



Original Article

Using Electroplating Sludge and Rice Husk Biochar for the Photocatalytic Degradation of Phenols in Aqueous Environment

Hoang Minh Trang^{1,2,*}, Nguyen Thi Mai³, Nguyen Huan Xuan², Dinh Thi Diu²

¹*VNU Key Laboratory of Green Environment, Technology and Waste Utilization (GreenLab),
VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam*

²*Faculty of Environmental Sciences, VNU University of Science,
334 Nguyen Trai, Hanoi, Thanh Xuan, Vietnam*

³*Thai Nguyen University of Agriculture and Forestry, Quyet Thang, Thai Nguyen, Vietnam*

Received 8th August 2025

Revised 15th September 2025; Accepted 30th September 2025

Abstract: In this study, electroplating sludge and rice husk were utilized for the synthesis of photocatalytic material for the degradation of phenols in aqueous environment. The characterization of the synthesized material was evaluated using EDX, SEM, and FTIR. The results indicated the presence of C, O, and other elements such as Ca, Si, Ni, Zn, Cu, Al, and Fe along with the porous structure of the biochar, which contributed to the removal of phenols. The influence of various parameters, including pH (3-10) and catalyst dosage (0.8 - 2 mg/L), was investigated. The results showed that after 240 mins of reaction, a degradation effectiveness of 54% was achieved for a phenol concentration of 20 ppm with the catalytic dosage of 1.5 mg/L under UVC irradiation. This study offers a flexible and scalable framework for the reuse of electroplating sludge in an environmentally friendly manner. By repurposing the treated waste as catalyst for phenol breakdown, the simple technique offers broad adoption while improving sustainability and resource efficiency.

Keywords: photocatalysis, sludge, organic matter, agricultural waste.

* Corresponding author.

E-mail address: hoangminhtrang@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5417>

Nghiên cứu chế tạo vật liệu xúc tác quang từ bùn thải mạ điện và than sinh học từ trấu để xử lý phenol trong môi trường nước

Hoàng Minh Trang^{1,2,*}, Nguyễn Thị Mai³, Nguyễn Xuân Huân², Đinh Thị Diệu²

¹Phòng thí nghiệm Trọng điểm Công nghệ môi trường xanh và tái chế chất thải,
Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

²Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

³Trường Đại học Nông lâm Thái Nguyên, Quyết Thắng, Thái Nguyên, Việt Nam

Nhận ngày 8 tháng 8 năm 2025

Chỉnh sửa ngày 15 tháng 9 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 9 năm 2025

Tóm tắt: Trong nghiên cứu này, bùn thải mạ điện và trấu được tận dụng để tổng hợp vật liệu xúc tác quang cho quá trình phân hủy phenol trong môi trường nước. Đặc tính của vật liệu tổng hợp được đánh giá bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX), kính hiển vi điện tử quét (SEM). Kết quả cho thấy có sự hiện diện của C, O và các nguyên tố khác như Ca, Si, Ni, Zn, Cu, Al và Fe cùng với cấu trúc rỗng xốp của than sinh học tham gia vào quá trình quang xúc tác xử lý phenol trong nước. Ảnh hưởng của các yếu tố như pH (3-10), khối lượng vật liệu (0,8-2 mg/L) đã được nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu cho thấy, ở điều kiện tối ưu cho quá trình xử lý phenol: pH = 7,0, liều lượng vật liệu là 1,5 g/L, nồng độ phenol là 20 ppm, khoảng 54% phenol đã được xử lý dưới điều kiện ánh sáng UV-C sau 240 phút. Nghiên cứu này mở ra một hướng đi tiềm năng cho việc tái chế chất thải công nghiệp và nông nghiệp để tạo ra các vật liệu xử lý môi trường.

Từ khóa: bùn thải mạ điện, than sinh học, xúc tác quang, phenol.

1. Tổng quan

Trong bối cảnh công nghiệp hóa và phát triển kinh tế, việc xử lý chất thải, đặc biệt là các chất gây ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy, đang trở thành một thách thức đối với môi trường. Phenol, một hợp chất hữu cơ được sử dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp như sản xuất nhựa (nhựa phenolic), thuốc trừ sâu, vật liệu dệt, và được phẩm [1], đã và đang gây ra những tác động tiêu cực nghiêm trọng đến hệ sinh thái thủy sinh

và sức khỏe con người. Sự hiện diện của phenol trong môi trường nước có thể gây ức chế hệ thần kinh trung ương, tổn thương gan và thận, dẫn đến các triệu chứng nguy hiểm như phù phổi và mờ mắt [2]. Do đó, việc tìm kiếm các phương pháp hiệu quả để loại bỏ phenol khỏi nguồn nước thu hút quan tâm của nhiều nhà khoa học. Các phương pháp xử lý truyền thống như chưng cất, hấp thụ hay oxy hóa hóa học đã được áp dụng rộng rãi với hiệu quả cao. Tuy nhiên, chúng thường đi kèm với nhược điểm là tạo ra chất thải

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: hoangminhtrang@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5417>

thứ cấp hoặc đòi hỏi chi phí vận hành lớn. Gần đây, trong số các phương pháp oxy hóa nâng cao (AOPs), quang xúc tác đã trở thành một giải pháp nổi bật và đầy hứa hẹn. Nhiều loại vật liệu đã được nghiên cứu và ứng dụng, bao gồm TiO_2 [3], hạt nano siêu thuận từ Fe_3O_4 (Bazrafshan và nnk, 2023) hay hạt nano ZnO [4]. Tuy nhiên, chi phí sản xuất và chế tạo của những vật liệu này đã hạn chế khả năng ứng dụng rộng rãi. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc phát triển các vật liệu quang xúc tác mới, hiệu quả hơn và có chi phí thấp hơn.

Một hướng đi đầy tiềm năng là tận dụng các nguồn phế thải công nghiệp và nông nghiệp để chế tạo vật liệu xúc tác. Trong số đó, bùn thải mạ điện (ES) là một nguồn chất thải nguy hại nhưng lại chứa hàm lượng cao các kim loại nặng có tiềm năng làm vật liệu xúc tác (như Zn, Fe, Cu). Tuy nhiên, việc sử dụng trực tiếp ES thường gặp khó khăn do hiện tượng kết tụ, làm giảm đáng kể hiệu suất xúc tác. Để khắc phục hạn chế này, chúng tôi đề xuất kết hợp ES với than trấu - một phụ phẩm từ nông nghiệp có cấu trúc xốp và thành phần chính là C và SiO_2 . Sự kết hợp này được kỳ vọng sẽ giảm thiểu sự kết tụ của ES, tăng cường khả năng truyền electron-lỗ trống, từ đó nâng cao hiệu suất quang xúc tác. Do vậy, nghiên cứu này tập trung vào việc tổng hợp vật liệu xúc tác quang trên cơ sở bùn thải mạ điện và than trấu bằng phương pháp hỗ trợ siêu âm, sau đó ứng dụng chúng như một vật liệu quang xúc tác để loại bỏ phenol. Kết quả của nghiên cứu này không chỉ đóng góp vào việc xử lý hiệu quả một trong những chất gây ô nhiễm phổ biến mà còn mở ra một hướng tiếp cận bền vững, chuyển đổi chất thải nguy hại thành vật liệu có giá trị, góp phần vào mục tiêu phát triển kinh tế tuần hoàn và bảo vệ môi trường lâu dài.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Bùn thải trong nghiên cứu được thu thập từ hệ thống xử lý nước thải của Nhà máy Công ty Cổ phần Cột thép mạ kẽm Thái Nguyên. Trấu được thu thập từ các cơ sở xay xát ở Hà Nội. Các

hóa chất phenol, NaOH và H_2SO_4 sử dụng trong thí nghiệm được mua từ công ty Merck, Đức.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp chế tạo vật liệu

Mẫu lấy về được xử lý sơ bộ theo TCVN 6647:2007 (Chất lượng đất - Xử lý sơ bộ đất để phân tích lý - hóa). Mẫu bùn được rửa sạch bằng nước khử ion đến pH = 7. Sau đó sấy khô và bảo quản trong túi polyme để dùng cho các nghiên cứu tiếp theo (ký hiệu là ES). Trấu trấu được rửa sạch bằng nước khử ion và sấy khô trong tủ sấy ở 100°C trong 12 giờ. Trấu khô được nung trong điều kiện không có oxy ở 600°C trong 1 giờ, sản phẩm thu được ký hiệu là RB.

Vật liệu quang xúc tác được điều chế bằng cách trộn 60 g bùn mạ điện (ES) và 30 g than trấu (RB) trong 1L nước khử ion với tỷ lệ khối lượng bùn mạ điện: than trấu 2:1 để thu được hỗn hợp bùn mạ điện/than trấu. Hỗn hợp này được khuấy trong 24 giờ và sau đó được đặt trong bể rung siêu âm trong 1 giờ. Sau đó, hỗn hợp được lọc bằng cách lọc chân không, rửa nhiều lần bằng nước cất, sấy khô trong 12 giờ ở 100°C , và nghiền để tạo ra vật liệu quang xúc tác (ký hiệu là ESB) [5].

2.2.2. Phương pháp đánh giá đặc tính lý hóa của vật liệu

Hình thái bề mặt và thành phần nhóm chức của vật liệu bùn mạ, than trấu và vật liệu quang xúc tác chế tạo được nghiên cứu bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM-EDX) trên thiết bị JEOL JSM-6700F và quang phổ FT-IR (máy quang phổ Nicolet iS50 FTIR).

Trong nghiên cứu này, nồng độ của các kim loại được xác định bằng phương pháp phá mẫu kín trong lò vi sóng (Multiwave 5000 của hãng Anton Paar) theo quy trình từ EPA method 3051A, sau đó phân tích trên thiết bị ICP-MS (Agilent 7850 ICP-MS).

2.2.3. Phương pháp đánh giá hoạt tính xúc tác của vật liệu

Hoạt tính xúc tác của vật liệu được nghiên cứu bằng cách đánh giá sự phân hủy phenol dưới ánh sáng UV bước sóng 254 nm từ đèn Philips

UVC 8W T8. 750 mL dung dịch phenol (20 ppm) ở pH 7 được trộn với 0,2 g vật liệu xúc tác quang. Đề đạt được trạng thái cân bằng hấp phụ, hỗn hợp trên được khuấy trong vòng 60 phút trong bóng tối. Sau đó, hỗn hợp được khuấy dưới ánh sáng chiếu xạ và được lấy mẫu sau mỗi 30 phút trong vòng 240 phút. Dung dịch thu được được ly tâm ở 6000 vòng/phút, sau đó lọc và lưu trữ trong các lọ tối màu. Nồng độ phenol của các mẫu pha lỏng được xác định bằng máy sắc ký Shimadzu LC-20A, detector UV/Vis SPD-20A, cột Crestpak C18S và dung môi pha động là hỗn hợp của methanol và nước khử ion với tỷ lệ theo thể tích là 70:30 được bơm vào hệ thống với lưu lượng 0,2 mL/phút. Ngoài ra, ảnh hưởng của pH (từ 3 đến 10) và liều lượng chất xúc tác (0,8 g/L, 1,5 g/L, và 2 g/L) cũng được khảo sát. Các thí nghiệm này được tiến hành trong 180 phút, với mẫu được thu thập sau mỗi 30 phút để phân tích nồng độ phenol còn lại. Các thí nghiệm được lặp lại 3 lần.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc trưng tính chất của vật liệu

Kết quả phân tích hình thái bề mặt của ES, RB và ESB được trình bày trong Hình 1. Kết quả từ Hình 1a cho thấy, ES có cấu trúc bề mặt xốp và không đều, bao gồm các hạt kết tụ với kết cấu giống như bọt biển. Trong khi đó, ảnh SEM của than sinh học trâu (Hình 1b) cho thấy cấu trúc xốp đặc trưng với các lỗ rỗng, cạnh sắc và vách có gờ tạo thành các kênh và lỗ xốp liên kết với nhau, có lợi cho việc hấp phụ các chất ô nhiễm. Hình 1c thể hiện hình thái SEM của vật liệu composite được tổng hợp bằng cách kết hợp bùn mạ điện và than sinh học trâu với bề mặt không đồng nhất bao gồm cả các hạt mịn kết tụ của ES và các cấu trúc khung xốp có tổ chức của RB, đây là các vị trí chức năng mới cho hoạt động hấp phụ hoặc xúc tác.

Các thành phần nguyên tố của vật liệu được xác định bằng phổ EDX. Có thể thấy rằng, O (45,56%), Al (2,93%), Fe (1,06%), Ni (5,49%) và Cu (0,76%) chiếm phần lớn trong ES. Ngược lại, than sinh học từ trâu chủ yếu bao gồm cacbon

(C, 90,3%) và oxy (O, 8,6%). Vật liệu composite (ESB), được tạo thành bằng cách kết hợp cả hai thành phần, thể hiện các nguyên tố đặc trưng từ cả hai vật liệu ban đầu với nồng độ cao của C (13,7%), O (45,71%), Ni (5,01%) và Cu (0,86%), cho thấy sự tích hợp thành công giữa pha than sinh học và bùn mạ điện. Ngoài ra, kết quả phân tích hóa học (Bảng 1) khẳng định Ni, Al và Cu là những nguyên tố kim loại chủ yếu trong thành phần bùn.

Bảng 1. Thành phần các nguyên tố trong bùn mạ điện

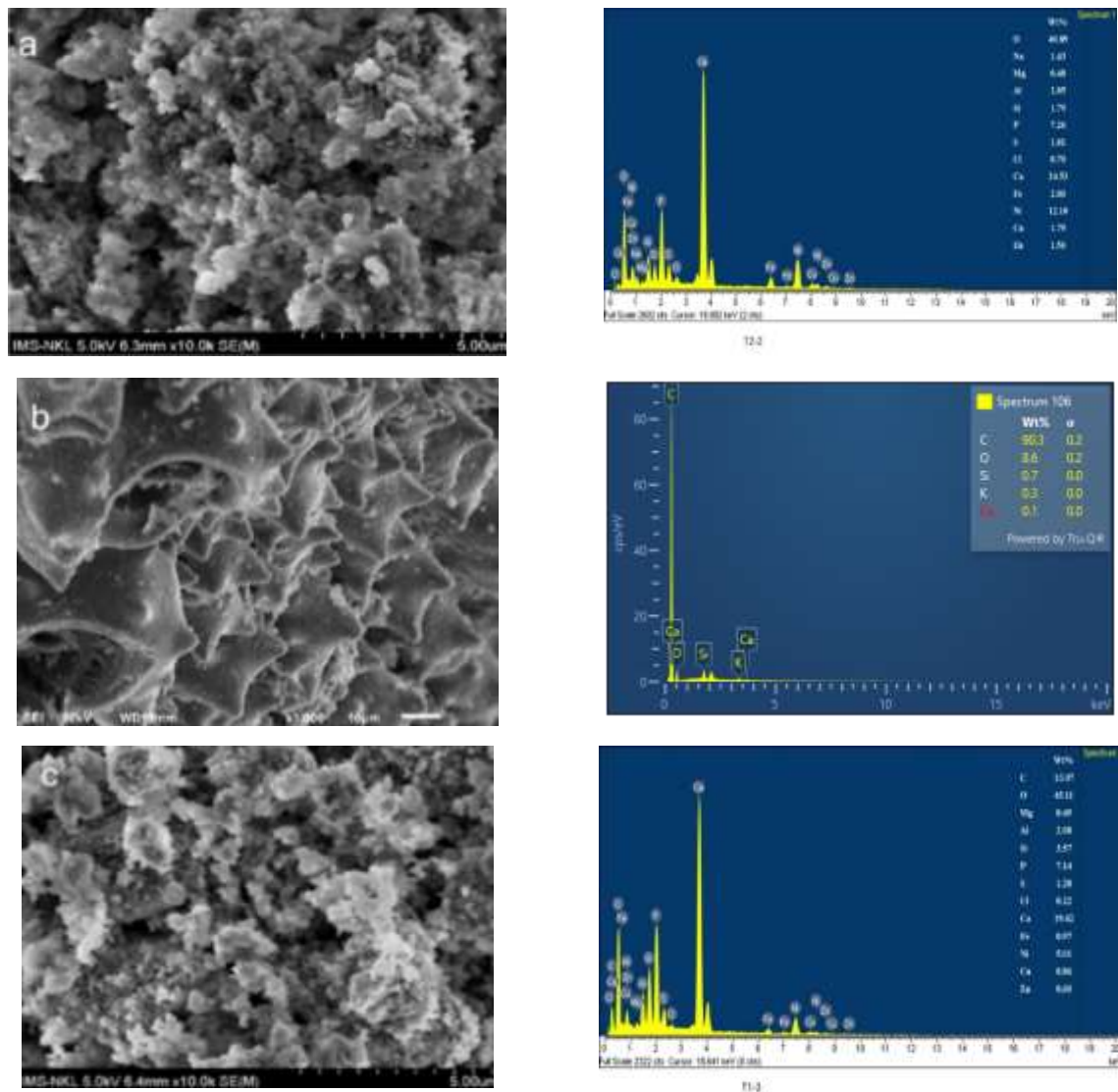
Nguyên tố	Khối lượng (%)	Nguyên tố	Khối lượng (%)
Mg	2,08	Fe	2,52
Al	8,30	Ni	27,36
Si	0,59	Cu	4,45
Ca	50,45	Zn	4,24

Sự xuất hiện của các đỉnh nhiễu xạ sắc nét trên giản đồ nhiễu xạ tia X (Hình 2a) cho thấy vật liệu tổng hợp ESB có độ kết tinh cao. Phổ nổi bật với ba đỉnh chính tại các góc 2-theta khoảng 31°, 43° và 48° trong đó đỉnh (110) tại có cường độ mạnh nhất. Các pic đặc trưng tương ứng với CuO và NiO của bùn thải mạ điện do đó rất thuận lợi cho quá trình quang xúc tác xử lý phenol.

Phổ FTIR của ba vật liệu ES, RB và ESB được phân tích để xác định các nhóm chức năng bề mặt. Kết quả phổ trên Hình 2b cho thấy sự hiện diện của các đỉnh đặc trưng cho nhóm hydroxyl (-OH, 3400-3500), carbonyl (C=O, 1700-1750), liên kết cacbon-cacbon của vòng thơm (C=C, 1600) và các liên kết C-O-C hoặc C-OH (1000-1100). Cụ thể, phổ FTIR của vật liệu ES chỉ ra sự hiện diện của các nhóm -OH và C=O, nhưng các đỉnh này kém rõ nét hơn so với các vật liệu khác. Ngược lại, RB, được nung ở 600°C, thể hiện các đỉnh phổ rõ ràng hơn, đặc biệt là các nhóm -OH, C=O và C=C, cho thấy cấu trúc bề mặt và tính chất hóa học được cải thiện. Đáng chú ý, vật liệu composite ESB thể hiện các đỉnh phổ mạnh nhất và rõ nét nhất, chứng tỏ các nhóm chức năng đã được tối ưu hóa. Điều này cho thấy sự kết hợp của bùn thải

mạ điện và than sinh học từ trấu đã tận dụng được các đặc tính tối ưu của cả hai thành phần, tạo ra

một vật liệu có khả năng hoạt động tốt hơn trong quá trình xúc tác và xử lý chất ô nhiễm.



Hình 1. Ảnh SEM của bùn mạ điện (a); than sinh học từ trấu (b) và vật liệu composite từ bùn mạ điện/than sinh học từ trấu (c).

3.2. Khả năng phân hủy phenol

3.2.1. Sàng lọc vật liệu

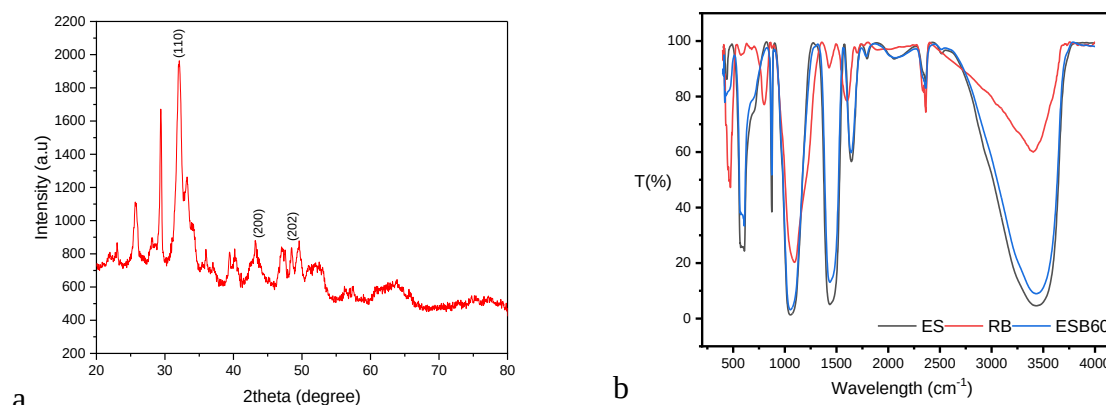
Kết quả đánh giá hiệu quả loại bỏ phenol của các vật liệu tổng hợp được trình bày trong Hình 3. Trong 60 phút đầu tiên của giai đoạn hấp phụ trong bóng tối, nồng độ phenol giảm nhẹ ở tất cả các mẫu, cho thấy quá trình hấp phụ trên

bề mặt đã diễn ra. Đáng chú ý, vật liệu composite ESB thể hiện khả năng hấp phụ cao nhất, điều này cho thấy sự hiện diện của nhiều vị trí bề mặt hoạt động và ái lực được cải thiện đối với chất gây ô nhiễm.

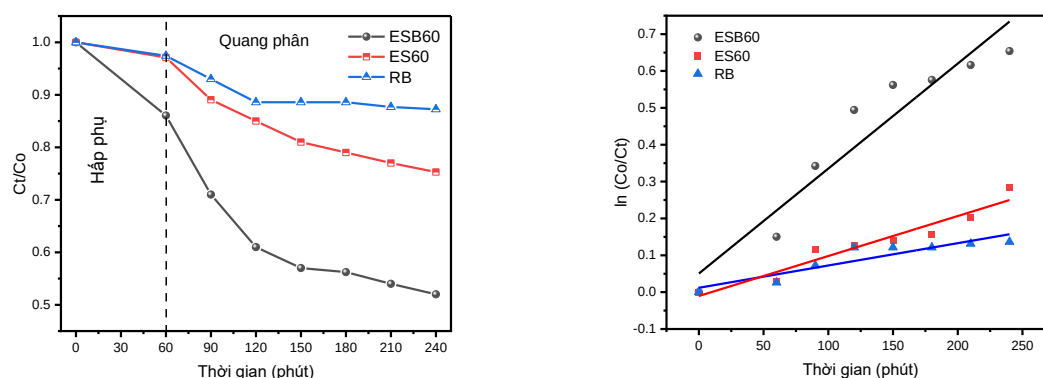
Khi được chiếu xạ (sau 60 phút), tất cả các vật liệu đều cho thấy hoạt tính phân hủy phenol. Trong số đó, ESB chứng minh hiệu suất quang

xúc tác vượt trội nhất, với tỉ lệ nồng độ phenol C/C_0 giảm đáng kể và đạt xấp xỉ 0,2 sau 240 phút. Trong khi đó, vật liệu ES chỉ đạt hiệu quả phân hủy trung bình, còn RB cho thấy hoạt tính quang xúc tác hạn chế. Những kết quả này cho

thấy vật liệu ESB được cải thiện đáng kể về khả năng quang xúc tác, có thể là do sự kết hợp của các vị trí hoạt động trên bề mặt, giúp tăng cường cả hiệu quả hấp phụ ban đầu và quá trình phân hủy quang xúc tác sau đó.



Hình 2. Phổ XRD và FTIR của vật liệu.



Hình 3. Hiệu quả loại bỏ phenol của các vật liệu.

3.2.2. Ảnh hưởng của pH dung dịch

Hiệu quả phân hủy quang xúc tác của phenol bằng vật liệu ESB chịu ảnh hưởng của pH và kết quả được trình bày trong Hình 4. Hiệu suất phân hủy phenol cao nhất trong điều kiện chiếu sáng UV-C đạt được ở pH 7, với hiệu suất phân hủy là 48% sau 240 phút. Trong khi đó, ở pH 3, hiệu suất loại bỏ phenol giảm có thể là do sự hòa tan của các oxit kim loại có trong bùn mạ điện. Xu hướng tương tự cũng được quan sát ở pH 10, điều này có thể được giải thích là do phenol và

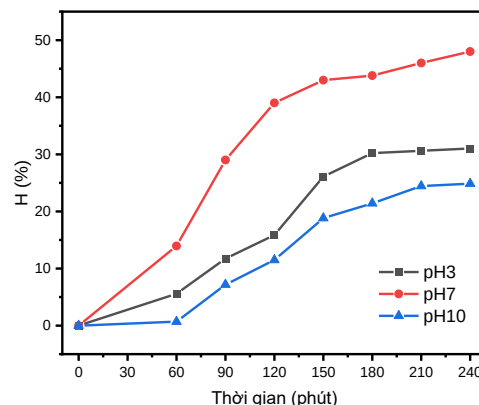
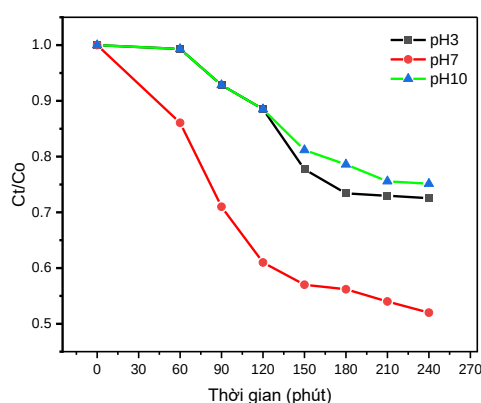
than sinh học mang cùng điện tích trong môi trường kiềm.

3.2.3. Ảnh hưởng của liều lượng xúc tác

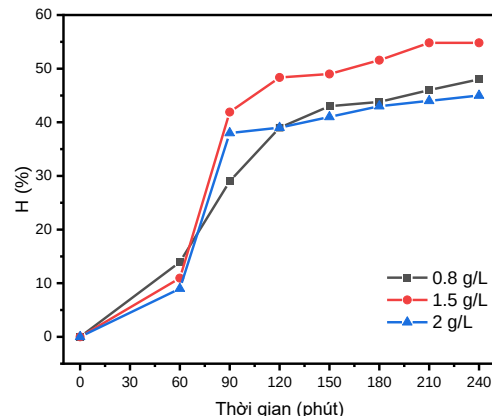
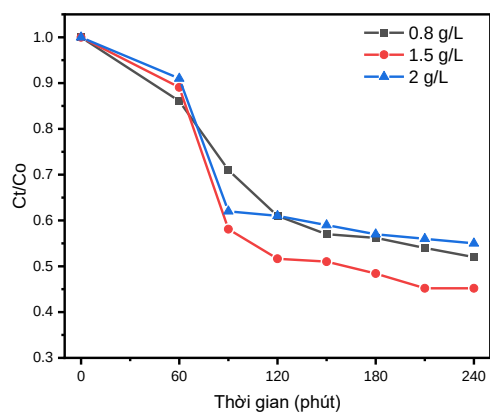
Hình 5 minh họa ảnh hưởng của liều lượng chất xúc tác đến sự phân hủy phenol. Kết quả cho thấy hiệu quả loại bỏ phenol được cải thiện đáng kể (54%) khi liều lượng tăng từ 0,8 g/L lên 1,5 g/L. Sự gia tăng này có thể được giải thích là do số lượng các vị trí hoạt động trên bề mặt vật liệu tăng lên, dẫn đến việc tạo ra nhiều gốc hydroxyl và các loại oxy hóa phản ứng khác. Tuy

nhiên, khi liều lượng tiếp tục được tăng lên 2,0 g/L, hiệu suất phân hủy phenol lại giảm. Hiện tượng này được cho là do nồng độ xúc tác quá cao trong dung dịch gây ra hiệu ứng tán xạ và che chắn ánh sáng. Điều này làm giảm khả năng hấp thụ photon của vật liệu, từ đó hạn chế hiệu quả quang xúc tác. Do đó, 1,5 g/L được xác định là liều lượng tối ưu để đạt hiệu quả phân hủy phenol cao nhất trong các điều kiện thử nghiệm.

Các kết quả trên cho thấy hiệu suất phân hủy phenol tăng đáng kể khi có sự kết hợp đồng thời của vật liệu xúc tác và bức xạ UVC, phù hợp với minh chứng cho sự tham gia của quá trình quang xúc tác. Theo giả thuyết, dưới tác động của photon, vật liệu composite được kích hoạt, dẫn đến sự hình thành các gốc oxy hóa, điển hình là các nhóm hydroxyl tại bề mặt giao diện pha. Các gốc oxy hóa này là tác nhân chính thúc đẩy quá trình khoáng hóa phenol.



Hình 4. Ảnh hưởng của pH đến hiệu quả loại bỏ phenol của vật liệu ESB.



Hình 5. Ảnh hưởng của liều lượng chất xúc tác đến hiệu quả loại bỏ phenol.

Bảng 2. Hiệu quả loại bỏ phenol bằng các vật liệu và phương pháp khác

Vật liệu	Phương pháp	Hiệu quả loại bỏ	Tài liệu tham khảo
rGO	Hấp phụ	35%	[6]
GO	Hấp phụ	63,1%	[7]
-FeC ₂ O ₄ 2H ₂ O	Quang xúc tác	92%	[8]
Ag/TiO ₂	Quang xúc tác	80,6%	[9]
ESB	Quang xúc tác	54%	Nghiên cứu này

4. Kết luận

Bùn thải ngành công nghiệp mạ điện và than trấu được nghiên cứu kết hợp thành vật liệu xúc tác quang hóa nhằm phân hủy phenol trong dung dịch nước dưới điều kiện ánh sáng UVC. Nhờ sự hiện diện của các kim loại trong thành phần, vật liệu này đã đạt hiệu suất phân hủy phenol 54% sau 240 phút, trong điều kiện nồng độ phenol ban đầu 20 mg/L và liều lượng xúc tác 1,5 g/L. Nghiên cứu này không chỉ chứng minh tiềm năng của vật liệu composite mà còn cung cấp một phương pháp khả thi để nâng cao giá trị của bùn thải công nghiệp, biến nó thành một chất xúc tác thân thiện với môi trường. Phương pháp được đề xuất không chỉ hỗ trợ xử lý ô nhiễm hiệu quả mà còn thúc đẩy tái sử dụng chất thải bền vững và kinh tế tuần hoàn tài nguyên. Tuy nhiên, việc phân tích cơ chế xúc tác quang của vật liệu chế tạo được cùng với việc đánh giá khả năng ứng dụng thực tế và độ ổn định của vật liệu dưới ánh sáng mặt trời trong môi trường nước thải phức tạp để khẳng định tính khả thi sẽ được tiếp tục tìm hiểu chuyên sâu hơn ở các nghiên cứu tiếp theo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Hà Nội trong đề tài mã số QG.24.04.

Tài liệu tham khảo

- [1] M. Ghouti, J. Sayma, N. Munira, D. Mohamed, D. Da'na, H. Qiblawey, Effective Removal of Phenol from Wastewater Using a Hybrid Process of Graphene Oxide Adsorption and UV-irradiation, *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 27, 2022, pp. 102525, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102525>.
- [2] M. Fatima, B. Li, M. R. Al Shehhi, X. Feng, K. Wang, Treatment of Phenolic-wastewater by Hybrid Technologies: A Review, *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 57, 2024, pp. 104695, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104695>.
- [3] K. G. Pavithra, P. S. Rajan, J. Arun, K. Brindhadevi, Q. H. Le, A. Pugazhendhi, A Review on Recent Advancements in Extraction, Removal and Recovery of Phenols from Phenolic Wastewater: Challenges and Future Outlook, *Environmental Research*, Vol. 237, Part 2, 2023, pp. 117005, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117005>.
- [4] M. Seloglu, R. Orhan, V. Selen, G. Dursun, Analysis of Photocatalytic Degradation of Phenol by Zinc Oxide Using Response Surface Methodology, *Chemistry Open*, Vol. 13, 2024, pp. e202300238, <https://doi.org/10.1002/open.202300238>.
- [5] D. V. Hien, H. M. Trang, N. T. Mai, D. V. Thanh, N. M. Dung, T. T. Huong, N. M. Khai, T. T. M. Hang, Recycling Electroplating Sludge as an Efficient Photocatalyst for Degradation of Ciprofloxacin in Aqueous Solution, *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 75, No. 3, 2025, pp. 252-265, <https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2446361>.
- [6] M. N. Deyala, M. B. Nahla, Phenol Removal from Wastewater Using Waste Products, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 8, No. 1, 2020, pp. 103592, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103592>.
- [7] B. Abeer, H. Mohammad, A. Arwa, T. Muhammad, A. Amani, Efficient Removal of Phenol Compounds from Water Environment Using Ziziphus Leaves Adsorbent, *Science of the Total Environment*, Vol. 761, 2021, pp. 143229, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143229>.
- [8] S. Galeas, S. V. Ramirez, P. I. Pontón, V. H. Guerrero, V. Goetz, Photocatalytic Degradation of Phenol under Visible Light Irradiation by Using Ferrous Oxalate Synthesized from Iron-rich Mineral Sands via a Green Hydrothermal Route, *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 32, 2023, pp. 103325, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103325>.
- [9] M. Norouzi, A. Fazeli, O. Tavakoli, Photocatalytic Degradation of Phenol under Visible Light Using Electrospun Ag/TiO₂ as a 2D Nano-Powder: Optimizing Calcination Temperature and Promoter Content, *Advanced Powder Technology*, Vol. 33, No. 11, 2022, pp. 103792, <https://doi.org/10.1016/j.appt.2022.103792>.