

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT



BÁO CÁO HỌC THUẬT

NĂM HỌC 2025-2026

**NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ỨNG DỤNG HIỆU ỨNG SIÊU DẪN
TRONG VẬT LIỆU KIM LOẠI NHẪM NÂNG CAO HIỆU SUẤT
TRUYỀN NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY**

Người báo cáo: Bùi Hữu Nguyên

Đơn vị: Bộ môn Vật lý, Khoa Khoa học cơ bản

Hà Nội, 06/2025

MỤC LỤC

A. MỞ ĐẦU	1
I. Lý do chọn chủ đề báo cáo	1
II. Mục tiêu	4
III. Phạm vi nghiên cứu	4
IV. Phương pháp nghiên cứu	4
V. Bố cục báo cáo	4
B. NỘI DUNG BÁO CÁO	4
I. Đặc tính siêu dẫn của một số vật liệu YBCO, NbTi	4
II. Mô hình mô phỏng hệ thống truyền năng lượng không dây	7
IV. Kết quả và phân tích	8
C. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	12
D. TÀI LIỆU THAM KHẢO	13

A. MỞ ĐẦU

I. Lý do chọn chủ đề báo cáo

a) Tính cấp thiết của đề tài

Trong bối cảnh cuộc Cách mạng Công nghiệp 4.0, nhu cầu về năng lượng sạch và các phương thức truyền tải điện năng thông minh đang trở thành tâm điểm của cộng đồng khoa học toàn cầu. Công nghệ truyền năng lượng không dây (Wireless Power Transfer - WPT), kể từ khi được Nikola Tesla đề xướng và được hiện thực hóa mạnh mẽ bởi nhóm nghiên cứu của Kurs et al. (2007) [1] tại MIT thông qua hiện tượng cộng hưởng từ, đã mở ra một kỷ nguyên mới cho việc cung cấp năng lượng. Tuy nhiên, một trong những rào cản lớn nhất ngăn cản WPT thay thế hoàn toàn dây dẫn truyền thống chính là hiệu suất truyền tải ở khoảng cách xa và sự thất thoát năng lượng dưới dạng nhiệt. Các hệ thống WPT hiện nay chủ yếu sử dụng cuộn dây bằng đồng (Cu) hoặc bạc (Ag). Ở tần số cao (MHz), hiệu ứng bề mặt (skin effect) và hiệu ứng gần (proximity effect) làm gia tăng đáng kể điện trở thuần của cuộn dây, dẫn đến việc giảm hệ số phẩm chất (Quality Factor - Q) của hệ thống. Việc nghiên cứu ứng dụng vật liệu siêu dẫn – loại vật liệu có điện trở gần như bằng không khi đạt tới nhiệt độ giới hạn – không chỉ là một bước đột phá về mặt vật liệu học mà còn là giải pháp cốt lõi để tối ưu hóa hiệu suất truyền năng lượng lên mức tiệm cận tuyệt đối. Do đó, việc thực hiện đề tài này là hết sức cấp thiết nhằm đón đầu xu hướng công nghệ năng lượng tương lai.

b) Thực trạng và những hạn chế của vật liệu dẫn điện truyền thống

Hiệu suất của một hệ thống truyền năng lượng không dây phụ thuộc chặt chẽ vào hệ số liên kết (k) giữa các cuộn dây và hệ số phẩm chất (Q) của chúng. Theo công thức tính hiệu suất cực đại ($\eta_{\max}$) của hệ WPT sử dụng hai cuộn dây cộng hưởng:

$$\eta_{\max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{\left(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}\right)^2}$$

Trong đó, $Q_i = \omega L_i / R_i$. Đối với các vật liệu kim loại thông thường như đồng, điện trở R tăng tỷ lệ thuận với căn bậc hai của tần số do hiệu ứng bề mặt. Điều này giới hạn khả năng hoạt động của hệ thống ở dải tần số cao và làm giảm hiệu suất khi khoảng cách truyền tăng lên. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã chỉ ra rằng, ngay cả với các cấu trúc dây quấn phức tạp (Litz wire), tổn hao Ohmic vẫn chiếm tỷ trọng lớn trong tổng thất thoát năng lượng (Zhang et al., 2019) [2]. Bên cạnh đó, vấn đề nhiệt dư thừa trong quá trình truyền tải công suất lớn (như sạc xe điện EV) không chỉ làm giảm tuổi thọ linh kiện mà còn gây ra các rủi ro về an toàn cháy nổ. Điều này đặt ra yêu cầu cấp bách về việc tìm kiếm một loại vật liệu có khả năng dẫn dòng mật độ cao với tổn hao nhiệt tối thiểu.

c) Ưu thế của hiệu ứng siêu dẫn trong truyền năng lượng không dây

Vật liệu siêu dẫn, đặc biệt là các chất siêu dẫn ở nhiệt độ cao (High Temperature Superconductors - HTS) như YBCO hay NbTi, cho phép duy trì dòng điện với điện trở DC bằng không. Trong môi trường dòng điện xoay chiều (AC) dùng cho WPT, mặc dù vẫn tồn tại một lượng nhỏ tổn hao AC, nhưng giá trị này thấp hơn nhiều so với đồng truyền thống. Việc ứng dụng vật liệu siêu dẫn mang lại ba lợi thế chiến lược: Hệ số phẩm chất cực cao ($Q > 10^4$): So với cuộn dây đồng (thường có Q từ 100 đến 500), cuộn dây siêu dẫn có thể nâng cao giá trị này lên gấp hàng chục, hàng trăm lần. Điều này cho phép duy trì hiệu suất truyền cao ngay cả khi hệ số liên kết k rất nhỏ (khoảng cách xa). Mật độ dòng điện lớn: Cho phép thiết kế các hệ thống truyền tải công suất lớn với kích thước nhỏ gọn hơn nhiều so với hệ thống dùng kim loại thông thường. Khả năng hoạt động ở dải tần rộng: Giảm thiểu sự phụ thuộc vào các mạch bù phức tạp và nâng cao độ ổn định của hệ thống trước các tác động của môi trường ngoại vi. Nghiên cứu của Wang et al. (2014) [3] đã chứng minh rằng việc sử dụng cuộn dây YBCO ở trạng thái siêu dẫn hiệu suất cao hơn 13,58% so với cuộn dây đồng. Năm 2025, Zhao et al. [4] đã thử nghiệm hệ thống WPT sử dụng HTS tại 500 kHz với hiệu suất đạt 97,01% với công suất truyền 1,87 kW.

d) Lý do lựa chọn phương pháp nghiên cứu mô phỏng

Mặc dù vật liệu siêu dẫn có tiềm năng to lớn, nhưng việc thực nghiệm trực tiếp gặp nhiều khó khăn về chi phí vật liệu và hệ thống làm lạnh (cryogenic system) phức tạp. Vì vậy, nghiên cứu mô phỏng trên các phần mềm phần tử hữu hạn (FEA) như Ansys Maxwell, COMSOL Multiphysics hay sử dụng các thuật toán giải mã trên Python là bước đi tối ưu vì: Tối ưu hóa thiết kế: Mô phỏng cho phép khảo sát chính xác sự phân bố từ trường, dòng xoáy và tổn hao AC trên từng lớp vật liệu siêu dẫn mà không tốn kém chi phí chế tạo mẫu thử nhiều lần. Hiệu ứng siêu dẫn liên quan chặt chẽ đến các thông số như mật độ dòng tới hạn (J_c) và từ trường bề mặt. Mô phỏng giúp xác định các ngưỡng giới hạn để hệ thống hoạt động ổn định mà không bị mất tính siêu dẫn (quench). Tính linh hoạt: Dễ dàng thay đổi các thông số cấu hình (số vòng dây, khoảng cách, tần số, cấu trúc cuộn dây 4 cuộn) để tìm ra điểm tối ưu cho hiệu suất truyền năng lượng.

e) Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Về mặt khoa học: Đề tài góp phần làm sáng tỏ cơ chế tương tác giữa từ trường biến thiên và vật liệu siêu dẫn trong cấu hình truyền năng lượng không dây. Việc xây dựng mô hình mô phỏng chính xác sẽ là nền tảng lý thuyết quan trọng cho các nghiên cứu về vật liệu mới trong tương lai.

Về mặt thực tiễn: Kết quả của nghiên cứu có thể ứng dụng trực tiếp vào các lĩnh vực:

Giao thông vận tải: Sạc không dây công suất lớn cho xe điện (EV), tàu điện cao tốc, giúp giảm thời gian sạc và tăng quãng đường di chuyển.

Y tế: Cung cấp năng lượng cho các thiết bị cấy ghép nội tạng với sự sinh nhiệt cực thấp, đảm bảo an toàn cho cơ thể người.

Công nghiệp: Truyền năng lượng trong môi trường khắc nghiệt hoặc môi trường chân không, nơi việc sử dụng dây dẫn và bảo trì gặp khó khăn.

II. Mục tiêu

Phân tích hệ số truyền qua của hệ thống truyền năng lượng không dây khi sử dụng vật liệu kim loại ở trạng thái siêu dẫn.

III. Phạm vi nghiên cứu

Nội dung báo cáo tập trung nghiên cứu hệ thống truyền năng lượng không dây khi sử dụng vật liệu kim loại ở trạng thái siêu dẫn.

IV. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp tổng hợp, phân tích tính toán và mô phỏng.

V. Bố cục báo cáo

Bố cục báo cáo ngoài ba phần chính là phần mở đầu, phần nội dung và phần kết luận còn có mục lục và tài liệu tham khảo.

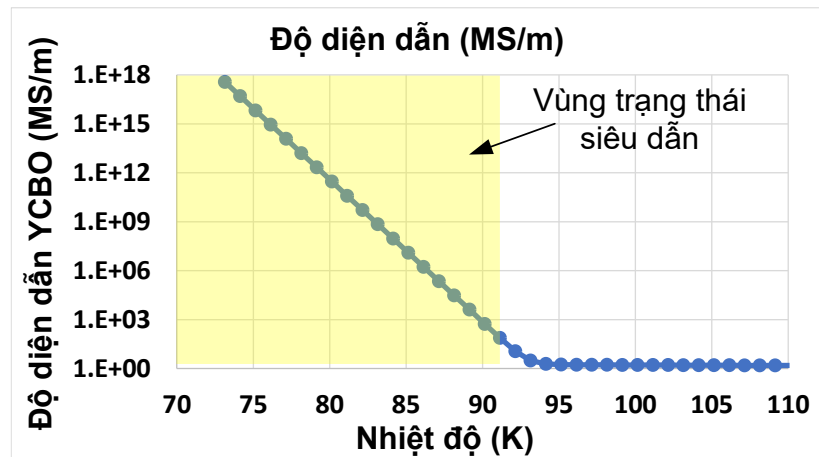
Phần nội dung có ba mục:

1. Mô phỏng cấu trúc WPT có các cuộn cộng hưởng sử dụng các loại vật liệu siêu dẫn khác nhau.
2. Kết quả và phân tích.
3. Kết luận.

B. NỘI DUNG BÁO CÁO

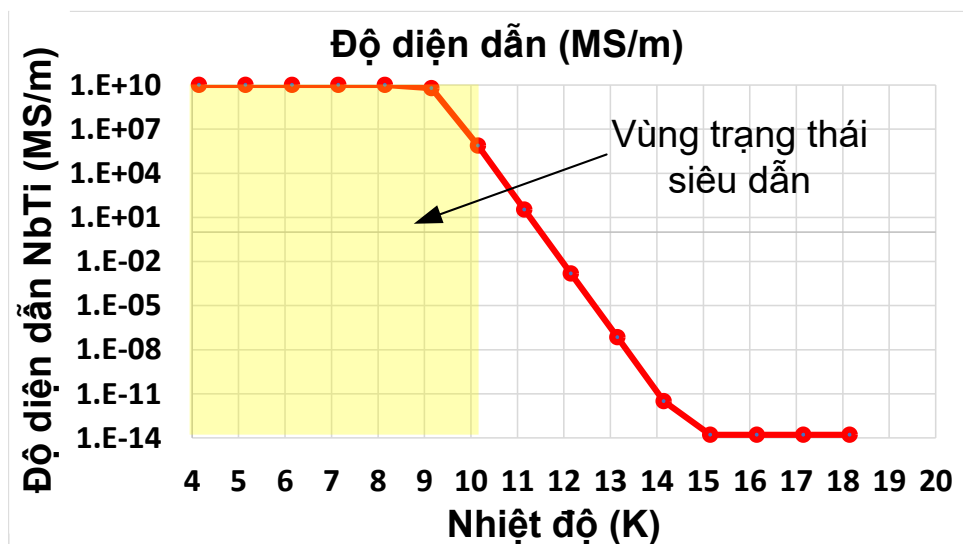
I. Đặc tính siêu dẫn của một số vật liệu YBCO, NbTi

Hình 1 mô tả sự phụ thuộc của độ dẫn điện (σ) theo nhiệt độ (T) của vật liệu YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) trên thang đo logarit. Kết quả cho thấy một quá trình chuyển pha điện từ trạng thái dẫn bình thường sang trạng thái siêu dẫn diễn ra tại vùng nhiệt độ tiệm cận 90 K. Trong vùng nhiệt độ từ 95 K đến 110 K, độ dẫn điện duy trì ở mức nền thấp và ổn định (khoảng 1 MS/m). Tuy nhiên, khi nhiệt độ giảm xuống dưới ngưỡng tới hạn $T_c \sim 92$ K, độ dẫn điện bắt đầu tăng vọt theo hàm số mũ.



Hình 1. Đặc tính độ dẫn điện của vật liệu YBCO theo nhiệt độ.

Đặc điểm đáng chú ý nhất của YBCO là giá trị độ dẫn điện đạt tới mức cực đại khoảng 10^{18} MS/m tại 73 K. Tốc độ tăng trưởng của σ trong vùng siêu dẫn (vùng màu vàng) diễn ra rất nhanh và liên tục, thể hiện sự nhạy bén đặc biệt của các cặp electron Cooper đối với nhiệt độ trong cấu trúc tinh thể gốm oxit đồng. Việc duy trì trạng thái siêu dẫn ở vùng nhiệt độ này cho phép sử dụng Nitơ lỏng làm môi chất làm lạnh, giúp tối ưu hóa hiệu quả kinh tế cho các ứng dụng thực tế như hệ thống truyền tải điện không dây hay các thiết bị hạn chế dòng ngắn mạch.

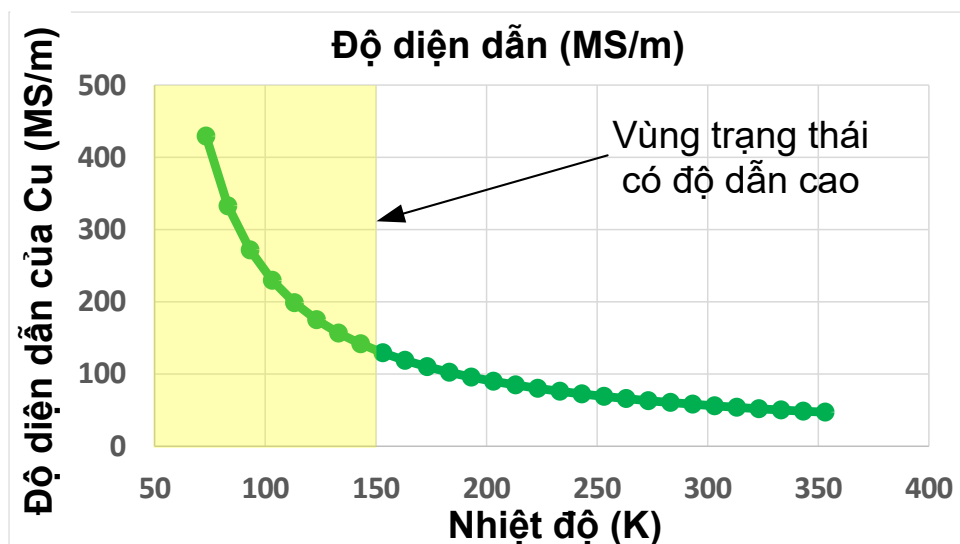


Hình 2. Đặc tính độ dẫn điện của vật liệu NbTi theo nhiệt độ.

Hình 2 trình bày đặc tính của hợp kim siêu dẫn **NbTi** (Niobium-Titanium) trong dải nhiệt độ cực thấp từ 4 K đến 18 K. Khác với YBCO, NbTi thể hiện một bước nhảy chuyển pha cực kỳ đột ngột và dứt khoát. Ở trạng thái bình thường

(trên 15 K), độ dẫn điện của vật liệu cực thấp, chỉ ở mức 10^{-14} MS/m. Khi nhiệt độ được làm nguội xuống dưới điểm tới hạn $T_c \sim 10$ K, độ dẫn điện tăng vọt qua hơn 20 bậc lũy thừa và nhanh chóng đạt trạng thái bão hòa ở mức 10^{10} MS/m.

Đồ thị cho thấy một vùng chuyển tiếp dốc đứng giữa 10 K và 15 K, nơi các tính chất điện từ của hợp kim thay đổi hoàn toàn. Một đặc điểm kỹ thuật quan trọng là sau khi đạt đến ngưỡng bão hòa tại khoảng 9 K, độ dẫn điện không tiếp tục tăng thêm mà duy trì ở mức hằng số 10^{10} MS/m cho đến 4 K (nhiệt độ của Heli lỏng). Điều này chứng tỏ NbTi có một trạng thái siêu dẫn cực kỳ ổn định, rất phù hợp để chế tạo các cuộn dây tạo từ trường cường độ cao trong máy chụp cộng hưởng từ (MRI) hoặc các máy gia tốc hạt, nơi sự ổn định của dòng điện là yếu tố tiên quyết.



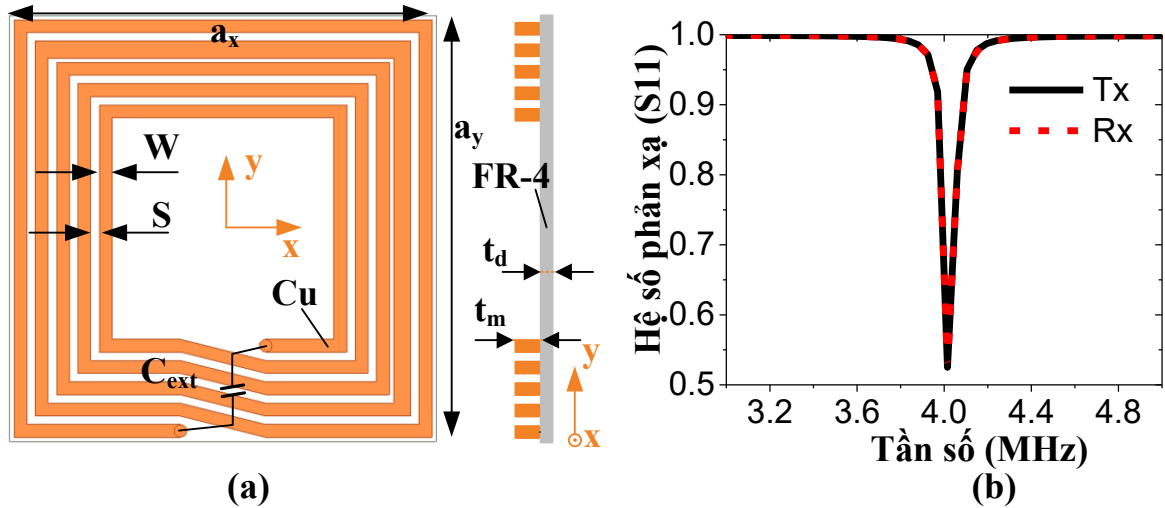
Hình 3. Đặc tính độ dẫn điện của vật liệu đồng (Cu) theo nhiệt độ.

Hình 3 cung cấp biểu diễn sự phụ thuộc của độ dẫn điện của đồng vào nhiệt độ trong dải từ 70 K đến 350 K. Khác với các vật liệu siêu dẫn, đồng thể hiện đặc tính của một **kim loại dẫn điện điển hình**: độ dẫn điện (σ) tăng dần khi nhiệt độ giảm nhưng không có sự nhảy vọt về pha. Ở nhiệt độ phòng (khoảng 300 K), độ dẫn điện của đồng đạt khoảng 58 MS/m. Khi làm lạnh xuống vùng 70-80 K, độ dẫn điện tăng lên mức hơn 400 MS/m, tức là tăng gấp khoảng 7-8 lần so với điều kiện tiêu chuẩn.

Nguyên nhân vật lý của hiện tượng này là do sự giảm rung động nhiệt của mạng tinh thể (phonon) khi nhiệt độ hạ thấp, làm giảm xác suất tán xạ của các electron dẫn. Tuy nhiên, đồ thị cho thấy độ dẫn điện của đồng có xu hướng tiệm cận một giá trị hữu hạn thay vì tiến tới vô hạn. Ngay cả trong “Vùng trạng thái có độ dẫn cao” (dưới 150 K), đồng vẫn duy trì một mức điện trở nhất định do các khuyết tật mạng tinh thể và tạp chất, điều này tạo ra sự khác biệt bản chất so với trạng thái siêu dẫn.

II. Mô hình mô phỏng hệ thống truyền năng lượng không dây

Hình 4(a) mô tả cấu trúc hình học của cuộn cộng hưởng phát Tx và cuộn cộng hưởng thu Rx. Hai cuộn Tx và Rx có kích thước giống nhau được cấu tạo từ hai lớp vật liệu là lớp kim loại đồng và lớp đế điện môi FR-4. Lớp kim loại cộng hưởng được cấu tạo từ các vật liệu khác nhau như: đồng (Cu), NbTi, YCBO, được chế tạo theo hình xoắn ốc vuông với 5 vòng dây, bề dày rộng $S = 2$ mm và bề dày là $t_m = 0.03$ mm. Lớp đế điện môi FR-4 có kích thước $a_x = a_y = 5$ cm, bề dày $t_d = 1$ mm. Hằng số điện môi của FR-4 là 4.4 và hệ số tổn hao là 0.002.

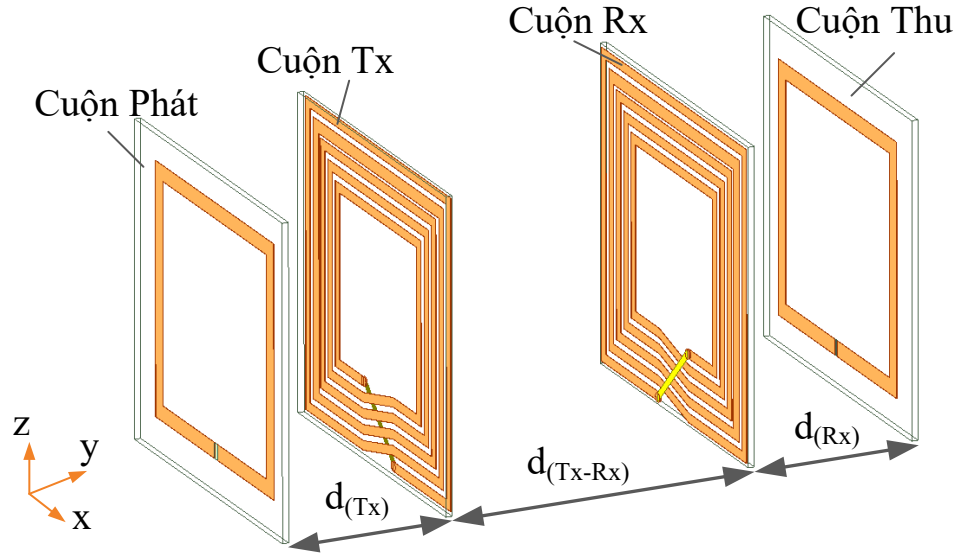


Hình 4. (a) cấu trúc hình học của cuộn Tx, và Rx, (b) phổ phản xạ của cuộn Tx và Rx.

Hình 4(b) mô tả phổ phản xạ của cuộn Tx và cuộn Rx. Kết quả cho thấy hai cuộn có cùng tần số cộng hưởng tại 4,02 MHz.

Hình 5 mô tả cấu tạo mô hình truyền năng lượng không dây sử dụng 4 cuộn dây. Hệ thống bao gồm: cuộn phát, cuộn cộng hưởng phát Tx, cuộn cộng hưởng

thu Rx và cuộn thu. Cuộn phát đóng vai trò ăng-ten phát công suất sóng điện từ tại tần số 4,02 MHz. Cuộn cộng hưởng Tx đóng vai trò khuếch đại năng lượng từ cuộn phát. Cuộn Rx nhận năng lượng từ cuộn Tx thông qua hiện tượng cộng hưởng từ tại tần số 4,02 MHz, năng lượng này được truyền tới tải thông qua cuộn thu. Khoảng cách giữa các cuộn dây $d_{(Tx)}$, $d_{(Tx-Rx)}$ và $d_{(Rx)}$ lần lượt là 1 mm, 50 mm, 1 mm.



Hình 5. Mô hình mô phỏng hệ thống WPT sử dụng 4 cuộn dây.

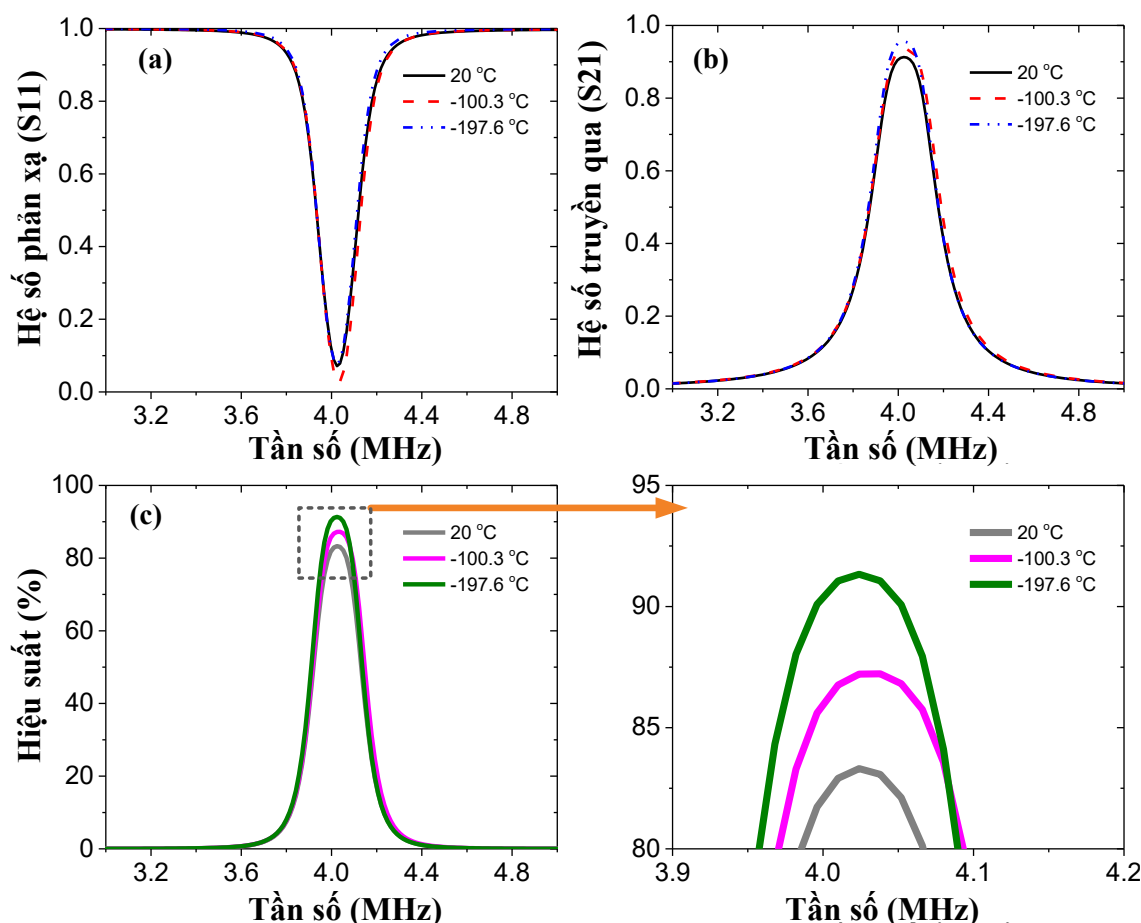
Trong nghiên cứu này, chúng tôi thực hiện mô phỏng hệ thống WPT sử dụng các vật liệu khác nhau gồm Cu, NbTi và YCBO tại các điều kiện nhiệt độ khác nhau. Trong đó có một số kết quả khảo sát tại nhiệt độ mà lớp cộng hưởng đạt trạng thái siêu dẫn.

IV. Kết quả và phân tích

Hình 6(a)-(b) mô tả phổ phản xạ (S_{11}) và truyền qua (S_{21}) của mô hình truyền năng lượng không dây (WPT) sử dụng 4 cuộn dây bằng kim loại đồng (Cu) được khảo sát trong dải tần số từ 3 MHz đến 5 MHz tại các nhiệt độ 20 °C, -100 °C và -197,6 °C.

Kết quả mô phỏng cho thấy khi nhiệt độ của kim loại đồng giảm từ nhiệt độ phòng 20 °C tới -197,6 °C hệ số phản xạ của hệ thống giảm từ 0,08 tới 0,03, trong khi đó hệ số truyền qua của hệ thống tăng dần từ 0,91 tới 0,96 tại tần số 4,02 MHz. Hơn nữa, tần số cộng hưởng của hệ thống không đổi khi nhiệt độ của các cuộn dây giảm từ 20 °C tới -

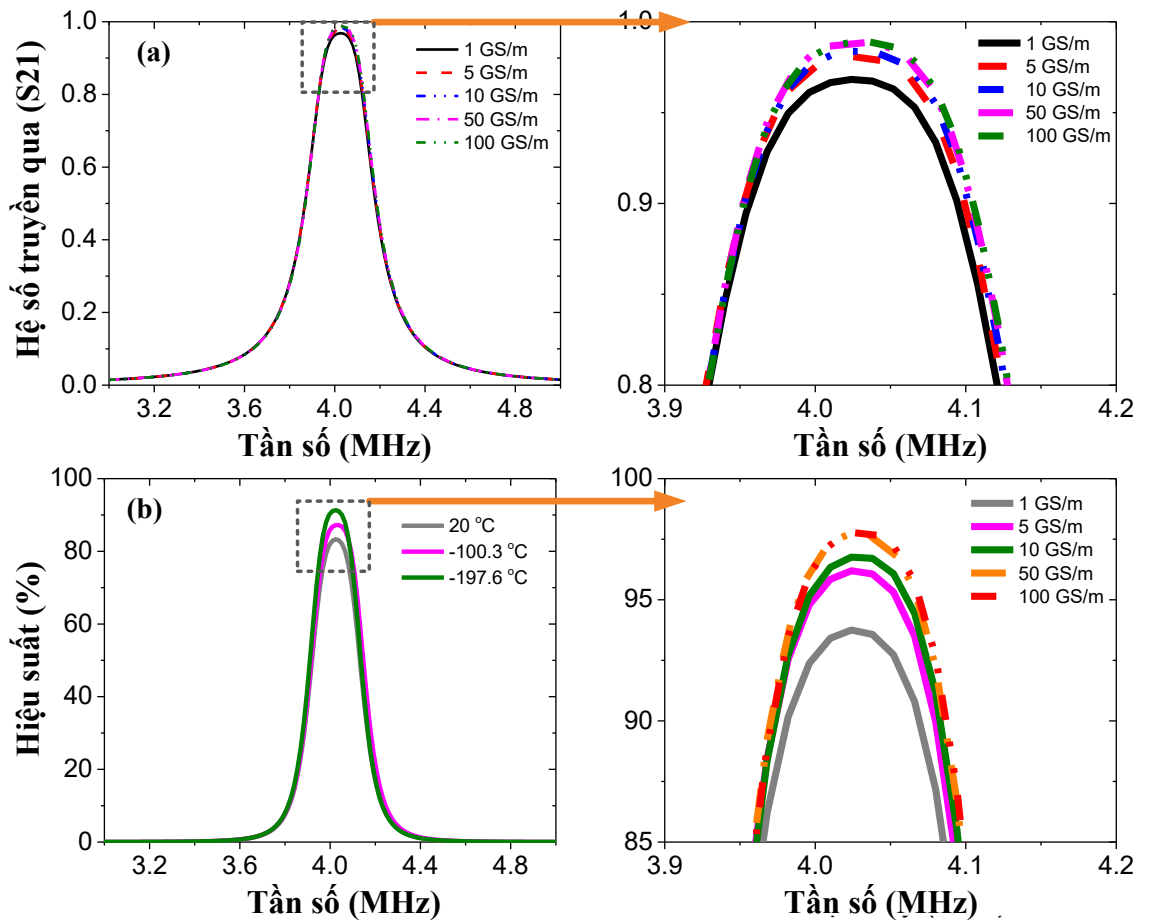
197,6 °C cho thấy các thành phần L, C tương đương của cấu trúc không bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ. Như vậy các kết quả cho thấy hệ số phẩm chất (Quality factor, $Q = \omega L/R$) của các cuộn dây Tx và Rx được tăng lên khi nhiệt độ của các cuộn dây giảm đi. Điều này được giải thích do điện trở của các cuộn dây đồng giảm hay mật độ điện dẫn tăng lên khi nhiệt độ của kim loại đồng giảm đi như trên hình 3.



Hình 6. (a) Phổ phản xạ (S_{11}), (b) phổ truyền qua (S_{21}) và (c) hiệu suất của mô hình WPT sử dụng kim loại đồng (Cu) tại nhiệt độ 20 °C, -100 °C, -197,6 °C.

Hình 6(c) mô tả hiệu suất đạt được của hệ thống WPT sử dụng kim loại đồng tại nhiệt độ 20 °C, -100 °C và -197,6 °C. Tại tần số cộng hưởng 4,02 MHz, hiệu suất truyền đạt giá trị cực đại và thể hiện sự phụ thuộc nghịch biến rõ rệt đối với nhiệt độ. Cụ thể, quan sát đồ thị phóng to vùng đỉnh (Hình 6c - bên phải), tại nhiệt độ phòng 20 °C, hiệu suất cực đại của hệ thống chỉ đạt mức 83,3%. Khi nhiệt độ giảm xuống -100 °C, hiệu suất đỉnh tăng lên đáng kể đạt 87,2% và tiếp tục tăng mạnh lên mức cực đại là 91,4% khi hệ thống được làm lạnh sâu bằng nitơ lỏng đến mức -197,6 °C.

Hiện tượng tăng trưởng hiệu suất này (tăng khoảng 8.1% so với nhiệt độ phòng) được giải thích dựa trên cơ chế suy giảm tổn hao Ohmic (Joule loss) trên cuộn dây dẫn. Theo lý thuyết cấu trúc mạng và dao động nguyên tử quanh nút mạng, khi nhiệt độ môi trường giảm mạnh, biên độ dao động nhiệt của các ion nút mạng (phonon) trong cấu trúc kim loại đồng giảm đi đáng kể. Điều này làm giảm xác suất tán xạ của các electron di chuyển tự do với các phonon, dẫn đến sự sụt giảm mạnh điện trở suất của vật liệu đồng. Sự sụt giảm của điện trở thuần R_{ac} trong cuộn dây dưới tác động của hiệu ứng bề mặt (skin effect) ở tần số cao đã trực tiếp nâng cao hệ số phẩm chất Q của mạch cộng hưởng ($Q = \omega L/R$), từ đó tối ưu hóa khả năng liên kết từ trường và nâng cao hiệu suất truyền năng lượng của hệ thống WPT.



Hình 7. (a) Phổ truyền qua (S_{21}) và (c) hiệu suất của mô hình WPT sử dụng vật liệu ở trạng thái siêu dẫn với độ điện dẫn đạt 1 GS/m, 5 GS/m, 10 GS/m, 50 GS/m, và 100 GS/m.

Hình 7(a) minh họa phổ hệ số truyền qua (S_{21}) của hệ thống truyền năng lượng không dây (WPT) sử dụng vật liệu ở trạng thái siêu dẫn với năm giá trị độ dẫn điện (σ) tăng dần từ 1 GS/m đến 100 GS/m. Kết quả đồ thị cho thấy hệ thống duy trì tính ổn định tần số rất cao, với đỉnh cộng hưởng không đổi tại giá trị 4,02 MHz trên toàn bộ các dải thông số khảo sát. Quan sát cận cảnh vùng đỉnh phóng to (Hình 7a - bên phải), biên độ cực đại của S_{21} thể hiện xu hướng tăng trưởng tỷ lệ thuận với độ dẫn điện. Cụ thể, tại giá trị độ dẫn tại 1 GS/m, hệ số truyền qua đạt mức khoảng 0,94. Khi độ dẫn tăng mạnh lên các mức 5 GS/m, 10 GS/m, 50 GS/m và tiệm cận trạng thái siêu dẫn lý tưởng tại 100 GS/m, biên độ đỉnh S_{21} liên tục được đẩy cao và đạt giá trị tối ưu sát ngưỡng 0,99. Sự gia tăng biên độ này khẳng định khả năng truyền dẫn từ trường cực kỳ hiệu quả của cuộn dây khi vật liệu tiến dần về trạng thái siêu dẫn.

Hiệu suất truyền năng lượng của mô hình WPT siêu dẫn được thể hiện rõ nét trong Hình 7b và phần đồ thị phóng to tiêu điểm. Tại tần số cộng hưởng trung tâm 4,02 MHz, hiệu suất của hệ thống đạt mức rất cao (đều vượt ngưỡng 93%) ngay cả ở mức độ dẫn thấp nhất trong dải khảo sát (1 GS/m).

Khi độ dẫn điện tăng từ 1 GS/m lên 5 GS/m, hiệu suất đỉnh tăng mạnh từ **93.7%** lên **96.1%**. Tuy nhiên, khi tiếp tục nâng độ dẫn lên các mức từ 10 GS/m đến 100 GS/m, mức độ tăng của hiệu suất có xu hướng chậm lại và dần bão hòa, đạt giá trị cực đại khoảng **98%** tại 100 GS/m (đường nét đứt màu đỏ). Hiện tượng này được giải thích bằng việc tổn hao Ohmic (Joule loss) trên cuộn dây siêu dẫn đã được triệt tiêu gần như hoàn toàn khi độ dẫn đạt ngưỡng vùng GS/m. Tại giới hạn này, tổng trở ký sinh của cuộn dây không còn là yếu tố chính quyết định tổn hao của hệ thống; thay vào đó, hiệu suất truyền lúc này bị chi phối chủ yếu bởi hệ số liên kết (k) giữa các cuộn dây và tổn hao bức xạ ra môi trường xung quanh. Điều này chỉ ra rằng, việc tối ưu hóa cấu trúc hình học để tăng cường hệ số liên kết sẽ mang lại hiệu quả cao hơn việc tiếp tục gia tăng độ dẫn của vật liệu khi hệ thống đã chạm ngưỡng bão hòa siêu dẫn.

C. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã chứng minh thành công giải pháp nâng cao hiệu suất hệ thống WPT (tần số cộng hưởng cố định tại 4.02 MHz) bằng cách giảm tổn hao trên cuộn dây. Đối với cuộn dây đồng (Cu), khi hạ nhiệt độ từ 20 °C xuống -197,6 °C (nhiệt độ nitơ lỏng), tổn hao Ohmic giảm mạnh do sự suy giảm tán xạ electron-phonon. Hiệu suất cực đại của hệ thống được cải thiện rõ rệt, tăng từ 83,3% lên 91,4%. Đối với trạng thái siêu dẫn, sử dụng cuộn dây siêu dẫn giúp đẩy hiệu suất lên ngưỡng lý tưởng, đạt tối đa 97.4 % tại độ dẫn 100 GS/m. Nghiên cứu cũng chỉ ra hiệu ứng bão hòa: khi độ dẫn đạt trên 10 GS/m, hiệu suất tăng chậm lại do tổn hao dây dẫn không còn là yếu tố quyết định, lúc này hệ thống bị chi phối chủ yếu bởi hệ số liên kết từ và tổn hao bức xạ.

Kết quả này khẳng định tính khả thi của việc làm mát sâu cuộn dây kim loại thông thường và là cơ sở dữ liệu quan trọng để ứng dụng vật liệu siêu dẫn vào các hệ thống WPT công suất lớn trong môi trường đặc biệt (vũ trụ, y tế, công nghiệp lạnh). Bằng cách kết hợp giữa lý thuyết về vật liệu siêu dẫn tiên tiến và sức mạnh của công cụ mô phỏng hiện đại, nghiên cứu kỳ vọng sẽ tìm ra giải pháp tối ưu để vượt qua những giới hạn vật lý của vật liệu dẫn điện truyền thống, đóng góp vào sự phát triển bền vững của hạ tầng năng lượng không dây trong tương lai.

D. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., & Soljačić, M. (2007). Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 317(5834), 83-86.
- [2] Zhang, Z., Pang, H., Georgiadis, A., & Cecati, C. (2018). Wireless power transfer—An overview. *IEEE transactions on industrial electronics*, 66(2), 1044-1058.
- [3] Wang, X., Wang, Y., Hu, Y., He, Y., & Yan, Z. (2018). Analysis of wireless power transfer using superconducting metamaterials. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(2), 1-5.
- [4] Zhao, S., Wang, Y., Kheirollahi, R., Mostafa, A., Zhang, H., & Lu, F. (2025). Superconducting Inductive Wireless Power Transfer System With Underground Cryogenic Transmitter Structure for Electric Vehicle Charging. *IEEE open journal of power electronics*, 7, 69-78..