d^2 . \pi . d . \left(l_b - l_d - l \right) \\ m = m_d + \rho . S . \left(l_b - l_d - l \right) \\ \dfrac{dz}{dt} = \xi_2 \dfrac{p}{I_k} \\ \dfrac{d\omega_k}{dt} = \omega \dfrac{d\psi}{dz} . \dfrac{dz}{dt} = \xi_2 \omega \chi . \left(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2 \right) . \dfrac{dz}{dt} - \xi_4 G_b - (1 - \xi_3) G_d - \xi_5 Gr \\ \dfrac{dW}{dt} = \xi_2 \dfrac{1 - \alpha\delta}{\delta} \chi \omega (1 + 2\lambda z + 3\mu z^2) \dfrac{dz}{dt} + \xi_3 S v_d \\ \dfrac{dp}{dt} = \dfrac{1}{W} \left[\xi_2 \dfrac{p}{I_k} . \chi . \omega . f . \left(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2 \right) - K_T . p - kp \dfrac{dW}{dt} - K_p (1 - \xi_3) G_d - K_p \xi_4 G_b - K_p \xi_5 G_r \right] \\ p = \dfrac{f . \omega . \psi - \theta . (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5)}{S . \left(l_\psi + l \right)} \end{cases} \quad (1)$$

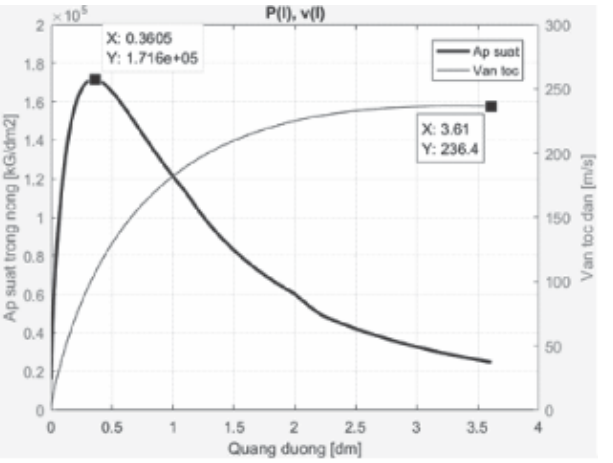
Trong đó: v - Vận tốc đầu đạn; p - Áp suất khí thuốc; S_d - Diện tích ngang lòng nòng; α - Cộng tích khí thuốc; f - Lực thuốc phóng; m_d - Khối lượng đầu đạn; ω - Trọng lượng thuốc phóng; ω_k - Trọng lượng khí thuốc; I_k - Xung lượng áp suất khí thuốc; χ, λ - Các đặc trưng hình dạng thuốc phóng; z - Độ dày tương đối của hạt thuốc; K_t - Hàm xác định tổn thất nhiệt; A - Tương đương cơ nhiệt; F_k - Diện tích bề mặt ban đầu của buồng đạn; d - Cỡ nòng; l - Quãng đường chuyển động của đạn trong nòng; R - Hằng số khí; σ_T - Hệ số truyền nhiệt không đổi; k - Chỉ số đoạn nhiệt; $W = W_0 + S_d.l$ - Thể tích không gian sau đáy đạn; W_0 - Thể tích ban đầu buồng đạn; G_b - Lưu lượng khí chảy vào buồng khí; G_d - Lưu lượng khí phụt qua miệng nòng; G_r - Lưu lượng khí phụt qua khe hở giữa đạn và lòng nòng.

$$G_r = \mu_r . S_r \sqrt{\frac{p\omega_k}{w}} . \left[\xi_r A_1 + \left(1 - \xi_r \right) A_2 \right] \quad (2)$$

Trong đó: μ_r - Hệ số lưu lượng dòng chảy; S_r - Diện tích tiết diện chảy; ξ_r - Biến điều khiển xác định trạng thái dòng chảy; A_1, A_2 - Hệ số dòng chảy trên âm, dưới âm.

2.3. Giải bài toán thuật phóng trong và kết quả

Giải hệ phương trình vi phân vi phân thuật phóng trong (1) của đạn bắn dưới nước trên súng hai môi trường bằng thuật toán Runge-Kutta bậc 4 [3]. Với các thông số đầu vào cơ bản như d = 5,56mm; m_d = 20g; L = 48mm; $W_0 = 2.10^{-3}dm^3$; L_d = 361mm; ω = 0,85g, ta nhận được quy luật thay đổi vận tốc của đầu đạn và quy luật áp suất ở trong nòng khi đầu đạn chuyển động trong nòng ở dưới nước như hình 3:



Hình 3. Đồ thị áp suất và vận tốc đầu đạn theo chiều dài nòng

Từ kết quả hình 3, ta nhận được áp suất lớn nhất trong nòng: P_{max} = 1716 kG/cm² và vận tốc đầu đạn tại miệng nòng: V_d = 236,4 m/s.

3. THỬ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

3.1. Thử nghiệm bắn đo áp suất khí thuốc ở dưới nước

Dùng nòng thử nghiệm đo áp suất chuyên dụng chiều dài 361mm bắn đo áp suất được kẹp chặt trên giá chuyên dụng dưới nước ở độ sâu 0,8m; lắp trụ đồng ϕ3×4,9mm dự áp 1000 kG/cm². Bắn 10 viên đạn đo áp lấy giá trị áp suất trung bình.

- Kết quả kiểm tra: P_{maxTB} = 1690 kG/cm². ☞

3.2. Thử nghiệm bắn đo vận tốc đầu đạn ở dưới nước

Dùng nòng thử nghiệm chuyên dụng đo vận tốc chiều dài 361mm bắn đo vận tốc được kẹp chặt trên giá chuyên dụng dưới nước ở độ sâu 0,8m; sử dụng bia đứt dây và thiết bị đo thời gian UTC-8 (bia thứ nhất cách miệng nòng 0,8 m, bia thứ hai cách bia thứ nhất 1m). Bắn 20 viên đạn đo vận tốc $V_{1,3TB}$ lấy giá trị trung bình.

- Kết quả kiểm tra: $V_{1,3TB}$ = 230,8 m/s.

3.3. Nhận xét và kết luận

Từ kết quả tính toán lý thuyết, ta nhận được áp suất lớn nhất trong nòng: P_{max} = 1716 kG/cm² và vận tốc đầu đạn tại miệng nòng: V_d = 236,4 m/s. So sánh với giá trị thử nghiệm áp suất lớn nhất trung bình của nhóm bắn P_{maxTB} = 1690 kG/cm² và kết quả đo vận tốc trung bình $V_{1,3TB}$ = 230,8 m/s cho thấy mô hình tính toán thuật phóng trong có kể đến sự phá hủy của chi tiết nhựa bịt kín là phù hợp, đảm bảo tính chính xác, tin cậy khi tính toán thiết kế chế tạo đồng bộ súng hai môi trường và đạn bắn dưới nước trang bị cho lực lượng đặc công nước, người nhái.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp xác định quy luật áp suất, vận tốc của đầu đạn ĐDN-M1 trong nòng súng bắn hai môi trường khi bắn dưới nước có tính đến hiện tượng phá hủy chi tiết bịt kín và dẫn hướng ban đầu cho đầu đạn khi chuyển động trong nòng. Kết quả bài báo cho thấy mô hình tính toán thuật phóng trong có kể đến sự phá hủy của chi tiết nhựa bịt kín là phù hợp, đảm bảo tính chính xác, tin cậy khi tính toán thiết kế chế tạo đồng bộ súng hai môi trường và đạn bắn dưới nước trang bị cho lực lượng đặc công nước, người nhái.❖

Ngày nhận bài: **15/10/2025**
Ngày phản biện: **27/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Đào Văn Đoan, Hà Huy Nguyện, Nguyễn Văn Hưng, Mai Quốc Chiên, Nguyễn Sỹ Hòa (2011), "*Mô hình tính toán sự chuyển động của đạn khi bắn dưới nước*". Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, số 145, Học viện Kỹ thuật quân sự.

[2]. Đào Văn Đoan và Nguyễn Văn Hưng (2014), "*Xây dựng mô hình tính toán thuật phóng ngoài đạn bắn dưới nước*". Tạp chí Khoa học và Quân sự, Học viện Kỹ thuật quân sự (163), tr.114-122.

[3]. Nghiêm Xuân Trình, Nguyễn Quang Lượng, Nguyễn Trung Hiếu và Ngô Văn Quảng (2015), "*Thuật phóng trong*". Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội.

[4]. Vũ Duy Quang (2006), "*Thủy khí động lực ứng dụng*". Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

[5]. Richard Rand, Rudra Pratap, Deepak Ramani, Jeffery Cipolla, Ivan Kirschner (1997), "*Impact dynamic of a supercavitating underwater projectile*". DOI: 10.1115/DETC97/VIB-3929.

NGHIÊN CỨU TIỆN VẬT LIỆU CỨNG SAU NHIỆT LUYỆN CÓ HỖ TRỢ GIA NHIỆT

RESEARCH ON THERMALLY ASSISTED TURNING OF HARDENED MATERIALS USING CONVENTIONAL TOOLS

Chảo Láo Lở[1], Triệu Quý Huy[2], Hoàng Trung Kiên[3]
[1]Công ty Cổ phần Công nghiệp Việt Long
[2]Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp
[3]Viện Nghiên cứu Cơ khí

TÓM TẮT

Gia công vật liệu cứng sau nhiệt luyện là xu hướng công nghệ tiên tiến thay thế cho mài tinh trong chế tạo chi tiết chính xác. Tuy nhiên, lực cắt lớn, mòn dao nhanh và biến dạng đàn hồi cao là các thách thức chính. Bài báo này tổng hợp và phân tích các nghiên cứu trong và ngoài nước về gia công có hỗ trợ nhiệt (Thermal Assisted Machining – TAM), làm rõ ưu và nhược điểm của từng phương pháp (laser, cảm ứng, điện trở). Từ đó, nhóm tác giả đề xuất hướng nghiên cứu tiện vật liệu cứng có hỗ trợ gia nhiệt bằng dụng cụ cắt thông dụng tích hợp cảm ứng từ, phù hợp với điều kiện thiết bị tại Việt Nam. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm bước đầu cho thấy lực cắt giảm 25-40%, tuổi thọ dao tăng 2-3 lần, độ nhám giảm 0,3-0,5 µm chứng tỏ tính khả thi ứng dụng trong sản xuất khuôn mẫu và chi tiết chính xác.

Từ khóa: *Tiện vật liệu cứng; Gia công có hỗ trợ nhiệt; Dụng cụ cắt thông dụng; Cảm ứng từ; Mô phỏng phần tử hữu hạn.*

ABSTRACT

Machining hard materials after heat treatment is an advanced technology trend replacing fine grinding in manufacturing precision parts. However, high cutting force, rapid tool wear and high elastic deformation are the main challenges. This article synthesizes and analyzes domestic and foreign studies on thermally assisted machining (Thermal Assisted Machining – TAM), clarifying the advantages and disadvantages of each method (laser, induction, resistance). From there, the authors propose a research direction for turning hard materials with heating support using common cutting tools integrated with magnetic induction, suitable for equipment conditions in Vietnam. Initial simulation and experimental results show that cutting force is reduced by 25-40%, tool life is increased by 2-3 times, roughness is reduced by 0,3-0,5 µm, demonstrating the feasibility of application in the production of molds and precision parts.

Keywords: *Hard material turning; Thermally assisted machining; General cutting tools; Magnetic induction; Finite element simulation.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong sản xuất cơ khí hiện đại, gia công vật liệu cứng sau nhiệt luyện đóng vai trò quan trọng trong chế tạo khuôn mẫu, chi tiết chịu tải và các bộ phận có độ chính xác cao. Các vật liệu như SKD11, SKD61, H13, D2… sau khi tôi đạt độ cứng 55-65 HRC thường rất khó cắt, dẫn đến lực cắt lớn, nhiệt độ vùng cắt cao (vượt 700°C) và mòn dao nhanh, làm giảm tuổi thọ dụng cụ cũng như hiệu suất gia công.

Các giải pháp truyền thống như sử dụng dao PCBN, gốm hoặc dao phủ TiAlN mang lại hiệu quả cắt tốt nhưng chi phí dụng cụ và thiết bị rất cao, khó áp dụng rộng rãi trong sản xuất. Do đó, các phương pháp gia công có hỗ trợ nhiệt (thermal-assisted machining) như Laser Assisted Machining (LAM) hay Induction Assisted Machining (IAM) được xem là hướng tiếp cận tiềm năng, làm nóng cục bộ vật liệu trước hoặc trong quá trình cắt từ đó giảm ứng suất cắt, tăng tính dẻo của vật liệu và kéo dài tuổi thọ dao.

Ở Việt Nam, việc triển khai các công nghệ hỗ trợ bằng laser hay hệ thống cảm ứng công suất lớn gặp khó khăn do chi phí đầu tư và thiết bị phức tạp. Vì vậy, nghiên cứu tận dụng dụng cụ cắt thông thường kết hợp gia nhiệt cục bộ bằng cảm ứng từ là hướng đi khả thi, có ý nghĩa thực tiễn cao, góp phần nâng cao năng suất, chất lượng và hiệu quả kinh tế trong gia công vật liệu cứng sau nhiệt luyện.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

2.1. Nghiên cứu quốc tế

Sun et al. [1] và Germain et al. [2] đã chứng minh rằng gia nhiệt bằng chùm laser trước vùng cắt giúp giảm 30-50% lực cắt và hạn chế vết nứt tế vi trên thép hợp kim và hợp kim titan Ti6Al4V. Mô hình FEM 3D của Yang et al. [3] cho thấy khi nhiệt độ phôi tăng từ 300-600°C, mòn dao giảm trên 40%, nâng cao năng suất bóc tách phoi. Tuy nhiên, phương pháp này đòi hỏi hệ thống laser công suất cao, chi phí lớn và yêu cầu an toàn nghiêm ngặt.

Laser assisted machining (LAM): Sun et al. [1] chứng minh giảm lực cắt 30-50% với thép cứng. Germain [2] mô phỏng FEM 3D cho thấy phân bố nhiệt ổn định ở 400-600°C. Tuy nhiên, thiết bị laser yêu cầu công suất lớn (≥ 500 W), chi phí cao.

Induction-assisted machining (IAM): Amin & Ginta [4] đạt hiệu quả giảm 25% lực cắt, tăng độ ổn định phoi, nhưng hệ thống cảm ứng vẫn cồng kềnh.

Resistance heating machining (RHM): Luo & Shih [6] phát triển dao tiện có dây nung nội tại đạt nhiệt 400°C, giảm mòn dao 35%.

Như vậy, các nghiên cứu quốc tế tập trung vào tối ưu nguồn nhiệt và kiểm soát vùng nhiệt cắt, song chưa có mô hình chi phí thấp.

2.2. Nghiên cứu trong nước

- Nguyễn Thành Huân (2018) [7]: Gia nhiệt laser trong tiện thép 9XC làm giảm lực cắt và cải thiện nhám bề mặt.

- Mạc Thị Bích (2019) [8]: Gia công phay SKD11 bằng cảm ứng điện từ, giảm mòn dao đáng kể.

- Nguyễn Đức Toàn (2023) [9]: Tiện có hỗ trợ nhiệt độ 200-400°C làm tăng năng suất mà không làm thay đổi vi cấu trúc vật liệu.

Tuy nhiên, hướng nghiên cứu quá trình tiện thép sau nhiệt có độ cứng cao bằng dao thông dụng chưa được triển khai nên là khoảng trống nghiên cứu mà đề tài hướng đến.

3. KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU VÀ ĐỊNH HƯỚNG ĐỀ TÀI

Phân tích các công trình đã công bố cho thấy:

- Các phương pháp TAM hiện có (LAM, IAM, PAM) hiệu quả cao nhưng chi phí lớn.

- Gia công tiện vật liệu cứng bằng dụng cụ cắt phổ thông chưa có giải pháp tối ưu kết hợp nhiệt hỗ trợ.

- Việc tận dụng dụng cụ cắt thông dụng kết hợp nguồn nhiệt tạo ra bước tiến lớn về hiệu quả, chi phí sản xuất.

Do đó, hướng nghiên cứu mới tập trung quá trình gia nhiệt cảm ứng phù hợp với máy tiện cơ khí dùng dụng cụ cắt thông thường, chi phí thấp, dễ ứng dụng trong doanh nghiệp nhỏ và vừa.

4. HƯỚNG NGHIÊN CỨU ĐỀ XUẤT

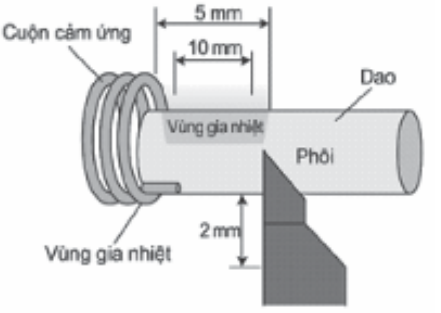
- Đối tượng: Thép SKD11 (HRC 55-60).

- Nguồn nhiệt: Cuộn dây cảm ứng tần số cao (100 kHz) gắn vào gá dao, truyền nhiệt cục bộ 350-450°C.

- Mô phỏng: Sử dụng DEFORM/ ABAQUS, mô hình Johnson Cook cho vật liệu, phân tích trường nhiệt cơ (Hình 1).

- Thực nghiệm: Đo lực cắt bằng Kistler, nhiệt độ bằng camera hồng ngoại, độ nhám bằng SJ410.

- Phân tích tối ưu: Taguchi và GRA xác định chế độ cắt tối ưu (Vc = 90-150 m/min, f = 0,1-0,2 mm/vg, nhiệt hỗ trợ từ 350-600°C).



Hình 1. Sơ đồ mô hình cảm ứng, dao và phôi

5. KẾT QUẢ DỰ KIẾN

- Giảm lực cắt trung bình 25-40%;
- Tăng tuổi thọ dao 2-3 lần;
- Giảm độ nhám bề mặt 0,3-0,5 µm.

Bảng 1. Kết quả dự kiến của quá trình tiện vật liệu cứng có hỗ trợ gia nhiệt

Thông số	Tiện thường	Tiện có hỗ trợ gia nhiệt (350-450°C)	Mức cải thiện (%)	Ghi chú
Lực cắt trung bình (Fc, N)	820	520	↓ 36,6	Giảm lực cắt giúp ổn định phoi
Mòn dao V_B (µm, sau 10 phút)	125	60	↓ 52,0	Tuổi thọ dao tăng 2,1 lần
Độ nhám bề mặt Ra (µm)	0,85	0,50	↓ 41,2	Bề mặt mịn, ít nứt tế vi
Nhiệt độ vùng cắt (°C)	720	450	↓ 37,5	Kiểm soát tốt biến dạng nhiệt
Năng suất bóc tách phoi (cm^3/phút)	2,8	3,6	↑ 28,6	Năng suất tăng đáng kể

Thiết bị đơn giản, tích hợp trên máy tiện vạn năng hiện có mà không thay đổi kết cấu. Ứng dụng cho doanh nghiệp cơ khí vừa và nhỏ, xưởng khuôn mẫu, dụng cụ y tế, chi tiết chính xác.

6. KẾT LUẬN

Bài báo khẳng định hướng gia công có hỗ trợ gia nhiệt bằng dụng cụ cắt thông dụng là giải pháp mới, chi phí thấp, thích hợp với điều kiện thiết bị trong nước. Nghiên cứu làm rõ cơ chế tương tác nhiệt và cơ trong vùng cắt nhằm phát triển công nghệ tiện vật liệu cứng tại Việt Nam.❖

Ngày nhận bài: **15/10/2025**
Ngày phản biện: **24/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Sun Y. et al., "*Laser-assisted machining of hardened steel*". Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2019.
[2]. Germain G. et al., "*Thermo-mechanical modeling of LAM process*". J. Mater. Process. Technol., 2020.
[3]. Yang J. et al., "*Finite Element Simulation of LAM on Ti6Al4V*". Procedia CIRP, 2021.
[4]. Amin A.K.M.N. & Ginta T.L., "*Induction heating assisted hard turning of SKD11 steel*". Wear, 2018.
[5]. Dughiero F. et al., "*Electromagnetic–thermal modeling for induction heating*". Appl. Therm. Eng., 2022.
[6]. Luo S.Y. & Shih A.J., "*Resistance heating tool in hard turning*". J. Manuf. Sci. Eng., 2020.
[7]. Nguyễn Thành Huân, "*Nghiên cứu tiện thép hợp kim 9XC có hỗ trợ laser*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, 2018.
[8]. Mạc Thị Bích, "*Gia công SKD11 bằng cảm ứng điện từ*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ, 2019.
[9]. Nguyễn Đức Toàn, "*Ảnh hưởng nhiệt độ hỗ trợ đến gia công vật liệu cứng*". Hội nghị Cơ khí toàn quốc, 2023.

XÁC ĐỊNH NHIỆT ĐỘ BỀ MẶT NGOÀI CỦA NÒNG SÚNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐO THỰC NGHIỆM

DETERMINATION OF THE SURFACE TEMPERATURE OF GUN BARREL BY EXPERIMENTAL MEASUREMENT METHOD

TS. **Võ Văn Biên**[1,*], ThS. **Lê Văn Dũng**[2], KS. **Trần Văn Mạnh**[3]
[1]Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự
[2]Phòng Hậu cần - Kỹ thuật, Trường Sĩ quan Lục quân 2
[3]Phòng Tham mưu - Hành chính, Trường Sĩ quan Lục quân 2
**Email: vovanbien@lqdtu.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo đã trình bày phương pháp xác định nhiệt độ bề mặt ngoài của nòng súng bằng thực nghiệm. Dữ liệu thu được từ thực nghiệm phản ánh chính xác nhiệt độ bề mặt ngoài của nòng súng khi bắn loạt ngắn. Kết quả thu được từ nghiên cứu này là cơ sở khoa học đáng tin cậy để đánh giá mô hình lý thuyết xác định trường nhiệt độ thành nòng súng pháo. Từ kết quả nghiên cứu của bài toán nhiệt, các nhà thiết kế có thể lựa chọn vật liệu chế tạo nòng, đưa ra chế độ bắn phù hợp cho từng loại súng theo các yêu cầu sử dụng để đảm bảo hiệu quả khai thác của các loại súng pháo cụ thể.

Từ khóa: *Nhiệt độ nòng súng; Súng tự động; Phương pháp thực nghiệm.*

ABSTRACT

The paper presents the method for experimentally determining the outer surface temperature of a gun barrel. The experimental data accurately reflect the outer surface temperature of the gun barrel during short burst firing. The results obtained from this study provide a reliable scientific basis for evaluating the theoretical model for determining the temperature field of the gun barrel wall. From the research results of the thermal problem, designers can choose the material to make the gun barrel, give the appropriate firing mode for each type of gun according to the usage requirements to ensure the exploitation efficiency of specific types of artillery guns.

Keywords: *Barrel temperature; Automatic weapon; Experimental method.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khi bắn, nòng súng chịu áp suất cao và nhiệt độ lớn, chính điều này đã gây nên ảnh hưởng xấu tới quá trình làm việc của nòng súng như: Sự chênh lệch nhiệt độ theo chiều dày nòng làm xuất hiện ứng suất và biến dạng nhiệt, điều này cần phải được tính tới khi đánh giá độ bền nòng cũng như tính đến sự thay đổi cơ bản đặc tính cơ học của vật liệu làm nòng súng. Hơn nữa nó còn làm giảm tính chất đàn hồi của vật liệu nòng dẫn tới độ cứng giảm, ở một mức độ nào đó, làm tăng sự uốn tĩnh và động của nòng khi bắn và làm tăng sự tản mát của đạn,… Đặc biệt, nhiệt độ đốt nóng cao gây nên mòn lớn bề mặt lòng nòng và làm giảm tuổi thọ của nòng. Do đó, việc nghiên cứu, phân tích trạng thái nhiệt của nòng khi bắn là cơ sở để xác định độ mòn và tuổi thọ của nòng. Liên quan đến vấn đề truyền nhiệt, đã có nhiều nhà khoa học trong nước và quốc tế quan tâm nghiên cứu và đã đạt được nhiều thành tựu nhất định, điển hình là các nghiên cứu [1-4]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu chỉ mới dừng lại ở mô phỏng lý thuyết về truyền nhiệt. Các nghiên cứu lý thuyết thường sử dụng nhiều giả thiết để đơn giản trong khi xây dựng mô hình toán học. Mặt khác, trong quá trình tính toán thường sử dụng nhiều hệ số cho trước và các hệ số thực nghiệm, điều này làm cho kết quả tính toán lý thuyết có sai số nhất định so với kết quả thực tế. Để kết quả bài toán mô phỏng lý thuyết có thể chấp nhận và để chứng minh mô hình toán học được xây dựng là đúng đắn thì nghiên cứu thử nghiệm là một yêu cầu bắt buộc. Trong bài báo này, một nghiên cứu thực nghiệm nhằm xác định nhiệt độ bề mặt ngoài của nòng súng đã được thiết lập. Đây là cơ sở để đánh giá mô hình lý thuyết về truyền nhiệt độ thành nòng súng cũng như giúp cho các nhà thiết kế có thể lựa chọn vật liệu chế tạo nòng, đưa ra chế độ bắn phù hợp cho từng loại súng theo các yêu cầu sử dụng để đảm bảo hiệu quả khai thác của từng loại súng pháo cụ thể.

2. THIẾT LẬP THÍ NGHIỆM, THỬ NGHIỆM

2.1. Mục đích, đối tượng và điều kiện thử nghiệm

- Mục đích thử nghiệm: Xác định nhiệt độ bề mặt ngoài của nòng súng khi bắn loạt ngắn.

- Đối tượng thử nghiệm: Súng tiểu liên AK-47 cấp 2 có số hiệu súng là BSC103897 đã được kiểm tra kỹ thuật. Súng được gá chắc chắn trên giá súng chuyên dùng. Đạn súng 7,62mm ĐS-K56 T thuộc lô đạn số P11-79-539 do Nga sản xuất.

- Điều kiện tiến hành thử nghiệm: Thử nghiệm đo nhiệt độ mặt ngoài của nòng súng được tiến hành tại hầm bắn thuộc Trung tâm Kỹ thuật Vũ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự. Buổi thử nghiệm được diễn ra trong điều kiện nhiệt độ môi trường 27°C ÷ 30°C. Đạn được bảo ôn trong điều kiện tiêu chuẩn (áp suất 760mmHg, nhiệt độ môi trường 20°C, độ ẩm không khí 60%).

2.2. Các thiết bị đo lường được sử dụng trong thử nghiệm

Từ thực tiễn đo nhiệt độ bề mặt ngoài của nòng súng khi bắn, chúng ta nhận thấy rằng nhiệt độ của nòng súng thay đổi liên tục, không ổn định sau mỗi phát bắn và khi ngừng bắn. Hiện nay, một số phương pháp sau thường được sử dụng để đo nhiệt độ của các chi tiết trong vũ khí:

- Đo nhiệt độ dạng tiếp xúc: Cảm biến đo được gắn trực tiếp vào đối tượng cần đo. Các cảm biến đo dạng này thường có cấu tạo theo

nguyên lý nhiệt điện và được đặt trên một tấm cách điện nhỏ có hình dạng như con tem (gọi là tem nhiệt, hình 1), hoặc được đặt trong các lớp bảo vệ khác có hình dạng như một thanh kim loại nhỏ (gọi là cặp nhiệt, hình 2). Khi sử dụng, cần linh hoạt lựa chọn các loại cảm biến theo mục đích và nhiệm vụ cụ thể. Các loại cảm biến tiếp xúc không đo được nhiệt độ tức thời vì thời gian đáp ứng thường chậm. Nhiệt độ chúng ta đo được thường là nhiệt độ trung bình.



Hình 1. Cảm biến đo nhiệt dạng tem nhiệt



Hình 2. Cảm biến đo nhiệt dạng cặp nhiệt

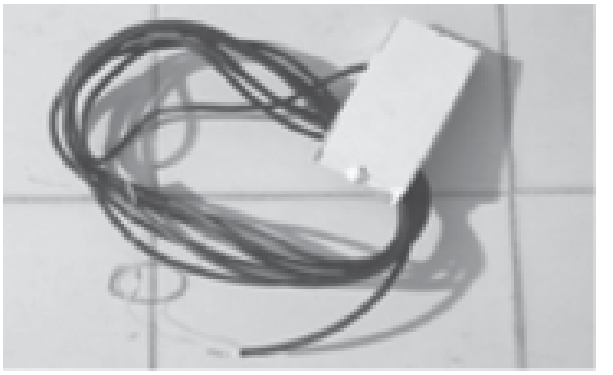
- Đo nhiệt độ dạng không tiếp xúc: Sử dụng các hệ thống đo nhiệt độ không tiếp xúc trực tiếp với đối tượng cần đo (sử dụng nguyên lý hồng ngoại, ảnh nhiệt,…). Các thiết bị đo nhiệt độ dạng này thường được sử dụng tương đối rộng rãi trong kỹ thuật dân sự. Trong kỹ thuật quân sự, do yêu cầu các hệ thống đo phải có tần số lấy mẫu cao và thời gian đáp ứng nhanh nên các hệ thống đo nhiệt dạng không tiếp xúc vẫn chưa được áp dụng nhiều. Ưu điểm nổi bật của dạng này là có thể đo nhiệt độ tức thời cũng như toàn bộ quá trình tăng và giảm nhiệt độ của đối tượng đo. Tuy nhiên, chúng có nhược điểm chung đó là không thể đo được nhiệt độ khi không chiếu xạ vào vị trí cần đo và giá thành đắt.

Trong nghiên cứu này, một phương pháp đo nhiệt độ dạng tiếp xúc đã được sử dụng. Cảm biến dạng tem nhiệt (hình 1) cùng hệ thống cáp nối tín hiệu vừa có cấu tạo nhỏ gọn, có thể gắn trực tiếp trên nòng vừa đo được sự thay đổi nhiệt độ liên tục qua từng phát bắn hoàn toàn có thể đáp ứng được yêu cầu đề ra.

Cảm biến đo dạng tem nhiệt được chế tạo theo nguyên lý nhiệt điện nên tín hiệu đầu ra của cảm biến là điện áp. Đây là loại cảm biến chủ động và kết quả là điện áp chênh lệch giữa hai điểm nóng - lạnh. Tuy nhiên, điện áp chênh lệch rất nhỏ nên tín hiệu đầu ra của cảm biến cần được khuếch đại, lọc tương thích đầu vào của máy đo. Hệ thống thu thập và xử lý tín hiệu đo NI (hình 3) với cạc đo nhiệt độ (hình 4) đã được sử dụng. Các thông số cơ bản của hệ thống NI SCX1-1000 được thể hiện trên bảng 1.



Hình 3. Hệ thống thu thập dữ liệu NI



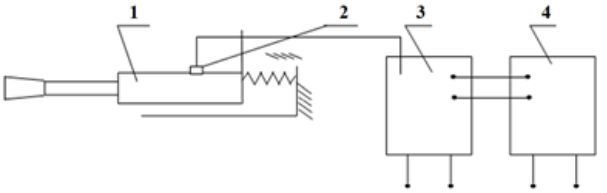
Hình 4. Cạc đo nhiệt độ của NI

Bảng 1. Một số thông số cơ bản của hệ thống NI SCX1-1000

Thông số	Giá trị
Kích thước	(24,8 × 19,5 × 17,7) mm
Khối lượng	3,9 kg
Điện áp đầu vào	100V; 120V; 220V; hoặc 240V
Dòng điện hoạt động	0,6A
Tần số dòng AC	(50 ÷ 60) Hz
Nhiệt độ hoạt động	0 ÷ 50°C
Nhiệt độ lưu trữ	- 20°C ÷ 70°C

2.3. Sơ đồ thử nghiệm

Sơ đồ thử nghiệm được trình bày trên hình 5, hệ thống tem nhiệt được gắn trên nòng súng khi thử nghiệm (hình 6). Trước khi gắn tem nhiệt, vị trí cần đo nhiệt trên nòng súng phải được loại bỏ lớp sơn phủ, làm sạch bề mặt để đảm bảo nhiệt từ nòng súng sẽ được truyền trực tiếp vào cảm biến. Tem nhiệt cần được định vị chắc chắn trên nòng súng trong quá trình bắn.



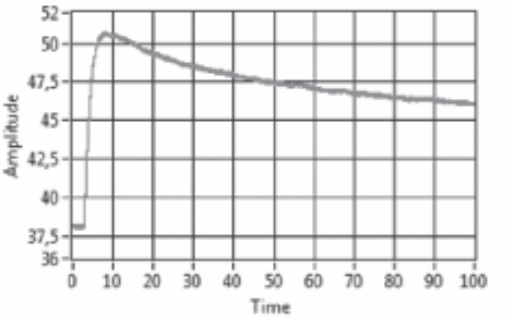
Hình 5. Sơ đồ khối mô tả hệ thống thực nghiệm xác định nhiệt độ nòng súng khi bắn:
1. Đối tượng đo (súng tiểu liên AK-47);
2. Cảm biến đo nhiệt độ dạng tiếp xúc;
3. Bộ thu dữ liệu; 4. Thiết bị phân tích tín hiệu.



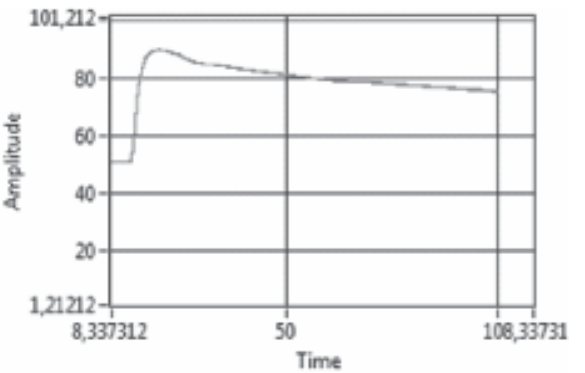
Hình 6. Tem nhiệt được được gắn lên vị trí cần đo trên nòng

3. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

Kết quả đo nhiệt độ bề mặt ngoài của nòng súng AK-47 khi bắn loạt 3 viên được thể hiện trên hình 7, khi bắn loạt 10 viên được thể hiện trên hình 8. Các số liệu thu thập từ thực nghiệm được thể hiện trên bảng 2.



Hình 7. Đồ thị nhiệt độ mặt ngoài nòng súng khi bắn loạt 3 viên



Hình 8. Đồ thị nhiệt độ mặt ngoài nòng súng khi bắn loạt 10 viên

Bảng 2. Bảng số liệu thu được từ thực nghiệm đo nhiệt độ

Loạt bắn		Nhiệt độ ban đầu (°C)	Nhiệt độ lớn nhất (°C)	Thời gian đạt nhiệt độ lớn nhất (s)	Chênh lệch nhiệt độ (°C)
Liên thanh 3 viên	Lần 1	31	43,1	3,7	12,1
	Lần 2	39,2	51,6	5,3	12,4
	Lần 3	43,6	55,9	7,9	12,3
Liên thanh 10 viên	Lần 1	47	85,1	9,9	38,1
	Lần 2	63,7	101	8,6	37,3
	Lần 3	73,2	112	8,3	38,8

*Từ kết quả đo thu được, ta có một số nhận xét sau:

- Kết quả đo nhiệt độ bề mặt ngoài của nòng súng khi sử dụng tem nhiệt tương đối ổn định, tuy nhiên giá trị chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trước và sau khi bắn có sự khác biệt rõ rệt: 12,4°C (đối với loạt 3 viên) và 38,8°C (đối với loạt 10 viên). Sự chênh lệch này là do thời gian phát bắn diễn ra tương đối ngắn và thời gian cần thiết để truyền nhiệt từ mặt ngoài nòng súng vào lõi của cảm biến nhiệt đạt đến giá trị nhiệt độ lớn nhất tương đối lớn, vì vậy sẽ xuất hiện sự tổn thất nhiệt do truyền ra môi trường bên ngoài và dọc theo dây dẫn.

- Hệ thống đo sử dụng tem nhiệt có thể dùng để đo nhiệt độ mặt ngoài của nòng súng pháo khi bắn nếu chúng ta chấp nhận một sai số nào đó [5]. Do điều kiện thử nghiệm còn hạn chế, số lần bắn không nhiều nên kết quả sẽ có sự thay đổi khi chúng ta bắn loạt lớn hơn trong khoảng thời gian lâu hơn, tuy nhiên đường cong đặc tính của kết quả đo phản ánh đúng quy luật thay đổi nhiệt độ mặt ngoài của nòng súng khi bắn. Sai số xuất hiện chủ yếu do sự tổn thất nhiệt truyền ra môi trường xung quanh cũng như sang các chi tiết khác của súng, pháo.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã đề xuất một phương án thử nghiệm xác định nhiệt độ bề mặt ngoài của nòng súng pháo bằng cảm biến dạng tem nhiệt. Súng tiểu liên AK-47 đã được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu. Thí nghiệm đã tiến hành bắn liên thanh loạt ngắn 3 viên (3 loạt) và loạt dài 10 viên (3 loạt) và thu được các giá trị nhiệt độ của bề mặt ngoài của nòng súng tại vị trí xác định. Phương pháp và nguyên lý đo được giới thiệu trong nghiên cứu này có thể được sử dụng để đo nhiệt độ mặt ngoài của các chi tiết trong súng pháo hoặc động cơ tên lửa. Kết quả thu được từ nghiên cứu này có thể được sử dụng để xác minh mô hình toán học tương ứng, đây cũng là cơ sở khoa học để các nhà thiết kế có thể lựa chọn vật liệu chế tạo nòng súng, đưa ra chế độ bắn phù hợp cho từng loại súng theo các yêu cầu sử dụng để đảm bảo hiệu quả khai thác của các loại súng pháo cụ thể.❖

Ngày nhận bài: **18/8/2025**
Ngày phản biện: **28/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Dao Van Doan, et al., "*Modeling and simulation of heat transfer process for 37mm K65 anti aircraft gun barrel when single shot and multiple shot using finite element method*". Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật – số 179, Học viện Kỹ thuật quân sự, 2016.

[2]. Nguyễn Trường Sinh, "*Phân tích trạng thái nhiệt của nòng ghép khi bắn*". Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật – số 125, Học viện Kỹ thuật quân sự, 2008.

[3]. Andrzej DĘBSKI, et al., "*Analysis of Heat Transfer in a 35 mm Barrel of an Anti-Aircraft Cannon*". Problems of Mechatronics Armament, Aviation, Safety Engineering, 3(25), pp. 71-86. ISSN: 2081-5891. DOI: 10.5604/01.3001.0009.2983.

[4]. Andrzej DĘBSKI, et al., "*Heat Transfer Calculations in Barrel Cover of 35 mm Naval Armament System Gun*". Problems of Mechatronics Armament, Aviation, Safety Engineering, 3(33), pp. 57-74. ISSN: 2081-5891. DOI: 10.5604/01.3001.0012.2739.

[5]. Bùi Trọng Tuấn, "*Giáo trình thử nghiệm vũ khí*". NXB. Quân đội nhân dân, Hà Nội, 2023.

CƠ SỞ LÝ THUYẾT XÂY DỰNG ĐƯỜNG CAM LÀM VIỆC CỦA SÚNG MÁY SM7,62-6N KIỂU MINIGUN M134

THEORETICAL FOUNDATION FOR DESIGNING THE CAM TRACK OF THE SM7.62-6N MINIGUN M134 MACHINE GUN

KS. **Nguyễn Giang Châu**[1], ThS. **Tạ Bá Dũng**[2], ThS. **Nguyễn Xuân Kông**[3]
[1]Nhà máy Z111, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng
[2]Viện Vũ khí, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng
[3]Trường Cao đẳng Kỹ thuật quân sự 1, Tổng cục Hậu cần - Kỹ thuật

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày lý thuyết và phương pháp thiết kế đường cam làm việc cho hệ súng máy SM7,62-6N hoạt động theo nguyên lý Gatling. Nghiên cứu phân tích chi tiết các thành phần cấu thành đường cam làm việc, bao gồm các đoạn tăng tốc, giảm tốc và các vị trí hoạt động của cơ cấu đóng khóa nòng trong chu kỳ bắn. Đặc biệt, bài báo so sánh ưu nhược điểm giữa hình dạng parabolic và đường cong không va chạm, đồng thời đưa ra các công thức tối ưu hóa nhằm giảm thiểu ứng suất cơ học và đảm bảo hoạt động ổn định của hệ thống. Kết quả nghiên cứu cho thấy đường cam làm việc không va chạm với dạng hình sin biến đổi mang lại hiệu quả vận hành tối ưu, giảm va chạm so với hình dạng parabolic truyền thống.

Từ khóa: *Gatling; Cơ cấu cam; Súng máy minigun M134.*

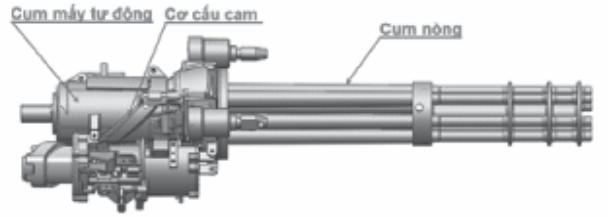
ABSTRACT

This paper presents the theory and methodology for designing the cam track for the SM7.62-6N machine gun system operating on the Gatling principle. The study analyzes in detail the components constituting the cam track, including acceleration and deceleration segments and the operational positions of the barrel locking mechanism during the firing cycle. Specifically, the paper compares the advantages and disadvantages between parabolic shapes and non-collision curves, while providing optimization formulas aimed at minimizing mechanical stress and ensuring stable system operation. Research results indicate that the non-collision cam track with modified sinusoidal form delivers optimal operational efficiency, reducing impact compared to traditional parabolic shapes.

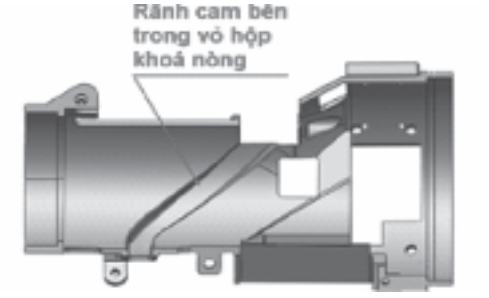
Keywords: *Gatling; Cam mechanism; Minigun M134 machine gun.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Súng máy SM7,62-6N được thiết kế theo nguyên lý Gatling để đạt tốc độ bắn cực cao. Nguyên lý hoạt động dựa trên việc sử dụng nhiều nòng súng quay quanh trục chung, mỗi nòng thực hiện các pha khác nhau của chu kỳ bắn. Yếu tố quyết định hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống này chính là thiết kế đường cam làm việc (đường cong chức năng) – một rãnh dẫn hướng điều khiển chuyển động của các cơ cấu đóng, mở khóa nòng.



Hình 1. Súng máy SM7,62-6N



Hình 2. Đường cam làm việc

Đường cam làm việc đóng vai trò như một bộ điều khiển cơ học, đảm bảo đồng bộ hóa hoạt động của tất cả các bộ phận của súng. Tuy nhiên, việc thiết kế đường cong này đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về động học, động lực học và lý thuyết tối ưu hóa.

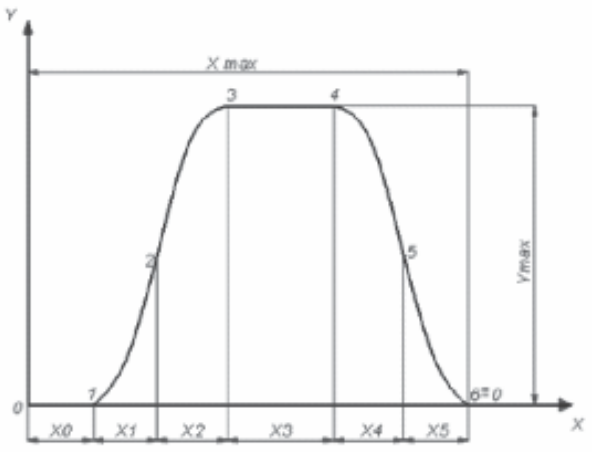
Mục tiêu của bài báo này là xây dựng khung lý thuyết cho việc thiết kế đường cam làm việc, từ đó đưa ra phương pháp tối ưu hóa nhằm nâng cao hiệu suất và tuổi thọ của hệ thống vũ khí Gatling.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

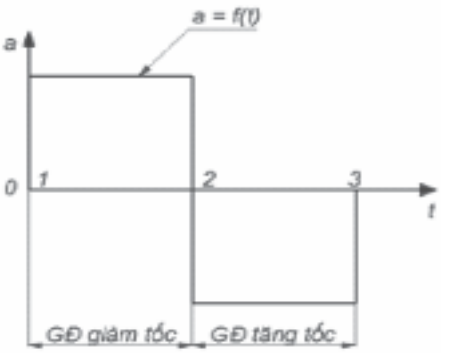
2.1. Cấu trúc và nguyên lý hoạt động

Hệ thống súng máy SM7,62-6N bao gồm cụm 6 nòng súng quay quanh trục trung tâm. Mỗi nòng súng được trang bị một cơ cấu đóng, mở khóa nòng riêng biệt, có con lăn tiếp xúc với đường cam làm việc được gia công trên vỏ hộp khóa nòng. Khi cụm nòng quay, con lăn di chuyển dọc theo đường cam, tạo ra chuyển động tịnh tiến của cơ cấu khóa nòng theo chu kỳ định sẵn.

2.2. Định nghĩa đường cam làm việc



Hình 3. Sơ đồ đường cam làm việc lý thuyết



Hình 4. Gia tốc cơ cấu khóa nòng khi đường cam làm việc có hình dạng parabolic

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Đường cam làm việc được biểu diễn trong hệ tọa độ (x,y) với:

- Tọa độ x: Khoảng cách cung tròn từ điểm gốc, có giá trị tối đa $x_{max} = 2\pi r$;
- Tọa độ y: Độ dịch chuyển của cơ cấu khóa nòng theo phương trục nòng súng;
- Bán kính r: Khoảng cách từ trục quay đến tâm tiếp xúc con lăn-đường cong.

2.3. Phân tích các đoạn chức năng

Đường cam làm việc được chia thành 6 đoạn chính:

x_0: Đoạn bắn - cơ cấu khóa nòng được khóa cố định ở vị trí phía trước;
x_1: Đoạn tăng tốc cơ cấu khóa nòng khi chuyển động lùi;
x_2: Đoạn giảm tốc trong chuyển động lùi;
x_3: Đoạn đẩy vỏ đạn và cấp đạn mới;
x_4: Đoạn tăng tốc cơ cấu khóa nòng chuyển động tiến;
x_5: Đoạn giảm tốc trong chuyển động tiến.

Mỗi đoạn có vai trò riêng biệt và đòi hỏi tính toán chính xác để đảm bảo đồng bộ hóa chính xác.

3. PHÂN TÍCH TOÁN HỌC VÀ MÔ HÌNH HÓA

3.1. Chuyển đổi hệ tọa độ

Để phân tích động học của hệ thống, cần chuyển đổi từ mô tả không gian y = f(x) sang mô tả thời gian y = f(t).

Thời gian tương ứng với một vòng quay: $x_{max} = r\omega t_{fc}$ (1)

Quan hệ tổng quát: $x = r\omega t$ (2)

Tốc độ góc: $\omega = 2\pi n_f$ (3)

Trong đó:
- t_{fc}: Thời gian chu kỳ chức năng;
- $n_r = k_G/i_h$: Tần số quay; (4)
- k_G: Tốc độ bắn (phát/phút);
- i_h: Số lượng nòng súng.

Từ các quan hệ trên, ta có:

$$x_{max} = 2\pi r(k_G/i_h).t_{fc} \quad (5)$$

Và thời gian chu kỳ làm việc:

$$t_{fc} = (i_h /2\pi r\, k_G).\, x_{max} \quad (6)$$

Từ các công thức trên có thể chọn hình dạng parabolic cho các đoạn tăng tốc và giảm tốc. Hình 4 cho thấy sự thay đổi gia tốc của khóa nòng trong đoạn tăng tốc và đoạn giảm tốc khi cam làm việc có hình dạng parabolic. Ở đầu đoạn tăng tốc, gia tốc tăng ngay lập tức lên giá trị không đổi và khi chuyển từ đoạn tăng tốc sang đoạn giảm tốc, giá trị của gia tốc thay đổi ngay lập tức về giá trị âm. Ở cuối đoạn giảm tốc, gia tốc lại ngay lập tức giảm về không. Từ quá trình này có thể thấy rằng với hình dạng parabolic của đường cam thì xảy ra va chạm tác động lên con lăn của cơ cấu khóa nòng. Điều này không phù hợp vì súng hoạt động với tốc độ lớn sẽ gây va chạm liên tục ảnh hưởng nghiêm trọng đến độ ổn định cũng như tuổi thọ của máy tự động. Vì vậy cần phải tìm cho đường cam làm việc một hình dạng đảm bảo hoạt động của khóa nòng là không va chạm khi làm việc.

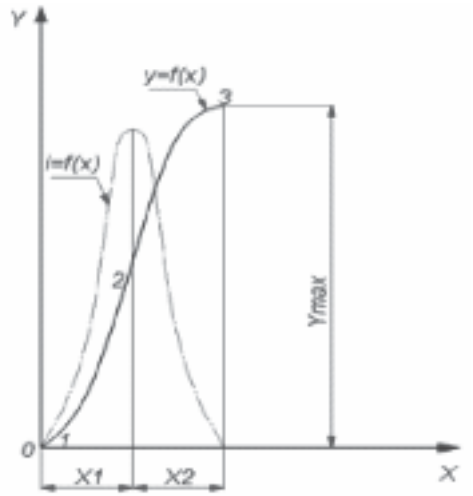
3.2. So sánh hình dạng parabolic và không va chạm

3.2.1. Hình dạng parabolic ☞

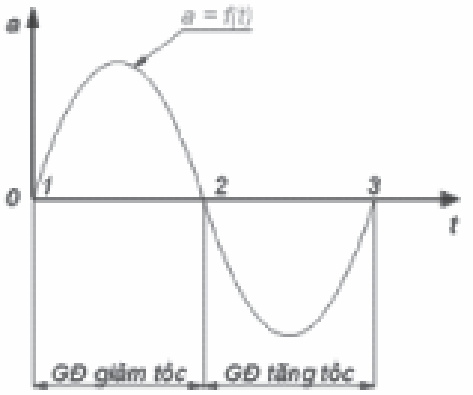
Hình dạng parabolic tuy đơn giản về mặt toán học nhưng tạo ra gia tốc không đổi trong các đoạn tăng tốc và giảm tốc. Điều này dẫn đến hiện tượng va chạm đột ngột tại các điểm chuyển tiếp, từ đó gây ra các yếu tố bất lợi như sau:

- Tăng ứng suất cơ học;
- Giảm tuổi thọ con lăn và đường cong;
- Tạo rung động và tiếng ồn.

3.2.2. Đường cong không va chạm



Hình 5. Đường cam làm việc và hàm truyền dạng không va chạm



Hình 6. Gia tốc cơ cấu khóa nòng khi đường cam làm việc dạng không va chạm với các đoạn tăng tốc và giảm tốc

Để khắc phục nhược điểm trên, đường cong không va chạm được thiết kế với hình dạng sin biến đổi:

- Đoạn tăng tốc:

$$y_{zr} = \frac{y_{max}}{x_1 + x_2}\left[x - \frac{x_1}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{x_1}x\right)\right] \quad (7)$$

- Đoạn giảm tốc:

$$y_{zp} = \frac{y_{max}}{x_1 + x_2}\left[x + \frac{x_2}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{x_2}(x - x_1)\right)\right] \quad (8)$$

Các mối quan hệ cho hàm truyền của cơ cấu $i_{zr} = f(x)$ thu được bằng cách lấy đạo hàm của các phương trình (7) và (8) theo x.

- Hàm truyền tương ứng:

$$i_{zr} = \frac{y_{max}}{x_1 + x_2}\left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{x_1}x\right)\right] \quad (9)$$

$$i_{zp} = \frac{y_{max}}{x_1 + x_2}\left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{x_2}(x - x_1)\right)\right] \quad (10)$$

Hình dạng đường cam làm việc y = f(x) (cho đoạn tăng tốc và giảm tốc) và dạng của hàm truyền i = f(x) cho đường cam làm việc này được thể hiện trên hình 5. Hàm truyền động i được cho bởi tỷ lệ tốc độ theo hướng trục y và tốc độ theo hướng trục x, đường cong i = f(x) cho thấy các giai đoạn tăng tốc và giảm tốc liên tục không va chạm của cơ cấu khóa nòng khi quay cụm nòng.

3.3. Phân tích gia tốc

Thay x từ công thức (2) và công thức (7) và (8), ta được hàm y = f(t) như sau:

$$y_{zr} = \frac{y_{max}}{x_1 + x_2}\left[r\omega t - \frac{x_1}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{x_1}r\omega t\right)\right] \quad (11)$$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

$$y_{zp} = \frac{y_{max}}{x_1 + x_2}\left[r\omega t + \frac{x_2}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{x_2}(r\omega t - x_1)\right)\right] \quad (12)$$

Khi đó, gia tốc trên hai đoạn giảm tốc là:

$$a_{zr} = \frac{d^2 y_{acc}}{dt^2} = \frac{y_{max} r^2\omega^2}{x_1 + x_2}\frac{\pi}{x_1}\sin\left(\frac{\pi}{x_1} r\omega t\right) \quad (13)$$

$$a_{zp} = \frac{d^2 y_{dec}}{dt^2} = -\frac{y_{max} r^2\omega^2}{x_1 + x_2}\frac{\pi}{x_2}\sin\left(\frac{\pi}{x_2}(r\omega t - x_1)\right) \quad (14)$$

Sử dụng các phương trình (13), (14), ta được diễn biến gia tốc của cơ cấu khóa nòng khi chuyển động như thể hiện trên hình 6. Gia tốc thay đổi liên tục từ không đến giá trị dương tối đa và từ đó lại liên tục giảm đến giá trị âm tối đa rồi quay về không. Do đó, tải trọng tác động trong rãnh cam lên con lăn là không va chạm. Biết rằng hàm sin có thể đạt giá trị cao nhất ±1, thì các giá trị gia tốc tối đa khi chuyển động lùi của cơ cấu khóa nòng bởi các mối quan hệ sau:

$$a_{zr\,max} = \frac{y_{max} r^2\omega^2}{x_1 + x_2}\frac{\pi}{x_1} \quad (15)$$

$$a_{zp} = \frac{y_{max} r^2\omega^2}{x_1 + x_2}\frac{\pi}{x_2} \quad (16)$$

Trong thời kỳ chuyển động tiến của cơ cấu khóa nòng, lời giải cho hình dạng đường cam là tương tự.

3.4. Kết luận

Từ phân tích ở trên và các công thức (15) và (16) cho thấy rằng khi tìm kiếm hình dạng tối ưu của đường cam làm việc không thể thay đổi tốc độ góc của cụm nòng ω (phụ thuộc vào tốc độ bắn yêu cầu), cũng như bán kính r (xuất phát từ độ bền của cụm nòng). Do đó, trong quá trình tối ưu hóa này cần phải phù hợp với các công thức (15) và (16) chọn y_{max} càng ngắn càng tốt và các đoạn tăng tốc và giảm tốc của đường cam làm việc càng dài càng tốt.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng khung lý thuyết tổng quát cho thiết kế đường cam làm việc của hệ thống súng máy SM7,62-6N. Các đóng góp chính bao gồm:

- Mô hình toán học hoàn chỉnh mô tả mối quan hệ giữa hình học đường cong và động học hệ thống;
- Phương pháp lựa chọn tối ưu hóa dựa trên tiêu chí giảm thiểu gia tốc tối đa và va chạm cơ học;
- Phân tích so sánh giữa hình dạng parabolic và đường cong không va chạm.

Kết quả nghiên cứu không chỉ có giá trị lý thuyết mà còn được chứng minh qua việc chế tạo súng SM7,62-6N tại nhà máy của Tổng cục Công nghiệp quốc phòng. Việc áp dụng đường cong chức năng không va chạm đã cải thiện đáng kể hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống vũ khí.❖

Ngày nhận bài: **15/9/2025**
Ngày phản biện: **26/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. "*Mechanical Engineering Design of Gatling Gun Systems*". Journal of Defense Technology, 2023.
[2]. "*Optimization of Functional Curves in Rotating Weapon Systems*". International Journal of Military Engineering, 2022.
[3]. Nguyễn Ngọc Du, Đỗ Văn Thọ, "*Thuật phóng trong của súng pháo*". Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội, 1976.
[4]. Phạm Huy Chương, "*Động lực học vũ khí tự động*". Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội, 2002.

PHÂN TÍCH SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ LÊN LỰC CẮT TRONG QUÁ TRÌNH GIA CÔNG PHAY

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS ON CUTTING FORCE IN MILLING PROCESSES

Võ Anh Tuấn[1], Lê Đức Chương[1], ThS. **Nguyễn Đức Thịnh[2]**, TS. **Phạm Phương Tùng[1]**, PGS,TS. **Nguyễn Quốc Chí[1]**

[1]Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

[2]Khoa Kỹ thuật, Trường Đại học Việt Đức

Email: nqchi@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Việc hiểu rõ ảnh hưởng của các tham số vận hành và đặc điểm vật liệu đối với lực cắt là điều cần thiết để tối ưu hóa quy trình gia công CNC. Nghiên cứu này phát triển một mô hình lực cắt sử dụng lý thuyết của Oxley kết hợp với mô hình dòng chảy Johnson-Cook. Mô hình được phát triển được kiểm tra thông qua dữ liệu thực nghiệm của một công bố trước đó. Mô hình này cho phép ước lượng lực cắt một cách hiệu quả mà không cần thiết bị đo lực đắt tiền. Bên cạnh đó, bằng cách sử dụng mô hình này, độ nhạy của các yếu tố gia công như tốc độ cắt, lượng tiến dao và đặc tính vật liệu đối với lực cắt được nghiên cứu. Việc phân tích này là bước quan trọng để nâng cao hiệu quả, độ chính xác và độ bền của quá trình gia công trong thực tiễn.

Từ khóa: *Phay CNC; Lực cắt; Lý thuyết Oxley; Mô hình dòng chảy Johnson-Cook; Phân tích độ nhạy.*

ABSTRACT

Understanding the influence of operational parameters and material properties on cutting forces is essential for optimizing CNC machining processes. This study develops a cutting force model based on Oxley's theory and the Johnson-Cook flow model. The proposed model is validated using experimental data from a previous publication. It enables efficient estimation of cutting forces without the need for expensive force measurement equipment. Additionally, by utilizing this model, the sensitivity of machining parameters such as cutting speed, feed rate, and material characteristics to cutting forces is investigated. This analysis serves as a crucial step towards improving the efficiency, accuracy, and durability of machining processes in practical applications.

Keywords: *CNC milling; Cutting force; Oxley's theory; Johnson-Cook flow model; Sensitivity analysis.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dự báo lực cắt ngày càng trở nên quan trọng với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ gia công CNC. Việc sản xuất chính xác cao, thường với độ chính xác ở mức micromet, đòi hỏi kiểm soát chặt chẽ các thông số gia công. Trong số đó, hao mòn dụng cụ là yếu tố then chốt ảnh hưởng đến độ chính xác kích thước và độ bóng của bề mặt. Khi dụng cụ hao mòn, lực cắt tăng lên, gây ra các sai lệch ngoài giới hạn cho phép và làm giảm chất lượng bề mặt gia công. Việc dự đoán và giám sát chính xác lực cắt, kết hợp giữa các mô hình lý thuyết đã được xác thực và dữ liệu từ cảm biến, cung cấp một phương pháp thực tiễn để phát hiện hao mòn dụng cụ và nâng cao kết quả gia công.

Lực cắt bắt nguồn từ ba cơ chế chính: lực kháng lại biến dạng đàn hồi của vật liệu, lực kháng lại biến dạng dẻo trong quá trình cắt gọt, và lực ma sát giữa phoi và các bề mặt của dụng cụ - đặc biệt là mặt cạnh răng, mặt chuyển tiếp của vật gia công, và mặt bên của dụng cụ.

Lực cắt đóng một vai trò quan trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến độ nhám bề mặt gia công và độ mòn dụng cụ cắt [1]. Dimla và Lister [2] phát triển một hệ thống giám sát tình trạng dụng cụ dựa trên mô hình phân tích tín hiệu cảm biến trực tuyến. Họ sử dụng ba thành phần của lực cắt và dữ liệu dao động (được đo bởi gia tốc kế) để đánh giá độ mòn dụng cụ thông qua phân tích miền thời gian và phân tích miền tần số.

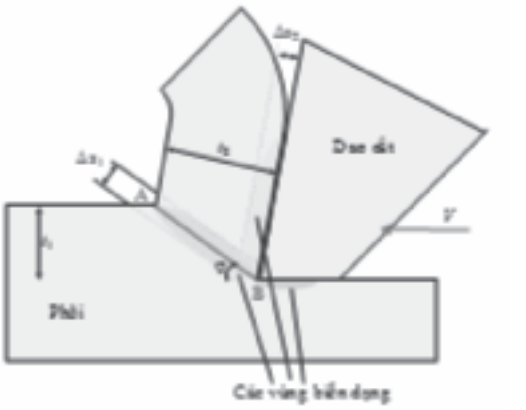
Trong suốt quá trình phát triển của mô hình lực cắt trong gia công, có ba phương pháp chính để mô hình hóa lực cắt: phương pháp thực nghiệm [3], phương pháp số [4], và phương pháp phân tích [5]. Phương pháp thực nghiệm đo lực cắt trực tiếp bằng dụng cụ đo lực, dựa trên nhiều thử nghiệm, dữ liệu thu được được xử lý bằng các phương pháp toán học để xác định công thức thực nghiệm tính lực cắt. Ví dụ, trong [3], mô hình cắt được xây dựng dựa trên phương pháp này: các thử nghiệm cắt diễn ra với các điều kiện gia công được giữ cố định, chỉ thay đổi độ sâu cắt, và dữ liệu lực cắt theo các giá trị khác nhau của độ sâu cắt được đo bằng cảm biến lực dynamometer. Nhược điểm lớn nhất của phương pháp này là mô hình chỉ đúng trong một số trường hợp cụ thể, đồng thời chi phí thử nghiệm cao do yêu cầu nhiều lần thực hiện. Trong khi đó, phương pháp số tập trung vào mô phỏng sự tương tác giữa dụng cụ và vật liệu gia công và các hiện tượng thay đổi về nhiệt độ và ứng suất trong quá trình gia công. Chìa khóa của phương pháp này là sử dụng kỹ thuật phần tử hữu hạn để mô phỏng quá trình gia công và dự đoán lực cắt. So với phương pháp thực nghiệm, phương pháp số cho ra các mô hình với đa dạng điều kiện hơn, song lại tiêu tốn nhiều thời gian và cần sử dụng các phần mềm mô phỏng thương mại có chi phí cao.

Khác với hai phương pháp trên, phương pháp phân tích xây dựng các mô hình dự đoán lực cắt dựa trên lý thuyết cắt và cơ học cắt. Phương pháp này cho phép đặc trưng hóa quá trình gia công, giúp nâng cao hiểu biết về bản chất của quá trình cắt. Thông qua đó, các cơ chế loại bỏ vật liệu và hành vi ứng xử của dụng cụ cắt và vật liệu trong vùng biến dạng có thể được nghiên cứu kỹ, tạo điều kiện thuận lợi cho việc tối ưu hóa quá trình gia công.

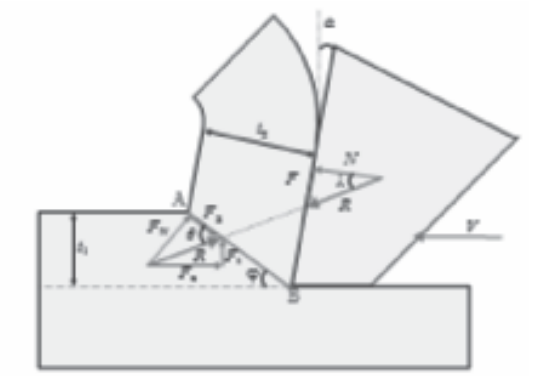
Phương pháp phân tích dự đoán lực cắt trong gia công kim loại dựa trên lý thuyết trượt. Các phương pháp này thường được chia thành ba cách tiếp cận chính. Thứ nhất là mô hình mặt cắt trượt, do Merchant đề xuất [6], giúp đơn giản hóa quá trình bằng cách giả định phoi hình thành và trượt dọc theo một mặt cắt trượt duy ☞

nhất dựa trên nguyên tắc năng lượng tối thiểu. Thứ hai là mô hình trường trượt, được Lee và Shaffer giới thiệu năm 1949 [7], sử dụng lý thuyết trượt và cơ học biến dạng dẻo để phân tích cắt trực giao, xem xét các hiện tượng như hình thành phoi cuộn và dòng chảy vật liệu trong toàn bộ vùng biến dạng dẻo. Tuy nhiên, độ phức tạp của các đường trượt siêu nhỏ khiến phương pháp này ít khả thi trong thực tế để dự đoán lực, do đó nhiều nhà nghiên cứu ưu tiên sử dụng phương pháp đơn giản hơn dựa trên mặt cắt trượt thẳng cho các quá trình gia công khác nhau. Phương pháp thứ ba là mô hình vùng cắt trượt, do Oxley phát triển [8], trong đó xem xét biến dạng dẻo trong một dải hẹp có chiều dày xác định (Hình 1), bao gồm các yếu tố như biến dạng, tốc độ biến dạng, độ cứng do biến dạng và nhiệt độ. Phương pháp này phản ánh điều kiện gia công thực tế hơn và được đánh giá cao trong dự đoán lực cắt chính xác. Trong những nghiên cứu trên, lý thuyết của Oxley được áp dụng song song với mô hình dòng chảy Johnson-Cook để phân tích ảnh hưởng của đặc tính vật liệu và điều kiện gia công đến hành vi lực cắt trong gia công phay CNC.

Trong bài báo này, một mô hình dự đoán lực cắt dựa trên nền tảng lý thuyết của Oxley kết hợp với mô hình dòng chảy Johnson-Cook được xây dựng, nhằm nâng cao khả năng dự báo chính xác các đặc trưng của quá trình gia công. Đồng thời, mô hình này còn được sử dụng để phân tích độ nhạy của các yếu tố gia công như tốc độ cắt, lượng tiến dao và đặc tính vật liệu đối với lực cắt, từ đó làm rõ ảnh hưởng của từng yếu tố đến hiệu suất gia công. Mô hình được xác thực bằng cách so sánh với dữ liệu thực nghiệm từ các công bố khoa học trước đây, góp phần củng cố tính khả thi và độ tin cậy của phương pháp nghiên cứu.



Hình 1. Các vùng biến dạng được giả định trong mô hình vùng cắt trượt của Oxley



Hình 2. Quá trình biến dạng của phôi

2. MÔ HÌNH ĐA VẬT LÝ CHO QUÁ TRÌNH GIA CÔNG CNC

Trong chương này, một mô hình đa vật lý mô tả quá trình gia công của máy phay CNC được xây dựng nhằm dự đoán lực cắt. Phương pháp được sử dụng ở đây là vận dụng lý thuyết của Oxley và mô hình Johnson and Cook để xác định góc mặt phẳng trượt ϕ; tỷ lệ giữa chiều dài mặt phẳng trượt AB và độ dày vùng biến sơ cấp $l/\Delta s_2$ (vùng màu xanh dương trong Hình 1), được thể hiện bởi C_0 và δ đại diện tỷ lệ của độ dày vùng biến dạng thứ cấp và chiều dày phoi (vùng màu xanh là trong Hình 1) $\Delta s_2/t_2$. Các góc và lực sử dụng trong mô hình được mô tả tại Hình 2.

2.1. Phân tích ứng xử trên mặt phẳng AB

Với lý thuyết von Mises, k_{AB} được tính toán theo phương trình:

$$k_{AB} = \frac{\sigma_{AB}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}.(A + B.\varepsilon_{AB}^{n}).\left(1 + C.\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{AB}}{\dot{\varepsilon}_{o}}\right)\right).\left(1 - \left(\frac{T_{AB} - T_{w}}{T_{m} - T_{w}}\right)^{m}\right) \quad (1)$$

Trong đó: A, B, C, D, n và m đại diện cho các hằng số của vật liệu; σ là ứng suất chảy của vật liệu; ε, $\dot{\varepsilon}$ và $\dot{\varepsilon}_0$ lần lượt là các giá trị biến dạng tương đương, tốc độ biến dạng tương đương và tốc độ biến dạng tham chiếu. Nhiệt độ tức thời được đại diện bởi T; T_w là nhiệt độ khởi tạo ban đầu hay còn được gọi là nhiệt độ phòng; nhiệt độ nóng chảy của vật liệu là T_m. Góc giữa mặt phẳng cắt và lực tổng hợp R được thể hiện qua:

$$\tan(\theta) = 1 + 2.\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) - C_o.\frac{n.B.\varepsilon_{AB}^{n}}{(A + B.\varepsilon_{AB}^{n})} \quad (2)$$

$$\theta = \phi + \lambda - \alpha \quad (3)$$

Vì AB có vị trí tại trung tâm của mặt phẳng cắt sơ cấp, do vậy biến dạng trượt tại AB bằng một nửa biến dạng trượt tại vùng của mặt phẳng sơ cấp này:

$$\gamma_{AB} = \frac{1}{2}.\frac{\cos(\alpha)}{\sin(\phi).\cos(\phi - \alpha)} \quad (4)$$

Theo Oxley, tốc độ biến dạng trượt trung bình dọc theo AB, $\dot{\gamma}_{AB}$, tỷ lệ thuận với tốc độ trượt và tỷ lệ nghịch với chiều dài của đoạn AB, l:

$$\dot{\gamma}_{AB} = \frac{C_o.V_s}{l} \quad (5)$$

Phương trình thể hiện độ biến dạng và tốc độ biến dạng với lý thuyết von Mises là:

$$\varepsilon_{AB} = \frac{\gamma_{AB}}{\sqrt{3}} \quad \text{và} \quad \dot{\varepsilon}_{AB} = \frac{\dot{\gamma}_{AB}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Nhiệt độ trung bình dọc theo AB là:

$$T_{AB} = T_w + \eta.\Delta T_{SZ} \quad (7)$$

Gọi η là phần trăm năng lượng sinh ra từ biến dạng trượt được chuyển hóa thành nhiệt cảm nhận được (trong nghiên cứu này η = 0.9). Nhiệt độ tăng lên tại vùng cắt sơ cấp ΔT_{SZ} được xác định bởi công biến dạng dẻo được sinh ra trong vùng trượt. F_sV_s là công biến dạng được sinh ra trong vùng này, với F_s là lực cắt; V_s là tốc độ trượt. Khối lượng phoi được xác định: $m_{chip} = \rho V t_1 w$, trong đó ρ là khối lượng riêng của vật liệu; V là tốc độ cắt; t_1 là chiều dày phoi chưa bị biến dạng và w thể hiện chiều rộng cắt.

$$\Delta T_{SZ} = \frac{(1-\beta).F_s.V_s}{m_{chip}.C_p} \quad (8)$$

Gọi β là phần nhiệt được truyền vào phoi và được xác định như sau:

$$\beta = 0.5 - 0.35.\log_{10}(R_T.\tan\phi) \quad \text{if } 0.04 \le R_T.\tan\phi \le 10$$
$$\beta = 0.3 - 0.15.\log_{10}(R_T.\tan\phi) \quad \text{if } R_T.\tan\phi > 10 \quad (9)$$

Trong đó, hệ số $R_T = \rho.C_p.V.t_1/K$. Ứng suất pháp tuyến tại B, σ'_N, được xác định bởi:

$$\sigma'_N = k_{AB}\left(1 + \frac{\pi}{2} - 2\alpha - 2C_o n_{eq}\right) \quad (10)$$

2.2. Phân tích ứng xử trên mặt tiếp xúc giữa dao và phôi

Vùng biến dạng dẻo tại bề mặt tiếp xúc giữa dao và phoi được xấp xỉ là vùng biến dạng dẻo hình chữ nhật với chiều dày trung bình là $\Delta s_1 = \delta t_2$, tốc độ biến dạng tương đương cực đại tại vùng tiếp xúc dao và phoi với tiêu chí von Mises được thể hiện qua: ☞

$$\dot{\varepsilon}_{int} = \frac{\dot{\gamma}_{int}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{V_c}{\delta.t_2} \quad (11)$$

Lấy mô men của ứng suất pháp tuyến trên AB quanh điểm B, chiều dài vùng tiếp xúc giữa dao và phoi là:

$$h = \frac{t_1.\sin\theta}{\cos\lambda.\sin\phi}.\left(1 + \frac{C_o n_{eq}}{3(1+2(\frac{\pi}{4}-\phi)-C_o n_{eq}}\right) \quad (12)$$

Giả sử ứng suất pháp dọc theo mặt tiếp xúc của dao và phoi được phân bố đồng nhất, ứng suất pháp tại điểm B có thể được tính theo σ_N = N/hw. Nhiệt độ trung bình tại bề mặt tiếp xúc dao và phoi được tính theo công thức:

$$T_{int} = T_w + \Delta T_{SZ} + \psi \Delta T_M \quad (13)$$

Trong đó, ΔT_{SZ} là nhiệt độ tăng lên tại vùng biến dạng cắt, ΔT_M là lượng nhiệt độ tăng tối đa tại vùng tiếp xúc dao và phoi, phần nhiệt truyền tới vùng tiếp xúc trong phân tích này được đại diện bởi ψ = 0.9.

$$\log_{10}\frac{\Delta T_M}{\Delta T_C} = 0.06 - 0.195(\delta)\sqrt{\frac{R_T.t_2}{t_1}} + 0.5\log_{10}\left(\frac{R_T t_2}{h}\right) \quad (18)$$

Trong đó, $\Delta T_C = FV_c/m_{chip}C_p$ là nhiệt độ tăng trung bình trong phoi. Biến dạng trượt cực đại tại vùng tiếp xúc dao – phoi:

$$\gamma_M = \frac{h}{\delta t_2} \quad (14)$$

Biến dạng tương đương tại vùng tiếp xúc dao – phoi:

$$\varepsilon_{int} = \frac{\gamma_{int}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}(2\gamma_{AB} + 0.5\gamma_M) \quad (15)$$

Ứng suất chảy tại vùng tiếp xúc dao – phoi được xác định sau khi độ biến dạng và tốc độ biến dạng tại vùng này được xác định:

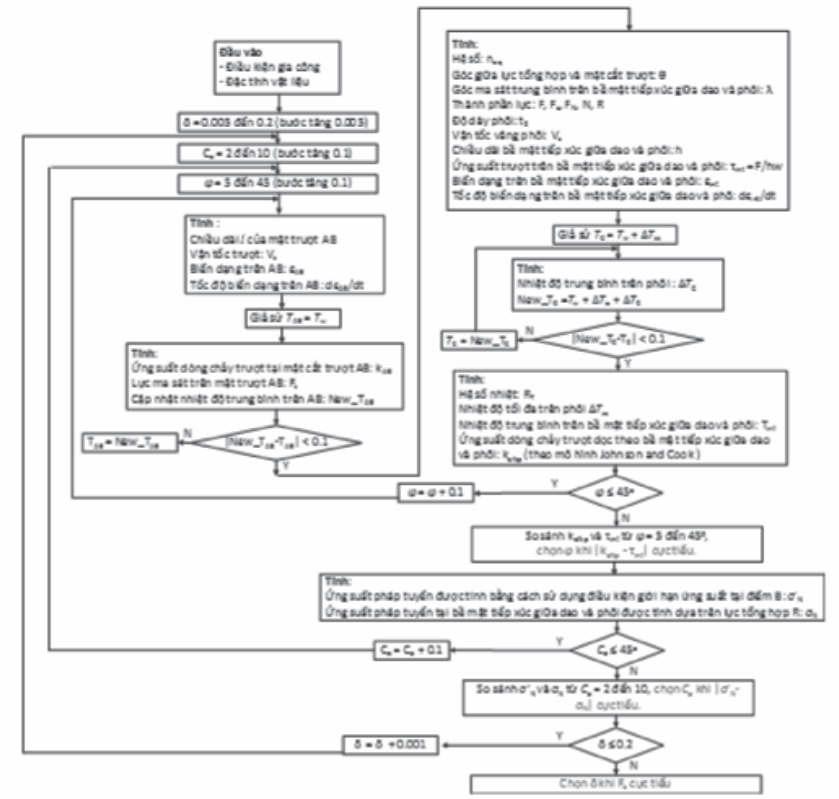
$$k_{chip} = \frac{1}{\sqrt{3}}(A + B\varepsilon_{int}^n)\left(1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}_{int}}{\dot{\varepsilon}_o}\right)\left(1 - \left(\frac{T_{int}-T_w}{T_m-T_w}\right)^m\right) \quad (16)$$

Lực cắt được xác định qua sơ đồ giải thuật tại Hình 3. Góc trượt ϕ được lựa chọn khi ứng suất trượt τ_{int} bằng với ứng suất chảy k_{chip} của vật liệu phoi tại điểm tiếp xúc. Khi ứng suất pháp tại vùng dao – phoi σ_N bằng với σ'_N, giá trị C_o được xác định. Giá trị δ được lựa chọn tại vòng lặp có lực cắt thấp nhất.

3. KIỂM TRA MÔ HÌNH LỰC CẮT

Một chương trình dự đoán lực cắt được xây dựng trên Matlab, sử dụng lưu đồ được giới thiệu ở Mục 2. Kết quả dự đoán lực cắt từ chương trình sẽ được đối chiếu với dữ liệu thực nghiệm đã được công bố [9], nhằm kiểm tra độ chính xác của mô hình lực cắt.

Trong mô phỏng này, dao phay gắn mảnh với hai lưỡi được sử dụng. Quá trình gia công được thực hiện trên phôi thép AISI 4340, độ cứng 47±1 HRC. Các tham số đầu tiên liên quan đến tính chất vật liệu gồm: ứng suất chảy A và ứng suất cứng hóa B lần lượt là 950 MPa và 750 MPa; hệ số cứng hóa biến dạng C, hệ số phần trăm cứng hóa theo tốc độ biến dạng n, và hệ số làm mềm nhiệt m lần lượt bằng 0.015, 0.375, và 0.625; tốc độ biến dạng tham chiếu $\dot{\varepsilon}_0$ bằng 3500; nhiệt độ nóng chảy T_m là 635°C; nhiệt dung riêng C_p bằng 477 J/kgK; hệ số dẫn nhiệt K là 45.5 W/mK. Các điều kiện vận hành cũng được xác định dựa trên các tham số cắt gọt như đường kính dụng cụ D bằng 20 mm, góc thoát phôi của dao α là 14.5°; tốc độ tiến dao 800 mm/phút độ sâu cắt trục là 1 mm. Kết quả so sánh trong Hình 4 cho thấy lực cắt dự đoán tương đối trùng khớp với dữ liệu thực nghiệm. Điều này cho thấy tính chính xác cao của mô hình dự đoán.

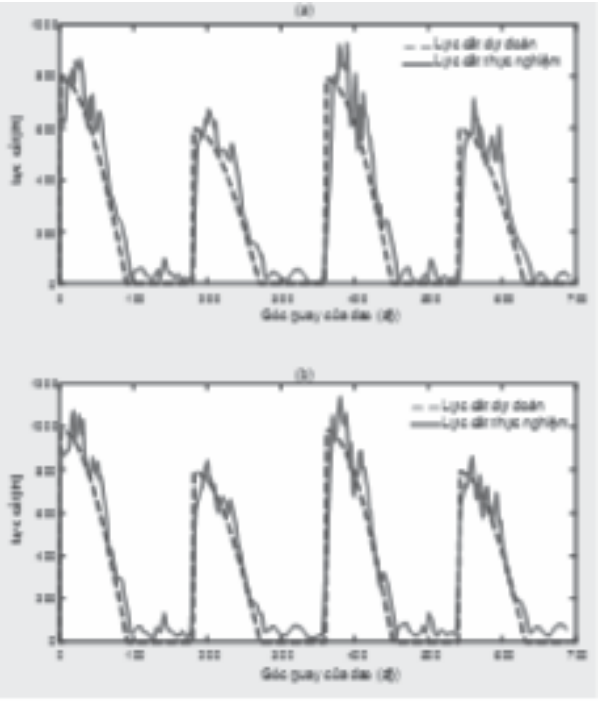


Hình 3. Sơ đồ giải thuật dự đoán lực cắt với lý thuyết Oxley áp dụng vào mô hình ứng suất chảy Johnson và Cook

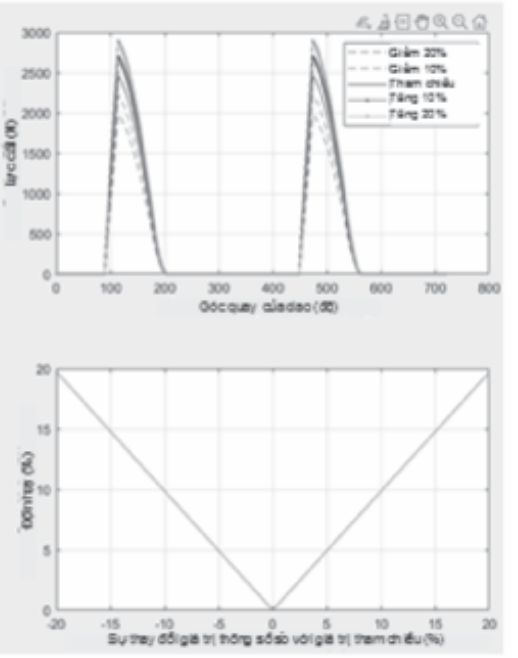
4. PHÂN TÍCH VỀ ĐỘ NHẠY CỦA CÁC THÔNG SỐ

Dựa trên mô hình lực cắt đã được kiểm chứng ở Mục 3, mức độ ảnh hưởng của từng biến đầu vào đến kết quả đầu ra của mô hình lực cắt đánh giá. Cụ thể là phân tích độ nhạy của các thông số cắt gọt và đặc tính vật liệu, điều này giúp xác định những yếu tố có tác động lớn nhất đến lực cắt. Đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố về điều kiện gia công đến lực cắt được mô tả trong các hình 5 và 6, trong khi đó, tác động của sự thay đổi về đặc tính vật liệu đến kết quả ước lượng lực cắt được trình bày trong hình 7 và 8. Hình 9 cho thấy một cái nhìn tổng quát về độ nhạy của lực cắt với các sự thay đổi của tham số đầu vào.

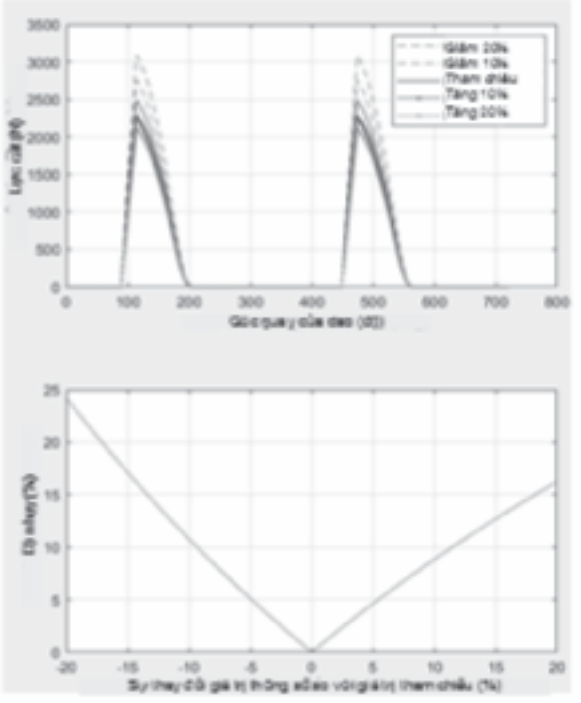
Dựa trên đồ thị độ nhạy Hình 9, có thể rút ra rằng sự thay đổi tốc độ quay dao, tốc độ tiến dao, và góc thoát phoi ảnh hưởng đáng kể đến lực cắt. Điều này cho thấy chúng có độ nhạy cao đối với lực cắt, đồng thời là những tham số cần được kiểm soát chặt chẽ trong quá trình gia công để đảm bảo hiệu suất tối ưu. Bên cạnh đó, các yếu tố vật liệu trong mô hình Johnson-Cook như ứng suất (A, B), và hệ số phần trăm cứng hóa theo tốc độ biến dạng (n), cũng ảnh hưởng mạnh đến lực cắt. Đây là những yếu tố tương đối khó xác định chính xác trên thực tế, vì chúng phụ thuộc rất nhiều vào chất lượng vật liệu của phôi. Việc có sai số khi xác định các yếu tố này có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến kết quả dự đoán lực cắt. Ngược lại, sự thay đổi trong hệ số cứng hóa biến dạng (C), và tốc độ biến dạng tham chiếu ít ảnh hưởng đến lực cắt. ☞



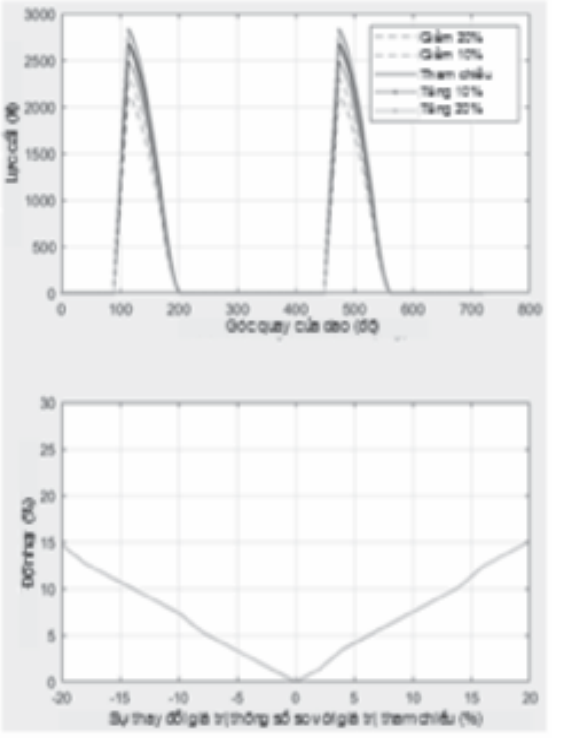
Hình 4. Kết quả so sánh của mô hình lực cắt với tốc độ cắt khác nhau: a) 125 m/phút và b) 100 m/phút



Hình 6. Tác động của sự thay đổi tốc độ tiến dao đến lực cắt (tốc độ tiến dao tham chiếu là 800 mm/phút)

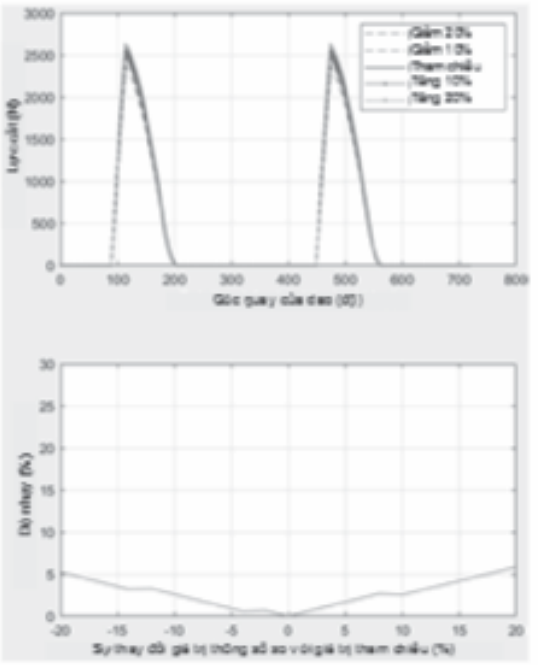


Hình 5. Tác động của sự thay đổi tốc độ quay của trục chính (hay tốc độ cắt) đến lực cắt (tốc độ quay tham chiếu là 4000 vòng/phút)

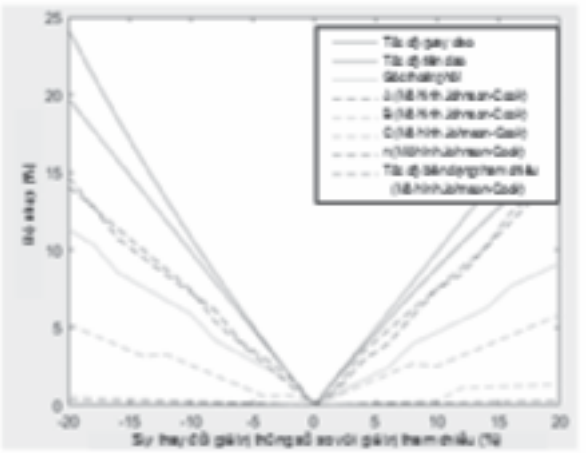


Hình 7. Tác động của sự thay đổi ứng suất chảy A đến lực cắt (ứng suất chảy tham chiếu là 950 MPa)

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn



Hình 8. Tác động của sự thay đổi ứng suất cứng hóa B đến lực cắt (ứng suất cứng hóa tham chiếu là 750 MPa)



Hình 9. Độ nhạy của các thông số đầu vào của mô hình lực cắt

5. KẾT LUẬN

Bài báo này phân tích độ nhạy của các yếu tố gia công như tốc độ cắt, lượng tiến dao và đặc tính vật liệu đối với lực cắt dựa trên mô hình dự đoán lực cắt. Mô hình dự đoán lực cắt được phát triển trên nền tảng lý thuyết của Oxley kết hợp với mô hình dòng chảy Johnson-Cook, và được xác thực bằng cách so sánh với dữ liệu thực nghiệm từ các công bố khoa học trước đây. Kết quả cho thấy sự ảnh hưởng của các yếu tố gia công và vật liệu đến lực cắt. Kết quả phân tích này là nền cơ sở để nâng cao hiệu quả, độ chính xác và độ bền của quá trình gia công trong thực tiễn.❖

Ngày nhận bài: **02/6/2025**
Ngày phản biện: **10/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Choudhury, S. K., & Rath, S. (2000), "*In-process tool wear estimation in milling using cutting force model*". Journal of Materials Processing Technology, 99(1-3), 113-119.

[2]. Dimla Sr, D. E., & Lister, P. M. (2000), "*On-line metal cutting tool condition monitoring.: I: force and vibration analyses*". International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40(5), 739-768.

[3]. Adem, K. A., Fales, R., & El-Gizawy, A. S. (2015), "*Identification of cutting force coefficients for the linear and nonlinear force models in end milling process using average forces and optimization technique methods*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 79, 1671-1687.

[4]. Felhő, C., & Rakonczai, E. (2019), "*FEM investigation of cutting force components in high-feed face milling*". Cutting & Tools in Technological System, (91), 191-199.

[5]. Sujuan, W., Tao, Z., Wenping, D., Zhanwen, S., & To, S. (2022), "*Analytical modeling and prediction of cutting forces in orthogonal turning: a review*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-28.

[6]. Merchant, M. E. (1945), "*Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip*". Journal of Applied Physics, 16(5), 267-275.

[7]. Lee E. H. and Shaffer B.W. (1951), "*The theory of plasticity applied to a problem of machining*". Division of Applied Mathematics, 405-413.

[8]. Oxley, P.L.B., Shaw, M.C., (1990), "*Mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability*". The Journal of Applied Mechanics, 57, 253 -253.

[9]. Hopkins, C., & Hosseini, A. (2020), "*An oxley-based force model for milling of hardened steel using indexable milling tools*". Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress 2020, Charlottetown, PE, Canada.

MÔ HÌNH TOÁN THIẾT KẾ THUẬT PHÓNG CHO THIẾT BỊ BẮN TẬP SỬ DỤNG NGUYÊN LÝ PHẢN LỰC

MATH MODEL OF BALLISTIC DESIGN FOR PRACTICE SHOOTING DEVICES USING THE JET PRINCIPLE

Bùi Xuân Sơn[1], Đỗ Văn Minh[1], Bùi Văn Nghĩa[2], Nguyễn Hoàng Hải[1], Nguyễn Văn Hường[1,*]
[1]Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật quân sự
[2]Nhà máy Z117, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng
**Email: h4ta.030588@gmail.com*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày mô hình bài toán thiết kế thuật phóng cho các thiết bị bắn tập sử dụng nguyên lý phản lực. Trên cơ sở mô hình toán thiết kế thuật phóng xây dựng, nhóm tác giả tiến hành thiết kế thiết bị bắn tập cho đạn phản lực chống tăng cỡ 105 mm và khảo sát ảnh hưởng của giá trị vận tốc lớn nhất (sơ tốc) v_k và khối lượng phần bay của đạn bắn tập m đến sai lệch chiều cao đường đạn và sai lệch chiều cao điểm chạm ứng với các tầm bắn 100m, 200m, 300m. Kết quả khảo sát chỉ ra rằng, để đảm bảo yêu cầu tương đồng về quỹ đạo giữa đạn bắn tập và đạn thật (với sai lệch chiều cao đường đạn và chiều cao điểm chạm lớn nhất là 0,6 m) thì vùng sơ tốc của đạn bắn tập là 232,5÷240 m/s. Khi sơ tốc của đạn bắn tập là 240 m/s, thì vùng khối lượng phần bay để sai lệch chiều cao đường đạn và sai lệch chiều cao điểm chạm nhỏ nhất là 0,6÷0,7 kg. Kết quả nghiên cứu của bài báo là cơ sở định hướng thiết kế thiết bị bắn tập theo nguyên lý phản lực nói chung, định hướng lựa chọn các tham số kết cấu tối ưu để đảm bảo yêu cầu trùng đường đạn đối với thiết bị bắn tập cho đạn phản lực chống tăng cỡ 105 mm nói riêng.

Từ khóa: *Thiết bị bắn tập; Nguyên lý phản lực; Thuật phóng ngoài.*

ABSTRACT

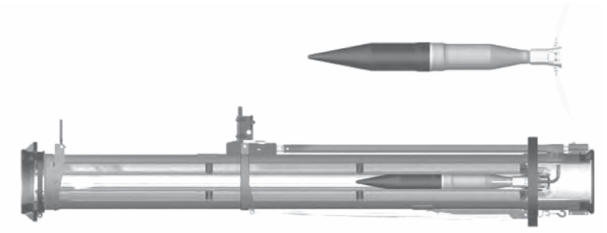
The article presents a mathematical model of the ballistic design problem for practice shooting devices using the jet principle. Based on this model, the authors designed a practice shooting device for 105 mm anti-tank rockets. They also investigated the influence of the initial velocity (v_k) and the mass of the flight part (m) on the deviations in bullet trajectory and impact point height at ranges of 100m, 200m, and 300m. The survey results show that, to meet the trajectory similarity requirement between practice and real shots (maximum deviation of 0.6 m in trajectory and impact point height), the initial velocity zone for practice shots is 232,5÷240 m/s. At an initial velocity of 240 m/s, the mass of the flight part should be 0,6÷0,7 kg to achieve the smallest deviation in trajectory and impact point height. These results form the basis for designing the training shooting device following the jet principle and guide the selection of optimal structural parameters to ensure ballistic path overlap for the 105 mm anti-tank jet projectile.

Keywords: *The practice shooting device; The jet principle; External ballistic.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công tác huấn luyện, đào tạo lực lượng vũ trang luôn gắn liền với việc sử dụng vũ khí, trang bị kỹ thuật. Tuy nhiên, việc tổ chức bắn đạn thật thường gặp nhiều khó khăn do chi phí lớn, yêu cầu về an toàn cao và điều kiện thao trường hạn chế. Do đó, việc nghiên cứu và chế tạo các thiết bị bắn tập nhằm mô phỏng sát thực tế nhưng bảo đảm an toàn, tính kinh tế và hiệu quả là hết sức cần thiết [1-4].

Đạn phản lực chống tăng vác vai là loại hỏa lực chống tăng có uy lực cao, đóng vai trò quan trọng trong biên chế bộ binh. Xuất phát từ yêu cầu thực tiễn của việc nâng cao chất lượng huấn luyện, giảm chi phí và bảo đảm an toàn, việc thiết kế thiết bị bắn tập phục vụ huấn luyện đạn chống tăng theo nguyên lý đạn phản lực ngày càng phát triển [4, 5].



Hình 1. Đạn phóng lựu chống tăng РПГ-27 và thiết bị bắn tập ПУИ-27

Bài báo này đề xuất mô hình toán thiết kế thuật phóng cho thiết bị bắn tập sử dụng nguyên lý phản lực làm cơ sở khoa học cho nhiệm vụ thiết kế thiết bị bắn tập nói chung và thiết bị bắn tập theo nguyên lý phản lực nói riêng.

2. CÁC YÊU CẦU ĐẶT RA ĐỐI VỚI THIẾT BỊ BẮN TẬP

Để đáp ứng yêu cầu đặt ra đối với một thiết bị bắn tập, qua tìm hiểu và phân tích các dạng thiết bị của Nga, nhận thấy, thiết bị phải có kết cấu gồm một cơ cấu phóng và đạn bắn tập. Cơ cấu phóng bản chất là một súng có cỡ nhỏ hơn cỡ của súng thật, có hình dáng, kích thước, khối lượng, trọng tâm như của đạn thật. Đạn bắn tập có đường đạn tương đồng với đạn thật [1, 2, 5].

Trên thực tế, khi so sánh đường đạn của đạn bắn tập và đường đạn của đạn thật trong mặt phẳng bắn, ở các cự ly bắn khác nhau, quỹ đạo đạn bắn tập được xem là tương đồng với quỹ đạo đạn thật khi đáp ứng các yêu cầu sau [6]:

- Sai lệch về độ cao đường đạn của đạn bắn tập và đạn thật (ΔY_{maxi}) không vượt quá giá trị cho phép [ΔY_{maxi}], trong đó i ứng với các thước ngắm thứ i:

$$|\Delta Y_{maxi}| \leq [\Delta Y_{maxi}] \quad (1)$$

- Sai lệch độ cao điểm chạm của đạn bắn tập và đạn thật tại các tầm bắn (ΔY_{Ci}) không vượt quá giá trị cho phép [ΔY_{Ci}]:

$$|\Delta Y_{Ci}| \leq [\Delta Y_{Ci}] \quad (2)$$

Ngoài ra, thiết bị còn phải đảm bảo các điều kiện khác như về vị trí trọng tâm, lực giật, cường độ âm thanh,... Tuy nhiên, những yêu cầu (1), (2) là những yêu cầu tiên quyết. Khi đảm bảo các yêu cầu này, quỹ đạo đạn bắn tập sẽ gần giống với quỹ đạo đạn thật.

3. MÔ HÌNH TOÁN THIẾT KẾ THUẬT PHÓNG CHO THIẾT BỊ BẮN TẬP SỬ DỤNG NGUYÊN LÝ PHẢN LỰC

Bài toán thiết kế thuật phóng là lựa chọn được bộ thông số thuật phóng trong và thuật phóng ngoài cho cơ cấu phóng và đạn bắn tập thỏa mãn các yêu cầu đặt ra. ☞

Theo lý thuyết thuật phóng ngoài, ứng với mỗi bộ thông số ban đầu của đạn gồm sơ tốc v_0, hệ số phóng C và góc phóng θ sẽ cho một quỹ đạo đạn. Có thể viết mối liên hệ trên như sau [6]:

$$X = X(v_0, C, \theta)$$

Trong đó: X – Tầm bắn.

Trong công thức trên: $C = \frac{id^2}{m}$

Trong đó: d – Cỡ đạn (mm); m – Khối lượng phần bay (g); i – Hệ số hình dạng đầu đạn.

Đối với đạn chống tăng bắn trong tầm bắn thẳng và có động cơ với thuốc phóng cháy nhanh (cháy hết trong nòng), quỹ đạo đạn coi như không phụ thuộc vào độ cao, mà chỉ phụ thuộc vào bộ ba thông số chủ yếu: hệ số phóng, C_{bt}; vận tốc lớn nhất (sơ tốc), v_{kbt}; góc phóng θ_t. Vì θ_t không đổi, nên nếu hệ số phóng và sơ tốc của đạn bắn tập và đạn thật bằng nhau thì có thể coi đường đạn của hai loại đạn trùng nhau. Tuy nhiên, đảm bảo C_{bt} đúng bằng C_t không phải lúc nào cũng thực hiện được. Dẫn tới chúng ta cần phải thay đổi bộ thông số C_{bt} (thay đổi m, khi đã thiết kế kết cấu cụ thể của đạn bắn tập) và v_{kbt} sao cho thiết bị bắn tập thỏa mãn các điều kiện (1)÷(2) bên trên.

Trên cơ sở lý thuyết thuật phóng ngoài [6], lý thuật thiết kế động cơ [7], thuật toán giải bài toán thiết kế thuật phóng cho thiết bị bắn tập được đề xuất gồm các bước như sau:

Bước 1. Xác định các thông số ban đầu, bao gồm các thông số thuật phóng, kích thước của hệ súng đạn thật.

Bước 2. Xác định sơ bộ các thông số thuật phóng ngoài của đạn bắn tập:

+ Bước 2.1. Lấy $i_{bt} = i_t$, $v_{kbt} = v_{kt}$, $C_{bt} = C_t$.

+ Bước 2.2. Xác định bộ các giá trị (d_{bti}, m_{bti}) từ điều kiện $C_{bt} = C_t$.

+ Bước 2.3. Chọn bộ giá trị tối ưu (d_{bt}, m_{bt}) phù hợp với khả năng công nghệ chế tạo trong nước.

Bước 3. Xác định các thông số thuật phóng động cơ tên lửa với điều kiện $v_{kbt} = v_{kt}$.

Bước 4. Thiết kế kết cấu và kỹ thuật trên cơ sở bộ số liệu kết cấu được xác định ở bước 2 và bước 3, qua đó xác định được hệ số hình dạng i_{bt} của đạn bắn tập.

Nếu $i_{bt} = i_t$ thì đạn bắn tập đảm bảo yêu cầu trùng đường đạn và phương án thiết kế thỏa mãn yêu cầu.

Nếu $i_{bt} \neq i_t$, phải thay đổi các thông số: vận tốc lớn nhất v_k và khối lượng phần bay m (được điều chỉnh qua khối lượng phần chiến đấu) để đường đạn sai lệch với đường đạn thật trong phạm vi cho phép.

Trong các vòng lặp trên sử dụng hệ phương trình cơ bản của lý thuyết động cơ tên lửa nhiên liệu rắn [6] và hệ phương trình thuật phóng ngoài của đạn thông thường [7].

4. ÁP DỤNG THIẾT KẾ THUẬT PHÓNG CHO THIẾT BỊ BẮN TẬP SỬ DỤNG NGUYÊN LÝ PHẢN LỰC VÀ KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG VẬN TỐC v_k VÀ KHỐI LƯỢNG PHẦN BAY m TỚI SAI LỆCH ĐỘ CAO ĐƯỜNG ĐẠN VÀ SAI LỆCH ĐỘ CAO ĐIỂM CHẠM Ở CÁC TẦM BẮN KHÁC NHAU

a) Số liệu ban đầu của súng và đạn thật:

Qua đo đạc trên mẫu thật và thử nghiệm

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

bắn đạn thật xác định được các thông số sau: d_t = 105 mm; m_t = 5,76 kg; i_t = 1,95; v_{kt} = 230 m/s; các góc phóng ứng với thước ngắm 1, 2, 3 lần lượt bằng 0,8114°; 1,3126°; 1,8361°.

b) Chọn bộ thống số thuật phóng ngoài:

Với $i_{bt} = i_t = 0 = 1,95$, ta tính được $C_{bt} = C_t = 3,74$. Chọn d_{bt} = 42 mm, ta tính được m_{bt} = 0,92 kg; $v_{kbt} = v_{kt}$ = 230 m/s.

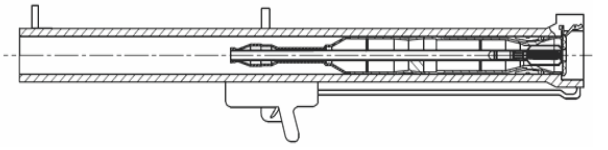
c) Thiết kế kết cấu và xác định hệ số hình dạng i_{bt}

Với bộ số liệu sơ bộ xác định trên cơ sở thiết kế thuật phóng cho thiết bị bắn tập, lựa chọn hình dạng, kích thước của thiết bị bắn tập thiết kế. Kết cấu thiết bị bắn tập và đạn bắn tập được thể hiện trên Hình 2. Qua tính toán thổi khí động trên phần mềm Ansys CFX với hình dạng đạn bắn tập thiết kế, xác định được i_{bt} = 2,3.

Bài toán thiết kế đặt ra: Cần phải xác định vùng vận tốc lớn nhất v_k và khối lượng phần bay m để sai lệch về chiều cao đường đạn và chiều cao điểm chạm nhỏ đến mức cho phép tương ứng với các tầm bắn khác nhau.

d) Ảnh hưởng của vận tốc v_k và khối lượng phần bay m đến sai lệch chiều cao đường đạn và chiều cao điểm chạm ở các tầm bắn khác nhau.

Thực hiện sơ đồ thuật toán giải hệ phương trình cơ bản thuật phóng ngoài đối với đạn thật và đạn bắn tập với v_{kbt} thay đổi. Do $i_{bt} > i_t$ nên cần tăng v_{kbt} đến giá trị phù hợp. Kết quả khảo sát trình bày trên bảng 1.



a)



b)

Hình 2. Kết cấu thiết bị bắn tập:
a. Toàn cảnh thiết bị bắn tập; b. Đạn bắn tập trên đường bay

Bảng 1. Ảnh hưởng của v_{kbt} đến ΔY_{maxi} và ΔY_i (i_{bt} = 2,3)

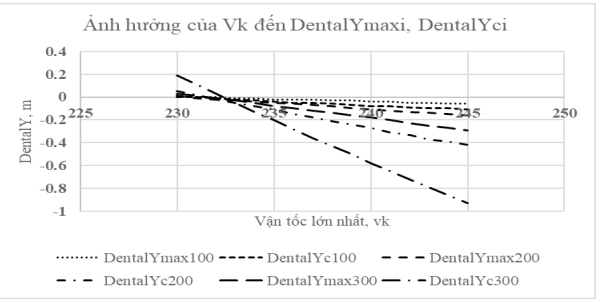
Thước ngắm 1		**Thước ngắm 2**		**Thước ngắm 3**	
q_1 = 0,8114°		q_2 = 1,3126°		q_3 = 1,8361°	
X = 100 m		X = 200 m		X = 300 m	
DY_{max100}, m	DY_{C100}, m	DY_{max200}, m	DY_{C200}, m	DY_{max300}, m	DY_{C300}, m
m	m	m	m	m	m
0,01	0	0,01	0,05	0,03	0,19
0	0	-0,01	0,02	0,01	0,11
0	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	0,03
-0,01	-0,02	-0,03	-0,05	-0,03	-0,05
-0,01	-0,03	-0,04	-0,08	-0,05	-0,13
-0,02	-0,04	-0,05	-0,11	-0,08	-0,2

☞

-0,02	-0,05	-0,06	-0,15	-0,1	-0,28
-0,02	-0,05	-0,07	-0,18	-0,12	-0,36
-0,03	-0,06	-0,08	-0,21	-0,14	-0,43
-0,03	-0,07	-0,1	-0,24	-0,16	-0,5
-0,04	-0,08	-0,11	-0,27	-0,18	-0,58
-0,04	-0,08	-0,12	-0,31	-0,2	-0,65
-0,05	-0,09	-0,13	-0,33	-0,23	-0,72
-0,05	-0,1	-0,14	-0,37	-0,25	-0,79
-0,06	-0,1	-0,15	-0,39	-0,27	-0,86
-0,06	-0,11	-0,16	-0,42	-0,29	-0,93

Trên cơ sở kết quả Bảng 1, xây dựng đồ thị thể hiện sự ảnh hưởng của vận tốc lớn nhất v_k đến sai lệch chiều cao đường đạn và chiều cao điểm chạm. Đồ thị được thể hiện trên Hình 3.

Từ Hình 3 ta nhận thấy: ở cả ba dải tầm (100 m, 200 m và 300 m), giá trị vận tốc v_k lớn nhất cho sai lệch chiều cao điểm chạm và chiều cao đường đạn nhỏ nhất là khoảng 232,5 m/s. Tuy nhiên, thực tế giá trị v_k của đạn thật cũng nằm trong một khoảng nhất định (giá trị tính toán được thực hiện với giá trị danh nghĩa). Vì vậy, từ đồ thị hình 3 có thể chọn vùng thay đổi của v_k trong khoảng 232,5 m/s đến khoảng 240 m/s, lúc đó sai lệch điểm chạm lớn nhất ở tầm 300 m là 0,6 m.

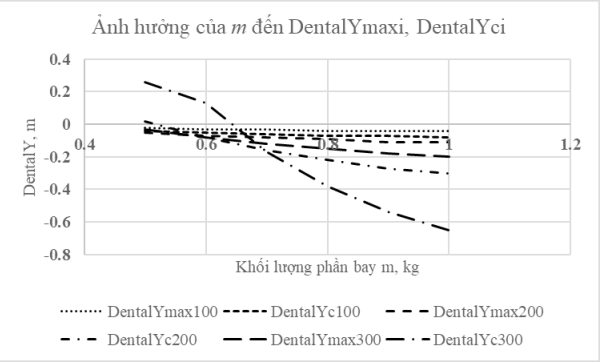


Hình 3. Ảnh hưởng của vận tốc lớn nhất V_k đến sai lệch chiều cao đường đạn và chiều cao điểm chạm ở các tầm bắn 100 m, 200 m và 300 m

Trên cơ sở kết quả khảo sát ảnh hưởng của v_k, bài báo tiến hành khảo sát ảnh hưởng của khối lượng phần bay ứng với vận tốc v_k = 240 m/s - ứng với trường hợp cho độ lệch điểm chạm lớn nhất có thể chấp nhận được. Kết quả khảo sát được thể hiện trên Bảng 3 và Hình 4.

Bảng 3. Ảnh hưởng của m đến ΔY_{maxi} và ΔY_i (v_k = 240 m/s)

m, kg	Thước ngắm 1		Thước ngắm 2		Thước ngắm 3	
	q_1 = 0,8114°		q_2 = 1,3126°		q_3 = 1,8361°	
	X = 100m		X = 200m		X = 300m	
	DY_{max100}, m	DY_{C100}, m	DY_{max200}, m	DY_{C200}, m	DY_{max300}, m	DY_{C300}, m
0,5	-0,02	-0,04	-0,05	0,02	-0,03	0,26
0,6	-0,03	-0,05	-0,07	-0,08	-0,08	0,13
0,7	-0,03	-0,06	-0,08	-0,16	-0,12	-0,17
0,8	-0,04	-0,07	-0,09	-0,22	-0,15	-0,38
0,9	-0,04	-0,07	-0,11	-0,27	-0,18	-0,54
1,0	-0,04	-0,08	-0,11	-0,3	-0,2	-0,65



Hình 4. Ảnh hưởng của khối lượng phần bay m đến sai lệch chiều cao đường đạn và chiều cao điểm chạm ở các tầm bắn 100 m, 200 m và 300 m

Từ đồ thị Hình 4 nhận thấy, nếu ứng với v_k = 240 m/s, có thể điều chỉnh khối lượng phần bay của đạn bắn tập trong khoảng 0,6÷0,7 kg, lúc đó sai lệch điểm chạm và chiều cao đường đạn của đạn bắn tập và đạn thật ở vùng nhỏ nhất.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đưa ra quan điểm chung thiết kế các thiết bị bắn tập theo nguyên lý phản lực, có thể áp dụng khi thiết kế thiết bị bắn tập cho loại đạn phản lực chống tăng. Kết quả khảo sát đối với thiết bị bắn tập cho đạn phản lực chống tăng cỡ 105 mm cho thấy để đảm bảo yêu cầu tương đồng về quỹ đạo (sai lệch chiều cao điểm chạm và chiều cao đường đạn của đạn thật và đạn bắn tập không vượt quá 0,6 m ở tầm bắn 300 m) thì vùng giá trị vận tốc lớn nhất của đạn bắn tập là 232,5÷240 m/s. Khối lượng phần bay của đạn bắn tập nằm trong khoảng 0,6÷0,7 kg, khi vận tốc lớn nhất của đạn bắn tập là 240 m/s thì sai lệch chiều cao đường đạn và điểm chạm trên bia ở các tầm bắn 100m, 200m và 300m là nhỏ nhất.❖

Ngày nhận bài: **21/10/2025**
Ngày phản biện: **04/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. "*Training weapon system for recoilless antitank rifle weapons*". US patent WO 2011/142695A1, 2011.
[2]. "*Приспособление ПУС-7М для учебной стрельбы из РПГ-7*". Техническое описание и инструкция по эксплуфтации. М, 1986.
[3]. "*Основы устройства и эксплуатации стрелковому оружия и гранатометов*". Мин.обороны, Москва, 1978.
[4]. Наставление по стрелковому делу ручной противотанковый гранатомет (РПГ-7 и РПГ-7Д).
[5]. Weapon training systems. US patent, 1990.
[6]. Nguyễn Văn Thọ, Nguyễn Đình Sại, "*Giáo trình thuật phóng ngoài*". Học viện Kỹ thuật quân sự, 2003.
[7]. Phạm Thế Phiệt, "*Lý thuyết động cơ tên lửa*". Học viện Kỹ thuật quân sự, 1995.

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PLC CÂN NƯỚC TỰ ĐỘNG PHỤC VỤ PHA SƠN

RESEARCH ON THE DESIGN OF A PLC-BASED AUTOMATIC WATER WEIGHING CONTROLLER FOR PAINT MIXING APPLICATIONS

Đỗ Duy Hà
Viện Cơ khí Động lực, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
Email: hadd@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Trong quá trình sản xuất sơn, việc cấp và cân nước chính xác là yếu tố quan trọng quyết định đến độ ổn định của màu sắc, độ nhớt và chất lượng sản phẩm. Tuy nhiên, tại nhiều nhà máy pha sơn hiện nay, công đoạn này vẫn chủ yếu được thực hiện thủ công, dẫn đến sai lệch tỷ lệ pha, giảm năng suất, tăng tỷ lệ phế phẩm và khó truy xuất dữ liệu sản xuất. Xu hướng tự động hóa quy trình pha trộn trong công nghiệp, đặc biệt là ứng dụng hệ thống cân và cấp nước tự động, đang được nghiên cứu và triển khai rộng rãi nhằm nâng cao độ chính xác, tiết kiệm nguyên liệu và đảm bảo đồng nhất chất lượng giữa các lô sản xuất. Trong nghiên cứu này, tác giả tính toán thiết kế hệ thống cấp nước tự động điều khiển bằng Program Logic Control (PLC). Với kết quả thu được có ưu điểm vượt trội như: giá thành hạ, dễ thi công lắp đặt, dễ sửa chữa, chất lượng làm việc ổn định, linh hoạt.

Từ khoá: *Hệ thống cấp nước; Bộ điều khiển PLC; Sản xuất sơn.*

ABSTRACT

In the paint manufacturing process, accurate water dosing and weighing are crucial factors that determine the stability of color, viscosity, and overall product quality. However, in many paint mixing plants today, this stage is still mainly performed manually, leading to mixing ratio deviations, reduced productivity, increased defect rates, and difficulties in production data traceability. The trend toward automation in industrial mixing processes – particularly through the implementation of automatic water weighing and dosing systems – is being widely researched and applied to enhance accuracy, save raw materials, and ensure consistent quality across production batches. In this study, the author designed an automatic water supply system controlled by a Programmable Logic Controller (PLC). The proposed system demonstrates several outstanding advantages, such as low cost, ease of installation and maintenance, operational stability, and flexibility.

Keywords: *Water Supply System; PLC Controller; Paint Production.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quá trình sản xuất sơn, việc cấp và cân nước chính xác là yếu tố quan trọng quyết định đến độ ổn định của màu sắc, độ nhớt và chất lượng sản phẩm. Xu hướng tự động hóa quy trình pha trộn trong công nghiệp, đặc biệt là ứng dụng hệ thống cân và cấp nước tự động, đang được nghiên cứu và triển khai rộng rãi. Các nghiên cứu cho thấy bơm tỷ lệ có khả năng kiểm soát chính xác lượng cấp, giảm dao động nồng độ và tối ưu hóa quy trình pha trộn [1], [2]. Việc tích hợp bộ điều khiển thông minh như PID, Fuzzy hay mô hình dự đoán với hệ thống đo lường thời gian thực còn giúp điều chỉnh lượng cấp nước linh hoạt theo điều kiện sản xuất, qua đó giảm lãng phí và tăng tính ổn định [3]. Trong ngành sơn, các hệ thống pha trộn sử dụng PLC và SCADA đã cho thấy hiệu quả cao trong việc tự động hóa công đoạn định lượng, đồng thời cung cấp dữ liệu theo dõi và cảnh báo chất lượng sản phẩm [4]. Vì vậy, việc nghiên cứu, thiết kế và chế tạo hệ thống cân nước tự động cho nhà máy pha sơn là cần thiết và phù hợp với xu hướng chuyển đổi số, giúp nâng cao hiệu quả sản xuất, giảm sai số và đảm bảo tính đồng nhất sản phẩm.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Lưu lượng chất lưu là lượng chất lưu chảy qua một tiết diện ống dẫn hoặc kênh dẫn trong một đơn vị thời gian. Đại lượng này biểu thị mức độ vận chuyển của chất lưu trong hệ thống và là thông số quan trọng trong các quá trình công nghiệp, hệ thống cấp thoát chất lưu, và điều khiển tự động.

Lưu lượng trung bình trong khoảng thời gian $\Delta t = t_2 - t_1$ xác định bởi biểu thức:

$$Q_{tb} = \frac{\Delta V}{dt}$$

Trong đó: ΔV – Thể tích chất lưu chảy qua ống trong thời gian khảo sát.

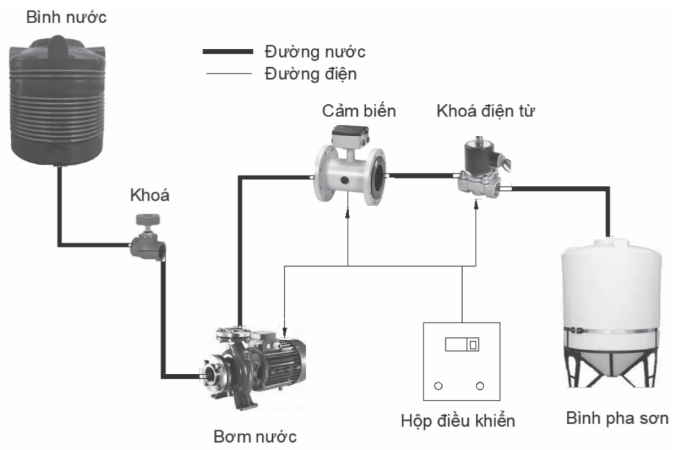
Lưu lượng nước tức thời được tính theo công thức:

$$Q = \frac{dV}{dt}$$

Nguyên lý hoạt động của lưu lượng kế dựa trên cơ sở: Để trực tiếp thể tích chất lưu chảy qua công tơ trong một khoảng thời gian xác định Δt; Đo vận tốc chất lưu chảy qua công tơ khi lưu lượng là hàm của vận tốc; Đo độ giảm áp qua tiết diện thu hẹp trên dòng chảy, lưu lượng là hàm phụ thuộc vào độ giảm áp. Tín hiệu đo biến đổi trực tiếp thành tín hiệu điện nhờ bộ chuyển đổi điện thích hợp.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

3.1. Sơ đồ và các thành phần hệ thống



Hình 1. Sơ đồ của hệ thống

Mục tiêu của việc thiết kế và chế tạo hệ thống cân nước cho dây chuyền pha sơn là đảm bảo khả năng định lượng chính xác và ổn định lượng nước bổ sung vào quá trình pha chế, qua đó duy trì độ nhớt, tỷ lệ pha trộn và chất lượng màu sơn theo yêu cầu công nghệ. Hệ thống được xây dựng nhằm tự động hóa quá trình cấp nước, giảm thiểu sai số do thao tác thủ công, rút ngắn thời gian pha mẻ, đồng thời nâng cao năng suất, độ lặp lại và khả năng kiểm soát chất lượng sản phẩm.

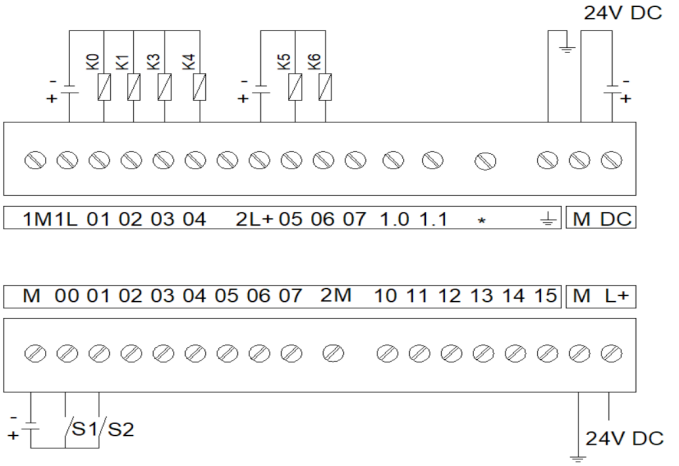
*Hệ thống cân nước gồm:

01 bơm tăng áp có mã HS 350-300-4802/1-F_FB EBQP;

01 cảm biến lưu lượng có mã KF700;

01 van điện từ solenoid AC220V;

01 tủ điều khiển trung tâm (dùng PLC S7200) có sơ đồ đấu nối như sau:

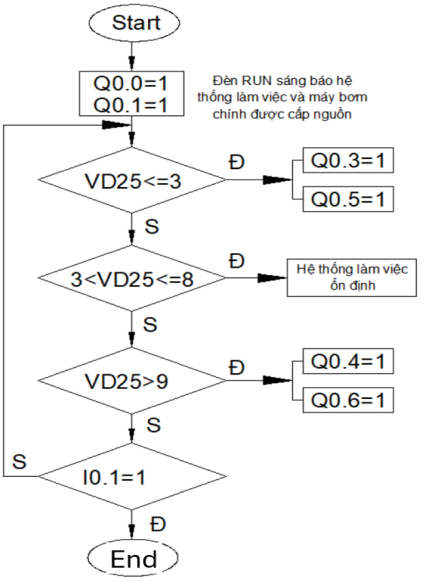


Hình 2. Sơ đồ đấu dây PLC S7200

3.2. Sơ đồ thuật toán của hệ thống

*Nguyên lý hoạt động của hệ thống như sau:

Bước 1: Bật aptomat cấp nguồn cho tủ điều khiển; Bước 2: Đặt khối lượng cần cân qua màn hình hiển thị; Bước 3: Thực hiện ấn lệnh cân thông qua nút "Start"; Bước 4: Nếu quá trình cân bị lỗi hoặc sai gì đó cần dừng khẩn cấp, ấn phím "Stop"; Bước 5: Nếu trong quá trình cân, khi khối lượng cân bằng khối lượng tổng, lúc này máy sẽ không cho cân tiếp. Để tiếp tục cân mẻ khác, ta ấn và giữ phím "Stop" trong khoảng 5s.



Hình 3. Thuật toán của hệ thống

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chế tạo và ứng dụng thành công hệ thống vào các nhà máy sản xuất và chiết rót sơn với mức chính xác 99,95% cùng với việc nâng cao năng suất mà vẫn đảm bảo được các điều kiện sử dụng nước trong quá trình pha trộn.

Sản phẩm của nó trước tiên được ứng dụng trong nhà máy, xí nghiệp, dây chuyền để góp phần giảm thiểu lượng nước thất thoát, làm tăng chất lượng phục vụ và hiệu quả kinh tế trong sản xuất. ❖

Ngày nhận bài: **21/10/2025**
Ngày phản biện: **04/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. X. Lu, S. Huang, H. Liu, F. Yang, and T. Zhang, "*Research on Intelligent Chemical Dosing System for Phosphorus Removal in Wastewater Treatment Plants*". Water, vol. 16, no. 11, 2024.

[2]. Petra S, Martin M, et al., "*Powder dosing within continuous manufacturing: A lean approach*". International Journal of Pharmaceutics, vol. 667, 124903 2025.

[3]. Rafael R, Jose AC, et al., "*A novel robot co-worker system for paint factories without the need for human operators*". Journal of Coatings Technology and Research, vol. 18, no. 4, pp. 889-900, 2023.

[4]. Sartorius AG, "*Paint Mixing Scales-High-precision weighing solutions for industrial paint mixing*". Technical White Paper, 2024.

KỸ THUẬT HÃM CỦA ĐOÀN TÀU TỐC ĐỘ CAO

BRAKING TECHNOLOGY OF HIGH-SPEED TRAINS

Vũ Thị Hoài Thu
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: thuvth@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Đường sắt tốc độ cao đang là một xu thế phát triển giao thông trên thế giới và tại Việt Nam cũng đang nghiên cứu xây dựng hệ thống đường sắt cao tốc với tốc độ lên đến 350 km/h. Hệ thống hãm đoàn tàu có những đặc điểm cần tương đồng với các đặc điểm kết cấu của đoàn tàu EMU hiện đại. Bài viết này giới thiệu đặc điểm cũng như các yêu cầu của hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao. Việc ứng dụng phương thức hãm phối hợp điện – khí nén có khả năng tận dụng được tối đa năng lực hãm của hệ thống.

Từ khóa: *Hệ thống hãm đoàn tàu EMU; Phân phối lực hãm.*

ABSTRACT

High-speed rail has become a global trend in transportation development, and Vietnam is also conducting research on building a high-speed railway system with operating speeds of up to 350 km/h. The braking system of a train must exhibit characteristics consistent with the structural features of modern EMU trains. This article presents the characteristics and requirements of the braking system for high-speed trains. The application of a combined electro – pneumatic braking method enables the system to maximize its braking capacity.

Keywords: *EMU train braking system; Braking force distribution.*

1. MỞ ĐẦU

Hiệp hội Đường sắt quốc tế (UIC) định nghĩa đường sắt tốc độ cao là một hệ thống có tốc độ khai thác ≥ 250km/h trên tuyến đường xây dựng mới hoặc từ 200km/h trên tuyến đường sắt nâng cấp [2], [3].

Theo luật đường sắt năm 2017 quy định: Đường sắt tốc độ cao là một loại hình đường sắt quốc gia có tốc độ thiết kế từ 200km/h trở lên, có khổ đường 1435mm, đường đôi, điện khí hoá.

Dựa vào các đặc điểm của đoàn tàu tốc độ cao mà hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao cũng cần có các đặc điểm tương ứng:

- Đối với đoàn tàu tốc độ cao động lực phân tán, thiết bị hãm đoàn tàu là sự kết hợp giữa thiết bị hãm toa xe động và thiết bị hãm toa xe kéo theo để tạo thành một hệ thống hãm hoàn chỉnh. Điều khiển hãm chọn dùng phối hợp hãm điện không và hãm khí nén. Đoàn tàu tốc độ cao thường chọn phương thức hãm tái sinh kết hợp với phương thức động lực phân

tán của đoàn tàu nên có thể phát huy hết hiệu quả của hãm tái sinh nhằm nâng cao tính kinh tế.

- Để nâng cao sự thoải mái, độ giảm tốc mỗi toa xe trong đoàn tàu tốc độ cao là phải thống nhất.

- Các đoàn tàu tốc độ cao đều được trang bị bộ chống trượt điện tử hiệu suất cao để tiến hành điều khiển chống trượt, tận dụng đầy đủ lực bám dính.

2. HỆ THỐNG HÃM ĐOÀN TÀU TỐC ĐỘ CAO

Hệ thống hãm là một trong những hệ thống chính và quan trọng nhất trong quá trình vận hành đoàn tàu. Hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao bao gồm: hệ thống chỉ lệnh và truyền tải chỉ lệnh; hệ thống điều khiển hãm; hệ thống thực hiện hãm và hệ thống cung cấp khí nén. Các hệ thống có quan hệ mật thiết với nhau. Hiệu quả và tính năng của hệ thống hãm ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn của đoàn tàu. Vì vậy, hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao phải đáp ứng được các yêu cầu cơ bản sau [3]:

- Yêu cầu về tính an toàn: Có đủ năng lực hãm, đáp ứng yêu cầu về khoảng cách hãm quy định và đảm bảo đoàn tàu dừng trong khoảng cách hãm quy định. Đoàn tàu phải đáp ứng yêu cầu về khoảng cách hãm khẩn cấp trong mọi điều kiện.

Động năng của đoàn tàu tỷ lệ bình phương với tốc độ nhưng yêu cầu về năng lực của hệ thống hãm còn phải lớn hơn nhiều. Đây là một trong những thách thức của hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao khi nâng cao tốc độ. Hệ thống hãm phải có năng lực đủ lớn để đảm bảo triệt tiêu được lượng động năng khổng lồ của đoàn tàu trong một khoảng cách nhất định là rất quan trọng. Ví dụ, khi tốc độ tăng từ 200 km/h đến 300km/h thì khoảng cách hãm khẩn đã bị kéo dài lên tương đối lớn từ 2000m đến 3700m, nhưng khi tốc độ tăng đến 350 km/h thì khoảng cách hãm khẩn đã tăng lên nhanh hơn, kéo dài từ 4500m đến 6000m tùy vào năng lực của thiết bị hãm [5]. Điều khiển linh hoạt, độ giảm tốc hãm nhanh, tác dụng hãm nhạy và đáng tin cậy, tác dụng hãm và nhả hãm của các toa xe trước và sau đoàn tàu phải thống nhất.

- Có khả năng hãm động lực, trong quá trình hãm thường, phải được tận dụng tối đa năng lực của hãm động lực để giảm chi phí vận hành. Có khả năng hãm kết hợp giữa hãm động lực và hãm ma sát.

- Hệ thống hãm phải đảm bảo lực hãm không suy giảm khi lên và xuống dốc dài.

- Lực hãm của mỗi toa xe động càng ổn định càng tốt và hệ thống hãm phải có khả năng điều chỉnh theo sự thay đổi số lượng hành khách.

- Phải có tính năng hãm khẩn cấp: Trong quá trình vận hành, khi các toa xe động gặp sự cố gây nguy hiểm cho an toàn vận hành đoàn tàu như đoàn tàu bị phân tách, hỏng hệ thống hãm, v.v., các toa xe động phải có khả năng tự động áp dụng hãm khẩn cấp.

Hãm khẩn cấp có thể được kích hoạt từ nhiều nguồn khác nhau: thứ nhất là do tài xế tác động vào vị trí hãm khẩn cấp trong buồng lái, thứ hai là do hành khách đi tàu tác động vào nút khẩn cấp được lắp trên toa xe để thông báo với tài xế hoặc bởi hệ thống bảo vệ đoàn tàu tự động ATP (Automatic Train Protection) trong trường hợp phát hiện nguy hiểm. Khi hãm khẩn cấp được kích hoạt, tất cả các thiết bị hãm trên ☞

tất cả các toa tàu sẽ được áp dụng với lực tối đa để đảm bảo thời gian hãm ngắn nhất và khoảng cách hãm ngắn nhất có thể.

- Đáp ứng yêu cầu nhẹ hóa trọng lượng của đoàn tàu: Thiết bị cung cấp khí nén và thiết bị điều khiển hãm của hệ thống hãm được phân bố trên tất cả các toa xe trong đoàn tàu cũng phải đáp ứng yêu cầu về nhẹ hóa trọng lượng.

- Trạng thái làm việc của hệ thống hãm liên quan trực tiếp đến an toàn vận hành đoàn tàu, ngoài việc đáp ứng yêu cầu về độ tin cậy còn phải đáp ứng yêu cầu dễ bảo trì, bảo dưỡng và sửa chữa.

Bảng 1. Hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao trên thế giới và hệ thống điều khiển [3, 5]

Đoàn tàu		Đức		Pháp		Nhật Bản	
		ICE3	ICE350	TGV-2N	AGV	Seri 700	Seri E2
Tốc độ vận doanh cao nhất, km/h		330	350	300	350	300	300
Móc nối		4M4T	4M4T	2M8T	12M8T	12M4T	6M2T
Thiết bị hãm toa xe	Toa động	Tái sinh + 2 bộ hãm đĩa bánh xe	Tái sinh + điện trở + 2 bộ hãm đĩa bánh xe	1,54	Tái sinh + 2 bộ hãm đĩa bánh xe	Tái sinh + 2 bộ hãm đĩa bánh xe	Tái sinh + 2 bộ hãm đĩa bánh xe
	Toa kéo theo	2 bộ hãm đĩa trục + 2 bộ đĩa dòng xoáy	3 bộ hãm đĩa trục		4 bộ hãm đĩa bánh xe	2 bộ hãm đĩa bánh xe + 1 bộ đĩa dòng xoáy	2 bộ hãm đĩa bánh xe + 2 bộ đĩa trục
Phương thức điều khiển hãm		Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu mô phỏng	Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu mô phỏng	Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu mô phỏng	Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu mô phỏng	Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu số học hãm	Chỉ lệnh trực thông điện khí kiểu số học

Bảng 2. Tham số kỹ thuật cơ bản của đoàn tàu tốc độ cao của Trung Quốc [3, 5]

Đoàn tàu	CRH2C	CRH3C	CRH5A	CRH380	
				CRH380AL	CRH380D
Năm khai thác	2008	2008	2007	2011	2014
Tốc độ vận doanh cao nhất, km/h	350	350	250	380	380
Móc nối	6M2T	4M4T	5M3T	14M2T	4M4T
Gia tốc khởi động, km/h/s	1,46	1,54	1,8	1,74	1,44
Thiết bị hãm	Tái sinh + hãm đĩa	Tái sinh + hãm đĩa	Tái sinh + hãm đĩa	Tái sinh + hãm đĩa	Tái sinh + hãm đĩa

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Từ Bảng 1 và 2 cho thấy, các đoàn tàu của tốc độ cao trên thế giới đều sử dụng kết hợp hãm tái sinh và hãm đĩa làm thiết bị hãm chính và sử dụng hãm dòng xoáy – chủ yếu dùng khi hãm khẩn cấp (đoàn tàu của Đức và Nhật Bản) ở các toa xe kéo theo nhằm nâng cao khả năng hãm của đoàn tàu. Việc sử dụng thiết bị hãm dòng xoáy sẽ ảnh hưởng đến tính năng động lực cũng như giá thành đầu tư thiết kế của đoàn tàu.

3. PHÂN TÍCH PHƯƠNG THỨC TỔNG HỢP CỦA LỰC HÃM TRÊN ĐOÀN TÀU EMU TỐC ĐỘ CAO

Phân bố lực hãm ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn vận hành đoàn tàu. Để đạt được sự cân bằng giữa tốc độ phản ứng và hiệu quả hãm, lực hãm điện – khí nén thường được phân bổ cho các toa xe trong nhóm theo mô-đun. Độ lớn của lực hãm bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như hệ số ma sát, diện tích tiếp xúc, tốc độ tương đối và nhiệt độ. Ở mỗi giai đoạn vận hành của đoàn tàu, mối quan hệ giữa tốc độ vận hành và lực hãm là phi tuyến tính. Do cơ chế kết hợp của hãm phối hợp tương đối phức tạp nên nếu hãm phối hợp được thực hiện hoàn toàn theo điều kiện thực tế của từng đoàn tàu thì khối lượng tính toán của hệ thống điều khiển hãm sẽ rất lớn, điều này sẽ ảnh hưởng nghiêm trọng đến tốc độ phản ứng của hệ thống hãm đoàn tàu.

Hiện nay, các đoàn tàu EMU đều áp dụng phương pháp hãm phối hợp giữa hãm khí nén và hãm điện với tiêu chí ưu tiên hãm điện đầu tiên. Việc sử dụng phối hợp hãm điện và hãm khí nén có thể nâng cao hiệu quả sử dụng hãm điện, giảm hao mòn cơ học của thiết bị hãm cơ bản và giảm chi phí vận hành.

Việc thực hiện kết hợp hãm điện và hãm khí nén trên một toa xe gọi là tổ hợp lực hãm phương tiện đơn; việc thực hiện kết hợp hãm điện và hãm khí nén trong một mô-đun gồm nhiều xe trong toàn đoàn tàu gọi là đơn nguyên hãm phối hợp điện – không (khí nén) [3], [4], [6].

3.1. Nguyên lý phân bổ lực hãm phối hợp điện – khí nén

Chúng ta đã biết, toa xe động có thể có khả năng cung cấp cả hãm điện và hãm khí nén, còn toa xe kéo theo thường chỉ có khả năng cung cấp hãm khí nén. Do đó, tổng lực hãm trong quá trình hãm tàu thỏa mãn mối quan hệ sau:

$$F_U = F_t + F_m = F_E + F_{tA} + F_{mA}$$

Trong đó:

• F_U - Tổng lực hãm đạt được khi hãm đoàn tàu;

• F_E - Lực hãm điện do tất cả toa động cung cấp;

• F_t và F_m - Lực hãm yêu cầu của toa xe kéo theo và toa xe động lực;

• F_{tA} (N), F_{mA} (N) - Lực hãm khí nén được cung cấp bởi tất cả các toa xe kéo theo và toa xe động lực tương ứng.

(1) Khi $F_E \geq F_U$, tức là lực hãm điện có thể thỏa mãn lực hãm yêu cầu của đoàn tàu, thì cả toa xe kéo theo và toa xe động lực đều không cần dùng hãm khí nén ($F_{tA} = 0$ và $F_{mA} = 0$), toàn bộ lực hãm mà đoàn tàu yêu cầu đều do hãm điện đảm nhiệm.

(2) Khi $F_U > F_E$, khi hãm điện không đủ đáp ứng toàn bộ lực hãm yêu cầu của đoàn tàu thì sẽ xảy ra các trường hợp sau:

*Trường hợp 1:

Khi $F_E \geq F_m$, $F_{mA} = 0$, $F_{tA} = F_U - F_E$.

Khi lực hãm điện không đáp ứng được lực hãm mà đoàn tàu yêu cầu thì lực hãm còn lại sẽ được bổ sung bằng hãm khí nén. Để ngăn bánh xe bị trượt, nếu lực hãm không đủ đầu tiên sẽ bổ sung tác dụng của hãm khí nén toa xe kéo theo trước tiên.

*Trường hợp 2:

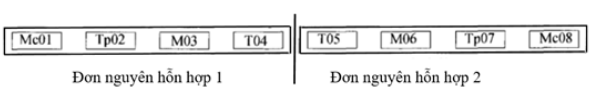
Khi $F_E < F_m$, $F_{mA} = F_m - F_E$, $F_{tA} = F_U - F_m$.

Nếu lực hãm vẫn không đủ thì sẽ bổ sung tác dụng của hãm khí nén toa xe động lực.

Tuy nhiên, khi hãm ở tốc độ thấp, đoàn tàu không thể cung cấp lực hãm điện ổn định, hãm khí nén bị ảnh hưởng bởi thời gian phản ứng và không thể tạo lượng giảm tốc nhanh lực hãm điện. Nếu không tránh được tình trạng này, bộ chuyển đổi hãm điện – khí nén được đặt ở phần hãm tốc độ thấp và BCU sẽ điều khiển hãm điện rút từ từ để có thể bổ sung lực hãm khí nén kịp thời nhằm giảm dao động gây ra bởi độ trễ của lực hãm khí nén.

3.2. Giới thiệu giải pháp tổng hợp lực hãm

Việc lựa chọn phương pháp tổ hợp hãm chủ yếu liên quan đến chế độ điều khiển và yêu cầu vận hành của đoàn tàu. Đối với đoàn tàu tốc độ cao sử dụng phương pháp tổ hợp lực hãm theo mô-đun, lấy đoàn tàu EMU gồm 8 toa với 4 toa động và 4 toa kéo theo làm ví dụ. Đoàn tàu sẽ được tách thành 2 mô-đun, mỗi mô-đun gồm 2 toa động và 2 toa kéo theo để tạo tổ hợp lực hãm (xem hình 1).



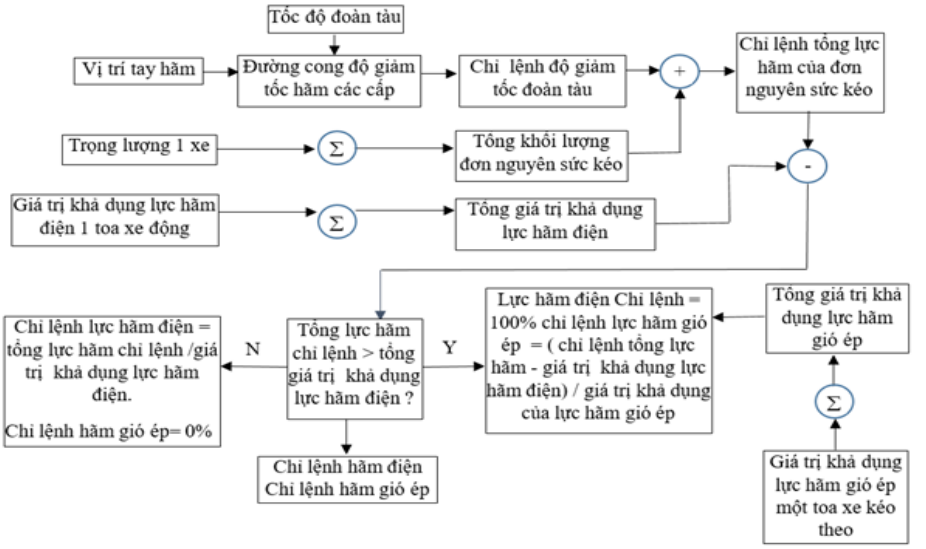
Hình 1. Sơ đồ hãm hỗn hợp điện – khí nén của mô-đun 2 xe động + 2 xe kéo theo Mc – Xe động có buồng tài xế; Tp – Xe kéo theo có cần lấy điện; M – Xe động không có cần lấy điện; T – Xe kéo theo.

* Phương pháp tổng hợp lực hãm được thực hiện như sau:

(1) Logic điều khiển tổng hợp lực hãm.

Hãm hỗn hợp điện – khí nén cũng được áp dụng theo mô-đun. Khi hãm hỗn hợp được thực hiện theo cách này, hai đơn vị lực kéo độc lập với nhau có thể được truyền bằng MVB (Multifunction Vehicle Bus – Mạng truyền thông tin trên toa xe) hoặc dây cứng. Mỗi BCU (Brake Control Unit – Bộ điều khiển hãm) có thể đọc vị trí tay hãm thông qua dây cứng của đoàn tàu và có thể đọc các tín hiệu phân bổ lực hãm liên quan thông qua MVB. Dựa trên chỉ lệnh hãm và thông tin hãm tổng hợp từ các toa xe khác nhau, mỗi BCU tính toán và áp dụng hãm điện – khí nén cho toa xe của mình.

Tức là việc phân bổ lực hãm chỉ được thực hiện trong đơn nguyên 2 toa động và 2 toa kéo theo. Khi đoàn tàu hãm bình thường, lực hãm điện của đoàn tàu được ưu tiên trong mô-đun, phần không đủ sẽ được bổ sung bằng hãm khí nén theo nguyên lý "độ bám bằng nhau" hoặc "độ mòn bằng nhau" của hãm khí nén. Hãm khí nén của toa xe kéo theo có thể được bổ sung trước hoặc hãm khí nén của toa động và toa kéo theo có thể được áp dụng đồng thời. Khi một toa xe trong mô-đun không thể thực hiện hãm thì thông qua tính toán hãm có thể xác định xem có nên bổ sung lực hãm từ 3 toa xe còn lại. Do đó cải thiện tính khả dụng của hệ thống hãm khi hãm thông thường so với việc hãm cả đoàn tàu, nó làm giảm độ phức tạp của giao thức mạng và giảm số lượng kết nối có dây cứng. Logic tính toán cụ thể của nó được thể hiện trong hình 2:



Hình 2. Logic điều khiển tổng hợp lực hãm mô-đun 2 toa động + 2 toa kéo theo

(2) Phân tích sơ đồ tổng hợp lực hãm.

Để giải thích chi tiết sự phân bố lực hãm khi hãm phối hợp, các sơ đồ phân bố khác nhau trong cùng điều kiện làm việc hỗn hợp được chọn để phân tích. Lấy sơ đồ hãm phối hợp 2 toa động và 2 toa kéo theo làm ví dụ và xét trong các điều kiện làm việc khác nhau:

a) Trường hợp 1: Tổ hợp lực hãm trong điều kiện làm việc bình thường.

Trong điều kiện bình thường (có tính đến trọng lượng xe) và không vượt quá giới hạn bám dính, lực hãm điện được phát huy tối đa tác dụng hãm. Nếu lực hãm điện không đáp ứng được yêu cầu hãm thì ưu tiên bổ sung thêm hãm khí nén từ toa xe kéo theo tùy theo trọng lượng xe và hạn chế về độ bám dính. Nếu lực hãm vẫn không đủ, trong trường hợp không vượt quá giới hạn bám dính, đoàn tàu sẽ bổ sung hãm khí nén từ các toa xe động.

b) Trường hợp 2: Lực hãm tổng hợp khi hãm điện bị hỏng.

Hãm hỗn hợp điện – khí nén được phối hợp theo thời gian thực theo lực hãm điện thực tế. Khi hãm điện của một đoàn tàu nào đó bị hỏng, lực hãm điện thực tế bằng 0 và hệ thống hãm khí nén vẫn có thể hoạt động bình thường và không bị ảnh hưởng về tổng lực hãm tàu. Khi tất cả các hệ thống hãm điện trong bộ phận hỗn hợp bị hỏng, mỗi toa xe sẽ được coi như một toa kéo theo và việc kết hợp chéo trong bộ phận sẽ được thực hiện tùy theo trọng lượng xe và các hạn chế về độ bám dính.

Khi hãm điện của toa xe điện trong mô-đun hỗn hợp không thành công, logic tổng hợp giống như trường hợp bình thường. Lực hãm điện tối đa được áp dụng lần đầu tiên và lực hãm còn lại được bổ sung cho mỗi xe tùy theo trọng lượng xe và giới hạn bám dính.

c) Trường hợp 3: Phối hợp lực hãm khi hãm khí nén bị hỏng.

Bình thường, nếu hệ thống hãm khí nén của một toa động lực bị hỏng, lực hãm điện vẫn có thể hoạt động bình thường, do đó không ảnh ☞

hưởng đến tổng lực hãm của đoàn tàu. Khi hệ thống hãm khí nén của toa kéo theo bị hỏng, trong mô-đun vẫn có thể thực hiện hãm phối hợp giữa điện và khí nén. Nếu lực hãm điện có thể đáp ứng nhu cầu lực hãm của mô-đun, thì sự cố hệ thống hãm khí nén của toa kéo theo sẽ không gây ảnh hưởng đến tổng lực hãm của đoàn tàu. Tuy nhiên, lực hãm của đoàn tàu có thể bị giảm nhỏ.

Hệ thống hãm cơ bản vẫn cần được kiểm chứng thông qua tính toán lực hãm, nhằm xác định có cần bổ sung lực hãm trong đơn vị hay phải cân nhắc chế độ vận hành giảm cấp. Trong phương án này, mặc định toa bị sự cố đã tạo ra lực hãm tương ứng, và ba toa còn lại trong cùng đơn vị sẽ thực hiện phối hợp hãm chéo để bù đắp. Mức lực hãm suy giảm này, sau khi được thẩm định và kiểm chứng, vẫn đáp ứng yêu cầu an toàn.

4. KẾT LUẬN

Bài viết này chủ yếu giới thiệu những đặc điểm cũng như các yêu cầu của hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao. Đặc điểm của hệ thống hãm đoàn tàu cần tương đồng với các đặc điểm kết cấu của đoàn tàu EMU hiện đại nhưng lợi dụng động lực phân tán, phân phối lực hãm khi thực hiện phối hợp hãm điện – khí nén , nghiên cứu nguyên lý phân phối hãm phối hợp điện – khí nén của trong các điều kiện làm việc khác nhau.... Với các đoàn tàu khác nhau, việc lựa chọn hợp lý các mô-đun phân bổ lực hãm có ý nghĩa cực kỳ quan trọng trong việc tận dụng tốt hiệu quả của hệ thống hãm cũng như giảm giá thành kinh tế. Ngoài ra, phương pháp phân bổ lực hãm cũng liên quan đến điều kiện đường, trọng lượng xe và các điều kiện khác nên khi thiết kế và lựa chọn hệ thống hãm phải căn cứ vào tình hình thực tế để lựa chọn.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong quá trình thực hiện đề tài mã số T2025-CK-008.❖

Ngày nhận bài: **23/9/2025**
Ngày phản biện: **06/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Vũ Thị Hoài Thu, Vũ Duy Lộc, Tào Văn Chiến, "*Hãm đoàn tàu*". NXB. Giao thông vận tải, 2024.
[2]. Nguyễn Chí Đạt, "*Đường sắt tốc độ cao và một số công nghệ đặc trưng*". Sở Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, 2022.
[3]. Li He Ping, "*Hệ thống hãm đoàn tàu tốc độ cao*". NXB. Đại học Giao thông Tây Nam (Trung Quốc), 2019.
[4]. Zhang Zhong Yang, "*Tính toán lực kéo tàu*". NXB. Đường sắt Trung Quốc, 2009.
[5]. Chang Zhong Bing, "*Thảo luận về đường sắt cao tốc*". NXB. Đường sắt Trung Quốc, 2013.
[6]. MJ Leigh, "*Đặc điểm và ứng dụng của hãm tổng hợp*", 2009.

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ DAO CHUỐT RÃNH XOẮN NÒNG PHÁO P-25HQ HẢI QUÂN

RESEARCH ON DESIGN OF BROACHING TOOL TO MACHINING SPIRAL GROOVE FOR P-25HQ NAVAL GUN BARREL

TS. **Nguyễn Quang Mạn**h, TS. **Nguyễn Dương Phụng**, ThS. **Nguyễn Đức Trọng**
Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu thiết kế dao chuốt rãnh xoắn nòng pháo P-25HQ của Hải quân. Gia công rãnh khương tuyến nòng pháo là một công nghệ đặc biệt trong gia công lỗ sâu. Nghiên cứu rãnh khương tuyến và các yêu cầu kỹ thuật đối với rãnh xoắn cho thấy độ chính xác gia công phụ thuộc rất nhiều vào phương pháp gia công, thiết bị gia công và dụng cụ gia công. Dao chuốt là một trong những dụng cụ quan trọng nhất để gia công rãnh khương tuyến. Trên cơ sở tính toán thiết kế, ứng dụng phần mềm Ansys để mô phỏng kiểm bền dao chuốt dùng để gia công rãnh xoắn nòng pháo P-25HQ. Kết quả nghiên cứu là căn cứ để lựa chọn các thông số công nghệ của bộ dao chuốt trong sản xuất.

Từ khóa: *Ansys; Chuốt rãnh xoắn; Dao chuốt.*

ABSTRACT

The article introduces the research results of designing the spiral groove broaching tool for P-25HQ gun barrel of the Navy. This is a special technologie of machining twist in long hole. The studies on twist and on technical requirements indicate that machining accuracy depends very much on manufactoring processing methods and machining tools. Broaching tool is one of the most important tools for machining spiral grooves. Based on the design calculation, Ansys software is applied to simulate the durability test of the broaching tool used to process the spiral groove of P-25HQ gun barrel. The research results are the basis for selecting the technological parameters of the broaching tool set in production.

Keywords: *Ansys; Broaching; Broaching tool.*

1. MỞ ĐẦU

Trong chế tạo các chi tiết của pháo thì vấn đề công nghệ và thiết bị chế tạo nòng pháo là cơ bản nhất, đặc biệt là phần rãnh xoắn nòng pháo. Rãnh xoắn nòng pháo là rãnh nằm trên bề mặt lòng nòng và chạy theo đường vít ở trên tất cả chiều dài phần dẫn hướng [1]. Công nghệ gia công tạo hình rãnh khương tuyến với bề mặt xoắn ốc trong lỗ sâu có chiều dài lớn là một trong những vấn đề rất khó khăn và phức tạp với rất nhiều đặc điểm riêng cùng sự khác biệt đáng kể so với công nghệ chế tạo các chi tiết máy thông thường. Một trong những phương pháp thường được sử dụng để gia công rãnh xoắn nòng pháo là phương pháp chuốt. Chuốt rãnh xoắn nòng pháo có nhiều đặc điểm giống với quá trình chuốt lỗ then hoa nhưng có góc xoắn nhỏ và gia công trong lỗ rất sâu [2]. Trong quá trình chuốt rãnh xoắn nòng pháo phải đảm bảo không được hỏng dao hay sửa bề rộng lưỡi cắt, bởi vì trong các trường hợp này đều dẫn đến kích thước sau chuốt nòng pháo không đạt yêu cầu. Do vậy việc tính toán kiểm bền dao chuốt trong quá trình làm việc là rất quan trọng, giảm việc hỏng phôi và dao trong quá trình gia công.

Để đảm bảo điều kiện làm việc của đầu cắt của dao theo chuẩn của các nhà sản xuất, việc áp dụng phần mềm Ansys trong mô phỏng tính toán kiểm bền đảm bảo độ tin cậy trong quá trình gia công là giải pháp hợp lý được nhóm nghiên cứu đề xuất.

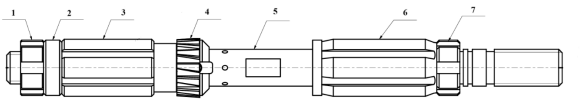
2. CƠ SỞ TÍNH TOÁN THIẾT KẾ

Vật liệu chế tạo nòng P-25HQ là thép hợp kim ОХН3МФА, ГОСТ 5192-78 (tương đương mác thép 38ХН3МФА, ГОСТ 4543-16). Yêu cầu độ cứng phôi thép trước khi chuốt là 34 ÷ 39 HRC.

Bảng 1. Một số thông số chính của rãnh xoắn nòng pháo P-25HQ.

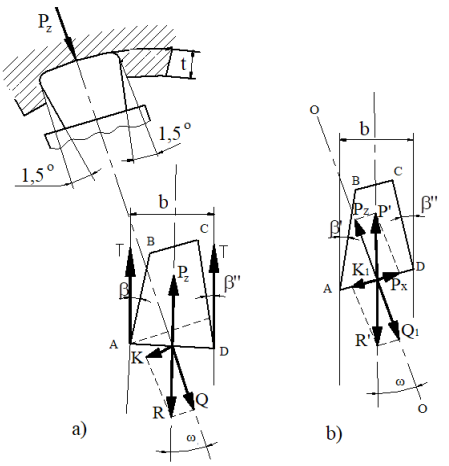
Đường kính dương tuyến d, mm	$\Phi 25^{+0,08}$
Đường kính âm tuyến, mm	$\Phi 25,6^{+0,08}$
Chiều dài l, mm	1775
Chiều dài bước xoắn, mm	625
Số rãnh xoắn	12 (hướng xoắn phải)
Góc xoắn	Không đổi, 7°9′32″
Chiều rộng rãnh xoắn, mm	4±0,3

Qua nghiên cứu biên dạng rãnh xoắn nòng pháo P-25HQ và phân tích ưu nhược điểm của các loại đầu cắt và khả năng công nghệ trong nước [4], chọn phương pháp cắt theo sơ đồ kéo với đầu dụng cụ dạng lưỡi đơn, cho phép thay dao trong quá trình cắt, phương pháp này dễ thoát phoi, bôi trơn; đảm bảo yêu cầu kỹ thuật rãnh xoắn nòng pháo, phù hợp với máy cải tạo và trình độ công nghệ nước ta.



Hình 1. Kết cấu bộ dao chuốt nòng pháo P-25HQ: 1, 7 - Đai ốc chặn; 2 - Vòng đệm; 3 - Dẫn hướng sau; 4 - Dao chuốt; 5 - Thân dao; 6 - Dẫn hướng trước

Để nghiên cứu bản chất của nguyên công cắt rãnh xoắn xem xét lực tác dụng lên đầu dao khi cắt rãnh xoắn được mô tả trên hình 2.



Hình 2. Sơ đồ lực cắt khi cắt rãnh xoắn: a - Trường hợp lưỡi cắt của dao vuông góc với phương của rãnh xoắn; b - Trường hợp lưỡi cắt của dao vuông góc với phương chuyển động tịnh tiến của dụng cụ

Lực tác dụng lên dao R và R′ tính theo công thức [5]:

$$R = \sqrt{Q^2 + K^2}\ ;\ R' = \sqrt{Q_1^2 + K_1^2} \qquad (1)$$

Trong đó: Q - Lực kéo của máy; K - Lực tiếp tuyến với phương chuyển động của dao, phát sinh do phôi quay cưỡng bức với dao. Các lực này được tính theo công thức:

$$Q = P_z.\cos\omega \text{ và } K = P_z.\sin\omega \qquad (2)$$

Với P_z là lực cắt dọc đặt vào lưỡi dao, có hướng pháp tuyến với lưỡi cắt của dao (dọc theo hướng chuyển động của dao) được tính gần đúng theo công thức sau:

$$P_Z = pf \ \text{(N)} \qquad (3)$$

Trong đó: p - Là lực cắt đơn vị, đối với thép làm nòng pháo thì p = 3200 N/mm²; f - Diện tích mặt cắt của lớp cắt (mm²).

Tổng diện tích mặt cắt F của toàn bộ lớp cắt với đầu dao có n lưỡi cắt sau một lần cắt là:

$$F = \sum_{i=1}^{n} f_i = abn \ (\text{mm}^2) \qquad (4)$$

Trong đó: a – Chiều dày lớp cắt (mm); b – Chiều rộng lớp cắt (mm); n – Số dao của đầu cắt.

Lực tác dụng lên dao theo phương hướng kính P_Y (N). Lực này không cần xét đến vì đầu dao có 12 dao cắt đối xứng. Có thể tính theo công thức gần đúng sau:

$$P_Y = 0{,}3P_Z \qquad (5)$$

Nếu lưỡi cắt của dao không vuông góc với phương của rãnh xoắn, mà vuông góc với phương chuyển động tịnh tiến của đầu dụng cụ, thì lực sẽ phân bố như hình 3b. Khi đó, lực pháp tuyến P_Z cần tăng hơn để cân bằng với thành phần lực xoắn và kéo R′. Hợp lực P_Z và P_X là P′ cân bằng với lực kéo R′. P_X xác định theo công thức:

$$P_X = P_Z tg\omega \qquad (6)$$

Thành phần lực P_X sẽ gây ra sai lệch dao do độ lớn của nó thay đổi nên làm cho dao bị dao động, điều này đã được chứng minh trong thực tế sản xuất. Nguyên nhân gây ra ở đây chính là do thiết kế dao và mài dao không chính xác.

Trường hợp lưỡi cắt của dao vuông góc với phương rãnh xoắn:

P_z = 0,01*4*12*3200 = 1536 (N)

Lực kéo cần thiết là:

Q = 1536*cos7°9′32″ = 1524 (N);
K = 1536*sin7°9′32″ = 191,4 (N)

Khi đó, ta có: R = $\sqrt{1524^2 + 191{,}4^2}$ = 1535 (N) ☞

Trường hợp lưỡi cắt không vuông góc với hướng xoắn, ta có:

$$P' = \sqrt{P_z^{\,2} + P_x^{\,2}}$$

$P_x = 1536*\tan^2(7°9'32'') = 193$ (N)

$$P' = \sqrt{P_z^{\,2} + P_x^{\,2}} = \sqrt{1536^2 + 193^2} = 1548 \text{ (N)}$$

Khi đó, ta có: $R' = P' = 1548$ (N).

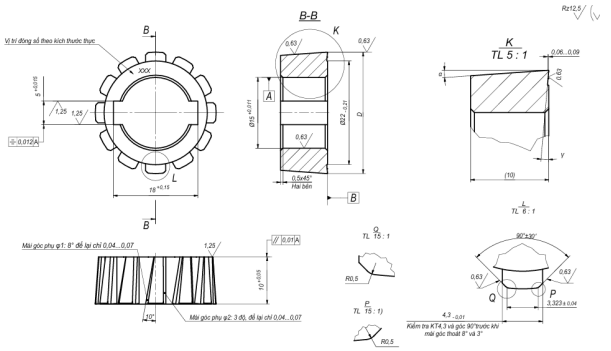
Như vậy, qua phân tích lực như trên, ta nhận thấy rằng trường hợp lưỡi cắt vuông góc với hướng xoắn của rãnh xoắn thì lực kéo nhỏ hơn nhưng không đáng kể. Tuy lưỡi cắt của dao khi gia công vuông góc với hướng xoắn có lợi về lực hơn nhưng quá trình gia công sẽ khó khăn, dễ dẫn đến sai số nên chọn phương án thiết kế lưỡi cắt vuông góc với trục dao.

Trên cơ sở phân tích và tham khảo các thông số công nghệ gia công tương tự, công nghệ chế tạo dao [4], ta có thể kết luận và chọn các thông số hình học của lưỡi cắt: Góc thoát sau α lấy bằng 5°; Để tăng độ bền lâu của dao và nhám bề mặt gia công, góc cắt trước γ = 5°; Do lượng dư nhỏ nên đỉnh lưỡi cắt để sắc nếu không sẽ gây trượt.

Bảng 2. Thông số các dao chuốt.

TT	Tên gọi	Đường kính D	Góc sau α (°)	Góc trước γ (°)
1	Dao chuốt số 1	Ø25,14$_{-0,009}$	5	4
2	Dao chuốt số 2	Ø25,16$_{-0,009}$	5	4
3	Dao chuốt số 3	Ø25,18$_{-0,009}$	5	4
4	Dao chuốt số 4	Ø25,20$_{-0,009}$	5	4
5	Dao chuốt số 5	Ø25,22$_{-0,009}$	5	4
6	Dao chuốt số 6	Ø25,24$_{-0,009}$	5	4
7	Dao chuốt số 7	Ø25,26$_{-0,009}$	5	4
8	Dao chuốt số 8	Ø25,28$_{-0,009}$	5	4
9	Dao chuốt số 9	Ø25,30$_{-0,009}$	5	4
10	Dao chuốt số 10	Ø25,32$_{-0,009}$	5	4
11	Dao chuốt số 11	Ø25,34$_{-0,009}$	5	4
12	Dao chuốt số 12	Ø25,36$_{-0,009}$	5	4
13	Dao chuốt số 13	Ø25,38$_{-0,009}$	5	4
14	Dao chuốt số 14	Ø25,40$_{-0,009}$	5	4
15	Dao chuốt số 15	Ø25,42$_{-0,009}$	5	4
16	Dao chuốt số 16	Ø25,44$_{-0,009}$	5	4
17	Dao chuốt số 17	Ø25,46$_{-0,009}$	5	4
18	Dao chuốt số 18	Ø25,48$_{-0,009}$	5	4
19	Dao chuốt số 19	Ø25,50$_{-0,009}$	5	4
20	Dao chuốt số 20	Ø25,52$_{-0,009}$	5	4
21	Dao chuốt số 21	Ø25,54$_{-0,009}$	5	4
22	Dao chuốt số 22	Ø25,56$_{-0,009}$	5	4
23	Dao chuốt số 23	Ø25,58$_{-0,009}$	5	4

24	Dao chuốt số 24	Ø25,60-0,009	5	4
25	Dao chuốt số 25	Ø25,62-0,009	5	4
26	Dao chuốt số 26	Ø25,64-0,009	5	4
27	Dao chuốt số 27	Ø25,66-0,009	5	4
28	Dao chuốt số 28	Ø25,68-0,009	5	4
29	Dao chuốt số 29	Ø25,695-0,009	5	4
30	Dao chuốt số 30	Ø25,710-0,009	5	4
31	Dao chuốt số 31	Ø25,725-0,009	5	4
32	Dao chuốt số 32	Ø25,740-0,009	5	4
33	Dao chuốt số 33	Ø25,755-0,009	5	4
34	Dao chuốt số 34	Ø25,770-0,009	5	4



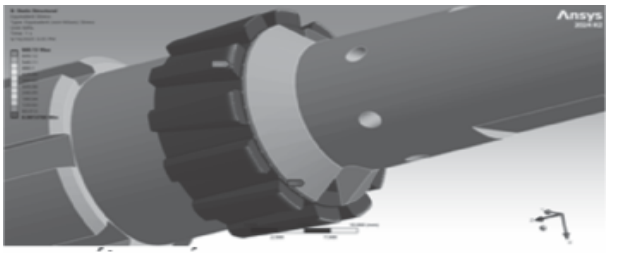
Hình 3. Thiết kế dao chuốt nòng pháo P-25HQ

Để chuốt hoàn thiện rãnh xoắn nòng pháo P-25HQ đạt kích thước trước mạ crom (chiều dày lớp mạ 0,06 ÷ 0,09mm), theo tính toán ở trên cần 34 con dao chuốt. Thông số của các dao được trình bày trong bảng 2. Tác giả lựa chọn dao chuốt số 1 để tính toán kiểm bền.

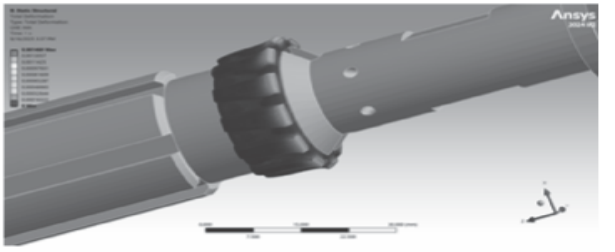
3. ỨNG DỤNG PHẦN MỀM ANSYS TÍNH TOÁN KIỂM BỀN DAO CHUỐT

Thông số đầu vào khai báo để tính toán ngoài các thông số lực, điều kiện biên như tính toán ở trên còn chọn vật liệu chế tạo dao chuốt là thép gió P18, đây là loại thép gió có độ cứng và độ dai va đập cao, chịu mài mòn tốt. Độ cứng phần đầu cắt của dao khoảng 63 ÷ 68 HRC, chiều sâu mỗi lần cắt 0,01mm.

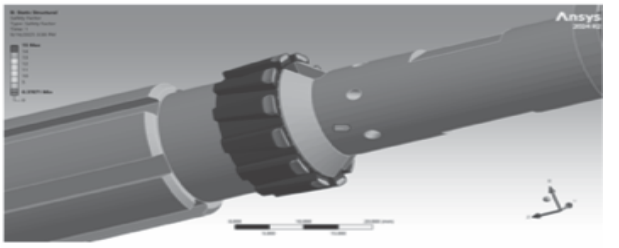
Kết quả phân tích ứng suất tương đương, chuyển vị và hệ số an toàn cho lần lượt trên các hình 4 ÷ 6. Các giá trị tương ứng theo màu và vị trí trên dao.



Hình 4. Ứng suất tương đương (Von Mises Stress)



Hình 5. Kết quả tính chuyển vị

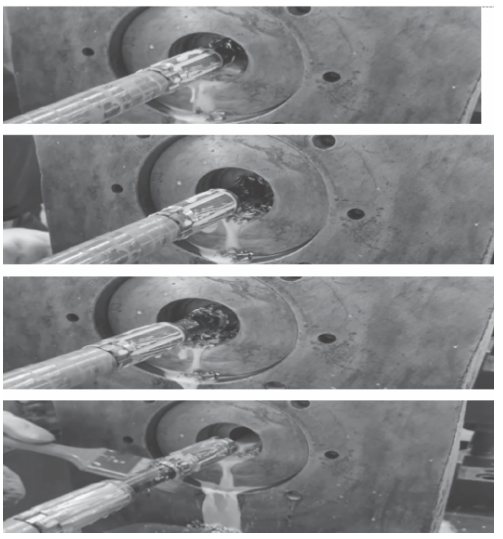


Hình 6. Kết quả tính hệ số an toàn

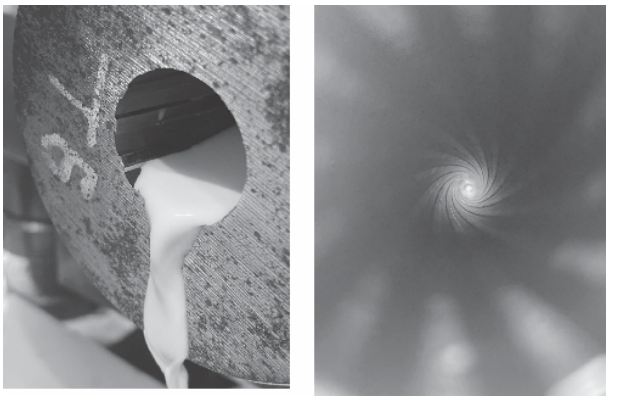
Từ kết quả tính toán kiểm nghiệm có thể thấy: Các giá trị ứng suất, chuyển vị, hệ số an toàn hoàn toàn nằm trong giới hạn cho phép của vật liệu chế tạo dao. Vùng có giá trị lớn nhất nằm ở phần lưỡi cắt, đây là vùng chịu các tải trọng trong quá trình cắt.

4. MỘT SỐ HÌNH ẢNH QUÁ TRÌNH CHẾ TẠO RÃNH XOẮN

Dựa trên kết quả nghiên cứu tính toán thiết kế đầu dao chuốt, đã chế tạo thành công rãnh xoắn trên nòng pháo P-25HQ.



Hình 7. Ảnh minh họa quá trình chuốt rãnh xoắn nòng pháo P-25HQ



Hình 8. Ảnh bề mặt rãnh xoắn bên trong nòng pháo P-25 HQ sau khi chuốt

5. KẾT LUẬN

- Bài báo đã trình bày nội dung tính toán thiết kế dao chuốt nòng pháo P-25HQ của Hải quân. Trên cơ sở phân tích lực cắt và tham khảo các thông số công nghệ gia công tương tự, công nghệ chế tạo dao chuốt, tác giả đã xác định được thông số hình học của lưỡi dao cắt và số lượng dao dùng để chuốt là 34. Sau đó, tác giả đã ứng dụng phần mềm Ansys để kiểm bền dao chuốt, xác định được các giá trị ứng suất min – max và chuyển vị xuất hiện trong quá trình gia công rãnh xoắn nòng P-25HQ.

- Kết quả đã đưa vào sản xuất thử thành công tại Viện Công nghệ, là tiền đề cho việc làm chủ công nghệ chế tạo trong nước, thay thế hàng nhập khẩu.❖

Ngày nhận bài: **01/10/2025**
Ngày phản biện: **10/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Khổng Đình Tuy, "*Nguyên lý kết cấu vũ khí có nòng*". Học viện Kỹ thuật quân sự (2003).
[2]. "*Sổ tay thiết kế cơ khí*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật (1979).
[3]. "*Giáo trình thiết kế dụng cụ công nghiệp*". NXB. Khoa học Kỹ thuật (2005).
[4]. "*Giáo trình chế độ cắt gia công cơ khí*". NXB. Đà Nẵng (2002).
[5]. Đoàn Ngọc Sơn, "*Báo cáo tổng hợp đề tài "Nghiên cứu thiết kế, công nghệ chế tạo nòng pháo 105mm kiểu M2A2"*". Đề tài cấp Nhà nước do Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng chủ trì (2024).

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO MÔ HÌNH MÁY THỬ ĐỘ BỀN CHO CHI TIẾT NHỰA

RESEARCH ON THE FABRICATION OF A STRENGTH TESTING MACHINE MODEL FOR PLASTIC COMPONENTS

Tưởng Phước Thọ, Phạm Thế Sơn, Nguyễn Phương Nam, Lê Hồng Phúc, Huỳnh Đỗ Song Toàn*

Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: thotp@hcmute.edu.vn;
19144186@student.hcmute.edu.vn;
19144158@ student.hcmute.edu.vn;
19144175@student.hcmute.edu.vn;
**toanhds@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày quá trình thiết kế, chế tạo và thử nghiệm mô hình máy thử độ bền xoắn dành cho các chi tiết nhựa được in 3D. Mục tiêu của đề tài là xây dựng một thiết bị thử nghiệm có khả năng đo mô-men xoắn và góc xoay của mẫu vật nhằm đánh giá khả năng chịu xoắn của vật liệu nhựa trong các điều kiện in khác nhau. Mô hình được thiết kế theo tiêu chuẩn ASTM D1043, bao gồm các cụm cơ cấu như hệ truyền động, bộ đo mô-men xoắn, bộ đo góc xoắn (encoder), khung giữ mẫu và hệ truyền đai – giảm tốc. Mẫu thử bằng vật liệu PLA-F được in với các thông số công nghệ khác nhau về nhiệt độ, góc in, mật độ và chiều dày lớp. Kết quả thực nghiệm cho thấy mô-men xoắn cực đại dao động từ 4,2 đến 15,7 N·m, trong đó các mẫu có mật độ in 100% và chiều dày lớp 0,1 mm đạt giá trị bền xoắn cao nhất. Mật độ in và chiều dày lớp là hai yếu tố ảnh hưởng rõ rệt đến độ bền xoắn của mẫu, trong khi góc in và nhiệt độ in có tác động thứ yếu. Kết quả này chứng minh mô hình máy thử có khả năng hoạt động ổn định, đo đạc chính xác và có thể ứng dụng trong nghiên cứu, giảng dạy cũng như đánh giá cơ tính vật liệu nhựa.

Từ khóa: *Máy thử độ bền xoắn; Chi tiết nhựa; In 3D; Mô-men xoắn; Tiêu chuẩn ASTM D1043; Vật liệu PLA-F.*

ABSTRACT

This study presents the design, fabrication, and testing of a torsional strength testing machine for 3D-printed plastic specimens. The objective is to develop an experimental setup capable of measuring torque and angular displacement to evaluate the torsional resistance of polymer components under various printing parameters. The testing device was designed in accordance with ASTM D1043, consisting of a drive mechanism, torque sensor, encoder, clamping frame, and belt–reduction transmission system. PLA-F samples were fabricated using different printing conditions ☞

including temperature, infill angle, density, and layer thickness. Experimental results show that the maximum torque ranged from 4.2 to 15.7 N·m, with the highest torsional strength obtained from samples printed at 220 °C, 100% infill density, and 0.1 mm layer thickness. The infill density and layer thickness exhibited the most significant influence on torsional performance, while the printing temperature and infill angle had lesser effects. The developed testing model demonstrates reliable performance and accuracy, providing a useful platform for mechanical characterization of polymer materials in research and education.

Keywords: *Torsional strength tester; Plastic component; 3D printing; Torque measurement; ASTM D1043; PLA-F material.*

1. TỔNG QUAN

Trong lĩnh vực cơ khí và vật liệu, việc đánh giá độ bền cơ học của chi tiết nhựa đóng vai trò quan trọng nhằm đảm bảo tính an toàn, độ tin cậy và tuổi thọ của sản phẩm trong quá trình sử dụng. Các chi tiết nhựa được ứng dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp như điện – điện tử, ô tô, y sinh và hàng tiêu dùng, nhờ vào đặc tính nhẹ, dễ gia công và chi phí thấp. Tuy nhiên, đặc tính cơ học của vật liệu nhựa lại phụ thuộc mạnh vào thành phần polymer, điều kiện gia công và môi trường làm việc, do đó việc xác định chính xác khả năng chịu tải, chịu uốn hoặc chịu xoắn là hết sức cần thiết [1-3].

Các nghiên cứu trong y học, đặc biệt là về vít xương trong phẫu thuật chỉnh hình, đã chỉ ra rằng độ bền và độ tin cậy của mối ghép chịu tải phụ thuộc trực tiếp vào mức mô-men siết và lực nén tại vị trí lắp ghép. Nếu mô-men siết quá lớn, ren có thể bị tuột hoặc biến dạng, làm giảm khả năng chịu tải [6]; ngược lại, nếu siết quá nhỏ, liên kết dễ bị lỏng khi chịu tải lặp hoặc rung động [8]. Áp lực cơ học quá lớn cũng có thể ảnh hưởng đến khả năng sống của tế bào tạo xương (osteoblast) [7], trong khi việc siết không đủ chặt có thể dẫn đến tổn thương mô xung quanh hoặc thậm chí gây biến chứng phải phẫu thuật lại [9]. Những kết quả này cho thấy tầm quan trọng của việc kiểm soát lực và mô-men trong quá trình lắp ghép và kiểm tra độ bền, qua đó có thể suy rộng sang các ứng dụng trong thiết kế thiết bị thử nghiệm độ bền cho chi tiết nhựa, nơi yêu cầu độ chính xác cao về tải trọng và mô-men tác dụng.

Trong thực tế, nhiều thí nghiệm kiểm tra độ bền cơ học của vật liệu nhựa vẫn được thực hiện bằng các thiết bị nhập khẩu có chi phí cao hoặc các mô hình tự chế có độ chính xác và độ lặp lại chưa cao. Điều này đặt ra nhu cầu cần thiết phải nghiên cứu, thiết kế và chế tạo mô hình máy thử độ bền chuyên dụng cho các loại chi tiết nhựa khác nhau như mẫu kéo, mẫu uốn hoặc mẫu xoắn, nhằm phục vụ công tác giảng dạy, nghiên cứu khoa học và kiểm nghiệm vật liệu tại các cơ sở đào tạo kỹ thuật.

Bên cạnh đó, sự phát triển của các công nghệ đo lường, cảm biến và trí tuệ nhân tạo (AI) đang mở ra hướng tiếp cận mới trong việc tự động hóa và định lượng quá trình thử nghiệm cơ học. Các cảm biến mô-men, cảm biến biến dạng hoặc cảm biến lực có thể được tích hợp vào mô hình máy thử để ghi nhận dữ liệu chính xác, đồng thời áp dụng các mô hình tính toán và phân tích dữ liệu nhằm đánh giá đặc tính vật liệu một cách khách quan hơn [12]. Xu hướng này phù hợp với định hướng phát triển các mô hình thí nghiệm thông minh, có khả năng đo

đạc, xử lý và đánh giá dữ liệu tự động, góp phần nâng cao chất lượng nghiên cứu và đào tạo trong lĩnh vực cơ khí – vật liệu.

Từ những cơ sở lý thuyết và thực tiễn nêu trên, đề tài "Nghiên cứu chế tạo mô hình máy thử độ bền cho chi tiết nhựa" được thực hiện nhằm phát triển một hệ thống thử nghiệm có khả năng đo, điều khiển và đánh giá lực – mô-men tác dụng một cách định lượng và chính xác, qua đó hỗ trợ công tác nghiên cứu cơ học vật liệu và kiểm định chất lượng sản phẩm nhựa trong thực tế sản xuất.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Quy trình thử nghiệm theo tiêu chuẩn D 1043

Tiêu chuẩn thử độ bền xoắn D 1043 xác định quy trình thử nghiệm chi tiết để đo lường độ bền xoắn của các mẫu vật liệu nhựa. Quy trình thử nghiệm này bao gồm các bước sau:

• Bước 1 – Chuẩn bị mẫu thử: Đầu tiên, các mẫu vật liệu nhựa được chuẩn bị theo quy định của tiêu chuẩn. Mẫu thử có thể có dạng thanh, tấm, hoặc đĩa tùy thuộc vào yêu cầu cụ thể của vật liệu.

• Bước 2 – Xác định điều kiện thử nghiệm: Trước khi thực hiện thử nghiệm, cần xác định các thông số quan trọng như tốc độ xoắn, góc xoắn, và nhiệt độ môi trường. Điều này đảm bảo rằng các thử nghiệm được tiến hành trong điều kiện đồng nhất và có thể so sánh kết quả.

• Bước 3 – Sử dụng thiết bị thử nghiệm: Tiếp theo, mẫu vật liệu được gắn vào thiết bị thử nghiệm xoắn theo quy định của tiêu chuẩn. Thiết bị thử nghiệm bao gồm một bộ trục xoắn và một bộ đo lường xoắn.

• Bước 4 – Áp dụng lực xoắn: Lực xoắn được áp dụng lên mẫu vật liệu thông qua thiết bị thử nghiệm. Lực này tạo ra một xoắn trong mẫu và đo lường được độ phân giải của xoắn.

• Bước 5 – Ghi nhận và đo lường xoắn: Trong suốt quá trình áp dụng lực xoắn, mô-đun được sử dụng để ghi nhận và đo lường dữ liệu xoắn. Điều này giúp xác định độ bền xoắn của mẫu vật liệu.

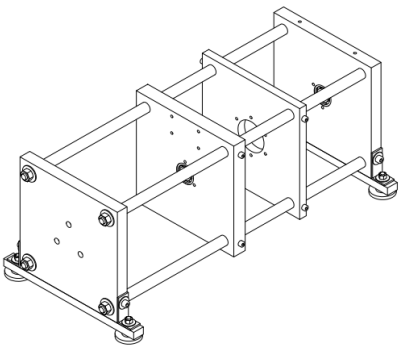
• Bước 6 – Xác định kết quả: Sau khi hoàn thành quá trình thử nghiệm, dữ liệu xoắn được xử lý và phân tích để xác định độ bền xoắn của mẫu vật liệu. Các phương pháp phân tích có thể bao gồm tính toán giá trị trung bình, độ lệch chuẩn, và so sánh với các giá trị tham chiếu hoặc tiêu chuẩn.

2.2. Nguyên lý hoạt động của máy

Ban đầu bật công tắc nguồn điện được cấp cho mô tơ giúp mô tơ quay và tạo ra mô-men xoắn. Mô-men này được truyền lên trục gắn với vô lăng thông qua bộ truyền đai răng tỉ số truyền 1:2. Trục này được làm bằng thép có khả năng chịu tải cao để chịu được mô-men xoắn từ lực quay vô lăng.

Trục vô lăng nối tiếp với trục đầu vào của hộp giảm tốc thông qua một khớp nối cứng. Khớp nối này giúp truyền động từ trục vô lăng sang hộp giảm tốc một cách liên tục và chính xác. Hộp giảm tốc được sử dụng để giảm tốc độ quay và tăng mô-men xoắn trên trục ra.

Trục ra của hộp giảm tốc kết nối với mâm cặp bằng một khớp nối cứng. Khớp nối cứng đảm bảo truyền động xoắn một cách chính xác. ☞



Hình 1. Khung máy

Trên trục gắn với mâm cặp, có một cặp bánh đai răng tỉ số truyền 1:1 được gắn để truyền chuyển động quay từ trục gắn mâm cặp tới encoder. Bộ truyền đai răng giúp đồng bộ hóa chuyển động để cung cấp góc xoắn cho enconder. Encoder được sử dụng để thu thập góc xoắn của mẫu thử, cho phép quan sát và ghi lại dữ liệu xoắn thông qua một màn hình nhỏ.

Mâm cặp 1 được kết nối với mẫu thử xoắn thông qua một chi tiết trung gian để liên kết mâm cặp và mẫu với nhau. Khác với mâm cặp 1, mâm cặp 2 của mô hình này được cố định và không thể quay.

Adapter được sử dụng để đo mô-men xoắn của mẫu thử. Nó được gắn vào mâm cặp được cố định thông qua chi tiết trung gian được thiết kế phù hợp với đầu vào và đầu ra của cảm biến. Adapter thu nhận mô-men xoắn từ mẫu thử cho phép quan sát và ghi lại dữ liệu mô-men xoắn.

Khi mô tơ quay, quá trình truyền mô-men xoắn qua các chi tiết trong mô hình giúp tạo ra mô-men xoắn trong mẫu thử, đồng thời đo được góc xoắn thông qua encoder và mô-men xoắn thông qua adapter. Quá trình này cho phép kiểm tra độ bền xoắn và thu thập dữ liệu để phân tích và đánh giá tính chất cơ học của mẫu thử.

2.3. Cấu tạo khung máy

Tấm 1 trong khung máy có nhiều tác dụng quan trọng. Đây là tấm giữ cho mâm cặp được cố định và ổn định trong quá trình hoạt động của máy thử xoắn. Tấm này có một rãnh tròn đặc biệt giúp cho việc định vị cho mâm cặp trở nên dễ dàng hơn (Hình 1).

Ngoài ra, trên tấm 1 còn có 3 lỗ bắt bulong được sử dụng để gắn mâm cặp chắc chắn vào tấm này. Điều này đảm bảo rằng mâm cặp sẽ được cố định vững chắc và không bị rung động trong quá trình hoạt động của máy thử xoắn.

Vị trí của tấm 1 trong khung máy cũng có vai trò trong việc giữ cho 4 thanh liên kết của khung máy ổn định. Tấm này đóng vai trò cố định, giúp giữ cho các bộ phận của máy thử xoắn không bị rung động quá nhiều trong quá trình hoạt động.

Bên dưới tấm 1, có thanh đỡ được sử dụng để kê mặt bên dưới. Thanh đỡ này đảm bảo sự ổn định và chống rung của khung máy, giúp máy thử xoắn hoạt động một cách ổn định và chính xác.

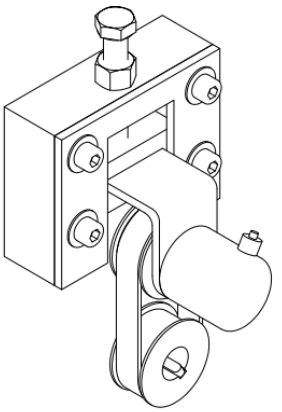
2.4. Bộ căng đai và bộ truyền đai

Chúng ta đã biết rằng bộ căng đai và bộ truyền đai đóng vai trò quan trọng trong việc truyền chuyển động quay từ trục gắn mâm cặp tới encoder để đo góc xoắn một cách chính xác.

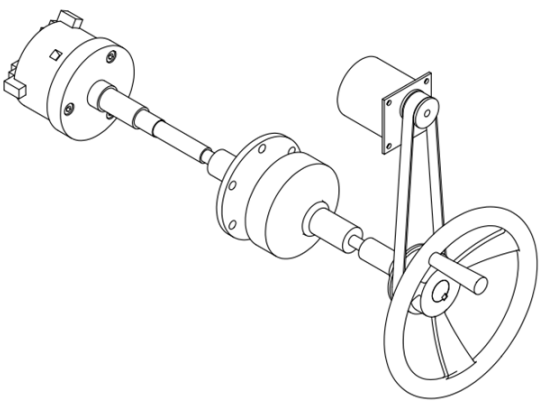
Bộ căng đai có vai trò căng đai, đảm bảo đai luôn trong trạng thái căng đúng đắn. Nhóm căng đai sử dụng một con ốc để căng. Khi vặn ốc, đai sẽ được căng đến độ căng phù hợp. Điều này rất quan trọng để đảm bảo đai không bị luồi hoặc trượt ra khi đang trải qua quá trình hoạt động của máy thử xoắn.

Bộ truyền đai, đặc biệt bộ truyền đai răng, đóng vai trò truyền chuyển động quay từ trục gắn mâm cặp tới encoder. Bằng cách kết nối đai răng với trục gắn mâm cặp và encoder, sự xoay của trục sẽ được truyền từ mâm cặp tới encoder. Điều này cho phép encoder đo góc xoắn một cách chính xác.

Vì vậy, bộ căng đai và bộ truyền đai là hai bộ phận quan trọng trong hệ thống đo góc xoắn của máy thử xoắn. Sự căng đúng đảm bảo sự ổn định và độ chính xác của đai, trong khi bộ truyền đai đảm bảo truyền chuyển động quay một cách chính xác từ trục gắn mâm cặp tới encoder để đo góc xoắn.



Hình 2. Cơ cấu bộ căng đai



Hình 3. Bộ truyền mô-men xoắn

2.5. Bộ truyền mô-men xoắn

Lực được truyền vào tay quay vô lăng tạo ra mô-men xoắn (Hình 3). Mô-men này được tạo ra bởi người điều khiển. Mô-men xoắn được truyền từ tay quay qua trục gắn với vô lăng. Trục này chịu tải từ mô-men xoắn và truyền nó đến các bộ phận khác trong hệ thống. Đầu còn lại của trục gắn với vô lăng được kết nối với khớp nối cứng. Khớp nối cứng giữ cho trục và các bộ phận khác liên kết chặt chẽ, chuyển động xoay từ trục gắn vô lăng sang trục hộp giảm tốc. Trục vào của hộp giảm tốc được kết nối với một khớp nối khác. Đây là khớp nối để truyền động từ trục hộp giảm tốc đến một khối nối khác trong hệ thống. Đầu còn lại của khớp nối này gắn với trục gắn vào mâm cặp. Trục gắn này chịu tải từ hộp giảm tốc và truyền nó đến mâm cặp. Qua quá trình truyền lực này, mô-men xoắn ban đầu tạo ra bởi người điều khiển được truyền từ tay quay vô lăng, qua các trục và khớp nối, cho đến khi nó đạt được mâm cặp. Điều này cho phép xoắn được áp dụng lên mâm cặp và các bộ phận liên quan trong hệ thống máy thử xoắn.

3. LẮP RÁP VÀ THỬ NGHIỆM

3.1. Lắp ráp

• Bước 1: Lắp vô lăng và mô tơ vào tấm 1 (Hình 4).

- Vô lăng sẽ được lắp với tấm 1 thông qua trục gắn vô lăng và trục này sẽ có tác dụng giữ vô lăng đồng trục với tấm 1 và kết nối với hộp giảm tốc thông qua khớp nối;

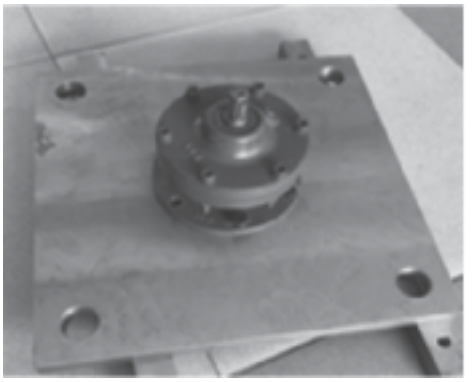
- Cùng với đó mô tơ sẽ được lắp ngay phía bên trên của vô lăng;

- Lắp ráp ở bước này cần có độ hở vì ☞

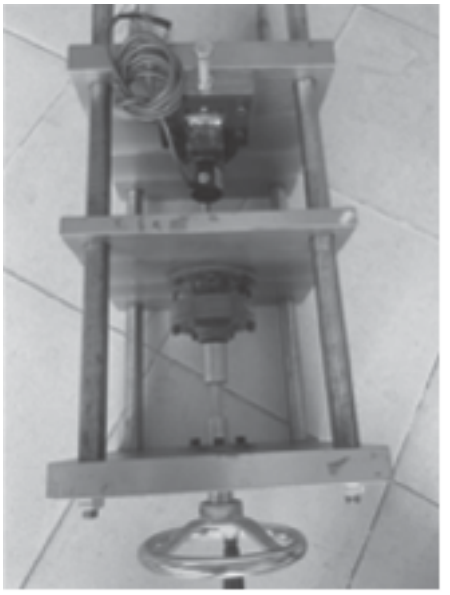
vô lăng cần phải di chuyển theo quỹ đạo đường tròn, sau cùng ta sẽ có cụm chi tiết (1).



Hình 4. Cụm chi tiết 1



Hình 5. Cụm chi tiết 2



Hình 6. Lắp cụm 1, 2, 3 vào máy



Hình 7. Chuẩn bị thiết bị điện tử và đặt chi tiết thử nghiệm vào máy

• Bước 2: Lắp ráp hộp giảm tốc với tấm 2.

- Hộp giảm tốc sẽ được lắp ráp chặt đồng tâm với tấm 2 thông qua 8 con bulong M10;

- Dung sai độ đồng tâm không vượt quá 0,5 mm để đảm bảo độ chính xác khi quay, sau đó ta được cụm chi tiết (2).

• Bước 3: Lắp mâm cặp 1 với tấm 3.

- Đầu tiên mâm cặp 1 sẽ được gắn với trục gắn mâm cặp, trục này có tác dụng liên kết giữa mâm cặp và tấm 3 một cách chắc chắn đảm bảo khi quay được đồng tâm và đều;

- Sau đó trục gắn mâm cặp sẽ được gắn với tấm 3;

- Trục gắn mâm cặp sẽ được gắn thêm 1 gánh đai, bánh đai này có tác dụng truyền tỉ số quay tới bánh đai trong cụm chi tiết căng đai thông qua dây đai.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

3.2. Quy trình thử nghiệm

• Bước 1: Kiểm tra mẫu (mẫu thử nghiệm là nhựa PLA-F) bảo quản mẫu vật.

+ Trước khi thử nghiệm, mẫu vật phải được bảo quản ở môi trường phù hợp, cụ thể là nhiệt độ phòng (khoảng 25-34 độ C), việc bảo quản đúng cách rất quan trọng vì việc này đảm bảo mẫu vật không bị biến dạng khi gặp nhiệt độ quá cao, vì đây là nhựa nên khi gặp nhiệt độ cao sẽ bị biến dạng dẫn tới kết quả thử nghiệm không chính xác.

+ Đo kích thước: Mẫu vật phải đảm bảo có chiều dài là 68 mm, chiều rộng là 14.8 mm và bề dày là 15 mm. Việc đo kích thước này đảm bảo rằng mọi mẫu thử đều đồng nhất về kích thước từ đó cho ra số liệu như mô-men xoắn và góc xoay một cách chính xác và tổng quan nhất, cùng với đó việc đo kích thước cũng là bước để kiểm tra xem liệu mẫu vật có đặt vào được dụng cụ đo, nằm trong khoảng dung sai cho phép để tránh bị tuột khi xoay.

+ Đánh số thứ tự mẫu: Bởi vì ta có tổng cộng 9 mẫu vật được kiểm tra nên việc đánh số này khá quan trọng khi giúp ta phân biệt được số thứ tự mẫu và thứ tự thử nghiệm, cùng với đó là sẽ dễ dàng ghi chép lại thông tin thu được của từng mẫu, phân biệt dễ dàng từ đó tổng hợp số liệu một cách dễ dàng.

• Bước 2: Chuẩn bị các thiết bị điện tử sẵn sàng.

+ Đặt điện thoại vào gá đỡ: Việc này giúp ghi hình lại quá trình thử nghiệm với mẫu và có thể xem lại một cách rõ nét và trực diện từ trên xuống;

+ Bật adapter đo mô-men xoắn lên và cài đặt đơn vị là N.m;

+ Cắm dây điện của mô tơ;

+ Kiểm tra Encoder: Kiểm tra dây điện của encoder cũng như là màn hình hiển thị góc xoay có hoạt động bình thường không bằng cách quay tay quay nhẹ nhàng và xem góc xoay trên màn hình có nhảy không.

• Bước 3: Đặt mẫu vào máy.

+ Căn chỉnh hai hốc giữ thẳng hàng với nhau: Vì ta không kẹp chặt mẫu vật trực tiếp với mâm cặp mà thông qua hai hốc giữ, hai hốc này có kích thước bằng với hai đầu của mẫu vật và lắp ghép với mẫu có độ dôi (độ dôi để tránh bị tuột mẫu lúc xoay), nên vì thế trước khi đặt mẫu vào ta phải căn chỉnh cho hai hốc thẳng hàng với nhau thì mới bỏ mẫu vật vào dễ dàng tránh làm hư mẫu vật.

+ Nhẹ nhàng đưa hai đầu mẫu vật lại gần hai hốc và lắp vào, dùng búa nhựa nhỏ gõ thật nhẹ để mẫu vật ăn khớp với hốc giữ, đảm bảo sau khi gõ thì hai đầu của mẫu vật phải thật khít và không còn dư một chút không gian nào bên trong hốc để đảm bảo khi xoay hai đầu mẫu thật cân bằng và đồng tâm, giúp cho số liệu chính xác nhất.

• Bước 4: Thu thập dữ liệu (Hình 7).

+ Sau khi đã đặt mẫu vào máy, ta bật công tắc của mô tơ.

+ Mô tơ bắt đầu quay và số mô-men xoắn trên adapter bắt đầu nhảy, cùng với đó là giá trị góc quay trên màn hình cũng nhảy theo, mỗi mẫu vật sẽ cho ra một giá trị mô-men xoắn và góc quay khác nhau tùy thuộc vào thông số in của mẫu vật đó. ☞

+ Sau khi mẫu vật bị phá hủy, ta ghi lại số mô-men xoắn cực đại thu lại được trên adapter, và giá trị góc xoay ở trên màn hình hiển thị (nếu không nhìn kịp giá trị góc xoay thì ta có thể xem lại trong video vừa quay đối với mẫu vật đó).

3.3. Kiểm tra độ bền xoắn

Kết quả kiểm tra độ bền xoắn của 9 mẫu in 3D (Hình 8) đã cung cấp cái nhìn sâu sắc về khả năng chịu xoắn của từng mẫu và sự tương tác giữa các thông số in. Trên cơ sở dữ liệu này, chúng tôi sẽ tiến hành phân tích chi tiết để hiểu rõ hơn về độ bền xoắn của các mẫu và ảnh hưởng của các yếu tố in lên kết quả này.

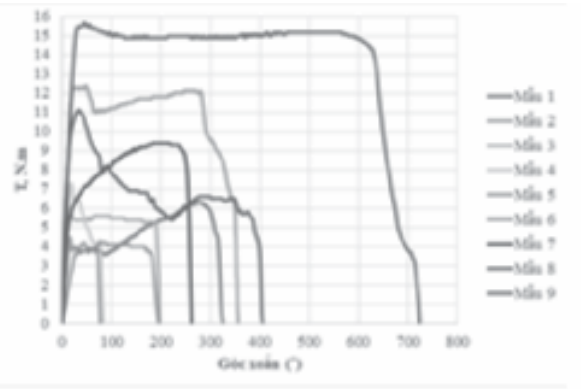
Kết quả phân tích cho thấy trong phạm vi thử nghiệm của chúng tôi với 9 mẫu in 3D, mô-men xoắn thu được dao động trong khoảng từ 4.2 đến 15.7 Nm. Điều này chỉ ra rằng các mẫu này có khả năng chịu xoắn khác nhau, từ những mẫu có độ bền xoắn thấp đến những mẫu có độ bền xoắn cao hơn. Sự biến đổi rộng lớn này đòi hỏi phải xem xét kỹ lưỡng các yếu tố ảnh hưởng để hiểu rõ hơn về tương quan giữa các thông số in và độ bền xoắn của các mẫu in 3D này.

Mối quan hệ giữa mô-men xoắn và góc quay của các mẫu thử nghiệm được biểu diễn qua các hình minh họa dưới đây. Trong những hình này, chúng ta có thể quan sát sự thay đổi của mô-men xoắn theo góc quay tương ứng cho từng mẫu.

Từ các đường cong trên, chúng ta có thể quan sát rằng sự thay đổi các thông số in 3D có ảnh hưởng đáng kể đến tính chất cơ học của các mẫu thử nghiệm. Điều này được thể hiện qua mô-men xoắn tăng cao hơn khi giá trị thay đổi từ 4.2 Nm đến 15.7 Nm.

Kết quả thử nghiệm đo mô-men xoắn và góc xoắn của tất cả các mẫu được thể hiện trong hình 11 và hình 12. Mẫu 9, với nhiệt độ in 220°C, góc in 45°, mật độ in 100% và độ dày 0,1 mm, có mô-men xoắn lớn nhất là 15,7 N.m. Đáng chú ý, các mẫu có cùng độ dày 0,1 mm, như mẫu 1, 6 và 9, cho thấy mô-men xoắn ở mức cao. Tuy nhiên, giá trị mô-men xoắn nhỏ nhất được ghi nhận khi độ dày là 0,2 mm, đối với các mẫu 2, 5 và 7.

Dựa vào các số liệu trên, chúng ta có thể thấy rằng mật độ in tỷ lệ thuận với mô-men xoắn. Khi tăng mật độ in từ 50% lên 100%, mô-men xoắn cũng tăng theo. Điều này cho thấy sự ảnh hưởng của mật độ in đến đặc tính mô-men xoắn trong quá trình thử nghiệm.



Hình 8. Biểu đồ so sánh mối quan hệ giữa mô-men – góc xoắn của 9 mẫu thử

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế và chế tạo thành công mô hình máy thử độ bền xoắn cho chi tiết nhựa in 3D theo tiêu chuẩn ASTM D1043, cho phép đo chính xác mô-men xoắn và góc xoay của mẫu. Kết quả thử nghiệm với vật liệu PLA-F cho thấy mô-men xoắn cực đại dao động từ 4,2 đến 15,7 N·m, trong đó mật độ in và chiều dày lớp ảnh hưởng rõ rệt đến độ bền xoắn. Mô hình máy thử hoạt động ổn định, độ chính xác cao

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

và có thể ứng dụng hiệu quả trong nghiên cứu, giảng dạy và đánh giá cơ tính vật liệu nhựa.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Tưởng Phước Thọ, Huỳnh Đỗ Song Toàn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Tưởng Phước Thọ, Phạm Thế Sơn, Nguyễn Phương Nam, Lê Hồng Phúc, Huỳnh Đỗ Song Toàn.

(*) Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện và hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này (Mã số đề tài: T2024-36).❖

Ngày nhận bài: **16/10/2025**
Ngày phản biện: **31/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bel, J.C., "*Pitfalls and Limits of Locking Plates*". Orthop. Traumatol. Surg. Res. 2019, 105, S103-S109.

[2]. Stoesz, M.J.; Gustafson, P.A.; Patel, B.V.; Jastifer, J.R.; Chess, J.L., "*Surgeon Perception of Cancellous Screw Fixation*". J. Orthop. Trauma 2014, 28, e1.

[3]. Qi, W.; Xu, X.; Qian, K.; Schuller, B.W.; Fortino, G.; Aliverti, A., "*A Review of AIoT-Based Human Activity Recognition: From Application to Technique*". IEEE J. Biomed. Health Inform. 2025, 29, 2425-2438.

[4]. Wilkie, J.; Docherty, P.D.; Möller, K., "*A Simple Screwing Process Model for Bone Material Identification*". In Proceedings of the 14th Symposium on Automation in Medical Engineering, AUTOMED, Lübeck, Germany, 2-3 March 2020; Number 1. p. 38.

[5]. Wilkie, J.; Docherty, P.D.; Stieglitz, T.; Möller, K. "*Geometric Generalization of Self Tapping Screw Insertion Model*". In Proceedings of the 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine Biology Society (EMBC), Virtual, 30 October–5 November 2021; pp. 4387-4390.

[6]. Wilkie, J.; Rauter, G.; Möller, K., "*Interfacing with Prototype Instrumented Smart Screwdriver for Bone Screw Torque Regulation*". IFAC-PapersOnLine 2024, 58, 287-290.

[7]. Wilkie, J.; Docherty, P.D.; Möller, K., "*Stripping Torque Model for Bone Screws*". IFAC-PapersOnLine 2021, 54, 442-447.

[8]. Reynolds, K.J.; Mohtar, A.A.; Cleek, T.M.; Ryan, M.K.; Hearn, T.C., "*Automated Bone Screw Tightening to Adaptive Levels of Stripping Torque*". J. Orthop. Trauma 2017, 31, 321-325.

[9]. Thomas, R.L.; Bouazza-Marouf, K.; Taylor, G.J.S., "*Automated Surgical Screwdriver: Automated Screw Placement*". Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med. 2008, 222, 817-827.

[10]. Wright, B.J.; Grigg, S.; Bergsaker, A.S.; Brattgjerd, J.E.; Steen, H.; Pullin, R., "*Real Time Monitoring of Screw Insertion Using Acoustic Emission Can Predict Screw Stripping in Human Cancellous Bone*". Clin. Biomech. 2020, 76, 105026.

[11]. Wright, B.J.; Grigg, S.; McCrory, J.; Pullin, R.; Brattgjerd, J.E., "*A Novel Acoustic Emission Screwdriver Reduces Surgeons' Cancellous Screw Stripping Rate – A Biomechanical Study*". Clin. Biomech. 2025, 123, 106467.

[12]. Fletcher, J.W.A.; Neumann, V.; Silva, J.; Burdon, A.; Mys, K.; Panagiotopoulou, V.C.; Gueorguiev, B.; Richards, R.G.; Whitehouse, M.R.; Preatoni, E.; et al., "*Augmented Screwdrivers Can Increase the Performance of Orthopaedic Surgeons Compared with Use of Normal Screwdrivers*". Sci. Rep. 2022, 12, 20076.

CƠ CẤU MỀM ĐƯỢC CHẾ TẠO TỪ PHƯƠNG PHÁP PHUN ÉP NHỰA

THE SOFT MECHANISM IS FABRICATED USING THE PLASTIC INJECTION MOLDING PROCESS

Nguyễn Văn Minh, Trần Phước Trung, Huỳnh Đỗ Song Toàn*
Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
*Email: minhngvan@hcmute.edu.vn; 19116143@student.hcmute.edu.vn; *toanhds@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày quá trình thực nghiệm và phân tích đặc tính đàn hồi của cơ cấu mềm dạng compliant mechanism được chế tạo bằng vật liệu nhựa PA6 (Polyamide 6) có gia cường sợi thủy tinh (Glass Fiber – GF) với các tỷ lệ khác nhau: 0%, 5%, 15%, 20% và 30%. Các mẫu được đo mô-men xoắn tương ứng với các góc quay từ 0° đến 275° nhằm khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ sợi thủy tinh đến khả năng chịu tải và biến dạng đàn hồi. Kết quả cho thấy mẫu PA6 không gia cường (0%GF) có khả năng biến dạng lớn, mô-men tăng dần theo góc quay với đặc tính phi tuyến, trong khi mẫu PA6-5%GF thể hiện độ cứng cao hơn và khả năng truyền lực tốt hơn ở vùng biến dạng lớn. Sự gia cường bằng sợi thủy tinh giúp tăng mô-men cực đại và độ ổn định cơ học, song làm giảm nhẹ tính linh hoạt tổng thể. Kết quả nghiên cứu là cơ sở quan trọng cho việc thiết kế và tối ưu hóa cơ cấu mềm bằng vật liệu composite nền nhựa, hướng tới ứng dụng trong robot mềm, cơ cấu truyền động linh hoạt và các thiết bị cơ điện tử có yêu cầu biến dạng đàn hồi lớn.

Từ khóa: *Cơ cấu mềm; Biến dạng đàn hồi; PA6; Sợi thủy tinh (GF); Mô-men xoắn; Phun ép nhựa; Vật liệu composite.*

ABSTRACT

This study presents an experimental investigation and analysis of the elastic behavior of a compliant mechanism fabricated from PA6 (Polyamide 6) reinforced with glass fibers (GF) at various contents of 0%, 5%, 15%, 20%, and 30%. The torque response was measured at different rotation angles ranging from 0° to 275° to evaluate the influence of fiber content on load-bearing capacity and elastic deformation. The results show that the unreinforced PA6 (0%GF) exhibits high flexibility with a nonlinear increase in torque as the rotation angle increases, whereas the PA6-5%GF samples demonstrate higher stiffness and improved torque transmission in large deformation ranges. Glass fiber reinforcement enhances maximum torque and structural stability but slightly reduces overall flexibility. These findings provide a valuable basis for designing and optimizing soft mechanisms made from polymer composite materials, targeting applications in soft robotics, flexible actuators, and electromechanical systems requiring large elastic deformation.

Keywords: *Soft mechanism; Elastic deformation; PA6; Glass fiber (GF); Torque; Injection molding; Composite materials.*

1. TỔNG QUAN

Cơ cấu mềm là một trong những xu hướng thiết kế tiên tiến trong lĩnh vực cơ khí hiện đại, cho phép cấu trúc cơ học có thể biến dạng đàn hồi lớn mà vẫn duy trì khả năng điều khiển chính xác chuyển động. Việc chế tạo các cơ cấu mềm bằng vật liệu polymer hoặc vật liệu composite nền nhựa giúp đạt được sự linh hoạt cao, trọng lượng nhẹ, và khả năng hấp thụ năng lượng tốt, từ đó mở rộng phạm vi ứng dụng trong robot mềm, thiết bị y sinh, và các hệ thống cơ cấu thích ứng. Trong bối cảnh đó, công nghệ phun ép nhựa (injection molding) được xem là phương pháp tiềm năng để chế tạo hàng loạt các cơ cấu mềm với độ chính xác và khả năng tái lập cao.

Một trong những hướng nghiên cứu được quan tâm hiện nay là sử dụng composite gỗ–nhựa (Wood–Plastic Composites, WPCs) trong chế tạo các chi tiết hoặc cơ cấu mềm. WPCs là vật liệu composite có pha gia cường là gỗ và pha nền là nhựa nhiệt dẻo hoặc nhựa nhiệt rắn [1, 2, 3]. Trong quá trình sản xuất, các hạt gỗ hoặc sợi gỗ (sawdust hoặc wood fibers) thường là sản phẩm phụ của ngành chế biến gỗ hoặc được nghiền từ các loại cây không đủ tiêu chuẩn làm gỗ thương phẩm. Các sợi hoặc bột gỗ này được phối trộn với polymer nền như polypropylene (PP), polyethylene (PE) hoặc polyvinyl chloride (PVC), kèm theo các chất phụ gia như chất tương hợp, chất ổn định nhiệt và chất độn vô cơ, nhằm cải thiện tính chất cơ lý của vật liệu và tương tác giữa hai pha vật liệu [4].

Quá trình phun ép nhựa là một trong những phương pháp phổ biến để tạo hình vật liệu WPC. Trong đó, hỗn hợp nhựa và gỗ được nung chảy, nén và ép vào lòng khuôn dưới áp suất cao, sau đó làm nguội để tạo ra sản phẩm có hình dạng mong muốn. Phương pháp này cho phép sản xuất chi tiết có hình học phức tạp, độ chính xác cao và khả năng tái lập ổn định hơn so với phương pháp ép nén hoặc đùn. Tuy nhiên, cơ chế tương tác giữa các pha vật liệu trong quá trình phun ép, cũng như ảnh hưởng của thông số công nghệ đến tính chất cơ học, vẫn là vấn đề đang được nghiên cứu [5, 6].

Một trong những thách thức chính khi gia công WPC bằng phun ép là độ nhạy nhiệt của gỗ. Gỗ bắt đầu phân hủy nhiệt trong dải nhiệt độ tương đương với nhiệt độ gia công của hầu hết nhựa nhiệt dẻo, dẫn đến hiện tượng cháy hoặc suy giảm cơ tính của sản phẩm nếu nhiệt độ gia công quá cao [5]. Các nghiên cứu cho thấy trong quá trình phối trộn (compounding) và tái chế, sự phân hủy của thành phần gỗ có thể làm giảm độ bền kéo và độ cứng của composite. Ngoài ra, việc tái chế nhiều lần cũng gây ra suy giảm độ kết dính giữa pha gỗ và nhựa, ảnh hưởng đến tính chất lâu dài của vật liệu [6].

So sánh giữa phương pháp đùn (extrusion) và phun ép (injection molding) cho thấy phun ép mang lại tính chất cơ học cao hơn nhờ áp suất và ứng suất cắt lớn hơn trong quá trình gia công, giúp phân tán sợi gỗ tốt hơn trong nền nhựa và tăng cường tương tác giữa các pha vật liệu [7]. Tuy nhiên, quy trình phun ép WPC chưa được nghiên cứu sâu rộng trong tài liệu hiện có. Một số công trình đề cập đến việc tạo bọt (foaming) trong phun ép để giảm khối lượng và tăng khả năng cách âm, cách nhiệt [8, 9]. Các nghiên cứu khác so sánh tính chất giữa sản phẩm đúc nén và phun ép, chỉ ra sự khác biệt về độ bền, độ cứng và mật độ khuyết tật [10].

Các nghiên cứu gần đây cũng xem xét kỹ thuật phủ (overmolding) khi kết hợp lớp ☞

gỗ hoặc ván ép với lớp nhựa, nhằm cải thiện khả năng kết dính bề mặt và nâng cao độ bền liên kết giữa hai vật liệu [11]. Tuy nhiên, thách thức lớn trong phun ép WPC là đảm bảo dòng chảy của vật liệu trong khuôn phức tạp và kiểm soát hiện tượng rỗ khí, cháy bề mặt hoặc không điền đầy khuôn. Nghiên cứu [12] đã chỉ ra rằng thiết kế hệ thống khuôn, cổng phun, và nhiệt độ khuôn đóng vai trò rất quan trọng; đặc biệt, cần duy trì nhiệt độ khuôn tối thiểu đủ cao để vật liệu có thể điền đầy lòng khuôn mà không gây nứt hoặc rỗ bề mặt. Ngoài ra, công đoạn sấy khô nguyên liệu trước khi phun ép là bắt buộc để tránh bọt khí và sai hỏng trên bề mặt sản phẩm [12]. Tác giả [13] nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ nóng chảy đến tính chất cơ học của WPC nền polyethylene (PE) và nhận thấy khi tăng nhiệt độ, mô đun đàn hồi và độ bền kéo giảm nhẹ do sự phân hủy vi mô của thành phần gỗ. Điều này cho thấy việc lựa chọn thông số công nghệ thích hợp là yếu tố then chốt để cân bằng giữa khả năng gia công và chất lượng cơ học của sản phẩm. Bên cạnh đó, nhiều công trình khác tập trung vào ảnh hưởng của thời gian lưu (residence time) trong xilanh phun ép và tốc độ làm nguội khuôn, vì các yếu tố này quyết định mức độ phân bố nhiệt trong vật liệu, ảnh hưởng đến cấu trúc tinh thể của polymer và sự kết dính giữa pha gỗ–nhựa.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu tập trung vào vật liệu WPC, sự ảnh hưởng của thông số công nghệ phun ép đến tính chất cơ học và hình thái của sản phẩm vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Việc hiểu rõ cơ chế này không chỉ có ý nghĩa trong sản xuất ban đầu mà còn trong tái chế phế liệu và tái sử dụng vật liệu composite. Do đó, mục tiêu của các nghiên cứu gần đây là đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ nhựa nóng chảy, nhiệt độ khuôn, và thời gian lưu đến các đặc trưng cơ học (như độ bền kéo, mô đun đàn hồi) cũng như đặc tính màu sắc của vật liệu WPC, qua đó tối ưu hóa quá trình phun ép để đạt chất lượng sản phẩm cao nhất.

Nhìn chung, công nghệ phun ép cho phép tạo hình các cơ cấu mềm composite nền nhựa với khả năng kiểm soát chính xác hình học và tính chất vật liệu, mở ra hướng phát triển mới cho các sản phẩm cơ khí có tính linh hoạt cao. Tuy nhiên, để chế tạo các cơ cấu mềm hoạt động ổn định và bền vững, cần tiếp tục nghiên cứu sâu hơn về mối quan hệ giữa cấu trúc vật liệu, điều kiện công nghệ và cơ chế biến dạng đàn hồi. Việc kết hợp các công cụ mô phỏng (như ANSYS, Moldflow) với thực nghiệm sẽ giúp hiểu rõ hơn quá trình truyền nhiệt, phân bố áp suất và dòng chảy trong lòng khuôn, từ đó tạo cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa thiết kế khuôn và quy trình chế tạo cơ cấu mềm bằng phương pháp phun ép nhựa trong tương lai.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Trong lĩnh vực kỹ thuật, các chi tiết thường được liên kết với nhau bằng các kết nối truyền thống như: khớp bản lề, khớp sạch tiến trình, khớp cầu. Các chế độ cố định hạn chế của các trận đấu này luôn tồn tại ở một khoảng thời gian nên sẽ gây ra sai số truyền động và sai số này thường có kích thước 0,01 mm. Ngoài ra, trong tất cả các loại truyền thống kết nối phù hợp luôn có năng lực. Lực này là nguyên nhân làm giảm hiệu suất, gây mài mòn các chi tiết, làm tăng khe hở trong kết nối theo thời gian, từ đó làm giảm chất lượng hoạt động của thiết bị cũng như chất lượng của sản phẩm. Các câu trả lời về việc làm truyền thống không phù hợp với các cấu hình máy có yêu cầu độ chính xác cao (kích thước 0,001 mm) hay không phản đối điều kiện làm sạch và nhu cầu làm việc trong chân không [7].

Một trong những giải pháp giải quyết vấn đề này để giải quyết phần thưởng của hệ thống truyền tải phù hợp là việc sử dụng cơ chế phục hồi. Cơ sở cấu hình đàn hồi/mềm cũng cho phép truyền tải hoặc chuyển đổi chuyển động, năng lượng và thời điểm. Tuy nhiên,

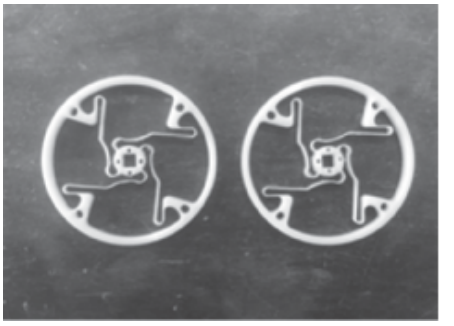
không giống hệ thống truyền tải cấu hình cơ sở, cấu hình cơ sở phục hồi có thể thực hiện ít nhất một hoặc một vài chuyển động hỗ trợ cho dạng biến thể của các nhóm hồi phục không chỉ dựa vào các loại sử dụng thường xuyên phù hợp. Một ví dụ minh họa các cấu hình cơ sở phổ biến như Hình 1. Một dạng cấu hình cơ sở thường được sử dụng khi tổng hợp cấu hình cơ sở phù hợp với bảng tổng hợp. Nó có cấu hình đơn giản từ một khối dữ liệu được cắt khoét một phần và tạo ra chuyển động dựa trên độ mềm trong vật liệu thân máy. Chính vì vậy, nó giải quyết được các điểm yếu của truyền thống trận đấu. Do không phải chế tạo từ nhiều chi tiết khác nhau nên khớp nối đàn hồi không tồn tại tại các nhược điểm như: ma sát, ồn ào, mài mòn, phải bôi trơn và khe hở. Ngoài ra, nó còn tiết kiệm được không gian và giảm chi phí của các bộ phận, vật liệu, lắp ráp và bảo trì. Kết nối khối cấu hình của kết nối được trả lời ưu tiên khi sử dụng để truyền động có độ chính xác ở mức micro và dưới micro trong các tác vụ cần độ chính xác cao hay trong các thiết bị y sinh học, các hệ thống thông tin điện từ [7].



Hình 1. Các cơ cấu mềm phổ biến

3. MÔ HÌNH SẢN PHẨM CƠ CẤU MỀM

Mô hình được thiết kế trên phần mềm Creo Parametric, tiếp theo được thiết kế khuôn ép phun cho mô hình này, gia công bộ khuôn và lắp ráp. Sau đó, mô hình được ép phun với những vật liệu nhựa PA6 và PA6 30%GF với những trường hợp tương ứng với những tỷ lệ khối lượng trộn giữa hai loại nhựa khác nhau, bao gồm 0%, 5%, 15%, 20%, 30%, cụ thể những tỷ lệ phần trăm đã nêu là tỷ lệ khối lượng trộn của vật liệu nhựa tái sinh.



Hình 2. Cơ cấu mềm dùng trong nghiên cứu này

Hình 2 mô tả thông số hình học của mô hình cơ cấu mềm dạng "Compliant". Cơ cấu có hình dáng là hình tròn với đường kính đường bao là Ø100×5mm và được gia công bằng phương pháp phun ép nhựa với vật liệu nhựa PA6 và PA6 30%GF được trộn với nhau với tỷ lệ trộn như đã nêu ở trên. Mô hình này có tổng cộng 4 dây có bề dày 1mm được nối từ hình trụ tròn ở tâm với đường bao hình tròn ở bên ngoài. Bốn dây này có thể giãn dài ra tùy theo góc xoắn.

(*) Thông số phun ép

Theo yêu cầu của nghiên cứu này, thông số ép phun của từng loại nhựa không được thay đổi trong từng trường hợp trong quá trình ép mô hình. Thông qua sự hướng dẫn của giáo viên hướng dẫn và nghiên cứu những thông số kỹ thuật của từng loại nhựa và đã thử nghiệm trên máy ép nhựa, em đưa ra thông số phun ép nhựa như sau:

Sử dụng thông số ép nhựa của PA6 30% GF áp dụng cho tất các trường hợp còn lại: 0%, 5%, 15%, 20%, 30%. ☞

Bảng 1. Thông số nhựa PA6 0%

TH	Filling time (s)	Filling press (bar)	Packing time(s)	Packing press(bar)	Cooling time(s)	Melt temperature (độ C)	Filling speed (%)
1	2	80	1	75	25	250	50 52 54 56 58

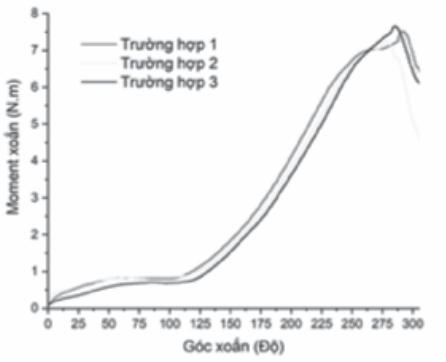
4. KẾT QUẢ ĐO BIẾN DẠNG

Qua quá trình làm thực nghiệm đo biến dạng đàn hồi của mô hình cơ cấu mềm dạng "Compliant" với những vật liệu nhựa PA6 được gia cố thêm sợi thủy tinh tương ứng với những trường hợp: 0%, 5%, 15%, 20% và 30%, kết quả đo mô-men của những trường hợp được trình bày ở những bảng sau, với Input là giá trị góc độ quay trung bình cộng của 3 giá trị đầu vào, 3 giá trị Output 1, 2 và 3 là giá trị mô-men xoắn đo được của 3 mẫu của từng trường hợp và giá trị Avg. Out là giá trị trung bình Output của 3 mẫu được đo.

• Trường hợp PA6 0%GF:

Bảng 2. Bảng thông số thí nghiệm đo được của trường hợp PA6 0%GF

Input (độ)	0	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275
Lần 1 (N.m)	0	0.58	0.68	0.69	0.85	1.51	2.41	3.6	5.02	6.47	7.31
Lần 2 (N.m)	0	0.79	0.83	0.8	1.01	1.7	2.61	3.85	5.26	6.57	7.13
Lần 3 (N.m)	0	0.78	0.84	0.82	1.12	1.81	2.78	4.01	5.63	6.73	7.04
Avg (N.m)	0	0.71	0.78	0.77	0.99	1.67	2.6	3.82	5.3	6.59	7.16



Hình 3. Biểu đồ thể hiện đặc tính mô-men của những trường hợp PA6 0%GF

Dữ liệu thu được cho trường hợp PA6 tinh khiết (0% sợi thủy tinh) cho thấy đặc tính của vật liệu có độ dẻo và khả năng biến dạng đàn hồi khá cao. Ở giai đoạn đầu, khi góc quay nhỏ hơn 75°, giá trị mô-men xoắn tăng nhẹ và gần như tuyến tính theo góc quay, thể hiện vùng đàn hồi tuyến tính của cơ cấu. Cụ thể, tại 50° góc xoay, mô-men trung bình đạt khoảng 0,71 N·m, và đến 100°, giá trị này tăng lên 0,99 N·m, cho thấy cơ cấu phản ứng ổn định khi chịu tải nhỏ.

Khi góc quay vượt quá 125°, độ dốc của đường cong mô-men tăng rõ rệt – biểu hiện của sự tăng độ cứng cơ học do biến dạng đàn hồi phi tuyến. Giá trị mô-men trung bình đạt 1,67 N·m tại 150° và 2,60 N·m tại 175°, sau đó tăng mạnh lên 5,30 N·m tại 225° và 7,16 N·m tại 275°. Đường cong thể hiện sự phi tuyến tăng dần, đặc trưng cho cơ cấu mềm có sự phân bố ứng suất không đồng đều, trong đó vùng cổ cơ cấu chịu nén và kéo mạnh dần khi góc xoay tăng.

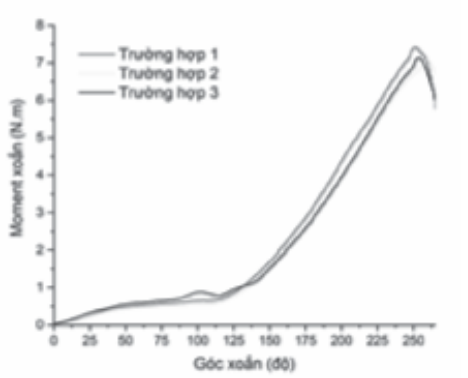
Điểm đáng chú ý là sự đồng nhất của ba lần đo, cho thấy kết quả ổn định, sai số thấp. Điều này khẳng định quá trình thí nghiệm và vật liệu PA6 thuần có khả năng lặp lại tốt. Tuy nhiên, do không có sợi thủy tinh gia cường, vật liệu này có giới hạn chịu tải thấp hơn, mặc dù đạt được biên độ biến dạng lớn. Điều này phù hợp với đặc tính của PA6 tinh khiết – mềm dẻo, đàn hồi tốt nhưng khả năng chịu mô-men cao bị hạn chế.

Hình 3 cho thấy đồ thị mô-men theo góc quay có dạng cong mượt, liên tục tăng, biểu thị mối quan hệ gần như phi tuyến bậc hai giữa mô-men và góc quay. Đây là đặc trưng của cơ cấu compliant khi chịu biến dạng lớn mà không phá hủy cấu trúc vật liệu.

• Trường hợp PA6 5%GF:

Bảng 3. Bảng thông số thí nghiệm đo được của trường hợp PA6 5%GF

Input (độ)	0	25	50	75	100	125	150	175	225	250	260
Lần 1 (N.m)	0	0.25	0.43	0.5	0.54	0.77	1.49	2.52	5.39	7.1	0.65
Lần 2 (N.m)	0	0.27	0.45	0.57	0.64	0.87	1.50	2.54	5.4	6.69	0.68
Lần 3 (N.m)	0	0.28	0.48	0.65	0.87	0.89	1.66	2.64	5.89	6.69	0.64
Avg (N.m)	0	0.26	0.45	0.57	0.68	0.84	1.55	2.56	5.56	6.82	0.65



Hình 4. Biểu đồ thể hiện đặc tính mô-men của những trường hợp PA6 5%GF

Khi bổ sung 5% sợi thủy tinh, cơ tính của vật liệu thay đổi rõ rệt. Sợi thủy tinh hoạt động như các pha gia cường, làm tăng môđun đàn hồi của vật liệu, giúp cơ cấu cứng hơn nhưng giảm nhẹ khả năng biến dạng đàn hồi. Dữ liệu trong Bảng 3 cho thấy ở các góc nhỏ (dưới 75°), mô-men xoắn tăng chậm, giá trị trung bình chỉ khoảng 0,26 N·m tại 25° và 0,57 N·m tại 75°, thấp hơn một chút so với PA6 0% GF ở cùng góc xoay. Điều này phản ánh độ dẻo của vật liệu bị giảm, do sợi thủy tinh hạn chế chuyển vị của pha polymer nền.

Từ 100° trở đi, đường cong mô-men bắt đầu tăng nhanh hơn. Tại 150°, mô-men trung bình đạt 1,55 N·m, tương đương với PA6 0%GF, cho thấy ở vùng biến dạng lớn, tác dụng gia cường bắt đầu phát huy rõ rệt. Đặc biệt, tại 225° và 250°, giá trị mô-men trung bình đạt 5,56 N·m và 6,82 N·m, gần tương đương với PA6 0%GF, mặc dù góc xoay nhỏ hơn (trong ☞

khoảng 225-260° so với 275° ở mẫu không gia cường). Điều này chứng tỏ rằng việc thêm 5% sợi thủy tinh giúp tăng khả năng truyền lực và ổn định biến dạng, trong khi vẫn duy trì tính đàn hồi tổng thể của cơ cấu.

Tuy nhiên, khi góc vượt quá 250°, giá trị mô-men giảm mạnh xuống khoảng 0,65 N·m, có thể do hiện tượng trượt hoặc tách lớp vi mô trong vùng tiếp xúc giữa pha polymer và sợi thủy tinh. Đây là giới hạn đàn hồi của vật liệu trong điều kiện gia cường thấp, khi ứng suất cục bộ vượt quá khả năng bám dính giữa hai pha.

Hình 4 minh họa rõ ràng đặc tính phi tuyến hai giai đoạn: giai đoạn đầu (0-100°) có độ dốc nhỏ, biểu thị vùng đàn hồi tuyến tính, và giai đoạn sau (trên 125°) có độ dốc tăng nhanh, phản ánh vùng tăng cứng do sự căng giãn đồng thời của cả pha polymer và pha sợi thủy tinh. Sự chuyển pha này là đặc trưng cơ học của composite có gia cường sợi ngắn.

5. KẾT LUẬN

So sánh hai trường hợp PA6 0%GF và 5%GF cho thấy ảnh hưởng của sợi thủy tinh là tăng độ cứng và khả năng chịu tải của cơ cấu, trong khi giảm nhẹ độ dẻo tổng thể. PA6 thuần cho biến dạng lớn và đường cong mô-men mượt, trong khi PA6-5%GF thể hiện phản ứng cơ học mạnh hơn ở vùng góc lớn, với khả năng duy trì giá trị mô-men cao trong phạm vi biến dạng trung bình.

Kết quả thực nghiệm chứng minh rằng tỷ lệ sợi thủy tinh thấp (≈5%) là tối ưu để cân bằng giữa tính đàn hồi và khả năng chịu lực xoắn, phù hợp với yêu cầu của các cơ cấu mềm cần vừa linh hoạt vừa bền vững. Xu hướng này mở ra hướng thiết kế vật liệu composite ứng dụng trong các cơ cấu compliant có khả năng tự phục hồi biến dạng và hoạt động bền bỉ trong môi trường làm việc có tải trọng thay đổi.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Văn Minh, Huỳnh Đỗ Song Toàn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Văn Minh, Trần Phước Trung, Huỳnh Đỗ Song Toàn.

(*) Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện và hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này (Mã số đề tài: T2024-31).❖

Ngày nhận bài: **16/10/2025**
Ngày phản biện: **30/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bledzki, A. K., & Faruk, O. (2004), "*Wood fiber reinforced polypropylene composites: Compression and injection molding process*". Polymer-Plastics Technology and Engineering, 43(3), 871-888, https://doi.org/10.1081/PPT-120030034.

[2]. Burgstaller, C. (2007), "*Processing of thermal sensitive materials – A case study for wood plastic composites*". Monatshefte für Chemie – Chemical Monthly, 138(4), 343-346, https://doi.org/10.1007/s00706-007-0608-5.

[3]. Burgstaller, C., & Renner, K. (2023), "*Recycling of wood-plastic composites – A reprocessing study*". Macromoleculars, 3(3), 754-765, https://doi.org/10.3390/macromol3030043.

[4]. Gosselin, R., Rodrigue, D., & Riedl, B.

(2006a), "*Injection molding of postconsumer wood–plastic composites I: Morphology*". Journal of Thermoplastic Composite Materials, 19(6), 639-657, https://doi.org/10.1177/0892705706066535.

[5]. Gosselin, R., Rodrigue, D., & Riedl, B. (2006b), "*Injection molding of postconsumer wood–plastic composites II: Mechanical properties*". Journal of Thermoplastic Composite Materials, 19(6), 659-669, https://doi.org/10.1177/0892705706066536.

[6]. Golmakani, M. E., Wiczenbach, T., Malikan, M., Aliakbari, R., & Eremeyev, V. A. (2021), "*Investigation of wood flour size, aspect ratios, and injection molding temperature on mechanical properties of wood flour/polyethylene composites*". Materials, 14(12), 3406, https://doi.org/10.3390/ma14123406.

[7]. Jafarian Jam, N., & Hossein Behravesh, A. (2009), "*Challenge to the production of fine wood–plastic injection molded composites*". Journal of Reinforced Plastics and Composites, 28(1), 73-82, https://doi.org/10.1177/0731684408091545.

[8]. Kumar, V., Tyagi, L., & Sinha, S. (2011), "*Wood flour–reinforced plastic composites: A review*". Reviews in Chemical Engineering, 27(6), 253-264, https://doi.org/10.1515/revce.2011.008.

[9]. Migneault, S., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K., & Wolcott, M. P. (2009), "*Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood–plastic composites*". Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40(1), 80-85, https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.10.004.

[10]. Mitaľová, Z., Mitaľ, D., & Berladir, K. (2024), "*A concise review of the components and properties of wood–plastic composites*". Polymers, 16(7), 1556, https://doi.org/10.3390/polym16071556.

[11]. Stadlmann, A., Mautner, A., Pramreiter, M., Bismarck, A., & Müller, U. (2021), "*Interfacial adhesion and mechanical properties of wood–polymer hybrid composites prepared by injection molding*". Polymers, 13(17), 2849, https://doi.org/10.3390/polym13172849.

[12]. Xu, K., Du, G., & Wang, S. (2021), "*Wood plastic composites: Their properties and applications*". In Engineered Wood Products for Construction (Chap. 12, pp. 197-221), IntechOpen, https://doi.org/10.5772/intechopen.95542.

[13]. Yadav, S. M., Lubis, M. A. R., & Sihag, K. (2021), "*A comprehensive review on process and technological aspects of wood–plastic composites*". Journal of Sylva Lestari, 9(3), 329-356, https://doi.org/10.23960/jsl.v9i3.329-356.

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO MÁY HÀN ỐNG

RESEARCH ON THE FABRICATION OF A PIPE WELDING MACHINE

Hoàng Văn Hướng, Lê Văn Tú, Trương Đình Trí, Hà Minh Đức, Huỳnh Đỗ Song Toàn*
Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: huonghv@hcmute.edu.vn;
18144203@student.hcmute.edu.vn;
18144193@student.hcmute.edu.vn;
18144087@student.hcmute.edu.vn;
**toanhds@hcmute.edu.vn*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày quá trình thiết kế, chế tạo và thử nghiệm máy hàn ống tự động nhằm nâng cao chất lượng và tính ổn định của mối hàn trong điều kiện sản xuất thực tế. Trong quá trình thực nghiệm, các thông số như lưu lượng khí bảo vệ, chiều dài hồ quang, tốc độ và chu kỳ xung hàn được giữ cố định, chỉ thay đổi biến dòng điện hàn để đánh giá ảnh hưởng của nó đến hình dạng và chất lượng mối hàn. Kết quả cho thấy, khi dòng điện thấp (74-84 A), mối hàn không đạt độ ngấu cần thiết; khi dòng cao (94-100 A), độ ngấu tăng nhưng xuất hiện hiện tượng cháy cạnh và biến dạng phôi. Dải dòng trung bình từ 86-92 A cho ra mối hàn có bề mặt mịn, độ ngấu đạt yêu cầu và vảy hàn đồng đều. Kết quả này xác định được khoảng giá trị dòng điện tối ưu, đồng thời chứng minh tính khả thi của hệ thống máy hàn ống tự động trong việc đảm bảo tính ổn định, thẩm mỹ và độ bền cơ học của mối hàn.

Từ khóa: *Máy hàn ống; Hàn hồ quang; Dòng điện hàn; Độ ngấu; Mối hàn tối ưu; Tự động hóa quá trình hàn.*

ABSTRACT

This study presents the design, fabrication, and experimental evaluation of an automatic pipe welding machine aimed at improving weld quality and process stability under practical manufacturing conditions. During the experiments, key parameters such as shielding gas flow rate, arc length, welding speed, and pulse cycle were kept constant, while the welding current was varied to assess its influence on weld geometry and quality. The results indicate that at low current levels (74-84 A), the weld penetration was insufficient, while at high current levels (94-100 A), excessive penetration and edge burning occurred. The medium current range of 86-92 A produced the most desirable welds with smooth surfaces, uniform bead formation, and adequate penetration. These findings identify the optimal current range for achieving high-quality pipe welds and demonstrate the effectiveness of the developed automatic pipe welding system in ensuring stability, aesthetics, and mechanical integrity of the welded joints.

Keywords: *Pipe welding machine; Arc welding; Welding current; Weld penetration; Optimal weld; Welding automation.*

1. TỔNG QUAN

Trong ngành cơ khí chế tạo, công nghệ hàn đóng vai trò hết sức quan trọng, được xem là một trong những phương pháp liên kết kim loại chủ yếu trong chế tạo và sửa chữa sản phẩm cơ khí. Quá trình hàn cho phép kết nối vĩnh viễn các chi tiết bằng cách nung nóng kim loại đến trạng thái nóng chảy hoặc dẻo, nhờ đó tạo thành liên kết có cường độ cơ học cao [1]. Nhờ những ưu điểm như độ bền mối hàn lớn, tiết kiệm vật liệu, khả năng tạo hình linh hoạt và thích ứng với nhiều loại vật liệu, công nghệ hàn đã được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như chế tạo kết cấu thép, sản xuất bình chịu áp lực, chế tạo nồi hơi, đóng tàu, chế tạo phương tiện giao thông, và đặc biệt là sản xuất, lắp đặt hệ thống đường ống trong công nghiệp [2, 3].

(*) Vai trò của hàn ống trong công nghiệp

Trong các ngành công nghiệp dầu khí, năng lượng, hóa chất, thực phẩm và xử lý nước, hệ thống đường ống đóng vai trò thiết yếu trong việc vận chuyển chất lỏng, khí hoặc hơi dưới áp suất cao. Chất lượng mối hàn quyết định trực tiếp đến độ kín, độ bền và tuổi thọ của hệ thống ống. Mối hàn kém chất lượng có thể dẫn đến rò rỉ, hư hỏng thiết bị, gây mất an toàn và thiệt hại lớn về kinh tế [4, 5]. Do đó, việc đảm bảo chất lượng hàn ống là yêu cầu then chốt trong thiết kế, chế tạo và bảo dưỡng các hệ thống dẫn.

Tùy theo loại vật liệu và yêu cầu kỹ thuật, quá trình hàn ống có thể được thực hiện bằng nhiều phương pháp khác nhau như hàn hồ quang tay (SMAW), hàn TIG (GTAW), hàn MIG/MAG (GMAW), hàn plasma (PAW) hoặc hàn laser [6]. Mỗi phương pháp có ưu, nhược điểm riêng: hàn TIG cho chất lượng mối hàn cao nhưng năng suất thấp; hàn MIG/MAG có năng suất cao hơn nhưng yêu cầu điều khiển chính xác dòng khí bảo vệ; hàn hồ quang tay dễ triển khai nhưng phụ thuộc nhiều vào kỹ năng thợ hàn. Trong sản xuất công nghiệp hàng loạt, việc duy trì chất lượng ổn định giữa các mối hàn do con người thực hiện là rất khó khăn, đặc biệt khi yêu cầu cao về thẩm mỹ, độ đồng nhất và độ kín khít [7].

(*) Xu hướng cơ giới hóa và tự động hóa quá trình hàn ống

Cùng với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, xu hướng cơ giới hóa và tự động hóa trong hàn đang trở thành một hướng phát triển tất yếu. Các hệ thống máy hàn ống tự động đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi ở nhiều quốc gia công nghiệp phát triển, đặc biệt trong các lĩnh vực yêu cầu độ chính xác cao như năng lượng hạt nhân, dầu khí ngoài khơi và chế tạo thiết bị áp lực [8]. So với hàn thủ công, máy hàn tự động giúp kiểm soát chính xác tốc độ di chuyển đầu hàn, tốc độ quay ống, dòng điện và điện áp hàn, đồng thời giảm thiểu sai số do yếu tố con người. Điều này mang lại sự đồng nhất về chất lượng mối hàn, nâng cao năng suất và giảm chi phí nhân công trong dài hạn.

Một số nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc thiết kế hệ thống hàn ống tự động dựa trên các bộ điều khiển vi xử lý như Arduino, PLC, hoặc Raspberry Pi, cho phép điều chỉnh linh hoạt thông số hàn theo từng loại vật liệu [9]. Ngoài ra, các hệ thống này có thể tích hợp cảm biến nhiệt, cảm biến vị trí, hoặc camera để giám sát quá trình hàn theo thời gian thực, nhờ đó phát hiện sớm các sai lệch về hồ quang hoặc biến dạng nhiệt. Ở một số mô hình tiên tiến, cơ cấu gá kẹp ống được thiết kế sao cho có thể xoay tròn 360°, giúp duy trì vị trí mỏ hàn cố định và thuận lợi trong điều khiển [10].

(*) Tình hình nghiên cứu và chế tạo trong nước

Tại Việt Nam, mặc dù công nghệ hàn đã được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất, nhưng các thiết bị hàn ống tự động vẫn chủ yếu được nhập khẩu, có giá thành cao và khó bảo trì. Các trường đại học, viện nghiên cứu và doanh nghiệp trong nước mới chỉ dừng lại ở mức chế tạo các mô hình thử nghiệm hoặc thiết bị bán tự động phục vụ mục đích đào tạo và nghiên cứu. Một số công trình đã nghiên cứu việc sử dụng vi điều khiển để điều chỉnh tốc độ quay của động cơ, tự động hóa chuyển động đầu hàn theo quỹ đạo định trước, và đồng bộ giữa tốc độ cấp dây và dòng điện hàn, đạt kết quả khả quan về độ ổn định mối hàn [9, 10]. Tuy nhiên, số lượng nghiên cứu hoàn thiện một máy hàn ống có khả năng hoạt động ổn định, linh hoạt và dễ vận hành vẫn còn hạn chế.

Bên cạnh đó, trong điều kiện sản xuất tại các xưởng cơ khí vừa và nhỏ, yêu cầu về thiết bị không chỉ là tự động hóa mà còn phải đơn giản, dễ bảo trì, chi phí thấp và phù hợp với điều kiện kỹ thuật trong nước. Do đó, việc nghiên cứu chế tạo một máy hàn ống tự động với thiết kế gọn nhẹ, dễ sử dụng, có khả năng điều chỉnh các thông số hàn linh hoạt là hướng đi có tính thực tiễn cao, phục vụ tốt cho cả công tác giảng dạy, thực hành và sản xuất thực tế.

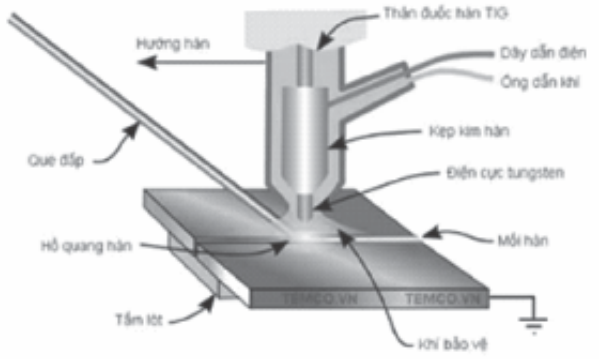
Trên cơ sở đó, đề tài "Nghiên cứu chế tạo máy hàn ống" được thực hiện với mục tiêu thiết kế, chế tạo và thử nghiệm một mô hình máy hàn ống tự động có khả năng thực hiện quá trình hàn hồ quang kim loại (MIG/TIG) cho các loại ống thép và inox với đường kính nhỏ đến trung bình. Hệ thống được tích hợp cơ cấu quay ống chủ động, cơ cấu giữ mỏ hàn cố định, bộ điều khiển điều chỉnh tốc độ quay và dòng hàn, đồng thời có thể mở rộng sang các ứng dụng hàn ống có kích thước và vật liệu khác nhau. Việc hoàn thiện mô hình không chỉ góp phần nâng cao năng lực thiết kế – chế tạo trong lĩnh vực tự động hóa quá trình hàn mà còn là cơ sở để triển khai các nghiên cứu nâng cao như điều khiển phản hồi, giám sát hồ quang bằng camera, hoặc ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong điều chỉnh thông số hàn tối ưu.

Nghiên cứu này mang ý nghĩa khoa học và thực tiễn rõ rệt: (i) góp phần bổ sung dữ liệu nghiên cứu trong lĩnh vực thiết kế máy hàn ống tự động, (ii) phục vụ đào tạo sinh viên và kỹ sư cơ khí về công nghệ hàn và điều khiển tự động, (iii) mở ra khả năng thương mại hóa trong sản xuất quy mô nhỏ, giảm sự phụ thuộc vào thiết bị nhập khẩu, và (iv) hướng đến xây dựng các giải pháp "made in Vietnam" có chi phí cạnh tranh và tính linh hoạt cao.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Nguyên lý về hàn TIG

Hàn TIG (Tungsten Inert Gas) còn có tên gọi khác là hàn hồ quang tungsten trong môi trường khí – GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) thường được gọi với tên hàn argon hoặc WIG (Wonfram Inert Gas). Hồ quang cháy giữa điện cực tungsten không nóng chảy và chi tiết hàn được bảo vệ bởi dòng khí trơ (Argon hoặc Argon + Helium) thổi qua mỏ phun, sẽ cung cấp nhiệt làm nóng chảy mép chi tiết, sau đó có hoặc không dùng que đắp tạo nên mối hàn. Kim loại đắp (que hàn có đường kính Ø 0,8 mm đến Ø 4,0 mm) được bổ sung vào vũng chảy bằng tay hoặc nhờ thiết bị tự động khi dùng dây cuộn (cuộn dây có đường kính từ Ø 0,8 mm đến Ø 2,0 mm). Vũng chảy được bảo vệ bằng dòng khí trơ (lưu lượng 5 đến 25 lít/phút) Argon hoặc Argon + Helium, khi hàn tự động có thể dùng Argon + H_2.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý của phương pháp hàn TIG

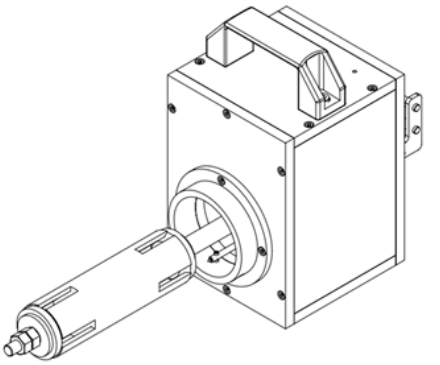
2.2. Ứng dụng của hàn TIG trong đời sống

Phương pháp hàn TIG được áp dụng trong nhiều lĩnh vực sản xuất, đặc biệt rất thích hợp trong hàn thép hợp kim cao, kim loại màu và hợp kim của chúng… Thường được sử dụng trong quá trình phục chế, sửa chữa các chi tiết bị hỏng, đặc biệt là các chi tiết làm bằng nhôm và magie. Sử dụng hàn các tấm mỏng, ống thành mỏng trong ngành công nghiệp xe đạp. Hàn TIG đặc biệt áp dụng trong chi tiết hàn khó, yêu cầu mối hàn cao như là các góc nhỏ khó hàn trong các chi tiết máy, vỏ máy photo, máy lạnh, máy điều hòa, các loại máy trong bệnh viện như máy X-Quang, máy chiếu… Ứng dụng nhiều trong công nghệ hàn tàu, hàn ống tàu, hàn ống dẫn ga, dẫn dầu…

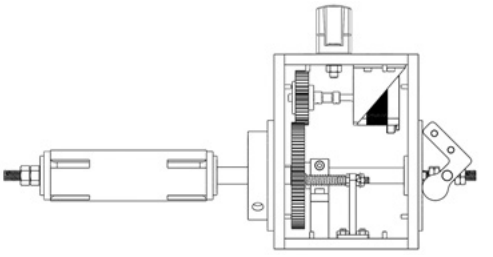
3. THIẾT KẾ MÔ HÌNH CƠ KHÍ

3.1. Thiết kế phần cơ khí (Hình 2 và 3)

Để đáp ứng các yêu cầu thiết kế ban đầu của đề tài, nhóm đã lên phương án thiết kế với các cơ cấu cơ khí bao gồm: Cụm vỏ hộp, cụm động cơ, thiết kế bánh răng, thiết kế trục chính, cụm siết, cụm trục chính, nguyên lý định vị, cụm nắp hộp, cụm tiếp điểm, các bộ phận khác.



Hình 2. Mô hình máy hàn sơ bộ.



Hình 3. Cấu tạo bên trong máy hàn.

3.2. Cụm vỏ hộp (Hình 4)

Vỏ hộp là một bộ phận vô cùng quan trọng, dùng để gắn kết và bảo vệ các cơ cấu bộ phận bên trong. Do đó, vỏ hộp phải đảm bảo được độ bền và hình dáng đơn giản. Không những vậy, vỏ hộp phải cách điện và có độ chịu nhiệt tốt vì khi hàn máy hàn sinh ra nhiệt rất lớn. Vì vậy, nhóm đã quyết định chọn Mica làm vật liệu để làm vỏ hộp. Việc chọn vật liệu Mica để làm vỏ hộp mang lại khá nhiều lợi ích:

• Mica tính chất bóng đều óng ánh, bề mặt phẳng mịn, sáng bóng, nên sẽ tăng tính thẩm mỹ cho vỏ hộp và có thể quan sát được các bộ phận bên trong máy.

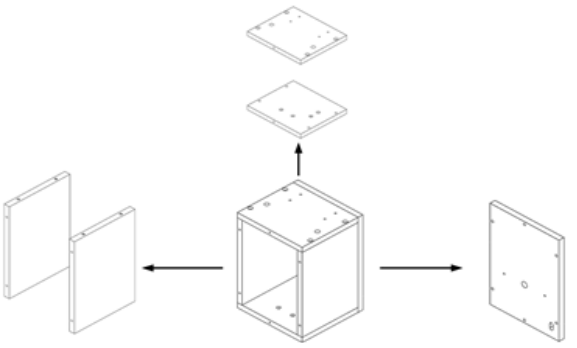
• Mica có đặc tính dẻo nên dễ dàng gia công lắp ghép, uốn, ép theo ý muốn.

• Chịu được nhiệt độ cao, chống ăn mòn.

• Không dẫn điện, nhiệt.

• Giá thành thấp.

• Mica có tỉ trọng chỉ bằng ½ so với thủy tinh, và cho khoảng 98% ánh sáng xuyên qua nó (đối với mica có độ dày 3mm). Nó bị đốt cháy ở 460 °C (860 °F).



Hình 4. Cụm vỏ hộp

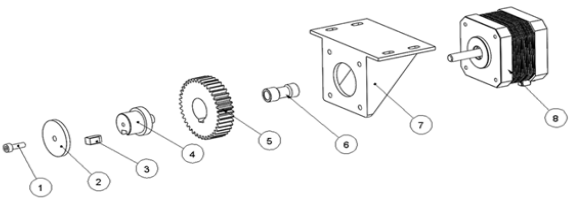
3.3. Cụm động cơ

Chuyển động chủ yếu của máy hàn là chuyển động xoay tròn và chúng ta có thể tùy chỉnh được tốc độ, góc quay của điện cực để cho ra mối hàn ổn định. Do đó, động cơ phù hợp nhất với những yêu cầu trên là động cơ bước.

Vì cơ cấu máy hàn không có cơ cấu làm việc và động cơ cũng không chịu tải lớn nên nhóm quyết định chọn động cơ bước vừa phải và nhỏ gọn là động cơ Step motor NEMA 17.

*Thông số kỹ thuật của động cơ:

• Kích thước: 42×42×38 mm.
• Đường kính trục: 5mm. Đầu trục vát phẳng, giúp puli/khớp nối không đỡ bị lỏng khi hoạt động.
• Cường độ định mức 1.5A, góc quay mỗi bước 1.8°.
• Động cơ gồm có 2 cực.
• Mô-men xoắn: 400 Nmm.
• Quán tính: 57g-cm².
• Trọng lượng: 300gr.
• Công suất phù hợp cho máy in 3D và CNC mini.
• Ít tỏa nhiệt, chuyển động êm.



Hình 5. Cụm động cơ sau khi phân rã.

Động cơ bước là một bộ phận rất quan trọng, quyết định đến toàn bộ cơ cấu chuyển động của máy. Nó có tác dụng truyền chuyển động xoay tròn đến bộ truyền bánh răng, làm cho bộ truyền bánh răng hoạt động và máy sẽ hoạt động.

Để liên kết bộ truyền bánh răng với động cơ, ta sẽ liên kết bánh răng nhỏ với động cơ bước bằng phương pháp nối trục. Ta sẽ nối trục động cơ bước với bánh răng nhỏ thông qua một khớp nối trục bằng kim loại (Hình 5).

3.4. Thiết kế bánh răng (Hình 6)

Bộ phận truyền động là một phần rất quan trọng của bộ máy, nhiệm vụ là truyền và biến đổi tốc độ cho phù hợp với tốc độ của các bộ phận trong máy.

Chuyển động chủ yếu của máy hàn là chuyển động xoay tròn và chúng ta có thể tùy chỉnh được tốc độ, góc quay của điện cực để cho ra mối hàn ổn định. Vì thế, nhóm quyết định chọn bộ truyền bánh răng trụ thẳng làm bộ phận truyền động của máy hàn.

Vì những ưu điểm của bộ truyền này:

• Có kích thước nhỏ gọn, khả năng truyền lực lớn.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

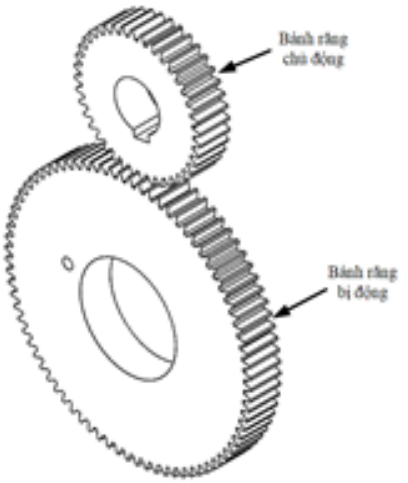
• Độ bền cao.

• Dễ dàng thay thế cũng như lắp đặt trong hệ thống máy móc.

• Hiệu suất làm việc của bánh răng trụ thẳng cao đạt từ 97% đến 99%.

• Tỉ số truyền luôn không đổi và kết hợp nhiều bộ bánh răng trụ thẳng tạo ra nhiều tỉ số truyền.

Vật liệu của bánh răng trụ thẳng nhóm chọn là thép C45 vì những ưu điểm sau: Do có độ bền kéo từ 570-690Mpa, thép C45 có khả năng chống bào mòn, chống oxy hóa tốt và chịu được tải trọng cao. Tính đàn hồi tốt, khả năng chịu được va đập mạnh của thép C45 cũng được thể hiện bởi độ bền kéo và giới hạn chảy cao. Vật liệu dễ tìm kiếm trên thị trường, giá thành cũng vừa phải.



Hình 6. Cặp bánh răng trụ thẳng

4. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

4.1. Chuẩn bị máy hàn với khí Argon

• Máy hàn TIG mà nhóm sử dụng trong đề tài này là máy hàn LIN COLNZONTER TIG-200 W120 bao gồm cả hàn TIG và hàn que.

• Nhóm sử dụng khí bảo vệ là khí Argon được trữ trong các bình khí Argon có dung tích 40 lít.

• Nhóm đã dùng phương pháp cắt laser để cắt ra hai tấm phôi inox 201, dày 3 mm có dạng hình chữ nhật và khoét các lỗ có đường kính 42.9 mm và 10.5 mm để gá các phôi ống và bulong M10.

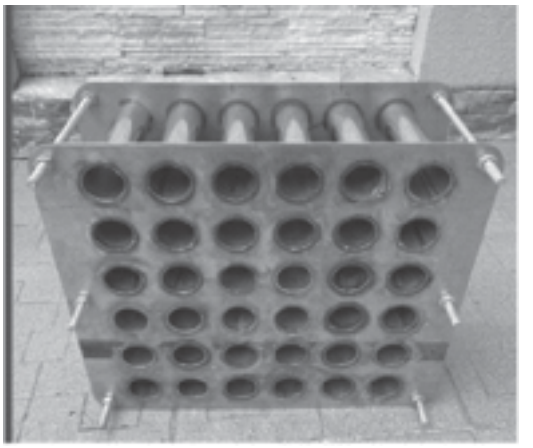
• Nhóm đã cắt nhỏ các phôi ống Ø42.7, inox 201, dày 1,5 mm thành từng đoạn nhỏ có chiều dài 16 cm.

Ta tiến hành lắp ráp theo các bước sau:

➢Lắp hai tấm inox lại với nhau bằng các bulong và đai ốc M10 để cho cứng vững và vuông góc với mặt đất.

➢ Sau đó, ta sẽ gá hết các phôi ống lên cả hai tấm inox.

➢ Cuối cùng, ta sẽ tăng, giảm khoảng cách hai tấm inox để cho mặt đầu của ống và tấm inox là bằng nhau.



Hình 7. Bộ phôi hoàn chỉnh

(*)Thông số hàn: Trong nghiên cứu này, các thông số hàn sẽ được tiến hành như Bảng 1. ☞

Bảng 1. Thông số hàn

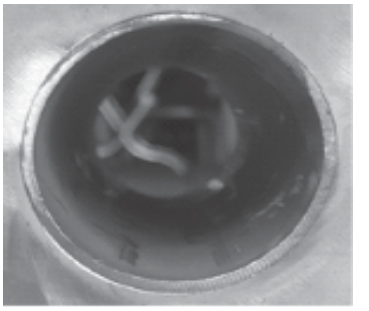
Bề dày (mm)	1.6	2.4	3.2	4.8	6.4	12.7
Đường kính điện cực (mm)	1.6	1.6	2.4	2.4	3.2	3.2
Dòng điện hàn (A)	80÷120	100÷160	120÷200	150÷250	200÷350	225÷375
Điện áp hàn (V)	12	12	12	12	12	12
Đường kính dây hàn (mm)	1.6	1.6	1.6	2.4	3.2	3.2
Tốc độ hàn min (mm)	250	250	250	200	200	200
Đường kính mỏ phun (mm)	9.5	9.5	9.5	9.5	12.5	12.5
Lưu lượng khí bảo vệ min (lít)	10	10	10	10	12	12

4.2. Kết quả thử nghiệm

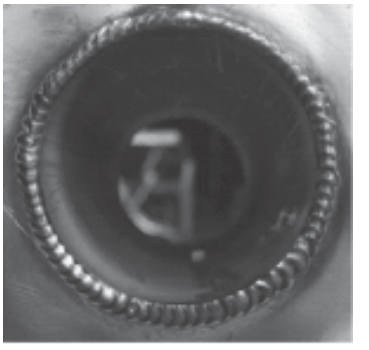
Trong thí nghiệm này, các thông số hàn được cố định bao gồm lưu lượng khí bảo vệ, chiều dài hồ quang, chu kỳ xung hàn và tốc độ hàn, chỉ thay đổi biến dòng điện hàn nhằm khảo sát ảnh hưởng của cường độ dòng đến hình dạng và chất lượng mối hàn ống.

Khi dòng điện hàn nằm trong khoảng 74 A – 84 A, tiết diện ngang của mối hàn cho thấy dạng phẳng và hơi dẹt, bề mặt mối hàn không mịn, vảy hàn phân bố đều nhưng độ ngấu thấp, kim loại nóng chảy không thâm nhập đủ vào thành ống. Hiện tượng này xuất phát từ năng lượng cung cấp không đủ để duy trì vùng hồ quang ổn định, khiến quá trình chảy loãng kim loại hạn chế và dẫn đến liên kết yếu.

Khi dòng điện tăng lên khoảng 86 A – 92 A, hình dạng mối hàn được cải thiện đáng kể. Bề mặt mối hàn trở nên mịn và lồi nhẹ, vảy hàn phân bố đồng đều, đường hàn ổn định hơn, độ ngấu đạt mức vừa đủ để đảm bảo độ bền liên kết. Tuy nhiên, ở một số mẫu, hiện tượng cháy cạnh nhẹ có thể xuất hiện do nhiệt tập trung cục bộ khi hồ quang di chuyển chậm. Mặc dù vậy, nhìn chung đây là dải dòng điện cho chất lượng hàn tốt nhất về cả thẩm mỹ lẫn độ bền.



Hình 8. Liên kết chưa hàn



Hình 9. Liên kết sau hàn

Khi dòng điện tiếp tục tăng từ 94 A – 100 A, tiết diện ngang mối hàn trở nên rộng và lồi cao, bề mặt mối hàn vẫn mịn nhưng xuất hiện hiện tượng cháy cạnh rõ rệt hơn. Độ ngấu tăng mạnh, thậm chí ở một số trường hợp có nguy cơ xuyên thủng thành ống. Điều này là do nhiệt năng hồ quang quá lớn trong khi tốc độ hàn của máy khá chậm, dẫn đến thời gian nung nóng dài và vùng ảnh hưởng nhiệt rộng, dễ gây biến dạng hoặc khuyết tật nóng chảy.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Ngoài ra, do chu kỳ hàn và thời gian nghỉ giữa các mối khá ngắn, khi sử dụng dòng điện thấp, kim loại không đủ thời gian để đạt đến nhiệt độ nóng chảy tối ưu, khiến mối hàn yếu. Ngược lại, khi dòng quá cao, năng lượng nhiệt dư thừa làm tăng nguy cơ hư hỏng phôi và giảm chất lượng tổng thể.

Từ các kết quả thực nghiệm, có thể kết luận rằng dải dòng điện từ 86 A đến 92 A cho ra mối hàn có hình dạng đồng đều, bề mặt mịn, độ ngấu đạt yêu cầu và ít khuyết tật nhất. Đây được xem là khoảng giá trị dòng điện tối ưu cho quá trình hàn ống với các thông số cố định nêu trên, đảm bảo cả tính cơ học và thẩm mỹ của mối hàn.

5. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy dòng điện hàn là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến hình dạng, độ ngấu và chất lượng tổng thể của mối hàn ống. Khi các thông số khác được giữ cố định, việc thay đổi dòng điện trong khoảng 74 A – 100 A cho thấy sự khác biệt rõ rệt về tiết diện và tính ổn định của mối hàn. Ở mức dòng thấp (74 A – 84 A), độ ngấu yếu và bề mặt không mịn; ở mức cao (94 A – 100 A), mối hàn lồi, ngấu sâu nhưng dễ cháy cạnh hoặc thủng phôi. Dải dòng trung bình 86 A – 92 A cho kết quả tối ưu nhất với bề mặt mối hàn mịn, vảy đều, độ ngấu đạt yêu cầu và ít khuyết tật. Như vậy, khoảng dòng này được xác định là giá trị dòng điện hàn hợp lý cho máy hàn ống trong điều kiện thực nghiệm, đảm bảo đồng thời chất lượng cơ học, tính ổn định và hiệu quả gia công.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Huỳnh Đỗ Song Toàn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Hoàng Văn Hướng, Lê Văn Tú, Trương Đình Trí, Hà Minh Đức, Huỳnh Đỗ Song Toàn.

(*) Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện và hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này (Mã số đề tài: T2024-24).❖

Ngày nhận bài: **16/10/2025**
Ngày phản biện: **30/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Gao, Y., Zhao, H., & Zhang, H. (2003), "*The application of automatic welding technology in West-to-East gas pipeline project*". Oil & Gas Storage and Transportation, 22(1), 53-55.

[2]. Wang, R., & Guo, R. J. (2011), "*Developments of automatic girth welding technology in pipelines*". Electrical Welding Machine, 41(4), 53-55.

[3]. Anxin, H., Su, X., & Huafeng, S. (2006), "*Current situation of automatic welding of domestic long-distance pipelines*". Natural Gas and Oil, 24(6), 12-14.

[4]. Li, H., Wei, T., & Ji, L. (2010), "*High-grade line pipe and high-pressure transportation: Significant progress of oil and gas transportation pipeline technology in China*". China Engineering Science, 12(3), 84-90.

[5]. Yapp, D., & Blackman, S. A. (2004), "*Recent developments in high productivity pipeline welding*". Brazilian Manufacturing Congress, 26, 89-97.

[6]. Yu, Z., Zhang, W., & Zhang, Z. (2012), "*Development trend of China's gas pipeline and relevant technical problems*". Oil & Gas Storage and Transportation, 31(4), 321-325.

[7]. Kim, R.-H., Choi, G.-D., Kim, C.-H., Cho, D.-W., & Na, S.-J. (2012), "*Arc characteristics in pulse-GMA welding with acute groove angles*". Welding Journal, 91(4), 101-105.

[8]. Kim, J. W. (1991), "*A study on the analysis of weld pool convection and seam tracking by considering the arc length characteristics in GMA welding*" (Doctoral dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology [KAIST], Daejeon, Korea).

[9]. Moon, H.-S., & Ko, S.-H. (2008, July 6-11), "*Automatic pipeline welding system equipped with six welding carriages, laser vision sensor and arc sensor for offshore pipeline laying*". In Proceedings of the ISOPE Conference (Vancouver, BC, Canada).

[10]. Moon, H.-S., & Na, S. (1996), "*A study on algorithm for seam tracking by considering weld defects in horizontal fillet welding*". Korean Welding Society Journal, 2(3), 139-141.

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ CHẾ TẠO HỆ THỐNG THIẾT BỊ XỬ LÝ CHẤT THẢI CHĂN NUÔI QUY MÔ CÔNG NGHIỆP

RESEARCH ON DESIGN AND MANUFACTURE OF LIVESTOCK WASTE TREATMENT SYSTEM AT INDUSTRIAL SCALE

Nguyễn Đình Tùng[1,2]
[1]Trường Đại học Công nghiệp Việt – Hung
[2]Viện Nghiên cứu Thiết kế Chế tạo Máy nông nghiệp
Email liên hệ: tungbo1983@gmail.com

TÓM TẮT

Nội dung bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thiết kế chế tạo hệ thống thiết bị xử lý chất thải rắn từ chăn nuôi lợn ở quy mô công nghiệp. Kết quả này đưa ra được thị trường Việt Nam một "mẫu" thiết bị hiện đại đồng bộ, có nhiều tính mới, tính khoa học về công nghệ so với các mẫu thiết bị tương tự trên thị trường Việt Nam có nguồn gốc nhập khẩu từ Trung Quốc, Hàn Quốc, Cộng hòa Liên bang Đức, ví dụ như: hệ thống cấp khí và cân bằng áp suất trong buồng ủ; thiết bị đảo liệu linh hoạt; chất lượng đảo trộn nguyên liệu được đồng đều; tự động cấp khí nóng, lạnh; tự động điều chỉnh được nhiệt độ khí cấp vào buồng ủ,... Ngoài ra, hệ thống thiết bị xử lý chất thải rắn chăn nuôi có kết nối với thiết bị lọc khí khử mùi theo phương pháp lọc hữu cơ, vì vậy đảm bảo đáp ứng yêu cầu về môi trường khí thải. Công suất của hệ thống 30 tấn/modul phù hợp với các trang trại chăn nuôi lớn, công ty chăn nuôi quy mô công nghiệp, với quy mô này đem lại hiệu quả đầu tư và kinh tế khi đưa vào vận hành sản xuất.

Từ khóa: *Chất thải rắn chăn nuôi; Hệ thống xử lý chất thải chăn nuôi; Hệ thống ủ phân.*

ABSTRACT

The content of the article presents the results of research on the design and manufacture of a system of equipment for treating solid waste from pig farming on an industrial scale. This result brings to the Vietnamese market a modern, synchronous "model" of equipment with many novelties and scientific technology compared to similar equipment models on the Vietnamese market imported from China, Korea, and the Federal Republic of Germany, for example: air supply system and pressure balance in the incubation chamber; flexible material mixing equipment; uniform quality of mixing raw materials; automatic hot, cold air supply; automatic adjustment of air temperature supplied to the incubation chamber, etc. In addition, the system of equipment for treating solid waste from livestock farming is connected to an air filter and deodorizer using the organic filtration method, thus ensuring compliance with environmental requirements for exhaust gas. The system capacity of 30 tons/module is suitable for large livestock farms and industrial-scale livestock companies. This scale brings investment efficiency and economy when put into production operation.

Keywords: *Livestock solid waste; Livestock waste treatment system; Composting system.*

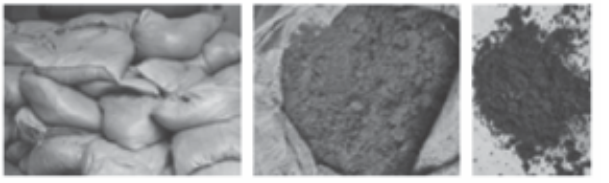
1. MỞ ĐẦU

Việt Nam là đất nước sản xuất nông nghiệp, trong đó chăn nuôi chiếm tỷ trọng cao trong chuỗi sản xuất nông nghiệp, đóng góp một phần vào tăng trưởng kinh tế trong những năm gần đây. Để có sự tăng trưởng đó, những năm gần đây quy mô và năng suất chăn nuôi gia súc ngày một tăng và mở rộng. Tuy nhiên, do tập quán và thói quen truyền thống của đất nước nông nghiệp đã "ăn sâu" vào tiềm thức của người nông dân, ngoài ra người nông dân Việt Nam chưa có điều kiện để được đào tạo và tiếp cận khoa học kỹ thuật một cách "khoa học, bài bản" như các nước trên thế giới. Vì thế, chăn nuôi vẫn theo hình thức "tự phát", theo kinh nghiệm và phân tán, công nghệ chăn nuôi lạc hậu, ít đầu tư về công nghệ, thiết bị. Hơn nữa, chất thải rắn chăn nuôi thải ra đều không qua xử lý mà phần lớn thải trực tiếp ra môi trường, vì vậy gây ô nhiễm môi trường và làm thất thoát nguồn "tài nguyên" quý giá mà ta hoàn toàn có thể sử dụng để sản xuất thành phân bón hữu cơ chất lượng cao [1].

Để tăng hiệu quả kinh tế cho các cơ sở, doanh nghiệp chăn nuôi gia súc và giảm thiểu ô nhiễm môi trường thì việc nghiên cứu tiềm năng và nguồn chất thải từ chăn nuôi, khảo sát công nghệ xử lý và thiết lập/xây dựng phương án công nghệ, thiết bị để "khuyến cáo" cho các nhà đầu tư cần ứng dụng đồng bộ công nghệ từ khâu chăn nuôi, chế biến và xử lý chất thải chuyển thành nguồn phân bón hữu cơ vi sinh chất lượng cao sử dụng cho các loại cây trồng nông nghiệp của Việt Nam trong tương lai là rất cần thiết. Bởi vậy, nhiệm vụ khoa học này ra đời/thực hiện có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao, góp phần thúc đẩy ứng dụng khoa học và công nghệ vào trong sản xuất nông nghiệp công nghệ cao làm ổn định kinh tế và tạo công ăn việc làm cho xã hội nói chung và cho các địa phương có tỷ lệ chăn nuôi cao nói riêng [1, 2]. Trước thực trạng như vậy, việc nghiên cứu thiết kế chế tạo hệ thống thiết bị xử lý chất thải rắn từ chăn nuôi lợn quy mô công nghiệp để đưa ra thị trường Việt Nam "mẫu" hệ thống dây chuyền thiết bị có nhiều ưu điểm và nổi trội về đặc tính công nghệ, chi phí đầu tư, vận hành so với thiết bị nhập khẩu là cần thiết và có ý nghĩa khoa học, thực tiễn cao, sẽ đáp ứng được yêu cầu thực tiễn đòi hỏi.

2. VẬT LIỆU, PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

- Vật liệu nghiên cứu: Nguồn phân lợn được lấy từ chuồng trại; Hệ thống thiết bị xử lý phụ phẩm chăn nuôi gia súc thành nguyên liệu sản xuất phân bón vi sinh hữu cơ chất lượng cao quy mô công nghiệp; Các dụng cụ hỗ trợ lấy mẫu [1].



Hình 1. Hình ảnh nguyên liệu trước khi xử lý sau khi ép giảm ẩm [1]

- Phương pháp nghiên cứu: Phương pháp nghiên cứu lý thuyết (tính toán) được sử dụng trong nghiên cứu này dựa trên thiết kế hệ thống thiết bị ủ xử lý dạng khép kín tự động [1].

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

3.1. Kết quả tính toán

- Kết cấu đường ống dẫn khí: Đường ống dẫn không khí làm nhiệm vụ đưa không khí từ quạt gió tới các miệng thổi gió (đường ☞

ống cấp gió), hoặc từ miệng hút tới quạt gió hoặc quạt thải gió; nghĩa là bao gồm: đường ống dẫn gió chính; các ống nhánh trên đường ống cấp gió; đường ống gió hồi; đường ống thải gió,... [3-5].

- Hệ thống kênh ngầm: Trong nghiên cứu này, các kênh dẫn gió ngầm có tiết diện ngang hình chữ nhật, hình vuông, ống định hình dạng tròn. Các kênh ngầm thường được xây dựng đồng bộ cùng với toàn bộ buồng ủ [3-5].

- Quan hệ giữa cột áp tĩnh và tốc độ không khí ở miệng thổi: Như đã biết, vị trí tốc độ không khí ở vùng làm việc v_L là một đặc trưng quan trọng đối với hệ thống phân phối không khí và do trị số tốc độ ra v_x quyết định. Trị số v_x được định nghĩa [3-5]:

$$v_x = \frac{g_x}{f_x}, \text{ m/s}$$

Trong đó: f_x – Diện tích tiết diện ngang của miệng thổi, m²; g_x – Lưu lượng không khí qua miệng thổi, m³/s.

- Phân bố cột áp tĩnh trên đường ống hút: Phương trình Bernoulli viết cho tiết diện có miệng hút đầu tiên (cột áp tĩnh H_1, tốc độ dòng trong ống dẫn ω_1 vào cho tiết diện có miệng hút thứ n (H_n, ω_n) có dạng [3-5]:

$$H_1 + \frac{\rho.\omega_1^2}{2} = H_n + \frac{\rho.\omega_n^2}{2} + \sum \Delta p \quad (1)$$

Hay:

$$H_n = H_1 - \frac{\rho}{2}(\omega_n^2 - \omega_1^2) - \sum \Delta p, \text{ Pa} \quad (2)$$

- Tính toán lựa chọn công nghệ và thiết bị sơ chế compost từ phân gia súc (lợn): ở đây tính toán cho quy mô năng suất Q = 30 tấn/modul/ngày (đầu vào), đầu ra Q = 15 tấn/ngày (sau ủ). Theo công nghệ sơ chế biến compost từ phân lợn với năng suất Q = 50 tấn tươi/ngày, khối lượng riêng của nguyên liệu đầu vào tính trung bình m = 900 kg/m³.

- Tính toán một số thông số công nghệ: Nguyên liệu được nạp với chiều cao h = 1,2m. Hệ thống cào liệu và gạt liệu được điều khiển tự động hoàn toàn, nạp hết buồng này đến buồng khác (khi có nhiều buồng).

- Tính toán/lựa chọn nguyên lý, kết cấu ống, đầu cấp khí cho buồng ủ:

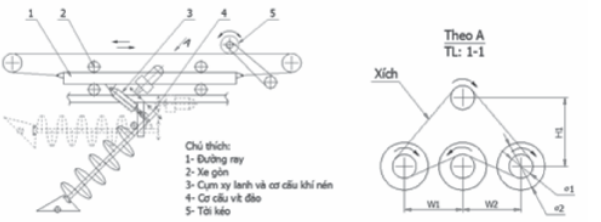
Nguyên tắc thiết kế/lựa chọn phân phối/cấp gió vào buồng ủ: Mục tiêu là lượng khí (nóng, lạnh) được cấp vào buồng ủ từ phía dưới cần được phân phối đều trên diện tích sàn buồng ủ, hơn nữa khí cần được len lỏi đều qua lớp nguyên liệu ủ càng đều càng tốt, như vậy sẽ "kích thích" quá trình lên men nhanh hơn. Vì vậy, nguyên lý của "đầu cấp/đầu phun khí và phải phù hợp để sao cho hạn chế nguyên liệu bít vào lỗ cấp khí. Ngoài ra, vận tốc khí cũng phải đảm bảo đủ lớn để "xuyên" qua lớp nguyên liệu. Theo kết quả nghiên cứu của một số tác giả trong lĩnh vực "công nghệ tầng sôi", ta thấy vận tốc của dòng khí thông thường nằm trong khoảng (0,15 đến 1,25 m/s) tùy thuộc vào diện tích của sàn cấp khí (ở đây là diện tích buồng ủ) và kích thước độ lớn của "hạt" nguyên liệu. Ở đây, buồng ủ có diện tích lớn, hơn nữa kích thước hạt nguyên liệu nhỏ, ngoài ra nguyên liệu còn có độ ẩm lớn, vì thế dòng khí sẽ rất khó để xuyên qua lớp nguyên liệu trong buồng ủ với chiều cao lớp nguyên liệu cần ủ (cần xử lý) từ 1,0 đến 1,2m [3-7].

Trong trường hợp này, khí được dẫn bằng các đường ống và phân phối trực tiếp vào luống được bố trí trong buồng ủ. Ta có thể duy

trì tốc độ khí trong vòi phun vượt quá tốc độ thoát ra của hơi ẩm (hơi nóng ẩm) để tránh sự thổi ngược nào có thể xảy ra [5-7].

Vì thể tích của khí trong dàn ống nhỏ hơn đáng kể so với trong buồng cấp khí lớn, khả năng nổ cũng giảm đáng kể. Một phương pháp thay thế để tránh nguy cơ nổ là bơm/cấp khí trực tiếp vào các vòi phun không khí của buồng ủ là rất hợp lý [5-7].

- Tính toán lựa chọn nguyên lý thiết bị đảo trộn: Từ cơ sở lý thuyết tính toán, xây dựng, thiết lập sơ đồ nguyên lý cho máy đảo trộn compost trong buồng ủ được thể hiện như trên Hình 2 sau [1].



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý máy đảo trộn compost sử dụng cho buồng ủ 20-30 tấn/bin/lần xử lý [1]

Kết quả quá trình tính toán được thống kê như trong bảng 1 dưới đây.

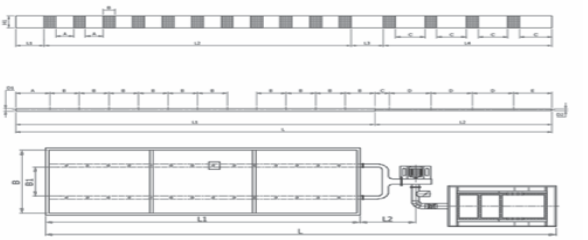
Bảng 1. Kết quả tính toán thiết bị đảo trộn di động

TT	Thông số kỹ thuật	Đơn vị	Ký hiệu	Giá trị
1	Thời gian đảo	Phút	T	1-2
2	Công suất động cơ tời kéo cho cụm thiết bị đảo trộn	kW	N	2,2
3	Tốc độ động cơ tời kéo cho cụm thiết bị đảo trộn	v/ph	n	30
4	Số trục vít đảo	Cái	a	3
5	Góc nghiêng β của trục vít đảo so với phương thẳng đứng	Độ	β	75
6	Đường kính ngoài của cánh vít	m	D	0,55
7	Đường kính trong của trục vít	m	d	0,45
8	Tốc độ quay của trục vít	v/phút	n	100
9	Công suất đảo trộn của thiết bị đảo trộn	kW	N	15

3.2. Kết quả thiết kế

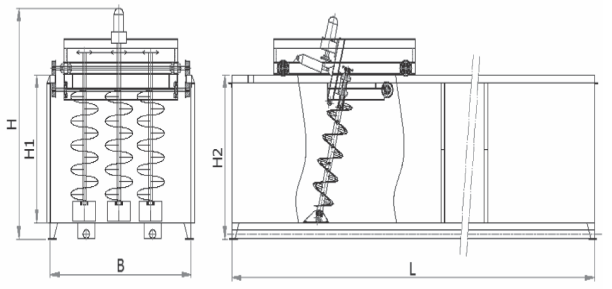
Cơ sở khoa học để thiết kế các máy móc trong hệ thống dựa trên các kết quả tính toán nêu trên. Từ đó làm cơ sở để xây dựng/thiết kế bản vẽ chung cũng như các bản vẽ cụm chi tiết, chi tiết chính cho các máy móc trong hệ thống. Kết quả thiết kế được thể hiện thông qua các bản vẽ tổng thể/bản vẽ lắp, bản vẽ chi tiết cho toàn bộ thiết bị, cụm chi tiết, chi tiết được đính kèm thuyết minh này. Dưới đây, tác giả trình bày tóm lược một số kết quả chính về thiết kế hệ thống [1].

- Đường ống, kênh cấp khí: Trong nội dung này trình bày kết quả thiết kế chế tạo đối với cụm đường ống cấp khí. Hình 3 là kết quả thiết kế đối với cụm đường ống cấp khí [1].



Hình 3. Kết quả xây dựng bản vẽ tổng thể thiết kế kênh và đường ống cấp khí [1]

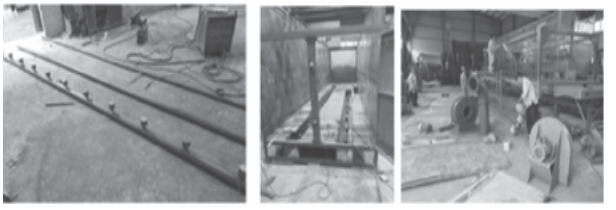
- Thiết bị đảo trộn: Từ kết quả tính toán đối với thiết bị đảo trộn compost trong buồng ủ như trên, tác giả đã thiết kế bản vẽ cho máy đảo trộn compost trong buồng ủ được thể hiện như trên Hình 4 sau [1].



Hình 4. Kết quả xây dựng bản vẽ tổng thể thiết kế cụm thiết bị đảo trộn [1]

3.3. Kết quả chế tạo và lắp đặt hệ thống

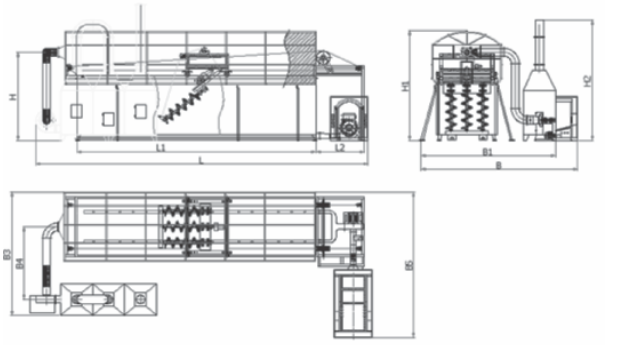
Trên Hình 5 đến Hình 8 trình bày/thể hiện kết quả chế tạo và lắp đặt hệ thống thiết bị ủ/xử lý phân lợn làm nguyên liệu sản xuất phân bón hữu cơ chất lượng cao [1].



Hình 5. Hình ảnh kết quả chế tạo sàn buồng ủ và kênh, ống dẫn, cấp khí [1]



Hình 6. Hình ảnh kết quả chế tạo thân buồng ủ và cụm thiết bị đảo liệu [1]



Hình 7. Kết quả xây dựng bản vẽ thiết kế và lắp đặt tổng thể toàn bộ hệ thống thiết bị [1]



Hình 8. Hình ảnh kết quả chế tạo và lắp đặt toàn bộ hệ thống thiết bị [1]

4. KẾT LUẬN

Nội dung bài báo đã đưa ra được kết quả nghiên cứu tính toán, thiết kế, chế tạo và lắp đặt hoàn chỉnh hệ thống thiết bị buồng ủ để xử lý chất thải chăn nuôi (ở đây là phân lợn) quy mô công nghiệp, năng suất 30 tấn/modul/bin ủ, với nhiều tính mới từ khâu cấp khí, đảo liệu;

Đã đưa ra trên thị trường Việt Nam "mẫu" hệ thống thiết bị có nhiều điểm nổi trội so với thiết bị nhập khẩu từ Hàn Quốc, Trung Quốc, Cộng hòa Liên bang Đức về tính ưu việt trong công nghệ, giá thành đầu tư ban đầu cho doanh nghiệp, chi phí vận hành trong quá trình sản xuất và bảo dưỡng, thay thế, chăm sóc sau bán hàng;

Giảm "chảy máu ngoại tệ" ra thị trường nước ngoài; đặc biệt là làm chủ được công nghệ chế tạo đối với ngành cơ khí chế tạo trong nước.

Nên tiếp tục nghiên cứu tính toán, thiết kế đối với hệ thống thiết bị xử lý cho các phụ phẩm, chất thải khác và xét đến phương án ứng dụng điều khiển tự động (IoT) theo xu thế ứng dụng công nghiệp 4.0; Ứng dụng điều khiển điện thoại từ xa và lưu trữ dữ liệu.

Lời cảm ơn:

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Viện Nghiên cứu Thiết kế Chế tạo Máy nông nghiệp (Viện Riam) và Bộ Công Thương đã cấp kinh phí để Viện Riam thực hiện đề tài nghiên cứu cấp Bộ mã số: Mã số: 158.21.ĐT.BO/HĐKHCN.❖

Ngày nhận bài: **23/10/2025**
Ngày phản biện: **30/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Đình Tùng, Nguyễn Văn Tiến và cs. (2024), Báo cáo tổng kết Nhiệm vụ NCKH cấp Bộ "*Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo hệ thống thiết bị xử lý phụ phẩm chăn nuôi gia súc thành nguyên liệu sản xuất phân bón vi sinh hữu cơ chất lượng cao quy mô công nghiệp*", mã số: 158.21.ĐT.BO/HĐKHCN.

[2]. Kowalski, Z., Makara, A., Matysek, D., Hoffmann, J., Hoffmann, K., (2013), "*Pig manure treatment by filtration*". Acta Biochim. Pol. 60, 839e844.

[3]. Schiller, L., Hahnemann, H.W., Linke, W., "*Strömung durch Rohre*". In: Schmidt, W. (Hrsg.) Landolt-Börnstein, Bd. 4, 6. Aufl. Springer, Berlin (1995).

[4]. Schmidt, E.F., "*Wärmeübertragung und Druckverlust in Rohrschlangen*". Chemie-Ing-Techn. 39, 781-789 (1996).

[5]. Gnielinski, V., "*Berechnung des Druckverlustes in glatten konzentrischen Ringspalten bei ausgebildeter laminarer u. turbulenter isothermer Strömung*". Chem.-Ing.-Tech. (2007).

[6]. Aziz, S.Q., Imad, A.O. and Mustafa, J.S. (2018), "*Design And Study For Composting Process Site*". International Journal of Engineering Inventions.7(9): 9-18.

[7]. Chaher, N.E.H., Chakchou, M., Engler, N., Nassour, A., Nelles, M. and Hamdi, M. (2020), "*Optimization of Food Waste and Biochar In-Vessel Co-Composting*". Sustainability. 12: 1-20.

NGHIÊN CỨU GIẢM RUNG KHI ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHANH ABS BẰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

AN INVESTIGATION INTO THE REDUTION OF THE CHATTERING PHENOMENON IN ANTI-LOCK BRACKING SYSTEM CONTROL USING SLIDING MODE CONTROL

ThS. **Nguyễn Đức Trung***, PGS,TS. **Trần Văn Như**, **Bùi Minh Nghĩa, Nguyễn Việt Hoàng**
Trường Đại học Giao thông vận tải
**Email: trungnd@utc.edu.vn*

TÓM TẮT

Mục tiêu của bài báo là thiết kế bộ điều khiển hệ thống chống hãm cứng bánh xe khi phanh (Anti-lock Braking System – ABS) dựa trên thuật toán điều khiển chế độ trượt (Sliding Mode Control – SMC) để điều khiển độ trượt bánh xe xung quanh độ trượt mục tiêu. Các tham số tùy chọn trong bộ điều khiển SMC được phân tích và lựa chọn phù hợp, đồng thời khắc phục được hiện tượng rung (chattering) của bộ điều khiển SMC khi đưa giá trị mặt trượt, s = 0. Các luật điều khiển đề xuất xây dựng dựa vào điều kiện ổn định Lyapunov, sau đó được kiểm tra qua mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink. Với hai phương án được đưa ra, các kết quả mô phỏng cho thấy chúng đều có khả năng điều khiển ổn định độ trượt bánh xe trên các loại đường khác nhau. Trong đó, bộ điều khiển thứ hai đã loại bỏ hoàn toàn hiện tượng chattering, giúp cải thiện chất lượng điều khiển.

Từ khóa: *Hệ thống chống bó cứng bánh xe khi phanh; Thuật toán điều khiển trượt; Tham số tuỳ chọn; Giá trị bề mặt trượt; Hiện tượng rung.*

ABSTRACT

This paper aims to design an anti-lock braking system (ABS) controller that utilizes the sliding mode control (SMC) algorithm to regulate wheel slip in relation to a target slip value. The optional parameters in the SMC controller are analyzed and selected appropriately, and the chattering phenomenon is overcome when the slip surface value, s = 0, is set. The proposed control laws are built based on the Lyapunov stability condition and then verified through simulation using Matlab-Simulink software. With the two proposed solutions, the simulation results indicate that they are both capable of stably controlling the wheel slip on different types of roads. In particular, the second controller eliminates the chattering phenomenon, helping to improve the control quality.

Keywords: *Anti-lock Brake System; Sliding Mode Control Algorithm; Optional Parameters; Slip Surface Value; Chattering Phenomenon.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

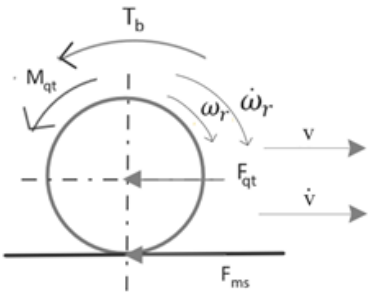
ABS là hệ thống an toàn quan trọng trên ô tô, việc nghiên cứu thuật toán điều khiển hệ thống phanh ABS đã và đang được rất nhiều nhà khoa học quan tâm. Hai yếu tố quan trọng khi xây dựng thuật toán điều khiển đó là đặc tính phi tuyến và các thông số không chắc chắn trong mô hình điều khiển hệ thống phanh ABS. Yếu tố phi tuyến đến từ mối quan hệ phi tuyến của hệ số ma sát giữa lốp xe – đường và độ trượt bánh xe. Các yếu tố không chắc chắn bao gồm điều kiện đường, phản lực từ đường tác dụng lên bánh xe, lực gió, lực bên… Các hướng nghiên cứu tập trung vào việc giải quyết hai yếu tố này. Trong nghiên cứu [1], để cải thiện chất lượng điều khiển, ngoài sử dụng cảm biến tốc độ bánh xe, tác giả sử dụng thêm cảm biến đo mô men bánh xe. Việc này, giúp bộ điều khiển có thông tin trực tiếp mô men đầu vào và đầu ra của hệ thống là gia tốc góc của bánh xe giúp hiểu biết phản ứng của hệ thống tốt hơn và đưa ra tác động xử lý hiệu quả hơn. Tuy nhiên, việc đưa vào cảm biến mô men bánh xe làm cho hệ thống phức tạp hơn. Để nâng cao chất lượng điều khiển, nhiều nghiên cứu tập trung vào cải thiện thuật toán điều khiển mà không cần thêm cảm biến, cải thiện chất lượng điều khiển với điều kiện đường khác nhau. Sử dụng hàm Lyapunov để tổng hợp bộ điều khiển thích nghi với sự thay đổi điều kiện bám khác nhau [2], sử dụng phương pháp điều khiển trượt (SMC – Sliding Mode Control) để đáp ứng được với sự thay đổi điều kiện bám mặt đường và sự không chính xác của mô hình [5]. Trong nghiên cứu [4], tác giả sử dụng phương pháp điều khiển tối ưu toàn phương (LQR) để so sánh với các bộ điều khiển SMC và điều khiển PID. Để sử dụng bộ điều khiển SMC và LQR cũng đòi hỏi nhiều cảm biến hơn để đo các thông số động học của hệ thống. Trong thực tế, nhiều bộ điều khiển đơn giản cũng phát huy được hiệu quả điều khiển, như bộ điều khiển ON-OFF [3], bộ điều khiển PID [4]. Tuy nhiên, hiệu quả điều khiển chỉ phát huy được trong điều kiện bám nhất định. Bộ điều khiển SMC có khả năng điều khiển các hệ thống phi tuyến mạnh, có khả năng ổn định hệ thống có tham số không chắc chắn trong mô hình điều khiển. Trong các nghiên cứu, bộ điều khiển SMC cho thấy hiệu quả điều khiển tốt với sự thay đổi điều kiện bám khác nhau, sự không chính xác của mô hình. Tuy nhiên, bộ điều khiển này có nhược điểm gây ra hiện tượng rung ở tần số lớn (hiện tượng chatering) trong hệ thống.

Mục tiêu của nghiên cứu là tìm phương pháp cải thiện chất lượng điều khiển của bộ điều khiển SMC cho hệ thống ABS nhằm giảm hiện tượng rung, khi bộ điều khiển đưa vector trạng thái về mặt trượt s = 0. Để đạt được mục đích trên, nghiên cứu tổng hợp một bộ điều khiển theo thuật toán SMC từ phương trình động lực học quay bánh xe và phương trình động lực học tịnh tiến ¼ xe , đánh giá và lựa chọn hai tham số tùy chọn k, ε của bộ điều khiển. Bộ điều khiển tổng hợp tồn tại hiện tượng chattering, nguyên nhân cốt lõi là sự tồn tại của hàm dấu trong luật điều khiển, khiến thành phần đi cùng hàm dấu luôn thay đổi từ -1 đến 1 và ngược lại làm luật điều khiển thay đổi gián đoạn. Để khử hiện tượng trên, đề tài sử dụng phương pháp lớp biên (Boundary Layer Method) làm "mềm" sự gián đoạn của hàm dấu bằng cách thay thế nó bằng một hàm liên tục trong một vùng lân cận của mặt trượt (s = 0). Việc đánh giá hiệu quả giảm rung của bộ điều khiển được thực hiện thông qua mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC PHANH

Trong quá trình phanh ô tô, mô men phanh sinh ra tại cơ cấu phanh, kết hợp với lực ☞

dọc tương tác của lốp với đường (lực phanh) sẽ làm tốc độ quay bánh xe chậm lại. Lực phanh theo hướng dọc cũng làm xe ô tô chuyển động chậm lại. Vì khối lượng quán tính của bánh xe nhỏ hơn rất nhiều so với tốc độ quán tính của xe, nên trong quá trình phanh, bánh xe là thành phần có xu hướng dừng trước, việc này sẽ làm độ trượt của bánh xe tăng lên làm giảm tính điều khiển khi phanh. Mô hình phân tích lực tác dụng lên bánh xe thể hiện trên hình 1 và động lực học phanh bánh xe được mô tả bằng phương trình vi phân (1), (2):



Hình 1. Mô hình động lực học phanh bánh xe khi phanh

$$m\dot{v} = -F_{ms} \tag{1}$$

$$J\dot{\omega}_r = -T_b + F_{ms}r_r \tag{2}$$

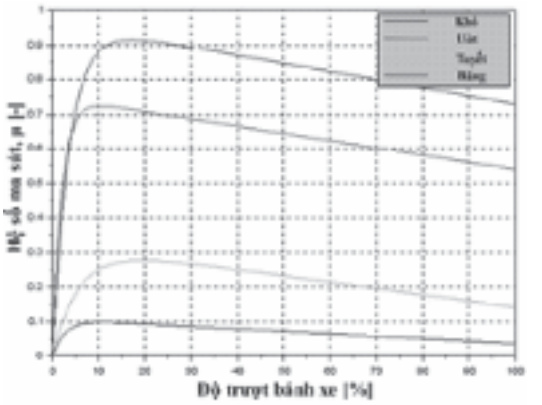
Trong đó: m - Khối lượng bánh xe; v - Vận tốc tâm bánh xe; F_{ms} - Lực tương tác của lốp và đường theo phương dọc (lực phanh); T_b - Mô men phanh tác dụng lên bánh xe; r_r - Bán kính bánh xe; ω_r - Tốc độ quay bánh xe; J - Mô men quán tính bánh xe.

Theo [3], [6], lực tương tác của lốp với đường là hàm của độ trượt bánh xe.

$$F_{ms} = mg\mu(\lambda) \tag{3}$$

Trong đó: μ(λ) - Hệ số ma sát giữa bánh xe và mặt đường; λ - Độ trượt bánh xe. Độ trượt bánh bánh xe được xác định:

$$\lambda = \frac{v - \omega_r r_r}{v} \rightarrow \lambda = 1 - \frac{\omega_r r_r}{v} \tag{4}$$



Hình 2. Đồ thị mối quan hệ giữa hệ số ma sát - độ trượt trên các loại đường

Lực ma sát lốp với đường đạt cực đại khi độ trượt đạt giá trị từ 10-20% tùy loại đường. Do vậy, hầu hết các nghiên cứu điều khiển hệ thống ABS đều lấy giá trị độ trượt 20% là giá trị độ trượt mục tiêu λ_d. Tại độ trượt này, lực phanh đạt giá trị gần cực đại, trong khi lực bám ngang đủ lớn để đảm bảo tính điều khiển khi phanh.

Theo [3], phương trình thực nghiệm mối quan hệ giữa hệ số ma sát theo phương dọc và độ trượt:

$$\mu(\lambda) = C_1(1 - e^{C_2\lambda}) - C_3\lambda \tag{5}$$

Trong đó: C_1, C_2, C_3 là các hệ số được xác định theo thực nghiệm (Bảng 1).

Bảng 1. Giá trị hệ số cho các mặt đường khác nhau (theo [3])

Mặt đường	C_1	C_2	C_3
Khô	1.2801	23.99	0.52
Ướt	0.857	33.82	0.347
Tuyết	0.1946	94.12	0.0646
Băng	0.05	306.3	0

3. XÂY DỰNG THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN SMC CHO HỆ THỐNG PHANH ABS

Gọi T_b là mô men phanh bánh xe, là tín hiệu điều khiển, e(t) là sai lệch độ trượt bánh xe mục tiêu λ_d và độ trượt bánh xe, ta có:

$$e(t) = \lambda_d - \lambda \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow \dot{e}(t) = \lambda_d - \dot{\lambda} \\ \Leftrightarrow \dot{e}(t) = -\dot{\lambda} \quad (7)$$

Chọn mặt trượt tích phân:

$$s(t) = e(t) + k\int e(t)\,dt \quad (8)$$

Trong đó: k là hằng số dương tùy chọn. Chọn hàm Lyapunov V:

$$V = \frac{1}{2}s^2$$

$$\rightarrow \dot{V} = \frac{1}{2}.2.s.\dot{s} = s.\dot{s}$$

Theo điều kiện ổn định Lyapunov, với hàm $V \geq 0$, $\dot{V} \leq 0$ thì hệ ổn định.

Như vậy, điều kiện để đảm bảo $e(t) \rightarrow 0$ thì $\dot{s}(t)s(t) < 0$. Để thỏa mãn điều kiện này, chọn $\dot{s}(t) = -\varepsilon sign(s(t))$ với ε là hằng số dương.

$$\rightarrow \dot{e} = -\varepsilon sign(s) - ke$$

Theo (4), (7), ta có:

$$\dot{\lambda} = -\frac{r_r\dot{\omega}_r}{v} + \frac{r_r\omega_r\dot{v}}{v^2}$$

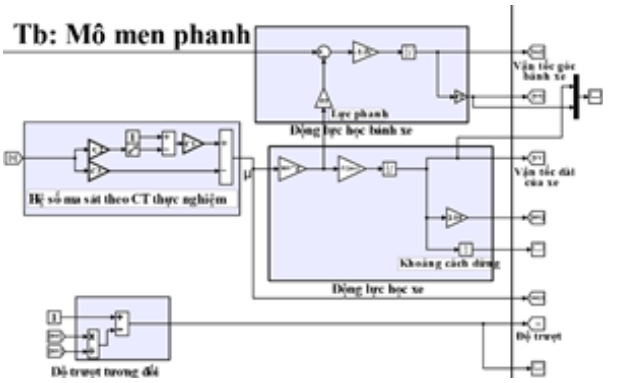
Kết hợp với (4):

$$\rightarrow \dot{\omega}_r = \frac{1}{r_r}\left(\frac{r_r\omega_r\dot{v}}{v} - \varepsilon v \sin gn(s) - kve\right)$$

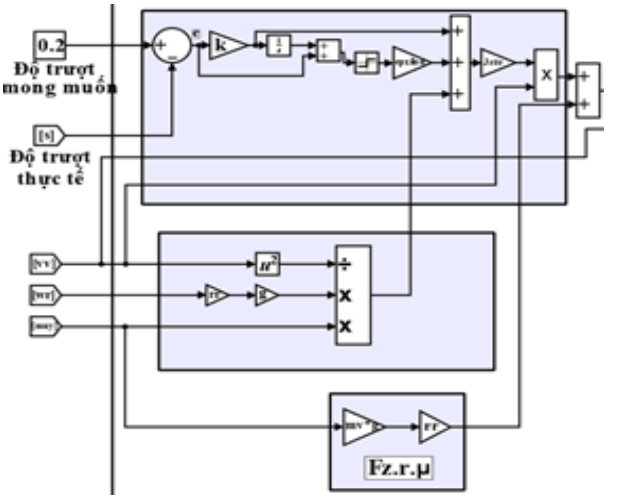
Kết hợp với (1), (2), ta được luật điều khiển SMC:

$$T_b = \frac{Jv}{r_r}\left(\frac{r_r\omega_r g\mu(\lambda)}{v^2} + \varepsilon sign(s) + ke\right) + mg\mu(\lambda)r_r \quad (9)$$

Sơ đồ mô phỏng động lực học phanh bằng phần mềm Matlab-Simulink thể hiện trên hình 3 và hình 4.



Hình 3. Mô hình Simulink - phần động lực học phanh



Hình 4. Mô hình Simulink - phần bộ điều khiển SMC

Các số liệu đầu vào cho mô hình mô phỏng tham khảo [3] gồm:

$J = 5kgm^2, m = 800kg, v_0 = 28m/s^2, r_r = 0.28m.$

4. CHỌN THAM SỐ BỘ ĐIỀU KHIỂN SMC VÀ KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

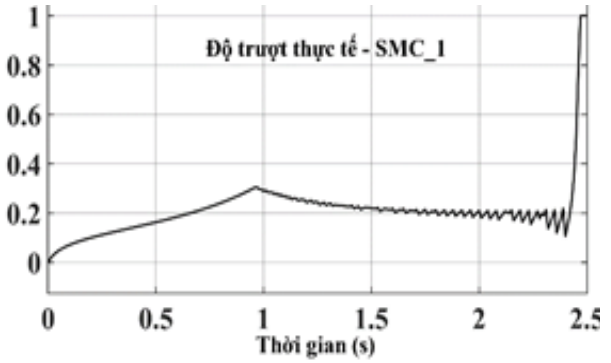
Bộ điều khiển SMC theo (9) có hai tham số k, ε là các hằng số dương tùy chọn. Hai tham ☞

số trên ảnh hưởng lớn đến độ ổn định, độ nhạy, độ chính xác của điều khiển. Để phân tích sự ảnh hưởng của các hệ số trên tới hiệu quả của bộ điều khiển SMC, bài báo thực hiện khảo sát với các hệ số k, ε cho như trong bảng 2, để đề xuất một bộ tham số hợp lý. Kết quả mô phỏng thể hiện trên hình 5 đến 13.

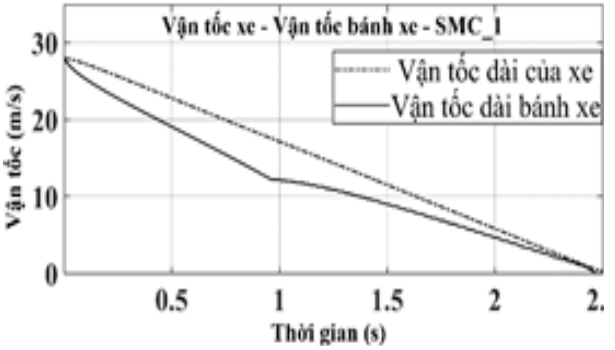
Bảng 2. Giá trị các hệ số dương k, ε trong bộ điều khiển SMC

Bộ điều khiển	k	ε
SMC_1	3	570
SMC_2	17	570
SMC_3	17	12

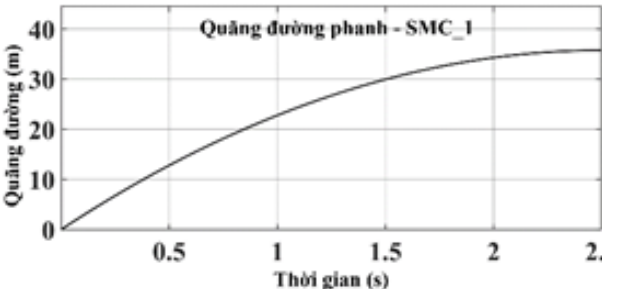
+ Kết quả mô phỏng với bộ điều khiển SMC_1:



Hình 5. Đồ thị độ trượt tương đối - SMC_1

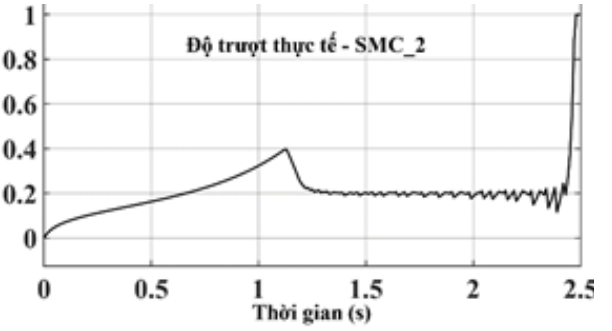


Hình 6. Đồ thị vận tốc xe - SMC_1

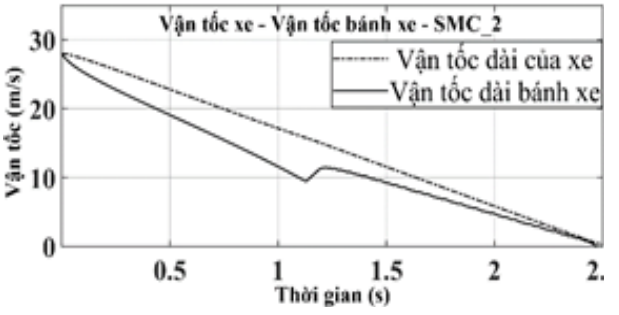


Hình 7. Đồ thị quãng đường phanh - SMC_1

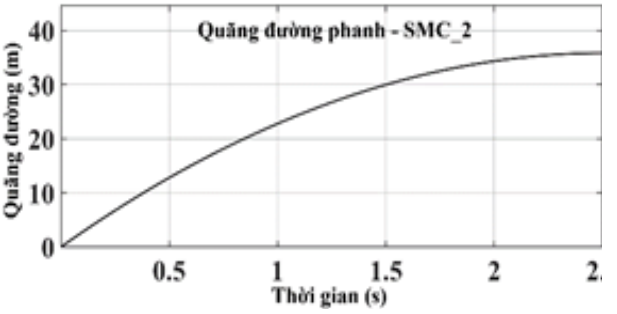
+ Kết quả mô phỏng với bộ điều khiển SMC_2:



Hình 8. Đồ thị độ trượt tương đối - SMC_2



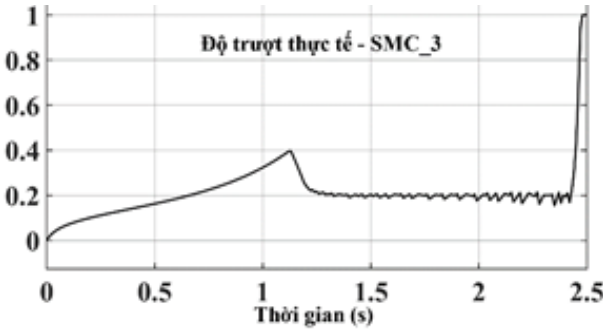
Hình 9. Đồ thị vận tốc xe - SMC_2



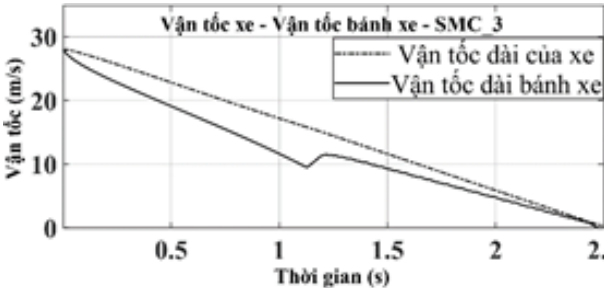
Hình 10. Đồ thị quãng đường phanh - SMC_2

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

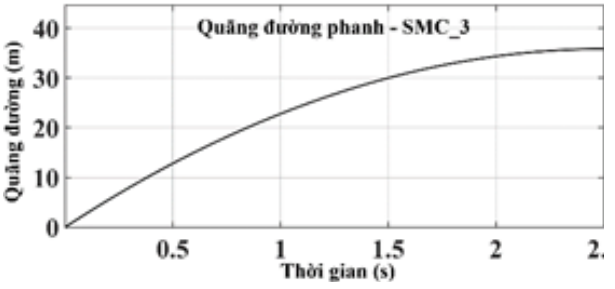
+ Kết quả mô phỏng với bộ điều khiển SMC_3:



Hình 11. Đồ thị độ trượt thực tế - SMC_3



Hình 12. Đồ thị vận tốc xe - SMC_3



Hình 13. Đồ thị quãng đường phanh - SMC_3

- Khi mặt trượt s đến s(t) = 0, thì tham số k quyết định thời gian sai lệch e(t) tiệm cận về 0. Theo kết quả mô phỏng thực tế, thời gian đưa e(t) → 0 đối với bộ điều khiển SMC_1 khoảng trên 1.5 giây, SMC_2, SMC_3 khoảng 1.2 giây, như vậy khi k lớn, thời gian đưa e(t) về 0 nhanh hơn.

- Tham số ε quyết định khả năng duy trì s(t) quanh mặt trượt s(t) = 0, ảnh hưởng đến tốc độ hội tụ của e(t) và độ bền vững của luật điều khiển khi thông số mô hình hay điều kiện hoạt động thay đổi. Tuy nhiên, tham số ε càng lớn dẫn tới quá điều chỉnh càng lớn, làm s đi xa khỏi mặt trượt s = 0. Điều này dẫn tới hiện tượng rung với biên độ lớn. Theo kết quả mô phỏng, hiện tượng này thể hiện rõ ở thời điểm từ 2,3 giây trở đi (hình 5, 8, 11). Đặc biệt với bộ điều khiển SMC_1 và SMC_2 với tham số ε lớn (Hình 5, 8). Tuy nhiên, khi ε càng nhỏ, tính bền vững của bộ điều khiển càng kém, nhất là đối với động lực học phanh, có rất nhiều thông số bất định và thay đổi.

- Từ các kết quả mô phỏng thực tế, nghiên cứu lý thuyết, tác giả lựa chọn tham số bộ điều khiển SMC_3, do bộ điều khiển này đảm bảo độ nhạy, độ chính xác điều khiển, và độ rung ở mức chấp nhận được, và không tiếp tục khảo sát để lựa chọn các bộ điều khiển khác có hệ số ε nhỏ hơn nữa. Chất lượng của bộ điều khiển SMC_3 sẽ được cải thiện hơn khi áp dụng giải pháp giảm rung ở phần sau.

5. GIẢI PHÁP GIẢM RUNG CHO BỘ ĐIỀU KHIỂN SMC

Nguyên nhân chính gây ra hiện tượng rung là do trong luật điều khiển chứa hàm dấu sign(s). Tuy nhiên, hàm đó cũng là yếu tố để duy trì mặt trượt s = 0. Để giảm hiện tượng này, thay thế hàm sign(s) bằng hàm sat(s/ϕ), luật điều khiển trượt cải tiến từ biểu thức (9) như sau:

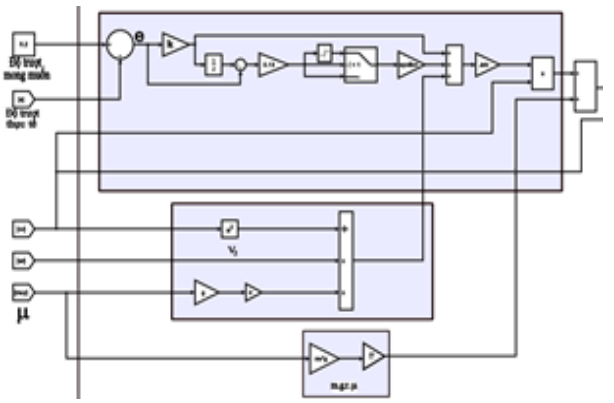
$$T_b = \frac{Jv}{r_r}\left(\frac{r_r\omega_r g\mu(\lambda)}{v^2} + \varepsilon sat(s/\phi) + ke\right) + mg\mu(\lambda)r_r \quad (10)$$

Trong đó, hàm sat(s/ϕ) được xác định:

$$sat(s/\phi) = \begin{cases} \text{sign}(s) & \text{khi } |s/\phi| \geq 1 \\ s/\phi & \text{khi } |s/\phi| < 1 \end{cases} \quad (11)$$

Với: ϕ là hệ số dương được lựa chọn ☞

sao cho để giảm hiện tượng rung. Khi mặt trượt đủ nhỏ s(t) < ϕ, khi đó bộ điều khiển SMC trở thành bộ điều khiển ổn định tiệm cận. Khi đi quá xa mặt trượt s(t) > ϕ thì bộ điều khiển trở về bộ điều khiển SMC giúp cho s(t) → 0 trong thời gian xác định đủ nhỏ.

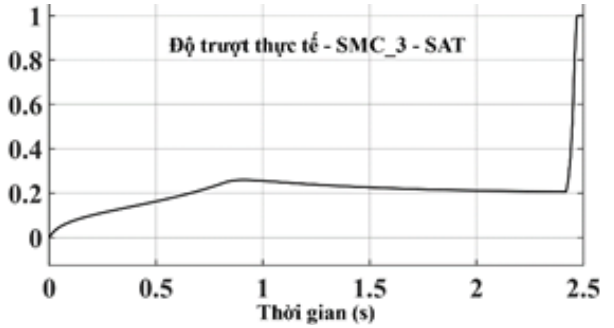


Hình 14. Mô hình Simulink điều khiển ABS bằng SMC khử chattering - phần bộ điều khiển

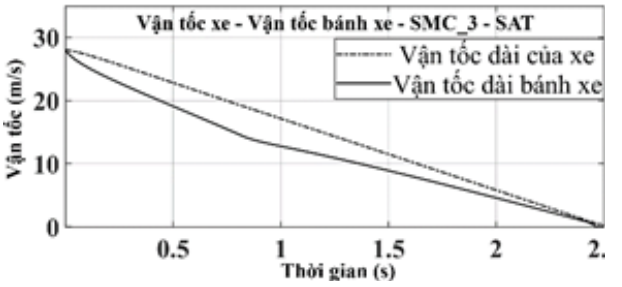
Trên hình 14 là sơ đồ phần khối điều khiển trượt giảm rung theo biểu thức (10) và (11). Các thông số bộ điều khiển thể hiện trong bảng 3.

Bảng 3. Giá trị các hệ số dương k, ε trong bộ điều khiển SMC_3_sat

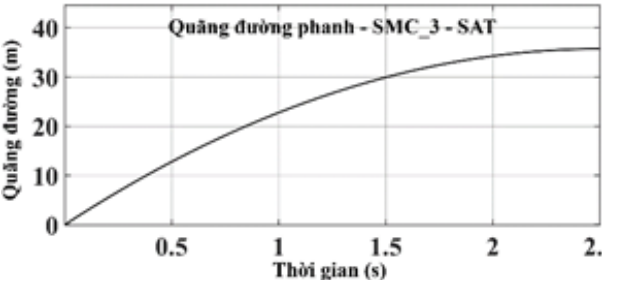
Bộ điều khiển	k	ε	ϕ
SMC_3_sat	17	12	7.7



Hình 15. Đồ thị độ trượt tương đối



Hình 16. Đồ thị vận tốc xe



Hình 17. Đồ thị quãng đường phanh

Kết quả mô phỏng thể hiện trên hình 15, 16 và 17. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả giảm rung rất rõ ràng như trên đồ thị độ trượt - hình 15 so với bộ điều khiển SMC_3. Hệ số trượt λ tiệm cận về hệ số trượt đặt λ_d trong khoảng thời gian xác định, khoảng trên 2 giây. Khi bộ điều khiển trượt đưa mặt trượt s về 0, và duy trì tại đó, độ rung của véc tơ trạng thái cải thiện rõ rệt. Tuy nhiên, thời gian này lớn hơn so với bộ điều khiển SMC_3. Hệ số ϕ được lựa chọn sao cho cân bằng giữa hai yếu tố thời gian xác lập và hiện tượng rung. Khi chọn ϕ nhỏ, thời gian xác lập nhanh nhưng vẫn xảy ra hiện tượng rung và ngược lại. Khi ϕ lớn thì thời gian xác lập lâu hơn nhưng khử được hiện tượng rung.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đưa ra hai phương pháp tổng hợp bộ điều khiển hệ thống ABS theo thuật toán SMC, và thuật toán SMC cải tiến giảm hiện tượng rung. Phân tích sự ảnh hưởng của hai tham số tùy chọn k, ε trong luật điều khiển

trượt thông qua ba bộ điều khiển trượt SMC1, SMC2, SMC3, với tham số k thay đổi từ 3 đến 17 và ε thay đổi từ 12 đến 570. Qua các kết quả mô phỏng, khi k lớn, thời gian đưa sai lệch e(t) về 0 nhanh hơn, khi tham số ε càng lớn dẫn tới quá điều chỉnh càng lớn. Bộ điều khiển SMC_3 có hiệu suất tốt nhất, có khả năng điều khiển được hệ thống động lực học phanh ABS có tính phi tuyến mạnh, miễn là biết được điều kiện đường. Bộ điều khiển SMC_3_sat cải tiến tiếp tục cải thiện hiện tượng rung so với bộ điều khiển SMC_3. Tuy nhiên, thời gian để độ trượt λ xác lập về độ trượt mong muốn λ_d lâu hơn (trên 2 giây).

Hướng nghiên cứu tiếp theo: Kết quả của nghiên cứu chỉ dựa trên nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink, nếu có thêm thực nghiệm sẽ khẳng định nghiên cứu sâu sắc hơn. Khi xây dựng bộ điều khiển, tác giả đã phân tích và lựa chọn hai tham số tùy chọn của bộ điều khiển sao cho cân bằng từ ba loại đường mẫu. Tuy nhiên, thực tế hai tham số trên sẽ thay đổi tùy thuộc rất nhiều loại đường, để cải thiện có thể sử dụng kết hợp một bộ điều khiển mờ để chỉnh hai tham số, hoặc sử dụng phương pháp học máy tăng cường để xác định hai tham số theo các thông số trạng thái hệ thống. Hai cải thiện này sẽ nâng cao chất lượng điều khiển của thuật toán trên.❖

Ngày nhận bài: **25/8/2025**
Ngày phản biện: **03/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Steur, E. (2004), "*Study on improvement of ABS performance using additional sensor information*". Technische Universiteit Eindhoven, DCT rapporten; Vol. 2004.077.

[2]. Stefano Di Gennaro and María Eugenia Sánchez-Morales (2016), "*An adaptive controller applied to an anti–lock braking system laboratory*". 2016 Universidad Nacional de Colombia, Vol. 83, no. 199, pp. 69-77.

[3]. Maria-Geanina Unguritu and Teodor-Constantin Nichit, Elea (2023), "*Design and Assessment of an Anti-lock Braking System Controller*". Romanian Journal of Information Science And Technology, Volume 26, 21-32, Number 1, 2023.

[4]. Francesco Pretagostini, Laura Ferranti, Giovanni Berardo, Valentin Ivanov, Barys Shyrokau (2020), "*Survey on Wheel Slip Control Design Strategies, Evaluation and Application to Antilock Braking Systems*". IEEE Access 2020.2965644.

[5]. Cem Unsal, Pushkin Kachroo (1999), "*Sliding Mode Measurement Feedback Control for Antilock Braking Systems*". Electrical and Computer Engineering Faculty Publications.

[6]. Tor A. Johansen, Idar Petersen, Jens Kalkkuhl, and Jens Lüdemann (2003), "*Gain-Scheduled Wheel Slip Control in Automotive Brake Systems*". IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol.11, No.6.

NGHIÊN CỨU CÁC THÔNG SỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN QUÁ TRÌNH GIA NHIỆT CỦA MÁY HÚT ÉP NHỰA TẤM ỨNG DỤNG TRONG CHẾ TẠO VỎ CHO CÁC THIẾT BỊ VẬT LÝ TRỊ LIỆU

INVESTIGATION OF PARAMETERS AFFECTING THE HEATING PROCESS IN VACUUM FORMING OF THERMOPLASTIC SHEETS FOR REHABILITATION DEVICE CASINGS

Nguyễn Trường Sơn[1], Trương Thị Thùy Trang[1], Nguyễn Văn Toàn[2], Nguyễn Trường An[2], Hà Trường Sang[2,*]

[1]Viện Vật lý Y Sinh học, Bệnh viện Quân y 175, Bộ Quốc phòng

[2]Học viện Kỹ thuật quân sự, Bộ Quốc phòng

**Email: sanght.st@lqdtu.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu mô phỏng số quá trình gia nhiệt tấm nhựa trong máy hút ép chân không ứng dụng trong chế tạo vỏ cho thiết bị vật lý trị liệu. Mục tiêu của nghiên cứu là đánh giá định lượng ảnh hưởng của các thông số thiết kế đến tốc độ gia nhiệt và độ đồng đều nhiệt độ trên tấm, từ đó làm cơ sở cho tối ưu hóa hệ thống gia nhiệt. Ba nhóm tham số chính được khảo sát gồm: (i) khoảng cách từ đèn halogen đến tấm nhựa (40-100 mm), (ii) số lượng bóng đèn (4, 6 và 8 bóng, công suất mỗi bóng 1200 W), và (iii) vật liệu tấm nhựa (PVC, ABS, Acrylic). Mô hình bức xạ bề mặt – bề mặt (S2S) được áp dụng trong ANSYS Fluent để mô phỏng đồng thời dẫn nhiệt, đối lưu tự nhiên và bức xạ hồng ngoại. Kết quả cho thấy số lượng bóng đèn là tham số ảnh hưởng mạnh nhất đến thời gian đạt nhiệt độ hóa mềm, trong khi khoảng cách đèn quyết định độ đồng đều nhiệt. Vật liệu PVC có tốc độ gia nhiệt nhanh nhất do dẫn nhiệt cao và nhiệt dung thấp. Các kết quả thu được cung cấp cơ sở khoa học cho thiết kế và điều chỉnh chế độ gia nhiệt trong sản xuất vỏ nhựa kỹ thuật.

Từ khóa: *Gia nhiệt tấm nhựa; Hút ép chân không; Bức xạ nhiệt S2S; Mô phỏng số; ANSYS Fluent.*

ABSTRACT

This paper presents a numerical investigation of the heating process of thermoplastic sheets in a vacuum forming machine used for manufacturing casings of physical therapy devices. The objective is to quantitatively evaluate the influence of design parameters on heating rate and temperature uniformity, thereby supporting the optimal configuration of the heating system. Three primary parameters are analyzed: (i) heater-to-sheet distance (40-100 mm), (ii) number of halogen lamps (4, 6, and 8 units, 1200 W each), and (iii) sheet material (PVC, ABS, Acrylic). A Surface-to-Surface (S2S) radiation model is implemented in ANSYS Fluent to simultaneously account for conduction, natural convection, and infrared radiation. The results reveal that the number of lamps

is the dominant factor governing the time required to reach softening temperature, while the heater distance mainly affects temperature uniformity. Among the tested materials, PVC reaches the target temperature fastest due to its higher thermal conductivity and lower heat capacity. The findings provide a scientific basis for the thermal design and operation of vacuum forming systems in plastic enclosure manufacturing.

Keywords: *Sheet heating; Vacuum forming; S2S radiation; Numerical simulation; ANSYS Fluent.*

1. GIỚI THIỆU

Trong lĩnh vực chế tạo thiết bị vật lý trị liệu, phần vỏ thiết bị đóng vai trò không chỉ bảo vệ phần tử chức năng bên trong mà còn quyết định yếu tố thẩm mỹ, độ bền cơ học và khả năng vệ sinh. Tại Việt Nam, đa số vỏ thiết bị y tế cỡ nhỏ và trung bình hiện vẫn được chế tạo theo phương pháp thủ công từ tấm nhựa PVC, thông qua các công đoạn cắt CNC, ghép dán, bả matit và sơn hoàn thiện. Quy trình này có nhược điểm rõ rệt: năng suất thấp, độ đồng đều hình học kém, thời gian gia công dài và khó tạo hình các bề mặt cong phức tạp, từ đó năng suất trung bình chỉ đạt khoảng 50-60 vỏ máy/tháng/người, đồng thời tiêu hao vật liệu lớn do phải xử lý bề mặt nhiều lần [1].

Trong bối cảnh đó, công nghệ hút ép chân không (vacuum forming) nổi lên như một giải pháp thay thế khả thi. Đây là phương pháp gia công nhựa nhiệt dẻo dạng tấm bằng cách gia nhiệt tấm nhựa đến trạng thái dẻo, sau đó hút ép lên khuôn bằng chênh lệch áp suất giữa môi trường và khoang khuôn [2]. Công nghệ này đã được ứng dụng rộng rãi trên thế giới trong sản xuất bao bì, thiết bị tiêu dùng, công nghiệp ô tô và y tế nhờ ưu điểm: chi phí khuôn thấp, khả năng thay đổi mẫu mã linh hoạt, phù hợp sản xuất loạt nhỏ và trung bình [3]-[5]. So sánh với ép phun (injection molding), vacuum forming có cấu trúc thiết bị đơn giản hơn nhiều, không yêu cầu khuôn thép đắt tiền, trong khi vẫn có thể tạo ra sản phẩm có bề mặt liên tục, không mối ghép và đáp ứng yêu cầu thẩm mỹ ở mức khá [6].

Một trong những yếu tố quyết định chất lượng tạo hình trong vacuum forming là quá trình gia nhiệt tấm nhựa trước khi ép hút. Tấm nhựa phải đạt trạng thái hóa mềm đồng đều, đặc biệt ở vùng sẽ biến dạng lớn, để tránh hiện tượng mỏng cục bộ, rách tấm hoặc không bám sát khuôn. Bản chất truyền nhiệt trong giai đoạn này là tổng hợp ba cơ chế: bức xạ nhiệt từ đèn halogen, đối lưu tự nhiên không khí và dẫn nhiệt trong vật liệu nhựa [7]. Nhiều nghiên cứu cho thấy sự phân bố nhiệt độ trên tấm phụ thuộc mạnh vào: (i) tính chất nhiệt vật liệu (ρ, Cp, k, ε), (ii) khoảng cách nguồn nhiệt, (iii) số lượng và bố trí đèn sấy, và (iv) điều kiện bức xạ phản xạ từ thành buồng [8]- [10].

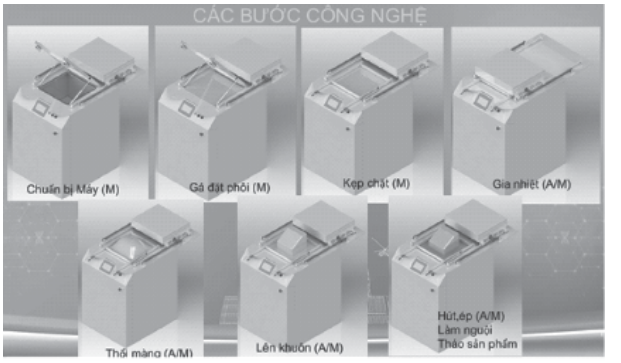
Trong đề tài cấp bệnh viện "Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo máy hút ép nhựa tấm ứng dụng trong chế tạo vỏ cho các thiết bị vật lý trị liệu" [1], hệ thống gia nhiệt được thiết kế sử dụng đèn halogen công suất 1200 W, bố trí phía trên tấm nhựa. Để tối ưu hiệu quả gia nhiệt, nhóm nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng số nhằm khảo sát ảnh hưởng các thông số thiết kế, bao gồm: Khoảng cách từ đèn đến tấm nhựa, số lượng bóng đèn, ảnh hưởng của tấm phản xạ nhiệt cũng như đặc tính vật liệu của tấm nhựa sẽ quyết định đến thời gian gia nhiệt như các nghiên cứu trước đây trên thế giới [11]. ☞

Trên cơ sở đó, bài báo này tập trung trình bày kết quả mô phỏng truyền nhiệt trong quá trình gia nhiệt tấm nhựa bằng đèn halogen, nhằm đánh giá định lượng ảnh hưởng của hình học bố trí và vật liệu tấm đến chất lượng gia nhiệt. Các kết quả thu được cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn thông số thiết kế tối ưu của máy hút ép nhựa tấm, hướng đến ứng dụng trong ngành thiết bị vật lý trị liệu và lĩnh vực sản xuất vỏ nhựa kỹ thuật trong nước.

2. MÔ HÌNH KHẢO SÁT QUÁ TRÌNH GIA NHIỆT CỦA TẤM NHỰA

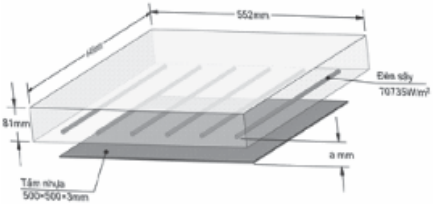
Hình 1 trình bày chu trình công nghệ của quá trình hút ép tấm nhựa, gồm bảy bước chính: chuẩn bị máy, gá đặt phôi, kẹp chặt, gia nhiệt, thổi màng (nếu cần), ép hút và làm nguội sản phẩm. Trong đó, giai đoạn gia nhiệt là bước quan trọng nhất, quyết định khả năng tạo hình của tấm nhựa cũng như chất lượng bề mặt sau ép. Nếu gia nhiệt không đủ hoặc không đồng đều, tấm có thể bị rách, mỏng cục bộ, hoặc không bám sát khuôn. Ngược lại, gia nhiệt quá mức có thể gây cháy, biến màu hoặc biến dạng ngoài ý muốn.

Quá trình gia nhiệt là một hiện tượng truyền nhiệt đa vật lý, trong đó đồng thời xảy ra ba cơ chế: dẫn nhiệt trong vật liệu rắn, đối lưu tự nhiên của không khí bao quanh tấm, và bức xạ nhiệt từ các đèn halogen. Vì cấu trúc hình học phức tạp và có sự tương tác giữa chất khí – chất rắn, bài toán không thể giải tích chính xác. Thực nghiệm trực tiếp tốn thời gian, khó kiểm soát điều kiện và chi phí cao. Do đó, phương pháp mô phỏng số được lựa chọn để đánh giá ảnh hưởng của các thông số thiết kế đến quá trình gia nhiệt, từ đó hỗ trợ tối ưu cấu hình máy hút ép trong thực tế sản xuất.

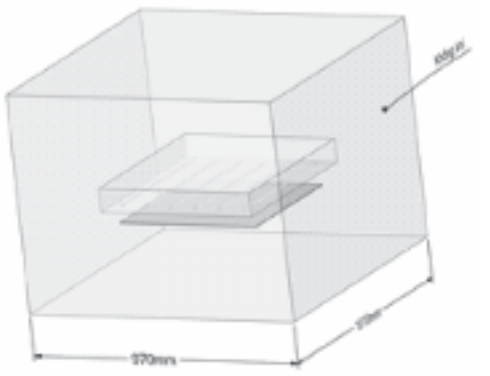


Hình 1. Quy trình các bước công nghệ quá trình hút ép tấm nhựa

2.1. Miền tính toán và điều kiện biên



(a) Mô hình sấy gia nhiệt



(b) Mô hình vùng mô phỏng

Hình 2. Mô hình mô phỏng sấy gia nhiệt trong máy ép tấm

Mô hình 3D của hệ thống gia nhiệt được xây dựng bằng phần mềm CAD và thể hiện trong Hình 2. Tấm nhựa có kích thước 500 × 500 × 3 mm đặt nằm ngang, phía trên là các đèn halogen bố trí song song và cách nhau đều. Mỗi đèn có công suất cực đại 1200 W. Hệ thống đèn được bố trí trong một khoang kim loại dạng

hộp, có thể lắp thêm tấm phản xạ (gương) để tăng hiệu quả gia nhiệt khi cần. Miền mô phỏng bao gồm:

• Không khí bao quanh tấm;
• Không khí giữa đèn và tấm;
• Bề mặt bức xạ của đèn;
• Tấm nhựa (miền rắn cần tính dẫn nhiệt);
• Thành bao ngoài (giả thiết cách nhiệt).

Nguồn nhiệt được xác định từ công suất phát của đèn, phân bố đều theo diện tích phát xạ (tương đương thông lượng khoảng 70735 W/m² ở chế độ cực đại). Quá trình mô phỏng dừng khi nhiệt độ bề mặt tấm đạt giá trị yêu cầu cho hút ép. Điều kiện biên chính:

• Trao đổi nhiệt bức xạ và dẫn nhiệt tại bề mặt tấm;
• Độ đen (emissivity) thay đổi theo vật liệu;
• Bề mặt đèn được coi là nguồn bức xạ hồng ngoại;
• Các mặt ngoài còn lại giả thiết cách nhiệt.

2.2. Đặc tính vật liệu

Ba loại vật liệu được khảo sát là PVC, ABS và Acrylic. Các thông số vật liệu được lấy từ tài liệu kỹ thuật, trình bày trong Bảng 1. Không khí được mô phỏng ở điều kiện ban đầu 30°C, với các tính chất nhiệt phụ thuộc theo nhiệt độ.

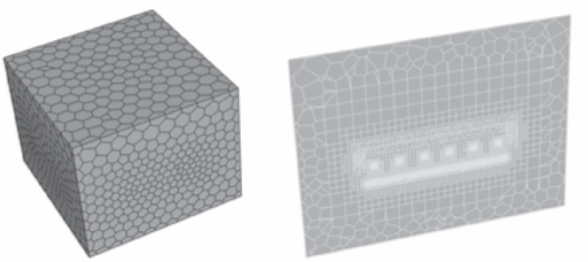
Bảng 1. Thông số vật liệu của tấm nhựa

Vật liệu	ρ (kg/m³)	Cp (J/kgK)	k (W/mK)	ε (độ đen)
PVC	1400	1025	0.2265	0.8
ABS	1115	1480	0.215	0.8
Acrylic	1195	1470	0.195	0.8

2.3. Lưới tính toán

Miền mô phỏng được rời rạc bằng lưới đa diện (polyhedral mesh), cho phép mô tả tốt các vùng hình học phức tạp và giữ được độ chính xác cao với số phần tử hợp lý. Lưới được tinh chỉnh tại các vị trí có gradient nhiệt lớn, gồm: vùng sát bóng đèn và bề mặt trên và dưới của tấm nhựa.

Với trường hợp 6 bóng đèn, khoảng cách a = 60 mm, số phần tử đạt 810,060 như thể hiện trên hình 3. Do vận tốc đối lưu tự nhiên trong khoang gia nhiệt nhỏ, không cần sử dụng lưới siêu mịn như các mô phỏng dòng chảy tốc độ cao.



Hình 3. Lưới đa diện cho mô phỏng số

3. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

Quá trình gia nhiệt tấm nhựa được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS Fluent, sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn (FVM) để giải bài toán truyền nhiệt liên hợp gồm dẫn nhiệt trong tấm, đối lưu tự nhiên của không khí và trao đổi bức xạ giữa các bề mặt. Mô phỏng được thực ☞

hiện trong miền không gian ba chiều, theo bài toán không ổn định phụ thuộc thời gian.

3.1. Phương trình cơ bản

(1) Phương trình năng lượng trong nhựa (dẫn nhiệt có phụ thuộc thời gian) được thể hiện như sau:

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T) + q''' \quad (1)$$

Trong đó, q‴ là thông lượng nhiệt tỏa ra.

Do không khí được coi là môi chất không tham gia hấp thụ bức xạ, ảnh hưởng bức xạ được đưa vào mô hình dưới dạng thông lượng biên theo điều kiện trao đổi nhiệt bức xạ – đối lưu.

(2) Phương trình bức xạ (S2S):

Giả thiết xám – khuếch tán – mờ đục. Với N bề mặt trao đổi bức xạ, hệ phương trình radiosity dạng:

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T^4 + (1-\varepsilon_i)G_i, i = 1, N \quad (2)$$

Trong đó:

$$G_i = \sum_{j=1}^{N} F_{ij} J_j$$

Với: J_i là năng lượng bề mặt i; G_i là năng lượng tới bề mặt i; ε_i là độ phát xạ; σ là hằng số Stefan-Boltzmann; và F_{ij} là hệ số hình dạng giữa bề mặt i và j.

(3) Phương trình đối lưu không khí:

Không khí mô phỏng ở chế độ đối lưu tự nhiên, dùng mô hình Laminar và phương trình Navier-stokes như sau:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \\ &\rho\left[\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V\right] = -\nabla p + \mu\nabla^2 V + \frac{1}{3}\nabla(\nabla \cdot V) + \rho g\beta(T - T0) \end{aligned} \quad (3)$$

3.2. Thuật toán và thiết lập mô phỏng

Thuật giải theo thời gian sử dụng phần mềm thương mại Ansys Fluent để giải các phương trình vi phân đề cập ở mục 3.1. Các thiết đặt để chạy phần mềm được thể hiện trên bảng 2.

Bảng 2. Các thiết lập cho mô phỏng

Hạng mục	Thiết lập
Solver	Pressure-based, transient
Viscosity	Laminar
Radiation model	Surface to surface (S2S)
Time step	0.001 s, tổng thời gian 20 s
Convergence	RMS residual < 10^{-6}
Coupling	PISO
Wall emissivity	0.8 (nhựa), 0.1 (gương phản xạ nếu có)

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Quá trình mô phỏng được tiến hành nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số thiết kế đến phân bố nhiệt độ của tấm nhựa trong giai đoạn gia nhiệt. Các thông số khảo sát gồm khoảng cách giữa đèn và tấm, số lượng bóng đèn halogen, vật liệu tấm nhựa, đồng thời có xét thêm trường hợp sử dụng tấm phản xạ quang. Các kết quả thu được được phân tích theo từng nhóm tham số, trên cơ sở so sánh sự biến thiên nhiệt độ theo thời gian và mức độ đồng đều trên bề mặt tấm.

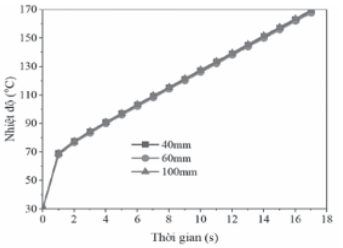
4.1. Ảnh hưởng của khoảng cách từ đèn đến tấm nhiệt

Trước hết, ảnh hưởng của khoảng cách

giữa đèn và tấm được thể hiện trong Hình 4, nơi phân bố nhiệt độ trên cả bề mặt trên và bề mặt dưới của tấm tại thời điểm t = 17 s được so sánh với ba khoảng cách 40 mm, 60 mm và 100 mm. Khi khoảng cách nhỏ (40 mm), nhiệt độ bề mặt trên thể hiện độ chênh lệch lớn, với các vùng cực đại xuất hiện ngay dưới vị trí của bóng đèn. Khi tăng khoảng cách lên 60 mm và 100 mm, sự phân bố nhiệt trở nên đồng đều hơn. Tuy nhiên, như thể hiện trong Hình 5, nhiệt độ trung bình theo thời gian của tấm gần như không thay đổi đáng kể giữa ba trường hợp. Điều này cho thấy mặc dù cường độ bức xạ suy giảm theo khoảng cách, sự gia tăng diện tích nhận bức xạ đã bù đắp cho tổn thất năng lượng, khiến tốc độ gia nhiệt trung bình gần như không đổi. Như vậy, có thể nhận định rằng việc tăng khoảng cách đèn chủ yếu cải thiện độ đồng đều nhiệt độ nhưng không ảnh hưởng đáng kể đến tốc độ gia nhiệt.



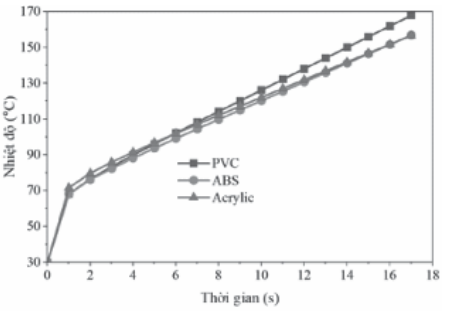
Hình 4. Trường nhiệt độ tại thời gian 17 s; hàng trên là nhiệt độ bề mặt trên, hàng dưới là nhiệt độ mặt dưới của tấm. Bên trái với a = 40 mm; giữa b = 60 mm; phải a = 100 mm.



Hình 5. Nhiệt độ trung bình theo thời gian khi khoảng cách a thay đổi.

4.2. Ảnh hưởng của vật liệu tấm nhựa

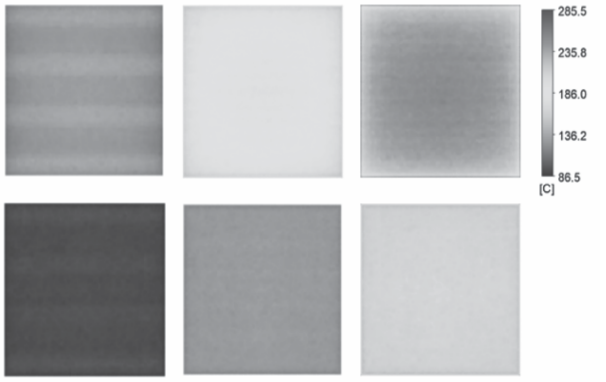
Ảnh hưởng của vật liệu tấm nhựa được trình bày trong Hình 6, với ba vật liệu PVC, ABS và Acrylic. Kết quả cho thấy vật liệu PVC đạt tốc độ gia nhiệt nhanh nhất, tiếp theo là ABS và Acrylic. Sau 17 giây, nhiệt độ trung bình của PVC cao hơn hai vật liệu còn lại khoảng 15°C. Xu hướng này xuất phát từ sự khác biệt về tính chất nhiệt: PVC có hệ số dẫn nhiệt cao hơn, cho phép truyền nhiệt hiệu quả hơn, trong khi ABS và Acrylic có nhiệt dung riêng lớn nên cần nhiều năng lượng hơn để đạt cùng mức nhiệt độ. Kết quả này nhất quán với các nghiên cứu trước đây về truyền nhiệt trong nhựa nhiệt dẻo.



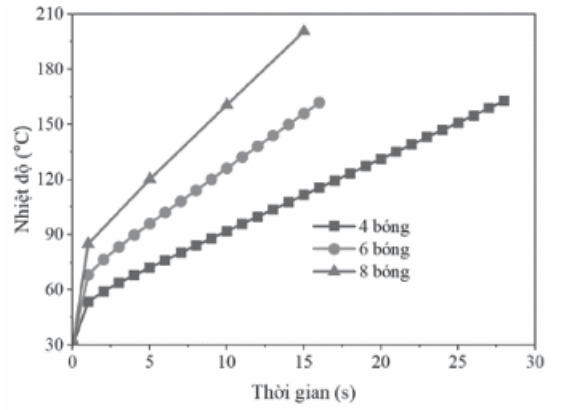
Hình 6. Nhiệt độ trung bình theo thời gian khi thay đổi vật liệu của tấm nhựa

4.3. Ảnh hưởng của số bóng đèn chiếu

Ảnh hưởng của số lượng bóng đèn halogen được minh họa trong Hình 7 và Hình 8. Khi số bóng tăng từ 4 lên 6 và 8, quá trình gia nhiệt diễn ra nhanh hơn rõ rệt. Trường nhiệt độ tại thời điểm t = 15 s cho thấy cấu hình 4 bóng xuất hiện vùng lạnh rõ rệt giữa các bóng đèn, trong khi cấu hình 8 bóng cho phân bố nhiệt đồng đều hơn. Biểu đồ nhiệt độ trung bình (Hình 8) cũng chỉ ra rằng để đạt mức nhiệt 150°C, hệ 8 bóng chỉ cần dưới 10 s, hệ 6 bóng cần khoảng 15 s, trong khi hệ 4 bóng vượt quá 25 s. Điều này chứng tỏ số lượng bóng đèn là tham số ảnh hưởng mạnh nhất đến tốc độ gia nhiệt. ☞



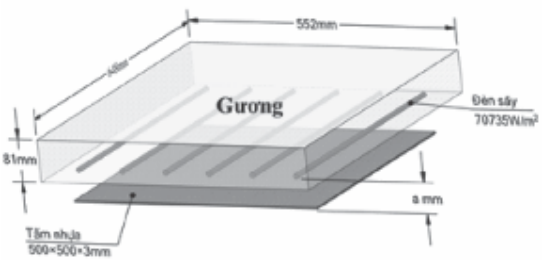
Hình 7. Trường nhiệt độ tại thời gian 15 s; hàng trên là nhiệt độ bề mặt trên, hàng dưới là nhiệt độ mặt dưới của tấm. Bên trái với 4 bóng; giữa 6 bóng; phải 8 bóng.



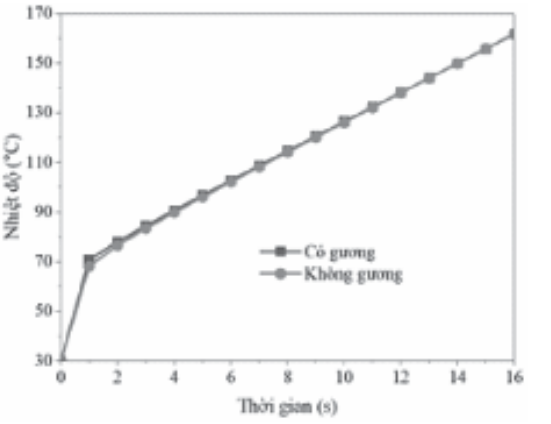
Hình 8. Nhiệt độ trung bình tấm nhựa theo thời gian khi số bóng thay đổi.

4.4. Ảnh hưởng của gương phản xạ quang

Cuối cùng, ảnh hưởng của tấm phản xạ quang được đánh giá bằng cách so sánh hai trường hợp có và không sử dụng gương phản xạ (Hình 9 và Hình 10). Kết quả chỉ ra rằng sự khác biệt về nhiệt độ trung bình chỉ rõ rệt trong những giây đầu tiên; sau đó, hai đường nhiệt độ dần tiến gần nhau. Nguyên nhân là dòng đối lưu trong khoang gia nhiệt làm suy giảm hiệu quả phản xạ tích lũy. Do đó, trong cấu hình hiện tại, tấm phản xạ không đem lại lợi ích đáng kể và chỉ phù hợp khi khoang gia nhiệt được thiết kế kín hoặc cách nhiệt tốt hơn.



Hình 9. Mô hình gia nhiệt có gương phản xạ



Hình 10. So sánh nhiệt độ trung bình khi có gương phản xạ

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày nghiên cứu mô phỏng quá trình gia nhiệt tấm nhựa trong máy hút ép chân không bằng phương pháp phân tích số, xem xét ảnh hưởng của ba tham số thiết kế chính gồm khoảng cách giữa đèn và tấm, số lượng bóng đèn halogen và vật liệu của tấm nhựa, đồng thời đánh giá bổ sung hiệu quả của tấm phản xạ quang. Các kết quả mô phỏng cho phép xác định rõ cơ chế chi phối và mức độ ảnh hưởng của từng tham số đến tốc độ và độ đồng đều của quá trình gia nhiệt.

Kết quả cho thấy số lượng bóng đèn là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến tốc độ gia nhiệt; khi số bóng tăng từ 4 lên 8, thời gian đạt nhiệt độ hóa mềm giảm hơn hai lần. Khoảng cách đèn không làm thay đổi đáng kể nhiệt độ trung bình nhưng ảnh hưởng rõ rệt tới độ đồng

đều nhiệt độ trên bề mặt tấm, trong đó khoảng cách 60-100 mm cho phân bố nhiệt hợp lý hơn. Vật liệu nhựa quyết định tốc độ dẫn nhiệt và nhiệt dung, dẫn đến sự khác biệt rõ rệt về thời gian gia nhiệt giữa PVC, ABS và Acrylic; trong đó PVC đạt nhiệt độ mục tiêu nhanh nhất. Tấm phản xạ quang chỉ tạo ra sự cải thiện nhỏ trong giai đoạn đầu của quá trình và không làm thay đổi đáng kể tốc độ gia nhiệt tổng thể trong cấu hình khảo sát.

Những phân tích trên góp phần xác lập cơ sở khoa học cho việc thiết kế và tối ưu hóa hệ thống gia nhiệt của máy hút ép nhựa tấm. Trong thực tiễn sản xuất, có thể ưu tiên sử dụng cấu hình 6-8 bóng đèn kết hợp khoảng cách chiếu 60-100 mm để đạt được sự cân bằng giữa thời gian chu trình, hiệu quả năng lượng và độ đồng đều nhiệt. Đồng thời, việc lựa chọn vật liệu nhựa cần gắn với chế độ gia nhiệt riêng, thay vì dùng một cấu hình chung cho nhiều loại vật liệu.

Các kết quả mô phỏng này sẽ là tiền đề để hiệu chỉnh và tối ưu quy trình thực nghiệm trên máy hút ép đã chế tạo, đồng thời mở ra khả năng mở rộng nghiên cứu theo hướng tối ưu hóa năng lượng, tự động điều khiển công suất gia nhiệt theo phản hồi nhiệt độ thời gian thực, hoặc kết hợp mô hình mô phỏng với thuật toán tối ưu hình học để thiết kế bố trí đèn đạt độ đồng đều cao hơn.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp Cơ sở "Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo máy hút ép nhựa tấm ứng dụng trong sản xuất vỏ thiết bị vật lý trị liệu", mã số: ĐT.2025.003, do Viện Vật lý Y Sinh học, Bệnh viện Quân y 175 chủ trì.❖

Ngày nhận bài: **23/10/2025**
Ngày phản biện: **05/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Trường Sơn, "*Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo máy hút ép nhựa tấm ứng dụng trong sản xuất vỏ thiết bị vật lý trị liệu*". Viện Vật lý Y Sinh học, 2025. Đề tài khoa học cấp bệnh viện mã số: ĐT.2025.003, 2025. Viện Vật lý Y Sinh học, Bệnh viện Quân y 175.

[2]. Gruenwald, G. (2018), "*Thermoforming: a plastics processing guide*". Routledge.

[3]. Hosseinionari, H., Ramezankhani, M., Seethaler, R., & Milani, A. S. (2023), "*Development of a computationally efficient model of the heating phase in thermoforming process based on the experimental radiation pattern of heaters*". Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7(1), 48.

[4]. Throne, J. (2024), "*Thermoforming*". In Applied Plastics Engineering Handbook (pp. 449-480). William Andrew Publishing.

[5]. Pancrace, J. (2013), "*Coupled heating/forming optimization of knitted reinforced composites*". Lehigh University.

[6]. Ziedan, M. J., Hassan, A. F., Saad, N. A., & Al-Mukhtar, A. M. (2024) "*A Comprehensive Review of Forming Methods for Composite Materials and Cracking*". Procedia Structural Integrity, 66, 229-246.

[7]. Le Maoult, Y., & Schmidt, F. (2016), "*Infrared radiation applied to polymer processes*". Heat Transfer in Polymer Composite Materials: Forming Processes, 385-423.

[8]. Hosseinionari, H., Ramezankhani, M., Seethaler, R., & Milani, A. S. (2023), "*Development of a computationally efficient model of the heating phase in thermoforming process based on the experimental radiation pattern of heaters*". Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7(1), 48.

[9]. Baek, J. H., Park, T. I., Kim, Y. J., Park, J. S., & Kim, H. S. (2025), "*Integrated design and validation of 3D radiant heater for electric vehicles: Thermo-Electrical finite element analysis considering strain-dependent resistance in thermo-forming*". Materials & Design, 114701.

[10]. Mallick, P. K. (2017), "*Processing of polymer matrix composites*". CRC Press.

[11]. Hou, B. Y., Ren, L., Sun, Y. N., Zhang, M. Y., & Zhang, H. X. (2023), "*Structure and properties of heat-resistant ABS resins innovated via MSAMI random copolymer*". Journal of Thermoplastic Composite Materials, 36(3), 1004-1016.

MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH SẤY BƠM NHIỆT DÒNG KHÍ THẲNG ĐỨNG CHO VẬT LIỆU DẠNG BỘT DỄ CHÁY NỔ

MODELING AND SIMULATION OF VERTICAL AIR-FLOW HEAT PUMP DRYING PROCESS FOR EXPLOSIVE POWDER MATERIALS

Nguyễn Duy Dân*, Nguyễn Văn Thành, Trần Xuân Thịnh
Trung tâm Quang điện tử, Viện Ứng dụng công nghệ, Bộ Khoa học và Công nghệ
**Email: ngduydan166@gmail.com*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày mô hình hóa và mô phỏng động lực học của quá trình sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng đối với vật liệu bột có nguy cơ cháy nổ cao. Mô hình toán được thiết lập dựa trên phương trình cân bằng năng lượng – khối lượng kết hợp mô phỏng động lực học chất lưu (CFD), nhằm phân tích trường nhiệt – ẩm và phân bố vận tốc dòng khí trong buồng sấy. Kết quả mô phỏng cho thấy dòng khí thẳng đứng giúp phân bố nhiệt đều, ổn định gradient ẩm theo chiều sâu lớp bột, hạn chế tích nhiệt cục bộ. Lớp bột có chiều dày 2-4 mm đạt hiệu suất sấy cao nhất, rút ngắn thời gian sấy 20-25% so với sấy ngang truyền thống. Hệ số hiệu suất năng lượng COP đạt 3,4-4,2, với mức tiết kiệm điện năng trung bình 18-25%. Hệ thống duy trì an toàn nhiệt cấp II theo tiêu chuẩn ATEX, không xuất hiện vùng quá nhiệt (>85°C) trong suốt chu trình sấy. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho thiết kế và chế tạo hệ thống sấy bơm nhiệt tự động, tiết kiệm năng lượng và đảm bảo an toàn cháy nổ cho vật liệu bột dễ cháy.

Từ khóa: *Sấy bơm nhiệt; Mô hình CFD; Bột dễ cháy nổ; Dòng khí thẳng đứng; Động lực học nhiệt – ẩm.*

ABSTRACT

This paper presents the modeling and dynamic simulation of a vertical air-flow heat pump drying process for powder materials with a high risk of explosion. A mathematical model was developed based on the energy – mass balance equations combined with Computational Fluid Dynamics (CFD) to analyze the temperature – moisture field and air velocity distribution inside the drying chamber. The simulation results show that the vertical airflow ensures a uniform temperature distribution, stabilizes the moisture gradient along the powder layer, and prevents local heat accumulation. Powder layers with a thickness of 2-4 mm achieved the highest drying efficiency, reducing the drying time by 20-25% compared to conventional horizontal airflow drying. The Coefficient of Performance (COP) ranged from 3.4 to 4.2, corresponding to an average energy saving of 18-25%. The system maintained thermal safety level II (ATEX standard), with no overheat zones (>85°C) observed during the entire drying cycle. The results provide a scientific basis for the design and development of automatic, energy-efficient, and explosion-safe heat pump drying systems for fine and flammable powder materials.

Keywords: *Heat pump drying; CFD modeling; Explosive powder materials; Vertical airflow; Thermo – moisture dynamics.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong lĩnh vực chế biến vật liệu dạng bột dễ cháy nổ (như bột kim loại, bột năng lượng, bột hữu cơ tinh chế), công đoạn sấy và định lượng luôn tiềm ẩn rủi ro cao về cháy bụi. Các hệ thống sấy cưỡng bức truyền thống thường xuất hiện điểm nóng cục bộ và tích tụ nhiệt, dẫn đến nguy cơ cháy nổ khi nồng độ bụi vượt giới hạn cháy nổ hạ (LEL) [1-4]. Ngoài ra, trong quá trình sấy đối lưu thông thường, sự phân bố nhiệt và ẩm không đồng đều trong khối bột dẫn đến hiện tượng tạo vón cục, biến tính sản phẩm và làm giảm chất lượng cuối cùng [2, 3]. Việc phát triển các công nghệ sấy tiên tiến có khả năng điều khiển chính xác nhiệt độ, độ ẩm và dòng không khí đang là hướng nghiên cứu trọng tâm của nhiều nhóm trong và ngoài nước [5, 6]. Trong đó, công nghệ sấy bơm nhiệt (Heat Pump Drying – HPD) được xem là một giải pháp hiệu quả do có thể thu hồi và tái sử dụng nhiệt ẩn của không khí thải, giúp tiết kiệm năng lượng 30-50% so với sấy điện trở thông thường [6-8]. Nguyên lý hoạt động dựa trên chu trình nén – ngưng – giãn – bay hơi, cho phép duy trì nhiệt độ sấy thấp (40-70°C) nhưng vẫn đảm bảo tốc độ truyền nhiệt cao nhờ khả năng tuần hoàn không khí kín [5, 7]. Một số nghiên cứu trước đây như của Trần Văn Phú (2002) [1], Hoàng Văn Chước (2006) [3] và Alves-Filho & Stommen (1996) [4] đã chứng minh rằng việc tổ chức dòng khí thẳng đứng cưỡng bức giúp giảm đáng kể gradient nhiệt theo chiều dày vật liệu, tăng tính đồng đều của quá trình trao đổi nhiệt – ẩm. Tuy nhiên, các công trình này chủ yếu tập trung vào vật liệu nông sản hoặc sinh khối, chưa xem xét kỹ yếu tố an toàn cháy nổ khi sấy vật liệu có khả năng tự bốc cháy hoặc phát tia lửa.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tập trung mô phỏng và đánh giá đặc tính truyền nhiệt – ẩm của hệ thống sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng cho vật liệu dạng bột dễ cháy nổ, với mục tiêu: (i) xây dựng mô hình toán mô tả động lực học truyền nhiệt – ẩm; (ii) phân tích phân bố trường nhiệt độ, độ ẩm và vận tốc dòng khí bằng phương pháp mô phỏng CFD; và (iii) đề xuất cấu hình vận hành tối ưu đảm bảo hiệu suất năng lượng cao và an toàn nhiệt trong môi trường có nguy cơ cháy nổ cao [7-9].

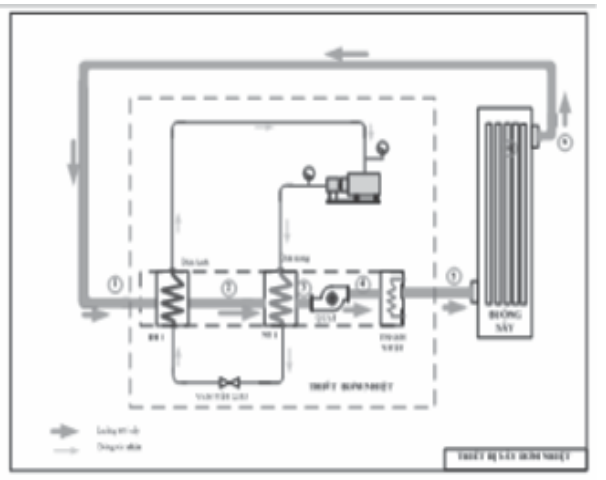
2. CẤU HÌNH THIẾT BỊ VÀ NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG

Hệ thống sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng được thiết kế dưới dạng buồng sấy kín, sử dụng chu trình bơm nhiệt tuần hoàn cưỡng bức, trong đó luồng khí nóng khô được thổi từ dưới lên xuyên qua lớp bột vật liệu. Cấu hình tổng thể gồm bốn cụm chính: Cụm bơm nhiệt (Heat pump unit): Gồm máy nén, dàn ngưng, dàn bay hơi và van tiết lưu; sử dụng môi chất lạnh R134a. Hệ thống thực hiện chu trình nén – ngưng – giãn – bay hơi, cho phép thu hồi và tái sử dụng nhiệt từ khí thải, đồng thời duy trì nhiệt độ ổn định 40-70°C trong buồng sấy.

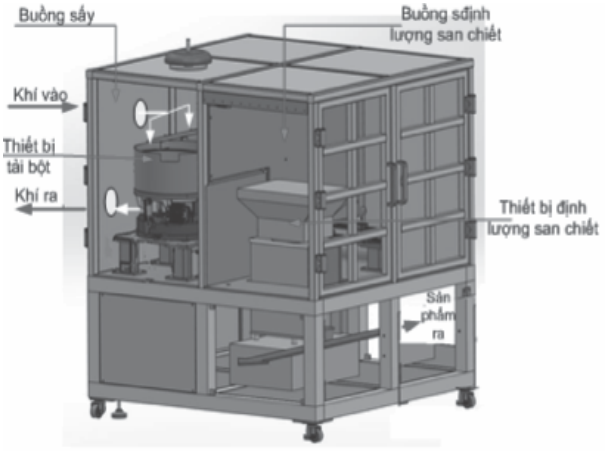
Buồng sấy đối lưu thẳng đứng: Có kích thước 1000 × 600 × 800 mm; vỏ hai lớp inox – composite cách nhiệt. Luồng khí nóng được phân phối đều tại đáy buồng, đi xuyên qua khay sấy chứa lớp bột dày 2-10 mm. Nhiệt độ được kiểm soát tự động với sai số ±1°C. Cụm định lượng – san chiết: Cho phép định lượng khối lượng 50-200 g mỗi chu kỳ, sai số ±0,3%. Sau sấy, sản phẩm được chuyển đến phễu định lượng và san chiết tự động.

Hệ thống điều khiển và giám sát SCADA: Gồm cảm biến nhiệt, ẩm, áp suất và khối lượng; bộ PID điều khiển công suất nén; màn hình hiển thị và lưu trữ dữ liệu thời gian thực. Hệ thống có chức năng cảnh báo quá nhiệt ☞

(> 90°C), van xả áp tự động và ngắt mạch khẩn cấp, đảm bảo an toàn cấp II theo tiêu chuẩn ATEX.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng.



Hình 2. Cấu tạo buồng sấy và hệ thống định lượng tự động.

Nguyên lý hoạt động: Không khí ẩm từ lớp bột được dẫn qua dàn bay hơi để tách nước, sau đó được gia nhiệt trở lại trong dàn ngưng tụ và phân phối đều trong buồng sấy. Quá trình này lặp lại cho đến khi độ ẩm của vật sấy giảm dưới 1%. Cấu trúc dòng khí thẳng đứng giúp giảm gradient nhiệt, ngăn hiện tượng "cháy lớp" thường gặp trong sấy ngang.

3. MÔ HÌNH TOÁN VÀ PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

3.1. Mô hình toán học

Quá trình sấy được mô tả dựa trên hệ phương trình truyền nhiệt – truyền khối kết hợp trong môi trường xốp, có xét tới sự biến thiên ẩm và nhiệt theo thời gian và không gian [1, 5, 10, 11]:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = k_{eff} \nabla^2 T - L_v \frac{\partial w}{\partial t}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 w - v_z \frac{\partial w}{\partial z}$$

Trong đó:

- T: Nhiệt độ (°C);
- w: Độ ẩm vật liệu (%);
- ρ_s,c_s: Khối lượng riêng và nhiệt dung riêng của vật liệu;
- k_{eff}: Hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng (W/m•K);
- D_{eff}: Hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng (m²/s);
- v_z: Vận tốc dòng khí thẳng đứng (m/s);
- L_v: Nhiệt ẩn hóa hơi của nước (kJ/kg).

Các hằng số vật lý được xác định theo thực nghiệm và tham chiếu theo mô hình truyền nhiệt – ẩm [10, 11].

3.2. Mô phỏng CFD

Mô hình CFD được xây dựng trên phần mềm ANSYS Fluent 2024R1, chia lưới không gian 3D theo khối dạng cấu trúc (structured grid), với kích thước ô 1 mm trong vùng lớp bột (2 ÷ 10 mm). Mô phỏng sử dụng mô hình dòng rối k-ε chuẩn (Standard k-ε), kết hợp với mô hình Discretized Evaporation để mô phỏng sự thoát hơi ẩm từ bề mặt hạt bột [12].

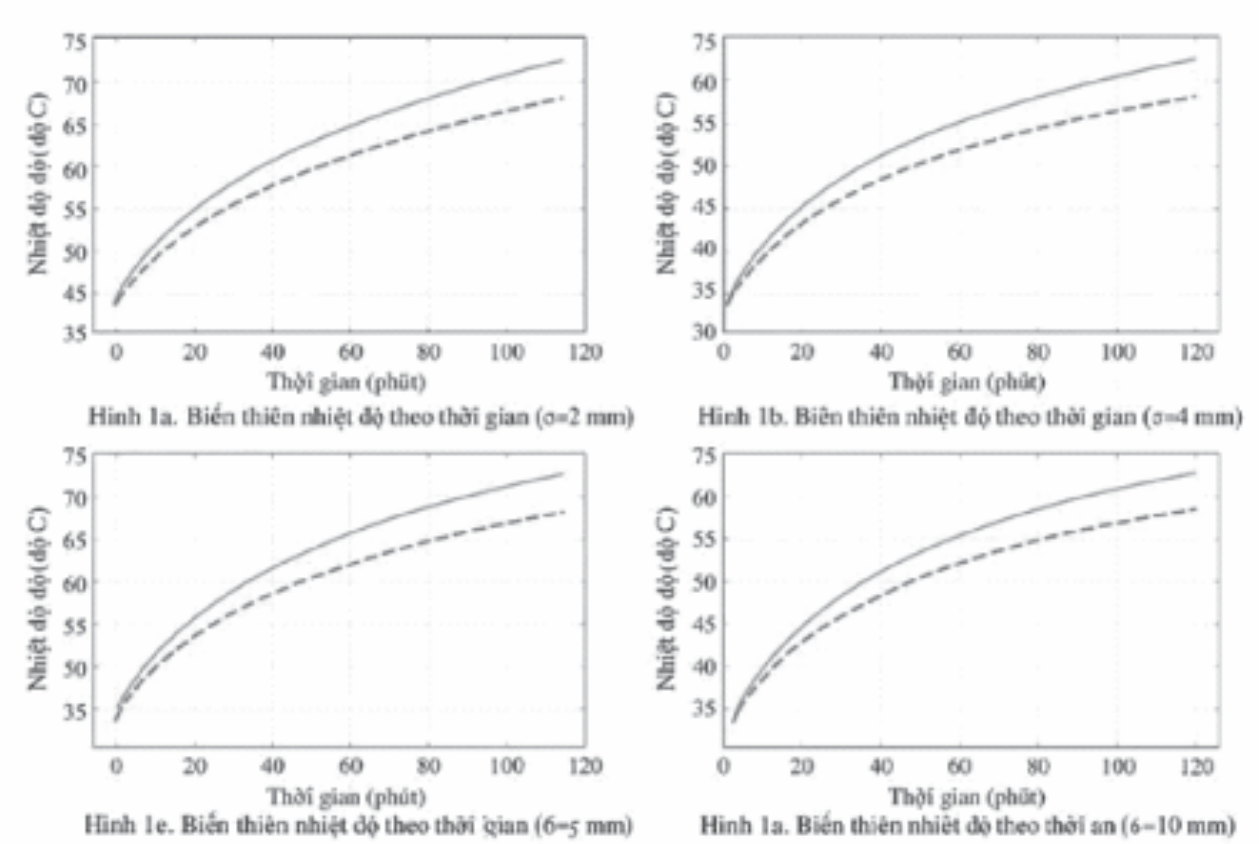
Điều kiện biên mô phỏng:
Nhiệt độ khí vào: 40 ÷ 70°C (nội suy tới 100°C).
Độ ẩm tương đối khí vào: 20%.
Tốc độ dòng khí: 0,5 ÷ 1,2 m/s.
Độ dày lớp bột: 2, 4, 6, 10 mm.
Các đại lượng được trích xuất sau mô phỏng:
Phân bố nhiệt độ trong lớp bột theo thời gian (T-z-t).
Biến thiên độ ẩm trung bình (w-t).
Gradient nhiệt độ và ẩm theo chiều sâu (dT/dz, dw/dz).
Đánh giá ổn định dòng nhiệt và nguy cơ tích tụ nhiệt cục bộ.
Dữ liệu mô phỏng được dùng làm cơ sở để vẽ các biểu đồ 2D và 3D về:
Biến thiên nhiệt độ theo thời gian;
Độ ẩm giảm theo thời gian;
Phân bố nhiệt độ – độ ẩm – chiều dày lớp bột.

Kết quả này là nền tảng để xây dựng biểu đồ đặc trưng động lực học sấy (drying kinetics) và phân tích độ ổn định nhiệt – an toàn phòng nổ.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Biến thiên nhiệt độ theo thời gian và chiều dày lớp bột

Kết quả mô phỏng (Hình 3) cho thấy nhiệt độ phân bố đều trong toàn lớp bột. Giai đoạn đầu (0-30 phút): nhiệt độ tăng nhanh từ 25°C lên 50°C. Sau 120 phút, chênh lệch nhiệt độ giữa mặt trên – dưới lớp bột chỉ còn 0,8-1,2°C. Lớp bột dày 2 mm đạt trạng thái ổn định nhiệt sau 60 phút, lớp 10 mm cần ~180 phút.

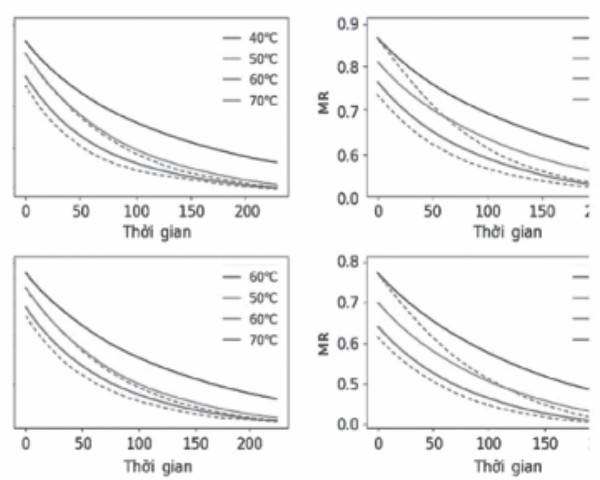


Hình 3. Biểu đồ biến thiên nhiệt độ trung bình theo thời gian ở các lớp bột (2, 4, 6, 10 mm).

Hiệu quả này chứng tỏ dòng khí thẳng đứng cho hiệu suất truyền nhiệt cao hơn 15-25% so với sấy ngang.

4.2. Biến thiên độ ẩm và mô hình động lực học sấy

Độ ẩm giảm nhanh trong 100 phút đầu – giai đoạn sấy tốc độ không đổi, sau đó giảm chậm dần (Hình 4).



Hình 4. Quan hệ giữa độ ẩm tương đối (MR) và thời gian sấy ở các mức nhiệt độ khác nhau (40-70°C)

Mô hình Henderson – Pabis hiệu chỉnh được sử dụng:

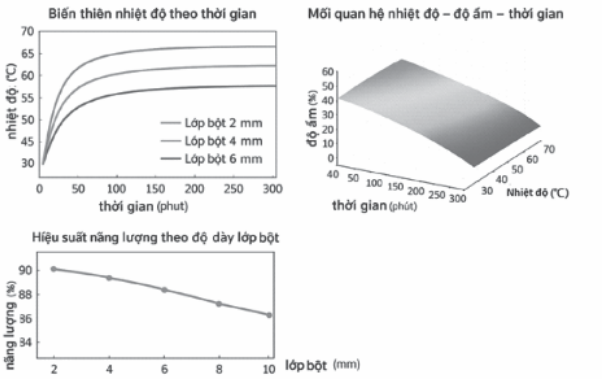
$$MR = A\ e^{-k\ t}$$

Trong đó: A ≈ 1, k thay đổi từ 0,0042-0,0095 min^{-1} (40-70°C).

Hệ số tương quan $R^2 > 0,99$ chứng tỏ mô hình mô phỏng phù hợp thực tế.

4.3. Phân bố nhiệt – ẩm 3D trong buồng sấy

Kết quả mô phỏng (Hình 5) thể hiện trường nhiệt đều và gradient thấp: Gradient nhiệt trung bình: <1,2°C/cm; Gradient ẩm: <1%/cm sau 200 phút. Cơ chế "đẩy ẩm liên tục" (Continuous Vapor Lifting) giúp tránh tích ẩm vùng sâu, tăng đồng đều chất lượng sấy.



Hình 5. Phân bố trường nhiệt và độ ẩm 3D trong buồng sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng.

4.4. Phân tích năng lượng

Hệ số hiệu suất năng lượng COP xác định theo:

$$COP = \frac{Q_{useful}}{W_{input}}$$

Trong đó:

• Q_{useful}: Nhiệt lượng có ích truyền vào vật liệu (kJ);

• W_{input}: Điện năng tiêu thụ của hệ bơm nhiệt (kJ).

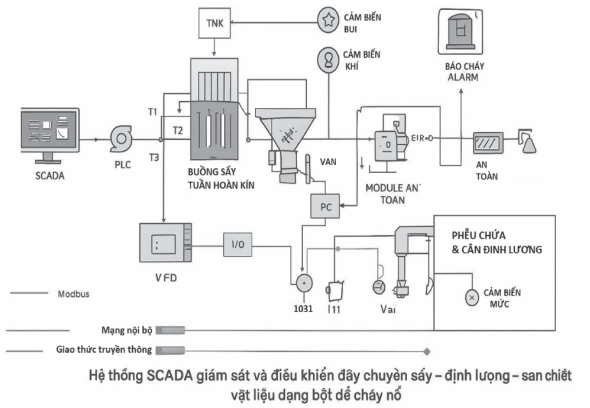
Kết quả cho thấy: Ở 60°C: COP = 3,8-4,2; Ở 70°C: COP = 3,4-3,6. Mức tiêu thụ năng lượng giảm 18-25% so với sấy điện trở cưỡng bức.

4.5. Đánh giá an toàn cháy nổ

Mô phỏng trường nhiệt cho thấy không xuất hiện vùng quá nhiệt (> 85°C) trong toàn bộ thể tích sấy, kể cả với lớp bột dày 10 mm. Độ ẩm khí thải luôn duy trì dưới 20%, giúp giảm khả năng tích điện tĩnh và cháy bụi. Áp

suất buồng sấy được điều chỉnh ổn định nhờ cơ chế xả ẩm tuần hoàn kín. Hệ thống đạt cấp an toàn II theo tiêu chuẩn ATEX – phù hợp với vật liệu dễ cháy nổ.

Ngoài ra, hệ thống được trang bị bộ điều khiển SCADA để giám sát và cảnh báo tự động các thông số nhiệt, ẩm, áp suất, khối lượng, cùng với tính năng ngắt mạch khẩn cấp khi vượt ngưỡng an toàn (Hình 6).



Hệ thống SCADA giám sát và điều khiển dây chuyền sấy – định lượng – san chiết vật liệu dạng bột dễ cháy nổ



Hình 6. Hệ thống điều khiển SCADA và giao diện hiển thị thông số vận hành.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã xây dựng và mô phỏng thành công mô hình sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng cho vật liệu dạng bột dễ cháy nổ bằng phương pháp CFD.

Kết quả mô phỏng cho thấy phân bố nhiệt – ẩm đồng đều trong toàn buồng sấy, với gradient nhiệt nhỏ và hiệu quả thoát ẩm cao, góp phần giảm nguy cơ cháy bụi và cải thiện chất lượng sản phẩm.

Động lực học sấy được mô tả tốt bằng mô hình Henderson – Pabis, với hệ số tương quan $R^2 > 0,99$, chứng minh độ phù hợp cao giữa kết quả mô phỏng và dữ liệu thực nghiệm.

Hiệu suất năng lượng của hệ thống, biểu thị qua hệ số COP, đạt từ 3,4-4,2 ở nhiệt độ sấy 40-70°C, cao hơn 20-25% so với sấy cưỡng bức thông thường.

Cấu trúc dòng khí thẳng đứng cưỡng bức và chu trình bơm nhiệt kín giúp hệ thống hoạt động ổn định, không phát sinh điểm nóng, đảm bảo an toàn cho vật liệu dạng bột có nguy cơ cháy nổ.

Kết quả nghiên cứu khẳng định tính khả thi và hiệu quả năng lượng của công nghệ sấy bơm nhiệt dòng khí thẳng đứng trong các ứng dụng công nghiệp, dược phẩm và quốc phòng.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài cấp Bộ Khoa học và Công nghệ: "Nghiên cứu công nghệ và giải pháp an toàn chế tạo hệ thống thiết bị tự động liên hoàn sấy, định lượng san chiết vật liệu dạng bột dễ cháy nổ", mã số: 03/2024/HĐ-ĐTCB.❖

Ngày nhận bài: **03/11/2025**
Ngày phản biện: **12/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Trần Văn Phú (2002), "*Tính toán và thiết kế hệ thống sấy*". NXB. Giáo dục.
[2]. Trần Văn Phú (1994), "*Hệ thống sấy công nghiệp và dân dụng*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[3]. Hoàng Văn Chước (2006), "*Thiết kế hệ thống thiết bị sấy*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[4]. Alves-Filho O., Stommen I. (1996), "*Application of heat pump in drying of biomaterials*". Drying Technology, 14: 2061-2090.
[5]. Hoàng Đình Tính (1996), "*Truyền nhiệt và tính toán thiết bị trao đổi nhiệt*". Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh.
[6]. Phạm Văn Tùy, Nguyễn Văn An (2005), "*Bơm nhiệt sấy lạnh và hút ẩm BK-BSH18*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nhiệt, số 65/2005.
[7]. Nguyễn Đức Lợi, Phạm Văn Tùy (2005), "*Máy và thiết bị lạnh*". NXB. Giáo dục.
[8]. Hoàng Đình Tín, Lê Chí Hiệp (1997), "*Nhiệt động lực học kỹ thuật*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[9]. Võ Chí Chính, Đinh Văn Thuận (2009), "*Hệ thống máy và thiết bị lạnh*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật.
[10]. Hoàng Đình Tín, Bùi Hải (2004), "*Bài tập nhiệt động lực học kỹ thuật và truyền nhiệt*". NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.
[11]. Hoàng Đình Tín (2002), "*Cơ sở truyền nhi*ệt". NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.
[12]. Adhikari B., Howes T., Bhandari B.R., Truong V. (2001), "*Stickiness in food: a review of mechanisms and test methods*". Int. J. Food Prop., 4(1): 1-33.

ỨNG DỤNG PHẦN MỀM MATLAB/SIMULINK MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG TRÊN Ô TÔ ĐIỆN VINFAST VF9 PLUS

APPLICATION OF MATLAB/SIMULINK SOFTWARE TO SIMULATE THE TRANSMISSION SYSTEM ON THE VINFAST VF9 PLUS ELECTRIC CAR

TS. **Hoàng Văn Thành**
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email: hoangvanthanh@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Hiện nay để đáp ứng yêu cầu về tiết kiệm năng lượng và giảm phát thải thì việc nghiên cứu, mô phỏng và đánh giá hiệu suất hệ truyền động trên xe ô tô điện đóng vai trò hết sức quan trọng, giúp dự đoán được đặc tính làm việc cũng như tối ưu hóa thiết kế trước khi đi vào thực tế. Với sự hỗ trợ mạnh mẽ của phần mềm Matlab/Simulink, chúng ta có thể xây dựng các mô hình toán học, tái hiện các chu trình lái tiêu chuẩn và phân tích chi tiết hiệu năng hệ thống. Bài báo này giới thiệu nghiên cứu tính toán mô phỏng và đánh giá hệ thống truyền động bằng phần mềm Matlab/Simulink nhằm xác định trạng thái sạc của pin (SOC) trên ô tô điện VinFast VF9 Plus.

Từ khóa: *Ô tô điện VinFast VF9 Plus; Động cơ điện; Trạng thái sạc của pin.*

ABSTRACT

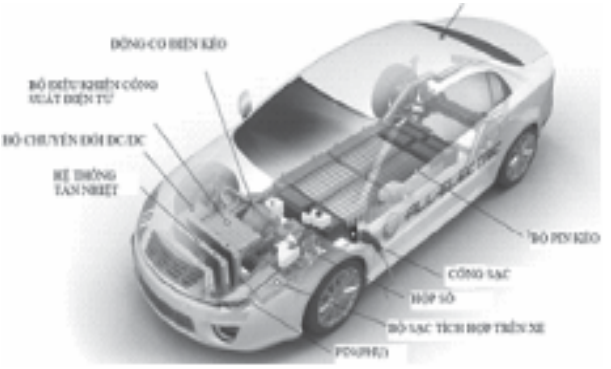
Currently to meet the requirements of energy saving and emission reduction, the research, simulation and evaluation of the performance of the transmission system on electric cars plays a very important role, helping to predict the working characteristics as well as optimize the design before going into practice. With the strong support of Matlab/Simulink software, we can build mathematical models, reproduce standard driving cycles and analyze the system performance in detail. This paper introduces the study of simulation calculation and evaluation of the transmission system using Matlab/Simulink software to determine the state of charge of the battery (SOC) on the VinFast VF9 Plus electric car.

Keywords: *VinFast VF9 Plus electric car; Electric motor; Battery charge status.*

1. CẤU TẠO VÀ NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG TRÊN XE ĐIỆN

1.1. Cấu tạo xe ô tô điện

Về cơ bản bao gồm hai bộ phận chính là bộ pin và động cơ điện thể hiện trên (hình 1). Ngoài ra, xe điện còn có một số bộ phận khác như hệ thống điều khiển, hệ thống phanh, hệ thống treo, hệ thống truyền động, hệ thống lái, hệ thống chiếu sáng,…



Hình 1. Cấu trúc hệ thống truyền động trên xe điện

Bộ pin: Là bộ phận lưu trữ năng lượng điện cho xe hoạt động. Bộ pin thường được đặt ở phía dưới sàn xe hoặc ở phía sau xe. Bộ pin có thể là loại pin lithium-ion, pin lithium-polymer hoặc pin nickel-metal hydride.

Ắc quy phụ: Trên một chiếc xe truyền động bằng điện, nguồn pin phụ cung cấp năng lượng cho các thiết bị trên xe hoạt động.

Cổng sạc: Cổng sạc cho phép người dùng kết nối phương tiện với nguồn điện bên ngoài để sạc ắc quy.

Bộ chuyển đổi DC/DC: Thiết bị này chuyển đổi nguồn DC áp cao từ ắc quy thành nguồn DC áp thấp cần thiết để các thiết bị trên xe hoạt động và sạc lại cho ắc quy phụ.

Động cơ điện/motor điện: Cấu tạo xe ô tô điện sử dụng năng lượng từ bộ nguồn ắc quy, mortor này dẫn động các bánh xe. Là bộ phận chuyển hóa năng lượng điện thành năng lượng cơ học để làm quay bánh xe. Động cơ điện thường được đặt ở phía sau xe. Một số phương tiện khác còn sử dụng tổ hợp động cơ và máy phát (motor generators) thực hiện cả hai chức năng truyền động và tái sinh năng lượng [1].

Bộ sạc tích hợp trên xe: Nó sử dụng nguồn điện AC được cung cấp qua cổng sạc và chuyển đổi chúng thành nguồn DC để sạc cho bình ắc-quy. Bộ phận này theo dõi các thông số của ắc-quy như điện áp, nhiệt độ, dòng và trạng thái sạc [6].

Bộ điều khiển điện tử công suất (Power Electronics Controller): Bộ phận này quản lý dòng điện năng được cung cấp từ ắc-quy, điều khiển tốc độ quay của mô tơ điện và mô-men xoắn mà nó tạo ra.

Hệ thống làm mát (Thermat System): Hệ thống này giúp xe ô tô điện duy trì một phạm vi nhiệt độ thích hợp cho động cơ/motor điện và các bộ phận khác.

Bộ ắc quy kéo: Lưu trữ điện để cung cấp tới mô tơ.

1.2. Nguyên lý hoạt động của hệ thống truyền động

Sử dụng năng lượng từ pin (điện một chiều – DC) được chuyển đổi thành điện xoay chiều AC bởi bộ biến tần, sau đó cấp cho 2 động cơ điện đặt ở cầu trước và sau sinh ra mô-men xoắn cực đại. Nhờ sử dụng hộp số 1 cấp tối ưu hóa cho đặc tính vận hành của các động cơ điện nên tốc độ quay sẽ giảm từ đây tới các bánh xe giúp xe chuyển động [2].

Khi nhấn ga, bộ điều khiển sẽ điều chỉnh dòng điện đến động cơ để tăng tốc, còn khi đạp phanh động cơ sẽ hoạt động như máy phát, chuyển hóa động năng thành điện năng để nạp lại cho pin (phanh tái tạo) [4].

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHỎNG TRONG SIMULINK

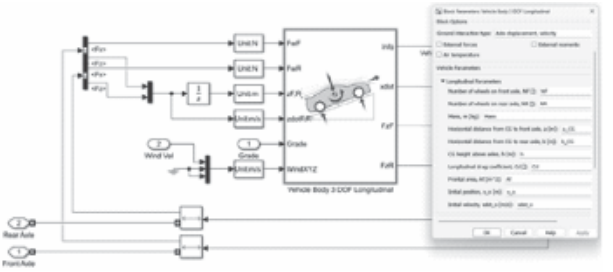
2.1. Sơ đồ khối của xe và Cách tiếp cận

Sơ đồ khối của xe và Cách tiếp cận được thể hiện trên (hình 2), trong đó Sơ đồ khối của xe (hình 2a) và Cách tiếp cận (hình 2b).



Hình 2. Sơ đồ khối của xe và cách tiếp cận: a - Sơ đồ khối của xe; b - Cách tiếp cận

2.2. Khối thân xe



Hình 3. Khối thân xe

Khối này được sử dụng để mô tả mô hình dọc của xe (hình 3), không tính đến các lực ngang, chẳng hạn như lực do vô lăng quay hoặc các lực bên ngoài khác, nhưng tính đến sự truyền tải tải trọng dọc do xe tăng tốc hoặc giảm tốc trong quá trình xe di chuyển.

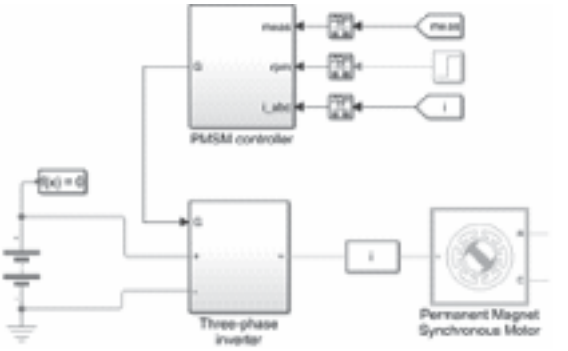
2.3. Khối bánh răng đơn cấp



Hình 4. Bánh răng đơn cấp

Được mô hình hóa đơn giản như một cặp bánh răng giúp giảm tốc độ của động cơ điện với tỷ số truyền (hình 4). Nó chỉ đại diện cho tỷ số truyền động cuối cùng, mô tả mối quan hệ cơ bản giữa tốc độ quay và mô-men xoắn giữa trục chủ động (cổng vào) và trục bị động (đầu ra), đồng thời có thể xét đến hiệu suất truyền động và tổn thất cơ khí [3].

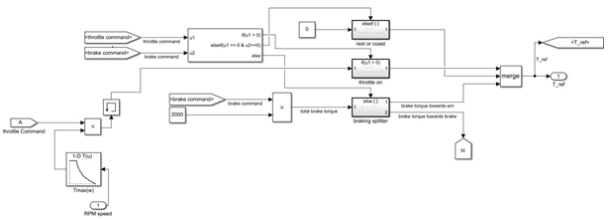
2.4. Mô hình động cơ điện và bộ điều khiển



Hình 5. Mô hình động cơ điện

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM: Permanent Magnet Synchronous ☞

Motor) là một loại động cơ xoay chiều trong đó từ trường rotor được tạo ra bởi các nam châm vĩnh cửu (hình 5), thay cho dòng điện kích từ như ở động cơ đồng bộ truyền thống. Động cơ PMSM ba pha hoạt động dựa trên nguyên lý: khi dòng điện xoay chiều ba pha (Động cơ PMSM ba pha trong ô tô là loại động cơ đồng bộ sử dụng nam châm vĩnh cửu trên rôto và cuộn dây ba pha trên stato, tạo ra từ trường quay để dẫn động rotor) chạy qua dây quấn stator, nó sinh ra từ trường quay có tốc độ đồng bộ với tốc độ quay của rotor. Nhờ nam châm vĩnh cửu trên rotor (hình 6), động cơ duy trì sự đồng bộ giữa từ trường stator và rotor, cho khả năng điều khiển mô-men và tốc độ chính xác [3].



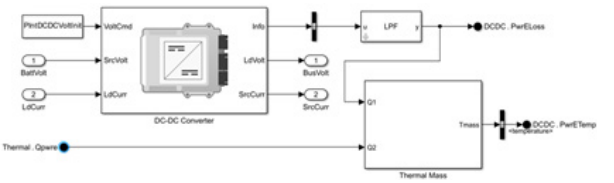
Hình 6. Mô hình bộ điều khiển

Nếu tín hiệu bàn đạp ga dương, điều đó có nghĩa là người lái đang yêu cầu xe tăng tốc, nếu bàn đạp ga không được nhấn và phanh cũng không được kích hoạt, (điều này có nghĩa là xe đang ở trạng thái dừng hoặc đang trong giai đoạn thả trôi), hệ thống phụ hành động "dừng hoặc thả trôi" sẽ được kích hoạt, trả về lệnh mô-men xoắn bằng 0, nếu bàn đạp phanh được nhấn, tức là người lái yêu cầu xe giảm tốc, hệ thống phụ tác động "bộ chia phanh" sẽ được kích hoạt.

2.5. Bộ pin

Là nguồn năng lượng chính cung cấp điện áp một chiều (DC) cho toàn bộ hệ thống truyền động. Khối Battery Pack được xây dựng dựa trên mô hình mạch tương đương của cell pin Li-ion, cho phép mô phỏng chính xác đặc tính điện áp, dung lượng, điện trở trong, hiệu suất và sự thay đổi trạng thái nạp (SOC – State of Charge) trong quá trình vận hành [5].

2.6. Bộ chuyển đổi công suất



Hình 7. Bộ chuyển đổi công suất

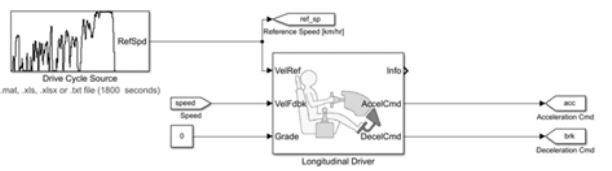
Là bộ biến đổi công suất điện áp một chiều cao – điện áp một chiều thấp hơn, có chức năng thay đổi mức điện áp một chiều DC từ gói pin cao áp sang giá trị phù hợp cho các tải trong hệ thống (hình 7).

2.7. Khối tín hiệu đầu vào và mô hình mô phỏng

a) Khối tín hiệu đầu vào

Chu trình lái FTP-75 (Federal Test Procedure/Quy trình kiểm tra liên bang).

- Thời gian 1874 giây ≈ 31.23 phút;
- Quãng đường ≈ 17.77 km;
- Tốc độ trung bình ≈ 34 km/h.



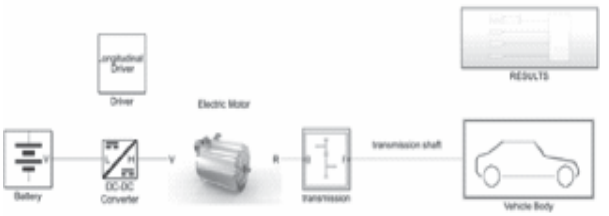
Hình 8. Cụm tín hiệu đầu vào

Drive Cycle (chu kỳ lái xe) là chuỗi dữ liệu vận tốc theo thời gian được xây dựng dựa trên thực tế giao thông. Nó được dùng làm đầu vào cho mô phỏng để đánh giá mức tiêu thụ năng lượng, công suất, SOC pin và hiệu suất truyền động (hình 8).

Khối điều khiển dọc trục là một trong những yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến tính ổn định của các mô phỏng. Lựa chọn được đưa ra là mô hình hóa nó như một bộ điều khiển PI cho thấy hệ thống hoặc quy trình được đề cập có đặc điểm phù hợp với bộ điều khiển tỉ lệ-tích phân (PI controller). Điều này có nghĩa là hệ thống có thể được điều chỉnh để hoạt động hiệu quả bằng cách sử dụng sự kết hợp của hai thành phần: phần tỉ lệ (P) phản ứng với sai số hiện tại, và phần tích phân (I) loại bỏ sai số tĩnh theo thời gian, mang lại sự ổn định và độ chính xác cho hệ thống, tức thời nhận tín hiệu đầu vào từ một chu kỳ lái xe được thiết lập trước (chọn FTP-75). Tùy thuộc vào tốc độ thực tế của xe so với tốc độ mục tiêu, sẽ đưa ra tín hiệu lệnh ga và phanh ở đầu ra [3].

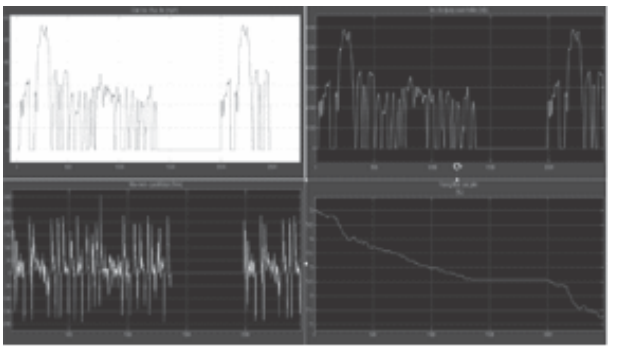
b) Mô hình mô phỏng

Mô hình mô phỏng được thể hiện trên (hình 9).



Hình 9. Mô hình mô phỏng

2.8. Kết quả mô phỏng



Hình 10. Kết quả mô phỏng

Khi mô phỏng trên chu trình FTP-75 (thời gian 31 phút, quãng đường ~17,8 km) được thể hiện trên (hình 10). Kết quả mô phỏng tín hiệu FTP-75 cho thấy vận tốc thực tế bám sát chu trình chuẩn (v_{max} ≈ 88 km/h), tốc độ quay động cơ 0-6000 vòng/phút, mô-men cực đại ~300 Nm và có giá trị âm ~200 Nm khi phanh tái sinh. SOC pin giảm từ 75% xuống còn 71,8% sau 41,2 phút (17,8 km), tương ứng mức tiêu thụ năng lượng ~22 kWh/100 km, phản ánh đúng đặc tính vận hành và hiệu suất của hệ truyền động VF9 Plus.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã mô phỏng thành công hệ truyền động trên ô tô điện bằng phần mềm Matlab/Simulink, kết quả cho thấy hệ truyền động của ô tô Vinfast VF9 Plus có khả năng đáp ứng tốt các chu trình vận hành trong đô thị, đồng thời tận dụng hiệu quả phanh tái sinh để thu hồi năng lượng cho pin. Vận tốc xe bám sát chu trình tiêu chuẩn, động cơ điện đạt hiệu suất cao và trạng thái sạc của pin SOC pin có mức tiêu thụ phù hợp với tiêu chuẩn Hoa Kỳ.❖

Ngày nhận bài: **20/9/2025**
Ngày phản biện: **01/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bosch (2014), "*Automotive Handbook (9th ed.)*". Robert Bosch GmbH.
[2]. Wong, J. Y. (2001), "*Theory of Ground Vehicles (3rd ed.)*". John Wiley & Sons.
[3]. MATLAB & Simulink (2024), "*Documentation and Examples for Vehicle Powertrain Modeling*". MathWorks.
[4]. Rajesh Rajamani, "*Vehicle Dynamics and Control*". Springer, 2nd edition (2012).
[5]. Chan, C. C. (2007), "*The state of the art of electric and hybrid vehicles*". Proceedings of the IEEE, 95(4).
[6]. Vinfast.vn

ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP THIẾT KẾ XE ĐIỆN 4 BÁNH THÍCH ỨNG VỚI ĐẶC THÙ GIAO THÔNG ĐÔ THỊ THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

PROPOSING A DESIGN METHOD FOR FOUR-WHEELED ELECTRIC VEHICLES ADAPTED TO THE URBAN TRAFFIC CHARACTERISTICS OF HO CHI MINH CITY

Bùi Văn Hưng, Lê Thanh Nhàn*, Huỳnh Diệp Ngọc Long
Trường Cao đẳng Kỹ nghệ II
**Email: nhanlethanh@hvct.edu.vn*

TÓM TẮT

Trong bối cảnh nhu cầu trung chuyển hành khách tại các bến xe ngày càng tăng, việc phát triển xe điện 4 bánh cỡ nhỏ phù hợp với điều kiện giao thông nội đô là hết sức cần thiết. Bài báo trình bày phương pháp xác định cấu hình xe điện dựa trên đặc thù khai thác vận tải hành khách ở TP. Hồ Chí Minh và các đô thị Việt Nam. Thông qua khảo sát hiện trạng giao thông và hạ tầng đô thị, nhóm nghiên cứu đã xác định được những thông số cơ bản phục vụ thiết kế như quãng đường hoạt động, vận tốc trung bình, tải trọng hành lý và số chỗ ngồi cần thiết. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất sơ đồ trình tự thiết kế cùng phương pháp tính toán cho hệ thống động cơ điện và nguồn năng lượng của xe. Kết quả nghiên cứu góp phần chuyên môn hóa quá trình thiết kế, đồng thời đảm bảo tính phù hợp của xe điện cỡ nhỏ đối với nhu cầu vận tải đô thị.

Từ khóa: *Xe điện 4 bánh; Giao thông đô thị; Cấu hình xe; Trình tự thiết kế; Động cơ điện; Nguồn năng lượng.*

ABSTRACT

With the increasing demand for passenger transfer at bus stations, the development of compact four-wheeled electric vehicles suitable for inner-city traffic conditions has become essential. This paper introduces a design method for determining the configuration of electric vehicles based on the operational characteristics of passenger transport in Ho Chi Minh City and other urban areas in Vietnam. By surveying the current traffic situation and infrastructure, fundamental design parameters such as travel range, average speed, luggage capacity, and passenger capacity were identified. Accordingly, a step-by-step design procedure and calculation method for the electric motor and energy source are proposed. The results contribute to the specialization of the design process and ensure the suitability of small electric vehicles for urban transportation demands.

Keywords: *Four-wheeled electric vehicle; Urban traffic; Vehicle configuration; Design procedure; Electric motor; Energy source.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cùng với sự phát triển của xã hội, nhu cầu đi lại của người dân ngày càng tăng, đòi hỏi phải có nhiều loại phương tiện giao thông phù hợp với điều kiện khai thác thực tế. Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu và phát triển xe điện 4 bánh cỡ nhỏ phục vụ trung chuyển hành khách nội đô trở nên cần thiết, đặc biệt tại các đô thị lớn như TP. Hồ Chí Minh. Ngoài mạng lưới xe buýt và taxi truyền thống, thành phố đang từng bước đưa vào vận hành các tuyến metro, qua đó hình thành nhu cầu cấp thiết về phương tiện trung chuyển linh hoạt, thân thiện môi trường để kết nối hành khách từ bến xe, ga metro đến các khu vực lân cận.

Để xác định cấu hình thiết kế phù hợp, nhóm nghiên cứu đã tiến hành khảo sát hoạt động của các loại phương tiện trung chuyển hiện có như taxi và xe ôm tại những bến xe lớn trong thành phố, tiêu biểu là bến xe Miền Tây và bến xe Miền Đông. Các phương tiện này có đặc điểm khai thác điển hình: sau khi hoàn thành chuyến chở khách, chúng quay về bến để tiếp tục phục vụ. Đặc trưng vận hành này vừa thể hiện vai trò quan trọng của taxi, xe ôm và phương tiện trung chuyển trong vận tải hành khách nội đô, vừa có nhiều điểm tương đồng với mô hình xe điện cỡ nhỏ. Đây là cơ sở để đề xuất cấu hình thiết kế xe điện 4 bánh phù hợp với điều kiện giao thông đô thị và xu thế phát triển hệ thống giao thông công cộng hiện đại tại TP. Hồ Chí Minh.

2. KHẢO SÁT DỮ LIỆU VÀ XÁC ĐỊNH CẤU HÌNH XE ĐIỆN

2.1. Phân tích kết quả khảo sát

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh, nhu cầu đi lại tại TP. Hồ Chí Minh liên tục gia tăng, với khoảng 25 triệu lượt hành khách/năm tại các bến xe liên tỉnh lớn như Bến xe Miền Đông và Bến xe Miền Tây [1]. Đồng thời, tuyến Metro số 1 (Bến Thành – Suối Tiên) đã chính thức đi vào vận hành từ cuối năm 2024, với công suất dự kiến trên 160.000 lượt khách/ngày [2]. Sự kết nối giữa các bến xe, ga metro và khu vực dân cư, thương mại đặt ra yêu cầu cấp thiết về phương tiện trung chuyển hiệu quả, linh hoạt và thân thiện môi trường. Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu và phát triển xe điện 4 bánh cỡ nhỏ phục vụ trung chuyển nội đô trở nên cần thiết, vừa đáp ứng nhu cầu đi lại, vừa góp phần giảm thiểu ô nhiễm không khí và ùn tắc giao thông.

Để xác định cấu hình thiết kế phù hợp, nhóm nghiên cứu đã phân tích dữ liệu khảo sát hoạt động của các loại hình phương tiện trung chuyển phổ biến như taxi và xe ôm tại những bến xe lớn, quãng đường chở hành khách mỗi ngày, tốc độ di chuyển, số lượt hành khách mỗi lượt [3]. Và nhận thấy rằng đặc điểm khai thác của nhóm phương tiện này là sau khi hoàn thành chuyến chở khách, chúng quay về bến để tiếp tục phục vụ. Điều này vừa thể hiện vai trò then chốt của taxi và xe ôm trong hệ thống vận tải đô thị, vừa có nhiều điểm tương đồng với mô hình khai thác của xe điện cỡ nhỏ.

Bên cạnh đó, kết quả khảo sát về quãng đường di chuyển cho thấy, hành khách thường đi trong khoảng 4 – 8 km, do hệ thống bến xe được phân bố khá dày đặc. Khi tính cả quãng đường quay về bến, tổng quãng đường thực tế xe đi trong ngày đối với xe ôm khoảng 52,48 km và taxi khoảng 62,16 km [3]. Điều này cho thấy, một chiếc xe có phạm vi hoạt động dưới 100 km hoàn toàn có thể đáp ứng nhu cầu chuyên chở khách hằng ngày.

Ngoài ra, theo kết quả khảo sát về tốc ☞

độ di chuyển, khối lượng hành lý và lượng hành khách mỗi lượt [3], có thể thấy tốc độ trung bình của các phương tiện trung chuyển hiện nay nằm trong khoảng 30 – 40 km/h, phổ biến nhất là 30 – 35 km/h, phù hợp với điều kiện hạ tầng và mật độ giao thông của TP. Hồ Chí Minh. Hành lý hành khách chủ yếu dưới 20 kg, trong đó mức 5 – 10 kg chiếm tỷ lệ cao nhất, cho thấy việc bố trí không gian chứa hành lý trên xe là cần thiết. Bên cạnh đó, số liệu khảo sát cũng chỉ ra taxi thường phục vụ nhóm 3 – 4 người, chiếm tỷ lệ lớn nhất; hành khách có xu hướng tận dụng tối đa số ghế ngồi, điều này chứng tỏ các loại xe có sức chứa lớn hơn sẽ đáp ứng tốt hơn nhu cầu thực tế và giúp giảm chi phí dịch vụ bình quân.

Ngoài những kết quả đạt được, các tài xế cũng phản ánh một số khó khăn trong quá trình khai thác như mật độ giao thông đông vào giờ cao điểm, xe ôm bị hạn chế chỉ chở được một hành khách, taxi thiếu điểm dừng đỗ hợp pháp và nhiều nút tín hiệu chưa có đồng hồ đếm ngược. Vấn đề họ quan tâm nhất là hiệu quả sử dụng năng lượng. Do đó, nếu một mẫu xe điện có khả năng tiết kiệm năng lượng và khắc phục được những hạn chế này thì chắc chắn sẽ được đón nhận. Từ cơ sở khảo sát, có thể đề xuất xe điện 4 bánh cỡ nhỏ với phạm vi hoạt động dưới 100 km mỗi lần sạc, vận tốc trung bình 30 – 35 km/h, có không gian hành lý hợp lý và chở được nhiều hành khách. Đặc điểm khai thác của xe ôm và taxi có nhiều điểm tương đồng, khẳng định tính khả thi của mô hình này cho TP. Hồ Chí Minh. Đồng thời, việc ứng dụng công nghệ tái tạo năng lượng khi phanh, xuống dốc hoặc dừng chờ sẽ nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng, góp phần vào xu hướng giao thông xanh và bền vững [4].

2.2. Xác định cấu hình xe điện

Như phân tích ở trên, một mẫu xe điện phục vụ nhu cầu chuyên chở hành khách nội đô tại các bến cần được thiết kế với cấu tạo đơn giản, giảm thiểu chi phí và tiện nghi không cần thiết nhằm đảm bảo giá bán hợp lý. Tham khảo các dòng xe điện hiện có trên thị trường, phương án xe điện bốn bánh được đánh giá là phù hợp nhất. So với xe ba bánh, loại xe này có độ ổn định cao hơn, đảm bảo an toàn khi vận hành trong điều kiện mật độ giao thông lớn của đô thị. Ngoài ra, xe bốn bánh còn đáp ứng tốt hơn nhu cầu chở nhiều hành khách và hành lý, phù hợp với xu hướng dịch vụ taxi nhỏ gọn.

Các chi tiết cấu thành của xe điện cỡ nhỏ bốn bánh nhìn chung vẫn có thể được thiết kế ở mức đơn giản, và với năng lực công nghiệp phụ trợ hiện nay, việc nội địa hóa sản xuất là khả thi [5], [6]. Mẫu xe điện này cần đáp ứng một số yêu cầu kỹ thuật cơ bản, được trình bày trong Bảng 1.

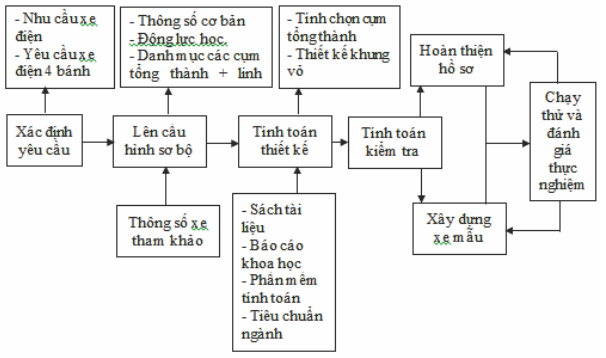
Bảng 1. Các thông số yêu cầu xe điện cỡ nhỏ

STT	Thông số	Yêu cầu
1	Số chỗ ngồi	05 người (bao gồm tài xế)
2	Trọng lượng xe không tải	G = 615 (Kg)
3	Trọng lượng 2 người khoang lái	G_{nt} = 130 (Kg)
4	Trọng lượng 3 người khoang hành khách	G_{ns} = 195 (Kg)
5	Khối lượng hành lý	G_{hl} = 20 (Kg)
6	Vận tốc cực đại	V = 40 (Km/h)
7	Quãng đường di chuyển	S = 85 (Km)
8	Khả năng vượt dốc	α = 10%.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Ngoài các yêu cầu cơ bản trên, xe điện cần đáp ứng thêm một số tiêu chí quan trọng khác. Cụ thể, xe phải có không gian bố trí hành lý thuận tiện cho hành khách mang theo đồ đạc; giá cước vận tải ở mức thấp, phù hợp với thu nhập phổ biến của người dân đô thị. Bên cạnh đó, xe cần được thiết kế với khả năng tiết kiệm năng lượng, đặc biệt là hạn chế tiêu hao khi xe dừng, không tải hoặc trong quá trình phanh và xuống dốc, nhờ cơ chế tái tạo năng lượng.

Trên cơ sở các yêu cầu kỹ thuật và tiêu chí khai thác, quy trình thiết kế xe điện cỡ nhỏ được xây dựng theo sơ đồ trình tự như Hình 1.

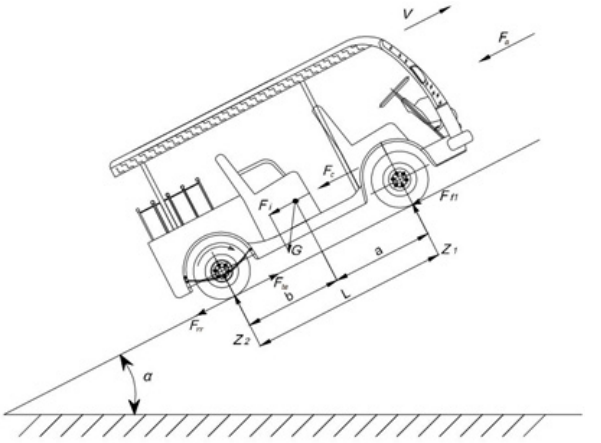


Hình 1. Sơ đồ trình tự thiết kế xe điện cỡ nhỏ [7]

3. TÍNH TOÁN LỰA CHỌN ĐỘNG CƠ ĐIỆN

3.1. Xác định công suất động cơ điện

Công suất cần thiết của động cơ điện được xác định nhằm tạo ra lực kéo tiếp tuyến tại các bánh xe chủ động để vượt qua các lực cản chuyển động tác động lên xe. Các lực cản này bao gồm: lực cản lăn, lực cản dốc, lực cản không khí và lực quán tính. Mối quan hệ tổng hợp giữa công suất động cơ và các lực cản được minh họa ở Hình 2 [8].



Hình 2. Các lực tác dụng lên xe

+ Lực cản lăn:

$$F_{rr} = f.(Z_1 + Z_2) = f.G_{tb}.\cos\alpha \quad (1)$$

Với: f là hệ số cản lăn (đường nhựa f = 0,02); G_{tb} = 9600 (N) là trọng lượng xe; α là góc dốc của mặt đường.

+ Lực cản không khí:

$$F_a = \frac{1}{2}\rho C.F.v^2 \quad (2)$$

Trong đó:

- ρ là mật độ không khí, ρ = 1,24 kg/m³;
- C là hệ số khí động của ô tô, chọn C = 0,45;
- F là diện tích chính diện của xe (m²), với xe thiết kế chọn: F = 0,85.B.H = 0,85.1,4.1,75 = 2,08 m²;
- v là vận tốc xe.

Ta tính công suất lớn nhất động cơ điện lúc xe đạt tốc độ cực đại và chạy trên đường bằng. Khi đó, công suất kéo cần khắc phục hai công suất cản là công suất cản lăn N_{rr} và công suất cản không khí N_a. Ta có công suất cản của xe lúc này là:

$$N_{arr} = N_{rr} + N_a = (F_{rr} + F_a).v \quad (3)$$

Từ công thức (1) với $\alpha = 0°$ thì $F_{rr} = 192$ (N);

Từ công thức (2) với v = 40 km/h = 11,11 (m/s) thì $F_a = 71,64$ (N);

Thay vào (3), ta được $N_{arr} = 2929$ (W).

Công suất cực đại yêu cầu của động cơ N_{yc} là công suất cần thiết của động cơ để cân bằng với công cản của xe trong trường hợp này:

$$N_{yc} = \frac{N_{arr}}{\eta_{dc}.\eta_{tl}} \quad (4)$$

Với, $\eta_{dc} = 0,85$ là hiệu suất của động cơ điện; $\eta_{tl} = 0,9$ là hiệu suất của hệ thống truyền lực.

Từ công thức (4), ta tính được công suất cực đại yêu cầu của động cơ $N_{yc} = 3828,7$ (W).

3.2. Tính mô-men lớn nhất của động cơ điện

Mô-men cực đại của động cơ điện được xác định trong điều kiện xe phải leo dốc với độ dốc lớn nhất $\alpha = 10\%$. Để đảm bảo xe vượt qua được sức cản lớn nhất trong tình huống này, hệ thống truyền lực cần cung cấp mô-men tại bánh xe đủ lớn để thắng tổng hợp các lực cản chuyển động (bao gồm lực cản dốc, lực cản lăn, lực cản quán tính và lực cản không khí). Khi đó, động cơ điện phải được thiết kế sao cho mô-men tại bánh xe đạt giá trị cần thiết để xe có thể khởi hành và tiếp tục di chuyển ổn định trên đoạn dốc [8].

$$\frac{M_{emax} i_t}{r_b} \eta_{tl} \geq G\psi_{max} \quad (5)$$

ψ_{max} là hệ số cản tổng cộng lớn nhất của đường:

$\psi_{max} = f + i_{max} = f + tg\alpha_{max} = 0,02 + tg10° = 0,02 + 0,176 = 0,196$

i_t tỉ số truyền của truyền lực chính, chọn $i_t = 7,6$;

r_b là bán kính bánh xe, với loại lốp 4,0-R12, ta chọn được $r_b = 0,236$ (m) [9].

M_{emax} là mô-men cực đại của động cơ, ta có:

$$M_{emax} = \frac{G\psi_{max}.r_b}{\eta_{tl}.i_t} \quad (6)$$

Ta tính được $M_{emax} = 66,3$ (N.m).

3.3. Xác định tốc độ định mức của động cơ

Với tốc độ thiết kế của xe là 40 Km/h, tỉ số truyền của truyền lực chính $i_t = 7,6$. Ta xác định được tốc độ định mức của động cơ như sau [8]:

$$v = \frac{\omega_e}{i_t}.r_b \rightarrow \omega_e = \frac{v.i_t}{r_b} \quad (7)$$

Ta có:

$$n = 30\frac{\omega_e}{\pi} = 30.\frac{v.i_t}{\pi.r_b} \quad (8)$$

Ta tính được: n = 3418 (vòng/phút).

Sau khi phân tích so sánh tính năng các loại động cơ điện, chọn động cơ một chiều không chổi than cho xe thiết kế vì có các ưu điểm như: hiệu suất cao, mật độ công suất cao, mô-men quán tính lớn, thay đổi tốc độ nhanh [10]. Với yêu cầu của động cơ có P = 3889,8 (W), $M_{emax} = 66,3$ (N.m), n = 3418 (vòng/phút) và dựa vào bảng thông số các loại động cơ điện hiện tại trên thị trường, ta lựa chọn động cơ 180WD-M19030 cho xe điện với các thông số thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2. Các thông số động cơ 180WD-M19030

STT	Thông số	Giá trị
1	Công suất	5700 (W)
2	Mô-men cực đại	66,8 (N.m)
3	Tốc độ định mức	3000 (vòng/phút)

3.4. Tính toán và lựa chọn nguồn năng lượng

Theo yêu cầu nguồn năng lượng cần đảm bảo xe có thể chạy tối thiểu được quãng đường 85 km cho mỗi lần sạc đầy. Giả sử xe chuyển động đều với tốc độ 36km/h = 10 m/s trên mặt đường bằng. Xe chạy quãng đường S = 85 km trong thời gian:

$$T_{85} = \frac{S}{V} = \frac{85}{36} = 2{,}36\ \text{h} \quad (9)$$

Khi xe chuyển động đều, ta có lực kéo xe F_{te} bằng tổng lực cản lăn F_{rr} và lực cản không khí F_a:

$$F_{te} = F_{rr} + F_a \quad (10)$$

Từ công thức (1) với $\alpha = 0°$ thì $F_{rr} = 192$ (N);

Từ công thức (2) với v = 10 m/s thì $F_a = 58{,}032$ (N);

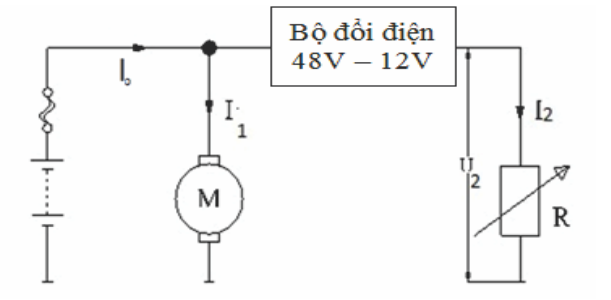
Thay vào (10), ta được $F_{te} = 250{,}032$ (N).

Công suất mà xe tiêu thụ khi chạy ở tốc độ v = 10 (m/s):

$$P_{xe} = F_{te}.V = 250{,}032.10 = 2500{,}32\ (W) \quad (11)$$

Giả sử động cơ có hiệu suất $\eta_{dc} = 85\%$; bộ biến đổi điện có hiệu suất $\eta_{bbd} = 90\%$, suy ra công suất mà ắc quy cung cấp cho động cơ:

$$P_{bat} = \frac{P_{xe}}{\eta_{dc}.\eta_{bbd}} = \frac{2500{,}32}{0{,}85.0{,}9} = 3268{,}4\ (W) \quad (12)$$



Hình 3. Sơ đồ tính chọn ắc quy.

Sơ đồ tính chọn ắc quy được thể hiện ở hình 3. Tổng công suất phụ tải không liên tục trên xe là P = 32,2 (W) [7]. Hiệu suất bộ chuyển đổi điện áp từ 48V thành 12V chọn là 90%:

Công suất cho phụ tải là:

$$P_p = \frac{32{,}2}{0{,}9} = 35{,}8\ \text{W}$$

Vậy công suất toàn bộ xe sử dụng là:

$$P_{\Sigma} = P_{bat} + P_p = 3268{,}4 + 35{,}8 = 3304{,}2\ \text{W} \quad (13)$$

Ắc quy cần đủ năng lượng để duy trì công suất phát này trong thời gian ít nhất T_{85} giờ. Vậy năng lượng tối thiểu của ắc quy:

$$W_{bat} = P_{\Sigma}.T_{85} = 3304{,}2.2{,}36 = 7797{,}912\ \text{Wh} \quad (14)$$

Chọn hệ số dự trữ 1,15, ta được năng lượng ắc quy cần thiết:

$$W_{bat} = 7797{,}912\ .1{,}15 = 8967{,}6\ \text{Wh}$$

Dung lượng ắc quy cần thiết để sử dụng cho xe thiết kế là:

$$Q = \frac{W_{bat}}{V_{DC}} = \frac{8967{,}6}{48} = 186{,}9\ Ah \quad (15)$$

So sánh với các dung lượng của các ☞

ắc quy đang có trên thị trường chọn ắc quy Lithium-ion 48V – 200Ah [9].

4. KẾT LUẬN

Các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước đã khẳng định xe điện có nhiều ưu thế về hiệu quả năng lượng và giảm thiểu tác động môi trường so với các loại phương tiện truyền thống. Thông qua khảo sát thực tiễn, có thể thấy rằng xe điện cỡ nhỏ hoàn toàn phù hợp cho nhu cầu trung chuyển hành khách tại các bến xe. Trên cơ sở đó, bài báo đã xây dựng phương pháp tính toán thiết kế, xác định các thông số cơ bản và tiến hành lựa chọn, tính toán hệ thống động lực cũng như nguồn năng lượng cho xe điện cỡ nhỏ. Cấu hình xe được đề xuất đảm bảo tính khả thi đối với điều kiện giao thông đô thị Thành phố Hồ Chí Minh nói riêng và Việt Nam nói chung. Nếu được triển khai sản xuất và quản lý hợp lý, mẫu xe điện này có tiềm năng ứng dụng rộng rãi, góp phần nâng cao chất lượng vận tải hành khách đô thị.❖

Ngày nhận bài: **29/9/2025**
Ngày phản biện: **08/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Sở Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh, "*Báo cáo thường niên về hoạt động vận tải hành khách công cộng năm 2022-2023*". TP. Hồ Chí Minh: Sở Giao thông vận tải, 2023.

[2]. Ban Quản lý Đường sắt Đô thị TP. Hồ Chí Minh (MAUR), "*Thông tin dự án tuyến metro số 1 Bến Thành – Suối Tiên*" [Online]. Available: https://maur.hochiminhcity.gov.vn, 2024.

[3]. Lê Thanh Nhàn, Đàm Hoàng Phúc, Nguyễn Thành Công, Nguyễn Văn Ngọc, Huỳnh Diệp Ngọc Long, "*Xây dựng phương pháp thiết kế xe điện ba bánh phù hợp với điều kiện sử dụng nội đô Hà Nội*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số tháng 9/2021.

[4]. Gianfranco Pistoia, "*Electric and Hybrid Vehicles Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*". Elsevier, 2010.

[5]. Bharati Parmar, Sachin Rajput, Pankaj Sanap, Dr. Fauzia Siddiqui, "*Design of a Three Wheeler Electric Vehicle: A Review*". International Journal of Scientic Engineering Research Volume 9, 2018.

[6]. Dhvani Pandya, Dr. A.M. Bisen, "*Analysis of Chassis in 3 Wheeler E-Rickshaw for Weight Reduction*". International Journal of Engineering Research Technology (IJERT), 2016.

[7]. PSG,TS. Nguyễn Khắc Trai, "*Cơ sở thiết kế ô tô*". NXB. Giao thông vận tải, 2006.

[8]. Nguyễn Hữu Cẩn, Dư Quốc Thịnh, Phạm Minh Thái, Nguyễn Văn Tài, Lê Thị Vàng, "*Lý thuyết ô tô*". NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2005.

[9]. Iqbal Husain, "*Electric and hybrid vehicles*". The CRC Press, 2005.

[10]. Ron Hodkinson and John Fenton, "*Lightweight Electric/ Hybrid Vehicle Design*". Butterworth-Heinemann, 2001.

NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP ĐO THỜI GIAN HẸN GIỜ CỦA THIẾT BỊ HẸN GIỜ GÂY NỔ CƠ KHÍ HGCK-21 BẰNG CẢM BIẾN AS5048A

RESEARCH ON THE TIMER MEASUREMENT METHOD OF THE HGCK-21 MECHANICAL EXPLOSION TIMER BY AS5048A SENSOR

Trần Thế Nghiệp, Nguyễn Xuân Dũng, Đỗ Tùng Lâm, Nguyễn Văn Lâm, Nguyễn Đình Phúc
Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng

TÓM TẮT

Thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí HGCK.21 được thiết kế và chế tạo theo kiểu thiết bị hẹn giờ gây nổ M564 để lắp cho các loại đạn bắn trên pháo 105 mm và 155 mm của Mỹ. Tính năng cơ bản của thiết bị gây nổ là có thể đặt giờ kích nổ đầu đạn trên quỹ đạo khi bắn trong khoảng thời gian từ (3 đến 100) giây, theo yêu cầu tác chiến. Vì vậy, trong quá trình sửa chữa, sản xuất việc đo kiểm thời gian hẹn giờ của thiết bị gây nổ là rất cần thiết nhằm kiểm soát chất lượng cũng như hiệu chỉnh trước khi xuất xưởng. Hiện nay, trong nước chưa có phương pháp, thiết bị thực hiện hạng mục quan trọng này.

Bài báo giới thiệu nguyên lý hoạt động của cụm đồng hồ trong thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí HGCK.21 (phần tử thực hiện chức năng hẹn giờ của thiết bị gây nổ). Trình bày phương pháp đo thời gian hẹn giờ bằng sử dụng cảm biến góc AS5048A, kết hợp công tắc hành trình để xác định thời gian bắt đầu và kết thúc quá trình làm việc của cụm đồng hồ; nguyên lý hoạt động, thiết kế mạch đo và xử lý tín hiệu của cảm biến AS5048A. Hệ thống được xây dựng gồm mô-đun cảm biến AS5048A, vi điều khiển STM32, cho phép thu thập và tính toán thời gian hẹn giờ theo góc quay thực tế. Các thông số chính của hệ thống: độ phân giải góc 0,0219°, độ chính xác đo ± 0,5°, tốc độ đọc dữ liệu đến 1MHz, thời gian đáp ứng dưới 1 ms. Trên cơ sở đó, tính toán thiết kế và chế tạo thiết bị đo thời gian hẹn giờ. Thực hành đo thời gian hẹn giờ cho cụm hẹn giờ của thiết bị gây nổ HGCK.21.

Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống đo bằng cảm biến AS5048A đạt độ ổn định cao, sai số nhỏ hơn 1% thời gian đặt giờ, và phù hợp cho việc kiểm tra, hiệu chỉnh cơ cấu đồng hồ trong thiết bị gây nổ. Đánh giá độ sai lệch phép đo, khẳng định độ tin cậy của phương pháp, thiết bị đo trong ứng dụng thực tế.

Từ khóa: *Cụm đồng hồ; Cảm biến AS5048A; Thiết bị đo thời gian.*

ABSTRACT

The HGCK.21 mechanical detonation timer is designed and manufactured according to the M564 detonation timer model to be installed on the ammunition fired on the American 105mm and 155mm artillery. The basic feature of the detonation device is to be able to set the time to detonate ☞

the warhead on the trajectory when firing within a period of 3 to 100 seconds, according to combat requirements. Therefore, during the repair and production process, measuring and checking the detonation timer of the detonation device is very necessary to control the quality as well as calibrate before leaving the factory. Currently, there is no method or equipment in the country to perform this important item.

The article introduces the operating principle of the clock cluster in the HGCK.21 mechanical detonation timer (the element that performs the timer function of the detonation device). Presenting the method of measuring the timer using the AS5048A angle sensor, combined with the travel switch to determine the start and end time of the clock cluster; operating principle, measuring circuit design and signal processing of the AS5048A sensor.

The system is built with the AS5048A sensor module, STM32 microcontroller, allowing the collection and calculation of the timer time according to the actual rotation angle. Main parameters of the system: angle resolution 0.0219°, measurement accuracy ±0.5°, data reading speed up to 1MHz, response time under 1 ms. On that basis, calculate the design and manufacture of the timer measuring device. Practice measuring the timer time for the timer cluster of the HGCK.21 explosive device. The test results show that the AS5048A sensor measurement system has high stability, the error is less than 1% of the set time, and is suitable for checking and calibrating the clock mechanism in explosive devices. The measurement error is evaluated, confirming the reliability of the method and measuring equipment in practical applications.

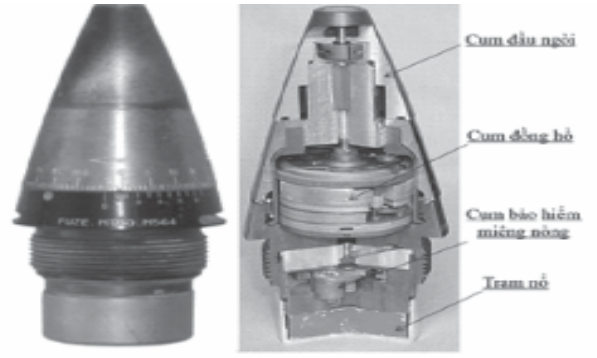
Keywords: *Instrument cluster; AS5048A sensor; Time measuring device.*

1. TỔNG QUAN

Thiết bị gây nổ được lắp cho các loại đạn pháo, đạn cối nhằm kích nổ đầu đạn ở một thời điểm nhất định trên quỹ đạo khi bắn, theo yêu cầu tác chiến. Thiết bị gây nổ thường được lắp cho các loại đạn nổ phá sát thương, đạn khói, đạn rải truyền đơn, đạn nhiệt nhôm và một số loại đạn đặc biệt khác. Thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí thường có phạm vi hẹn giờ khoảng từ (3 đến 100) giây (tùy theo mỗi loại). Trên thế giới cũng như trong trang bị quân đội ta có nhiều loại thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí, lắp cho các loại đạn khác nhau. Các thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí thường có cơ cấu đồng hồ. Cấu tạo cơ bản của cơ cấu đồng hồ bao gồm: bộ phận nguồn dưới dạng lò xo cót để cung cấp năng lượng cho hệ thống hoạt động, hệ thống truyền động dạng bánh răng, trục răng để truyền chuyển động từ bộ phận nguồn đến cơ cấu điều chỉnh vận hành. Bộ phận điều chỉnh vận hành gồm hệ thống thanh lắc, bánh răng vận hành có tác dụng điều hòa chuyển động, giúp hệ thống đồng hồ chuyển động ổn định trong suốt quá trình làm việc, không phụ thuộc vào sự suy giảm mô men của lò xo cót. Thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí HGCK-21 được thiết kế trên cơ sở mẫu thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí M564 của Mỹ, đây là một trong các loại thiết bị hẹn giờ cơ khí tiên tiến và điển hình trên thế giới hiện nay.

Cấu tạo thiết bị hẹn giờ gây nổ HGCK-21 về cơ bản giống thiết bị hẹn giờ gây nổ M564 gồm 04 bộ phận chính: Cụm đầu, cụm đồng hồ, cụm mở bảo hiểm miệng nòng và cụm trạm nổ.

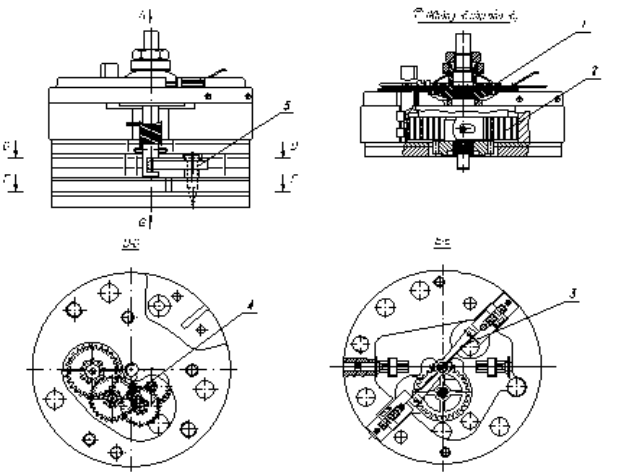
Thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí có thể đặt giờ từ (3 đến 100) giây (theo hệ thống vạch khắc), nhờ xoay chuyển động tương đối giữa chóp gió và thân, thông qua chốt định giờ tác động trực tiếp vào đĩa định giờ trên cụm đồng hồ. Quá trình bắn, các cơ cấu bảo hiểm được giải phóng, cụm đồng hồ làm việc đến hết thời gian đặt giờ, phát hỏa, kích nổ trạm nổ và đầu đạn.



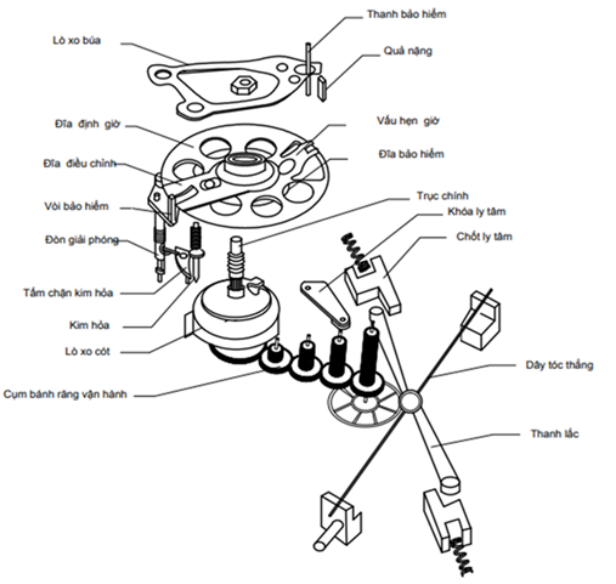
Hình 1. Cấu tạo thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí M564 của Mỹ

Cụm đồng hồ (Hình 2) là một thiết bị có thể hoạt động độc lập, bao gồm: Cơ cấu định giờ (VT1); lò xo cót (VT2); con lắc điều hòa (VT3); hệ thống truyền động bánh răng (VT4); cơ cấu phát hỏa hẹn giờ (VT5). Hệ thống làm việc nhờ năng lượng tích lũy của lò xo cót, thông qua bộ truyền bánh răng, giải phóng kim hỏa hẹn giờ và kích nổ mạch hẹn giờ. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của cụm đồng hồ được thể hiện trên Hình 3.

Ở trạng thái bảo quản và vận chuyển, lò xo cót đã được tích lũy năng lượng sẵn sàng giải phóng làm quay trục chính và hệ thống đĩa bảo hiểm, đĩa định giờ liên kết với nó qua lò xo đĩa. Nhưng trục chính chưa thể quay được vì nó còn liên kết với hệ thống truyền động đang bị giữ bởi hai chốt ly tâm, ngăn không cho thanh lắc làm việc. Lúc này đĩa bảo hiểm ngăn không cho vòi bảo hiểm chuyển động vào rãnh trên tấm 10, kim hỏa không thể giải phóng để phát hỏa.



Hình 2. Cấu tạo cụm đồng hồ thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí HGCK-21



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý hoạt động của cụm đồng hồ

Khi đặt giờ, thông qua chốt định giờ liên kết với chóp gió xoay đĩa định giờ đi một góc nhất định tương ứng với thời gian cần đặt ($1° \approx 0{,}3$ giây). Khi bắn hoặc cho cụm đồng hồ quay ly tâm, dưới tác dụng của lực ly tâm, chốt ly tâm nén lò xo, giải phóng thanh lắc; đồng thời khóa ly tâm cũng thoát khỏi khoang trống trên vòng giữ cót. Thanh lắc bắt đầu hoạt động, nhờ năng lượng của lò xo cót trục bắt đầu quay, ☞

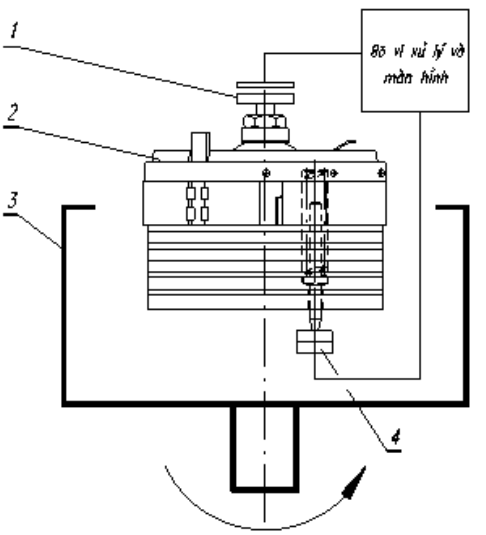
kéo theo đĩa định giờ, đĩa bảo hiểm quay đồng tốc. Trục chính quay với tốc độ được khống chế bởi cơ cấu điều chỉnh vận hành thông qua hệ thống truyền động bánh răng, đảm bảo sự chính xác của cơ cấu đồng hồ. Trục chính quay cho đến khi phần rãnh trên đĩa định giờ đối diện với vòi bảo hiểm, vòi bảo hiểm dưới tác dụng của lò xo chuyển động vào rãnh trên đĩa định giờ, đồng thời thông qua rãnh khuyết trên đòn giải phóng, giải phóng kim hỏa. Kim hỏa lao xuống phát hỏa, kết thúc thời gian hẹn giờ.

Như vậy, toàn bộ quá trình làm việc của cụm đồng hồ được tính từ lúc trục chính bắt đầu quay đến khi kim hỏa phát hỏa. Trong quá trình sửa chữa thiết bị gây nổ M564 của Mỹ hay chế tạo mới thiết bị gây nổ HGCK-21, cần thiết phải có phương pháp và thiết bị kiểm tra thời gian làm việc thực tế của cụm đồng hồ so với thời gian đặt trước từ đó để đánh giá độ chính xác đặt giờ cũng như điều chỉnh trong quá trình lắp ráp.

Phương pháp cụ thể như sau: Đặt trước thời gian cho cụm động hồ, cho cụm đồng hồ làm việc bằng cách giải phóng các cơ cấu bảo hiểm, đo thời gian làm việc của cụm đồng hồ, tính từ thời điểm trục chính bắn đầu chuyển động đến khi kim hỏa phát hỏa. Ghi nhận giá trị đo thời gian thực tế, so sánh với thời gian đặt giờ để đánh giá độ chính xác hẹn giờ. Thời gian hẹn giờ của cụm đồng hồ yêu cầu từ (0,9÷1) % giá trị đặt giờ.

Yêu cầu đối với thiết bị đo thời gian hẹn giờ: đảm bảo độ chính xác 0,1% giá trị đo, tin cậy hoạt động trong điều kiện bình thường và khi chịu tốc độ quay đồng trục tới ω = 3500 vòng/phút, thời gian để đạt được tốc độ quay max khoảng 10 giây; Dải thời gian đo từ 2 giây đến 120 giây. Thiết bị hoạt động độc lập, có nguồn năng lượng riêng, có khả năng duy trì hoạt động trong suốt quá trình đo và lưu trữ, hiển thị kết quả đo sau mỗi phép đo. Thao tác vận hành đơn giản, sử dụng lâu dài trong điều kiện công nghiệp, không bị ảnh hưởng bởi sóng điện từ. Thiết bị nhỏ gọn, trọng lượng nhẹ không quá 500 g.

Nhóm nghiên cứu đã thiết kế và chế tạo thiết bị đo thời gian hẹn giờ. Thiết bị sử dụng cảm biến AS5048A thu thập chính xác thời điểm trục chính bắt đầu quay, kết hợp với công tắc hành trình để xác định thời điểm kim hỏa phát hỏa. Dữ liệu thu được được đưa về bộ vi điều khiển STM32 để xử lý tín hiệu, tính toán thời gian và hiển thị kết quả đo. Thiết bị chỉ có vai trò kiểm tra và đánh giá độ chính xác hẹn giờ, nó không được thiết kế để thay thế hay tích hợp vào cấu trúc chức năng của thiết bị gây nổ. Kết quả nghiên cứu nhằm cung cấp giải pháp đo lường chính xác, ổn định để phục vụ việc hiệu chỉnh, kiểm tra chất lượng cụm đồng hồ trong sửa chữa và sản xuất trước khi lắp ráp vào sản phẩm hoàn chỉnh.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý đo thời gian làm việc của cụm đồng hồ:
1. Cảm biến AS5048A; 2. Cụm đồng hồ đã đặt giờ; 3. Đồ gá quay ly tâm; 4. Công tác hành trình

2. ĐỀ XUẤT NGUYÊN LÝ LÀM VIỆC VÀ THIẾT KẾ, CHẾ TẠO THIẾT BỊ ĐO THỜI GIAN THIẾT BỊ HẸN GIỜ GÂY NỔ CƠ KHÍ HGCK.21

2.1. Nguyên lý làm việc của thiết bị đo thời gian

Thiết bị làm việc dựa trên nguyên lý đo góc bằng phương pháp đo góc từ tính dựa trên hiệu ứng Hall vi sai (Differential Hall Effect).

- Nguyên lý hiệu ứng Hall:

Hiệu ứng Hall được Edwin Hall phát hiện năm 1879 [3]. Khi một dòng điện I chạy qua một tấm vật dẫn hoặc bán dẫn đặt trong từ trường vuông góc, một hiệu điện thế Hall (V_H) sẽ xuất hiện vuông góc với cả dòng điện và hướng từ trường.

Hiệu điện thế Hall được xác định theo công thức:

$$V_H = \frac{B.I}{n.q.t}$$

Trong đó:
- B - Cảm ứng từ (Tesla);
- I - Dòng điện qua vật dẫn (A);
- n - Mật độ hạt mang điện (m^{-3});
- q - Điện tích của hạt mang điện (C);
- t - Độ dày lớp bán dẫn (m).

Tín hiệu Hall này tỷ lệ tuyến tính với cường độ từ trường B, do đó có thể dùng để đo giá trị của từ trường hoặc sự thay đổi vị trí, góc, tốc độ quay của nam châm [4].

- Nguyên lý đo góc bằng cảm biến Hall vi sai:

Trong phương pháp đo góc từ tính, người ta không dùng chỉ một cảm biến Hall đơn, mà sử dụng nhiều phần tử Hall bố trí đối xứng nhau để đo các thành phần khác nhau của từ trường [5].

Ở cảm biến AS5048A, có 4 cảm biến Hall vi sai bố trí vuông góc trên cùng một mặt phẳng, chia làm hai cặp:

- Một cặp đo thành phần từ trường theo trục X (B_X).
- Một cặp đo thành phần từ trường theo trục Y (B_Y).

Nam châm vĩnh cửu hình trụ được gắn đồng trục với cảm biến và có cực từ Bắc – Nam dọc theo trục quay.

Khi nam châm quay, vector từ trường trên mặt chip thay đổi hướng theo góc quay θ:

$$B_X = B.\cos(\theta),\ B_Y = B.\sin(\theta)$$

- Nguyên lý "vi sai" (Differential Hall): Mỗi cặp cảm biến Hall được bố trí đối xứng qua tâm từ trường, nên tín hiệu giữa hai cảm biến trong cùng cặp có độ lệch pha 180°.

Ví dụ:
- Cảm biến Hall X1 và X2 đo từ trường theo trục X nhưng ở hai phía đối diện nhau.
- Mạch điện trong chip lấy hiệu điện áp vi sai:

$$V_X = V_{X1} - V_{X2} \Longrightarrow V_X \propto B_X$$

Tương tự, cặp Hall Y1 và Y2 cho:

$$V_Y = V_{Y1} - V_{Y2} \Longrightarrow V_Y \propto B_Y$$

Cách đo "vi sai" này có ba ưu điểm lớn [6]:

+ Khử nhiễu từ môi trường: Vì nhiễu từ chung ảnh hưởng như nhau lên cả hai cảm biến nên bị triệt tiêu khi lấy hiệu. ☞

+ Tăng độ nhạy: Do điện áp hiệu tăng gấp đôi so với một cảm biến đơn.

+ Ổn định theo nhiệt độ: Vì hai cảm biến cùng chịu tác động nhiệt, nên sai lệch do nhiệt được bù trừ tự nhiên.

- Tính toán góc quay tuyệt đối:

Hai tín hiệu đầu ra V_X và V_Y sau khi được khuếch đại và số hóa (ADC) sẽ đại diện cho hai thành phần vuông góc của véc-tơ từ trường tại tâm chip.

Mạch xử lý bên trong cảm biến tính toán góc quay tuyệt đối của trục nam châm dựa trên:

$$\theta = \text{atan2}(V_Y, V_X)$$

Công thức này cho kết quả góc liên tục từ 0° đến 360°, và vì nó phụ thuộc vào tỉ số V_Y/V_X, nên hầu như không bị ảnh hưởng bởi biên độ tổng thể của từ trường B [7].

- Chuyển đổi và truyền dữ liệu:

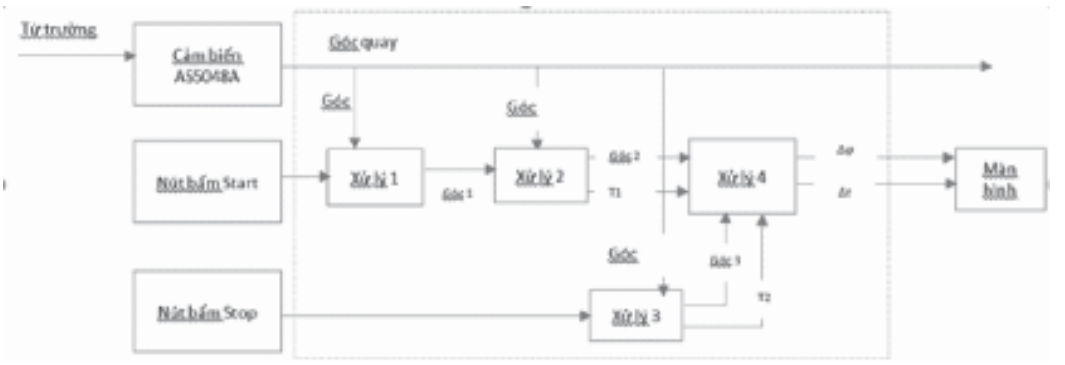
Sau khi tính toán, góc θ được chuyển đổi thành dữ liệu số 14 bit, tương ứng với:

$$\text{Độ phân giải} = \frac{360^\circ}{2^{14}} = 0{,}0219^\circ$$

Dữ liệu này được truyền ra qua giao tiếp SPI hoặc I2C, có thể đọc trực tiếp bằng vi điều khiển (STM32).

Cảm biến cũng tích hợp bit kiểm tra lỗi (Parity Bit) giúp phát hiện sai sót trong quá trình truyền dữ liệu [8].

- Nguyên lý đo góc và thời điểm kích nổ bằng cảm biến AS5048 và vi điều khiển STM32:



Hình 5. Sơ đồ nguyên lý đo góc và thời điểm kích nổ

*** Mục đích:**

Đo thời gian từ lúc trục chính cụm đồng hồ quay (thời điểm t_1) tới lúc kim hỏa phát hỏa (thời điểm t_2). Từ đó, ta tính được thời gian hẹn giờ $\Delta t = t_2 - t_1$.

*** Phương pháp đo như sau:**

Nam châm được cố định lên trục chính cụm đồng hồ và cảm biến từ trường AS5048A cố định trên nắp chụp của thiết bị đo. Khoảng cách từ cảm biến từ trường đến nam châm không quá 2 mm. Trước khi tiến hành đo thời

gian hẹn giờ, ta bấm nút "Start", khi này cảm biến sẽ cảm nhận được góc φ_1 và thời điểm t'_1. Các tín hiệu này sẽ được đưa vào trong bộ vi điều khiển STM32 (khối xử lý 1 trong sơ đồ). Khi đồng hồ bắt đầu làm việc, trục chính quay, cảm biến sẽ bắt tín hiệu góc φ_2 và thời điểm t_1, tín hiệu đưa vào khối xử lý 2 trong sơ đồ. Khi này bắt đầu so sánh nếu như $|\varphi_2 - \varphi_1| \geq 0{,}17°$ thì xác định trục chính bắt đầu quay. Trục chính tiếp tục quay, bộ điều khiển tiếp tục ghi nhận giá trị góc lệch, tới khi kim hỏa được giải phóng. Kim hỏa lao xuống tác động trực tiếp vào công tắc hành trình "Stop", cảm biến đo được tín hiệu góc φ_3 và thời điểm t_2 đưa vào khối xử lý 3. Khối xử lý 4 sẽ tính toán được góc quay của trục chính là $|\varphi_3 - \varphi_1|$ và thời gian đo được là $t_2 - t_1$. Sau đó tín hiệu sẽ được hiển thị lên màn hình OLED.

2.2. Thiết kế, chế tạo thiết bị đo thời gian hẹn giờ

2.2.1. Yêu cầu kỹ thuật cơ bản đối với các phần tử của thiết bị đo

Cụm đồng hồ có cấu trúc nhỏ, thời điểm đo bắt đầu và kết thúc chuyển động gắn liền với trục thiết bị và kim hỏa nằm bên trong cụm, do đó khó khăn trong việc bố trí các loại cảm biến có kích thước to, cồng kềnh hay quá trình đo phức tạp. Từ đó, ta lựa chọn được các thiết bị đo phù hợp như sau:

*** Đối với cảm biến AS5048A:** Cảm biến từ trường sử dụng nguyên lý Hall, nam châm được cố định chắc chắn trên trục chính cụm hẹn giờ, còn cảm biến và khối xử lý tín hiệu được gắn trên nắp chụp của thiết bị, khi đo tín hiệu không ảnh hưởng tới hoạt động độc lập của cụm hẹn giờ.

*** Đối với bộ điều khiển:** Thiết bị hẹn giờ đòi hỏi chính xác rất cao trong việc tính toán giải phóng kim hỏa. Do đó, ta lựa chọn dòng STM32, tốc độ xử lý lên tới 72MHz đảm bảo xử lý tín hiệu tốc độ cao, đồng thời STM32 có hỗ trợ đủ các ngắt cần thiết cũng như các kiểu truyền thông để giao tiếp với cảm biến AS5048A, màn hình OLED.

*** Đối với công tắc hành trình:** Công tắc sử dụng trong thiết bị là loại công tắc loại nhỏ nhất cùng dòng 6mm, có thể đặt trong thân của thiết bị hẹn giờ để lấy tín hiệu giải phóng kim hỏa, từ đó đưa vào khối xử lý.

*** Đối với màn hình hiển thị:** Màn hình lựa chọn cũng là loại nhỏ gọn có thể bố trí phù hợp trên khối thiết bị.

*** Đối với pin:** Sử dụng pin dẹt 1500mAh có thể đáp ứng thiết bị hoạt động liên tục trên 3h đồng hồ, đồng thời nó có kích thước nhỏ gọn có thể cố định trong thiết bị xử lý tín hiệu.

Để đáp ứng yêu cầu về độ chính xác của thiết bị đo, yêu cầu thông số chính của cảm biến AS5048 như sau:

- Độ phân giải của cảm biến là 0,0219°;
- Độ chính xác đo góc của thiết bị: ±0,5°;
- Sai lệch thời gian tính thời điểm t_1 là 51 ms;
- Thời gian giữa các lần đo góc liên tục của STM32 lấy từ cảm biến AS5048 là 70 ms.

2.2.2. Thiết kế, chế tạo thiết bị

Thiết bị đo góc và thời gian hẹn giờ gồm cụm mạch xử lý tín hiệu, nắp chụp, thân, công tắc hành trình.

- Cụm mạch xử lý tín hiệu gồm có:

+ Màn hình hiển thị OLED (dài × rộng): (25 × 15) mm; Nguồn 5V; cổng giao tiếp: I2C. ☞

+ Cảm biến AS5048A:

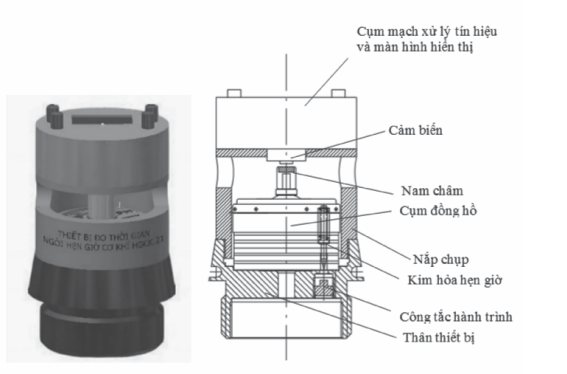
✓ Độ phân giải: 14-bit;
✓ Độ chính xác góc: 0,0219° LSB;
✓ Phạm vi đo: (0 – 360)°;
✓ Nguồn điện: (3 – 5,5)V;
✓ Cảm biến: Hall Effect (từ tính);
✓ Từ trường yêu cầu: 30 mT – 70 mT.

+ Vi điều khiển STM32F103C8T6:

✓ Kiến trúc: ARM Cortex-M3, 32-bit;
✓ Tần số tối đa: 72 MHz;
✓ Bộ nhớ Flash: 64 KB;
✓ SRAM: 20 KB;
✓ ADC: 2 × 12-bit, 10 kênh (Đo tín hiệu analog);
✓ Nguồn điện: (2 – 3,6) V.

- Nắp chụp:
+ Kích thước bao (đường kính × chiều dài): (55 × 44) mm;
+ Trọng lượng: 87 (g).
- Thân:
+ Kích thước (đường kính × dày): (6 × 2) mm.
+ Trọng lượng: 113 (g).

- Công tắc hành trình:
+ Đường kính nút: 6 mm.
+ Điện áp: 250VAC/1A, 125VAC/3A.
+ Công tắc dạng nút nhấn.



Hình 6. Mô hình thiết bị đo thời gian hẹn giờ



Hình 7. Thiết bị đo thời gian hẹn giờ thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí HGCK.21 qua chế tạo

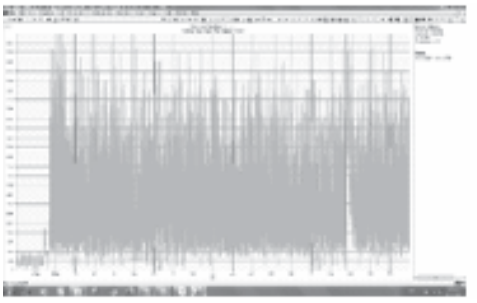
3. KẾT QUẢ ĐO THỰC TẾ

Tiến hành đo thực tế cụm đồng hồ thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí HGCK-21 do đề tài nghiên cứu thiết kế và chế tạo tại Viện Công nghệ và Nhà máy Z129/Tổng cục Công nghiệp quốc phòng. Thực hành đo ở hai trạng thái.

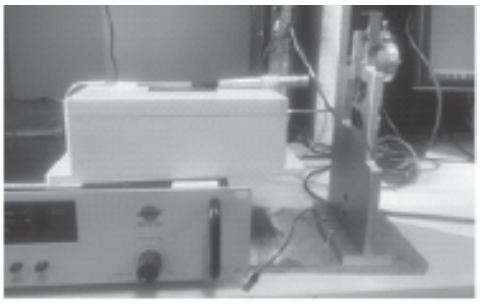
a) Trạng thái tĩnh: Đặt thời gian hẹn giờ 7 giây bằng đồ gá chuyên dụng; lắp cụm đồng hồ vào thiết bị đo, giải phóng chốt ly tâm; cụm đồng hồ làm việc khi đó khóa ly tâm chuyển động trong khoang chống vòng giữ cót; hết thời gian hẹn giờ, kim hỏa phát hỏa, cụm đồng hồ dừng hoạt động; thiết bị đo thời gian ghi nhận và hiển thị thời gian làm việc của cụm đồng hồ. Khi thử ở trạng thái tĩnh, nhóm đề tài đã sử dụng thêm một thiết bị ghi âm độc lập, ghi lại âm thanh phát ra từ thanh lắc va chạm với bánh răng 1.1 trong suốt quá trình làm việc đến khi kim hỏa phát hỏa. Thời gian phát ra âm thanh thu được cũng chính là thời gian thực tế làm việc của cụm đồng hồ. So sánh kết quả đo của hai phương pháp cho ra kết quả tương đương. Điều đó khẳng định phương pháp, thiết bị đo thời gian hẹn giờ làm việc tin cậy, có thể sử dụng để thực hiện các phép đo tiếp theo.

* Kết quả đo ở trạng thái tĩnh, khi đặt thời gian hẹn giờ 7 giây:

TT	Thiết bị đo/ Phương pháp	Thời gian hẹn giờ	Kết quả (giây)			Ghi chú
			Lần 1	Lần 2	Lần 3	
1	Thiết bị đo thời gian hẹn giờ/ trạng thái tĩnh	7 giây	6,98	7,01	7,02	Sai số giữa hai thiết bị: 0,01 giây
2	Đo bằng phương pháp ghi âm sử dụng Microphone đo lường Brüel & Kjær/ trạng thái tĩnh		6,99	7,00	7,01	



Kết quả đo



Thiết bị đo Micro

Hình 8. Kết quả thử nghiệm đo bằng phương pháp ghi âm sử dụng Micro đo lường Brüel & Kjær của Viện Đo lường Việt Nam

b) Trạng thái quay ly tâm: Đặt thời gian cho cụm đồng hồ 60 giây bằng đồ gá đặt giờ chuyên dụng; lắp cụm đồng hồ vào thiết bị đo hẹn giờ; khởi động thiết bị; lắp thiết bị vào máy quay ty tâm, đặt tốc động quay ω = 2.500 vòng/ phút. Nhờ tốc độ quay của thiết bị ly tâm, các cơ cấu bảo hiểm của cụm đồng hồ được giải phóng, cụm đồng hồ làm việc. Thiết bị đo thời gian tự động đo, tính toán và lưu trữ kết quả đo. Kết thúc thời gian đo, dừng máy quay ly tâm, tháo thiết bị đo ra khỏi máy ly tâm, quan sát đồng hồ hiển thị, ghi lại số liệu thời gian. Khi đo trong trạng thái ly tâm không thể sử dụng phương pháp đo bằng âm thanh như trong trạng thái tĩnh.

* Kết quả đo ở trạng thái quay ly tâm, khi đặt thời gian hẹn giờ 60 giây:

TT	Thiết bị đo/ Phương pháp	Thời gian hẹn giờ	Kết quả (giây)			Ghi chú
			Lần 1	Lần 2	Lần 3	
1	Thiết bị đo thời gian hẹn giờ/ trạng thái quay ly tâm	60 giây	60,33	60,19	60,21	

☞

Kết quả đo thực tế cho thấy, thiết bị làm việc tin cậy, ổn định. Độ chính xác đáp ứng yêu cầu khi đo cụm đồng hồ thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí. Thiết bị cho phép sử dụng trong quá trình triển khai đề tài nghiên cứu, sửa chữa, chế tạo mới các loại thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí.

4. KẾT LUẬN

Đo thời gian hẹn giờ của thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí nói chung và thiết bị hẹn giờ gây nổ HGCK-21 nói riêng là lĩnh vực đặc thù, hiện trong nước chưa có phương pháp và thiết bị kiểm tra. Bài báo đã mô tả, phân tích nguyên lý hoạt động của cụm đồng hồ thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí, làm cơ sở xây dựng phương pháp đo thời gian hoạt động của cụm đồng hồ đảm bảo chính xác, khách quan. Đã đề xuất phương án đo kiểm, tính toán thiết kế thiết bị đo thời gian hoạt động của cụm đồng hồ phù hợp với điều kiện thực tế nghiên cứu, thử nghiệm sản phẩm trong nước.

Kết quả nghiên cứu đã chế tạo 01 thiết bị đo thời gian hoạt động của cụm đồng hồ cho phép áp dụng trong triển khai đề tài nghiên cứu cũng như ứng dụng trong sản xuất, sửa chữa thiết bị hẹn giờ gây nổ cơ khí sau này. Thiết bị đã được sử dụng thực tế cho độ chính xác và tin cậy.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài cấp Bộ Quốc phòng. Tác giả xin cảm ơn Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng, Học viện Kỹ thuật quân sự đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **01/11/2025**
Ngày phản biện: **12/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. AMS AG, "*AS5048A 14-bit Rotary Position Sensor with SPI Interface – Datasheet*", Version 1.0, ams AG, 2016.
[2]. STMicroelectronics, "*STM32F103x8 Datasheet – Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU*", Rev. 18, STMicroelectronics, 2023.
[3]. Edwin H. Hall, "*On a New Action of the Magnet on Electric Currents*". American Journal of Mathematics, 1879.
[4]. "*Hall Effect – Definition, Formula, Applications*", Byju's Physics (2023).
[5]. "*AS5048A – 14-bit Magnetic Rotary Encoder Datasheet*", ams OSRAM AG, 2021.
[6] "*Application Note: Magnet Selection Guide for Rotary Magnetic Sensors*", ams OSRAM AG, 2022.
[7]. "*Understanding Sin/Cos Output Magnetic Encoders*, ams Technical Note, 2019.
[8]. "*AS5048A Datasheet*", Section "*Data Transmission and Parity Bit Check*", ams OSRAM AG.

ĐẶC ĐIỂM KẾT CẤU VÀ THIẾT KẾ MÔ HÌNH MÁY TÁCH BÙN PHÂN CẤP

STRUCTURAL FEATURES AND DESIGN OF A MULTI-STAGE SLUDGE SEPARATION MACHINE

Nguyễn Thanh Tùng
Trường Đại học Mỏ - Địa chất

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp tính toán và thiết kế máy tách bùn phân cấp dựa trên cơ sở lý thuyết và mô hình toán học. Nghiên cứu đã xác định các thông số hình học phù hợp cho trục vít và cụm sàng rung nhằm nâng cao hiệu quả tách bùn. Kết quả nghiên cứu đã xây dựng được mô hình hoàn chỉnh của máy tách bùn phân cấp, tạo nền tảng quan trọng cho việc phát triển và chế tạo máy tách bùn phân cấp phù hợp với điều kiện thực tế tại Việt Nam.

Từ khóa: *Máy tách bùn phân cấp; Trục vít ép; Sàng rung.*

ABSTRACT

The paper presents a method for calculating and designing a multi-stage sludge separator based on theoretical foundations and mathematical modeling. The study identified suitable geometric parameters for the screw shaft and vibrating screen assembly to enhance sludge separation efficiency. The research results led to the development of a complete model of the multi-stage sludge separator, providing an important basis for the development and fabrication of a multi-disc screw sludge separator adapted to practical conditions in Vietnam.

Keywords: *Multi-stage sludge separator; Screw press; Vibrating screen.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

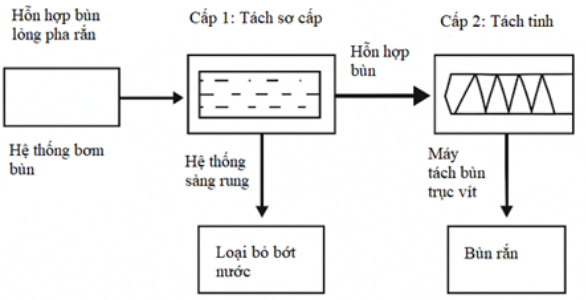
Hiện nay, việc xử lý ô nhiễm môi trường và hạn chế tác hại của nó tới đời sống đang được tất cả các quốc gia trên thế giới quan tâm. Bùn thải gây nên ô nhiễm nguồn nước, đất. Nó ảnh hưởng nghiêm trọng đến hệ sinh thái và sức khỏe cộng đồng. Vấn đề là làm thế nào để tách riêng bùn và nước để có thể áp dụng các biện pháp công nghệ nhằm biến chúng thành các thành phần thân thiện với môi trường đang là vấn đề cần được giải quyết một triệt để. Máy tách bùn là một trong các giải pháp đang được áp dụng. Một số loại máy tách bùn như máy tách bùn chân không, máy tách bùn băng tải [1-2], khi làm việc chúng tồn tại các nhược điểm như hiệu suất tách bùn thấp, tuổi thọ thiết bị không cao, chi phí sử dụng cao và mỗi thiết bị chỉ phù hợp với một số loại bùn nhất định. Trong nghiên cứu của mình, một số nhóm tác giả cũng công bố các nghiên cứu về các giải pháp [3-6] như nâng cao khả năng vận tải và tối ưu hóa thông số trục vít trong máy tách bùn trục vít hoặc bổ sung các yếu tố hoạt tính tới ☞

khả năng tách bùn của vải lọc trên máy tách bùn kiểu chân không. Tuy nhiên, các cải tiến đều dựa trên đặc điểm của phương pháp tách bùn đơn lẻ nên hiệu quả phụ thuộc nhiều vào đặc điểm kết cấu của thiết bị tách bùn. Dựa trên các thử nghiệm ban đầu của nhóm tác giả, để nâng cao hiệu quả tách bùn bằng sử dụng thiết bị tách bùn, quá trình được thực hiện qua hai bước: Bước 1: Tách sơ bộ, tại bước này nước sẽ được tách một phần ra khỏi bùn dựa trên công nghệ rung lắc. Một lượng nước đáng kể sẽ được tách ra và bùn trở lên khô hơn sẽ được tiến hành tách ở bước tiếp theo. Bước 2: Bùn được tách và ép khô nhờ máy tách bùn trục vít, các cải tiến về kết cấu cụm tách ép dạng trục vít và cụm vỏ thoát nước sẽ nâng cao hiệu quả làm việc của máy. Hệ thống tách bùn 2 cấp sẽ khắc phục được nhược điểm của các máy tách ép bùn như đã nêu trên, nó tạo ra bùn với độ ẩm thấp, chi phí vận hành bảo dưỡng thấp và khắc phục được các hiện tượng kẹt nước khi vận hành.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung vào tính toán thiết kế để xây dựng mô hình máy tách bùn phân cấp. Nó là cơ sở quan trọng trong việc chế tạo thiết bị này trong nước.

2. ĐẶC ĐIỂM THIẾT KẾ MÁY TÁCH BÙN PHÂN CẤP

2.1. Nguyên lý làm việc

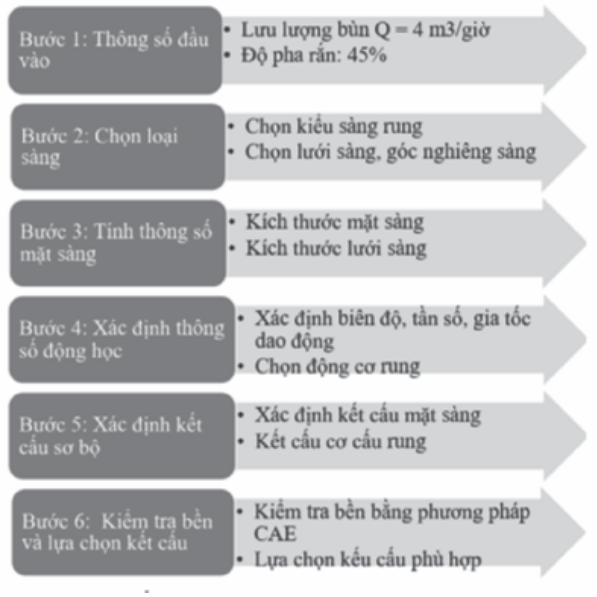


Hình 1. Sơ đồ nguyên lý

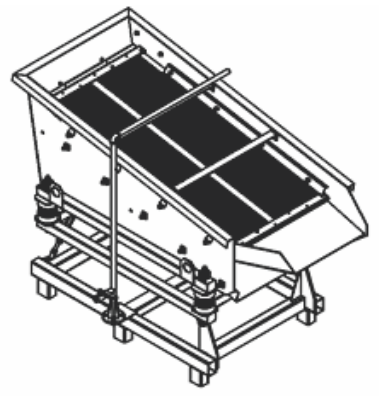
Hệ thống tách bùn phân cấp được thiết kế nhằm tách riêng pha rắn và pha lỏng trong bùn thải. Quá trình tách được thực hiện liên tục qua hai giai đoạn, gồm tách sơ cấp và tách thứ cấp nhằm nâng cao độ khô của bùn rắn đầu ra. Trước tiên, hỗn hợp bùn loãng được chuyển vào bồn khuấy trộn bằng thiết bị bơm bùn. Đồng thời, bơm định lượng sẽ bơm hóa chất polymer đã được pha loãng với nồng độ 0,1-0,2% vào bồn khuấy trộn. Tại đây, bùn loãng và polymer được trộn đều đảm bảo nồng độ bùn đầu vào tương đối ổn định và bùn được keo tụ tạo bông. Ở giai đoạn tách sơ cấp, hỗn hợp bùn được bơm bộ phận tách sơ bộ cấp 1 (hình 1) sử dụng sàng rung tách trọng lực. Giai đoạn này chủ yếu có nhiệm vụ loại bỏ một phần nước lẫn trong hỗn hợp bùn thông qua cơ chế sàng lọc cơ học. Kích thước khe sàng trong giai đoạn này thường nằm trong khoảng 0,5-1,0 mm, cho phép giữ lại phần lớn chất rắn có kích thước lớn và giảm tải cho bộ phận tách thứ cấp. Dòng vật liệu sau tách sơ cấp được dẫn tới bộ phận tách thứ cấp, nơi sử dụng cơ cấu vít ép đa đĩa để tách tinh. Trục vít ở đây dùng bước vít thay đổi nhỏ dần về phía các đĩa vít cuối, làm áp suất bên trong tăng lên do thể tích nhỏ dần tạo áp lực để tách nước ra khỏi bùn. Nước được tách ra khỏi bùn qua các kẽ hở giữa các đĩa. Bùn khô sẽ di chuyển ra đầu còn lại của máy ép nhờ chuyển động quay tịnh tiến của trục vít và chuyển động của đĩa ép thắng lại chuyển động tịnh tiến của trục vít. Bùn sau khi ép sẽ được thu gom và vận chuyển bằng thùng chứa hoặc hệ thống vít.

2.2. Tính chọn hệ thống sàng rung sơ cấp

Bùi thải được chọn là loại phổ biến với độ pha rắn trung bình 45%; Năng suất lựa chọn Q = 4,0 m^3/h. Các bước tính toán cụm sàng rung được thể hiện như sơ đồ hình 2.



a. Sơ đồ các bước tính toán



b. Cụm sàng rung

Hình 2. Sơ đồ bước tính hệ thống sàng rung

2.3. Tính chọn thông số trục vít cụm máy tách bùn trục vít

Theo [5], năng suất của vít tải Q (tấn/h) được xác định qua công thức sau:

$$Q = 60.\frac{\pi.D^2}{4}.p.n.\rho.k_c.k_n \quad (1)$$

Trong đó: D - Đường kính vít tải (mm), p - Bước vít trung bình (mm), ρ - Khối lượng riêng của vật liệu vận chuyển (kg/mm³), k_c - Hệ số chứa đầy tiết diện máng, phụ thuộc vật liệu, lấy $k_c = 2,9$; k_n - Hệ số phụ thuộc góc nghiêng ρ độ của vít tải, chọn β = 20° thì $k_n = 0,65$; n - Số vòng quay vít tải (vòng/phút), $n = \frac{k_v}{\sqrt{D}}$ với k_v là hệ số phụ thuộc vật liệu với bùn loãng, lấy $k_v = 1,8$.

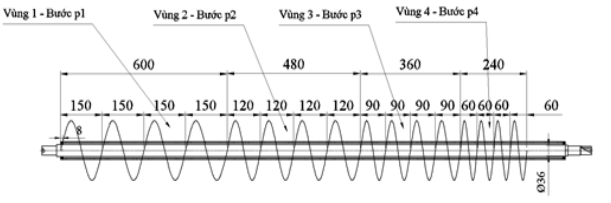
$$D = \left(\frac{Q}{37,7.k_v.k_c.k_n.\rho}\right)^{2/5} = 0,2054\,m\ ,$$

chọn D = 0,2 m = 200 mm (2)

Đường kính trong trục vít sẽ là:

d = 3,3.D = 3,3.200 = 60 (mm) (3)

Để tạo ra lực ép, để tách nước ra được hiệu quả thì thể tích buồng ép được giảm dần về cuối giai đoạn ép. Bước vít thay đổi dần, P_1 = 150 mm, P_2 = 120 mm, P_3 = 90 mm, P_4 = 60 mm.



Hình 3. Kết cấu trục vít ép

Góc xoắn vít thay đổi theo bước vít:

tanα = p / π.D (4)

Bảng 1. Thông số trục vít và góc xoắn

Bước vít P (mm)	150	120	90	60
Góc xoắn vít (độ)	13,43	10,82	8,16	5,45

2.4. Tính chọn động cơ trục vít và các thông số động học khác

Vận tốc bùn đầu vào trục vít: ☞

$$v_{1-max} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi.\left(D^2 - d^2\right)}{4}} = 1,83(m/s) \quad (5)$$

Trong đó, A là diện tích mặt cắt ngang khoang tách bùn.

Với lượng bùn khô tách ra có độ ẩm 30% thì lượng nước tách ra 70% thì lưu lượng đầu ra của máy Q' = 0,3.Q = 1,2 m³/h.

Vận tốc bùn đầu ra trục vít:

$$v_{2-max} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi.\left(D^2 - d^2\right)}{4}} = 0,55(m/s) \quad (6)$$

Tốc độ trục vít được tính theo vận tốc đầu ra:

$$n = \frac{60000.v}{\pi.D} = 5,25\,(\text{Vòng/phút}) \quad (7)$$

Công suất trên trục vít tải xác định theo:

$$P = c_o.\frac{QL}{360} + \frac{QH}{360} = 0,945\ KW \quad (8)$$

Trong đó: Q - Năng suất của vít tải (kg/giờ); L - Chiều dài vận chuyển (m), H - Chiều cao vận chuyển (m); c_0 - Hệ số lực cản, liệu với bùn loãng, lấy $c_0 = 36$.

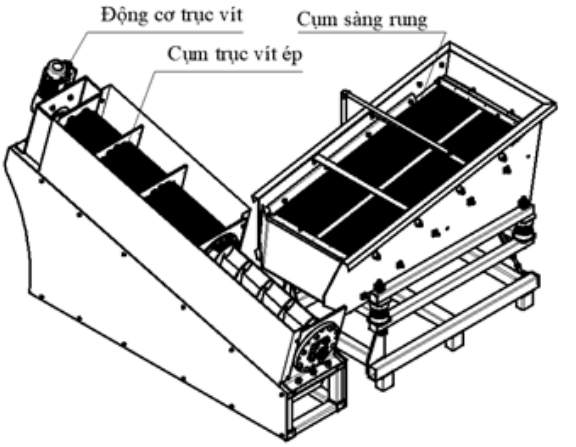
Hiệu suất chung của hệ thống:

$$\eta = \eta_{ol}.\eta_{kn}.\eta_{ck} = 0,72 \quad (9)$$

Công suất động cơ:

$$P_{dc} = \frac{P}{\eta} = \frac{0,945}{0,72} = 1,31\ KW \quad (10)$$

Từ kết quả tính chọn cụm sàng rung, cụm trục vít và lựa chọn một số kết cấu chính, mô hình máy tách bùn phân cấp được trình bày như hình 4.



Hình 4. Mô hình máy tách bùn phân cấp

Mô hình máy tách bùn phân cấp hoàn thiện bao gồm cụm sàng rung tách bùn sơ cấp và cụm trục vít đa đĩa tách tinh làm khô bùn.

3. KẾT LUẬN

Dựa trên nguyên lý làm việc và đặc điểm cấu tạo máy tách bùn, nhóm tác giả tập trung tính toán động lực học hình thành trục vít của máy tách bùn. Từ đó, nhóm tập trung tính toán thiết kế và xây dựng mô hình các cụm sàng rung, cụm truyền động trục vít, lựa chọn cụm khung máy và cuối cùng là bản vẽ hoàn chỉnh (hình 4). Mô hình máy tách bùn phân cấp là tài liệu quan trọng phục vụ quá trình chế tạo trong trong thời gian tới.

Lời cảm ơn:

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Mỏ - Địa chất đã hỗ trợ nguồn lực để thực hiện nghiên cứu cơ sở này, mã đề tài T25-01.❖

Ngày nhận bài: **03/11/2025**
Ngày phản biện: **12/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Lưu Ngọc Vĩnh và Công ty cổ phần thiết kế công nghiệp hóa chất, "*Nghiên cứu thiết kế chế tạo thiết bị lọc chân không thùng quay*", 2019.

[2]. Nguyễn Văn Thơm, Luận văn thạc sĩ khoa học với đề tài: "*Nghiên cứu đánh giá xử lý bùn đỏ Tây Nguyên*". Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 2015.

[3]. Anne Wambui Mumbi, Li Fengting, Fridah Mwarania and Batzorig Uganchimeg, "*An assessment of multi-plate screw press in dewatering process of sludge treatment*". Int. J. Adv. Res. 5(12), p. 740-747, 2015.

[4]. "*The Prediction of Filter Belt Press Dewatering Efficiency for Activated Sludge by Experimentation on Filtration Compression Cells*", Technology, E., & Universit, O. (2016).

[5]. Okada, Takesi, "*New Screw Press Sludge Dewatering Equipment. Reduction of Sludge Moisture Content with a Minimum of Operator Maintenance*". Japan Tappi Journal, 51, p. 351-356, 2017.

[6]. T. Remat, R. Branion, "*A laboratory sludge press for characterizing sludge dewatering*". Water Science and Technology, vol 35, p. 189-196, 2007.

XÂY DỰNG VÀ GIẢI BÀI TOÁN THUẬT PHÓNG ĐỐI VỚI SÚNG CỐI CỠ NÒNG 100MM

FORMULATION AND SOLUTION OF THE BALLISTICS PROBLEM FOR A 100MM MORTAR

Chu Hải Long[1], Nguyễn Văn Ngôn[1], Phạm Thành Đồng[2,*]
[1]Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng
[2]Khoa Hàng không Vũ trụ, Học viện Kỹ thuật quân sự
**Email: pham.thanh-dong@lqdtu.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày quá trình xây dựng mô hình toán học và giải bài toán thuật phóng cơ bản cho súng cối cỡ nòng 100mm cho các chiều dài súng cối lần lượt là 1.45m (bản thường) và 1.8m (bản cải tiến). Mục tiêu là xác định các thông số động lực học chính bên trong nòng súng, bao gồm áp suất khí thuốc cực đại và vận tốc đầu nòng của đạn, làm cơ sở để giải các bài toán thuật phóng ngoài, xác định các tham số quỹ đạo của quả đạn cối về tầm, độ cao và thời gian bay. Mô hình toán học được xây dựng dựa trên các phương trình cơ bản của thuật phóng, như phương trình trạng thái khí thuốc, phương trình định luật cháy của thuốc phóng, phương trình chuyển động của đạn trong và ngoài nòng, phương trình bảo toàn năng lượng. Hệ phương trình vi phân mô tả các quá trình thuật phóng (trong và ngoài) được giải bằng phương pháp số với các thông số đầu vào cụ thể của hệ súng cối cỡ nòng 100mm. Kết quả nghiên cứu cung cấp đường cong áp suất, vận tốc theo quãng đường chuyển động của đạn và các giá trị then chốt, đồng thời xác định được các tham số quỹ đạo chuyển động của quả đạn cối. Độ tin cậy của kết quả tính toán được khẳng định qua việc so sánh với số liệu từ bảng bắn loại súng cối cỡ nòng 100mm từ nhà sản xuất. Những kết quả này là cơ sở quan trọng để đánh giá hiệu suất, đảm bảo an toàn và cải tiến tối ưu hóa thiết kế của hệ thống súng cối 100mm.

Từ khóa: *Thuật phóng; Súng cối 100mm; Mô hình toán học; Áp suất cực đại; Vận tốc đầu nòng; Phương pháp số.*

ABSTRACT

This paper presents the development of a mathematical model and the solution of the fundamental ballistics problem for a 100mm mortar, considering two respective barrel lengths: 1.45m (standard version) and 1.8m (improved version). The objective is to determine key interior ballistic parameters, including maximum propellant gas pressure and projectile muzzle velocity. These results serve as the foundation for solving exterior ballistics problems to determine the mortar shell's trajectory parameters, such as range, altitude, and time of flight. The mathematical model is established based on the fundamental equations of ballistics, including the propellant gas equation of state, the propellant combustion law, the equations of projectile motion (both

interior and exterior), and the energy conservation equation. The system of differential equations describing these ballistic processes (interior and exterior) is solved using numerical methods, utilizing specific input parameters for the 100mm mortar system. The study's results yield pressure and velocity curves as a function of projectile travel distance, identify critical operational values, and determine the trajectory parameters of the mortar shell. The reliability of the computational results is validated by comparison with data from the manufacturer's firing tables for the 100mm mortar. These findings provide an essential basis for performance evaluation, safety assurance, and the design improvement and optimization of the 100mm mortar system.

Keywords: *Ballistics; 100mm Mortar; Mathematical Model; Maximum Pressure; Muzzle Velocity; Numerical Method.*

1. GIỚI THIỆU

Súng cối là loại hỏa lực pháo binh quan trọng, có vai trò lớn trong chiến đấu hiện đại nhờ khả năng bắn cầu vồng, cơ động và uy lực sát thương. Trong đó, súng cối tự hành là các hệ thống pháo binh được trang bị hệ thống động cơ đẩy riêng, cho phép chúng di chuyển độc lập đến vị trí bắn đang là xu hướng phát triển hiện đại hóa quân đội của nhiều quốc gia trên thế giới. Đưa súng cối lên xe cơ giới, nghiên cứu nâng tầm súng cối, tự động hóa, tích hợp công nghệ tiên tiến và tăng cường khả năng cơ động để đáp ứng các yêu cầu của chiến tranh hiện đại đang là một số bài toán khó trong nhiệm vụ phát triển hệ súng cối tự hành [5]. Việc cải tiến nâng cấp loại súng cối 100mm bằng phương pháp tăng chiều dài nòng (từ 1.45m lên 1.8m) là một cấu hình vũ khí cụ thể đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về các quá trình diễn ra bên trong nòng súng khi bắn.

Bài toán thuật phóng nghiên cứu các hiện tượng xảy ra từ khi hạt lửa mồi bắt đầu đốt cháy liều phóng cho đến khi đạn ra khỏi miệng nòng. Việc giải bài toán này cho phép dự đoán chính xác các thông số động lực học quan trọng như áp suất và vận tốc. Áp suất khí thuốc cực đại (p_{max}) liên quan trực tiếp đến độ bền và an toàn của nòng súng, trong khi vận tốc đầu nòng (v_{ra}) là yếu tố quyết định tầm bắn và độ chính xác [1, 2].

Trong bài báo này, nhóm tác giả tập trung xây dựng một mô hình toán học mô tả đầy đủ quá trình thuật phóng trong và ngoài cho súng cối cỡ nòng 100mm, với các chiều dài nòng từ 1.45m đến 1.8m. Mô hình toán được giải bằng phương pháp số để thu được các đặc tuyến p(l), v(l), p(t), v(t), xác định được các giá trị p_{max} và v_{ra} và phân tích ảnh hưởng của một số yếu tố ban đầu. Đồng thời, nhóm cũng tính toán các tham số quỹ đạo chuyển động của quả đạn cối, làm cơ sở để đánh giá hiệu quả của phương án cải tiến kéo dài nòng súng cối. Nghiên cứu này đóng góp cơ sở lý thuyết cho việc thiết kế, cải tiến và đánh giá tính năng kỹ - chiến thuật của loại súng cối tự hành cỡ nòng 100mm.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ XÂY DỰNG MÔ HÌNH

2.1. Các phương trình cơ bản của bài toán thuật phóng

Bài toán thuật phóng được mô tả bằng một hệ các phương trình vi phân phi tuyến dựa trên các định luật vật lý cơ bản [1, 2, 6]. Các giả thiết chính thường được áp dụng bao gồm:

- Quá trình cháy của thuốc phóng diễn ra theo các lớp song song.

- Khí thuốc tuân theo phương trình trạng thái Noble-Abel.

- Quá trình là đoạn nhiệt (bỏ qua mất mát nhiệt qua thành nòng) hoặc có tính đến mất mát nhiệt theo một hệ số nhất định.

- Áp suất khí tại mọi điểm trong không gian phía sau đạn là đồng nhất tại mỗi thời điểm t.

Các phương trình cơ bản của thuật phóng trong bao gồm:

- Phương trình hình học và động học cháy của thuốc phóng: Mô tả sự thay đổi của phần liều phóng đã cháy (ψ) theo thời gian, phụ thuộc vào hình dạng hạt thuốc. Đối với thuốc phóng dạng ống, ta có:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{2}{e1}(1-\psi)^{1/2} u(p) \quad (1)$$

Trong đó, u(p) là tốc độ cháy của thuốc phóng.

- Phương trình định luật cháy (Định luật Piobert): Mô tả quan hệ giữa tốc độ cháy u và áp suất p:

$$u(p) = B \cdot p^n \quad (2)$$

Với, B và n là các hằng số thực nghiệm của thuốc phóng.

- Phương trình chuyển động của đạn (Định luật II Newton): Mô tả gia tốc của đạn (a) dưới tác dụng của lực đẩy khí thuốc (S.p) và các lực cản (ma sát,...).

$$\phi_1 m_d \frac{dv}{dt} = S \cdot p - F_{can} \quad (3)$$

$$\frac{dl}{dt} = v \quad (4)$$

Trong đó:

m_d: Khối lượng đạn.

ϕ_1: Hệ số kể đến khối lượng các bộ phận chuyển động tịnh tiến cùng đạn và ảnh hưởng của khí thuốc (thường $\phi_1 \approx 1.05\text{-}1.15$).

S: Tiết diện ngang của nòng súng ($S = \pi D^2 / 4$).

p: Áp suất khí thuốc tức thời.

v: Vận tốc tức thời của đạn, $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

l: Quãng đường đạn đi được.

- Phương trình trạng thái khí thuốc (Noble-Abel): Liên hệ giữa áp suất, thể tích và nhiệt độ của khí thuốc:

$$p\left[W_0 + S \cdot l - \omega/\delta - \alpha\omega\psi\right] = R_k \omega f_k \psi \quad (5)$$

Trong đó:

W_0: Thể tích buồng đốt ban đầu.

ω: Khối lượng liều phóng.

δ: Tỷ trọng thuốc phóng.

α: Covolume (thể tích riêng) của khí thuốc.

f ($R_k f_k$): Lực của thuốc phóng.

- Phương trình bảo toàn năng lượng: Mô tả sự phân bố năng lượng từ quá trình cháy thuốc phóng thành nội năng của khí, động năng của đạn và các dạng mất mát.

$$Q_\psi = E_k + A_d + \Delta Q \quad (6)$$

$$\omega f \psi = \frac{p\left[W(l) - \alpha\omega\psi\right]}{k-1} + \frac{\phi_1 m_d v^2}{2} + \Delta Q_{mm} \quad (7)$$

(Trong đó, k là chỉ số đoạn nhiệt của khí thuốc).

Đối với thuật phóng ngoài (Quỹ đạo chuyển động), các phương trình cơ bản như sau:

- Trọng lực (F_g): Hướng thẳng đứng xuống dưới.

$$F_g = m_d \cdot g \tag{8}$$

- Lực cản không khí (F_d): Hướng ngược chiều với vector vận tốc tức thời v:

$$F_d = \frac{1}{2}\rho v^2 S_d C_d \tag{9}$$

Trong đó: S_d - Tiết diện ngang của đạn; ρ - Mật độ không khí; C_d - Hệ số cản khí động học của đạn.

2.2. Xây dựng hệ phương trình vi phân của mô hình

Từ các phương trình cơ bản trên, ta có thể xây dựng một hệ phương trình vi phân mô tả bài toán thuật phóng trong theo biến độc lập là quãng đường l và thời gian t. Hệ phương trình vi phân có dạng:

$$\begin{cases} \dfrac{dv}{dl} = \dfrac{a}{v} = \dfrac{S \cdot p}{\phi_1 m_d v} \\ \dfrac{dp}{dl} = \Phi(l, v, p, \psi) \\ \dfrac{d\psi}{dl} = \Psi(l, v, p, \psi) \end{cases} \tag{10}$$

Chi tiết việc rút ra các hàm Φ và Ψ từ các phương trình cơ bản từ (1 ÷ 7) là phần cốt lõi của việc xây dựng bài toán.

Đối với bài toán thuật phóng ngoài, ta có hệ phương trình vi phân (11) xây dựng trên cơ sở áp dụng Định luật II Newton:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = v_x \\ \dfrac{dy}{dt} = v_y \\ \dfrac{dv_x}{dt} = -\dfrac{\rho S C_d}{2m} v \cdot v_x \\ \dfrac{dv_y}{dt} = -g - \dfrac{\rho S C_d}{2m} v \cdot v_y \end{cases} \tag{11}$$

3. DỮ LIỆU ĐẦU VÀO VÀ PHƯƠNG PHÁP GIẢI

3.1. Các thông số đầu vào

Để giải bài toán, cần xác định các thông số ban đầu của hệ thống súng cối 100mm [3, 4]:

Bảng 1. Thông số súng và đạn

TT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Cỡ nòng	D	0.1	m
2	Chiều dài nòng	L_{nong}	1.45 và 1.8	m
3	Thể tích buồng đốt ban đầu	W_0	0.00195	m^3
4	Khối lượng đạn	m_d	8.0	kg
5	Hệ số khối lượng ảo	ϕ_1	1.05	
6	Áp suất khởi động	p_k	9.0	Pa

Bảng 2. Thông số thuốc phóng

TT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Loại thuốc phóng		TP Cầu	
2	Khối lượng liều	ω	0.205	kg
3	Lực thuốc phóng	f	10^6	J/kg
4	Covolume	α	0.00101	m^3/kg
5	Tỷ trọng thuốc	δ	1590	kg/m^3
6	Hệ số định luật cháy	B	1.2×10^{-8}	$(m/s)/p.a^n$
7	Lũy thừa định luật cháy	n	0.99	
8	Kích thước hạt thuốc	e_1	0.0002	m

3.2. Phương pháp giải số

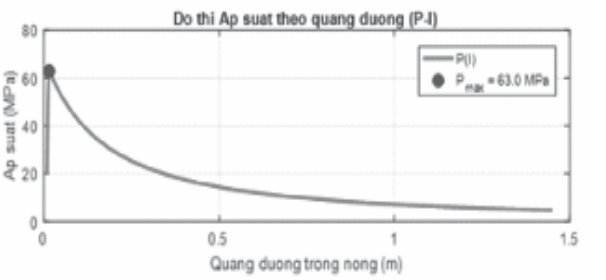
Hệ phương trình vi phân phi tuyến xây dựng ở Mục 2.2 không thể giải tích chính xác. Do đó, nhóm tác giả sử dụng phương pháp số để giải. Phương pháp được lựa chọn là Runge-Kutta bậc 4 (RK4), đây là phương pháp phổ biến và cho độ chính xác cao trong các bài toán động lực học. Quá trình giải bắt đầu tại điều kiện ban đầu ($l = l_0$, $v = v_0$, $p = p_0$ hoặc p_k) và lặp lại với bước nhảy Δl cho đến khi đạn đi hết chiều dài nòng $l = L_{nong}$. Tương tự đối với việc giải hệ phương trình thuật phóng ngoài. Các thuật toán giải số các hệ phương trình vi phân nêu trên được lập trình bằng phần mềm MATLAB.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Sau khi chạy mô phỏng số với các dữ liệu đầu vào tại Mục 3.1, với phương án 1, chiều dài nòng súng cối L = 1.45m (loại chưa cải tiến), nhóm tác giả thu được các kết quả sau:

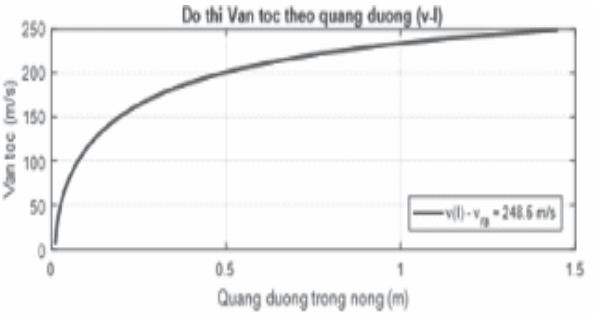
4.1. Các đặc tuyến thuật phóng trong

Kết quả mô phỏng được biểu diễn qua các đồ thị quan trọng:



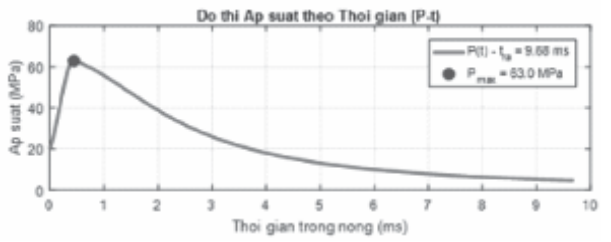
Hình 1. Đồ thị quan hệ Áp suất - Quãng đường p(l)

Trục hoành là quãng đường l(m), trục tung là áp suất p (Pa hoặc MPa). Đồ thị Hình 1, 3 cho thấy áp suất tăng nhanh, đạt cực đại p_{max} rồi giảm dần khi thể tích tăng.

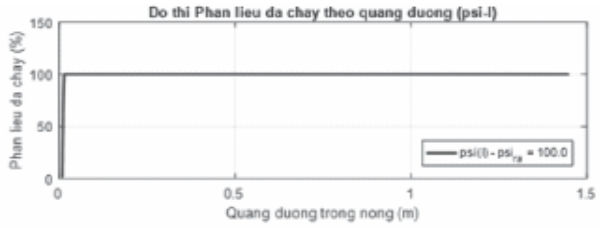


Hình 2. Đồ thị quan hệ Vận tốc - Quãng đường v(l)

Trục hoành là l(m), trục tung là v (m/s). Đồ thị Hình 2 cho thấy vận tốc tăng liên tục, tốc độ tăng nhanh nhất ở vùng áp suất cao và chậm dần về cuối nòng.



Hình 3. Đồ thị quan hệ Áp suất - Thời gian p(t)



Hình 4. Đồ thị quan hệ Phần liều đã cháy - Quãng đường ψ(l)

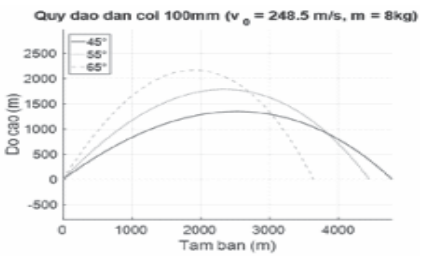
Hình 4 cho thấy thuốc phóng đã cháy hết trong nòng từ khá sớm, ở khoảng cách 0.016m tính từ đáy nòng. Từ kết quả mô phỏng, các thông số thuật phóng then chốt được xác định:

Bảng 3. Kết quả tính toán thuật phóng trong

TT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị tính toán	Đơn vị
1	Áp suất cực đại	p_{max}	63.03	MPa
2	Quãng đường đạt p_{max}	l_{pmax}	0.016	m
3	Vận tốc đầu nòng	v_{ra}	248.5	m/s
4	Thời gian đạn trong nòng	t_{ra}	9.68	ms
5	Phần liều cháy tại miệng nòng	ψ_{ra}	100	%

4.2. Tính toán các tham số thuật phóng ngoài

Trên cơ sở các tham số xác định được từ bài toán thuật phóng trong (Bảng 3), nhóm tác giả xác định được quỹ đạo chuyển động của quả đạn cối khi ra khỏi nòng ở các góc bắn (45, 55, 65) như sau:



Hình 5. Quỹ đạo chuyển động của đầu đạn ở các góc bắn khác nhau

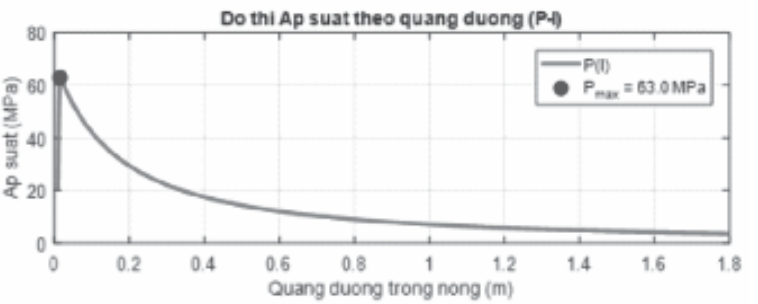
Từ kết quả mô phỏng, các thông số thuật phóng ngoài và số liệu bảng bắn tương ứng được thể hiện trong bảng 4:

Bảng 4. Kết quả tính toán thuật phóng ngoài và bảng bắn tương ứng

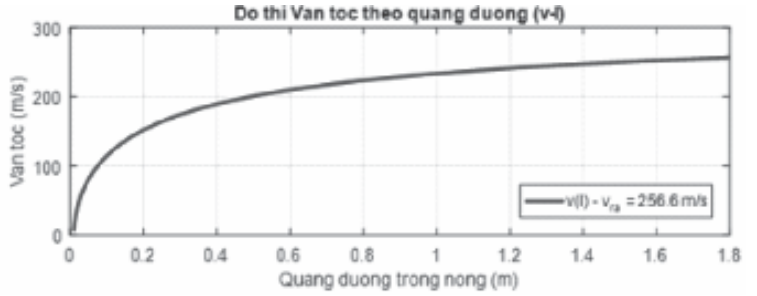
TT	Thông số	Góc bắn 45 độ			Góc bắn 55 độ			Góc bắn 65 độ		
		Tính toán	Bảng bắn	Sai lệch, %	Tính toán	Bảng bắn	Sai lệch, %	Tính toán	Bảng bắn	Sai lệch, %
1	Tầm bắn, m	4772.3	4751	0.45	4442.5	4400	0.96	3631.5	3600	0.88
2	Độ cao, m	1346.1	1343	0.23	1782.7	1792	0.52	2168.4	2165	0.16
3	Thời gian bay, s	33.1	33.05	0.15	38.11	38.19	0.21	42.04	42.00	0.1

Trên cơ sở tính toán thuật phóng trong và thuật phóng ngoài đối với loại súng cối cỡ nòng 100mm thông thường (chiều dài nòng L = 1.45m), các kết quả tính toán cho thấy có sự tương đồng khá cao so với các số liệu từ bảng bắn, sự sai lệch về giá trị không quá 1%. Điều này chứng minh rằng mô hình toán thuật phóng trong và thuật phóng ngoài của loại súng cối cỡ nòng 100mm mà nhóm tác giả xây dựng có độ chính xác cao. Có thể sử dụng để nghiên cứu tính toán cho các bài toán cải tiến, cải hoán loại súng cối cỡ nòng nêu trên.

4.3. Tính toán các tham số thuật phóng với loại súng cối cải tiến L = 1.8m



Hình 6. Đồ thị quan hệ Áp suất - Quãng đường p(l)



Hình 7. Đồ thị quan hệ Vận tốc - Quãng đường v(l)

Về cơ bản, các tham số thuật phóng trong ở trường hợp L = 1.8m so với phương án L = 1.45m chỉ khác về tốc độ đạn tại cửa nòng (tăng lên ~10 m/s), còn các tham số khác vẫn giữ nguyên. Khi đó, quỹ đạo chuyển động của đạn cối ở trường hợp L = 1.8m được thể hiện trong bảng 5 dưới đây:

Bảng 5. Các tham số quỹ đạo chuyển động của đạn cối ở trường hợp L = 1.8m

TT	Góc bắn, độ	Tầm bắn, m			Độ cao, m			Thời gian bay, s		
		L=1.45m	L=1.8m	Tăng, %	L=1.45m	L=1.8m	Tăng, %	L=1.45m	L=1.8m	Tăng, %
1	45	4772.3	4981.6	4.38	1346.1	1410.1	4.75	33.1	33.884	2.37
2	55	4442.5	4636.9	4.37	1782.7	1869.3	4.86	38.11	39.012	2.37
3	65	3631.5	3791.3	4.4	2168.4	2271	4.73	42.04	43.036	2.37

Từ kết quả tính toán trong bảng 5 cho thấy, việc tăng chiều dài nòng súng có làm cho tốc độ chuyển động tại cửa ra nòng súng tăng, từ đó làm tăng tầm bắn của súng cối. Tuy nhiên, lượng tăng tầm là không nhiều, chưa đến 5%. Chính vì thuốc đã cháy hết khá sớm (tại quãng đường 0.016m) (Hình 4), quá trình đạn đi trong phần lớn chiều dài nòng (cả 1.45m và 1.8m) chủ yếu là do sự giãn nở của khí thuốc. Do đó, việc kéo dài nòng thêm 0.35m không tạo thêm năng lượng mới, dẫn đến hiệu quả tăng vận tốc và tầm bắn là không nhiều.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày chi tiết quá trình xây dựng mô hình toán học và giải bài toán thuật phóng trong và ngoài cho súng cối 100mm, chiều dài nòng 1.45m (loại thường) và 1.8m (loại cải tiến) bằng phương pháp số Runge-Kutta bậc 4. Các kết quả chính thu được bao gồm:

Mô hình toán hoàn chỉnh mô tả động lực học quá trình bắn và chuyển động của đạn cối trong và ngoài nòng.

Các đặc tuyến p(l), v(l) đã được mô phỏng, cho thấy diễn biến của áp suất và vận tốc trong toàn bộ quá trình đạn chuyển động trong nòng. Các thông số kỹ thuật quan trọng đã được xác định (Áp suất cực đại p_{max} và vận tốc đầu nòng v_{ra}).

Các kết quả tính toán thuật phóng ngoài cho thấy việc kéo dài nòng súng cối như phương án hiện tại (từ 1.45m lên 1.8m) có làm tăng tầm bắn của súng cối, tuy nhiên lượng tăng là không nhiều (dưới 5%).

Kết quả của mô hình này cung cấp một công cụ lý thuyết hữu ích, cho phép dự đoán hiệu suất và kiểm tra độ an toàn của hệ vũ khí trước khi tiến hành thử nghiệm thực tế tốn kém. Mô hình cũng có thể được mở rộng để nghiên cứu các bài toán tối ưu hóa liều phóng hoặc ảnh hưởng của các yếu tố như nhiệt độ thuốc phóng, độ mòn nòng.❖

Ngày nhận bài: **10/11/2025**
Ngày phản biện: **17/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Ngọc Du, Đỗ Văn Thọ, "*Thuật phóng trong của súng pháo*". Trường Đại học Kỹ thuật quân sự, 1976.

[2]. Trần Đăng Điện, Nguyễn Quang Lượng, Trần văn Doanh, "*Bài tập thuật phóng trong*". Học viện Kỹ thuật quân sự, 2006.

[3]. Ngô Văn Giao, "*Tính chất thuốc phóng và nhiên liệu tên lửa*". NXB. Quân đội nhân dân, Hà Nội, 2005.

[4]. Nguyễn Quang Lượng, Nguyễn Hải Minh, "*Bảng tính Thuật phóng trong*". Học viện Kỹ thuật quân sự, 2004.

[5]. Nguyễn Quang Lượng, Trần Quốc Trình, "*Số liệu vũ khí - đạn*". Học Viện Kỹ thuật quân sự, 2009.

[6]. Nguyễn Quang Lượng, Nguyễn Thanh Điền, "*Thuật phóng trong thời kỳ tống đạn*". NXB. Quân đội nhân dân, Hà Nội, 2015.

NGHIÊN CỨU TÌNH HÌNH ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ CƠ KHÍ – TỰ ĐỘNG HÓA TRONG DÂY CHUYỀN SẢN XUẤT MAY CÔNG NGHIỆP VÀ TRIỂN VỌNG PHÁT TRIỂN TẠI VIỆT NAM

RESEARCH ON THE APPLICATION OF MECHANICAL TECHNOLOGY - AUTOMATION IN INDUSTRIAL GARMENT PRODUCTION LINES AND DEVELOPMENT PROSPECTS IN VIETNAM

ThS. **Nguyễn Gia Phong**
Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp
Email: ngphong@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Ngành dệt may Việt Nam đang đứng trước yêu cầu đổi mới công nghệ trong bối cảnh Cách mạng công nghiệp 4.0. Các giải pháp cơ khí – tự động hóa như máy trải vải tự động, máy cắt CNC, robot may, hệ thống chuyền treo bán tự động, kết hợp với công nghệ số như CAD/CAM và mô phỏng 3D, đang góp phần thay đổi quy trình sản xuất theo hướng hiện đại, chính xác và hiệu quả hơn. Bài báo này tổng quan các ứng dụng công nghệ cơ khí – tự động hóa trong sản xuất may công nghiệp, phân tích xu hướng phát triển trên thế giới, đánh giá thực trạng và thách thức khi triển khai tại Việt Nam. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất định hướng phát triển công nghệ sản xuất may theo hướng tự động hóa, tích hợp IoT và trí tuệ nhân tạo, nhằm nâng cao năng suất, chất lượng sản phẩm và năng lực cạnh tranh của ngành dệt may Việt Nam.

Từ khóa: *Dệt may; Cơ khí chính xác; Tự động hóa; CAD/CAM; Robot may; Sản xuất thông minh.*

ABSTRACT

Vietnam's textile and garment industry is facing increasing demands for technological innovation in the context of Industry 4.0. Mechanical and automation solutions such as automatic fabric spreading machines, CNC cutting systems, sewing robots, and semi-automatic hanger lines, combined with digital technologies such as CAD/CAM and 3D simulation, are transforming production processes towards greater precision and efficiency. This paper provides an overview of mechanical and automation technologies applied in industrial garment production, analyzes global development trends, and evaluates the current situation and challenges in Vietnam. Based on this analysis, the study proposes development directions towards automated and smart manufacturing, integrating IoT and artificial intelligence, in order to improve productivity, product quality, and the competitiveness of Vietnam's textile and garment industry.

Keywords: *Textile and garment; Precision mechanics; Automation; CAD/CAM; Sewing robots; Smart manufacturing.*

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Ngành dệt may Việt Nam là một trong những ngành công nghiệp mũi nhọn, đóng góp hơn 15% kim ngạch xuất khẩu quốc gia và tạo việc làm cho hàng triệu lao động [10]. Tuy nhiên, trong bối cảnh cạnh tranh toàn cầu và sự dịch chuyển chuỗi cung ứng, các doanh nghiệp dệt may Việt Nam đang đối mặt với nhiều thách thức, bao gồm năng suất lao động còn thấp, tỷ lệ tự động hóa hạn chế và chi phí sản xuất ngày càng tăng [8].

Sự phát triển mạnh mẽ của Cách mạng công nghiệp 4.0 đang mở ra cơ hội đổi mới toàn diện cho ngành dệt may, trong đó công nghệ cơ khí và tự động hóa đóng vai trò then chốt. Các giải pháp như máy trải vải tự động, máy cắt CNC, robot may, và hệ thống chuyền treo bán tự động đã được chứng minh giúp tối ưu hóa quy trình, giảm hao phí và nâng cao chất lượng sản phẩm [1, 2]. Đồng thời, công nghệ CAD/CAM, mô phỏng 3D và tích hợp IoT – AI đang thay đổi phương thức thiết kế và quản trị sản xuất theo hướng thông minh, linh hoạt hơn [3, 5].

Nhiều nghiên cứu quốc tế đã chỉ ra rằng việc áp dụng đồng bộ công nghệ cơ khí chính xác và tự động hóa trong may mặc không chỉ cải thiện năng suất mà còn nâng cao khả năng đáp ứng yêu cầu đa dạng của thị trường [2, 4]. Ở Việt Nam, một số doanh nghiệp tiên phong đã thử nghiệm các giải pháp CAD/CAM, Lean Manufacturing và chuyển đổi số, bước đầu đạt được hiệu quả tích cực [6, 7, 9]. Tuy nhiên, mức độ triển khai còn hạn chế do chi phí đầu tư cao, thiếu nguồn nhân lực chất lượng và khó khăn trong tích hợp công nghệ [8].

Vì vậy, việc nghiên cứu và tổng quan về ứng dụng công nghệ cơ khí – tự động hóa trong dây chuyền sản xuất may công nghiệp là cần thiết nhằm cung cấp cơ sở khoa học, định hướng phát triển và đề xuất giải pháp phù hợp cho ngành dệt may Việt Nam. Đây cũng là một hướng đi tất yếu để nâng cao năng suất, chất lượng sản phẩm, đồng thời tăng cường năng lực cạnh tranh trong bối cảnh hội nhập toàn cầu.

2. TỔNG QUAN CÔNG NGHỆ CƠ KHÍ – TỰ ĐỘNG HÓA TRONG NGÀNH DỆT MAY

Ngành dệt may Việt Nam đang chịu áp lực cạnh tranh toàn cầu khi tham gia sâu vào các chuỗi cung ứng quốc tế. Để đáp ứng yêu cầu về chất lượng sản phẩm, tốc độ giao hàng và chi phí cạnh tranh, nhiều doanh nghiệp đã đầu tư mạnh vào công nghệ cơ khí – tự động hóa (CNC, robot, IoT, AI). Nếu như trước đây phần lớn quy trình sản xuất phụ thuộc lao động thủ công thì ngày nay, tỷ lệ tự động hóa ngày càng cao, đặc biệt ở các khâu trải vải, cắt, may, kiểm tra chất lượng và đóng gói [1, 2]. Sau đây là các ứng dụng công nghệ cơ khí – tự động hóa trong sản xuất may công nghiệp.

2.1. Máy trải và cắt vải tự động

Trong khâu chuẩn bị sản xuất, máy trải vải tự động giúp giảm thời gian và công sức lao động so với trải thủ công. Tiếp đó, máy cắt CNC sử dụng dao quay hoặc laser để cắt chính xác theo rập đã lập trình, giảm hao phí nguyên liệu từ 3-5% [1].

Hiệu quả cắt có thể được đánh giá thông qua công thức:

$$\eta_c = \frac{A_{sp}}{A_v} \times 100\%$$

Trong đó:

- η_c: Hiệu suất sử dụng vải (%);
- A_{sp}: Diện tích vải sử dụng cho sản phẩm;

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

• A_v: Tổng diện tích vải tiêu hao.

Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy η_c đạt 82-90% khi dùng máy cắt CNC, trong khi thủ công chỉ đạt 75-80% [3].

2.2. Robot và tự động hóa trong may

Ứng dụng robot may được xem là bước tiến quan trọng, đặc biệt trong khâu may chi tiết nhỏ (cổ áo, túi, khóa kéo). Robot giúp tăng tốc độ may 20-25%, đồng thời giảm sai lệch đường may. Tuy nhiên, chi phí đầu tư còn cao, nên mới chủ yếu áp dụng ở doanh nghiệp lớn [4].

Hệ thống chuyền treo (hanger system) phân phối bán thành phẩm tự động, giảm thời gian chờ đợi, tối ưu hóa cân bằng chuyền. Một chuyền may sử dụng hanger system có thể nâng năng suất lên 15-20% so với chuyền truyền thống [5].

2.3. Công nghệ CAD/CAM và mô phỏng 3D

Ứng dụng CAD/CAM trong thiết kế rập và giác sơ đồ đã trở thành tiêu chuẩn trong nhiều doanh nghiệp may. Nhờ đó, có thể giảm hao phí nguyên liệu 5-8% [6].

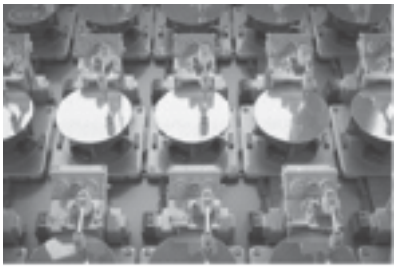
Mô phỏng 3D (3D garment simulation) cho phép thử nghiệm mẫu áo/quần trên mô hình ảo, kiểm tra độ vừa vặn và kiểu dáng trước khi cắt may thực tế. Điều này giúp:

• Rút ngắn thời gian phát triển mẫu từ 5-7 ngày xuống còn 1-2 ngày;

• Giảm chi phí thử mẫu vật lý tới 50% [7].



Hình 1. Máy cắt Laser tự động



Hình 2. Robot và tự động hóa trong may



Hình 3. Công nghệ mô phỏng 3D

2.4. Tích hợp IoT và AI trong sản xuất

Công nghệ IoT cho phép kết nối máy may, máy cắt, hệ thống kiểm tra chất lượng vào mạng lưới quản lý chung. Dữ liệu thu thập từ cảm biến (tốc độ kim, độ căng chỉ, thời gian vận hành) được xử lý để dự đoán hỏng hóc, nhờ đó giảm 15-20% chi phí bảo trì [8].

Trong khi đó, AI được ứng dụng trong:

• Nhận diện lỗi may qua camera (phát hiện lỗi đường chỉ, lệch rập);

• Dự báo nhu cầu thị trường để tối ưu hóa kế hoạch sản xuất; ☞

• Tự động phân bổ lao động theo năng suất từng công đoạn [9].

Công nghệ MES (Manufacturing Execution System) khi tích hợp IoT + AI giúp doanh nghiệp may đạt được sản xuất tinh gọn (lean manufacturing), giảm tồn kho bán thành phẩm và nâng cao khả năng phản ứng với đơn hàng nhỏ, đa dạng.

2.5 . Tác động đến năng suất và chất lượng

Tổng hợp từ nhiều nghiên cứu và thực tiễn triển khai:

• Năng suất lao động: Tăng 15-35% khi áp dụng đồng bộ máy cắt CNC, CAD/CAM và hệ thống chuyền treo [2, 5, 6];

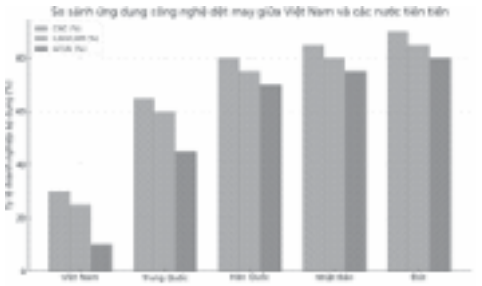
• Hao phí nguyên liệu: Giảm 5-10% nhờ giác sơ đồ tối ưu [3, 6];

• Chất lượng sản phẩm: Tỷ lệ lỗi giảm 20-40% nhờ kiểm soát bằng cảm biến và AI [8, 9];

• Chi phí bảo trì: Giảm 15-25% do bảo trì dự đoán (predictive maintenance) [10].



Hình 4. Tích hợp IoT và AI trong sản xuất



Hình 5. So sánh tỷ lệ doanh nghiệp may Việt Nam ứng dụng công nghệ với các nước

3. ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ CƠ KHÍ – TỰ ĐỘNG HÓA TRONG NGÀNH DỆT MAY TRÊN THẾ GIỚI

Trong hai thập kỷ qua, ngành dệt may toàn cầu đã có những bước tiến vượt bậc nhờ sự ứng dụng của công nghệ cơ khí chính xác, tự động hóa và số hóa. Các quốc gia có ngành công nghiệp dệt may phát triển như Mỹ, Nhật Bản, Đức, Hàn Quốc và Trung Quốc đã sớm đầu tư mạnh mẽ vào việc tích hợp máy móc hiện đại và hệ thống điều khiển thông minh vào sản xuất [1, 4, 7].

Ở châu Âu, nhiều doanh nghiệp sử dụng máy cắt vải CNC và robot may có khả năng xử lý vật liệu với độ chính xác cao, giảm 20-30% lượng phế liệu so với cắt thủ công [2]. Ngoài ra, các hệ thống dây chuyền tự động theo đơn vị (Unit Production System – UPS) được ứng dụng rộng rãi trong các nhà máy may ở Đức và Ý, giúp rút ngắn thời gian sản xuất một sản phẩm từ vài giờ xuống còn 40-60 phút [3].

Tại Nhật Bản và Hàn Quốc, các tập đoàn dệt may đã triển khai mô hình "Smart Factory", trong đó các công đoạn như trải vải, cắt, may, kiểm tra chất lượng đều được kết nối qua hệ thống IoT và giám sát bằng trí tuệ nhân tạo (AI). Nhờ đó, doanh nghiệp có thể theo dõi năng suất theo thời gian thực, dự báo lỗi sản phẩm và tối ưu hóa lịch trình sản xuất [5], [6].

Trung Quốc – trung tâm sản xuất dệt may lớn nhất thế giới – đã đầu tư mạnh vào robot may tự động và công nghệ thiết kế CAD/CAM. Một số nhà máy tại Quảng Châu và Thâm Quyến đã đạt mức tự động hóa trên 60%, nhờ đó giảm đáng kể sự phụ thuộc vào lao động giá rẻ [8]. Đồng thời, Trung Quốc cũng tiên phong ứng dụng công nghệ in 3D trong thiết kế mẫu, rút ngắn chu kỳ phát triển sản phẩm từ vài tuần xuống chỉ còn vài ngày [9].

Tại Mỹ, sự kết hợp giữa công nghệ may tự động và trí tuệ nhân tạo đang thúc đẩy xu hướng "reshoring" – đưa sản xuất trở lại trong nước. Các công ty như SoftWear Automation đã phát triển hệ thống Sewbot, có thể tự động may áo T-shirt với tốc độ và độ chính xác cao, mở ra khả năng cạnh tranh với chi phí lao động thấp ở châu Á [10].

Như vậy, kinh nghiệm từ các quốc gia phát triển cho thấy việc ứng dụng đồng bộ cơ khí – tự động hóa – số hóa đã và đang thay đổi toàn diện ngành dệt may. Các giải pháp này không chỉ giúp nâng cao năng suất, chất lượng sản phẩm, mà còn tạo điều kiện để ngành dệt may thích ứng với xu hướng sản xuất tinh gọn (Lean Manufacturing) và cá nhân hóa theo nhu cầu khách hàng.

4. THỰC TRẠNG VÀ TRIỂN VỌNG PHÁT TRIỂN TẠI VIỆT NAM

4.1. Thực trạng ứng dụng công nghệ

Ngành dệt may Việt Nam hiện có hơn 6.000 doanh nghiệp, trong đó phần lớn là doanh nghiệp vừa và nhỏ [1]. Dù đóng góp lớn vào xuất khẩu, nhưng trình độ công nghệ còn hạn chế:

• Khâu trải và cắt vải: Khoảng 70% doanh nghiệp vẫn cắt thủ công, chỉ một số ít dùng máy cắt CNC hoặc laser [2];

• Khâu may: Hầu hết vẫn dựa vào lao động thủ công, hệ thống chuyền treo tự động mới xuất hiện tại vài nhà máy lớn (ví dụ: May 10, Vinatex) [3];

• CAD/CAM: Đã được ứng dụng trong thiết kế rập và giác sơ đồ ở một số công ty xuất khẩu, nhưng chưa phổ biến rộng rãi [4];

• IoT và AI: Mới ở mức thử nghiệm, chưa có hệ thống sản xuất thông minh hoàn chỉnh [5].

4.2. Những khó khăn

• Chi phí đầu tư cao: Máy cắt CNC, robot may, hệ thống chuyền treo có giá hàng triệu USD, vượt quá khả năng của nhiều doanh nghiệp vừa và nhỏ [6];

• Nguồn nhân lực hạn chế: Kỹ sư cơ khí – tự động hóa trong ngành may còn thiếu, công nhân chưa quen với thao tác trên thiết bị số [7];

• Khó khăn trong tích hợp công nghệ: Hệ thống máy móc nhập khẩu từ nhiều hãng khác nhau, thiếu chuẩn kết nối chung, dẫn đến khó đồng bộ [8];

• Phụ thuộc lao động giá rẻ: Việt Nam vẫn dựa vào lợi thế nhân công chi phí thấp, do đó động lực đầu tư công nghệ chưa mạnh [9];

• Áp lực từ xu hướng "xanh" và bền vững: Các thị trường lớn (Mỹ, EU) yêu cầu sản xuất xanh, tiết kiệm năng lượng, trong khi công nghệ hiện tại ở Việt Nam chưa đáp ứng tốt [10].

4.3. Triển vọng phát triển tại Việt Nam

Bên cạnh thách thức, triển vọng phát triển tại Việt Nam cũng rất rõ rệt:

• Các hiệp định thương mại tự do (CPTPP, EVFTA) tạo điều kiện để doanh nghiệp nâng cấp công nghệ;

• Nhà nước đã có chính sách hỗ trợ chuyển đổi số và khuyến khích áp dụng công nghiệp 4.0 trong sản xuất;

• Một số doanh nghiệp tiên phong (như ☞

May 10, TNG, Vinatex) đã đầu tư hệ thống CAD/CAM, chuyền treo tự động, mở đường cho ngành [3, 4].

5. KẾT LUẬN

Ứng dụng công nghệ cơ khí – tự động hóa trong ngành dệt may đang trở thành xu hướng tất yếu để nâng cao năng suất, chất lượng và khả năng cạnh tranh. Việt Nam đã bắt đầu áp dụng CNC, CAD/CAM, IoT trong sản xuất nhưng mức độ còn hạn chế so với các nước tiên tiến. Do đó, việc đầu tư mạnh mẽ hơn vào công nghệ hiện đại, kết hợp đào tạo nhân lực chất lượng cao, sẽ là giải pháp then chốt giúp ngành dệt may Việt Nam chuyển dịch sang sản xuất thông minh và bền vững trong thời gian tới.❖

Ngày nhận bài: **15/10/2025**
Ngày phản biện: **27/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Wang, J., & Xu, Y. (2020), "*Application of CNC Cutting Technology in Garment Manufacturing*". Journal of Textile Engineering, 36(4), 55-62.

[2]. Li, H., Zhang, L., & Chen, Y. (2021), "*Automation and Robotics in Apparel Production: A Review*". International Journal of Clothing Science and Technology, 33(2), 145-163.

[3]. Gopalakrishnan, S., & Jayaraman, S. (2023), "*Smart Manufacturing in Textiles and Apparel*". Springer.

[4]. Behera, B. K. (2018), "*3D Body Scanning and CAD in Apparel Design*". Woodhead Publishing.

[5]. Xu, B., & Zhao, Y. (2022), "*Integration of IoT and AI in Garment Production Systems*". Journal of Manufacturing Systems, 65, 310-321.

[6]. Nguyễn Văn Hùng (2019), "*Ứng dụng công nghệ CAD/CAM trong thiết kế và sản xuất ngành may*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, 12, 25-30.

[7]. Trần Thị Thu Hà, & Lê Văn Dũng (2020), "*Ứng dụng Lean Manufacturing trong quản lý sản xuất may công nghiệp*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Công nghiệp Hà Nội, 59(3), 45-52.

[8]. Tran, T. Q., & Le, D. H. (2022), "*Digital Transformation in Vietnam's Textile and Garment Industry*". Vietnam Journal of Science and Technology, 60(3), 88-97.

[9]. Nguyễn Thị Lan Anh (2021), "*Tự động hóa và xu hướng phát triển trong ngành dệt may Việt Nam*". Tạp chí Dệt May Việt Nam, 8, 12-18.

[10]. International Labour Organization (ILO) (2019), "*The Future of Work in Textiles, Clothing, Leather and Footwear*". Geneva: ILO.

THÚC ĐẨY HOẠT ĐỘNG NGHIÊN CỨU KHOA HỌC, SÁNG KIẾN VÀ ĐỔI MỚI SÁNG TẠO TRONG GIẢNG VIÊN, SINH VIÊN TRƯỜNG CAO ĐẲNG CÔNG NGHIỆP VÀ XÂY DỰNG

PROMOTING SCIENTIFIC RESEARCH, INNOVATION AND CREATIVITY AMONG LECTURERS AND STUDENTS COLLEGE OF INDUSTRY AND CONSTRUCTION

Đỗ Minh Chiến, Lê Văn Lợi, Nguyễn Thanh Tuấn,
Hoàng Thị Nguyên, Mai Kim Hiếu, Hoàng Minh Thuận*
Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng (Bộ Công Thương)
**Email: hoangminhthuan@cic.edu.vn*

TÓM TẮT

Trong bối cảnh chuyển đổi số và hội nhập sâu rộng, đổi mới sáng tạo (ĐMST) được xem là động lực cốt lõi để nâng cao chất lượng đào tạo và năng lực cạnh tranh của các cơ sở giáo dục nghề nghiệp. Bài viết này trình bày thực trạng và các giải pháp trọng tâm nhằm thúc đẩy hoạt động nghiên cứu khoa học (NCKH), sáng kiến và ĐMST trong đội ngũ giảng viên, sinh viên Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng. Trên cơ sở tiếp cận mô hình đo lường ĐMST với các yếu tố đầu vào – đầu ra, bài viết đề xuất định hướng phát triển hệ sinh thái ĐMST bền vững, góp phần nâng cao hiệu quả đào tạo và phát triển nguồn nhân lực chất lượng cao.

Từ khóa: *Nghiên cứu khoa học; Đổi mới sáng tạo; Sáng kiến; Giáo dục nghề nghiệp; Giảng viên; Sinh viên.*

ABSTRACT

In the context of digital transformation and deep integration, innovation is considered a core driving force to improve the training quality and competitiveness of vocational education institutions. This article presents the current situation and key solutions to promote scientific research, initiatives, and innovation activities among lecturers and students of the College of Industry and Construction. Based on the innovation measurement model with input and output factors, the article proposes orientations for developing a sustainable innovation ecosystem, contributing to enhancing training efficiency and developing high-quality human resources.

Keywords: *Scientific research; Innovation; Initiatives; Vocational education; Lecturers; Students.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cuộc Cách mạng công nghiệp lần thứ tư [11] đã và đang tạo ra những thay đổi sâu sắc trong cơ cấu ngành nghề, yêu cầu kỹ năng và phương thức đào tạo. Đối với các cơ sở giáo dục nghề nghiệp, việc chuyển dịch từ truyền thụ kiến thức sang phát triển toàn diện năng lực người học – bao gồm tư duy phản biện, sáng tạo, và giải quyết vấn đề – là yêu cầu cấp thiết. Trong đó, hoạt động NCKH và ĐMST đóng vai trò trụ cột, giúp giảng viên nâng cao chất lượng giảng dạy và giúp sinh viên thích ứng hiệu quả với thị trường lao động.

Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng đã xác định ĐMST là nhiệm vụ chiến lược, cần sự đầu tư đồng bộ về cơ chế, nhân lực, hạ tầng và văn hóa học thuật.

2. KHUNG LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH ĐO LƯỜNG ĐỔI MỚI SÁNG TẠO

Đổi mới sáng tạo (ĐMST) là khái niệm đa chiều, được nghiên cứu trong nhiều lĩnh vực từ quản trị, giáo dục cho tới phát triển quốc gia. Theo OECD [8], ĐMST được hiểu là việc tạo ra và áp dụng thành công những ý tưởng mới dưới dạng sản phẩm, quy trình, dịch vụ hoặc phương thức tổ chức. Trong giáo dục nghề nghiệp, ĐMST không chỉ là phát minh công nghệ mà còn bao gồm sáng kiến sư phạm, phương pháp giảng dạy, mô hình đào tạo và gắn kết doanh nghiệp.

2.1. Các khung lý thuyết tham chiếu quốc tế

Chỉ số Đổi mới Toàn cầu (Global Innovation Index – GII, WIPO 2023) [14]: GII đánh giá năng lực ĐMST của quốc gia dựa trên hai nhóm lớn (Input và Output), gồm 7 trụ cột (thể chế, nguồn nhân lực và nghiên cứu, hạ tầng, mức độ phát triển thị trường, mức độ phát triển kinh doanh, sản phẩm tri thức và công nghệ, sản phẩm sáng tạo).

Khuyến nghị của UNESCO về giáo dục nghề nghiệp sáng tạo [9]: UNESCO nhấn mạnh việc đo lường ĐMST trong TVET cần kết hợp các yếu tố về hạ tầng số, tính sẵn sàng của giảng viên, khả năng học tập suốt đời và mức độ hợp tác với doanh nghiệp.

Khung của Tổng cục Giáo dục nghề nghiệp Việt Nam (2022) [4]: Xem ĐMST là tiêu chí đánh giá chất lượng trường nghề, thông qua các hoạt động nghiên cứu ứng dụng, sáng kiến cải tiến kỹ thuật và tham gia khởi nghiệp.

2.2. Cấu trúc mô hình đo lường ĐMST (Input – Output)

Cấu trúc mô hình đo lường ĐMST [7] được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Khung đo lường ĐMST – Input/Output và chỉ báo áp dụng tại Trường CĐ Công nghiệp và Xây dựng theo hướng vừa học thuật (dựa GII – WIPO, UNESCO) vừa gắn với thực tiễn nhà trường.

Nhóm yếu tố	Thành tố chính	Chỉ báo đo lường
Đầu vào (Input)	1. Thể chế	- Số lượng văn bản, quy chế về NCKH & ĐMST ban hành hằng năm; - Chính sách khuyến khích giảng viên/sinh viên tham gia nghiên cứu, sáng kiến.
	2. Nguồn nhân lực & nghiên cứu	- Tỷ lệ giảng viên có trình độ sau ĐH; - Số đề tài NCKH cấp trường/tỉnh được triển khai; - Số sinh viên tham gia cuộc thi sáng tạo, khởi nghiệp.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

	3. Hạ tầng công nghệ – kỹ thuật	- Số phòng thí nghiệm, thực hành sáng tạo được trang bị; - Tỷ lệ học liệu số, tài liệu mở trong thư viện số; - Mức độ ứng dụng phần mềm CAD/CAM, IoT, 3D mô phỏng trong đào tạo.
	4. Thị trường & môi trường kinh doanh	- Số lượng biên bản ghi nhớ (MOU) hợp tác với doanh nghiệp/viện nghiên cứu; - Số dự án phối hợp nghiên cứu - chuyển giao công nghệ.
Đầu ra (Output)	1. Sản phẩm tri thức – công nghệ	- Số bài báo khoa học đăng tạp chí/năm; - Số sáng chế, giải pháp hữu ích, đăng ký sở hữu trí tuệ; - Số giáo trình/ học liệu số hóa mới được biên soạn.
	2. Sản phẩm sáng tạo & giá trị xã hội	- Số sản phẩm/sáng kiến được ứng dụng vào giảng dạy, sản xuất, tuyển sinh; - Số ý tưởng/đề án khởi nghiệp thương mại hóa thành công; - Số giải thưởng trong các cuộc thi khoa học công nghệ, đổi mới sáng tạo.

Bảng 1 không chỉ giúp nhà trường lượng hóa và theo dõi tiến độ ĐMST theo từng giai đoạn, mà còn là căn cứ để so sánh với chuẩn khu vực/quốc tế (GII, UNESCO) [9, 10, 14]. Đồng thời, đây cũng là bộ chỉ báo phục vụ báo cáo thường niên hoạt động NCKH & ĐMST của Trường.

3. THỰC TRẠNG VÀ GIẢI PHÁP TẠI TRƯỜNG CAO ĐẲNG CÔNG NGHIỆP VÀ XÂY DỰNG

3.1. Thực trạng theo sơ đồ SWOT

Bảng 2. Sơ đồ SWOT thể hiện trực quan tại Trường CĐ Công nghiệp và Xây dựng

S (Strengths - Điểm mạnh) - Truyền thống đào tạo nghề uy tín - Đội ngũ giảng viên giàu kinh nghiệm - Quan hệ hợp tác doanh nghiệp	W (Weaknesses - Điểm yếu) - Cơ sở vật chất chưa đồng bộ - Nguồn lực tài chính hạn chế - Hoạt động R&D còn phân tán
O (Opportunities - Cơ hội) - Chính sách hỗ trợ ĐMST từ Nhà nước - Xu hướng CĐS giáo dục - Nhu cầu lao động kỹ thuật cao	T (Threats - Thách thức) - Cạnh tranh từ các cơ sở giáo dục khác - Tốc độ thay đổi công nghệ nhanh - Tác động kinh tế khó lường

+ Điểm mạnh (Strengths):

- Đã hình thành nền tảng về cơ sở vật chất và môi trường học thuật: có phòng STEM, thư viện số, các phòng thực hành hiện đại (CAD/CAM, IoT, điều khiển tự động,…);

- Đội ngũ giảng viên trẻ, có trình độ sau đại học chiếm tỷ lệ ngày càng cao; một số giảng viên đã công bố bài báo trên tạp chí khoa học trong và ngoài nước;

- Văn hóa sáng kiến được khuyến khích, nhiều sinh viên đạt giải trong các cuộc thi STAUP KITE, StartUp, Techconnect.

+ Điểm yếu (Weaknesses):

- Năng lực NCKH của giảng viên còn ☞

phân tán, chưa đồng đều, số lượng công trình khoa học có giá trị ứng dụng và bài báo quốc tế còn hạn chế;

- Kinh phí hỗ trợ nghiên cứu, sáng kiến và sở hữu trí tuệ chưa ổn định, còn phụ thuộc nhiều vào ngân sách nhà nước;

- Sinh viên tham gia NCKH chưa thường xuyên, nhiều em còn thiếu kỹ năng viết, phân tích dữ liệu, và chưa quen với nghiên cứu ứng dụng.

+ Cơ hội (Opportunities):

- Chính phủ, Bộ Công Thương và Tổng cục GDNN [1, 2, 4] đều đang khuyến khích mạnh mẽ hoạt động ĐMST trong trường nghề, có nhiều quỹ và chương trình hỗ trợ;

- Nhu cầu của doanh nghiệp về lao động có kỹ năng sáng tạo, tư duy giải quyết vấn đề và khả năng khởi nghiệp ngày càng cao;

- Hợp tác quốc tế và chuyển giao công nghệ mở ra nhiều cơ hội cho giảng viên, sinh viên tham gia dự án nghiên cứu thực tiễn.

+ Thách thức (Threats):

- Cạnh tranh giữa các cơ sở đào tạo nghề trong khu vực về uy tín, thương hiệu và sản phẩm khoa học – công nghệ;

- Sự thay đổi nhanh chóng của công nghệ (AI, IoT, công nghệ số) đòi hỏi nhà trường liên tục cập nhật;

- Việc thương mại hóa sản phẩm nghiên cứu trong môi trường giáo dục nghề nghiệp còn nhiều rào cản pháp lý và thị trường.

3.2. Giải pháp trọng tâm

Từ thực trạng trên, các nhóm giải pháp được đề xuất như sau:

(1) Nâng cao năng lực NCKH cho giảng viên và sinh viên

- Định kỳ tổ chức tập huấn phương pháp NCKH, kỹ năng viết báo khoa học, khai thác dữ liệu số;

- Thành lập các nhóm nghiên cứu mạnh, gắn với chuyên ngành đào tạo trọng điểm (Cơ khí – Ô tô, Điện – Điện tử, Du lịch – Kinh tế).

(2) Hoàn thiện cơ chế chính sách

- Ban hành quy định rõ ràng về xét duyệt, công nhận và khen thưởng sáng kiến, NCKH;

- Thí điểm cơ chế "hợp đồng nghiên cứu" với giảng viên – sinh viên nhằm gắn kết trách nhiệm và quyền lợi.

(3) Đầu tư cơ sở hạ tầng số và công nghệ

- Xây dựng "Không gian sáng tạo mở" (Innovation Hub) cho giảng viên và sinh viên;

- Ứng dụng mạnh mẽ công nghệ số (AI, mô phỏng 3D, big data) trong quá trình nghiên cứu và giảng dạy.

(4) Kết nối với doanh nghiệp và xã hội

- Phát triển mô hình "Trường – Doanh nghiệp – Viện nghiên cứu" để triển khai đề tài ứng dụng, chuyển giao công nghệ;

- Khuyến khích sinh viên thực hiện đề tài gắn với nhu cầu thực tiễn tại doanh nghiệp

(mini project, đề án khởi nghiệp).

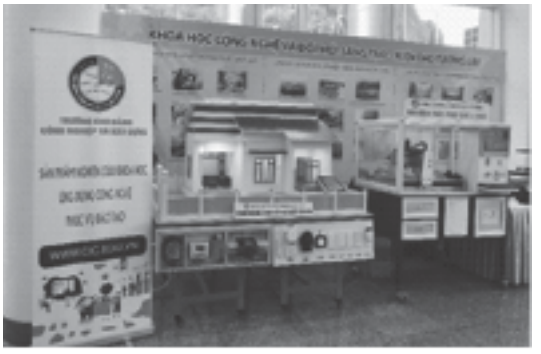
(5) Thúc đẩy văn hóa sáng tạo và hệ sinh thái ĐMST

- Xây dựng câu lạc bộ "Sinh viên sáng tạo khởi nghiệp", tổ chức cuộc thi ý tưởng sáng tạo nội bộ hằng năm;

- Đa dạng hóa nguồn lực tài chính từ doanh nghiệp, quỹ nghiên cứu, dự án quốc tế để duy trì hệ sinh thái ĐMST bền vững.



Hình 1. Lãnh đạo nhà trường cùng các đại biểu dự Lễ khai trương phòng STEM và ra mắt nhóm STEM



Hình 2. Trường CĐ Công nghiệp và Xây dựng tham gia trưng bày sản phẩm NCKH ứng dụng công nghệ phục vụ đào tạo

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Đổi mới sáng tạo trong giáo dục nghề nghiệp là xu thế tất yếu, giữ vai trò then chốt trong nâng cao chất lượng đào tạo và năng lực cạnh tranh của cơ sở giáo dục. Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng đã từng bước hình thành môi trường học thuật khuyến khích nghiên cứu khoa học, sáng kiến và khởi nghiệp sáng tạo.

Để phát huy hơn nữa hiệu quả, trong thời gian tới nhà trường cần tập trung vào một số giải pháp trọng tâm:

- Nâng cao năng lực NCKH cho giảng viên, sinh viên thông qua tập huấn, hình thành nhóm nghiên cứu mạnh và gắn kết với chuyên ngành đào tạo trọng điểm.

- Hoàn thiện cơ chế, chính sách khuyến khích sáng tạo, ban hành quy định rõ ràng về xét duyệt, công nhận và khen thưởng kết quả NCKH, sáng kiến.

- Đầu tư hạ tầng số và công nghệ, xây dựng không gian sáng tạo mở, ứng dụng mạnh mẽ AI, IoT, mô phỏng 3D trong giảng dạy – nghiên cứu.

- Kết nối chặt chẽ với doanh nghiệp, triển khai các dự án ứng dụng, chuyển giao công nghệ và đề tài gắn với nhu cầu thực tiễn.

- Phát triển hệ sinh thái đổi mới sáng tạo bền vững, đa dạng hóa nguồn lực tài chính, xây dựng văn hóa sáng tạo và thúc đẩy các hoạt động khởi nghiệp.

Những giải pháp trên nếu được triển khai đồng bộ sẽ góp phần xây dựng Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng trở thành cơ sở giáo dục nghề nghiệp tiên phong về nghiên cứu khoa học, đổi mới sáng tạo và phát triển nguồn nhân lực chất lượng cao.❖

Ngày nhận bài: **08/9/2025**
Ngày phản biện: **15/9/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bộ Công Thương (2021), "*Chiến lược phát triển ngành Công Thương giai đoạn 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2045*".

[2]. Bộ Lao động – Thương binh và Xã hội (2020), "*Chiến lược phát triển giáo dục nghề nghiệp giai đoạn 2021–2030, tầm nhìn 2045*".

[3]. Bộ Khoa học và Công nghệ (2019), "*Chiến lược quốc gia về đổi mới sáng tạo đến năm 2030*".

[4]. Tổng cục Giáo dục nghề nghiệp (2022), "*Báo cáo tổng kết công tác năm 2021 và phương hướng nhiệm vụ năm 2022*".

[5]. Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng (2023, 2024), "*Báo cáo tổng kết năm học, báo cáo công tác nghiên cứu khoa học và hợp tác quốc tế*".

[6]. Phạm Thành Nghị (2020), "*Đổi mới sáng tạo trong giáo dục và đào tạo nghề nghiệp*". Tạp chí Giáo dục.

[7]. Nguyễn Đăng Minh (2021), "*Đo lường và đánh giá đổi mới sáng tạo trong tổ chức giáo dục*". Tạp chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội.

[8]. OECD (2018), "*Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*". OECD Publishing, Paris.

[9]. UNESCO (2021), "*Transforming Technical and Vocational Education and Training for the Future of Work*".

[10]. European Commission (2020), "*European Innovation Scoreboard 2020*". Brussels.

[11]. World Economic Forum (2022), "*The Global Competitiveness Report*". Geneva.

[12]. Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000), "*The dynamics of innovation: from National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university – industry – government relations*". Research Policy, 29(2).

[13]. Schumpeter, J. A. (1942), "*Capitalism, Socialism and Democracy*". New York: Harper & Brothers.

[14]. WIPO (2023), "*Global Innovation Index 2023*". Geneva.

SA BÀN THỰC HÀNH ĐIỆN THÂN XE Ô TÔ – GIẢI PHÁP ĐÀO TẠO HIỆU QUẢ CHO NGHỀ CÔNG NGHỆ Ô TÔ

DEVELOPMENT OF AN AUTOMOTIVE BODY ELECTRICAL TRAINING BOARD FOR VOCATIONAL EDUCATION IN VIETNAM

Nguyễn Xuân Hòa, Vũ Thế Hòa, Nguyễn Thị Hồng Mến, Trương Văn Toản, Lê Văn Lợi, Đỗ Minh Chiến, Hoàng Minh Thuận*

Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng (Bộ Công Thương)

**Email: hoangminhthuan@cic.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày quy trình thiết kế, chế tạo và ứng dụng Sa bàn thực hành điện thân xe ô tô – một thiết bị dạy học trực quan nhằm nâng cao hiệu quả đào tạo nghề Công nghệ kỹ thuật ô tô. Thiết bị mô phỏng cấu trúc hệ thống điện thân xe dựa trên nền tảng xe Toyota Vios, cho phép người học thực hành đo kiểm, sửa chữa, chẩn đoán sự cố và khai thác tài liệu số thông qua mã QR. Sa bàn có khả năng điều chỉnh độ cao, độ nghiêng, tích hợp bộ tạo pan thông minh, phù hợp với cả hình thức dạy học trực tiếp và trực tuyến.

Từ khóa: *Sa bàn điện thân xe; Thiết bị dạy học nghề; Hệ thống điện ô tô; Công nghệ ô tô; Đào tạo thực hành.*

ABSTRACT

This paper presents the design, fabrication, and application of a training model simulating car body electrical systems, aimed at enhancing vocational education in Automotive Technology. The model replicates essential electrical systems based on the Toyota Vios, enabling learners to practice troubleshooting, circuit measurements, and component replacements. It features adjustable height and tilt, QR code integration for digital resources, and a smart fault simulation system, thus suitable for both in-person and online training contexts.

Keywords: *Car electrical system; Automotive training equipment; Vocational education; Electrical fault simulation; QR code integration.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh đổi mới giáo dục, nhu cầu đào tạo nguồn nhân lực chất lượng cao cho ngành công nghệ kỹ thuật ô tô đang đặt ra yêu cầu cấp thiết về thiết bị đào tạo hiện đại, sát với thực tế. Nội dung đào tạo điện thân xe ô tô là phần quan trọng nhưng thường gặp nhiều khó khăn trong giảng dạy và học tập do cấu trúc phân tán, phức tạp và vị trí lắp đặt các hệ thống điện không thuận tiện quan sát. Để khắc phục bất cập này, nhóm tác giả tại Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng đã thiết kế và chế tạo Sa bàn thực hành điện thân xe ô tô – thiết bị mô phỏng trực quan nhằm phục vụ hiệu quả quá trình đào tạo ở các cấp trình độ: sơ cấp, trung cấp, cao đẳng và đại học [1], [5].

2. Ý TƯỞNG THIẾT KẾ

Sa bàn được xây dựng dựa trên việc mô phỏng các hệ thống điện thân xe cơ bản theo cấu trúc của xe Toyota Vios – dòng xe phổ biến tại Việt Nam. Các hệ thống bao gồm: đèn chiếu sáng, xi nhan, còi, gương chỉnh điện, nâng hạ kính, khóa cửa, gạt nước rửa kính và hệ thống âm thanh. Thiết bị được thiết kế nổi trên bề mặt sa bàn giúp học viên dễ dàng quan sát, tra cứu, đo kiểm và sửa chữa [5].

Sa bàn tích hợp bộ tạo pan thông minh và mã QR tại từng cụm hệ thống giúp tiếp cận tài liệu học tập và sửa chữa theo hướng dẫn của hãng, đồng thời hỗ trợ tổ chức bài giảng tích hợp và học tập linh hoạt [5].

3. PHẠM VI ỨNG DỤNG

Sa bàn được ứng dụng cho các ngành: Công nghệ ô tô, Kỹ thuật ô tô, Bảo trì và sửa chữa ô tô. Đối tượng học tập bao gồm các cấp trình độ (sơ cấp, trung cấp, cao đẳng và đại học) [5].

Sa bàn phù hợp giảng dạy các môn học như: Trang bị điện ô tô; Thực hành điện ô tô; Mô đun sửa chữa điện thân xe [5].

Hình thức đào tạo: Dạy học trực tiếp tại trường, trung tâm vệ tinh, đào tạo từ xa và dạy học trực tuyến nhờ tích hợp thiết bị camera, tài liệu số và khả năng di động của sa bàn [5].

Thiết bị đáp ứng linh hoạt yêu cầu đào tạo trong nhiều điều kiện giảng dạy khác nhau, từ truyền thống đến số hóa [5].

4. CẤU TẠO VÀ CÔNG NĂNG KỸ THUẬT

4.1. Phần cơ khí

- Mặt sa bàn: Kích thước 2000x1200mm, chế tạo từ hợp kim nhôm Alcorest, khung đỡ bằng thép hộp.

- Khung giá: Dạng gấp khúc có khả năng điều chỉnh độ cao và độ nghiêng linh hoạt.

- Cơ cấu hỗ trợ: Tích hợp xy lanh điện, xy lanh giảm chấn, bộ hãm quay và bánh xe di chuyển.

4.2. Phần điện – điện tử

- Mạch điện: Được đấu theo sơ đồ nguyên bản, dây dẫn bố trí gọn, dễ quan sát và can thiệp.

- Bộ tạo pan thông minh: Cho phép giảng viên điều khiển sự cố từ xa hoặc pan trực tiếp để học viên chẩn đoán.

- Nguồn điện: Sử dụng linh hoạt cả ắc quy 12V và nguồn dân dụng 220V thông qua bộ chuyển đổi.

4.3. Tài liệu học tập

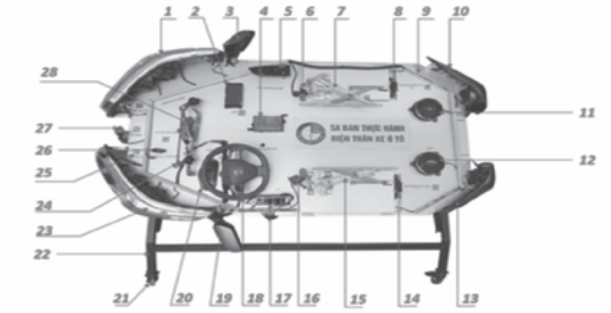
Tài liệu đi kèm là sơ đồ mạch điện tích hợp mã QR, giúp người học tra cứu nhanh chóng. Mỗi hệ thống đều gắn mã học liệu ngay trên vị trí cụm chi tiết, hỗ trợ học tập linh hoạt, phù hợp với đào tạo số và dạy học trực tuyến [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].

4.4. Đặc tính kỹ thuật

TT	Thông số kỹ thuật	Giá trị
1	Nguồn điện	AC 220V / DC 12V
2	Trọng lượng	90 kg
3	Kích thước mặt sa bàn	2000 × 1200 mm
4	Chiều cao tổng thể	1000 ÷ 1800 mm
5	Góc nghiêng mặt bàn	0 ÷ 80°
6	Số hệ thống mô phỏng	8 hệ thống điện thân xe

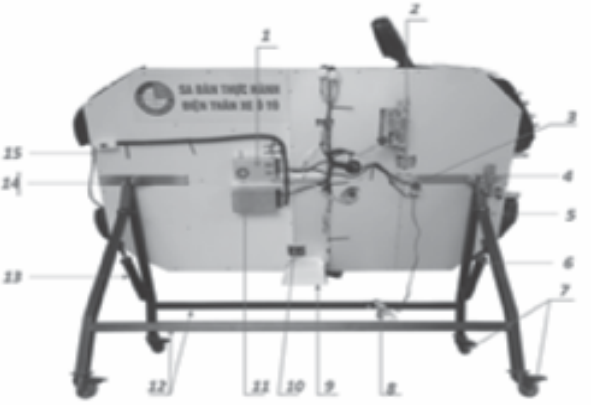
4.5. Cấu trúc tổng quát

Cấu trúc sa bàn mô phỏng nguyên lý hoạt động thực tế của các hệ thống điện thân xe, thiết bị được bố trí đối xứng trái – phải tương tự trên xe thật. Các bộ phận như cụm công tắc, hộp cầu chì, taplo... được chuyển lên mặt sa bàn để thuận tiện quan sát và thực hành [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].



Hình 1. Cấu trúc phía trước sa bàn thực hành điện thân xe ô tô:

1. Cụm đèn chiếu sáng phía trước RH;
2. Màn hình giải trí, radio;
3. Gương chiếu hậu RH;
4. Hộp cầu chì;
5. Cụm công tắc RH;
6. Mô tơ nâng hạ kính RH;
7. Cơ cấu nâng hạ kính RH;
8. Cụm khóa cửa RH;
9. Mạch điện các hệ thống;
10. Cụm đèn chiếu hậu RR;
11. Loa RR;
12. Loa LR;
13. Cụm đèn chiếu hậu LR;
14. Cụm khóa cửa RH;
15. Cơ cấu nâng hạ kính LR;
16. Mô tơ nâng hạ kính LR;
17. Cụm công tắc tổ hợp;
18. Cụm vô lăng;
19. Gương chiếu hậu LR;
20. Taplo;
21. Bánh xe di chuyển;
22. Khung sa bàn;
23. Cụm đèn chiếu sáng phía trước LR;
24. Cơ cấu gạt nước rửa kính;
25. Mã QR trên sa bàn;
26. Công tắc tín hiệu khẩn cấp;
27. Còi điện;
28. Mô tơ gạt nước rửa kính.



1, 11. Bộ chuyển đổi nguồn điện;
2. Bộ điều khiển cơ cấu nâng – hạ;
3. Rơle điều khiển cơ cấu nâng – hạ;
4. Cơ cấu hãm;
5. Khớp quay thay đổi chiều cao;
6, 13. Xilanh giảm chấn;
7. Bán xe di chuyển;
8. Xilanh điện;
9. Bộ tạo pan;
10. Cụm đèn chiếu hậu;
11. Bộ điều khiển hộp tạo pan;
12. Khung, giá;
14. Khớp quay thay đổi độ nghiêng mặt sa bàn.

Hình 2. Cấu trúc phía sau sa bàn thực hành điện thân xe ô tô

5. HƯỚNG DẪN VẬN HÀNH, SỬ DỤNG

+ Đối với Giáo viên [3], [4], [5], [6]:

- Hướng dẫn học sinh tải bài học qua mã QR;

- Tạo pan từ xa qua bộ điều khiển hoặc tạo pan trực tiếp;

- Giới thiệu cấu tạo, nguyên lý, hướng dẫn thao tác kiểm tra và sửa chữa.

+ Đối với người học [3], [4], [5], [6]:

- Tra cứu sơ đồ mạch, đo kiểm tín hiệu điện, phân tích sự cố, thay thế thiết bị, luyện kỹ năng thực hành tổng hợp;

- Thực hiện đúng quy trình, vệ sinh và bảo quản thiết bị sau khi học.

6. KẾT LUẬN

Sa bàn thực hành điện thân xe ô tô là thiết bị dạy học tích hợp có tính sư phạm và công nghệ cao, đáp ứng tốt yêu cầu đào tạo hiện đại. Thiết bị góp phần nâng cao chất lượng giảng dạy, hỗ trợ phương pháp tích hợp, ứng dụng công nghệ số và đào tạo theo năng lực. Mô hình có tiềm năng nhân rộng tại các cơ sở đào tạo nghề [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].

Sản phẩm đã tham gia và đạt Giải Nhất Hội thi Thiết bị đào tạo tự làm tỉnh Quảng Ninh, giải Ba Hội thi Thiết bị đào tạo tự làm toàn quốc và giải Khuyến khích Cuộc thi Sáng tạo kỹ thuật tỉnh Quảng Ninh. ❖



Hình 1. Ảnh nhóm tác giả và Sa bàn thực hành điện thân xe



Hình 2. Đại diện nhóm tác giả nhận Bằng khen của Bộ trưởng Bộ Lao động – Thương binh và Xã hội cho Thiết bị đạt giải tại Hội thi Thiết bị đào tạo tự làm toàn quốc

Ngày nhận bài: **12/11/2025**
Ngày phản biện: **20/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Bộ Lao động – Thương binh và Xã hội. (2017), "*Giáo trình Trang bị điện ô tô*". Tổng cục Giáo dục nghề nghiệp.

[2]. ISO. (2004), "*ISO 7637: Road vehicles — Electrical disturbances from conduction and coupling*". International Organization for Standardization.

[3]. Toyota Motor Corporation (2019), "*Toyota Vios Electrical Wiring Diagram (EWD)*". Toyota Service Information.

[4]. Toyota Motor Corporation (2019), "*Toyota Vios Repair Manual*". Toyota Service Information.

[5]. Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng (2022), "*Hồ sơ thiết kế và chế tạo thiết bị "Sa bàn thực hành điện thân xe ô tô*"".

[6]. Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh (2020), "*Giáo trình sửa chữa hệ thống điện thân xe ô tô*". NXB. Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ HÀN LASER–TIG ĐẾN HÌNH THÁI BỀ MẶT VÀ BIẾN DẠNG LIÊN KẾT HÀN GIÁP MỐI VẬT LIỆU COMPOSITE TRIMETAL HỢP KIM ĐỒNG – THÉP CÁC BON – HỢP KIM ĐỒNG

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LASER-TIG WELDING PARAMETERS ON SURFACE MORPHOLOGY AND DISTROTION OF BUTT JOINTS IN TRIMETAL COPPER ALLOY – CARBON STEEL – COPPER ALLOY COMPOSITES

Nguyễn Văn Mễ[1,3], Đặng Văn An[1], Hà Minh Hùng[1,2,5,*], Nguyễn Hoàng Quân[4]
[1]Viện Nghiên cứu Cơ khí
[2]Trường Đại học Duy Tân
[3]Trường Cao đẳng Công nghiệp Bắc Ninh
[4]Viện Công nghệ Vũ trụ, Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội
[5]Viện Phát triển Kỹ thuật Công nghệ tiên tiến (IDAT)
**Corresponding email: haminhhunggs@gmail.com*

TÓM TẮT

Bài báo này giới thiệu một số kết quả thực nghiệm khảo sát thăm dò sự ảnh hưởng của công suất laser (P, kW), tốc độ hàn (v_h, cm/ph), số lớp hàn (n) và hệ số quét chùm tia laser (C_q, %) trên hệ thống thiết bị SMATS 5Z-200 đến hình thái bề mặt và biến dạng liên kết hàn giáp mối từ hai phôi hàn dạng tấm mỏng. Phôi hàn lựa chọn là vật liệu composite Trimetal hợp kim đồng – thép các bon – hợp kim đồng được chế tạo bằng công nghệ luyện kim bột. Kết quả cho thấy tiêu chí hình thái bề mặt mối hàn phản ánh sơ bộ mức độ điền đầy và trạng thái của các lớp hàn dọc theo đường hàn, có quy luật giảm tỷ lệ nghịch so với chiều tăng của tốc độ hàn. Khi công suất laser tăng, tiêu chí đó lại có xu hướng tăng tỷ lệ thuận và ảnh hưởng mạnh đến chất lượng hàn. Theo đó, có thể đưa ra lựa chọn bộ thông số công nghệ hàn L-TIG cần khảo sát hợp lý hơn để áp dụng cho bước thí nghiệm tiếp theo với ma trận thực nghiệm trực giao N27 nhằm mục tiêu xây dựng mô hình toán học dự báo chất lượng mối hàn Laser-TIG tối ưu.

Từ khóa: *Hàn Laser-TIG; Vật liệu composite dạng lớp (trimetal, bimetal).*

ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation into the effects of laser power (P, kW), welding speed (v_h, cm/min), number of welded alloy (n), and beam scanning coefficient (C_q, %) on the surface morphology and characteristical deformation of butt-welded thin Trimetal sheets, utilizing the SMATS 5Z-200 system. The Trimetal composite, composed of copper alloy – carbon steel – copper alloy, was produced via powder metallurgy. The study reveals that the weld surface morphology, representing the filling adequacy and the state of weld layers along the joint, exhibits ☞

an inverse relationship with welding speed. In contrast, an increase in laser power leads to a proportionalrise in this criterion and strongly influences overall weld quality. Based on these findings help define an appropriate set of L-TIG welding parameters for further investigation using an N27 orthogonal experimental design, with the objective of developing a mathematical model for predicting optimal Laser-TIG weld integrity.

Keywords: *Laser-TIG welding; Laminated composite materials (trimetal, bimetal).*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chế tạo cặp đôi ma sát gồm đĩa ma sát từ vật liệu composite Trimetal hợp kim đồng – thép các bon – hợp kim đồng và chi tiết đối ứng bằng thép các bon, thép hợp kim trong bộ ly hợp truyền động cơ khí là những sản phẩm đặc thù có kích thước hình học với đường kính làm việc tiếp xúc ma sát và chiều dày khác nhau, phù hợp với gam công suất truyền động cơ khí có tải trọng khác nhau [1].

Hợp kim ma sát trong các lớp cấu thành vật liệu composite trimetal hoặc composite đơn kim thường chế tạo bằng công nghệ luyện kim bột có đặc tính cơ lý và kim tương học vượt trội hơn so với các hợp kim đúc cán truyền thống [3], [4], [5], [6].

Tuy nhiên, với năng lực thiết bị luyện kim bột hiện có tại Việt Nam hiện nay chưa được đầu tư đúng mức để có thể chế tạo được phôi vật liệu composite các loại với kích thước hình học đáp ứng yêu cầu chế tạo một số chi tiết ly hợp có kích thước lớn. Vì vậy, gần đây nhóm nghiên cứu dưới sự chủ trì của PGS,TS. Hà Minh Hùng tại Viện Nghiên cứu Cơ khí (Bộ Công Thương) và Viện IDAT đã tiến hành một số thí nghiệm thăm dò ứng dụng công nghệ hàn tiên tiến để tạo phôi gia công chi tiết đĩa ly hợp và đĩa thép đối ứng bước đầu có kết quả rất khả quan đã được công bố trên Tạp chí Cơ khí Việt Nam và Hội thảo quốc tế ICERA-2024 [7], [8], [9], [10].

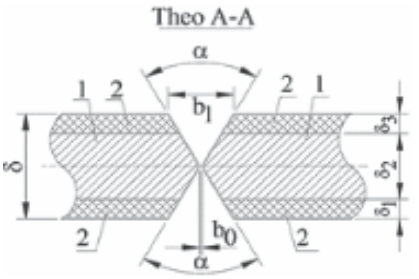
Một trong số các công nghệ hàn tiên tiến đã thử nghiệm trong điều kiện Việt Nam bởi tác giả các công trình nói trên là công nghệ lai ghép hàn bằng năng lượng laser (gọi tắt là hàn Laser) với hàn TIG, sau đây viết tắt là hàn L-TIG. Với đặc thù quá trình hàn liên kết giáp mối hai tấm phôi vật liệu thép các bon và thép hợp kim tấm mỏng với chiều dày 3 ÷ 5 mm dùng cho đĩa thép đối ứng, cũng như vật liệu composite trimetal hợp kim đồng – thép các bon – hợp kim đồng với chiều dày 3 lớp (1.5 ÷ 2.2) + (3.0 ÷ 5.0) + (1.5 ÷ 2.2) mm dùng cho đĩa ma sát cần khảo sát một số yếu tố công nghệ chủ yếu có ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng kết cấu hàn, đáp ứng được độ bền cơ học cao đồng thời với biến dạng của nó giảm thiểu xuống mức nhỏ nhất, là bài toán khá phức tạp. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu đề cập đến vấn đề các yếu tố công nghệ đầu vào khảo sát có mức độ ảnh hưởng như thế nào đến một trong các tiêu chí khá quan trọng khi đánh giá chất lượng mối hàn L-TIG là chỉ tiêu ngoại dạng, tức là các hiện tượng thay đổi hình thái bề mặt mối hàn, tùy thuộc vào mức lựa chọn ban đầu của hai thông số công nghệ chính gồm: công suất laser (P, W) và tốc độ hàn (v_h, cm/ph). Các yếu tố khác được cố định ở mức khuyến cáo của nhà cung cấp thiết bị hàn Laser và có điều chỉnh tùy theo tình thực tế khi hàn thử tại một doanh nghiệp sản xuất cơ khí phục vụ xuất khẩu ở Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

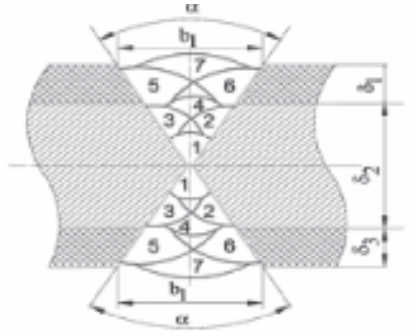
Kết cấu mối hàn L-TIG: Hàn liên kết

giáp mối 2 mảnh ghép vật liệu composite trimetal hợp kim đồng - thép các bon - hợp kim đồng ở vị trí hàn bằng. Lớp hợp kim đồng luyện kim bột có ký hiệu BCu6Sn6Pb3Zn2C$_{gr}$2Al$_2$O$_3$ với chiều dày 3 lớp $\delta_\Sigma = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = (1.5 + 5.0 + 1.5)$ mm và chiều rộng $(B_1 + B_2) \times$ chiều dài (L) = 100 ÷ 200 mm [8-10]. Hai lớp hợp kim đồng đều được vát mép với góc vát tổng cộng $\alpha = 15 \div 45°$. Khe hở hàn giữa 2 đầu lớp thép các bon chọn trong khoảng $b_0 = 0.1 \div 0.5$ mm (hình 1). Dây bù sử dụng gồm hai loại là thép các bon GM70S và thép hợp kim SUS 316L với đường kính $d_b = 1.0 \div 1.2$ mm.

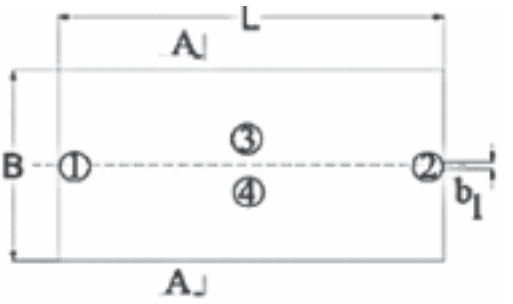
Trên hình 1 là sơ đồ kết cấu mối hàn L-TIG, ảnh các mảnh ghép bằng vật liệu composite trimetal hợp kim đồng – thép các bon – hợp kim đồng dùng cho thí nghiệm. Hình 2 a÷e tiếp theo là ảnh chụp tổng quát hệ thống máy hàn laser tự động SMATS 5Z-200 sử dụng cho hàn thử nghiệm tại một doanh nghiệp sản xuất cơ khí xuất khẩu hiện có ở Việt Nam.



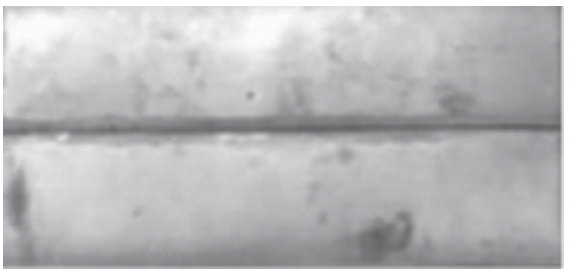
a) 1 - Lớp hợp kim đồng, 2 - Lớp thép các bon



b) Quy ước số lớp hàn n = 1, 2, 3, ...,7 theo một phía bề mặt phôi hàn chữ "X"

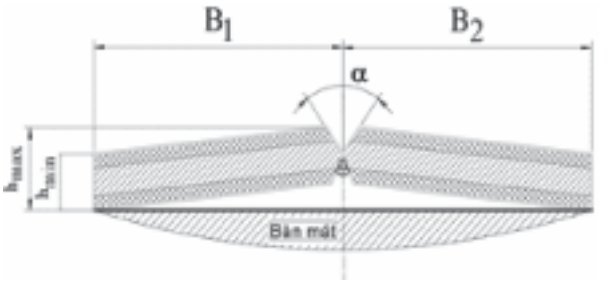


c) 1, 2, 3, 4 – Vị trí đặt cảm ứng T °C phôi hàn



d)

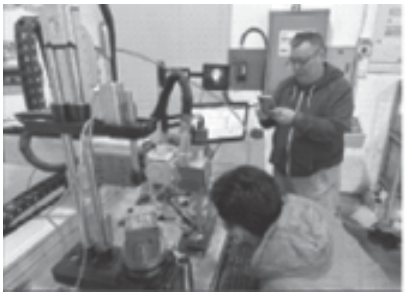
Hình 1. Sơ đồ nguyên lý kết cấu "X" theo mặt cắt ngang mối hàn L-TIG (a), quy định các lớp hàn kế tiếp nhau (b), ký hiệu vị trí đo nhiệt độ phôi hàn (c) và ảnh phôi hàn (d) sử dụng cho thí nghiệm



a)



b)



c)



d)

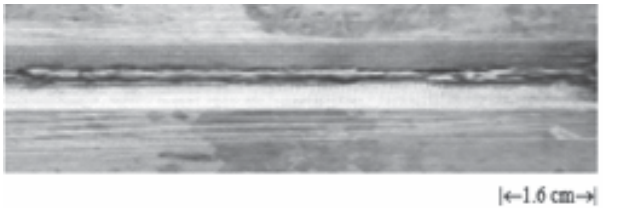


e)

Hình 2. Sơ đồ nguyên lý đo biến dạng kết cấu hàn (a), hệ thống máy hàn laser tự động SMATS 5Z-200 (b), hình ảnh một vài thời điểm trong quá trình hàn thử nghiệm L-TIG vật liệu composite trimetal hợp kim đồng - thép các bon - hợp kim đồng tại doanh nghiệp sản xuất cơ khí ở Việt Nam (c, d, e)



a) Mẫu Test 1, hàn 1 lớp



b) Mẫu Test 2, hàn 1 lớp

Hình 3. Ảnh hình thái bề mặt đường liên kết hàn L-TIG trên mẫu thử test hệ thống máy hàn laser tự động SMATS 5Z-200: α = 30°, b_0 = 0.1 mm, P = 1.4 kW, v_h = 20 cm/ph, d_{las} = 1.0 mm, C_p = 0

Chất lượng liên kết hàn giáp mối vật liệu thép và hợp kim nhận được bằng các công nghệ hàn khác nhau, trong đó có hàn L-TIG trên hệ thống thiết bị hàn SMATS 5Z-200 có công suất dòng laser đến 2.0 kW, điều khiển tự động quá trình hàn và có màn hình hiển thị giám sát trực tuyến bể hàn theo thời gian thực, thường được đánh giá thông qua một số tiêu chí cơ bản gồm: hình thái bề mặt, độ bền kéo, độ cứng, độ dai va đập, tổ chức thô đại và tổ chức tế vi của mối hàn và phụ thuộc vào chế độ hàn khác nhau. Trong bài báo này chỉ đề cập đến mức độ ảnh hưởng của công suất laser (P), tốc độ hàn (v_h) và biến dạng kết cấu hàn (f_{max}) với các yếu tố đầu vào khác như: đường kính chùm tia laser (d_{las}), tỷ lệ che phủ khi quét laser (C_q), có hoặc không có cấp dây bù, tốc độ cấp dây bù (v_{db}), lưu lượng cấp khí bảo vệ (G), … chọn ở mức cố định theo chỉ dẫn của nhà sản xuất thiết bị hàn và kinh nghiệm thực tiễn của người vận hành tại doanh nghiệp.

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ BÀN LUẬN

3.1. Đánh giá chất lượng bề mặt mối hàn L-TIG

Về nguyên lý, việc phân tích ảnh hưởng độc lập, cũng như tương tác cặp đôi của hai thông số công nghệ hàn L-TIG chủ yếu gồm: công suất laser (P) và tốc độ hàn (v_h) đến chất

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

lượng hàn thông qua tiêu chí hình thái bề mặt và biến dạng cong vênh (f_{max}) của liên kết hàn. Với điều kiện thí nghiệm và tham khảo thêm kinh nghiệm trên thực tế sản xuất của chuyên gia vận hành thiết bị hàn laser tại doanh nghiệp, chọn một số chế độ hàn L-TIG thử nghiệm điển hình như bảng 1 dưới đây. Ở đây: dây bù SUS316L có đường kính d_b = 1.2 mm và được sử dụng cho các mẫu thí nghiệm số 2, 3, 4 và mẫu Test 2; Lưu lượng cấp khí bảo vệ G = 3.5 ÷ 4.5 l/ph.

Bảng 1. Điều kiện hàn L-TIG thử nghiệm thăm dò định hướng công nghệ

Số TN	Ký hiệu mẫu	Thông số công nghệ hàn thử nghiệm cần khảo sát							Chất lượng liên kết hàn		
		P, W	v_h, cm/ph	v_{cd}/v_h	C_p, %	Số lớp hàn	d_{las}, mm	Có/ không dây bù	Đạt / Không	Ảnh bề mặt mối hàn	Biến dạng theo phương ngang, f_{max}
1	Test 1	1.4	20.0	1.2	0	1	0.8	Có	Không	Hình 3 a	0.020/50 mm
	Test 2	1.4	20.0	1.2	0	1	1.0	Có	Không	Hình 3 b	0.025/50 mm
2	2-1	1.4	20.0	1.3	0	1	1.0	Không	Đạt	Hình 4a	0.020/50 mm
	2-2	1.5	20.0	1.3	30	2	1.0	Có	Đạt	Hình 4 b	0.045/50 mm
	2-3	1.5	20.0	1.3	30	3	1.0	Có	Đạt	Hình 4 c	0.110/50 mm
	2-4	1.6	25.2	1.4	0	1	1.0	Không	Đạt	Hình 4 d	0.050/50 mm
	2-5	1.6	25.2	1.4	30	2	1.0	Có	Đạt	Hình 4 e	0.105/50 mm
3	3-1	1.4	25.2	1.3	40	1	1.0	Không	Đạt	Hình 5 a	0.035/50 mm
	3-2	1.4	25.2	1.3	40	2	1.0	Có	Đạt	Hình 5 b	0.075/50 mm
	3-3	1.6	25.2	1.4	40	1	1.0	Không	Đạt	Hình 5 c	0.065/50 mm
	3-4	1.6	25.2	1.4	40	2	1.0	Có	Đạt	Hình 5 d	0.130/50 mm
4	4-1	1.6	25.2	1.3	50	1	1.0	Không	Đạt	Hình 6 a	0.055/50 mm
	4-2	1.6	25.2	1.3	50	2	1.0	Có	Đạt	Hình 6 b	0.120/50 mm
	4-3	1.8	25.2	1.5	50	1	1.5	Không	Đạt	Hình 6 c	0.075/50 mm
	4-4	1.8	25.2	1.5	50	2	1.5	Có	Đạt	Hình 6 d	0.155/50 mm

Ghi chú: Mác dây bù: GM70S (mẫu Test 1) và SUS 316L (các mẫu còn lại); biến dạng theo phương ngang đường liên kết hàn (f_{max}) tính trung bình trên 04 điểm đo quy ước từ mép ngoài vào cạnh mép vát mối hàn ☞

Từ các số liệu thống kê thực nghiệm trong bảng 1, ta có một số nhận xét như sau:

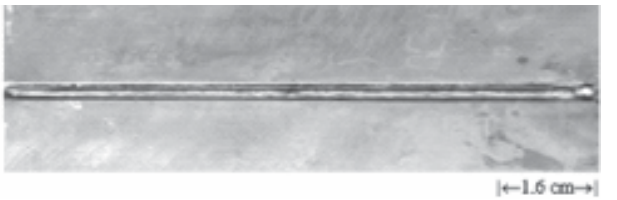
1) Trong thí nghiệm có số thứ tự 1 (hình 3) gồm có: mẫu Test 1 sử dụng dây bù là thép các bon GM70S và mẫu Test 2 sử dụng dây bù là thép hợp kim SUS 316L nhận được cho thấy về cơ bản đã có sự hình thành liên kết kim loại giữa hai mặt đầu giáp mối liên kết hàn ngay trong lớp hàn thứ nhất (hình 3). Tuy nhiên, mẫu Test 1 sau khi làm nguội trong môi trường không khí thì phát hiện thấy có nứt hai bên mép lớp hàn với phần kim loại cơ bản (lớp thép các bon của hai tấm vật liệu composite trimetal). Trong khi đó, sau khi làm nguội mẫu Test 2 thì không xuất hiện các vết nứt tương tự như mẫu Test 1. Điều đó chứng tỏ vật liệu dây bù bằng thép hợp kim SUS 316L có tính hàn tốt hơn hẳn so với dây bù GM70S. Kết quả thực nghiệm này dẫn đến các thí nghiệm số 2, 3 và 4 tiếp theo chọn phương án cấp dây bù là thép hợp kim SUS 316L.

2) Mẫu thí nghiệm số 2 (hình 4) gồm có 5 chế độ hàn được chọn với công suất laser ở các mức P = 1.4; 1.5; 1.6 kW, tốc độ hàn v_h = 20.0; 25.2 cm/ph và tỷ số tốc độ cấp dây bù so với tốc độ hàn v_{cd}/v_h = 1.3; 1.4. Tùy thuộc vào điều kiện biên gồm hệ số che phủ C_q = 0 % hoặc 30 %, cùng với số lớp hàn bằng 1; 2 và 3 lớp, đánh giá hình thái bề mặt đường liên kết hàn nhận được cho thấy có đặc điểm:

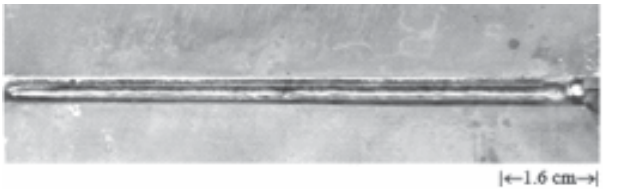
- Đã hình thành được liên kết hàn dọc theo chiều dài mẫu khảo sát ở tất cả 5 chế độ thử nghiệm liên tục và có tính tương đối ổn định (hình 4 a →e);

- Cùng với chiều tăng của công suất laser, chiều rộng đường liên kết hàn tăng tỷ lệ thuận với công suất laser một cách rõ nét (hình 4 a, b, c). Tuy nhiên, cùng với chiều tăng của tốc độ hàn, chiều rộng liên kết hàn lại có xu hướng tăng nhẹ với cường độ nhỏ hơn (hình 4 b, d, e);

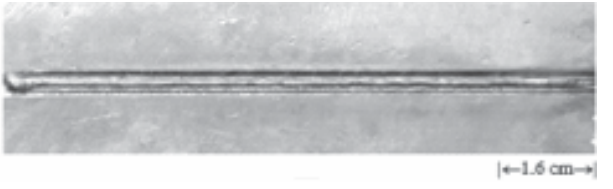
- Cùng với chiều tăng của số lớp hàn với độ che phủ C_q = 30% giữa hai và ba lớp hàn, chiều rộng đường liên kết hàn tăng tỷ lệ thuận một cách rõ nét (hình 4 a, b, c và hình 4 d, e). Chiều rộng liên kết hàn trên mẫu 2-1 và 2-5, mặc dù chỉ hàn 1 và 2 lớp tương ứng, nhưng với công suất laser được điều chỉnh tăng (từ P = 1.3 kW lên P = 1.4 kW) nên có xu hướng đạt kích thước tương đương so với khi hàn 3 lớp.



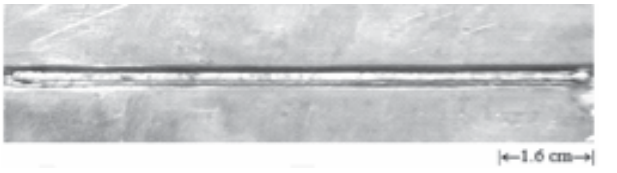
a) Mẫu 2-1, α = 30°, b_0 = 0.1 mm, hàn 1 lớp, C_p = 30%, P = 1.4 kW, v_h = 20 cm/ph



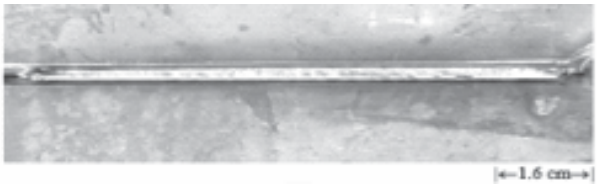
b) Mẫu 2-2, α = 30°, b_0 = 0.1 mm, hàn 2 lớp, C_p = 30%, P = 1.5 kW, v_h = 20 cm/ph



c) Mẫu 2-3, α = 30°, b_0 = 0.1 mm, hàn 3 lớp, C_p = 30%, P = 1.6 kW, v_h = 25.2 cm/ph



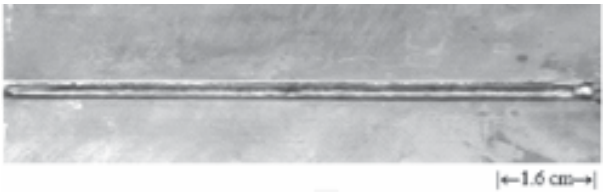
d) Mẫu 2-4, α = 30°, b_0 = 0.1 mm, hàn 1 lớp, C_p = 30%, P = 1.6 kW, v_h = 25.2 cm/ph



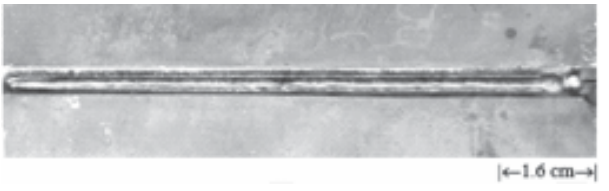
e) Mẫu 2-5, α = 30°, b_0 = 0.1 mm, hàn 2 lớp, C_p = 30%, P = 1.6 kW, v_h = 25.2 cm/ph

Hình 4. Ảnh hình thái bề mặt đường liên kết hàn L-TIG mẫu thí nghiệm số 2 trên hệ thống máy hàn laser tự động SMATS 5Z-200 ở các chế độ hàn mức công suất thấp và trung bình

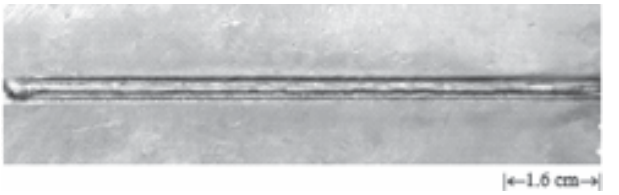
3) Mẫu thí nghiệm số 3 (hình 5): Nhận được khi hàn ở hai mức công suất laser P = 1.4 kW và P = 1.6 kW, độ che phủ tăng lên mức C_q = 40%, còn tốc độ hàn cố định ở một mức v_h = 25.2 cm/ph. Kết quả thực nghiệm cho trên hình 5 a÷d cho thấy chất lượng bề mặt liên kết hàn nhận được với các điều kiện biên trong bảng 1 đều đạt yêu cầu: hình thái bề mặt dọc và ngang liên kết hàn khá đều và kim loại hàn kết tinh lại khá ổn định. Trong trường hợp này, chiều rộng mối hàn tăng tỷ lệ thuận theo chiều tăng của công suất laser (P) và giảm theo chiều tăng của (C_q) so với mẫu số 2 đã xét ở phần trên.



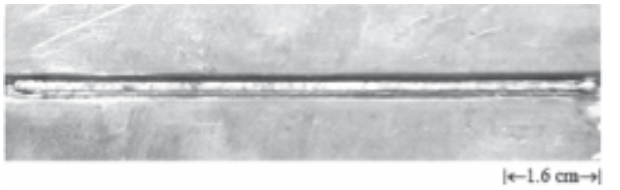
a) Mẫu 3-1, α = 30°, b_0 = 0.3 mm, hàn 1 lớp, C_p = 40%, P = 1.4 kW, v_h = 25.2 cm/ph



b) Mẫu 3-2, α = 30°, b_0 = 0.3 mm, hàn 2 lớp, C_p = 40%, P = 1.4 kW, v_h = 25.2 cm/ph



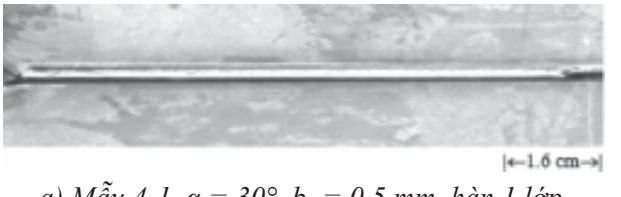
c) Mẫu 3-3, α = 40°, b_0 = 0.3 mm, hàn 1 lớp, C_p = 40%, P = 1.6 kW, v_h = 25.2 cm/ph



d) Mẫu 3-4, α = 40°, b_0 = 0.3 mm, hàn 2 lớp, C_p = 40%, P = 1.6 k W, v_h = 25.2 cm/ph

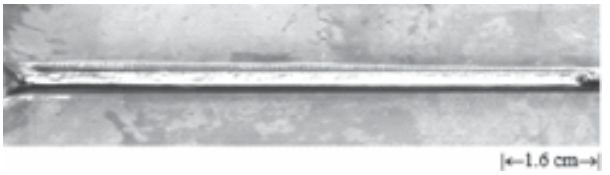
Hình 5. Ảnh hình thái bề mặt đường liên kết hàn L-TIG mẫu thí nghiệm số 5 trên hệ thống máy hàn laser tự động SMATS 5Z-200 ở các chế độ hàn mức công suất thấp và trung bình

4) Mẫu thí nghiệm số 4 (hình 6): Nhận được khi hàn ở hai mức công suất laser P = 1.6 kW và P = 1.8 kW, độ che phủ tiếp tục tăng lên mức C_q = 50%, còn tốc độ hàn cố định ở một mức v_h = 25.2 cm/ph. Kết quả thực nghiệm cho trên hình 6 (a ÷ d) cho thấy chất lượng bề mặt liên kết hàn nhận được với các điều kiện biên trong bảng 1 đều đạt yêu cầu: hình thái bề mặt dọc và ngang liên kết hàn khá đều và kim loại hàn kết tinh lại khá ổn định. Chiều rộng mối hàn tăng tỷ lệ thuận theo chiều tăng của công suất laser (P) và giảm theo chiều tăng của (C_q) với quy luật tương tự như đối với mẫu số 2 và mẫu số 3 đã xét trên đây.

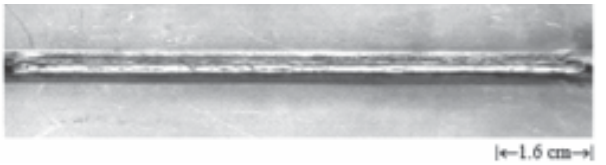


a) Mẫu 4-1, α = 30°, b_0 = 0.5 mm, hàn 1 lớp, C_p = 50%, P = 1.4 kW, v_h = 25.2 cm/ph

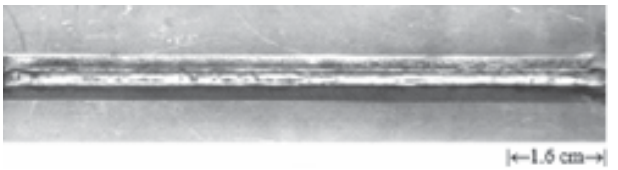
☞



b) Mẫu 4-2, α = 30°, b_0 = 0.5 mm, hàn 2 lớp, C_p = 50%, P = 1.4 kW, v_h = 25.2 cm/ph



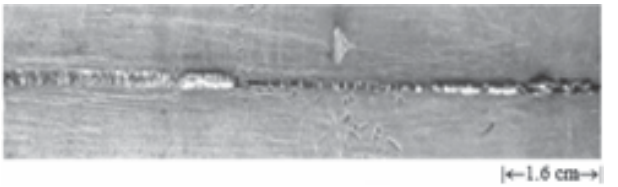
c) Mẫu 4-3, α = 30°, b_0 = 0.5 mm, hàn 1 lớp, C_p = 50%, P = 1.8 kW, v_h = 25.2 cm/ph



d) Mẫu 4-4, α = 30°, b_0 = 0.5 mm, hàn 2 lớp, C_p = 50%, P = 1.8 kW, v_h = 25.2 cm/ph

Hình 6. Ảnh hình thái bề mặt đường liên kết hàn L-TIG mẫu thí nghiệm số 8 trên hệ thống máy hàn laser tự động SMATS 5Z-200 ở các chế độ hàn mức công suất cao

5) Mẫu so sánh đối chứng thử nghiệm hàn tay số 5 (hình 7): Phân tích kết quả trên hình 7 dưới đây cho thấy, chất lượng liên kết hàn trong trường hợp này chưa đạt yêu cầu, vì đường hàn có nhiều đoạn mấp mô, cong lượn không có quy luật theo chiều dọc và chiều ngang và không đồng trục thẳng hàng với đường tâm liên kết phôi hàn. Như vậy, ảnh chụp hình thái bề mặt đường liên kết hàn khi sử dụng máy hàn laser bằng thủ công là minh chứng xác đáng cho việc khi sử dụng hệ thống máy hàn laser tự động SMATS 5Z-200 để làm thí nghiệm luôn đảm bảo nhận được mối hàn L-TIG có chất lượng bề mặt cao và ổn định.



a) Mẫu hàn 1 lớp, α = 10°, b_0 = 0.1 mm, P = 1.3kW, $v_h \approx$ 10.0 cm/ph, C_q = 0 %



b) Mẫu hàn 3 lớp, α = 10°, b_0 = 0.1 mm, P = 1.5 kW, $v_h \approx$ 10.0 cm/ph, C_q = 30 %

Hình 7. Mẫu hàn thử L-TIG bằng máy hàn laser cầm tay với dây bù thép SUS 316L đường kính 1.0 mm

3.2. Biến dạng kết cấu mối hàn L-TIG

Một tiêu chí quan trọng trong bộ chỉ tiêu đánh giá chất lượng mối hàn nói chung và mối hàn L-TIG là biến dạng kết cấu hàn lớn nhất (f_{max}, mm) ở trạng thái sau khi làm nguội tự nhiên trong môi trường không khí tĩnh lặng. Sơ đồ nguyên lý đo f_{max} cho trên hình 8 và tính theo công thức (1) và (2) dưới đây. Theo đó, ta có biến dạng kết cấu lớn nhất của mối hàn L-TIG (f_{max}) được tính trung bình bằng hiệu số giữa chiều cao lớn nhất (h_{max}) và nhỏ nhất (h_{min}).

$$f_{max} = h_{max} - h_{min} \quad (1)$$

$$h_{min} = \delta_{\Sigma} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \quad (2)$$

Trong đó: f_{max} – Biến dạng trung bình lớn nhất của mối hàn; h_{max} – Chiều cao trung bình đo được tại 4 điểm cao nhất theo bề mặt trên của mẫu khảo sát; δ_{Σ} – Chiều dày tổng cộng 3 lớp vật liệu composite trimetal; δ_1 và δ_3 – Chiều dày của hai lớp hợp kim đồng; δ_2 – Chiều dày của lớp thép cac bon.

Để đảm bảo sai số đo nhỏ nhất, sử dụng gá kẹp chuyên dụng để kẹp chặt mẫu sau khi hàn và làm nguội lên bàn mát sao cho 4 góc của mẫu tiếp xúc trực tiếp với bề mặt bàn mát, đồng thời có thể di chuyển đầu đo theo phương Z (chiều cao so với mặt chuẩn "0") tại 4 góc và 4 điểm gần mép vát mối hàn.

Số liệu thí nghiệm đo biến dạng trung bình (f_{max}) theo phương ngang đường hàn L-TIG tại các lớp đo tương ứng n = 1, 2, 3 trong bảng 1 cho thấy:

- Nếu khảo sát trên 50 mm chiều rộng mỗi bên phôi hàn thì f_{max} có xu hướng tăng tỷ lệ thuận theo chiều tăng của công suất laser trong khoảng P = 1.2 ÷ 1.8 kW, đạt giá trị trung bình tương ứng là f_{max} = 0.02 ÷ 0.075 mm (khi hàn 1 lớp) lên đến f_{max} = 0.045 ÷ 0.155 mm (khi hàn 2 lớp);

- Trên mẫu thí nghiệm số 2-3 với chế độ hàn với P = 1.5 kW, v_h = 20 cm/ph, C_q = 30 %, n = 3 lớp, d_{las} = 1.0 mm và có dây bù, ta nhận được f_{max} = 0.11 mm, tăng đáng kể so với khi hàn 1 lớp (f_{max} = 0.02 mm) và 2 lớp (f_{max} = 0.045 mm) trước đó. Khi hoàn thành các lớp hàn cần thiết cả hai mặt bên phôi hàn hai mảnh ghép vật liệu composite trimetal hợp kim đồng - thép các bon - hợp kim đồng chắc là sẽ có hiện tượng biến dạng ngược chiều với biến dạng khi hàn một phía. Việc này nhóm nghiên cứu đang tiến hành và kết quả như thế nào sẽ công bố trong thời gian tới.

- Ảnh hưởng của hai thông số công nghệ hàn L-TIG (P và n) đến lượng biến dạng (f_{max}) của kết cấu hàn khá mạnh, còn các thông số khác như v_h, C_q và d_{las} chưa được đánh giá một cách rõ nét. Để giải quyết vấn đề này, nhóm nghiên cứu hiện đang tiến hành phân tích nhờ trợ giúp của phần mềm tin học ANOVA với số lượng thí nghiệm với các mức điều chỉnh v_h, C_q và d_{las} lớn hơn so với phạm vi khảo sát trong công trình này.

Như vậy, đã có định hướng khắc phục những hạn chế nêu trên, kết quả như thế nào sẽ được nhóm nghiên cứu công bố trong một vài bài báo khác tiếp theo.

4. KẾT LUẬN

1) Sử dụng hệ thống thiết bị hàn laser tự động SMATS 5Z-200 cho phép nhận được liên kết hàn giáp mối L-TIG hai tấm vật liệu composite trimetal hợp kim đồng – thép các bon – hợp kim đồng đạt chất lượng bề mặt tốt, đồng thời đảm bảo giá trị biến dạng kết cấu hàn nhỏ. Mối hàn L-TIG nhận được khi hàn tự động có ảnh chụp hình thái bề mặt và kích thước hình học tốt hơn hẳn so với mẫu hàn thử nghiệm trên máy hàn laser di động (máy hàn cầm tay). Khi sử dụng dây bù là thép SUS 316, mối hàn L-TIG không có hiện tượng nứt tế vi dọc hai mép bên theo đường hàn, còn khi sử dụng dây bù là thép các bon GM70S thì đa số các mẫu hàn ngay từ lớp thứ nhất đã phát hiện thấy có khuyết tật mối hàn dạng nứt tế vi;

2) Kết quả khảo sát đánh giá trên một số mẫu thí nghiệm định hướng công nghệ với các mức lựa chọn thông số đầu vào chủ yếu được cài đặt vào chương trình máy tính điều khiển quá trình hàn gồm: công suất laser (P), đường kính laser (d_{las}), tốc độ hàn (v_h), số lớp quét chùm tia laser (n) và hệ số che giữa các lớp hàn (C_q) cho thấy quy luật ảnh hưởng của chúng đến hai tiêu chí cơ bản khi đánh giá ngoại dạng mối hàn L-TIG là: tính ổn định của hình thái bề mặt theo đường liên kết hàn và chiều rộng mối hàn có xu hướng tăng tỷ lệ thuận theo chiều tăng của P và n, còn khi v_h và C_q tăng thì đặc tính chất lượng hàn này có xu hướng ngược lại – giảm tỷ lệ nghịch theo chiều tăng của hai thông số cuối; ☞

3) Đã đánh giá sơ bộ được ảnh hưởng của chế độ hàn đến biến dạng trung bình lớn nhất của kết cấu hàn L-TIG liên kết giáp mối vật liệu composite trimetal hợp kim đồng - thép các bon - hợp kim đồng (f_{max}) ở trạng thái ngay sau khi hàn một phía từ 1 đến 3 lớp, đạt giá trị trung bình trong khoảng f_{max} = 0.02 ÷ 0.155 mm, tính trên chiều dài đoạn khảo sát theo chiều rộng phôi hàn mỗi bên là 50 mm;

4) Kết quả hàn thử nghiệm trên đây là cơ sở khoa học đáng tin cậy, cho phép định hướng và đưa ra lựa chọn miền điều chỉnh các thông số công nghệ hàn L-TIG khi xây dựng ma trận thực nghiệm theo quy hoạch trực giao N27 cho bước thí nghiệm tiếp theo của nhóm nghiên cứu phù hợp hơn với hệ thống thiết bị hàn laser tự động SMATS 5Z-200 hiện có trên thực tế tại doanh nghiệp sản xuất cơ khí ở Việt Nam.❖

Ngày nhận bài: **29/10/2025**
Ngày phản biện: **10/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Hà Minh Hùng (2013), "*Nghiên cứu công nghệ chế tạo vật liệu hợp kim 3 lớp (trimetal) ứng dụng làm đĩa ma sát của bộ ly hợp động cơ máy động lực, máy công trình và phương tiện vận tải*". Báo cáo tổng kết KHKT đề tài NCKH cấp Bộ Công Thương năm 2013, Viện Nghiên cứu Cơ khí, Hà Nội.

[2]. Hà Minh Hùng (2014), "*Nghiên cứu công nghệ chế tạo vật liệu tổ hợp (composite) kim loại chịu nhiệt và chịu mòn cao ứng dụng làm phanh tàu vận tải đường sắt*". Báo cáo tổng kết KHKT đề tài NCKH cấp Bộ Công Thương năm 2013, Viện Nghiên cứu Cơ khí, Hà Nội.

[3]. Nguyễn Văn Giáp, Vũ Lai Hoàng, Hoàng Ánh Quang, Nguyễn Hà Tuấn, Hà Minh Hùng (2016), "*Nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ sắt đến hệ số ma sát của vật liệu ma sát thiêu kết trên cơ sở đồng tạo hình bằng ép nóng*". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 6/2016, trang 68-73.

[4]. Ha Minh Hung, Doan Dinh Phuong (2016), "*Experimental research for tribology properties of friction materials with iron foundation being sintered and hot-pressed for application of making brake pads of train in railway transportation*". Kỷ yếu Hội thảo quốc tế về "*Công nghệ vật liệu tiên tiến và nanô*", Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam, 8-12/11/2016, Hạ Long, Code: NMD-P71.

[5]. Ha Minh Hung, Doan Dinh Phuong (2016), "*A research of powder metallurgy technology for manufacturing friction materials with iron powder foundation in Vietnam*". Kỷ yếu Hội thảo quốc tế về "*Công nghệ vật liệu tiên tiến và nanô*", Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam, 8-12/11/2016, Hạ Long, Code: NMD-P72.

[6]. Ha Minh Hung, Pham Duc Thang (2016), "*Experimental research for powder metallurgy technology making copper alloy friction materials for application of making clutch disks of cars*". Kỷ yếu Hội thảo quốc tế về "*Công nghệ vật liệu tiên tiến và nanô*", Viện Hàn Lâm KH&CN Việt Nam, 8-12/11/2016, Hạ Long, Code: NMD-P73.

[7]. Hung Ha Minh, Me Nguyen Van, Hung Nguyen Van, Huy Trieu Quy, Quan Nguyen Hoang, Mac Dinh Khac (2023), "*Study of Mechanical - Physical and Metallographic Characteristics Composite Materials of Copper Friction Alloy - Steel - Copper Friction Alloy Powder Metallurgy*". Vietnam Mechanical Engineering Journal, no. 310, pp.101-110.

[8]. Nguyen Van Me, Ha Minh Hung, Nguyen Hoang Quan, Ngo Trong Binh, Đinh Khac Mac (2024), "*Experimental Study on MAG Welding of Powder Metallurgy Composite Trimetal Copper Alloy - Carbon Steel - Copper Alloy*". Vietnam Mechanical Engineering Journal, no.316, pp.244-253.

[9]. Nguyen Van Me, Ha Minh Hung, Nguyen Hoang Quan, Ngo Trong Binh, Đinh Khac Mac (2024), "*A Research on Deformation and Metallographic Characteristic of TIG Welds Composite Trimetal Copper Alloy - Carbon Steel - Copper Alloy made by of Powder Metallurgy*". Vietnam Mechanical Engineering Journal, no.316, pp.280-288.

[10]. Hung Ha Minh, Me Nguyen Van, Quy Le Thu, Tuyen Vu Trung, Binh Trong Ngo, Quan Nguyen Hoang (2024), "*A Research on Metallographic Characteristic of Laser - TIG Welds Composite Trimetal Copper Alloy - Carbon Steel - Copper Alloy made by Powder Metallurgy*". Journal Springer: Advances in Engineering Research and Application (Online), Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Application, ICERA2024, 1-2, December, 2024.

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CỦA THUẬT TOÁN HAAR CASCADE AND LOCAL BINARY PATTERNS HISTOGRAM ĐỂ MỞ KHÓA Ô TÔ

RESEARCH ON EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE HAAR CASCADE AND LOCAL BINARY PATTERNS HISTOGRAM ALGORITHMS FOR CAR UNLOCKING

Nguyễn Thế Lương[1,*], Vũ Công Giang[1], Phạm Tuấn Dũng[1], Đinh Ngọc Mạnh[1], Mạc Văn Huy[1], Nguyễn Thế Hùng[2]

[1]Đại học Bách khoa Hà Nội

[2]Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội

**Email: luong.nguyenthe@hust.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu ứng dụng công nghệ nhận diện khuôn mặt sử dụng thuật toán Haar Cascade để phát hiện khuôn mặt và LBPH (Local Binary Patterns Histogram) để nhận diện khuôn mặt, tích hợp trong hệ thống điều khiển khóa cửa trên cánh xe ô tô Hyundai Vios. Thí nghiệm được tiến hành trên 10 người tham gia, mỗi người thực hiện nhận diện 50 lần, nhằm đánh giá độ chính xác của hệ thống. Kết quả cho thấy độ chính xác trung bình dao động từ 55,5% đến 56,2% đối với các cá nhân có trong dữ liệu nhận dạng và 32% đến 34,4% đối với các cá nhân không có trong dữ liệu nhận dạng. Các thí nghiệm bổ sung về ảnh hưởng của khoảng cách và điều kiện ánh sáng cũng được thực hiện. Độ chính xác nhận diện giảm dần khi khoảng cách từ camera đến khuôn mặt tăng lên, từ 53,7% ở khoảng cách 30 cm xuống còn 18% ở khoảng cách 120 cm. Đặc biệt, điều kiện ánh sáng có ảnh hưởng rất lớn đến hiệu suất nhận diện, với độ tin cậy trung bình đạt 54,7% trong điều kiện ánh sáng tốt, nhưng chỉ còn 8,4% trong điều kiện ánh sáng kém. Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ thống nhận diện khuôn mặt này phù hợp trong điều kiện khoảng cách gần và ánh sáng đầy đủ.

Từ khóa: *Nhận diện khuôn mặt; Haar Cascade; LBPH; Khoảng cách và điều kiện ánh sáng; Hệ thống mở khóa ô tô.*

ABSTRACT

This paper presents a study on the application of facial recognition technology using the Haar Cascade algorithm for face detection and the LBPH (Local Binary Patterns Histogram) algorithm for face recognition, integrated into the door lock control system on the door panel of a Hyundai Vios car. The experiment was conducted with 10 participants, each performing 50 recognition attempts, to evaluate the system's accuracy. The results showed that the average accuracy ranged from 55.5% to 56.2% for individuals included in the recognition dataset and from 32% to 34.4% for individuals not present in the dataset. Additional experiments were carried out ☞

to examine the impact of distance and lighting conditions. Recognition accuracy decreased as the distance from the camera to the face increased, from 53.7% at a distance of 30 cm to only 18% at 120 cm. Notably, lighting conditions had a significant influence on recognition performance, with an average confidence level of 54.7% under good lighting conditions, dropping to just 8.4% under poor lighting. The research results indicate that this facial recognition system is suitable for short-range applications and environments with adequate lighting.

Keywords: *Face Recognition; Haar Cascade; LBPH (Local Binary Patterns Histogram); Distance and Lighting Conditions; Door Lock Control System.*

1. GIỚI THIỆU

Trong thời đại công nghệ số phát triển mạnh mẽ, an toàn và bảo mật phương tiện giao thông ngày càng được quan tâm. Các phương pháp truyền thống như sử dụng chìa khóa cơ học hay hệ thống khóa điện tử có thể bị đánh cắp, sao chép hoặc bẻ khóa, gây ra nhiều rủi ro cho chủ sở hữu xe. Vì vậy, các giải pháp mở khóa ô tô bằng công nghệ sinh trắc học, đặc biệt là nhận diện khuôn mặt, đang thu hút sự quan tâm của các nhà nghiên cứu và phát triển hệ thống an ninh thông minh.

Nhận diện khuôn mặt là một trong những phương pháp xác thực sinh trắc học hiện đại, có thể xác định danh tính người dùng nhanh chóng, thuận tiện mà không cần tiếp xúc vật lý. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một hệ thống mở khóa ô tô dựa trên công nghệ nhận diện khuôn mặt, ứng dụng thuật toán Haar Cascade để phát hiện khuôn mặt và thuật toán LBPH (Local Binary Patterns Histograms) để nhận diện. Thuật toán Haar Cascade giúp xác định vùng chứa khuôn mặt một cách hiệu quả, trong khi LBPH là một phương pháp đơn giản nhưng mạnh mẽ trong việc nhận diện khuôn mặt với độ chính xác cao.

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng nhận diện khuôn mặt là một giải pháp đầy tiềm năng cho hệ thống bảo mật phương tiện. Viola và Jones (2001) đã giới thiệu thuật toán Haar Cascade để phát hiện khuôn mặt trong thời gian thực bằng cách sử dụng các đặc trưng Haar và mô hình cascade classifier [1]. Công trình này là nền tảng cho nhiều hệ thống phát hiện khuôn mặt hiện nay.

Ahonen et al. (2006) đã đề xuất thuật toán LBPH, một phương pháp nhận diện khuôn mặt dựa trên đặc trưng cục bộ, cho thấy hiệu quả cao trong việc nhận diện khuôn mặt ngay cả với hình ảnh có độ phân giải thấp [2]. Điều này làm cho LBPH trở thành một lựa chọn phù hợp cho hệ thống nhận diện khuôn mặt trong môi trường thực tế.

Trong lĩnh vực an ninh ô tô, Kumar et al. (2019) đã nghiên cứu hệ thống nhận diện khuôn mặt trong xe thông minh, cho thấy rằng việc kết hợp thuật toán Haar Cascade với các mô hình nhận diện khuôn mặt giúp tăng cường khả năng bảo mật và tính tiện dụng của phương tiện [3]. Tương tự, Patel và Shah (2020) đã ứng dụng các mô hình học sâu vào hệ thống mở khóa xe, đạt được độ chính xác cao nhưng vẫn gặp khó khăn về hiệu suất thời gian thực [4].

Các nghiên cứu của Nguyen et al. (2021) đã đề xuất một hệ thống nhận diện khuôn mặt kết hợp Haar Cascade và LBPH, với mục tiêu

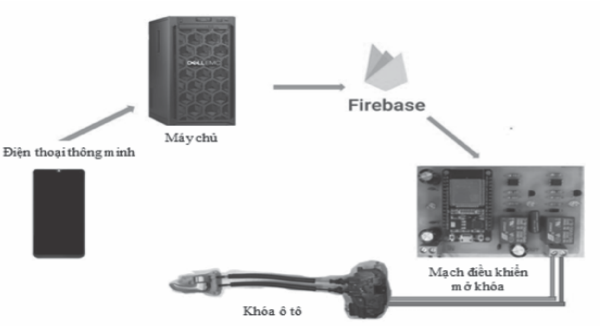
giảm chi phí tính toán trong khi vẫn đảm bảo độ chính xác cao trong điều kiện môi trường thay đổi [5]. Điều này cho thấy tính khả thi của việc sử dụng LBPH thay vì các mô hình học sâu đòi hỏi tài nguyên phần cứng mạnh mẽ.

Ngoài ra, một số nghiên cứu khác cũng tập trung vào việc cải tiến hiệu suất của thuật toán nhận diện khuôn mặt. Ojala et al. (2002) đã mở rộng phương pháp Local Binary Patterns (LBP) để tăng cường khả năng nhận diện trong môi trường có nhiều biến đổi ánh sáng [7]. Zhang et al. (2018) đã ứng dụng nhận diện khuôn mặt vào hệ thống khóa xe thông minh, sử dụng các mô hình học sâu để nâng cao độ chính xác nhưng gặp hạn chế về tốc độ xử lý [8].

Singh và Arora (2022) đã thực hiện một phân tích so sánh giữa các thuật toán nhận diện khuôn mặt như Eigenfaces, Fisherfaces, và LBPH, cho thấy rằng LBPH có hiệu suất ổn định và phù hợp với các hệ thống thời gian thực do yêu cầu phần cứng thấp hơn [9]. Gần đây, Kim và Park (2023) đã tối ưu hóa hệ thống nhận diện khuôn mặt bằng cách sử dụng mô hình CNN nhẹ, giúp cải thiện hiệu suất mà không làm giảm đáng kể độ chính xác [10].

Dựa trên những nghiên cứu trên, bài báo này sẽ phát triển một hệ thống nhận diện khuôn mặt và có khả năng triển khai trên các phương tiện thực tế. Hệ thống này sẽ sử dụng thuật toán Haar Cascade để phát hiện khuôn mặt và LBPH để nhận diện, đảm bảo sự cân bằng giữa hiệu suất và độ chính xác. Hệ thống sử dụng một máy chủ để phát hiện và nhận diện khuôn mặt, tín hiệu khuôn mặt nhận diện sẽ được gửi lên mạng dữ liệu firebase, từ đây tín hiệu đóng/mở cửa sẽ được gửi đến bộ phát nhận wifi hoặc 5G thực hiện việc đóng/mở xe.

2. HỆ THỐNG NHẬN DIỆN KHUÔN MẶT ĐỂ MỞ KHÓA CỬA Ô TÔ



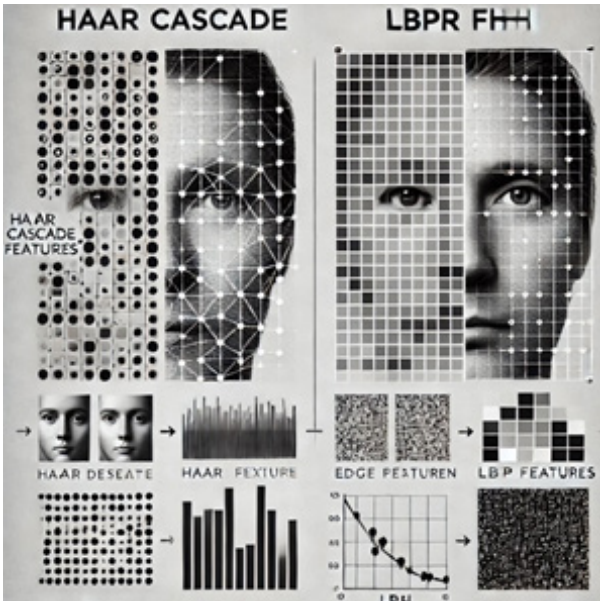
Hình 1. Sơ đồ hệ thống nhận diện khuôn mặt mở cửa ô tô

Hệ thống nhận diện khuôn mặt để mở khóa ô tô hoạt động như sau (hình 1): Người dùng sử dụng điện thoại thông minh để chụp ảnh hoặc quét khuôn mặt, sau đó gửi dữ liệu này tới máy chủ. Máy chủ thực hiện các bước phát hiện và nhận diện khuôn mặt bằng cách sử dụng các thuật toán như Haar Cascade và LBPH. Nếu khuôn mặt được nhận diện thành công, máy chủ sẽ gửi tín hiệu xác nhận tới Firebase, một nền tảng cơ sở dữ liệu thời gian thực, để tiếp tục xử lý. Firebase đóng vai trò trung gian, nhận tín hiệu từ máy chủ và chuyển tiếp tín hiệu đến mạch điều khiển thông qua vi điều khiển ESP32. Mạch điều khiển, khi nhận được tín hiệu từ Firebase, sẽ xử lý và thực hiện các thao tác đóng hoặc mở khóa ô tô thông qua kết nối với hệ thống khóa vật lý. Hệ thống này đảm bảo tính bảo mật cao nhờ sử dụng công nghệ nhận diện khuôn mặt và hoạt động linh hoạt nhờ tích hợp nền tảng điện toán đám mây (Firebase) cùng vi điều khiển ESP32.

3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ THUẬT TOÁN NHẬN DIỆN KHUÔN MẶT SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP HAAR CASCADE AND LBPH

Nhận diện khuôn mặt bằng Haar Cascade ☞

và LBPH (Local Binary Patterns Histogram) là hai phương pháp phổ biến với những đặc điểm khác nhau. Haar Cascade là một kỹ thuật phát hiện khuôn mặt dựa trên phương pháp học máy, sử dụng các đặc trưng Haar-like để xác định các vùng có khả năng chứa khuôn mặt. Phương pháp này hoạt động bằng cách phân tích sự khác biệt về độ sáng giữa các vùng trong ảnh, sử dụng tích phân ảnh để tăng tốc tính toán, và áp dụng thuật toán Adaboost để lựa chọn các đặc trưng quan trọng. Cuối cùng, mô hình Cascade Classifier giúp loại bỏ nhanh chóng các vùng không chứa khuôn mặt để cải thiện hiệu suất. Mặc dù Haar Cascade có tốc độ phát hiện nhanh, nhưng nó thường kém chính xác khi điều kiện ánh sáng thay đổi hoặc khi khuôn mặt có góc nhìn khác biệt.

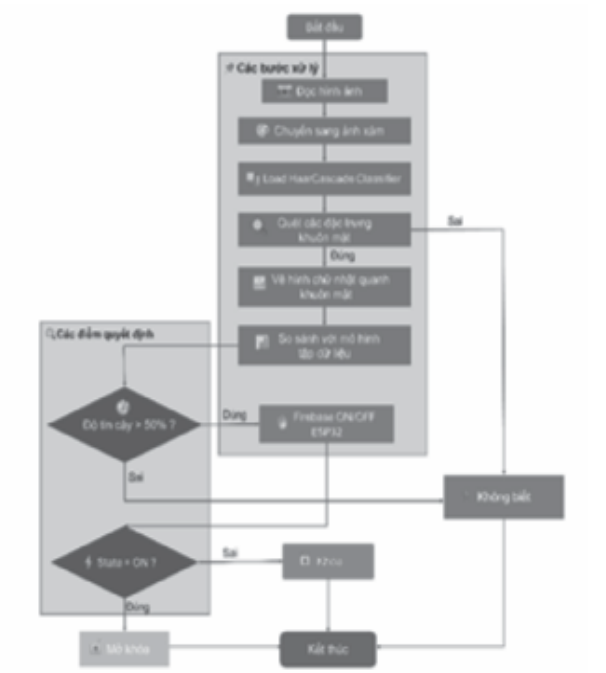


Hình 2. So sánh nhận diện khuôn mặt bằng phương pháp Haar Cascade và LBPH

Trong khi đó, LBPH là một phương pháp nhận diện khuôn mặt dựa trên Local Binary Patterns (LBP), hoạt động bằng cách chia ảnh thành các ô nhỏ, sau đó mã hóa mỗi pixel thành giá trị nhị phân bằng cách so sánh với các pixel lân cận. Từ đó, thuật toán tạo ra các histogram đặc trưng để biểu diễn cấu trúc khuôn mặt, giúp nhận diện hiệu quả ngay cả khi có sự thay đổi về ánh sáng hoặc tư thế. Cuối cùng, thuật toán sử dụng khoảng cách Euclidean hoặc Chi-square để so sánh với các mẫu đã được lưu trước đó. LBPH có độ chính xác cao hơn trong nhận diện khuôn mặt so với Haar Cascade, nhưng tốc độ xử lý chậm hơn.

Nhìn chung, Haar Cascade phù hợp để phát hiện khuôn mặt nhanh chóng trong thời gian thực, trong khi LBPH hiệu quả hơn trong nhận diện khuôn mặt với độ chính xác cao, đặc biệt trong các điều kiện ánh sáng không đồng nhất.

Hình 2 chỉ ra sự khác nhau của phương pháp nhận diện khuôn mặt bằng phương pháp Haar Cascade và LBPH. Hình 1 cho thấy Haar Cascade phát hiện khuôn mặt dựa trên đặc trưng Haar-like và cách LBPH chia ảnh thành các ô nhỏ để trích xuất đặc trưng kết cấu.



Hình 3. Thuật toán nhận diện khuôn mặt bằng Haar Cascade và LBPH

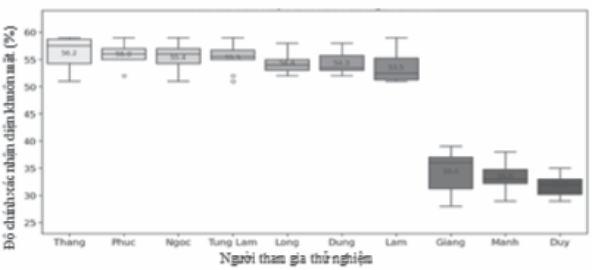
ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Hình 3 chỉ ra sơ đồ thuật toán nhận diện khuôn mặt bằng Haar Cascade và LBPH. Thuật toán nhận diện khuôn mặt sử dụng Haar Cascade và LBPH hoạt động qua hai giai đoạn chính: phát hiện và nhận diện. Đầu tiên, hệ thống đọc hình ảnh từ camera, chuyển đổi sang ảnh xám để giảm thiểu tính toán. Sau đó, bộ phân loại Haar Cascade được nạp để quét và phát hiện các đặc trưng khuôn mặt. Khi phát hiện thành công, khuôn mặt sẽ được đánh dấu bằng hình chữ nhật. Tiếp theo, thuật toán LBPH sẽ so sánh khuôn mặt đó với tập dữ liệu đã được huấn luyện. Kết quả nhận diện đi kèm với độ tin cậy, nếu độ tin cậy lớn hơn 50%, hệ thống sẽ kiểm tra trạng thái hoạt động. Nếu trạng thái ON, lệnh mở khóa sẽ được thực thi; ngược lại, khóa vẫn giữ nguyên. Trường hợp không nhận diện được hoặc độ tin cậy thấp, hệ thống sẽ trả về kết quả sai hoặc không biết. Quá trình này đảm bảo tính chính xác và bảo mật cho hệ thống nhận diện khuôn mặt.

4. PHƯƠNG PHÁP VÀ ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU

Trong nghiên cứu này, đối tượng thí nghiệm là cánh xe ô tô Hyundai Vios, nơi lắp đặt hệ khóa để điều khiển đóng/mở khóa cửa xe. Thí nghiệm được tiến hành trên tập dữ liệu gồm 10 người khác nhau để đánh giá độ chính xác và sai số lỗi của hệ thống nhận diện khuôn mặt, trong số 10 người có 7 người là được cài đặt trong dữ liệu nhận dạng khuôn mặt, 3 người còn lại không có trong dữ liệu nhận dạng. Phương pháp thí nghiệm được thực hiện theo quy trình cụ thể như sau: đầu tiên, thu thập hình ảnh khuôn mặt của 10 đối tượng để xây dựng cơ sở dữ liệu huấn luyện. Tiếp theo, hệ thống nhận diện khuôn mặt sử dụng thuật toán Haar Cascade để phát hiện khuôn mặt và LBPH (Local Binary Patterns Histogram) để nhận diện khuôn mặt trong điều kiện môi trường thực tế. Độ chính xác nhận diện được đánh giá thông qua việc so sánh kết quả nhận diện đúng hoặc sai với danh tính thực tế của từng người. Bên cạnh đó, độ chính xác của hệ thống tiếp tục được kiểm định trong các điều kiện ánh sáng khác nhau (ánh sáng mạnh, ánh sáng yếu, ánh sáng tự nhiên) và ở các khoảng cách từ camera đến khuôn mặt khác nhau (0,3m, 0,5m, 0,7m, và 1,2m). Mỗi điều kiện thí nghiệm cũng được lặp lại 50 lần để thu thập dữ liệu một cách đầy đủ, làm cơ sở đánh giá toàn diện độ chính xác và độ tin cậy của công nghệ nhận diện khuôn mặt khi ứng dụng trên cánh xe ô tô Hyundai Vios.

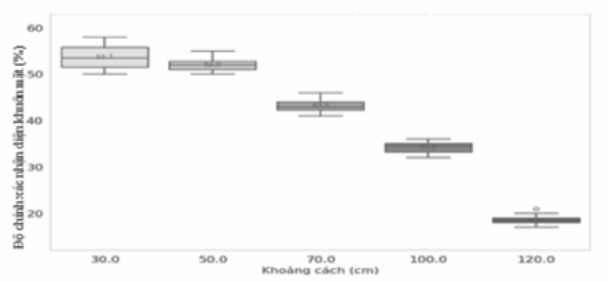
5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN



Hình 4. Độ chính xác của nhận diện khuôn mặt theo số người khác nhau

Hình 4 chỉ ra kết quả độ chính xác nhận diện khuôn mặt của 10 người trong điều kiện ánh sáng bình thường và khoảng cách từ người đến camera giữ cố định 40cm. Kết quả cho thấy Tùng, Lâm, Long và Dũng, với giá trị trung bình dao động từ 53,5% đến 56,2%. Trong đó, nhóm người có trong dữ liệu nhận dạng độ chính xác trung bình cao nhất là Thắng (56,2%), tiếp theo là Phúc (56,0%), Ngọc (55,4%), Tùng (55,2%), Long (54,4%), Dũng (54,3%), và Lâm (53,5%). Độ tin cậy của nhóm này khá ổn định, với phạm vi dao động hẹp và ít ngoại lệ. Ngược lại, nhóm có độ chính xác thấp bao gồm Giang, Mạnh và Duy không có trong dữ liệu nhận dạng. Đặc biệt, Duy có độ tin cậy trung bình thấp nhất ☞

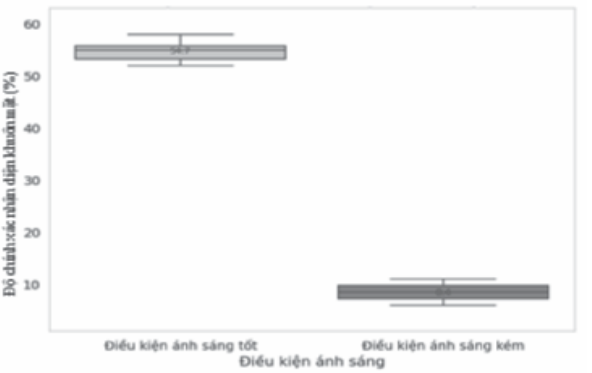
là 32,0%, theo sau là Mạnh (33,5%) và Giang (34,4%). Các đối tượng này có sự phân tán lớn, thể hiện qua các giá trị ngoại lệ và khoảng dao động rộng, đặc biệt là Giang. Kết quả này cho thấy hệ thống nhận diện khuôn mặt hoạt động hiệu quả với các cá nhân có trong dữ liệu nhận dạng và trả về kết quả đúng là mở cửa ô tô, ngược lại với những cá nhân không có trong dữ liệu nhận dạng, độ chính xác của kết quả nhận dạng sẽ thấp, hệ thống sẽ không mở cửa ô tô.



Hình 5. Độ chính xác của nhận diện khuôn mặt theo khoảng cách từ mặt đến camera

Hình 5 chỉ ra độ chính xác của nhận diện khuôn mặt theo khoảng cách từ mặt đến camera. Kết quả thí nghiệm cho thấy độ chính xác nhận diện khuôn mặt giảm dần khi khoảng cách từ camera đến khuôn mặt tăng lên. Cụ thể, ở khoảng cách 30 cm, độ tin cậy trung bình đạt 53,7%, cho thấy đây là khoảng cách tối ưu để hệ thống nhận diện đạt hiệu suất tốt nhất. Khi khoảng cách tăng lên 50 cm, độ tin cậy giảm nhẹ xuống còn 52,0%, nhưng vẫn duy trì ở mức tương đối cao. Tuy nhiên, khi khoảng cách tăng lên 70 cm, độ tin cậy trung bình giảm đáng kể xuống còn 43,2%. Độ chính xác tiếp tục suy giảm mạnh ở khoảng cách 100 cm, với giá trị trung bình chỉ đạt 34,2%. Đáng chú ý, ở khoảng cách 120 cm, độ tin cậy trung bình giảm xuống còn 18,0%, với phạm vi dao động rất hẹp, cho thấy khả năng nhận diện ở khoảng cách xa là rất thấp và hệ thống hoạt động kém ổn định.

Như vậy, kết quả cho thấy khoảng cách từ camera đến khuôn mặt có ảnh hưởng rõ rệt đến độ chính xác của hệ thống nhận diện. Khoảng cách càng xa, kích thước khuôn mặt trên khung hình càng nhỏ, làm giảm khả năng thu thập đặc trưng khuôn mặt chi tiết, dẫn đến sai sót trong nhận diện. Điều này phù hợp với các nghiên cứu trước đây, như nghiên cứu của Abate et al. (2007) đã chỉ ra rằng chất lượng nhận diện khuôn mặt phụ thuộc mạnh mẽ vào khoảng cách và độ phân giải ảnh khuôn mặt. Để cải thiện hiệu suất nhận diện ở khoảng cách xa, có thể xem xét sử dụng camera có độ phân giải cao hơn hoặc áp dụng các kỹ thuật xử lý ảnh tăng cường nhằm đảm bảo khả năng nhận diện ổn định hơn trong môi trường thực tế.



Hình 6. Độ chính xác của nhận diện khuôn mặt theo điều kiện ánh sáng

Hình 6 chỉ ra độ chính xác của nhận diện khuôn mặt phụ thuộc vào điều kiện ánh sáng. Kết quả thí nghiệm cho thấy độ chính xác nhận diện khuôn mặt phụ thuộc đáng kể vào điều kiện ánh sáng. Cụ thể, trong điều kiện ánh sáng tốt, độ tin cậy trung bình đạt 54,7%, với phạm vi dao động hẹp và ổn định, thể hiện hệ thống nhận diện hoạt động hiệu quả và nhất quán khi có đủ ánh sáng. Ngược lại, trong điều kiện ánh sáng kém, độ tin cậy trung bình giảm mạnh xuống chỉ còn 8,4%. Ngoài ra, kết quả trong môi trường ánh sáng kém có sự phân tán lớn, cho thấy độ ổn định của hệ thống bị suy giảm nghiêm trọng.

Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đó như của Zhang et al. (2017), chỉ ra rằng các thuật toán nhận diện khuôn mặt truyền thống như Haar Cascade và LBPH dễ bị ảnh hưởng bởi điều kiện ánh sáng, do đặc trưng khuôn mặt thu được trong môi trường ánh sáng yếu thường thiếu chi tiết và độ tương phản thấp. Do đó, để cải thiện hiệu suất nhận diện trong điều kiện ánh sáng kém, có thể áp dụng các kỹ thuật tăng cường ảnh hoặc sử dụng cảm biến camera hồng ngoại, hoặc nâng cấp lên các mô hình học sâu như CNN vốn có khả năng trích xuất đặc trưng mạnh mẽ hơn và kháng nhiễu tốt hơn trong môi trường thực tế.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã ứng dụng công nghệ nhận diện khuôn mặt sử dụng thuật toán Haar Cascade để phát hiện khuôn mặt và LBPH để nhận diện khuôn mặt, tích hợp vào hệ thống điều khiển khóa cửa trên cánh xe ô tô Hyundai Vios. Kết quả thí nghiệm cho thấy hệ thống có độ chính xác tương đối tốt đối với các cá nhân có trong tập dữ liệu huấn luyện, với độ tin cậy trung bình từ 55,5% đến 56,2%. Tuy nhiên, đối với các cá nhân không có trong tập dữ liệu, độ chính xác giảm rõ rệt, chỉ đạt từ 32% đến 34,4%. Bên cạnh đó, khoảng cách và điều kiện ánh sáng có tác động lớn đến hiệu suất nhận diện. Khi khoảng cách từ camera đến khuôn mặt tăng lên, độ chính xác giảm dần từ 53,7% ở 30 cm xuống còn 18% ở 120 cm. Trong điều kiện ánh sáng tốt, độ tin cậy trung bình đạt 54,7%, trong khi ở điều kiện ánh sáng kém, độ tin cậy chỉ còn 8,4%. Kết quả này cho thấy hệ thống nhận diện khuôn mặt đang nghiên cứu phù hợp với các ứng dụng ở khoảng cách gần và môi trường có ánh sáng đầy đủ. Để nâng cao hơn nữa độ chính xác và độ tin cậy của hệ thống, các nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào cải thiện chất lượng hình ảnh đầu vào, tối ưu thuật toán xử lý, hoặc kết hợp với các phương pháp nhận diện tiên tiến như mạng nơ-ron tích chập (CNN).❖

Ngày nhận bài: **10/11/2025**
Ngày phản biện: **19/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Viola, P., & Jones, M. (2001), "*Rapid object detection using a boosted cascade of simple features*". Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).

[2]. Ahonen, T., Hadid, A., & Pietikainen, M. (2006), "*Face recognition with local binary patterns*". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI).

[3]. Kumar, A., Gupta, P., & Sharma, S. (2019), "*Real-time face recognition for smart vehicle security system*". International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT).

[4]. Patel, H., & Shah, M. (2020), "*Enhancing vehicle security using deep learning-based face recognition*". IEEE International Conference on Smart Systems and Innovations (ICSSI).

[5]. Nguyen, D. M., Tran, Q. H., & Le, C. D. (2021), "*A hybrid approach for face recognition-based vehicle access control*". Journal of Computer Science and Technology (JCST).

[6]. Li, S., & Jain, A. K. (2011), "*Handbook of face recognition*". Springer Science & Business Media.

[7]. Ojala, T., Pietikainen, M., & Maenpaa, T. (2002), "*Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns*". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI).

[8]. Zhang, D., Lu, G., & Zhou, W. (2018), "*Secure access control for smart vehicles using face biometrics*". Journal of Intelligent Transportation Systems (JITS).

[9]. Singh, R., & Arora, S. (2022), "*Comparative analysis of face recognition algorithms for vehicle security*". International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC).

[10]. Kim, J., & Park, C. (2023), "*Real-time implementation of face recognition-based car unlocking system using lightweight CNN models*". IEEE Transactions on Intelligent Vehicles (TIV).

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ MAY ĐẾN ĐỘ GIÃN ĐỨT ĐƯỜNG MAY TRÊN SẢN PHẨM NỘI Y TỪ VẢI DỆT KIM TRONG SẢN XUẤT MAY CÔNG NGHIỆP

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF SELECTED SEWING PROCESS PARAMETERS ON THE SEAM ELONGATION AT BREAK OF KNITTED FABRIC UNDERWEAR PRODUCTS IN INDUSTRIAL GARMENT PRODUCTION

Nguyễn Thị Xuân, Nguyễn Văn Dung, Đỗ Thị Hoa Ngà
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên
Email: dungxuan012@gmail.com

TÓM TẮT

Chất lượng đường may của sản phẩm nội y may từ vải dệt kim được đánh giá qua nhiều yếu tố, trong đó độ giãn đứt của đường may là tiêu chí quan trọng phản ánh khả năng đàn hồi và độ bền của sản phẩm. Bài báo tập trung nghiên cứu hai thông số công nghệ chính ảnh hưởng đến độ giãn đứt đường may là lực căng chun trên máy may trần đè và loại chỉ may. Qua các thí nghiệm, nghiên cứu đánh giá mối quan hệ giữa sự thay đổi lực căng chun và loại chỉ đến khả năng giãn đứt của đường may trên một số loại vải dệt kim dùng trong sản xuất sản phẩm quần nội y. Để phân tích và xác định được mức độ ảnh hưởng của các yếu tố này, phần mềm STATA được sử dụng nhằm xử lý kết quả thí nghiệm và xây dựng mô hình hồi quy đánh giá tác động của lực căng chun (LCC) và loại chỉ may đến độ giãn đứt đường may. Kết quả cho thấy lực căng chun ảnh hưởng rất lớn đến độ giãn đứt đường may, và chỉ may quyết định độ ổn định, khả năng chịu kéo của đường may. Từ đó, nghiên cứu đề xuất thông số công nghệ tối ưu nhằm nâng cao chất lượng và độ bền đàn hồi của đường may trên sản phẩm quần nội y trong sản xuất may công nghiệp.

Từ khóa: *Độ giãn đứt đường may; Chỉ may; Lực căng chun; Sản phẩm nội y; Vải dệt kim.*

ABSTRACT

The seam quality of underwear products made from knitted fabrics is evaluated through multiple factors, among which seam breaking elongation is an important criterion reflecting the elasticity and durability of the product. This paper focuses on investigating two main technological parameters affecting seam breaking elongation: elastic tension force on the coverstitch machine and sewing thread type. Through experiments, the study evaluates the relationship between changes in elastic tension force and thread type on the seam breaking elongation capability of several types of knitted fabrics used in underwear production. To analyze and determine the influence level of these factors, STATA software was utilized to process experimental results and develop a regression model evaluating the impact of elastic tension force (ETF) and sewing thread type

on seam breaking elongation. Results show that elastic tension force has a significant effect on seam breaking elongation, and sewing thread determines the stability and tensile strength of the seam. Accordingly, the study proposes optimal technological parameters to enhance the quality and elastic durability of seams on underwear products in industrial garment manufacturing.

Keywords: *Seam breaking elongation; Sewing thread; Elastic tension force; Underwear products; Knitted fabric.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong sản xuất may công nghiệp, đặc biệt đối với sản phẩm nội y thì yêu cầu về độ bền, tính đàn hồi và sự thoải mái khi mặc luôn được đặt lên hàng đầu. Chất lượng sản phẩm không chỉ phụ thuộc vào vật liệu vải mà còn chịu ảnh hưởng lớn từ các thông số công nghệ may trong quá trình gia công. Trong đó, với sản phẩm nội y thì độ giãn đứt đường may là tiêu chí quan trọng quyết định đến độ bền và hình dạng sản phẩm.

Công nghệ gia công sản phẩm nội y không phức tạp, tuy nhiên các đường may đóng vai trò quan trọng trong việc tạo độ ôm sát và đảm bảo tính đàn hồi cho sản phẩm. Ở các vị trí như vòng đùi, cạp quần… sản phẩm nội y thường được may có dải chun bằng máy may trần đè. Đường may trên máy may trần đè có dải chun được sử dụng để giúp sản phẩm vừa vặn, co giãn tốt và không bị bai giãn trong quá trình sử dụng. Ngoài ra, loại chỉ may với đặc tính cơ lý khác nhau cũng tác động đến khả năng chịu lực và độ ổn định của đường may. Trong thực tế sản xuất hiện nay, việc lựa chọn và điều chỉnh các thông số chủ yếu dựa vào kinh nghiệm, chưa có cơ sở khoa học.

Chính vì vậy, việc nghiên cứu ảnh hưởng của lực căng chun và loại chỉ may đến độ giãn đứt đường may trên sản phẩm quần nội y từ vải dệt kim là rất cần thiết. Kết quả nghiên cứu sẽ giúp xác định được các thông số tối ưu, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả trong sản xuất.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHẠM VI NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

* Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã khảo sát và nghiên cứu sản phẩm quần nội y tại Công ty TNHH Dệt nhuộm JASAN. Tiến hành khảo sát quy trình may và lựa chọn các mẫu vải, chỉ may sử dụng phổ biến trong sản xuất sản phẩm quần nội y, thiết lập các mức lực căng chun thường dùng trong thực tế sản xuất như sau:

Sử dụng 3 loại vải (ký hiệu V1, V2, V3); 1 loại chỉ dưới (ký hiệu 70D/2), 1 loại kim may (UY128 GAS), 1 loại chun 0.5 cm (có thành phần 87% nylon, 13% spandex).

Đề tài tập trung nghiên cứu về hai nhóm biến được xác định gồm:

* Thông số về chỉ may: 2 loại chỉ CT1, CT2 (tương ứng 150D/1, S80).

* Thông số về lực căng chun: Gồm 3 mức lực căng khác nhau (ký hiệu F1, F2, F3) khi may dải chun vào vòng đùi tại 3 cung là cung thân trước, cung trên và cung thân sau (ký hiệu lần lượt L1, L2, L3).

Mức F1 lực căng tại 3 cung: L1 = 954 g; L2 = 930 g; L3 = 940 g;

Mức F2 lực căng tại 3 cung: L1 = 948 g; ☞

L2 = 924 g; L3 = 934 g;

Mức F3 lực căng tại 3 cung: L1 = 942 g; L2 = 918 g; L3 = 928 g.

2.2. Nội dung và phương pháp nghiên cứu

✓ Nội dung nghiên cứu: Đề tài tập trung nghiên cứu, phân tích và đánh giá mức độ ảnh hưởng của thông số công nghệ may (cụ thể: loại chỉ may sử dụng và lực căng chun trong quá trình may) đến độ giãn đứt của đường may vòng đùi trên máy may trần đè sản phẩm nội y từ vải dệt kim trong sản xuất may công nghiệp.

✓ Phương pháp nghiên cứu:

➢ Bước 1: Tiến hành may thí nghiệm các phương án.

Thiết bị may: Máy may trần đè có lắp hệ thống dải chun có thể điều chỉnh lực căng theo các mức độ khác nhau.



Hình 1. Máy trần đè có lắp hệ thống dải chun, bảng điều chỉnh lực căng chun

Các phương án may thí nghiệm: Gồm 6 phương án, mỗi phương án thực hiện may trên 3 mức căng (F1, F2, F3) và mỗi mức căng xác định tại 3 cung của vòng đùi (cung thân trước, cung trên và cung thân sau).

Bảng 1. Bảng các phương án thí nghiệm

STT	Phương án	Loại vải	Loại chỉ trên	Mức căng chun
1	Phương án 1	V1	150D/1	F1
				F2
				F3
2	Phương án 2	V2	150D/1	F1
				F2
				F3
3	Phương án 3	V3	150D/1	F1
				F2
				F3
4	Phương án 4	V1	S80	F1
				F2
				F3
5	Phương án 5	V2	S80	F1
				F2
				F3
6	Phương án 6	V3	S80	F1
				F2
				F3

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Sau đây là hình ảnh thể hiện các thông số lực căng chun được điều chỉnh khi may thí nghiệm theo các mức độ F1, F2, F3.

Mức F1 lực căng tại 3 cung: L1 = 954 g; L2 = 930 g; L3 = 940 g;
Mức F2 lực căng tại 3 cung: L1 = 948 g; L2 = 924 g; L3 = 934 g;
Mức F3 lực căng tại 3 cung: L1 = 942 g; L2 = 918 g; L3 = 928 g.



Hình 2. Điều chỉnh lực căng chun (F1 tại 3 cung) trên bảng điều khiển máy may trần đè



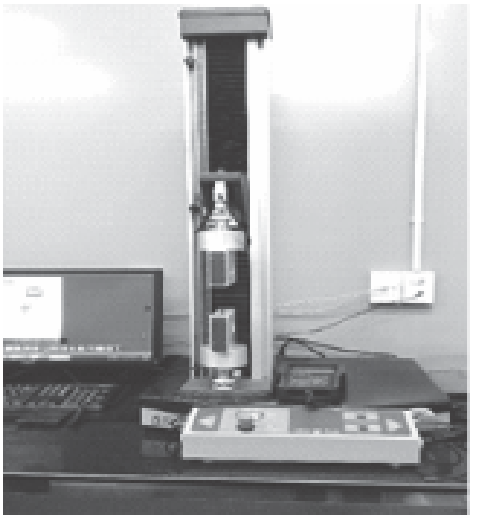
Hình 3. Điều chỉnh lực căng chun (F2 tại 3 cung) trên bảng điều khiển máy may trần đè



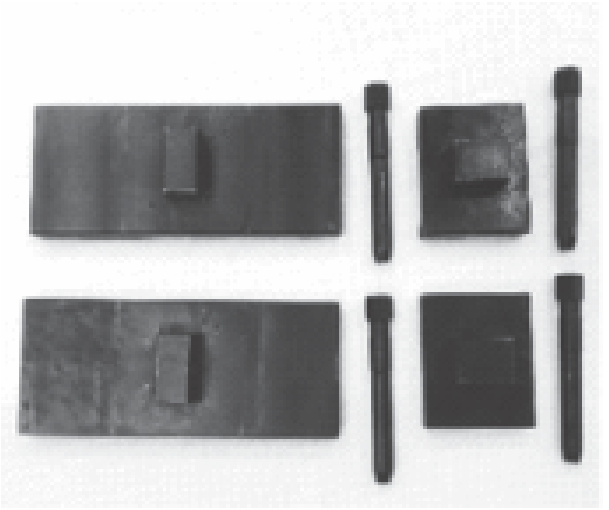
Hình 4. Điều chỉnh lực căng chun (F3 tại 3 cung) trên bảng điều khiển máy may trần đè

Quan sát 3 hình trên (hình 1, hình 2, hình 3) là các hình ảnh thể hiện lực căng chun được cài ở 3 mức (F1, F2, F3) cho 3 cung (L1, L2, L3) để may thí nghiệm các phương án (như bảng 1).

➢ Bước 2: Đo kiểm độ giãn đứt đường may trên mẫu bằng máy đo lực kéo theo tiêu chuẩn (AATCC/ASTM TS 015).



Máy thử độ bền kéo theo nguyên lý tốc độ kéo giãn không đổi (CRE)



Hàm kẹp (25×25) mm và (25×75) mm
Hình 5. Thiết bị và dụng cụ kéo giãn đứt đường may trên sản phẩm dệt kim AATCC/ASTM TS-015



Hình 6. Thiết bị kéo giãn đứt đường may theo các phương án thí nghiệm

➢ Bước 3. Phân tích và xử lý số liệu thí nghiệm. Phân tích và xử lý số liệu bằng phần mềm STATA để đánh giá mức độ ảnh hưởng của chỉ may và mức lực căng chun (Lcc) đến độ giãn đứt đường may trên vải dệt kim. Trong đó cần xác định các biến:

- Biến độc lập là các yếu tố thông số công nghệ đã lựa chọn: Chỉ may S80 và 150D/1 (CT1, CT2); Lực căng chun (LCC) 3 mức (F1, F2, F3) tương ứng với mỗi mức là 3 cung vòng đùi (cung thân trước, cung trên và cung thân sau có ký hiệu lần lượt L1, L2, L3).

- Biến phụ thuộc là độ giãn đứt đường may % (gd).

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Kết quả nghiên cứu mức độ ảnh hưởng của một số thông số công nghệ may: Chỉ may 150D/1 và S80 (CT1, CT2); Lực căng chun (LCC) là 3 mức (F1, F2, F3) tương ứng với mỗi mức là 3 cung vòng đùi (L1, L2, L3) trên 3 loại vải (V1, V2, V3) được thể hiện dưới các bảng sau:

3.1. Mối quan hệ lực căng chun, chỉ may đến độ giãn đứt đường may

Kết quả được thể hiện trong mô hình sau:

Bảng 2. Mô hình mối quan hệ lực căng chun, chỉ may đến độ giãn đứt đường may

```
. reg gd lcc if ct==1
      Source |       SS           df       MS      Number of obs   =        27
-------------+----------------------------------   F(1, 25)        =      6.74
       Model |  6693.28948         1  6693.28948   Prob > F        =    0.0156
    Residual |  24822.8677        25  992.914709   R-squared       =    0.2124
-------------+----------------------------------   Adj R-squared   =    0.1809
       Total |  31516.1572        26  1212.15989   Root MSE        =    31.511

------------------------------------------------------------------------------
          gd | Coefficient  Std. err.      t    P>|t|     [95% conf. interval]
-------------+----------------------------------------------------------------
         lcc |   1.432006   .5515449     2.60   0.016     .2960776    2.567934
       _cons |  -1122.51    515.914     -2.18   0.039    -2185.055   -59.96525
------------------------------------------------------------------------------

. reg gd lcc if ct==2
      Source |       SS           df       MS      Number of obs   =        27
-------------+----------------------------------   F(1, 25)        =      5.51
       Model |  2710.00875         1  2710.00875   Prob > F        =    0.0271
    Residual |  12292.0344        25  491.681377   R-squared       =    0.1806
-------------+----------------------------------   Adj R-squared   =    0.1479
       Total |  15002.0432        26  577.00166   Root MSE        =    22.174

------------------------------------------------------------------------------
          gd | Coefficient  Std. err.      t    P>|t|     [95% conf. interval]
-------------+----------------------------------------------------------------
         lcc |   .9111928   .3881207     2.35   0.027     .1118432    1.710542
       _cons |  -754.006    363.0473    -2.08   0.048    -1501.716   -6.296093
------------------------------------------------------------------------------
```

Kết quả phân tích hồi quy tuyến tính (tại bảng 2) cho thông số lực căng chun và chỉ may có ảnh hưởng, có ý nghĩa thống kê đến độ giãn đứt đường may trong cả hai điều kiện thí nghiệm (P_{rob} > F < 0,05). Ở điều kiện CT = 1 (chỉ may 1), mô hình thể hiện mức độ giải thích tốt hơn với R-squared = 21,24% và hệ số hồi quy của lcc = 1,432 (P = 0,016). Trong khi đó, ở điều kiện CT = 2 (chỉ may 2), mô hình vẫn có ý nghĩa (Prob > F = 0,0271) nhưng R-squared chỉ đạt 18,06% với hệ số lcc = 0,912 (P = 0,027). Như vậy, điều kiện CT = 1 cho thấy mức độ ảnh hưởng của lực căng chun và chỉ may đến độ giãn đứt rõ rệt hơn so với CT = 2.

3.2. Độ giãn đứt đường may theo các yếu tố thông số công nghệ

* Theo mức lực căng chun (F1, F2, F3):

Bảng 3. Kết quả kiểm định theo mức lực căng chun (lcc)

```
. by vai: sum gd lk1 lcc

-> vai = 1

    Variable |        Obs        Mean    Std. dev.       Min        Max
-------------+---------------------------------------------------------
          gd |         18    160.1611    72.11023         73        287
         lk1 |         18    15.44444    12.78635        2.9       31.5
         lcc |         18    935.3333    11.31371        918        954

-> vai = 2

    Variable |        Obs        Mean    Std. dev.       Min        Max
-------------+---------------------------------------------------------
          gd |         18    152.4833     69.7732       68.3      261.9
         lk1 |         18        13.7    11.22932        2.8       32.4
         lcc |         18    935.3333    11.31371        918        954

-> vai = 3

    Variable |        Obs        Mean    Std. dev.       Min        Max
-------------+---------------------------------------------------------
          gd |         18    160.0889    61.66495       84.9      264.3
         lk1 |         18    14.93333    12.52907        3.2       36.5
         lcc |         18    935.3333    11.31371        918        954
```

Quan sát bảng 3, kết quả cho thấy độ giãn đứt trung bình vải 1 là 160.1611% lớn hơn vải 3 là 160.0889%, vải 3 có độ giãn đứt lớn hơn vải 2 là 152.4833%. Độ giãn đứt có % càng cao có nghĩa đường may đó tốt hơn, vậy với 3 mức lực căng chun (F1, F2, F3) đã lựa chọn thì vải 1 có % giãn đứt cao có nghĩa là vải đó tốt nhất. Vậy nên ưu tiên chọn vải 1, sau đó đến vải 2 và cuối cùng là vải 3.

* Theo loại chỉ trên 1 và chỉ trên 2 (150D/1, S80):

Bảng 4. Kết quả kiểm định theo loại chỉ trên (CT)

```
. by ct: sum gd lk1 lcc

-> ct = 1

    Variable |        Obs        Mean    Std. dev.       Min        Max
-------------+---------------------------------------------------------
          gd |         27    216.8926    34.81609       180.3        287
         lk1 |         27    25.96667    5.370933        15.7       36.5
         lcc |         27    935.3333    11.20439         918        954

-> ct = 2

    Variable |        Obs        Mean    Std. dev.       Min        Max
-------------+---------------------------------------------------------
          gd |         27    98.26296    24.02086        68.3      163.3
         lk1 |         27    3.418519    .5151826         2.8        4.9
         lcc |         27    935.3333    11.20439         918        954
```

Quan sát bảng 4, kết quả cho thấy độ giãn đứt trung bình khi may trên 3 loại vải bằng chỉ trên 1 (CT1) có % giãn đứt cao 216.8926%, cao hơn khi may chỉ trên 2 (CT2) 98.26296%. Vì vậy, với 3 loại vải trên ta nên chọn chỉ 1 (150D/1) để sử dụng may sản phẩm vì khi may loại chỉ trên 150D/1 độ giãn đứt cao hơn, tức là đường may có chất lượng tốt hơn.

* Theo loại lực căng chun (F1, F2, F3):

Bảng 5. Kết quả kiểm định theo loại lực căng chun (F1, F2, F3)

```
. by llc: sum gd lk1 lcc

-> llc = 1

    Variable |        Obs        Mean    Std. dev.       Min        Max
-------------+---------------------------------------------------------
          gd |         18    194.8944    71.59615       101.4        287
         lk1 |         18    13.15556    10.68711         2.8       31.2
         lcc |         18    941.3333    10.12859         930        954

-> llc = 2

    Variable |        Obs        Mean    Std. dev.       Min        Max
-------------+---------------------------------------------------------
          gd |         19    141.1684    55.24668          70      201.5
         lk1 |         19    15.92632    12.39905         2.9       34.2
         lcc |         19    935.6842    9.961329         924        948

-> llc = 3

    Variable |        Obs        Mean    Std. dev.       Min        Max
-------------+---------------------------------------------------------
          gd |         17    136.4059    59.48738        68.3      208.7
         lk1 |         17    14.94118    13.32099         2.8       36.5
         lcc |         17    928.5882    9.918788         918        942
```

Quan sát bảng 5, kết quả cho thấy độ giãn đứt trung bình khi may trên 3 loại vải theo 3 loại mức căng khác nhau (F1, F2, F3) cho kết quả độ giãn đứt với loại mức căng F1 có % giãn đứt cao nhất 194.8944%, sau đó đến mức lực căng F2 có % giãn đứt 141.1684%, cuối cùng mức lực căng F3 có % giãn đứt nhỏ nhất 136.4059%. Vậy, khi may trên 3 loại vải để đảm bảo chất lượng về độ giãn đứt đường may nên chọn loại mức căng F1 để may sản phẩm.

3.3. Ảnh hưởng lực căng chun tại các vị trí đến độ giãn đứt đường may

* Mô hình ảnh hưởng lực căng chun đến độ giãn đứt đường may cung thân trước (L1):

Bảng 6. Mô hình ảnh hưởng lực căng chun đến độ giãn đứt cung thân trước L1

```
. reg gd lk1 lcc if vt==1
```

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	18
				F(2, 15)	=	78.57
Model	74905.0362	2	37452.5181	Prob > F	=	0.0000
Residual	7150.12554	15	476.675036	R-squared	=	0.9129
				Adj R-squared	=	0.9012
Total	82055.1618	17	4826.77422	Root MSE	=	21.833

gd	Coefficient	Std. err.	t	P>|t|	[95% conf.	interval]
lk1	4.46085	.3872412	11.52	0.000	3.635464	5.286235
lcc	6.258703	1.054501	5.94	0.000	4.011087	8.506318
_cons	-5843.728	1000.27	-5.84	0.000	-7975.752	-3711.703

* Mô hình ảnh hưởng lực căng chun đến độ giãn đứt đường may cung trên (L2):

Bảng 7. Mô hình ảnh hưởng lực căng chun đến độ giãn đứt cung trên (L3)

```
. reg gd lk1 lcc if vt==2
```

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	18
				F(2, 15)	=	62.07
Model	66176.4626	2	33088.2313	Prob > F	=	0.0000
Residual	7996.46491	15	533.097661	R-squared	=	0.8922
				Adj R-squared	=	0.8778
Total	74172.9275	17	4363.11338	Root MSE	=	23.089

gd	Coefficient	Std. err.	t	P>|t|	[95% conf.	interval]
lk1	5.398345	.5247796	10.29	0.000	4.279804	6.516887
lcc	4.739171	1.110867	4.27	0.001	2.371415	7.106927
_cons	-4292.977	1026.469	-4.18	0.001	-6480.845	-2105.109

* Mô hình ảnh hưởng lực căng chun đến độ giãn đứt đường may cung thân sau (L3):

Bảng 8. Mô hình ảnh hưởng lực căng chun đến độ giãn đứt cung cong L3

```
. reg gd lk1 lcc if vt==3
```

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	18
				F(2, 15)	=	51.07
Model	68667.6367	2	34333.8183	Prob > F	=	0.0000
Residual	10083.5231	15	672.234874	R-squared	=	0.8720
				Adj R-squared	=	0.8549
Total	78751.1598	17	4632.42116	Root MSE	=	25.927

gd	Coefficient	Std. err.	t	P>|t|	[95% conf.	interval]
lk1	5.240955	.5434309	9.64	0.000	4.08266	6.399251
lcc	6.07831	1.270175	4.79	0.000	3.370995	8.785624
_cons	-5599.973	1187.829	-4.71	0.000	-8131.772	-3068.175

Quan sát (bảng 6, bảng 7, bảng 8) trong 3 mô hình trên cho thấy mô hình tại 3 cung trên là phù hợp vì R-squared > 0.5 và Prob = 0.000 > 0.005. Khi lực căng của chun tăng thì cung (vt2) dễ bị đứt nhất vì có độ giãn đứt tăng nhỏ nhất lcc = 4.7399171%; tại cung 3 (vt3) lcc = 6.07831%; tại cung 1 (vt1) lcc = 6.258703 %. Kết quả đó cho thấy khi điều chỉnh lực căng chun không nên tăng đều 3 cung cong (L1, L2, L3) như thực tế tại các doanh nghiệp may hiện nay.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu đã chứng minh rằng các thông số công nghệ may, đặc biệt là chỉ may và lực căng chun có ảnh hưởng rõ rệt đến độ giãn đứt đường may trên sản phẩm nội y từ vải dệt kim trong sản xuất may công nghiệp.

Trong các mức lực căng chun khảo sát (F1, F2, F3), mức lực căng 1 (F1) cho giá trị độ giãn đứt cao và ổn định nhất trên cả 3 loại vải, cho thấy đây là thông số phù hợp để lựa chọn trong thực tế sản xuất. Đồng thời, với 2 loại chỉ may đã lựa chọn thì chỉ may 150D/1 thể hiện hiệu quả tốt hơn chỉ S80, với giá trị độ giãn đứt lớn nhất, do vậy đây là loại chỉ nên ưu tiên lựa chọn trong quá trình sản xuất.

Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng việc điều chỉnh lực căng chun giữa các cung cong không nên tăng đồng đều, đặc biệt vị trí thứ 2 (cung trên) cần được kiểm soát và tối ưu riêng biệt. Điều này cho thấy rằng tối ưu hóa lực căng chun phải lựa chọn và có phân vùng theo từng vị trí cụ thể thay vì tăng đều theo thói quen sản xuất hiện nay.

Các kết quả này có thể sử dụng như căn cứ tham khảo và định hướng điều chỉnh thông số công nghệ nhằm tăng độ bền - đàn giãn đứt đường may, góp phần nâng cao chất lượng sản phẩm nội y trong sản xuất công nghiệp.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên, mã số đề tài UTEHY.L.2025.35.❖

Ngày nhận bài: **10/11/2025**
Ngày phản biện: **18/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Nguyễn Thị Hồng (2018), "*Nghiên cứu ảnh hưởng thông số may đến độ bền đường may trên vải dệt kim*". Tạp chí Khoa học và Công nghệ Dệt May, Viện Dệt May Việt Nam.

[2]. Trần Thị Hạnh (2021), "*Ứng dụng thống kê phân tích ảnh hưởng thông số công nghệ đến đường may sản phẩm nội y*". Trường Đại học Công Nghiệp TP. Hồ Chí Minh.

[3]. Tùng, D. X. (2021), "*Các yếu tố ảnh hưởng đến độ bền đường may*". Trường Đại học Công nghiệp Dệt May Hà Nội.

[4]. ASTM D4964-19 (2019), "*Standard Test Method for Tension and Elastic Recovery of Fabrics*".

[5]. Lim, Y. & Cho, G. (2015), "*Effect of Sewing Thread and Elastic Tension on Seam Strength and Extension of Knit Underwear*". Textile Research Journal.

[6]. Verma, V. & Husain, N. (2020), "*Mechanical properties and seam performance of warp and weft knitted structures*". Journal of Engineered Fibers and Fabrics.

NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC, ỔN ĐỊNH VÀ TỐI ƯU HÓA QUỸ ĐẠO CHUYỂN ĐỘNG CỦA CẦN CẨU DI ĐỘNG VÀ CẦN CẨU ỐNG LỒNG: NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN

DYNAMIC MODELING, STABILITY ANALYSIS, AND TRAJECTORY OPTIMIZATION OF MOBILE AND TELESCOPIC CRANES: A REVIEW STUDY

Huỳnh Công Lớn*, Lương Văn Tới
Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh
**Email: huynhconglon@hcmut.edu.vn*

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày tổng hợp các kết quả nghiên cứu trong ba thập kỷ gần đây về mô hình động lực học, ổn định và tối ưu hóa quỹ đạo chuyển động của các loại cần cẩu di động và cần cẩu ống lồng. Dựa trên phân tích tám công trình tiêu biểu từ Ba Lan, Trung Quốc và Nga, nghiên cứu đã tổng hợp các mô hình toán học, phương pháp mô phỏng và tiêu chí ổn định được ứng dụng trong lĩnh vực cơ giới nâng/hạ hiện đại. Các hướng tiếp cận bao gồm mô hình động lực học phi tuyến dựa trên phương trình Lagrange, mô hình khí động học của tải trọng dưới tác động của gió, và phương pháp tối ưu hóa quỹ đạo chuyển động nhằm giảm năng lượng và dao động tải. Bài viết cũng thảo luận các xu hướng nghiên cứu mới về điều khiển thông minh, mô phỏng số, tiêu chuẩn hóa an toàn và mô hình học máy trong thiết kế cần cẩu hiện đại.

Từ khóa: *Cần cẩu di động; Cần cẩu ống lồng; Mô hình động lực học; Ổn định tải trọng; Ảnh hưởng của gió; Tối ưu hóa quỹ đạo; Điều khiển thông minh.*

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive synthesis of research conducted over the past three decades on the dynamic modeling, stability analysis, and trajectory optimization of mobile and telescopic cranes. Based on an analysis of eight representative studies from Poland, China, and Russia, the work integrates mathematical models, simulation methodologies, and stability criteria that have been applied in the field of modern lifting machinery. The reviewed approaches include nonlinear dynamic models derived from Lagrange's equations, aerodynamic models of payloads under wind excitation, and trajectory optimization methods aimed at minimizing energy consumption and load oscillations. The paper also discusses emerging research trends in intelligent control, numerical simulation, safety standardization, and machine learning-based design of modern cranes.

Keywords: *Mobile crane; Telescopic crane; Dynamic modeling; Load stability; Wind effects; Trajectory optimization; Intelligent control.*

1. MỞ ĐẦU

Trong các hệ thống cơ giới xây dựng và công nghiệp nặng, cần cẩu di động (mobile crane) và cần cẩu ống lồng (telescopic crane) đóng vai trò thiết yếu trong việc nâng/hạ và vận chuyển tải trọng lớn trong không gian ba chiều. Sự phát triển của cần cẩu hiện đại hướng đến nâng cao hiệu suất, đảm bảo an toàn và giảm năng lượng tiêu hao, đồng thời vẫn phải vận hành ổn định trong môi trường gió và dao động. Việc điều khiển chuyển động của cần cẩu là một bài toán động lực học phi tuyến phức tạp, trong đó các khối lượng chuyển động, dây cáp đàn hồi và tải trọng dao động tương tác chặt chẽ. Do đó, nhiều công trình đã tập trung phát triển mô hình động học, mô hình lực gió, phân tích ổn định và tối ưu hóa điều khiển để nâng cao độ chính xác của mô phỏng và tính an toàn khi vận hành. Bài báo này tổng hợp và phân tích tám công trình nghiên cứu tiêu biểu giai đoạn 1990-2025 nhằm làm rõ:

1) Mô hình toán học và phương pháp mô phỏng động lực học của cần cẩu;

2) Ảnh hưởng của gió đến chuyển động tải trọng;

3) Tiêu chí ổn định và thuật toán tối ưu hóa quỹ đạo;

4) Các cải tiến trong phương pháp đánh giá an toàn và hướng phát triển trong tương lai.

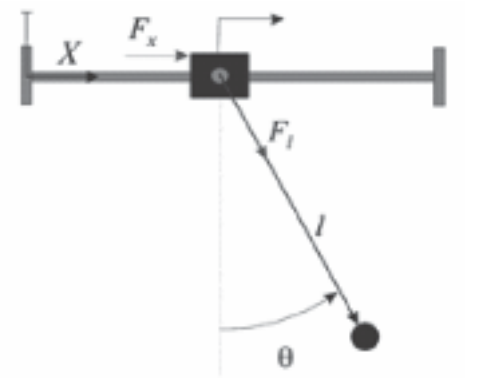
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH TOÁN

2.1. Mô hình con lắc tải treo (Pendulum Model)

Mô hình cổ điển xem tải như một khối chất điểm m treo qua dây dài l, chuyển động theo góc lệch θ. Phương trình chuyển động:

$$ml^2\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + mgl\sin\theta = M_d(t)$$

Trong đó, $M_d(t)$ là moment do chuyển động của cần hoặc gió gây ra. Nghiên cứu của Singhose (1999) và Fujioka (2009) chứng minh rằng dao động tải ảnh hưởng trực tiếp đến moment chống lật và khả năng kiểm soát vị trí tải [Fujioka, ACC 2009].



Hình 1. Mô hình con lắc tải treo đơn giản của cần cẩu di động (Nguồn: Fujioka et al., 2009)

2.2. Mô hình động lực học đa bậc tự do (Multibody Dynamics)

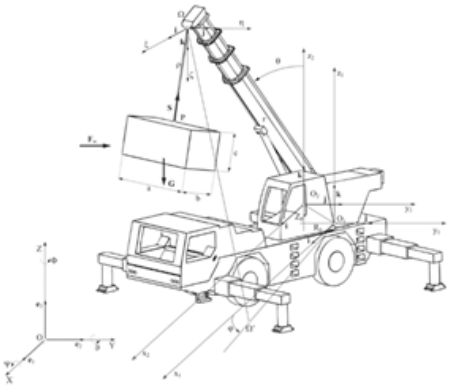
Từ năm 2005, cần cẩu được mô tả như hệ đa vật thể có khớp quay và cần ống lồng. Hệ có ba bậc tự do chính:

- Góc quay θ_s (slewing);
- Góc nâng θ_l (luffing);
- Chiều dài ống lồng L.

Phương trình tổng quát:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = Q(t)$$

với $q = [\theta_s, \theta_l, L]^T$. Kacalak (2017) xây dựng phương pháp CAD/CAE để xác định vùng ổn định làm việc và chỉ số DSF (Dynamic Stability Factor) đánh giá nguy cơ lật [Kacalak, Transport Problems, 2017]. ☞



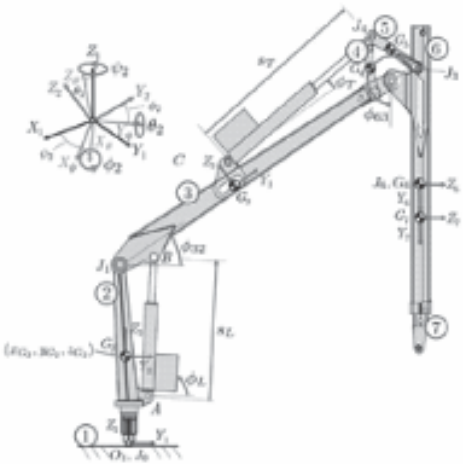
Hình 2. Sơ đồ động lực học cần cẩu ống lồng ba bậc tự do (Nguồn: Kacalak et al., 2017)

2.3. Mô hình linh hoạt và khớp đàn hồi

Khi chiều dài cần lớn hoặc tải trọng nặng, cần được xem như thanh đàn hồi chịu uốn, dao động có dạng mode riêng:

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = q(x,t)$$

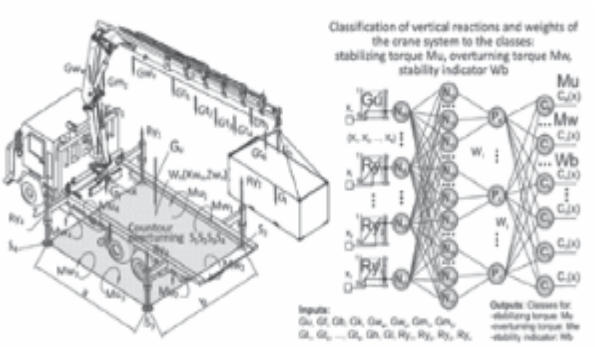
Chalermpong (2020) áp dụng phương pháp "Floating Frame of Reference Formulation (FFRF)" kết hợp "Adaptive Modal Integration" để giảm bậc mô hình linh hoạt [Chalermpong, MoViC, 2020].



Hình 3. Mô hình linh hoạt cần cẩu di động (Nguồn: Chalermpong et al., 2020)

3. ẢNH HƯỞNG CỦA GIÓ VÀ DAO ĐỘNG TẢI

Gió ngang tạo moment lớn tại mối quay và gây dao động cộng hưởng. Cękuś et al. (2018) sử dụng mô phỏng CFD–PIV để xác định phân bố lực gió theo chiều cao cần cẩu. Nghiên cứu của Urbaś & Stadnicki (2022) chỉ ra rằng năng lượng dao động tải có thể tăng hơn 30 % khi có gió rối, làm giảm đáng kể ổn định hệ thống [Urbaś, Materials 2022].



Hình 4. Ảnh hưởng gió ngang đến chuyển động tải treo (Nguồn: Cękuś et al., 2018)

4. ỔN ĐỊNH VÀ AN TOÀN KẾT CẤU

Khả năng lật được đánh giá thông qua Moment chống lật (M_s) và Moment lật (M_l). Điều kiện an toàn:

$$M_s > M_l + M_d$$

Trong đó, M_d là moment động do tải chuyển động hoặc gió. Zhou et al. (2022) đề xuất phương pháp ZMP (Zero Moment Point) để tính ổn định chống lật; Jang et al. (2024) phát triển cảm biến đo điện trở nền nhằm dự báo nguy cơ mất ổn định chân chống [Zhou, DYNA 2022; Jang, Appl. Sci. 2024].



Hình 5. Sơ đồ phân bố phản lực chân chống và điểm moment bằng không (Nguồn: Zhou et al., 2022)

5. CÔNG NGHỆ GIÁM SÁT VÀ MÔ PHỎNG HIỆN ĐẠI

Công nghệ IoT và cảm biến thông minh cho phép giám sát tải, góc nâng, và lún nền theo thời gian thực. Liu et al. (2025) mô phỏng hệ rigid–flexible coupling cho cần cẩu turbine gió, cho thấy phản lực chân chống cực đại 520 kN khi vận hành gió 15 m/s. Công nghệ VR/AR và BIM cũng được sử dụng trong lập kế hoạch nâng/hạ nhằm dự đoán nguy cơ va chạm và lật đổ [Liu, JERR 2025; Arifin, Automation in Construction, 2021].

6. TỒN TẠI VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

1) Chưa có mô hình phi tuyến đầy đủ cho hệ cần – dây – nền – gió có tương tác lẫn nhau.

2) Thiếu dữ liệu thực nghiệm tại vùng nhiệt đới (gió rối mạnh, nền yếu).

3) Cần tiêu chuẩn hóa quy trình đánh giá ổn định động (DSF, ZMP) cho điều kiện Việt Nam.

4) Ứng dụng AI và học máy trong dự báo dao động và điều khiển tối ưu quỹ đạo nâng/hạ.

7. KẾT LUẬN

Trong 30 năm qua, nghiên cứu về cần cẩu di động đã chuyển từ mô hình tuyến tính đơn giản sang mô hình phi tuyến linh hoạt đa tương tác. Sự phát triển của các phương pháp mô phỏng, cảm biến và trí tuệ nhân tạo đang mở ra hướng mới cho việc điều khiển thông minh và đảm bảo an toàn động lực học. Đối với Việt Nam, việc kết hợp mô phỏng động lực học với dữ liệu thực tế từ công trường sẽ là hướng nghiên cứu khả thi và cần thiết trong thập kỷ tới.❖

Ngày nhận bài: **29/10/2025**
Ngày phản biện: **07/11/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Fujioka D., Rauch A., Singhose W.E. (2009), "*Tip-Over Stability Analysis of Mobile Boom Cranes with Double-Pendulum Payloads*". American Control Conference.

[2]. Kacalak W., Budniak Z., Majewski M. (2017), "*Crane Stability Assessment Method in the Operating Cycle*". Transport Problems.

[3]. Chalermpong K., Hara K., Yamaura H. (2020), "*Flexible Dynamics Model of a Mobile Crane Using Adaptive Modal Integration*". MoViC 2020.

[4]. Cękuś L., Kwiatoń P. (2018), "*Influence of Wind on the Movement of the Load Carried by Mobile Crane*". EngMech 2018.

[5]. Zhou Q., Li S., Wang H. (2022), "*Anti-Overturning Stability of Truck Cranes Based on ZMP Theory*". DYNA Journal.

[6]. Urbaś A., Stadnicki J. (2022), "*Kinetic Energy Indicators for Mobile Cranes under Wind Loads*". Materials.

[7]. Jang H., Lee H., Park J. (2024), "*Preventing Overturning of Mobile Cranes Using Electrical Resistivity Sensors*". Applied Sciences.

[8]. Liu H., Zhang J. (2025), "*Dynamic Simulation Analysis of Wind Power Crane Multi-Body System*". Journal of Engineering Research and Reports.

[9]. Arifin A., Chen W. (2021), "*Integrating BIM and VR in Mobile Crane Lift Planning*". Automation in Construction.

[10]. Xu J., Zhuo Y., Qi Z., Wang G., Zhao T., Wang T. (2022), "*Instability Load Analysis of a Telescopic Boom for an All-Terrain Crane*". Mechanical Systems and Signal Processing, 13(2).

[11]. Yoon B.-J., Lee K.-S., Lee J.-H. (2021), "*Study on Overturn Proof Monitoring System of Mobile Crane*". Applied Sciences, 11(15):6819. https://doi.org/10.3390/app11156819

[12]. Alyazidi N.M., Hassanine A.M., Mahmoud M.S., Ma'arif A. (2023), "*Enhanced Trajectory Tracking of 3D Overhead Crane Using Adaptive Sliding-Mode Control and Particle Swarm Optimization*". Journal of Robotics and Control (JRC).

[13]. Tong T.L., Ho M.-T., Dao H.H., Pham V.K., Minh D.D., Dao Q.T. (2024), "*Parameter Optimization of Sliding Mode Controller for Tower Crane Using Particle Swarm Optimization Algorithm*". Journal of Measurement, Control, and Automation.

[14]. Kang H., Gao J., Wang S., Zhou K., Huang C. (2025), "*Research on Stability of Tower Crane Based on ANSYS Software*". Frontiers in Computing and Intelligent Systems.

[15]. Bošnjak S., Zrnić N., Gašić V. et al. (2012), "*Dynamic Responses of Mobile Elevating Work Platform and Mega Container Crane Structures*". Advanced Materials Research, 562-564.

[16]. Wu J. (2019), "*Static Modelling and Stability Analysis of Non-Slewing Articulated Mobile Cranes*". Master's Thesis, University of Western Australia.

[17]. Qin T., Lu Y., Liu W. (2025), "*Influence of Cable Wind Ropes on Wind-Induced Response and Wind Vibration Coefficient of Tower Crane*". In ICACMVE 2024, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer.

[18]. Dutta S., Cai Y., Zheng J. (2023), "*Multi-objective Anti-swing Trajectory Planning of Double-pendulum Tower Crane Operations using Opposition-based Evolutionary Algorithm*". arXiv preprint. https://arxiv.org/abs/2305.18745

[19]. Vu M.N., Schwegel M., Hartl-Nesic C., Kugi A. (2022). "*Sampling-Based Trajectory (Re)planning for Differentially Flat Systems: Application to a 3D Gantry Crane*". arXiv preprint.

[20]. Musridhoi R.Z., Nugroho M.S. (2025), "*Analysis of Mobile Crane and Crawler Crane Lift Capacity in Steel Box Girder Type Bridge Construction*". Journal of Applied Civil Engineering and Practices.

[21]. Khairudin M. (2020), "*Dynamics System Analysis and Modeling on Crane Brand Three Dimensions (3D) with Loading Costs*". Jurnal Penelitian Saintek.

[22]. Lee S.W., Han D.S., Han G.J. (2006), "*The Structural Stability Analysis of an Articulation Type Container Crane Using Wind Tunnel Test*". Key Engineering Materials, 326-328.

[23]. Yang W., Gu M. (2010), "*A Method of Dynamic Modeling of a Large Floating Crane and its External Excitations*". Advanced Materials Research, 139-141.

[24]. Cękuś L., Kwiatoń P., Gnatowska R. (2019), "*Impact of Wind on the Movement of the Load Carried by Rotary Crane*". Applied Sciences, 9(18):3842.

[25]. Shi J., Hu M., Zhang Y., Chen X., Yang S., Hallak T.S., Chen M. (2024), "*Dynamic Analysis of Crane Vessel and Floating Wind Turbine during Temporary Berthing for Offshore On-Site Maintenance Operations*". Journal of Marine Science and Engineering, 12(8):1393. https://doi.org/10.3390/jmse12081393

[26]. Kwiatoń P., Cękuś D., Skrobek D., Šofer M., Poruba Z. (2024), "*Path Planning Optimization of the Load Transport Process Using Heuristic Algorithms*". Applied Sciences, 14(21):9940. https://doi.org/10.3390/app14219940

[27]. Tomasi I., Solazzi L. (2025), "*Dynamic Analysis of an Offshore Knuckle-Boom Crane under Different Load Application Laws*". Applied Sciences, 15(14):8100. https://doi.org/10.3390/app15148100

[28]. Zhang K., Niu W., Zhang K. (2025), "*Phase Plane Trajectory Planning for Double Pendulum Crane Anti-Sway Control*". Algorithms, 18(5):246. https://doi.org/10.3390/a18050246

[29]. Fan B. (2023), "*A Novel Trajectory Online Planning and Under-Actuated Control Method on Positioning and Anti-Swing for Bridge Cranes*". Journal of Vibration and Control. https://doi.org/10.1177/10775463221132334

[30]. Li F., Qian Y., Wu S. (2024), "*Self-Adapting Trajectory Tracking Control for Double-Pendulum Marine Tower Crane Considering Constraint Dead-Zone Against Seawave Disturbances*". Nonlinear Dynamics.

[31]. Shi H., Yao F., Yuan Z., Tong Y., Gang H. (2024), "*Nonlinear Coupled Tracking Controllers for Double-Pendulum and Gantry Cranes under Disturbance*". Automatica.

[32]. Lu K., Fang B., Sun N. (2022), "*Online Trajectory Planning for Three-Dimensional Offshore Boom Cranes*". Ocean Engineering.

[33]. Cękuś L., Kwiatoń P., Gnatowska R. (2024), "*Wind-Load Visualization and Trajectory Tracking of Mobile Cranes Using Real-Time Sensing*". Sensors.

[34]. Zhang Y., Liu J., Wang C. (2025), "*Machine Learning-Based Prediction of Crane Stability under Wind and Dynamic Loads*". IEEE Access.

INFLUENCE OF COCONUT OIL-BASED BIODIESEL-DIESEL BLENDS ON INJECTION TIMING IN MECHANICAL-INJECTION DIESEL ENGINES

ẢNH HƯỞNG CỦA HỖN HỢP DIESEL-BIODIESEL GỐC DẦU DỪA ĐẾN THỜI ĐIỂM PHUN TRONG ĐỘNG CƠ DIESEL PHUN NHIÊN LIỆU KIỂU CƠ KHÍ

Duong V. Nguyen[1], Khanh P. Nguyen[1], Tai T. Ngo[1], Hiep V. Tran[1], Thinh V. Le[2], Kien T. Nguyen[1], Phuong X. Pham[1,*]

[1]Le Quy Don Technical University

[2]Vietnam Naval Academy

**Email: duongnv@lqdtu.edu.vn*

ABSTRACT

This study investigates the influence of coconut oil-based biodiesel blends on start of injection timing (SOI) in a diesel engine equipped with a mechanically controlled fuel system. Experimental tests were conducted using a four-cylinder diesel engine, with SOI determined from high-pressure line pressure signals. Results show that increasing the biodiesel blending ratio consistently advances SOI due to the higher bulk modulus of biodiesel compared with fossil diesel. For instance, at IMEP = 0.35 MPa, SOI shifted from 14.3° before TDC (Diesel) to 14.6° (B10) and 14.7° (B30). Such shifts may significantly affect combustion characteristics and emissions, warranting careful consideration in biodiesel applications.

Keywords: *Biodiesel; Start of injection; Bulk modulus of compressibility.*

TÓM TẮT

Bài báo khảo sát ảnh hưởng của hỗn hợp biodiesel gốc dầu dừa đến góc phun sớm nhiên liệu (SOI) động cơ diesel trang bị hệ thống nhiên liệu kiểu cơ khí. Các thử nghiệm được tiến hành trên động cơ diesel bốn xi-lanh, với SOI được xác định từ tín hiệu áp suất đường ống cao áp. Kết quả cho thấy việc tăng tỷ lệ pha trộn biodiesel làm tăng SOI do mô đun khối biodiesel cao hơn diesel. Khi IMEP = 0,35 MPa, SOI = 14,3° trước ĐCT đối với diesel trong khi SOI = 14,6° với B10 và 14,7° với B30. Sự thay đổi SOI ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính cháy và phát thải, do đó cần cân nhắc kỹ lưỡng khi sử dụng biodiesel.

Từ khóa: *Biodiesel; Góc phun sớm nhiên liệu; Mô đun khối.*

1. INTRODUCTION

Biodiesel (B) is a renewable fuel extracted through the transesterification of vegetable oils or animal fats. It is highly valued for its environmental benefits, such as not contributing carbon dioxide to the atmosphere and reducing emissions compared to traditional diesel [1]. Additionally, B offers technical advantages like good lubricity, a high cetane number, and a high flash point [2, 3]. Due to its physicochemical properties being similar to those of fossil diesel, B is currently considered as an alternate for diesel engine [4].

Among various vegetable oil sources, coconut oil has been identified as a potential source for biodiesel production, especially in tropical regions [5, 6]. However, biodiesel (including coconut oil-based biodiesel) has different physical properties (viscosity, bulk modulus) compared to conventional diesel standards. This poses challenges related to injection timing, especially in engines using mechanical fuel injection systems. Fuel start of injection (SOI) or injection timing is a critical parameter in diesel engines, significantly affecting engine performance, combustion processes, and emissions [2, 3, 7, 8]. Previous studies have shown that biodiesel has a higher bulk modulus of compressibility than fossil diesel, which leads to faster transmission of pressure waves from the fuel pump to the injector, causing the injector to open earlier and thus changing the SOI in mechanical injection systems [9]. This change in SOI is one of the main reasons for increased NO_x emissions when using biodiesel [9].

This paper investigates the influence of coconut oil-based biodiesel-diesel blends on SOI in a diesel engine using a mechanical fuel injection system.

2. EXPERIMENTAL SETUP

The experimental system was set up as shown in Figures 1 and 2.

The engine used in the experimental system is a 4-cylinder diesel engine.

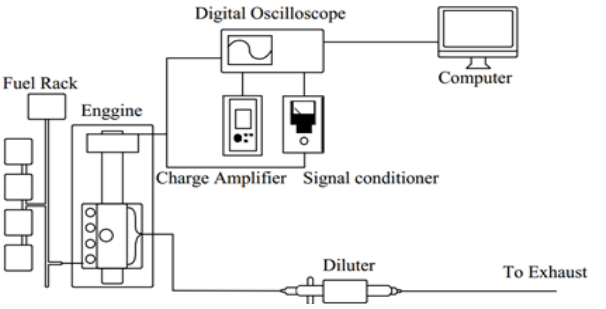


Figure 1. Engine testbed

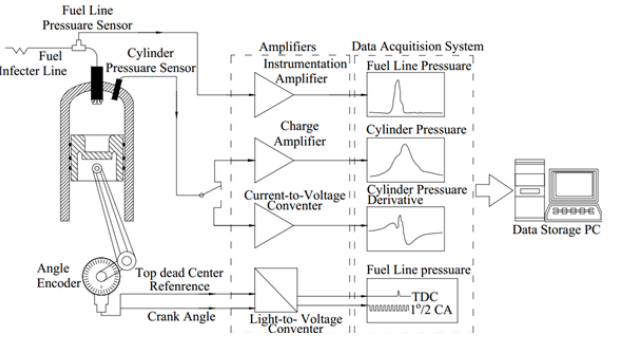


Figure 2. Signal recording and online processing

Crankshaft speed sensors, cylinder pressure sensors, and high-pressure fuel line pressure sensors were installed to collect signals sent to a computer for analysis via amplifiers and a data acquisition system. From the high-pressure line pressure profile, the SOI in mechanical fuel supply systems can be determined.

The physicochemical properties and composition of the tested biodiesel are presented in Table 1.

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

Table 1. Coconut-oil based biodiesel properties and constituents

	C1214	Diesel
Stoichiometric air fuel ratio	12.05	14.5
Relative Density [kg/m³]	0.871	0.848
Iodine Number	8	-
Cetane Number	69.8	48.5
Saponification Value	233	-
Boiling Point (°C)	>150	-
Bulk modulus [GPa] at 40°C	1.53	1.4
Viscosity (m²/s) at 40°C	2.40E-06	-
Higher Heating Value (HHV)	38.66	43.4

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Data Processing

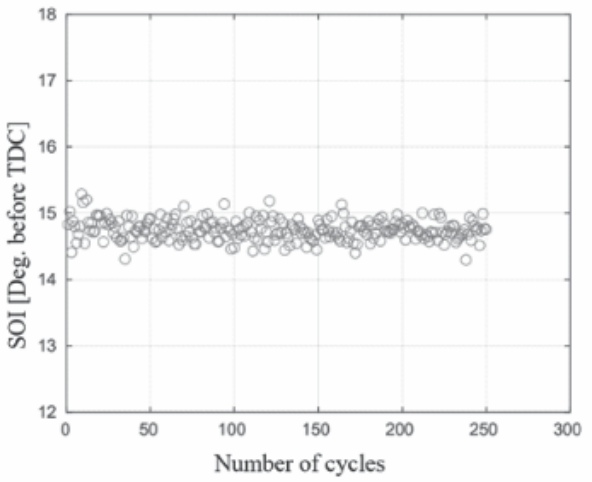


Figure 3. Example of SOI recorded for 250 cycles, D, 1500 rpm, IMEP = 0.38 MPa.

SOI data was recorded for 250 injection events at each test condition. Figure 3 shows the recorded SOI over 250 cycles at an engine speed of 1500 rpm and an indicated mean effective pressure (IMEP) of 0.38 MPa. The results in Figure 3 show the cycle-to-cycle variation of SOI. To determine the reliability of the injection timing results, the Coefficient of Variation of Injection Timing (CoV of InjT) was calculated and is shown in Figure 4. The results show that the CoV of InjT ranges from 1-2%, which is within the permissible range for cycle-to-cycle variation in diesel engines.

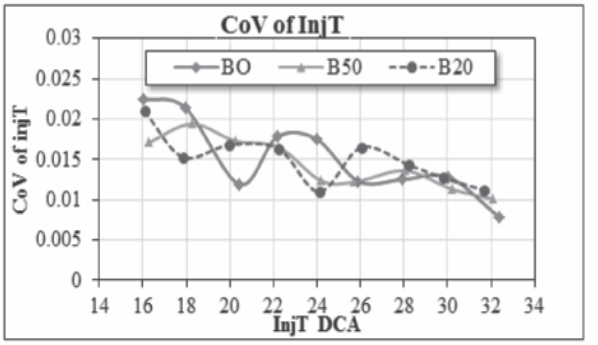


Figure 4. Coefficient of variation of SOI of diesel and biodiesel blends

3.2. Influence of Biodiesel-Diesel Blends on Injection Timing

Figure 5 illustrates the influence of biodiesel-diesel blending ratio on the SOI at different engine operating conditions. The results show that in all cases, increasing the biodiesel ratio leads to earlier SOI. This is because biodiesel has a higher bulk modulus than diesel. When blended, it increases the bulk modulus of the mixture, causing pressure waves to transmit faster from the fuel pump to the injector, and the injector opens earlier. At an IMEP of 0.35 MPa, the SOI for pure diesel is 14.3° before TDC, while for B10 and B30, it is 14.6° and 14.7° before TDC, respectively. Similarly, at an IMEP of 0.3 MPa, the SOI increased from 15.4° for B10 to 16.0° for B50. However, in the IMEP range of 0.3-0.55 MPa, SOI for B10 and B30 showed negligible changes. ☞

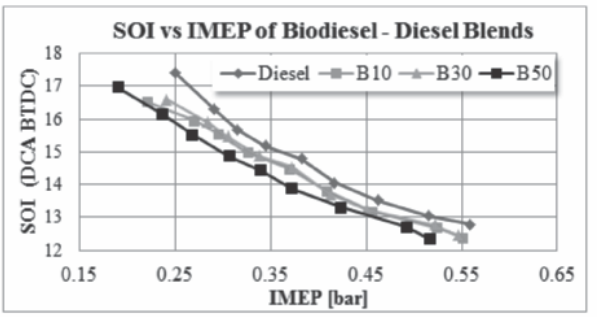


Figure 5. Fuel SOI versus injection timing of biodiesel-diesel blends

4. CONCLUSION

In conclusion, the experiments demonstrate that increasing the proportion of coconut oil-based biodiesel in diesel fuel advances SOI in mechanically controlled diesel engines. For instance, at IMEP = 0.35 MPa, the SOI shifted from 14.3° before TDC for pure diesel to 14.6° and 14.7° for B10 and B30, with a further advance to 16.0° for B50 at IMEP = 0.3 MPa. These shifts in SOI may significantly alter combustion behavior and emissions, highlighting the necessity of careful optimization when employing the blends in diesel engines.❖

References:

[1]. Zhang, Y., et al., "*A comprehensive review of the properties, performance, combustion, and emissions of the diesel engine fueled with different generations of biodiesel*". J Processes, 2022. 10(6): p. 1178.

[2]. Nghia, N.T., et al., "*A study the effect of biodiesel blends and the injection timing on performance and emissions of common rail diesel engines*". J Energies, 2021. 15(1): p. 242.

[3]. Jatadhara, G.S., et al., "*Effect of injection timing in direct injection diesel engine using plastic oil diesel blends with biodiesel as an additive*". J Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics Thermal Sciences, 2023. 101(2): p. 73-84.

[4]. Tat, M.E. and J.H. Van Gerpen, "*Physical properties and composition detection of biodiesel-diesel fuel blends. in 2002 ASAE Annual Meeting*". American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2002.

[5]. Kumar, G., et al., "*Continuous low cost transesterification process for the production of coconut biodiesel*". J Energies, 2010. 3(1): p. 43-56.

[6]. Adou, A.I., et al., "*Physicochemical Properties of Coconut and Waste Cooking Oils for Biofuel Production and Lubrication*". J Fuels, 2025. 6(3): p. 57.

[7]. Ahmed, S.A., et al., "*Influence of injection timing on performance and exhaust emission of CI engine fuelled with butanol-diesel using a 1D GT-power model*". J Processes, 2019. 7(5): p. 299.

[8]. Anggono, W., et al., "*Investigation of intake pressure and fuel injection timing effect on performance characteristics of diesel engine. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*". IOP Publishing, 2019.

[9]. Caresana, F., "*Impact of biodiesel bulk modulus on injection pressure and injection timing. The effect of residual pressure*". Fuel, 2011. 90(2): p. 477-485.

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION AND DECISION-MAKING IN ULTRASONIC VIBRATION-ASSISTED EDM OF HARDOX 500 USING NSGA-II COUPLED WITH SAW, MARCOS, AND TOPSIS

TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU VÀ RA QUYẾT ĐỊNH TRONG QUÁ TRÌNH GIA CÔNG XUNG ĐIỆN THÉP HARDOX 500 CÓ TRỢ GIÚP RUNG SIÊU ÂM SỬ DỤNG THUẬT TOÁN NSGA-II KẾT HỢP VỚI CÁC PHƯƠNG PHÁP SAW, MARCOS VÀ TOPSIS

Tran Huu Danh[1], Mai Tat Loi[2], Vu Ngoc Pi[3], Nguyen Manh Cuong[3,*]
[1]Vinh Long University of Technology Education (Long Chau ward, Vinh Long province)
[2]Vinh University of Technology Education (Truong Vinh ward, Nghe An province)
[3]Thai Nguyen University of Technology, Thai Nguyen University
**Email: nmcuong@tnut.edu.vn*

ABSTRACT

This paper presents a hybrid multi-objective optimization and decision-making framework for improving the performance of ultrasonic vibration-assisted electrical discharge machining (UV-EDM) of HARDOX 500 steel. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), assisted by Gaussian Process Regression (GPR) surrogate models, was employed to simultaneously maximize the material removal rate (MRR) and minimize the surface roughness (Ra). The resulting Pareto front demonstrated a clear trade-off between machining productivity and surface quality. To identify the most balanced solution among the Pareto-optimal points, three multi-criteria decision-making (MCDM) techniques – Simple Additive Weighting (SAW), Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution (MARCOS), and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) – were applied. The Spearman correlation analysis showed a perfect agreement between SAW and MARCOS ($\rho = 1.000$) and a high correlation ($\rho \approx 0.903$) between these two methods and TOPSIS. The integration of NSGA-II with comparative MCDM analysis provides a reliable and systematic approach for selecting optimal machining parameters, enabling enhanced efficiency and surface finish in UV-EDM of hardened steels.

Keywords: *Ultrasonic vibration-assisted EDM; HARDOX 500 steel; NSGA-II; Multi-criteria decision-making (MCDM); SAW-MARCOS-TOPSIS.*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày mô hình tích hợp giữa tối ưu hóa đa mục tiêu và ra quyết định nhằm nâng cao hiệu quả gia công của quá trình gia công xung điện có trợ giúp rung siêu âm (UV-EDM) trên vật liệu thép HARDOX 500. Thuật toán NSGA-II kết hợp với mô hình thay thế GPR được sử dụng để đồng thời tối đa hóa năng suất bóc tách vật liệu (MRR) và tối thiểu hóa độ nhám bề mặt (Ra). Đồ ☞

thị Pareto thu được thể hiện rõ sự đánh đổi (trade-off) giữa năng suất và chất lượng bề mặt. Nhằm lựa chọn nghiệm cân bằng tối ưu nhất trong tập nghiệm Pareto, ba phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) gồm SAW, MARCOS và TOPSIS đã được áp dụng. Kết quả phân tích tương quan Spearman cho thấy mức độ tương đồng tuyệt đối giữa SAW và MARCOS (ρ = 1.000) và tương quan rất cao (ρ ≈ 0.903) giữa hai phương pháp này với TOPSIS. Sự kết hợp giữa NSGA-II và phân tích MCDM so sánh đã chứng minh khả năng hỗ trợ ra quyết định hiệu quả, giúp lựa chọn bộ thông số UV-EDM tối ưu, qua đó cải thiện đồng thời năng suất và chất lượng bề mặt khi gia công thép có độ cứng cao.

Từ khóa: *Gia công tia lửa điện có hỗ trợ rung động siêu âm; Thép HARDOX 500; NSGA-II; Ra quyết định đa tiêu chí (MCDM); SAW-MARCOS-TOPSIS.*

1. INTRODUCTION

Ultrasonic vibration-assisted electrical discharge machining (UV-EDM) has emerged as an advanced hybrid machining process capable of improving the efficiency and stability of conventional EDM by superimposing high-frequency vibrations on either the tool or the workpiece. This technique effectively enhances debris removal, dielectric circulation, and discharge uniformity, leading to better surface quality and higher machining speed. Several researchers have investigated the fundamental mechanisms of debris motion, bubble dynamics, and spark discharge under ultrasonic assistance. For instance, Wang et al. [1] and Zhang et al. [2] reported that the introduction of longitudinal or torsional ultrasonic vibration significantly improves debris ejection in deep-hole EDM, suppressing taper and recast layer formation. Similarly, Chenxue et al. [3] observed the cavitation and bubble behavior generated during discharge, confirming the enhancement of dielectric flushing and discharge stability.

Further studies have developed novel ultrasonic vibration modes and tool designs to improve EDM performance. Yin et al. [4] proposed a longitudinal–torsional ultrasonic vibration (LTV) electrode configuration for micro-EDM, achieving more uniform spark distribution and reduced tool wear. Li et al. [5, 6] introduced a two-dimensional ultrasonic circular vibration (UCV) technique to enhance surface integrity and reduce micro-hole dimensional deviation. Hirao et al. [7] demonstrated that applying ultrasonic vibration to the tool electrode can substantially increase the material removal rate (MRR) by improving discharge frequency and stability. Lei et al. [8] further explored UV-EDM for enclosed microgrooves, achieving improved flushing efficiency and consistent micro-feature geometry. These studies collectively highlight the capability of ultrasonic vibration to overcome the limitations of debris stagnation and unstable discharge in conventional EDM.

Recent investigations have also extended UV-EDM applications to hard and difficult-to-machine materials. Han et al. [9] examined ultrasonic vibration-assisted powder-mixed EDM for TiN ceramics, observing enhanced MRR and improved micro-crack resistance. Dong et al. [10] employed vertical ultrasonic vibration in EDM and demonstrated its effect on discharge energy distribution and crater morphology, while Wang et al. [11] analyzed cavitation-induced surface generation mechanisms, emphasizing the dominant role of

ultrasonic amplitude in modifying the molten pool dynamics. Despite these advances, most existing studies have primarily focused on single-objective optimization – typically maximizing MRR or minimizing Ra – without addressing the multi-objective trade-off between productivity and surface quality that is critical for industrial UV-EDM of hardened steels.

To handle this trade-off effectively, evolutionary algorithms such as the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) have been increasingly adopted for multi-objective optimization in EDM and its hybrid variants. Xu et al. [12] successfully applied NSGA-II to optimize process parameters in ultrasonic vibration-assisted micro-EDM of Ti-6Al-4V, obtaining a well-distributed Pareto front between MRR and tool wear ratio. However, although such optimization methods can generate sets of non-dominated solutions, selecting the most appropriate solution from the Pareto front remains challenging. This decision-making stage requires systematic ranking techniques that can evaluate and prioritize the alternatives according to multiple conflicting criteria.

Multi-criteria decision-making (MCDM) methods, including Simple Additive Weighting (SAW), Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution (MARCOS), and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), have recently gained attention for post-Pareto evaluation and decision support in manufacturing optimization. However, their comparative consistency and reliability when applied to UV-EDM have not been systematically analyzed. This research gap motivates the present study, which aims to develop a hybrid NSGA-II–MCDM framework for optimizing and selecting the best machining parameters in ultrasonic vibration-assisted EDM of HARDOX 500 steel, targeting the simultaneous maximization of MRR and minimization of Ra.

In this study, Gaussian Process Regression (GPR) surrogate models were first constructed to predict MRR and Ra, followed by NSGA-II optimization to generate the Pareto-optimal front. The obtained solutions were subsequently ranked using SAW, MARCOS, and TOPSIS to determine the most balanced machining condition. Finally, a Spearman correlation analysis was performed to assess the consistency among the MCDM methods, ensuring the robustness of the decision-making results. The proposed approach provides a systematic and data-driven framework for multi-objective optimization and decision support in UV-EDM of hardened steels.

2. METHODOLOGY

2.1. Multi-objective optimization using NSGA-II

The NSGA-II is a population-based evolutionary algorithm widely employed for solving multi-objective optimization problems due to its ability to achieve both convergence and diversity within the Pareto front. In this study, NSGA-II was utilized to determine the optimal machining parameters of ultrasonic vibration-assisted EDM (UV-EDM) for HARDOX 500 steel with two conflicting objectives: maximizing the material removal rate (MRR) and minimizing the surface roughness (Ra).

The optimization process was implemented through the following main steps: ☞

1) Initialization: An initial population of candidate solutions was generated within the experimental design range of the input machining parameters (such as discharge current, pulse-on time, pulse-off time, and ultrasonic amplitude).

2) Fitness evaluation: The performance values of each candidate were predicted using Gaussian Process Regression (GPR)-based surrogate models developed for MRR and Ra.

3) Non-dominated sorting: All individuals were classified into multiple Pareto fronts according to the dominance relationship among solutions.

4) Diversity preservation: A crowding distance measure was calculated to maintain a well-distributed population along the front.

5) Genetic operations: Crossover and mutation operators were applied to generate new offspring from the parent population.

6) Selection: The combined parent and offspring populations were ranked, and the best individuals were selected based on Pareto rank and crowding distance.

7) Termination: The algorithm iteratively repeated these steps until the convergence criterion or the predefined number of generations was reached.

The final output of NSGA-II is a set of Pareto-optimal solutions representing the trade-off between the two objectives, providing the basis for subsequent decision-making analysis using MCDM techniques.

2.2. Multi-Criteria Decision-Making Methods: SAW, MARCOS, and TOPSIS

After obtaining the Pareto-optimal solutions from NSGA-II, a decision-making stage was performed to identify the most balanced machining condition among the non-dominated alternatives. For this purpose, three well-established and widely used multi-criteria decision-making (MCDM) techniques – SAW, MARCOS, and TOPSIS – were employed.

These MCDM methods share the same objective: to evaluate and rank the Pareto-optimal solutions based on multiple performance criteria (e.g., MRR as a benefit criterion and Ra as a cost criterion). The general procedure can be summarized as follows:

1) Normalization: Convert the performance values of each alternative into dimensionless form to allow comparison across criteria.

2) Weight assignment: Assign importance weights to each criterion according to their relative significance.

3) Computation of ranking indices: Aggregate the normalized and weighted criteria to compute a ranking score for each alternative.

4) Final ranking: Sort the alternatives from best to worst according to the computed scores.

The SAW method [13] is a simple additive approach based on the weighted sum of normalized criteria values. The MARCOS method [14] evaluates each alternative relative to both the ideal and anti-ideal solutions, allowing balanced ranking outcomes. The

TOPSIS method [15] determines the proximity of each alternative to the ideal and anti-ideal points in the decision space.

All three methods are well-recognized for their simplicity, stability, and interpretability. In the present study, they were applied independently to the Pareto solutions obtained from NSGA-II to support the final decision-making process. The detailed mathematical formulations of these MCDM methods are not presented here, as they are thoroughly described in the referenced literature [13-15].

3. EXPERIMENTAL WORK

All experiments were conducted on a Sodick A30 CNC EDM system modified to incorporate a high-power ultrasonic vibration module, as shown in Figure 1. The ultrasonic integration aimed to enhance spark stability, improve dielectric flushing, and facilitate effective debris removal during the machining of HARDOX 500 steel.

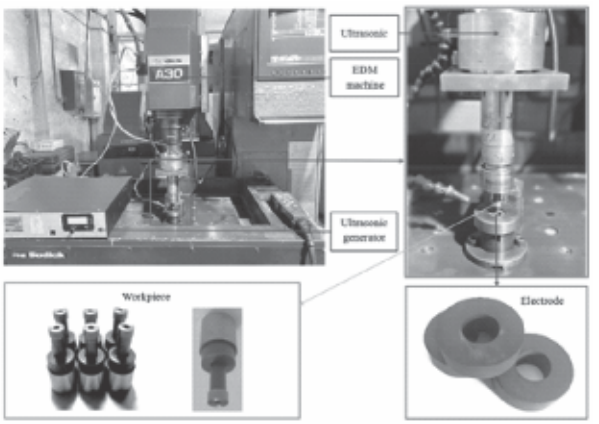


Figure 1. Experimental setup

Ultrasonic vibrations were supplied by an MPI WG-3000 generator (MPI Ultrasonics, Switzerland; 3000 W) and transmitted through an RPS-5020-4Z transducer operating at 20 kHz with a nominal power of 2000 W. A custom titanium horn was designed to efficiently transfer vibrational energy to the machining zone, ensuring stable oscillation at the tool–workpiece interface and uniform spark distribution.

The tool electrode was made of HK0 graphite, selected for its high electrical conductivity and wear resistance. The dielectric medium was Diel MS 7000 (Total, France), chosen for its stable discharge characteristics and high thermal endurance. The workpiece material was HARDOX 500, a quenched and tempered steel with superior hardness and abrasion resistance. Cylindrical specimens were used to maintain uniform flushing and surface measurement conditions.

Two output responses were evaluated: material removal rate (MRR) and surface roughness (Ra). MRR was determined by the gravimetric method using an analytical balance (resolution = 0.1 mg) according to:

$$MRR = \frac{m_{before} - m_{after}}{t} \cdot 3600 \quad (1)$$

Where m_{before} and m_{after} are the workpiece masses before and after machining (g), and t is the machining time (s). Each specimen was cleaned and dried before weighing to ensure measurement consistency.

Surface roughness (Ra) was measured using a Mitutoyo SV-3100 tester. Three readings were taken along the cylindrical surface of each specimen, and their mean value was reported as the representative Ra.

The experimental design followed the Box–Behnken Design (BBD), suitable for multi-factor response surface modeling with a reduced number of runs. Five input parameters ☞

were investigated – ultrasonic amplitude (A), pulse-on time (T_{on}), pulse-off time (T_{off}), discharge current (IP), and servo voltage (SV) – each at three levels (low, medium, high) determined through preliminary trials within the operating range of the machine.

The complete experimental matrix and measured responses (MRR and Ra) are summarized in Table 1.

Table 1. Experimental plan and output results (MRR and Ra)

No.	A (µm)	T_{on} (µs)	T_{off} (µs)	IP (A)	SV (V)	MRR (g/h)	Ra (µm)
1	1.2	8	12	10	5	3.346	3.353
2	1.2	16	12	10	5	1.482	6.569
3	5.2	8	12	10	5	3.119	3.198
4	5.2	16	12	10	5	1.228	5.711
5	3.2	12	8	5	5	1.210	7.220
…							
21	3.2	8	8	10	5	4.216	3.430
22	3.2	8	16	10	5	3.290	3.256
23	3.2	16	8	10	5	1.391	7.280
24	3.2	16	16	10	5	1.360	5.313
25	1.2	12	12	5	5	1.351	6.730
…							
44	3.2	12	12	10	5	3.799	5.032
45	3.2	12	12	10	5	3.764	5.455
46	3.2	12	12	10	5	3.775	4.785

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Multi-objective optimization results

The NSGA-II algorithm, assisted by GPR surrogate models, successfully generated a well-distributed Pareto front representing the trade-off between material removal rate (MRR) and surface roughness (Ra) in ultrasonic vibration-assisted EDM (UV-EDM) of HARDOX 500 steel. As shown in Figure 2, the Pareto front demonstrates an inverse relationship between the two objectives – an increase in MRR generally corresponds to a rise in Ra. This trend reflects the intrinsic machining trade-off in EDM: higher discharge energy enhances material melting and ejection, thereby improving productivity but simultaneously deteriorating surface finish.

The dispersion of Pareto-optimal points indicates that NSGA-II effectively maintained population diversity while converging toward the global Pareto front. The GPR-assisted approach proved computationally efficient and accurate, allowing reliable prediction of both objectives within the experimental domain. These results confirm the suitability of the NSGA-II–GPR framework for identifying balanced machining conditions in hybrid EDM processes.

The obtained Pareto solutions form the decision space for the next analytical stage, where multi-criteria decision-making (MCDM) methods are applied to determine the most favorable machining setting that simultaneously ensures high MRR and low Ra.

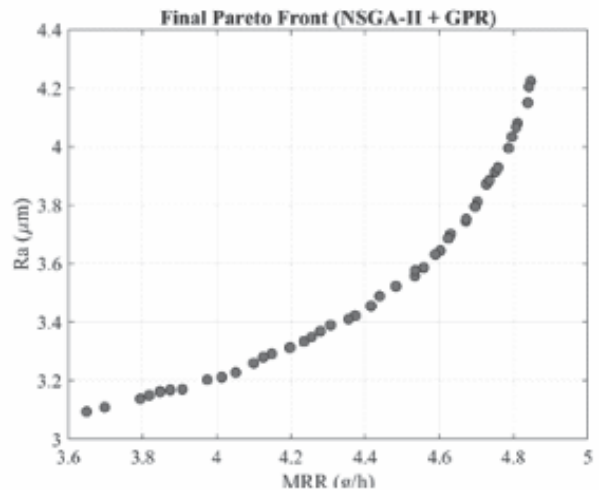


Figure 2. Pareto-optimal front obtained by NSGA-II for ultrasonic vibration-assisted EDM of HARDOX 500 steel

4.2. Comparative ranking using MCDM methods

Three established MCDM methods – SAW, MARCOS, and TOPSIS – were independently applied to rank the Pareto-optimal solutions based on the dual criteria of MRR (benefit) and Ra (cost). All three approaches successfully identified the top-performing alternatives, with minor variations in ranking order due to differences in their normalization and aggregation strategies.

To evaluate the consistency among the three methods, the Spearman rank correlation coefficients were computed and are presented in Figure 3. The results reveal perfect agreement between SAW and MARCOS (ρ = 1.000), indicating identical ranking patterns, while both exhibited strong correlation with TOPSIS ($\rho \approx 0.903$). This high degree of consistency confirms the robustness of the ranking process and demonstrates that all three MCDM techniques lead to comparable decision outcomes.

Among the methods, MARCOS showed superior interpretability in balancing the trade-off between MRR and Ra, while SAW offered the most computational simplicity. TOPSIS produced slightly different rankings due to its geometric distance-based formulation but remained in strong agreement with the other two approaches. The overall analysis verifies that the integration of NSGA-II with comparative MCDM methods provides a reliable framework for post-Pareto decision support in UV-EDM optimization.

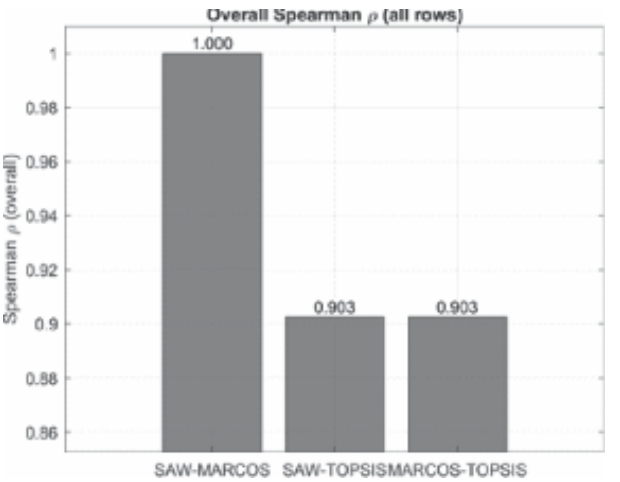


Figure 3. Spearman rank correlation coefficients among the three MCDM methods (SAW, MARCOS, and TOPSIS) applied to the Pareto-optimal solutions

Furthermore, all three MCDM methods – SAW, MARCOS, and TOPSIS – identified the same optimal solution from the Pareto front, confirming the strong consistency observed in the Spearman analysis. The selected optimal ☞

parameter combination was A = 4.17µm, T_{on} = 9.55µs, T_{off} = 8.00µs, IP = 11.71A, and SV = 5.36V, which yielded Ra = 4.22µm and MRR = 4.85g/h.

This convergence of results across all methods further validates the robustness of the proposed NSGA-II–MCDM framework and enhances confidence in the final decision-making outcome.

4.3. Discussion of optimal decision and process implications

The combined NSGA-II–MCDM framework enables a two-stage optimization strategy: NSGA-II efficiently generates the Pareto front, and MCDM methods refine the final selection according to specific performance priorities. The results highlight that ultrasonic vibration significantly improves EDM efficiency through enhanced debris evacuation and spark stability, allowing higher MRR values to be achieved without severely compromising surface integrity.

For practical implementation, the selected optimal condition – identified consistently by all three MCDM approaches – represents the most balanced trade-off between productivity and surface quality. The methodology established in this work provides a systematic, data-driven, and adaptable framework that can be extended to other hybrid or powder-mixed EDM processes involving multiple conflicting performance criteria.

5. CONCLUSION

This study proposed an integrated framework combining the NSGA-II and MCDM methods to optimize and select machining parameters in UV-EDM of HARDOX 500 steel. Two conflicting objectives – maximizing MRR and minimizing Ra – were simultaneously optimized using NSGA-II assisted by GPR surrogate models.

The algorithm effectively generated a well-distributed Pareto front representing the trade-off between productivity and surface quality. Subsequently, three widely used MCDM techniques – SAW, MARCOS, and TOPSIS – were applied to rank the Pareto-optimal solutions. Spearman correlation analysis indicated a perfect agreement between SAW and MARCOS ($\rho = 1.000$) and a high correlation with TOPSIS ($\rho \approx 0.903$), confirming the consistency and robustness of the decision-making process.

All three MCDM methods converged to the same optimal solution (A = 4.17µm, T_{on} = 9.55µs, T_{off} = 8.00µs, IP = 11.71A, SV = 5.36V), corresponding to Ra = 4.22µm and MRR = 4.85 g/h. This consistency validates the reliability of the proposed NSGA-II–MCDM integration in identifying balanced machining conditions.

Acknowledgments:

This work was supported by Ministry of Education and Training of Vietnam (MOET) through Project B2024-TNA-18.❖

References:

[1]. P. Wang et al., "*Debris motion and taper suppression in EDM deep hole machining assisted by longitudinal/torsional ultrasonic vibration*". Journal of Manufacturing Processes, vol. 133, pp. 798-810, 2025.

[2]. P. Zhang et al., "*Investigating mechanisms of debris removal in ultrasonic vibration-*

assisted EDM drilling". International Journal of Mechanical Sciences, vol. 279, p. 109486, 2024.

[3]. W. Chenxue, T. Sasaki, and A. Hirao, "*Observation of bubble behavior in EDM with ultrasonic vibration*". Procedia CIRP, vol. 113, pp. 267-272, 2022.

[4]. Z. Yin et al., "*A novel EDM method using longitudinal-torsional ultrasonic vibration (LTV) electrodes to improve machining performance for micro-holes*". Journal of Manufacturing Processes, vol. 102, pp. 231-243, 2023.

[5]. Z. Li, J. Tang, Y. Li, and J. Bai, "*Investigation on surface integrity in novel micro-EDM with two-dimensional ultrasonic circular vibration (UCV) electrode*". J Manuf Process 76: 828-840, ed, 2022.

[6]. Z. Li, J. Tang, and J. Bai, "*A novel micro-EDM method to improve microhole machining performances using ultrasonic circular vibration (UCV) electrode*". International Journal of Mechanical Sciences, vol. 175, p. 105574, 2020.

[7]. A. Hirao, H. Gotoh, and T. Tani, "*Some effects on EDM characteristics by assisted ultrasonic vibration of the tool electrode*". Procedia CIRP, vol. 68, pp. 76-80, 2018.

[8]. J. Lei, H. Shen, H. Wu, W. Pan, X. Wu, and C. Zhao, "*Ultrasonic vibration-assisted electrical discharge machining of enclosed microgrooves with laminated electrodes*". Journal of Materials Research and Technology, vol. 30, pp. 9521-9530, 2024.

[9]. J. Han, X. Gao, Y. Zhou, Z. Li, M. Gao, and Q. Zhang, "*Machining characteristics in ultrasonic vibration-assisted powder-mixed electrical discharge machining of TiN ceramics*". Ceramics International, vol. 50, no. 8, pp. 13478-13489, 2024.

[10]. Y. Dong, J. Liu, G. Li, and Y. Wang, "*Thermodynamic simulation modeling analysis and experimental research of vertical ultrasonic vibration assisted EDM*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 119, no. 7, pp. 5303-5314, 2022.

[11]. Y. Wang, L. Fan, J. Shi, Y. Dong, and Z. Fu, "*Effect of cavitation on surface formation mechanism of ultrasonic vibration-assisted EDM*". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 124, no. 10, pp. 3645-3656, 2023.

[12]. J. Xu, S. Xia, P. Yu, and M. Li, "*Multi-objective parameter optimization of ultrasonic vibration–assisted micro-EDM of Ti-6Al-4V alloys*". Journal of Vibration and Control, vol. 30, no. 7-8, pp. 1818-1828, 2024.

[13]. Sri, K.; Hartati, S.; Harjoko, A.; Wardoyo, R. Fuzzy, "*Multi-Attribute Decision Making (Fuzzy MADM)*". Graha Ilmu: Yogyakarta, Indonesia, 2006.

[14]. Stević, Ž.; Pamucar, D.; Puška, A.; Chatterjee, P., "*Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to Compromise solution (MARCOS)*". Comput. Ind. Eng. 2020, 140, 106231.

[15]. Hwang, C.-L., Y.-J. Lai, and T.-Y. Liu, "*A new approach for multiple objective decision making*". Computers & Operations Research, 1993. 20(8): p. 889-899.

DYNAMIC SURVEY OF AUTOMATIC GUNS WHEN MOUNTED ON MOBILE VEHICLES

KHẢO SÁT ĐỘNG LỰC CỦA SÚNG TỰ ĐỘNG KHI LẮP TRÊN PHƯƠNG TIỆN CƠ ĐỘNG

Lai Thanh Tuan
Military Technical Academy
Email: thanhtuan711@gmail.com

ABSTRACT

The article presents a survey model and research results on the dynamics of automatic guns when mounted on mobile vehicles. Based on the specific installation plan of the gun on the combat robot, authors has built a mathematical model describing the dynamics of the gun-carrier system when firing. Based on the system of differential equations of motion, combining the system of internal launch equations and the system of thermodynamic equations of the gas chamber, simulation calculations are conducted using Matlab software. The results obtained are the basis for making recommendations to improve the firing efficiency of automatic weapons when installed on mobile vehicles.

Keywords: *Combat robot; Dynamics; Automatic gun; Recoil reduction; Stability; Shooting accuracy.*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày mô hình khảo sát và kết quả nghiên cứu về động lực học của súng tự động khi lắp trên xe cơ động. Trên cơ sở phương án lắp súng cụ thể trên rô bốt chiến đấu, tác giả đã xây dựng mô hình toán học mô tả động lực học của hệ thống giá-súng khi bắn. Trên cơ sở hệ phương trình vi phân chuyển động, kết hợp hệ phương trình thuật phóng trong và hệ phương trình nhiệt động lực học buồng khí, tiến hành tính toán mô phỏng bằng phần mềm Matlab. Kết quả thu được là cơ sở đưa ra các khuyến nghị nhằm nâng cao hiệu quả bắn của vũ khí tự động khi lắp trên xe cơ động.

Từ khóa: *Robot chiến đấu; Động lực học; Súng tự động; Cơ cấu giảm giật; Ổn định; Độ chính xác bắn.*

1. INTRODUCTION

Nowadays, along with the advances of science and technology in all areas of social life, achievements in the field of military science have had many enormous applications, especially technologies that allow to minimize the presence of humans on the battlefield. Installing automatic guns on mobile vehicles (combat robots) is a trend to carry out tasks to ensure human safety in special combat spaces. In this case, factors related to the dynamics of the weapon-robot system must be taken into account when firing. The guns in current equipment mainly operate on the principle of gas extraction, so the connection between the gun and the robot is often through a recoil reduction mechanism. The structure of the recoil reduction mechanism ensures that the load acting on the stable mount when firing as well as ensuring the accuracy of the gun's shooting during combat.

2. COMBAT ROBOTS AND THE DYNAMICS OF AUTOMATIC GUNS WHEN MOUNTED ON COMBAT ROBOTS

2.1. Structure of the fighting robot

The combat robot consists of two main parts: the moving part and the weapon mounting part. To be highly effective in combat missions, the robot must ensure flexibility, the ability to move and maneuver well on complex terrain. In addition, to be able to fight effectively, the robot's weapon mounting part must have a reasonable structure, ensuring the stability of the weapon when firing. The remote-controlled combat robot uses a camera for automatic guns and is designed to include the following structural clusters (Figure 1): the vehicle body, gun mount, control and power block, remote loading and firing control mechanism cluster for machine guns and auxiliary equipment cluster.

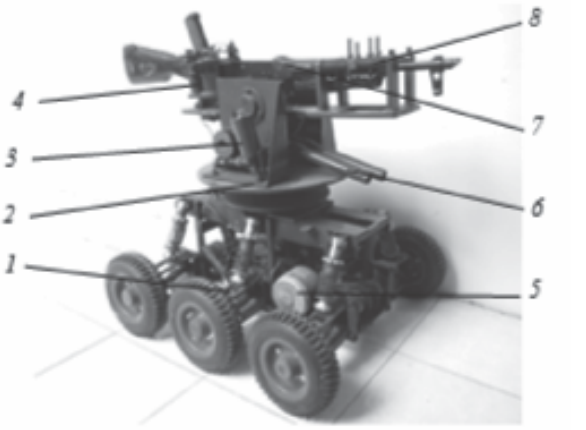


Figure 1. Mounting an AK submachine gun on a combat robot:
1 - Vehicle body; 2 - Gun mount; 3 - Rotation motor; 4 - Loading and firing assembly; 5 - Wheel drive motor; 6 - Balancing mechanism; 7 - AK submachine gun; 8 - Recoil reduction assembly

The body of the vehicle uses a reasonably structured frame system, ensuring rigidity. The robot moves on wheels to ensure high mobility and flexibility in use. The wheels are driven by electric motors, operating through relays that are remotely controlled by control signals from the command center.

The gun mount includes a recoil reduction mechanism connecting the dynamic part and the static part, a part connecting the gun to the mount, a mounting base for the target observation camera, a range-aiming part, a magazine and other mechanisms. The recoil reduction mechanism uses a recoil reduction spring with coplanar axes, parallel to the barrel axis. So the force of the shot through the recoil reduction mechanism is reduced, partly transmitted to the upper base and through two trough shafts acting on the lower base. The ☞

target observation camera mounting base is designed to be mounted on the mount to reduce the direct impact of the shot force and increase the stability of the camera during aiming. The vertical rotation mechanism is designed with a gear type, a toothed arc combined with a screw shaft, a worm gear. The horizontal rotation mechanism is a screw shaft, a worm gear with a dirt removal mechanism in type compression spring type. The vertical and horizontal rotation mechanism is controlled by electric motors with small module transmissions to help rotate in the vertical and horizontal smoothly.

In the control and power block, control relays, robot controllers and gun mount controllers are arranged along with motor amplifiers. The battery power supply is arranged in a separate compartment. The remote loading and firing control mechanism cluster for the machine gun is remotely controlled by control signals from the command center. The cluster of auxiliary equipment including remote target detection cameras, laser rangefinders, ballistic computers, control panels, multi-function displays, signal transmitters, etc. are arranged in the command center.

2.2. Dynamic model of automatic gun on combat robot

With the structure of the combat robot and the automatic gun based on the gas extraction principle, it is possible to build a physical model and a mathematical model of the system as an automatic gun system with the gas extraction principle linked to the mount through a recoil reduction mechanism (Figure 2) [1].

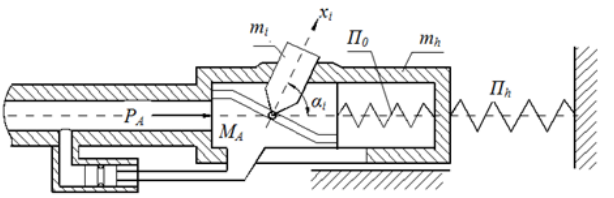


Figure 2. Schematic diagram of the working principle of an automatic machine based on the gas extraction principle with a recoil reduction mechanism mounted on a combat robot: P_A - Gas pressure; M_A - Breech mass; m_h - Breech block mass; Π_h - Potential energy of recoil reduction assembly; Π_0 - Potential energy of the spring; m_i - Mass of work parts; α_i - Angle between the direction of movement of the work parts and the barrel axis

Using the Lagrange equation of the second kind [2]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial q_i}+\frac{\partial \Pi}{\partial q_i}=Q_i \ , (j=1,2) \quad (1)$$

Where: T, Π - The kinetic and potential energy of the system; q_i, $\dot{q}_i$ - The extension coordinates and extension speed; Q_i - The extension force; t - Time; j - Number of degrees of freedom.

In extension coordinates, take $q_1 = x$ and $q_2 = x_h$.

Calculate the kinetic energy and potential energy of the system, then take the partial derivatives with respect to the corresponding variables and substitute into (1), we get the equation of motion of the system:

$$\left.\begin{aligned} M'_A+\dot{x}^2M_{qt}+M_\eta\ddot{x}_\eta=P'_A-C_Ax; \\ M_K\ddot{x}+\dot{x}^2M_i+M_h\ddot{x}_h=P'_h-C_hx_h. \end{aligned}\right\}$$

ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

In there:

$$M'_A = M_A + \sum_{i=1}^{n} \frac{K_i^2}{\eta_i} m_i;$$

$$M_h = M_A + m_h + \sum_{i=1}^{n} m_i;$$

$$M_{qt} = \sum_{i=1}^{n} \frac{K_i}{\eta_i} m_i \frac{dK_i}{dx};$$

$$M_\eta = M_A + \sum_{i=1}^{n} \frac{K_i}{\eta_i} m_i \cos\alpha_i$$

$$M_K = M_A + \sum_{i=1}^{n} K_i m_i \cos\alpha_i;$$

$$M_i = \sum_{i=1}^{n} K_i m_i \cos\alpha_i \frac{dK_i}{dx};$$

$$P'_A = P_A - \Pi_{A0} - \sum_{i=1}^{n} \frac{K_i}{\eta_i} P_i;$$

$$P'_h = P_h - \Pi_{h0} - \text{sign}x_h - F\text{sign}\dot{x}_h.$$

$$\text{sign}x_h = \begin{cases} 0 & \text{when} \quad x_h = 0, \\ -1 & \text{when} \quad x_h < 0, \\ 1 & \text{when} \quad x_h > 0. \end{cases}$$

$$\text{sign}\dot{x}_h = \begin{cases} 0 & \text{when} \quad \dot{x}_h = 0, \\ -1 & \text{when} \quad \dot{x}_h < 0, \\ 1 & \text{when} \quad \dot{x}_h > 0. \end{cases}$$

F - The friction force between the gun body and the slide on the robot's mount.

2.3. Simulation results and discussion

Simultaneously solving the system of differential equations of motion with the internal ballistic equation and the gas chamber thermodynamic equation, we get the result (Figure 3).

We perform calculations for the PKT machine gun with the input data: rear recoil spring stiffness C_g = 40000 N/m, initial compression x_{h0} = 11 mm, fire at gas port number 2. The results are: x_{hmax} = 6,1 mm, the duty cycle of the automatic machine T_{ck} = 76,42 ms is equivalent to the theoretical rate of fire of 735 rounds/min (The firing rate stated in the manufacturer's documentation is 700 - 750 rounds/min) [3, 4]. Thus, the structure of the combat robot ensures that it does not affect the gun's combat performance as well as the load acting on the mount (robot) within the allowable limits.

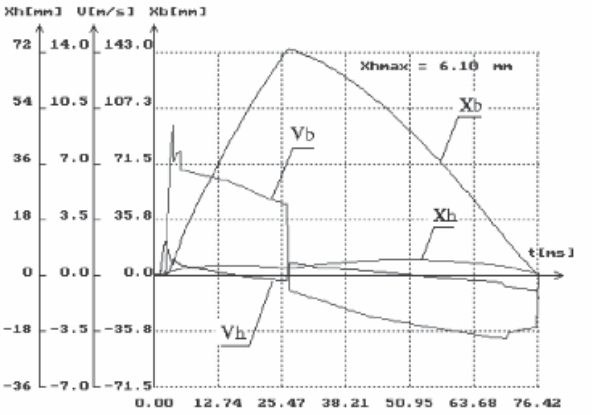


Figure 3. Law of motion of the breech block and the gun frame during the cycle of a shot:
X_b, V_b - The distance, velocity of movement of the breech block;
X_h, V_h - The displacement and velocity of the gun barrel block

3. CONCLUSION

When installing a gun on a mobile vehicle, a combat robot, to ensure the correlation between mobility and shooting accuracy, it is necessary to solve many problems in general. These problems include: the problem of ☞

increasing the capacity of the ammunition box, the ability to operate flexibly and remotely control the shooting of the robot, the problem of the load applied to the robot by the weapon when shooting... The content of the article only mentions a small part of the overall problem to ensure the stability of the weapon-robot system with the goal of ensuring the shooting accuracy of the entire system when shooting.❖

References:

[1]. Võ Ngọc Anh, "*Động lực học vũ khí tự động*". NXB. Học viện Kỹ thuật quân sự, 1995.
[2]. Phạm Huy Chương, "*Giáo trình cơ sở kết cấu và tính toán thiết kế máy tự động*". Học viện Kỹ thuật quân sự, 1998.
[3]. Phạm Huy Chương, "*Oerlikon sách tra cứu vũ khí*" (sách dịch). Học viện Kỹ thuật quân sự, 1998.
[4]. "*Hướng dẫn sử dụng súng PKMS*", Cục quân khí, Tổng cục Kỹ thuật.

DYNAMIC SIMULATION AND ANALYSIS OF BICYCLE FRAME USING LAPLACE TRANSFORM AND MATLAB SIMULINK

PHÂN TÍCH VÀ MÔ PHỎNG ĐỘNG LỰC HỌC KHUNG XE ĐẠP SỬ DỤNG PHÉP BIẾN ĐỔI LAPLACE VÀ MATLAB SIMULINK

Nguyen Khac Hai Long[1], Vu Truong Hy[2], Pham Huy Hoang[1,*]

[1]Faculty of Mechanical Technology, Ho Chi Minh University of Industry and Trade

[2]Vietnamese-German University

**Corresponding author email: hoangph@huit.edu.vn*

ABSTRACT

This article focused to the dynamic analysis of a bicycle frame including the simulation of the acting dynamic forces and the structural analysis of the frame. The dynamic forces from the road acting on the frame are determined from the equation of motion of Multi Degree of Freedom (MDOF) systems with MATLAB and the byke is considered moving on road with sinusoidal profile. The paper presents the following problems: the relationship between sinusoidal road profile and dynamic forces, natural frequencies and dynamic behaviors of the frame. Based on the results, we can determine the dynamic characteristics of the frame to avoid resonance and strengthen weak regions of it.

Keywords: *Bicycle Frame; Laplace transform; Simulation Analysis; Dynamic Analysis.*

TÓM TẮT

Bài báo nói về việc phân tích động lực học của khung xe đạp, bao gồm mô phỏng các lực tác động và phân tích kết cấu khung. Lực từ mặt đường tác động lên khung được xác định từ phương trình chuyển động của hệ thống nhiều bậc tự do (MDOF) dùng MATLAB, và xe đạp được coi là chuyển động trên mặt đường có dạng Sin. Bài báo trình bày các vấn đề sau: mối quan hệ giữa biên dạng mặt đường hình sin và các lực động, tần số riêng và phản ứng động lực học của khung xe. Dựa trên kết quả, chúng ta có thể xác định các đặc tính động lực học của khung để tránh cộng hưởng và gia cố các vùng yếu của khung.

Từ khóa: *Khung xe; Chuyển đổi Laplace; Mô phỏng; Phân tích động lực học.*

1. INTRODUCTION

This article presents the dynamic analysis using MATLAB. We have conducted research on bicycle frame based on differential equation system and MATLAB Simulink and Laplace transform method that are widely used to for modelling and simulation of dynamic systems.

Firstly, the differential equation system are established to describe dynamic motion on a road shaped as basic form as sinus, step and pulse. The shape of road has effect on the frame of bike. This effect is explored using dynamic analysis. This dynamic analysis with the dynamic force of the road surface acting on the vehicle is expected to see the maximum deformation and dynamic force of the road surface acting on the frame happened for mountain bike frame model.

2. REVIEW OF BICYCLE FRAME

The basic requirements for a bicycle frame are top tube, head tube, down tube, chain stays, seat stay, and seat tube. The double triangle shape of bicycle frame is known as a diamond frame. Various loads are acting on the different parts of a bicycle frame. In this study, the rider with 100 kg was considered to analyze the static and dynamic analysis of the alunimium alloy Al6061 T6 frame by FEM.

The material properties are shown in Table 1. The primary dimension of the bicycle frame are shown in Table 2. Figure 1 show the diagram of tube.

Table 1. Material properties

Aluminium Alloy 6061		
Data	Symbol	Value
Young's Modulus	E	70 GPa
Density	p	2700 kg/m³
Poisson's ratio	v	0.34

Table 2. Dimensions of main part

Part	**Length (mm)**	**Outer Diameter (mm)**	**Inner Diameter (mm)**
Top tube	50	40	38
Head tube	10	40	38
Down tube	60	40	38
Seat tube	40	40	38
Seat stays	45	20	0
Chain stays	42.5	20	0



Figure 1. Diagram of tube

3. METHOD AND IMPLEMENTATION

a. Analytical method – Differential equation

In this article, we use Laplace transform to analyze the behavior of Bicycle frame systems, such as structures' vibrations, the

pendulum's motion, and system dynamics.

It is used to solve partial differential equations. It transforms differential equations into algebraic equations, which are easier to solve.

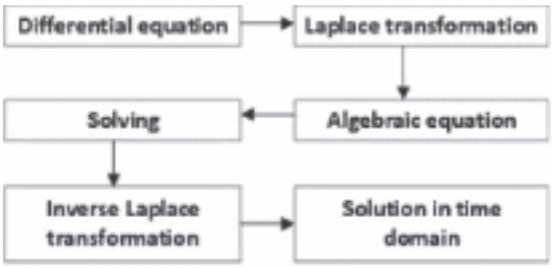


Figure 2. Laplace transform process

Mechanical dynamic system includes 3 basic elements:

- Inertia elements (mass, moment of inertia) store kinetic energy.

- Spring elements store potential energy. These elements relate with elastic force (or torque) obstructing deformation or displacement, restoring to non deformed state.

- Energy dissipating damper relates viscous friction resists motion.

The bicycle 4 DOF model consisting of front and rear absorbers shock, front and rear wheels system is illustrated as follows:

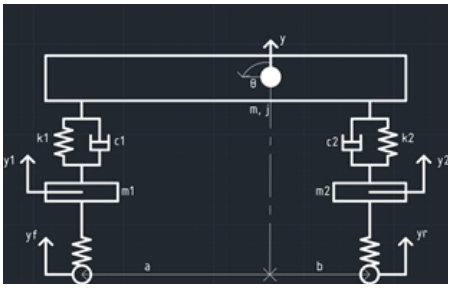


Figure 3. The 4 DOF bicycle frame

The fork with stiffness k_1, and damping coefficient c_1, on the other hand, k_2 and c_2 represent the stiffness and damping coefficient of the seat stays. The front wheel and rear wheels have the stiffness "k_f and k_r", respectively. The mass "m" is the mass of the frame and the driver, when mass "m_1, m_2" is the mass of front and rear wheels. "y_1 and y_2" are the displacements of the corresponding wheels, "y" is the displacements of seat position, "θ" is the rotation of seat place.

The free body diagram for 3 points mass:

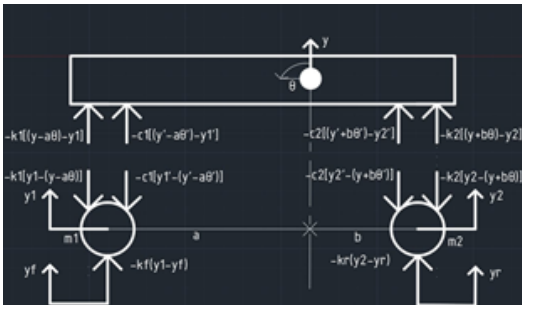


Figure 4. The free body diagram of 3 points mass

Apply the Newton II and Euler II laws, we get the equations of motion of 3 points mass:

$$m_1\ddot{y}_1 = -k_1(y_1-(y-a\theta)) - c_1\left(\dot{y}_1-(\dot{y}-a\dot{\theta})\right) - k_f(y_1-y_f)$$
$$m_2\ddot{y}_2 = -k_2(y_2-(y+b\theta)) - c_2\left(\dot{y}_2-(\dot{y}+b\dot{\theta})\right) - k_r(y_1-y_r)$$
$$m\ddot{y} = k_1(y_1-(y-a\theta)) + c_1\left(\dot{y}_1-(\dot{y}-a\dot{\theta})\right) + k_2(y_2-(y+b\theta)) + c_2\left(\dot{y}_2-(\dot{y}+b\dot{\theta})\right)$$
$$j\ddot{\theta} = -a\times[k_1(y_1-(y-a\theta)) + c_1\left(\dot{y}_1-(\dot{y}-a\dot{\theta})\right)] + b\times[k_2(y_2-(y+b\theta)) + c_2\left(\dot{y}_2-(\dot{y}+b\dot{\theta})\right)]$$

The equation of natural frequency ω_n and damping ratio ξ:

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{k\times m}} \quad (1)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

According to [10], the oscillation frequency for bicycle's wheels is $f_n = 40 \div 60$ Hz, which also equal to $\omega_n = 2\pi f_n = 250 \div 380$ rad/s. While the oscillation frequency for bicycle's frame is $f_n = 80 \div 90$ Hz, which is also equal to $\omega_n = 2\pi f_n = 500 \div 565$ rad/s.

In addition, when designing suspension system, the required damping ratio ξ must be inside the range $\omega = (0;1)$. However, to prevent the vibration suddenly disappeared, which should be against in vehicle suspension, the damping ratio is designed not too close to the value of 1.

To avoid resonance, the natural frequency for bicycle's front absorber shock and rear absorber shock must be differently chosen. Therefore, the natural frequency of $\omega = 500$ rad/s (front dropout), $\omega = 530$ rad/s (for rear dropout) and $\xi = 315$ rad/s (for bicycle's wheels) are chosen. Based on equation (2), the stiffness of front and rear wheels, dropouts can be found.

In this research, the damping ratio value of $\xi = 0{,}04$ is chosen. According to equation (1), the damping coefficient of front and rear dropouts can be defined.

After getting all value of parameters, we get the table bellow.

Table 3. Proposed input parameters

Name	Parameter	Value	Unit
Mass of front & rear wheels	m_1, m_2	1	kg
Mass of driver & bicycle frame	m	103	kg
Distance from sitting to front & rear wheels	a, b	0.3	m
Damping coefficient of the front & rear dropouts	c_1 c_2	4100 4400	Ns/m
Stiffness of the front & rear dropouts	k_1 k_2	260.000 290.000	N/m
Stiffness of the front & rear wheels	k_f k_r	63.000	N/m
Inertial moment of bicycle frame	j	20	kg.m²

From the system equations of motion of 3 points mass, we take a Laplace transform:

$$\xrightarrow{\mathcal{L}}$$

$$m_1 Y_1 s^2 = -k_1\left(Y_1 - (Y - a\theta)\right) - c_1\left(\dot{Y}_1 s - (Ys - a\theta s)\right) - k_f\left(Y_1 - Y_f\right)$$

$$m_2 Y_2 s^2 = -k_2\left(Y_2 - (Y + b\theta)\right) - c_2\left(\dot{y}_2 - (Ys + b\theta s)\right) - k_r\left(Y_1 - Y_r\right)$$

$$mYs^2 = k_1\left(Y_1 - (Y - a\theta)\right) + c_1\left(\dot{Y}_1 s - (Ys - a\theta s)\right) + k_2\left(Y_2 - (Y + b\theta)\right) + c_2\left(\dot{y}_2 - (Ys + b\theta s)\right)$$

$$j\theta s^2 = -a \times \left[k_1\left(Y_1 - (Y - a\theta)\right) + c_1\left(\dot{Y}_1 s - (Ys - a\theta s)\right)\right] + b \times \left[k_2\left(Y_2 - (Y + b\theta)\right) + c_2\left(\dot{y}_2 - (Ys + b\theta s)\right)\right]$$

After getting the algebraic equation above, we solving it by MATLAB software. We put 4 Laplace transformed equations into MATLAB and using the code to solve them in the Sinusoidal Road Profile situation:

```
%================================
% Data
%================================
m1 = 1;          %Mass of front wheel (kg)
m2 = 1;          %Mass of rear wheel (kg)
m = 103;         %Mass of bicycle frame (kg)
```


ISSN 2615 - 9910 (bản in), ISSN 2815 - 5505 (online)
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 335, tháng 11 năm 2025
cokhivietnam.vn

```
a = 0.9;          %distance from sitting to front
                  wheel (m)
b = 0.3;          %distance from sitting to rear
                  wheel (m)
c1 = 4100;        %damping coefficient of the
                  front absorber (Nm/s)
c2 = 4400;        %damping coefficient of the
                  rear absorber (Nm/s)
k1 = 260000;      %stiffness of the front absorber
                  (N/m)
k2 = 290000;      %stiffness of the rear absorber
                  (N/m)
kf = 66000;       %stiffness of the front wheel
                  (N/m)
kr=66000;         %stiffness of the rear wheel
                  (N/m)
j = 20;           %inertial moment of bicycle
                  frame (kg.m^2)
v = 5;            %velocity of bicycle (m/s)
%================================
% laplace transform differential equations
%================================
syms Y Y1 Y2 TETA s t
yf= 0.05/2*sin(2*pi*5*t);
[Yf]=laplace(yf)
yr= 0.05/2*sin(2*pi*5*t-v);
[Yr]=laplace(yr)
eq1 = m1*Y1*s^2 == -k1*(Y1-(Y-a*TETA))-
c1*(Y1*s-(Y*s-a*TETA*s))-kf*(Y1-Yf);
eq2 = m2*Y2*s^2 == -k2*(Y2-(Y+b*TETA))-
c2*(Y2*s-(Y*s+b*TETA*s))-kr*(Y2-Yr);
eq3 = m*Y*s^2 == k1*(Y1-
(Y-a*TETA))+c1*(Y1*s-
(Y*s-a*TETA*s))+k2*(Y2-
(Y+b*TETA))+c2*(Y2*s-(Y*s+b*TETA*s));
eq4 = j*TETA*s^2 == -a*(k1*(Y1-
(Y-a*TETA))+c1*(Y1*s-(Y*s-
a*TETA*s)))+b*(k2*(Y2-
(Y+b*TETA))+c2*(Y2*s-(Y*s+b*TETA*s)));
%================================
% solve the system of laplace equations
%================================
[Y,Y1,Y2,TETA] = solve(eq1,eq2,eq3,eq4,Y,Y
1,Y2,TETA)
%================================
% ilaplace equations
%================================
syms s t
[y]= ilaplace (Y)
[y1]= ilaplace (Y1)
[y2]= ilaplace (Y1)
[teta]= ilaplace (TETA)
%================================
%Plot the seat displacement
%================================
fplot(y)
title('seat displacement');
xlim([0 10])
xlabel('Time');
ylabel('m');
%================================
%Plot the seat acceleration
%================================
fplot(diff(y,2))
title('seat acceleration');
xlim([0 10])
xlabel('Time');
ylabel('m/s^2');
```

After run the MATLAB code, we can get the solutions for the equations of displacement of bicycle's wheels, seat position, etc. In this article, we pay more attention about seat displacement and seat acceleration so we plot it below.

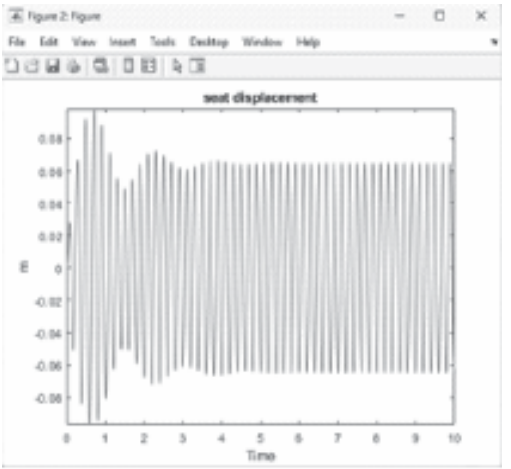


Figure 5. Seat displacement by MATLAB

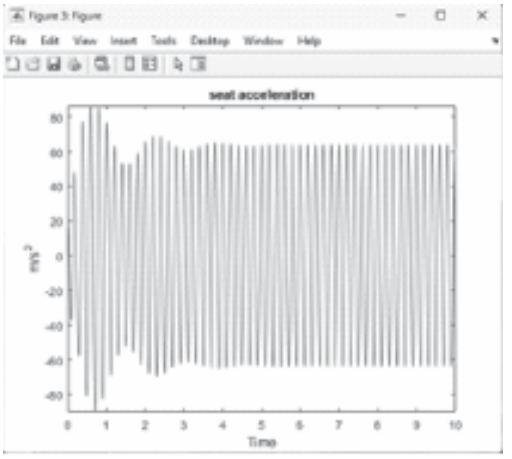


Figure 6. Seat acceleration by MATLAB

b. MATLAB Simulink method

Firstly, we consider the sinusoidal road profile, which means the vehicle is subjected under harmonic excitation. The sinusoidal road profile applied to the bicycle's wheel is determined by using equation according to [2]:

$$x_0(t) = \frac{d_2}{2}\sin\left(\frac{2\pi vt}{d_1}\right)$$

With d_1 and d_2 is the length and the height of the sine wave. In this simulation, the parameters of $d_1 = 1$m and $d_2 = 0.1$m are chosen. v = 5m/s denotes the velocity of the bicycle.



Figure 7. Set up for the Sinusoidal road profile

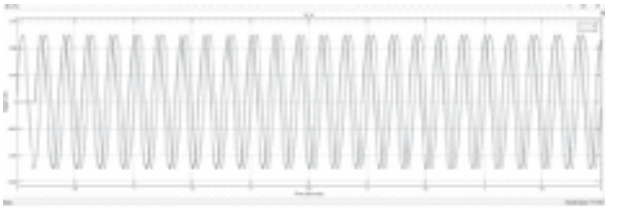


Figure 8. Sinusoidal road profile input signal

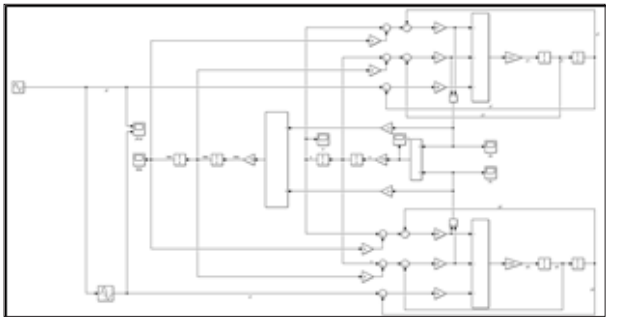


Figure 9. SIMULINK model

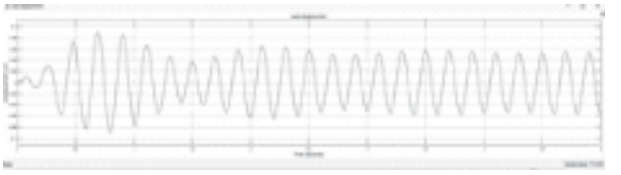


Figure 10. Seat displacement

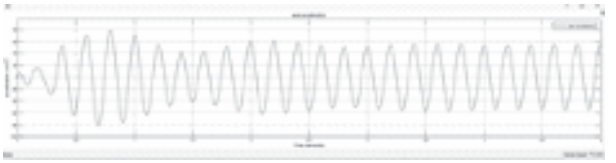


Figure 11. Acceleration of seat

4. CONCLUSION

After simulation, these above results prove that in harmonic excitation, the excitation is reduced during the time. As can be seen in figure 10, the maximum seat displacement is approximately 0.09m at t = 0.6s. Thanks to the damping ratio as well as damping coefficient, the seat displacement is reduced considerably. From 0s to 2.5s, seat displacement moves according to the natural nature of bicycle frame (natural frequency, damping ratio, etc.). After 2.5s, the seat displacement gradually becomes stable and become harmonic oscillation due to forced oscillation of the sinusoidal wave road profile, similarly for the remaining results. ❖

References:

[1]. Carolus Bintoro; Vicky Wuwung and Rady Suradi, "*Design and Construction of Mountain Bike Frame Using Solidworks Software and Matlab Simulink*". American Journal of Mechanical and Materials Engineering, May 22, 2023.

[2]. Trần, Nhân Hữu, "*Động lực học ứng dụng trong ô tô*". Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2022.

[3]. Nguyễn, Anh Tuấn, "*Simulation oscillation of active suspension system considering the effect of the hydraulic actuator*", 10 May 2022.

[4]. Carpenter, Scott, "*MATLAB/Simulink Simulation of Semi-Active Seat Suspension System with a Variable Flow Damper Valve*". Semi-Active Suspension System with M.R. Damper for Car Seat Vibration - A review, May 2019.

[5]. Ali Mohammadzadeh, Salim Haidar, "*On the Analysis and Design of Vehicle Suspension System Going over Speed Bumps*". American Society for Engineering Education, 2009.

[6]. A. Zainuddin, K.A.Z. Abidin, I. Ibrahim & M.S. Zakaria, "*Stress Analysis of the Personal Electric Vehicle Frame*". Conference Paper, June 2012.

[7]. Josef Viellehner, and Wolfgang Potthast, "*Upper body vibration transmission in cycling*". 40th International Society of Biomechanics in Sports Conference, Liverpool, UK: July 19-23, 2022.

[8]. Klee, Harold, and Randal Allen, "*Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink*". CRC Press, 2021.

[9]. Jazaar, Reza N, "*Vehicle Dynamics: Theory and Applications*".

[10]. Jon Thornham, "*Natural Frequency: Does It Matter In Cycling*?", August 8, 2020.

[11]. "*SOLID187 Element Description*", Access from: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID187.html

[12]. "*SOLID186 Element Description*", Access from: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html

[13]. Vince Adams and Abraham Askenazi, "*Building Better Products with Finite Element Analysis*".

OPTIMIZATION AND CONTROL OF BRAKING SYSTEM FOR USING ARDUINO AND MATLAB

TỐI ƯU HÓA VÀ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHANH BẰNG ARDUINO VÀ MATLAB

Le Thuong Hien*, To Ngoc Thien
Electric Power University
*Email: hienlt@epu.edu.vn

ABSTRACT

This paper presents the design, modeling, and optimization of an anti-lock braking system (ABS) for the Vehicle, focusing on improving braking efficiency, stability, and safety. The study develops a mathematical model of vehicle braking dynamics, implements real-time control strategies using Arduino and MATLAB, and validates the performance through simulation and experimental testing. Optimization techniques are applied to achieve minimum stopping distance while ensuring vehicle stability under different road conditions. The results demonstrate that the proposed system significantly improves braking performance compared to conventional methods.

Keywords: *Anti-lock braking system; Optimization; Arduino; Braking control.*

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày thiết kế, mô hình hóa và tối ưu hóa hệ thống chống bó cứng phanh (ABS) cho xe ô tô, tập trung vào việc cải thiện hiệu quả phanh, độ ổn định và an toàn. Nghiên cứu phát triển một mô hình toán học về động lực học phanh của xe, triển khai các chiến lược điều khiển thời gian thực bằng Arduino và MATLAB và xác thực hiệu suất thông qua mô phỏng và thử nghiệm. Các kỹ thuật tối ưu hóa được áp dụng để đạt được khoảng cách dừng tối thiểu đồng thời đảm bảo độ ổn định của xe trong các điều kiện đường xá khác nhau. Kết quả chứng minh rằng hệ thống được đề xuất cải thiện đáng kể hiệu suất phanh so với các phương pháp thông thường.

Từ khóa: *Hệ thống chống bó cứng phanh; Tối ưu hóa; Arduino; Điều khiển phanh.*

1. INTRODUCTION

The braking system is a critical safety component in modern passenger vehicles. In conventional systems, wheel lock-up during emergency braking may result in loss of steering control and extended stopping distances [1]. To address this issue, anti-lock braking systems (ABS) were developed, which modulate brake pressure to maintain wheel slip within an optimal range [2].

In this study, a widely used passenger car in Southeast Asia, is selected as the reference model. The aim is to optimize its braking system using modern control techniques combined with hardware implementation via Arduino and real-time simulation in MATLAB. The novelty lies in integrating optimization algorithms with low-cost hardware to achieve performance close to commercial ABS solutions.

2. LITERATURE REVIEW

Vehicle braking dynamics have been extensively studied. Gillespie [3] and Wong [4] established fundamental vehicle dynamics, while Pacejka [5] introduced tire-road interaction models. Modern ABS control strategies include PID, fuzzy logic [9], sliding mode control, and model predictive control (MPC) [11].

Hardware-in-the-loop (HIL) simulations have been widely used to validate control algorithms. Pathak and Rathore [12] demonstrated ABS implementation with Arduino and Simulink. Chen et al. [13] proposed disturbance observer-based ABS control. However, limited work focuses on optimization applied specifically to passenger cars such as the vehicle.

3. METHODOLOGY

A. Vehicle Dynamics Model

The longitudinal dynamics of the vehicle are modeled as:

$$m\dot{v} = \sum F_x - F_{brake} - F_{res}$$

Where m is the vehicle mass, v is velocity, F_x is longitudinal tire force, and F_{brake} is braking force. Wheel slip ratio is defined as:

$$\lambda = \frac{v - r\omega}{v}$$

Where r is tire radius and ω is wheel angular speed. Optimal slip λ_{opt} is typically 0.15-0.2 [5].

B. Control Strategy

A slip-ratio based ABS controller is designed. The Arduino receives wheel speed data from Hall-effect sensors, computes slip ratio, and modulates solenoid valves via PWM signals to regulate hydraulic brake pressure.

C. Simulation Environment

MATLAB is used to implement vehicle dynamics and controller blocks. Communication with Arduino is established using Serial Receive/Send blocks [18]. Optimization is carried out by tuning PID/fuzzy parameters using Simulink's Optimization Toolbox.

4. EXPERIMENTAL SETUP

The experimental platform consists of: (1) Arduino Uno microcontroller; (2) Hall-effect wheel speed sensors; (3) Hydraulic brake ☞

actuator with solenoid valve; (4) DC motor driver for modulation; (5) MATLAB/Simulink for HIL simulation. The experimental platform was designed to validate the proposed ABS optimization strategy. A block diagram of the hardware components and control architecture is presented in Figure 1. In addition, the control algorithm was implemented in MATLAB for real-time communication with the Arduino. The Simulink model is illustrated in Figure 2, where Serial Receive and Send blocks enable bidirectional data exchange.

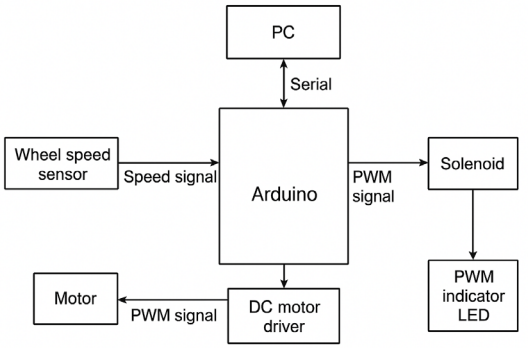


Figure 1. Arduino-based ABS control system block diagram

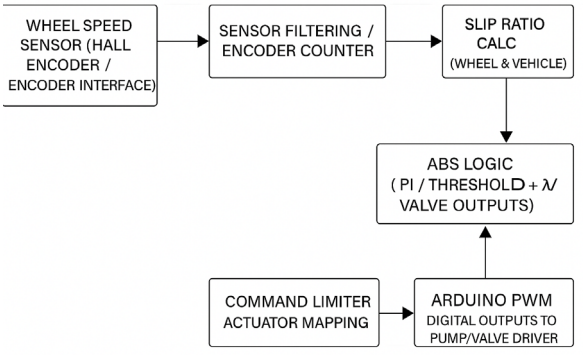


Figure 2. Simulink model for real-time ABS control with Arduino interface

5. RESULTS AND DISCUSSION

Simulation results demonstrate that the optimized ABS controller reduces stopping distance by approximately 15% compared to conventional braking under dry road conditions, and up to 25% on wet surfaces. Stability improvement is reflected in reduced yaw rate deviation.

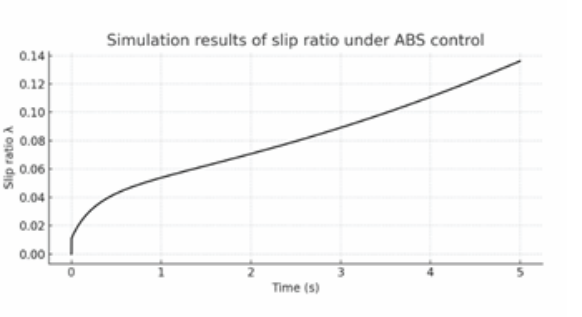


Figure 3. Simulation results of slip ratio under ABS control

The stopping distance and stability improvements are summarized in Table 1.

The proposed model was tested under various road conditions. As shown in Figure 3, the slip ratio was successfully maintained near the optimal value (0.2) during braking.

Experimental validation confirms that Arduino-Simulink implementation can effectively replicate ABS performance at low cost. These results align with previous studies [9], [12], [13], while providing specific optimization for vehicle.

Table 1. Comparison of braking performance

Condition	Conventional Braking	Optimized ABS	Improvement
Dry Asphalt	42 m	36 m	14.3%
Wet Asphalt	56 m	42 m	25.0%
Snowy Road	88 m	70 m	20.5%

6. CONCLUSION

This paper developed and validated an optimized ABS control system for vehilce using Arduino and MATLAB/Simulink. Results showed significant improvements in braking efficiency and vehicle stability. Future work will focus on real-vehicle testing and advanced optimization methods such as reinforcement learning.❖

References:

[1]. T. D. Gillespie, "*Fundamentals of Vehicle Dynamics*". SAE International, 1992.

[2]. J. Y. Wong, "*Theory of Ground Vehicles*", 4th ed.. Wiley, 2008.

[3]. R. Rajamani, "*Vehicle Dynamics and Control*". Springer, 2012.

[4]. R. N. Jazar, "*Vehicle Dynamics: Theory and Application*". Springer, 2017.

[5]. H. B. Pacejka, "*Tire and Vehicle Dynamics*", 3rd ed.. Elsevier, 2012.

[6]. ISO 22178:2009, "*Intelligent transport systems – Performance requirements for ABS*".

[7]. J. Ahn, S. Park, and H. Kim, "*Modeling and Simulation of ABS for Passenger Cars*". Int. J. Automot. Technol., vol. 12, no. 1, pp. 35-42, 2011.

[8]. Y. Zhao, X. Chen, and X. Xu, "*Design of Anti-lock Braking System Based on Fuzzy Control*". J. Mech. Sci. Technol., vol. 27, no. 5, pp. 1391-1398, 2013.

[9]. K. Çelik, "*Development of ABS Control System with Model Predictive Control*". Eng. Sci. Technol. Int. J., vol. 21, no. 1, pp. 14-23, 2018.

[10]. S. Pathak and A. Rathore, "*Hardware-in-the-Loop Simulation of ABS using Arduino and MATLAB/Simulink*". Int. J. Eng. Res. Technol., vol. 6, no. 5, 2017.

[11]. W. H. Chen, D. Williams, and L. Guo, "*Nonlinear Disturbance Observer-Based Control of Anti-lock Braking Systems*". IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 8, no. 4, pp. 581-593, 2000.

[12]. Toyota Motor Corporation, "*Toyota Vios Owner's Manual*". Toyota Press, 2021.

[13]. MathWorks, "*Simulink Support Package for Arduino Hardware*", 2023.

SIMULATION OF WASTE HEAT REUSE SYSTEM OF ELECTRIC CAR USING ARDUINO AND MATLAB

MÔ PHỎNG HỆ THỐNG TÁI SỬ DỤNG NHIỆT THẢI CỦA Ô TÔ ĐIỆN BẰNG ARDUINO VÀ MATLAB

Le Thuong Hien*, Hoang Van Luc
Electric Power University
**Email: hienlt@epu.edu.vn*

ABSTRACT

Electric vehicles (EVs) produce significant waste heat during battery operation. To improve energy efficiency and passenger comfort, this study proposes a waste heat reuse (WHR) system. A simulation-based model is developed using Matlab to evaluate cabin heating performance. Furthermore, an experimental setup with Arduino-based hardware is implemented to validate the concept. Results indicate that the proposed system effectively reuses waste heat, reduces external heating demand, and maintains passenger comfort within acceptable thermal ranges.

Keywords: *Electric vehicle; Waste heat recovery; Thermal management; Simulation.*

TÓM TẮT

Xe điện (EV) tạo ra lượng nhiệt thải đáng kể trong quá trình vận hành pin. Để cải thiện hiệu suất năng lượng và sự thoải mái cho hành khách, nghiên cứu này đề xuất một hệ thống tái sử dụng nhiệt thải (WHR). Mô hình mô phỏng được phát triển bằng Matlab để đánh giá hiệu suất sưởi ấm khoang xe. Đồng thời, thử nghiệm với phần cứng dựa trên Arduino được để kiểm chứng. Kết quả cho thấy hệ thống được đề xuất tái sử dụng nhiệt thải một cách hiệu quả, giảm nhu cầu sưởi ấm bên ngoài và duy trì sự thoải mái cho hành khách trong phạm vi nhiệt độ chấp nhận được.

Từ khóa: *Xe điện; Thu hồi nhiệt thải; Quản lý nhiệt; Mô phỏng.*

1. INTRODUCTION

Waste heat recovery (WHR) is a critical strategy to improve energy efficiency in electric vehicles (EVs). Unlike internal combustion engine vehicles, EVs do not generate sufficient waste heat from engines, but their battery packs and power electronics produce substantial thermal energy [1]. By reusing this energy to heat the cabin, the demand for auxiliary heaters can be reduced, extending EV driving range [2]. Previous studies have focused on thermal modeling [3, 4, 5, 6], but fewer works integrate both simulation and embedded control implementation.

This paper presents a hybrid approach: Octave-based simulation of EV-WHR performance, Arduino-based hardware validation with sensors and actuators and comparative analysis of cabin heating efficiency.

2. SYSTEM ARCHITECTURE

The proposed system consists of a coolant loop circulating between the battery pack and cabin heater core. A pump and solenoid valve regulate flow distribution, while temperature sensors monitor system performance.

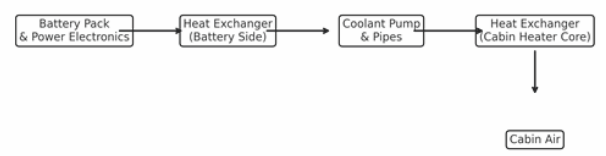


Figure 1. Illustrates the system block diagram

3. SIMULATION MODEL

The Matlab program was developed to simulate cabin heating dynamics.

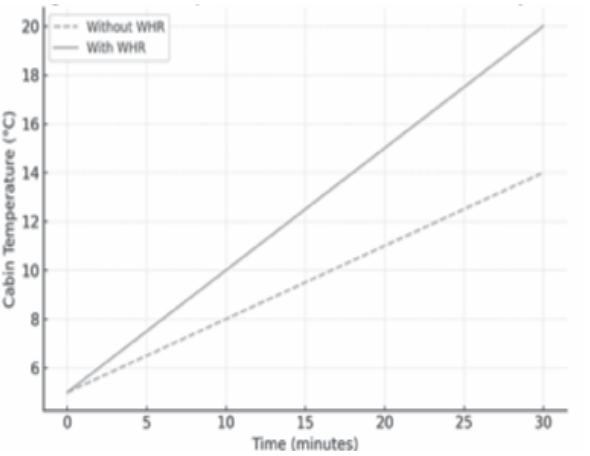


Figure 2. Cabin temperature rise with and without WHR integration.

The cabin was modeled as a thermal system with heat input from the coolant and losses to the environment. Results showed that with WHR, the cabin reached the comfort temperature (25°C) significantly faster, reducing the need for auxiliary heating.

4. ARDUINO-BASED EXPERIMENTAL SETUP

To validate the simulation, an Arduino-based experimental platform was built. Key components include:

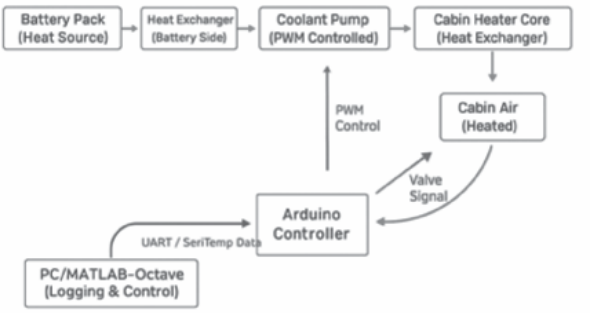


Figure 3. Presents the Arduino-integrated WHR system block diagram.

+ Sensors: DS18B20 for battery and cabin temperature, YF-S201 for coolant flow. ☞

+ Actuators: PWM-controlled pump, solenoid valve for bypass/cabin control.

+ Controller: Arduino UNO for sensor acquisition and actuator control.

+ Communication: Serial link with PC (MATLAB/Octave) for logging and control optimization.

The Arduino was programmed to regulate coolant flow based on cabin temperature setpoints. Data was transmitted to the PC for real-time visualization and comparison with simulation results.

5. RESULTS AND DISCUSSION

The results obtained from both simulation and experimental tests confirmed that the proposed Waste Heat Recovery (WHR) system can significantly improve cabin heating performance in electric vehicles by utilizing the otherwise wasted thermal energy generated by the battery pack.

5.1. Cabin Heating Performance

Simulation results based on the thermal resistance-capacitance (RC) network model indicated that, under a 2C discharge scenario, the battery generated sufficient waste heat to increase coolant temperature from 25°C to approximately 42°C within 8 minutes. This heated coolant was subsequently transferred to the cabin heater core, accelerating the rise in cabin air temperature.

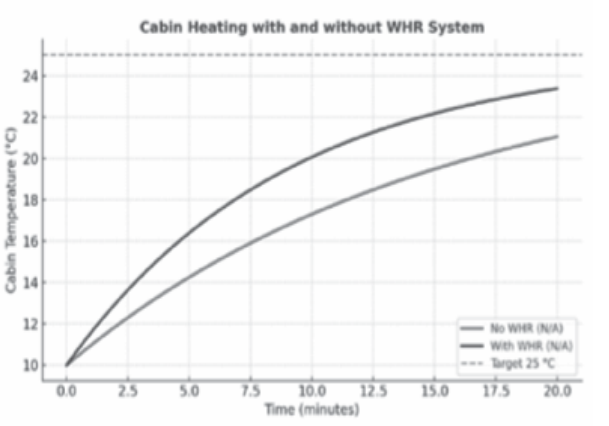


Figure 4. Cabin heat

Experimental measurements validated these findings. In the baseline case without WHR, the cabin air required approximately 15 minutes to reach 25°C from an initial 10°C ambient condition. In contrast, with WHR enabled, the cabin heating time was reduced by nearly 40%, achieving the same temperature in only 9 minutes. This improvement is consistent with previous studies that highlighted the potential of thermal integration to reduce auxiliary heating loads in EVs [1], [2].

5.2. System Control and Stability

The Arduino-based control system demonstrated reliable regulation of pump speed and solenoid valve switching. The PWM-controlled pump ensured stable coolant circulation, while valve actuation redirected flow efficiently between bypass and cabin modes. Cabin air temperature was maintained within ±2°C of the target setpoint, with minimal oscillations or overshoot. Importantly, the control overhead was negligible compared to the heating benefit, requiring less than 5 W of additional electrical power. These findings align with control strategies for low-power embedded thermal management reported in [3].

5.3. Energy Efficiency Implications

The integration of WHR reduced the reliance on electric resistance heaters, which are known to increase vehicle energy consumption by up to 30% during winter operation [4]. By reusing waste battery heat, the system effectively extended driving range while ensuring passenger comfort. The experimental results indicate that WHR can save approximately 0.8-1.0 kWh per 100 km in cold-weather driving scenarios.

Overall, both simulation and experimental results validate the proposed WHR concept as an effective strategy for improving thermal comfort and energy efficiency in electric vehicles. The close agreement between model predictions and hardware outcomes also confirms the accuracy of the adopted thermal modeling approach.

6. CONCLUSION

This study proposed and validated a waste heat reuse system for EVs. Octave simulation and Arduino-based experimental results confirmed the system's effectiveness in improving cabin heating efficiency while reducing auxiliary energy demand. Future work will integrate advanced control strategies such as Model Predictive Control (MPC) and Reinforcement Learning (RL) for further optimization.❖

References:

[1]. M. Zhang, J. Xu, and Y. Wang, "*Modeling and Control of Automotive Thermal Management Systems*". Applied Thermal Engineering, vol. 185, pp. 116-128, 2021.

[2]. J. Kim, J. Oh, and H. Lee, "*Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles*". Applied Thermal Engineering, vol. 149, pp. 192-212, 2019.

[3]. H. Ji, B. Wu, Y. Li, and S. Liu, "*Review on thermal management systems of electric vehicles*". Energy Reports, vol. 6, pp. 101-115, 2020.

[4]. Y. Zhang, H. Li, and S. Wang, "*Waste heat recovery technologies in electric vehicles: A review*". Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 145, p. 111132, 2021.

[5]. K. Liu, Q. Xu, and W. Chen, "*Simulation of waste heat recovery system for electric vehicles*". Appl. Therm. Eng., vol. 132, pp. 619-628, 2018.

[6]. H. Kim, J. Lee, and M. Park, "*Experimental study of heat pump and waste heat recovery integration in EVs*". Int. J. Automot. Technol., vol. 21, no. 4, pp. 845-853

LILAMA 10 hoàn tất lắp đặt rotor Tổ máy số 2 Nhà máy Thủy điện Hòa Bình mở rộng: Bước tiến quan trọng hướng tới mục tiêu vận hành cuối năm 2025

Sáng ngày 07/10/2025, tại công trường Dự án Nhà máy Thủy điện Hòa Bình mở rộng, không khí làm việc khẩn trương và đầy quyết tâm bao trùm toàn bộ khu vực thi công. Dưới sự chỉ đạo sát sao của Tập đoàn Điện lực Việt Nam (EVN) và Ban Quản lý dự án Điện 1, Công ty Cổ phần LILAMA 10 (LILAMA 10) – đơn vị đảm nhiệm vai trò thi công chủ lực – đã chính thức hoàn thành việc lắp đặt thành công rotor Tổ máy số 2, đánh dấu một mốc kỹ thuật đặc biệt quan trọng, mở ra giai đoạn tăng tốc về đích của toàn bộ dự án.



Lắp đặt thành công rotor của Tổ máy số 2, với trọng lượng hơn 600 tấn.

Mốc kỹ thuật quyết định trong tiến độ tổng thể

Rotor của Tổ máy số 2, với trọng lượng hơn 600 tấn, là một trong những cấu kiện quan trọng nhất của hệ thống thiết bị cơ – điện tại nhà máy thủy điện. Sau khi được tổ hợp hoàn chỉnh, rotor phải đạt độ chính xác cao tuyệt đối để tương thích hoàn hảo với stator, tua-bin và các thiết bị phụ trợ, bảo đảm vận hành an toàn, ổn định và đạt hiệu suất tối ưu.

Đây là hạng mục đòi hỏi tay nghề kỹ thuật cao, khả năng kiểm soát sai số nghiêm ngặt và quy trình tổ chức thi công tiêu chuẩn quốc tế. Việc lắp đặt thành công rotor Tổ máy số 2 khẳng định năng lực của đội ngũ kỹ sư, công nhân LILAMA 10 trong việc triển khai các cấu kiện siêu trọng, siêu chính xác – điều chỉ có thể đạt được nhờ kinh nghiệm dày dặn qua nhiều dự án công trình nguồn điện lớn trên cả nước.

Sau cột mốc này, dự án sẽ bước vào giai đoạn lắp đặt thiết bị cơ – điện còn lại, chạy thử không tải và có tải, tiến tới vận hành thương mại Tổ máy số 2 trong tháng 12/2025 theo đúng cam kết với chủ đầu tư.

LILAMA 10 – Chủ lực thi công các hạng mục trọng yếu

Tại dự án thuỷ điện Hòa Bình mở rộng, LILAMA 10 đảm nhận một loạt các hạng mục phức tạp và then chốt. Phạm vi công việc trải rộng từ: Chế tạo và lắp đặt toàn bộ phần cơ khí thủy công; Chế tạo – lắp đặt tuyến ống áp lực có kích thước lớn, yêu cầu kỹ thuật cao; Thi công các thiết bị trọng yếu của nhà máy; Lắp đặt thiết bị cơ – điện; Tham gia hỗ trợ chạy thử và nghiệm thu.

Đây đều là những hạng mục đòi hỏi sự chuẩn xác tuyệt đối, tính an toàn cao và khả năng phối hợp nhịp nhàng giữa nhiều đơn vị. Trong suốt quá trình thi công, dù điều kiện địa hình phức tạp, không gian thi công hạn chế, liên tục chịu ảnh hưởng của thời tiết và yêu cầu kỹ thuật cực kỳ nghiêm ngặt, LILAMA 10 vẫn duy trì tinh thần làm việc khoa học, chủ động và hiệu quả. Công tác tổ chức sản xuất được triển khai theo mô hình quản trị hiện đại, bám sát tiến độ và đảm bảo tiêu chuẩn "3 đúng": đúng kỹ thuật – đúng chất lượng – đúng thời hạn.

Việc hoàn thành lắp đặt rotor đúng thời điểm không chỉ thể hiện nỗ lực vượt khó, mà còn chứng minh khả năng làm chủ công nghệ và kinh nghiệm thi công của LILAMA 10 trước những yêu cầu ngày càng cao của các dự án nguồn điện chiến lược.



Việc lắp đặt thành công rotor Tổ máy số 2 khẳng định năng lực của đội ngũ kỹ sư, công nhân LILAMA 10.

Dự án Thủy điện Hòa Bình mở rộng – Công trình trọng điểm của ngành năng lượng

Dự án Nhà máy Thủy điện Hòa Bình mở rộng có tổng mức đầu tư hơn 9.220 tỷ đồng, gồm hai tổ máy, mỗi tổ máy có công suất 240 MW, nâng tổng công suất của dự án lên 480 MW. Khi hoàn thành và đi vào vận hành, công trình sẽ bổ sung khoảng 488 – 490 triệu kWh điện mỗi năm cho hệ thống điện quốc gia, đặc biệt là trong mùa khô – thời kỳ thường xuyên xảy ra hiện tượng thiếu hụt nguồn cung.

Không chỉ nâng cao an ninh năng lượng quốc gia, dự án còn giúp tăng khả năng điều tiết hồ chứa, tối ưu vận hành hệ thống điện, giảm thiểu rủi ro tác động của biến đổi khí hậu, phát huy tối đa công suất các nhà máy thủy điện bậc thang trên sông Đà. Đây là dự án có ý nghĩa chiến lược trong bối cảnh Việt Nam đang chuyển dịch mạnh mẽ sang các nguồn năng lượng sạch, bền vững và giảm phát thải theo cam kết tại COP26. ☞

Việc hoàn thành lắp đặt rotor Tổ máy số 2 đồng nghĩa với việc tiến độ tổng thể đang tiệm cận những mốc quan trọng cuối cùng, tạo đà để cả hai tổ máy kịp vận hành thương mại trong năm 2025.

Khẳng định bản lĩnh và thương hiệu LILAMA 10 trong lĩnh vực năng lượng

LILAMA 10 từ lâu đã trở thành thương hiệu hàng đầu trong lĩnh vực xây dựng – lắp đặt các công trình công nghiệp, đặc biệt là công trình nguồn điện. Từ các nhà máy nhiệt điện, thủy điện đến các dự án hóa chất, dầu khí, hạ tầng công nghiệp nặng, đội ngũ kỹ sư, thợ lành nghề của LILAMA 10 luôn hiện diện tại những công trường đòi hỏi năng lực kỹ thuật phức tạp nhất.

Tại Hòa Bình mở rộng, LILAMA 10 tiếp tục khẳng định vị thế của nhà thầu tổng lắp máy hàng đầu thông qua chất lượng thi công, khả năng làm chủ tiến độ và tinh thần trách nhiệm cao. Mỗi mốc kỹ thuật được hoàn thành chính xác, an toàn là một minh chứng cho giá trị cốt lõi mà doanh nghiệp luôn theo đuổi: An toàn – Chất lượng – Tiến độ.

Đại diện LILAMA 10 cho biết: "*Sự kiện lắp đặt thành công rotor Tổ máy số 2 là thành quả của tinh thần đoàn kết, nỗ lực không ngừng nghỉ của tất cả cán bộ, công nhân viên trên công trường. Chúng tôi sẽ tiếp tục huy động tối đa nguồn lực, áp dụng công nghệ tiên tiến và tăng cường phối hợp với các đơn vị liên quan để đảm bảo Tổ máy số 2 về đích đúng cam kết*".

Việc LILAMA 10 hoàn thành lắp đặt rotor Tổ máy số 2 không chỉ thể hiện sự trưởng thành về công nghệ và tổ chức thi công, mà còn khẳng định vai trò của doanh nghiệp trong các công trình trọng điểm quốc gia. Khi Tổ máy số 2 đi vào vận hành cuối năm 2025, đó sẽ là dấu mốc quan trọng cho thấy nỗ lực của toàn ngành điện Việt Nam trong hành trình bảo đảm an ninh năng lượng, đồng thời là thành quả đáng tự hào của tập thể LILAMA 10 trên hành trình khẳng định thương hiệu trong lĩnh vực xây lắp công nghiệp.❖



Lãnh đạo, cán bộ và công nhân viên Công ty Cổ phần LILAMA 10 chụp ảnh lưu niệm sau khi rotor tổ máy số 2 được lắp đặt thành công.

PV.