



TUYỂN TẬP HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA

QUẢN LÝ MÔI TRƯỜNG VÀ PHÁT TRIỂN TÀI NGUYÊN THIÊN NHIÊN

EMNR 2026





Đánh giá hiệu quả hệ thống USBF sử dụng giá thể phủ vật liệu nano TiO_2 biến tính Eu trong xử lý nước thải sinh hoạt

Nguyễn Hoàng Dũng ^{a, b}, Nguyễn Hoàng Nam ^{b*}, Đào Trung Thành ^b

^aCông Ty TNHH Môi Trường Xây Dựng ACE,

^bKhoa Môi trường, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

* Tác giả liên hệ

Họ và tên: Nguyễn Hoàng Nam

Điện thoại: 0969986467

E-mail: nguyenhoangnam@humg.edu.vn

Tóm tắt

Gia tăng ô nhiễm nước thải sinh hoạt và nhu cầu tái sử dụng nước đặt ra yêu cầu phát triển các công nghệ xử lý hiệu quả và bền vững. Nghiên cứu này đề xuất cải tiến hệ thống USBF bằng cách tích hợp giá thể phủ vật liệu nano TiO_2 biến tính europium (Eu- TiO_2) nhằm kết hợp cơ chế sinh học và quang xúc tác. Vật liệu Eu- TiO_2 được tổng hợp bằng phương pháp sol-gel cải tiến và phủ lên giá thể sinh học. Kết quả phân tích XRD, EDX, TEM và UV-Vis xác nhận sự hình thành pha anatase ổn định, sự hiện diện của Eu và khả năng mở rộng hấp thụ ánh sáng khả kiến. Hệ thống được vận hành với nước thải sinh hoạt điển hình và so sánh với USBF đối chứng. Kết quả cho thấy việc tích hợp Eu- TiO_2 giúp nâng cao rõ rệt hiệu suất loại bỏ COD, amoni, nitrit và photphat, đồng thời giảm vi sinh vật nhờ các gốc oxy hóa mạnh. Nước sau xử lý đạt hoặc tiệm cận tiêu chuẩn tái sử dụng, cho thấy USBF tích hợp Eu- TiO_2 là giải pháp tiềm năng cho xử lý nước thải phân tán với chi phí thấp và tính ổn định cao.

Từ khóa: USBF; Eu- TiO_2 ; quang xúc tác; nước thải sinh hoạt, giá thể sinh học

1. Đặt vấn đề

Quá trình đô thị hóa nhanh và gia tăng dân số làm khối lượng nước thải sinh hoạt tăng đáng kể, với đặc trưng ô nhiễm các chất

hữu cơ dễ phân hủy, nitơ, phospho, chất rắn lơ lửng và vi sinh vật gây bệnh. Trong điều kiện thiếu nước ngọt cục bộ và mục tiêu tái sử dụng nước, yêu cầu đặt ra là các công nghệ xử lý vừa hiệu quả, ổn định, vừa



nhỏ gọn và chi phí hợp lý dễ sử dụng. Ở Việt Nam, nhu cầu này càng cấp thiết tại các khu dân cư, cơ sở dịch vụ nhỏ lẻ miền núi và hải đảo.

Trong các công nghệ sinh học hiếu khí truyền thống (Aerotank, MBR, SBR), gặp hạn chế là yêu cầu diện tích, tổn năng lượng và hiệu quả chưa cao đối với hợp chất hữu cơ bền vững, nồng độ nitơ và phospho cao. USBF là hệ thống kết hợp thiếu khí, hiếu khí, lắng trong một đơn nguyên, vận hành đơn giản, ít bùn dư, phù hợp xử lý nước thải sinh hoạt có tải lượng dao động. Nghiên cứu quy mô phòng thí nghiệm và thực tế cho thấy việc bổ sung giá thể vào bể hiếu khí giúp tăng mật độ vi sinh, nâng cao loại bỏ BOD, COD và ổn định trước biến động tải lượng, với hiệu suất BOD và COD đạt $\approx 93\%$; đồng thời TSS đầu ra đạt QCVN (cột A) trong điều kiện thời gian lưu hợp lý (Lê Hoàng Việt và cộng sự, 2017).

Mặc dù vậy, USBF đơn thuần vẫn khó xử lý triệt để các hợp chất hữu cơ bền, kiểm soát nitơ, phospho ở mức thấp và khử vi sinh vật cho mục tiêu tái sử dụng. Để khắc phục, tích hợp cơ chế oxy hóa nâng cao, quang xúc tác với giá thể sinh học là hướng tiếp cận được quan tâm. Trong số các vật liệu nano, TiO_2 nổi bật nhờ tính ổn định, sẵn có, chi phí thấp và hoạt tính quang xúc

tác đã được áp dụng trên nước thải sinh hoạt cho loại bỏ BOD, COD và tổng nitơ với điều kiện tối ưu về nồng độ và thời gian phản ứng (Saqib và cộng sự, 2016; Hamrayev và cộng sự, 2024).

Các nghiên cứu gần đây cho thấy việc ứng dụng vật liệu nano đã mở ra nhiều hướng đi cải tiến trong xử lý nước thải, tăng hiệu quả của các phương pháp hấp phụ, xúc tác (bao gồm quang xúc tác) và màng nano. Hướng đi này không chỉ nâng cao hiệu suất loại bỏ chất ô nhiễm mà còn hỗ trợ thu hồi tài nguyên, đồng thời giảm tiêu thụ năng lượng và hạn chế phát sinh chất ô nhiễm thứ cấp trong quá trình xử lý (Mohadesi và cộng sự, 2022). Các oxit kim loại (TiO_2 , ZnO , CeO_2 , MnOx) là chất xúc tác chủ đạo, có khả năng tạo gốc oxy hóa mạnh dưới bức xạ UV hoặc ánh sáng mặt trời, từ đó phân hủy các hợp chất hữu cơ khó xử lý và tiêu diệt vi sinh vật gây bệnh (Shi và cộng sự, 2011; Wang, 2011). Tuy nhiên, việc triển khai rộng rãi công nghệ này vẫn đối mặt với một số thách thức như mức độ phổ biến của vật liệu nano trong môi trường, nguy cơ gây độc đối với hệ sinh thái nước, và yêu cầu xây dựng quy trình đảm bảo an toàn trước khi ứng dụng ở quy mô lớn (Ugwuanyi và cộng sự, 2024).

Mặc dù các nghiên cứu về TiO_2 và Eu- TiO_2 đem lại nhiều kết quả hứa hẹn, việc

tích hợp trực tiếp vật liệu nano vào hệ thống xử lý sinh học truyền thống vẫn còn hạn chế, chủ yếu do khó thu hồi và nguy cơ phát tán vật liệu ra môi trường (Göçer và cộng sự, 2022). Một hướng tiếp cận hợp lý là phủ nano vật liệu lên giá thể sinh học, giúp cố định hạt nano, đồng thời tận dụng giá thể như nền vi cấu trúc cho vi sinh bám dính (Wang và cộng sự 2024). Phương pháp này vừa duy trì hiệu quả sinh học, vừa phát huy hoạt tính quang xúc tác, đồng thời hạn chế các rủi ro liên quan đến vật liệu nano tự do. Tuy nhiên, hiện nay vẫn có rất ít nghiên cứu đánh giá sự kết hợp giữa USBF và giá thể phủ Eu-TiO₂ trong xử lý nước thải sinh hoạt, đặc biệt trong điều kiện nước thải đặc trưng của Việt Nam.

Vì vậy, việc nghiên cứu đánh giá hiệu quả hệ thống USBF tích hợp giá thể phủ nano TiO₂ biến tính Eu là cần thiết nhằm giải quyết đồng thời các tồn tại của USBF truyền thống và tối ưu hóa khả năng xử lý nước thải sinh hoạt. Việc kết hợp cơ chế sinh học – hấp phụ – quang xúc tác có tiềm năng tạo ra hệ thống xử lý hiệu quả cao, ổn định, phù hợp với điều kiện vận hành tại các khu dân cư, cơ sở nhỏ lẻ hoặc khu vực ven biển – nơi yêu cầu công nghệ nhỏ gọn và chi phí thấp. Nghiên cứu này không chỉ đóng góp vào việc hoàn thiện các giải pháp tích hợp vật liệu nano trong xử lý môi

trường, mà còn mở ra hướng ứng dụng bền vững nhằm đáp ứng mục tiêu tái sử dụng nước và giảm áp lực lên các nguồn tài nguyên nước sạch.

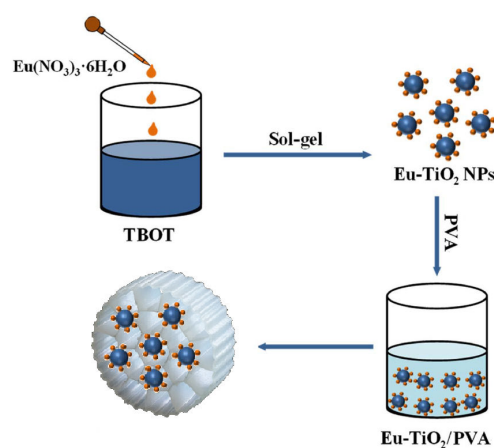
2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Tổng hợp vật liệu

Vật liệu nano TiO₂ biến tính europium (Eu-TiO₂) được tổng hợp bằng phương pháp sol-gel (Hình 1) nhằm kiểm soát tốt thành phần hóa học, đảm bảo kích thước hạt nano đồng đều ở nhiệt độ thấp, dễ dàng điều chỉnh tỷ lệ pha tạp Eu và tăng hoạt tính quang xúc tác. Phương pháp này cũng phù hợp để mở rộng quy mô và tích hợp vật liệu vào các hệ xử lý nước thải.

2.2. Phương pháp thử nghiệm

Hệ thống thí nghiệm được chế tạo bằng thép không gỉ với kích thước 75 × 38 × 50 cm, tổng thể tích làm việc 125 L, gồm ba ngăn chức năng: thiếu khí (46,2 L), hiếu khí (54,7 L) và USBF (27,4 L). Ngăn thiếu



Hình 1. Quy trình tổng hợp Eu-TiO₂

khí được trang bị máy khuấy cơ học vận hành liên tục ở 60 vòng/phút nhằm đảm bảo điều kiện trộn đều. Ngăn hiếu khí được lắp đặt hệ thống sục khí đáy gồm ba thanh phân phối khí bằng silicon, kết nối với máy nén khí RESUN ACO-006, cung cấp không khí với lưu lượng 13 m³/h. Cả ba ngăn đều được bổ sung giá thể vi sinh chiếm khoảng 1/3 thể tích làm việc, với diện tích bề mặt riêng 1.700 m²/m³.

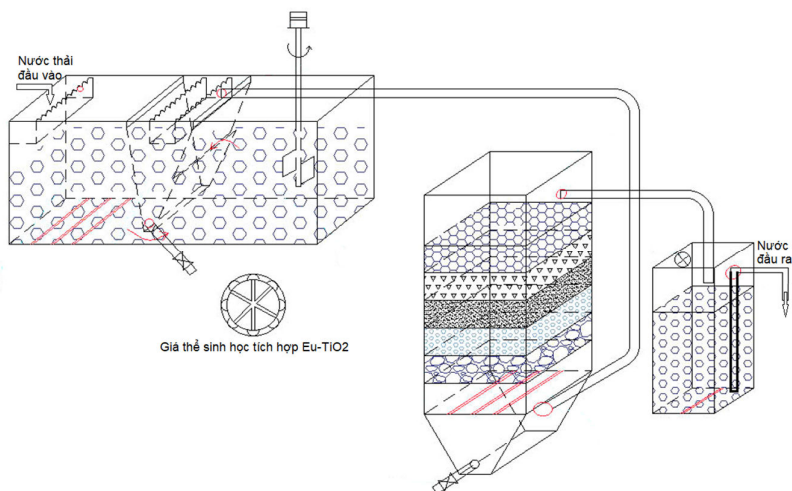
Bể lọc ngược được bố trí các lớp vật liệu gồm sỏi, cát, than hoạt tính và đá ong với tỷ lệ thể tích bằng nhau, vận hành theo chế độ dòng chảy từ dưới lên, thời gian lưu thủy lực 1 giờ. Bể nano được chế tạo bằng thủy tinh, chứa vật liệu composite nano TiO₂ biến tính Eu phủ trên tro trấu và cố định trên giá thể PE (1.000–1.200 m²/m³), chiếm 30% thể tích bể. Quá trình quang

xúc tác được kích hoạt bằng ánh sáng mặt trời và đèn wolfram, với thời gian lưu thủy lực 0,5 giờ và tốc độ sục khí 1 Ln/L.phút. Hệ thống được vận hành liên tục với lưu lượng đầu vào 20,83 L/h, tương ứng thời gian lưu thủy lực toàn hệ thống khoảng 6,15 giờ.

2.3. Lấy mẫu và phân tích mẫu

Trong quá trình vận hành hệ thống và nghiên cứu mẫu luôn được theo dõi, được lấy 3 lần /tuần vào lúc 8h30 để đưa về phòng thí nghiệm tiến hành phân tích hàm lượng thành phần. Mẫu được đựng trong chai đựng mẫu bằng PE, mẫu chưa phân tích ngay được bảo quản ở điều kiện nhiệt độ - 20°C.

Các chỉ tiêu cần xác định bao gồm: COD, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , và PO_4^{3-} được phân tích theo các phương pháp tiêu chuẩn trong



Hình 2. Sơ đồ hệ thống USBF cải tiến sử dụng giá thể sinh học tích hợp Eu-TiO₂

phòng thí nghiệm.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Hiệu quả xử lý COD

Hiệu quả loại bỏ COD của vật liệu nano TiO_2 biến tính Eu phủ trên tro trấu được thể hiện trong Hình 3. Kết quả cho thấy nồng độ COD trong nước thải sinh hoạt sau hệ thống USBF cải tiến dao động từ 5,40 đến 11,56 mgO_2/L , với giá trị trung bình 8,37 mgO_2/L . Sau khi dòng thải này được dẫn qua bể nano, COD được loại bỏ hoàn toàn và đạt ngưỡng cho phép theo quy chuẩn hiện hành. Hiệu quả xử lý COD còn tồn dư được giải thích bởi sự kết hợp giữa quá trình hấp phụ bề mặt và cơ chế quang xúc tác của vật liệu nano TiO_2/Eu /tro trấu, trong đó các gốc oxy hóa mạnh hình thành dưới tác dụng của ánh sáng đóng vai trò quyết định trong quá trình phân hủy các hợp chất hữu cơ.

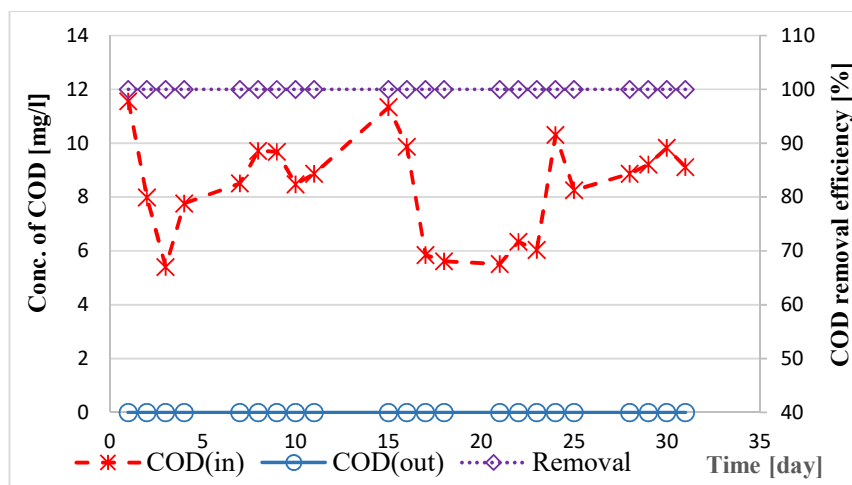
3.2. Hiệu quả xử lý các chất ô nhiễm khác
Ngoài COD trong nước thải sinh hoạt còn một số chất ô nhiễm đáng quan tâm như NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , và PO_4^{3-} . Sau khi qua hệ thống USBF thì hiệu quả xử lý các chất ô nhiễm này cũng đều đạt quy chuẩn cho phép, cụ thể:

- Hiệu quả xử lý NH_4^+

Kết quả loại bỏ amoni (NH_4^+) dư trong nước thải sinh hoạt sau hệ thống USBF cải tiến được trình bày ở Hình 4-a. Nồng độ NH_4^+ sau USBF dao động từ 0,75 đến 3,11 mg/L (trung bình 2,10 mg/L). Sau khi qua bể nano, NH_4^+ được loại bỏ hoàn toàn, đạt hiệu suất 100%, chủ yếu nhờ cơ chế hấp phụ và quang xúc tác của vật liệu nano.

- Hiệu quả xử lý NO_3^-

Hình 4-b thể hiện hiệu quả loại bỏ nitrat (NO_3^-), có thể thấy nồng độ NO_3^- trong



Hình 3. Hiệu quả loại bỏ COD trong nước thải sinh hoạt bằng bể USBF cải tiến

nước đầu ra USBF dao động từ 0,0018 đến 0,35 mg/L (trung bình 0,127 mg/L). Sau xử lý qua bể nano với thời gian lưu 0,5 giờ, nitrat được loại bỏ hoàn toàn, đạt hiệu suất 100%, chủ yếu nhờ cơ chế quang xúc tác tạo gốc tự do mạnh của vật liệu Eu-TiO₂.

- Hiệu quả xử lý NO_2^-

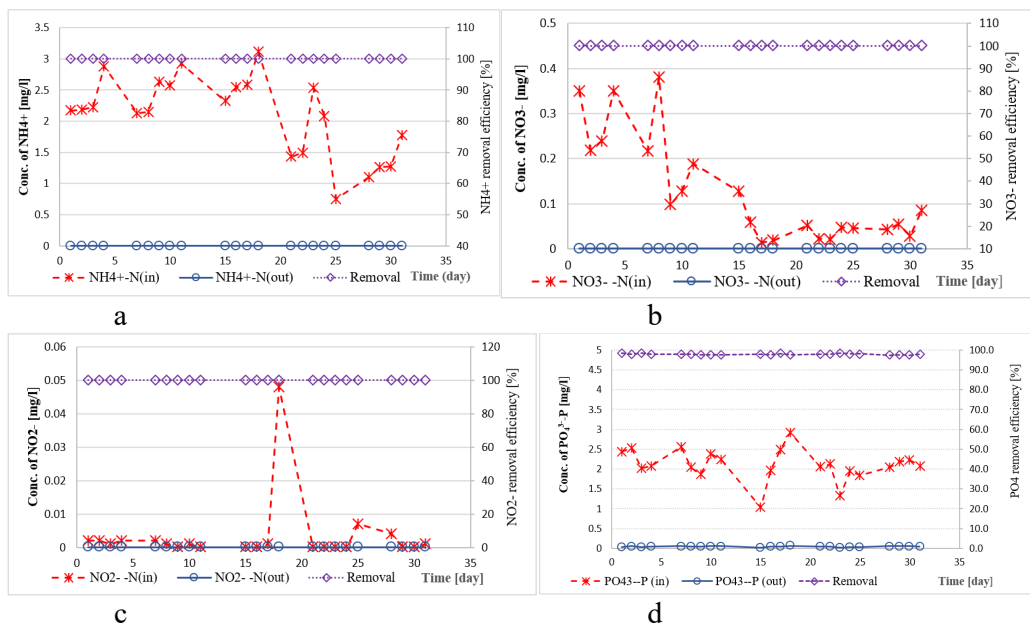
Tương tự với nitrit (NO_2^-), với cơ chế quang xúc tác hiệu suất xử lý đạt 100% (Hình 4-c). Mặc dù qua hệ thống xử lý, nồng độ NO_2^- dư rất thấp (trung bình 0,0003 mg/L) và có thời điểm được loại bỏ hoàn toàn. Tuy nhiên, để đảm bảo an toàn cho mục đích sử dụng sinh hoạt, NO_2^- được xử lý triệt để khi qua bể nano với thời gian lưu 0,5 giờ, nước sau xử lý đáp ứng

yêu cầu theo QCVN 01-1:2018/BYT.

- Hiệu quả xử lý PO_4^{3-}

Nồng độ photphat (PO_4^{3-}) qua các bước xử lý ban đầu còn ở mức tương đối cao, dao động từ 1,03 đến 2,92 mg/L (trung bình 2,11 mg/L). Nước thải tiếp tục được dẫn qua bể nano với thời gian lưu 0,5 giờ, hàm lượng PO_4^{3-} giảm mạnh xuống 0,021–0,068 mg/L (trung bình 0,045 mg/L), tương ứng hiệu suất loại bỏ 97,4–98,4%. Hiệu quả này chủ yếu nhờ diện tích bề mặt lớn, khả năng hấp phụ mạnh của tro trấu phủ TiO₂ và sự hình thành phức Eu-PO₄, kết hợp với cơ chế quang xúc tác tăng cường dưới tác dụng của ánh sáng.

3.3. Thảo luận



Hình 4. Hiệu quả loại bỏ NH_4^+ (a), NO_3^- (b), NO_2^- (c) và PO_4^{3-} (d) trong nước thải sinh hoạt bằng bể USBF cải tiến



Kết quả khảo sát hiệu quả xử lý của vật liệu composite nano Eu-TiO₂ trong hệ thống USBF cải tiến cho thấy tiềm năng ứng dụng cao trong tái sử dụng nước. Khi nước thải đầu ra của USBF cải tiến được dẫn qua bể nano với thời gian lưu 0,5 giờ, hàm lượng các chỉ tiêu COD, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , và PO_4^{3-} giảm đáng kể và đều đạt yêu cầu theo QCVN 01-1:2018/BYT. Kết quả này cho thấy nước sau xử lý đáp ứng các tiêu chí chất lượng cần thiết cho mục đích sinh hoạt.

USBF cải tiến là sự kết hợp giữa các cơ chế sinh học và các quá trình hấp phụ quang xúc tác trên bề mặt vật liệu nano Eu-TiO₂. Vật liệu nano thể hiện khả năng loại bỏ hiệu quả các ion dinh dưỡng và các hợp chất hữu cơ ở nồng độ thấp, đồng thời bất hoạt vi sinh vật nhờ hoạt tính quang xúc tác của TiO₂ dưới ánh sáng tự nhiên. Diện tích bề mặt lớn của vật liệu giúp tăng cường tiếp xúc pha rắn – lỏng, góp phần nâng cao hiệu suất xử lý các hợp chất hữu cơ khó phân hủy. Ngoài ra, hệ thống nhỏ gọn, giảm đáng kể diện tích xây dựng, chi phí đầu tư và vận hành. Với cấu trúc đơn nguyên, linh hoạt và khả năng vận hành tự chảy, hệ thống đặc biệt phù hợp cho các khu dân cư phân tán, vùng miền núi và hải đảo, nơi nguồn nước sạch còn hạn chế.

Kết luận

Nghiên cứu chứng minh rằng hệ thống USBF cải tiến tích hợp vật liệu nano Eu-TiO₂ phủ trên tro trấu có hiệu quả cao trong xử lý nước thải sinh hoạt sau sinh học để tái sử dụng. Các chỉ tiêu COD, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , và PO_4^{3-} được loại bỏ triệt để hoặc đạt hiệu suất rất cao, đáp ứng yêu cầu của QCVN 01-1:2018/BYT. Cơ chế xử lý hiệp đồng giữa sinh học – hấp phụ – quang xúc tác giúp hạn chế phát sinh ô nhiễm thứ cấp và bùn thải. Với cấu hình gọn nhẹ, chi phí đầu tư và vận hành thấp, hệ thống phù hợp cho các hộ gia đình và khu dân cư phân tán, đồng thời góp phần sử dụng tài nguyên nước theo hướng bền vững.

Cần xem xét triển khai thí điểm và mở rộng ứng dụng tại các vùng nông thôn, miền núi và hải đảo; xây dựng cơ chế hỗ trợ tài chính, kỹ thuật và đào tạo vận hành cho hộ gia đình; tăng cường truyền thông nâng cao nhận thức cộng đồng; và lồng ghép giải pháp vào các chương trình nông thôn mới nhằm thúc đẩy tái sử dụng nước an toàn và hiệu quả.

Lời cảm ơn:

Kết quả bài báo được hoàn thành dưới sự hỗ trợ của đề tài “Nghiên cứu chế tạo vật liệu nano TiO₂ biến tính đất hiếm Nd, Eu phủ trên tro trấu, ứng dụng trong xử lý nước thải sinh hoạt thành nước sinh hoạt phục vụ cho vùng núi và hải đảo” - Mã số



B2024-MDA-06. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

Tài liệu tham khảo

1. Göçer S., Kozak M., Ayrancılar İ., Duyar A., Köroğlu E., and Çirik K. (2022). Application of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticle materials on domestic wastewater: Removal of pollutants. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(4), 570–576.
2. Hamrayev H., Korpayev S., and Shameli K. (2024). Advances in Synthesis Techniques and Environmental Applications of TiO₂ Nanoparticles for Wastewater Treatment: A Review. Journal of Research in Nanoscience and Nanotechnology, 12(1), 1–24.
3. Lê Hoàng Việt, Đặng Thị Hồng Yến, và Nguyễn Võ Châu Ngân, (2017). Nghiên cứu ứng dụng bể USBF giá thể tự chế trong xử lý nước thải nhà hàng. Tạp chí Khoa học Đại học Thủ Dầu Một, 1(32), 143-152.
4. Mohadesi M., Fard M. S., and Shokri A. (2022). The application of modified nano-TiO₂ photocatalyst for wastewater treatment: A review. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 104(11), 2571–2592.
5. Saqib N. U., Adnan R., and Shah I., (2016). A mini-review on rare earth metal-doped TiO₂ for photocatalytic remediation of wastewater. Environmental Science and Pollution Research, 23(16), 15941–15951.
6. Shi Z., Zhang X., and Yao S., (2011). Preparation and photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles co-doped with Fe and La. Particuology, 9(3), 260-264.
7. Ugwuanyi E.D., et al, (2024). The impact of nanomaterials in enhancing wastewater treatment processes: A review. Magna Scientia Advanced Research and Reviews, 10(01), 273–285.
8. Wang J., (2011). Research on Modification and Application in Wastewater Treatment of Nano-TiO₂ Photocatalyst. Chemistry and Adhesion, 33(2), 66-69.
9. Wang J., Pi H., Zhao P., and Zhou N., (2024). Efficient removal of methyl orange and ciprofloxacin by reusable Eu–TiO₂/PVDF membranes with adsorption and photocatalysis methods. RSC Advances, 14(26), 18432–18443.

Ngày nộp: 18/11/2025

Ngày chấp nhận đăng: 24/12/2025



**FACULTY OF ENVIRONMENT
HANOI UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY
HANOI, VIETNAM**



ISBN: 978-604-76-3296-1



SÁCH KHÔNG BÁN