

Tổng hợp vật liệu CuFe_2O_4 từ tính bằng phương pháp sol-gel sử dụng dịch chiết vỏ thanh long: So sánh các phương pháp tổng hợp và đánh giá hoạt tính xúc tác trong phản ứng oxy hóa benzyl alcohol

Trần Thị Trinh Thi^{1,2}, Ngô Đức Toàn^{1,2}, Nguyễn Thế Luân^{1,2}, Hoàng Châu Ngọc^{1,2}, Trần Thụy Tuyết Mai^{2,3}, Lưu Thị Xuân Thi^{1,2}, Lê Tiến Khoa^{1,2,*}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

¹Khoa Hóa học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, TP.HCM, Việt Nam

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Khoa Kỹ thuật Hóa học, Trường Đại học Bách Khoa, TP.HCM, Việt Nam

Liên hệ

Lê Tiến Khoa, Khoa Hóa học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, TP.HCM, Việt Nam

Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Email: ltkhoa@hcmus.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 15-9-2025
- Ngày sửa đổi: 15-12-2025
- Ngày chấp nhận: 22-12-2025
- Ngày đăng: 26-03-2026

DOI:

<https://doi.org/10.32508/stdjns.v10i1.1478>



Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



TÓM TẮT

Bài báo trình bày việc tổng hợp và đánh giá hoạt tính xúc tác của các mẫu bột CuFe_2O_4 có từ tính trong phản ứng oxy hóa chọn lọc benzyl alcohol thành benzaldehyde dưới các điều kiện nhẹ nhàng (nhiệt độ phòng, sử dụng dung môi nước). Ba phương pháp điều chế đơn giản đã được áp dụng, bao gồm ceramic, đồng kết tủa và sol-gel, trong đó phương pháp sol-gel được hỗ trợ bởi dịch chiết vỏ thanh long nhằm thúc đẩy quá trình tạo gel và cải thiện sự phân tán của các ion kim loại trong mạng tinh thể. Kết quả cho thấy phương pháp tổng hợp ảnh hưởng đáng kể đến thành phần pha, kích thước hạt cũng như sự phân bố của các ion Cu^{2+} và Fe^{3+} trên bề mặt, từ đó quyết định đến hoạt tính xúc tác. Mặc dù tất cả các mẫu CuFe_2O_4 thu được đều cho thấy khả năng kích hoạt persulfate hiệu quả, thúc đẩy quá trình oxy hóa benzyl alcohol theo động học giả bậc hai, mẫu tổng hợp bằng phương pháp sol-gel thể hiện hoạt tính vượt trội, với độ chuyển hóa benzyl alcohol và độ chọn lọc benzaldehyde đều hơn 85% sau 24 giờ phản ứng. Độ chuyển hóa và độ chọn lọc cao này được cho là xuất phát từ sự phân bố tối ưu của các ion kim loại trên bề mặt vật liệu. Ngoài ra, nhờ đặc tính từ tính tốt, xúc tác có thể dễ dàng thu hồi và tái sử dụng qua nhiều chu kỳ, cho thấy tiềm năng ứng dụng trong các quá trình oxy hóa chọn lọc thân thiện môi trường.

Từ khóa: CuFe_2O_4 từ tính, hoạt hóa persulfate, dịch chiết vỏ thanh long, benzyl alcohol, benzaldehyde

GIỚI THIỆU

Benzaldehyde (BzH) là một trong những aldehyde thơm quan trọng nhất trong ngành công nghiệp hóa chất, được sử dụng rộng rãi như tiền chất chủ chốt để sản xuất hương liệu, mỹ phẩm, thuốc trừ sâu và thuốc nhuộm¹. Trước đây, BzH chủ yếu được tổng hợp thông qua quá trình oxy hóa pha lỏng hoặc chlor hóa toluene². Tuy nhiên, do toluene là một hợp chất hữu cơ dễ bay hơi, tiềm ẩn nguy cơ gây ô nhiễm đất và nước cũng như ảnh hưởng xấu đến sức khỏe con người³, các nhà nghiên cứu đang tích cực tìm kiếm những phương pháp tổng hợp xanh và bền vững hơn. Một hướng thay thế đầy hứa hẹn là oxy hóa chọn lọc benzyl alcohol (BzA) bằng các chất xúc tác và các chất hỗ trợ khác nhau. Thí dụ, Wu và cộng sự⁴ đã chuyển hóa thành công BzA thành BzH ở 110 °C bằng cách sử dụng xúc tác Au-Pd trên giá mang ZrO_2 . Tương tự, Zhang và cộng sự⁵ đã sử dụng xúc tác polyoxo-tungstate liên kết Sb kết hợp với H_2O_2 để oxy hóa hiệu quả BzA trong acetonitrile ở 60 °C, trong khi Berapi và cộng sự⁶ đề xuất sử dụng hạt nano Co_3O_4 làm xúc

tác dị thể để tổng hợp BzH từ BzA trong acetonitrile ở 110 °C.

Mặc dù đạt hiệu quả cao về độ chuyển hóa BzA và độ chọn lọc BzH, các nghiên cứu này vẫn tồn tại một số hạn chế, bao gồm việc sử dụng xúc tác kim loại quý đắt tiền và khó khăn trong việc thu hồi xúc tác. Gần đây, các xúc tác trên cơ sở spinel ferrite từ tính đã nổi lên như những lựa chọn thay thế đầy hứa hẹn cho quá trình oxy hóa BzA thành BzH, nhờ sự hiện diện của các ion kim loại chuyển tiếp và tính chất sắt từ cho phép chúng được thu hồi dễ dàng sau khi sử dụng. Thật vậy, nano NiFe_2O_4 đã được phát triển như vật liệu xúc tác từ tính cho phản ứng oxy hóa chọn lọc BzA thành BzH ở 60 °C⁷. Wang và các cộng sự⁸ cũng đã áp dụng thành công hệ nhũ tương Pickering nhậy từ dựa trên vật liệu ferrite làm chất xúc tác có thể thu hồi cho quá trình chuyển hóa BzA ở 80 °C trong dung môi acetonitrile. Giữa các vật liệu ferrite khác nhau, CuFe_2O_4 đang dần thu hút nhiều sự chú ý nhờ giá thành hợp lý, thành phần ít độc hại, từ tính tốt, và có hoạt tính xúc tác triển vọng cho nhiều phản ứng

Trích dẫn bài báo này: Trinh Thi T T, Đức Toàn N, Thế Luân N, Châu Ngọc H, Tuyết Mai T T, Xuân Thi L T, Tiến Khoa L. **Tổng hợp vật liệu CuFe_2O_4 từ tính bằng phương pháp sol-gel sử dụng dịch chiết vỏ thanh long: So sánh các phương pháp tổng hợp và đánh giá hoạt tính xúc tác trong phản ứng oxy hóa benzyl alcohol**. *Sci. Tech. Dev. J. - Nat. Sci.* 2026; 10(1):3543-3555.

oxi hóa-khử, trong đó có phản ứng oxi hóa chọn lọc BzA^{9,10}. Đặc biệt, trạng thái oxi hóa đa dạng của các cặp ion Cu(I)/Cu(II) và Fe(II)/Fe(III) trong vật liệu này còn đem đến khả năng dẫn truyền điện tử tốt, cho phép hoạt hóa nhiều chất oxi hóa khác nhau. Cụ thể, khi được kết hợp với H₂O₂ trong dung môi acetonitrile ở 60 °C, CuFe₂O₄ đã chuyển hóa thành công 98% BzA thành BzH chỉ trong 6 giờ⁹. Những đặc điểm trên cho thấy CuFe₂O₄ là lựa chọn xúc tác tiềm năng, vừa hiệu quả về mặt hoạt tính, vừa thân thiện và dễ thu hồi. Tuy nhiên, phản ứng oxy hóa BzA trong các khảo sát này vẫn cần sử dụng dung môi hữu cơ gây hại cho môi trường (như acetonitrile) và đòi hỏi nhiệt độ cao để oxi hóa BzA, làm hạn chế khả năng ứng dụng trong thực tiễn và công nghiệp. Ngoài ra, các xúc tác ferrite, nhất là CuFe₂O₄, thường được tổng hợp bằng những kỹ thuật phức tạp (thí dụ phương pháp thủy nhiệt), vốn yêu cầu thiết bị tinh vi và hóa chất công nghiệp không thân thiện với môi trường.

Để giải quyết những thách thức trên, một nghiên cứu gần đây của chúng tôi đã đề xuất tổng hợp xúc tác CuFe₂O₄ có từ tính bằng phương pháp sol-gel với sự hỗ trợ của chiết xuất vỏ thanh long (dragon fruit peel extract, DPE)¹¹. Do thanh long được tiêu thụ rộng rãi ở Việt Nam và trên toàn thế giới, quá trình chế biến loại quả này thường tạo ra một lượng lớn vỏ thải hàng năm, gây ra nhiều vấn đề về môi trường. Trong khi đó, không ít nghiên cứu đã chỉ ra rằng vỏ thanh long giàu polyphenol¹², các hợp chất có khả năng tạo phức với ion kim loại và thúc đẩy quá trình hình thành gel, rất thích hợp để ứng dụng trong tổng hợp vật liệu. Vì vậy, ứng dụng dịch chiết vỏ thanh long có thể được xem là một giải pháp hấp dẫn, vừa cho phép tái sử dụng một nguồn phụ phẩm nông nghiệp, vừa có thể tổng hợp CuFe₂O₄ theo tinh thần của “hóa học xanh”. Tuy nhiên, mức độ hiệu quả của phương pháp tổng hợp này vẫn chưa được so sánh với các phương pháp tổng hợp khác, khiến ưu điểm và giới hạn của phương pháp đề nghị vẫn chưa được xác định rõ ràng. Đặc biệt, ở nghiên cứu trên, tất cả các mẫu sau quá trình tạo gel đều được nung trong 2 giờ. Đây là thời gian nung chưa đủ để tối ưu hóa thành phần pha spinel cũng như hàm lượng các ion kim loại trên bề mặt vật liệu, khiến hoạt tính xúc tác còn hạn chế. Gần đây, Xu và các cộng sự¹³ nhận định thời gian nung tối ưu đối với các vật liệu pha spinel nên là 3 giờ, ít hơn sẽ không đủ để đạt được mức độ tinh thể hóa tốt, còn nhiều hơn sẽ tăng lượng pha tạp trong vật liệu.

Chính vì vậy, trong nghiên cứu này, các mẫu xúc tác CuFe₂O₄ từ tính sẽ được tổng hợp bằng ba phương pháp khác nhau: phương pháp ceramic, phương pháp đồng kết tủa và phương pháp sol-gel có sự hỗ trợ của dịch chiết vỏ thanh long nhằm làm rõ mức độ hiệu

quả của từng phương pháp tổng hợp. Tất cả các mẫu đều được nung trong 3 giờ, nhằm đảm bảo quá trình hình thành pha spinel ferrite được thuận lợi. Bên cạnh đó, nhằm thực hiện phản ứng oxi hóa BzA thành BzH trong điều kiện nhẹ nhàng, sodium persulfate (Na₂S₂O₈) được đề nghị sử dụng như một chất oxi hóa có khả năng sinh ra các gốc tự do sulfate trong môi trường nước dưới sự hoạt hóa của ion kim loại chuyển tiếp¹⁴. Chiến lược này có thể mang lại khả năng oxi hóa BzA hiệu quả và chọn lọc trong nước ở điều kiện ôn hòa, qua đó nâng cao tính khả thi và tiềm năng ứng dụng thực tiễn của quá trình tổng hợp BzH.

PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Tổng hợp xúc tác từ tính CuFe₂O₄

Như đã đề cập trong phần giới thiệu, các mẫu xúc tác CuFe₂O₄ được tổng hợp bằng ba phương pháp đơn giản gồm: phương pháp ceramic, phương pháp đồng kết tủa, và phương pháp sol-gel có hỗ trợ của chiết xuất vỏ thanh long. Trong cả ba quy trình, các tiền chất CuSO₄·5H₂O (≥ 99,0%) và Fe₂(SO₄)₃ (≥ 99,0%) với độ tinh khiết cao đều được cung cấp bởi Xilong Scientific Co. (Trung Quốc). Nhiệt độ nung 900 °C được lựa chọn cho tất cả các mẫu, vì đây là điều kiện được sử dụng phổ biến trong nhiều công trình nhằm thu được CuFe₂O₄ có độ kết tinh cao và hạn chế sự hình thành các pha tạp^{15,16}. Đặc biệt, nghiên cứu gần đây của chúng tôi cũng cho thấy nhiệt độ này là tối ưu cho sự hình thành pha spinel tứ phương CuFe₂O₄, vốn có khả năng hoạt hóa hiệu quả Na₂S₂O₈ trong phản ứng oxy hóa BzA¹¹.

Trong phương pháp ceramic, 1,25 g CuSO₄·5H₂O được trộn đều với 0,50 g Fe₂(SO₄)₃, sau đó được nung ở 900 °C trong 3 giờ bằng lò Carbolite. Sản phẩm thu được được ký hiệu là CuFeO-CE.

Xúc tác CuFe₂O₄ cũng được tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa. Trước tiên, 2,5 g CuSO₄·5H₂O và 4 g Fe₂(SO₄)₃ được hòa tan trong 100 mL nước cất. Sau đó, dung dịch NaOH (4 mol L⁻¹) được nhỏ giọt để điều chỉnh pH đến 9, tạo thành kết tủa. Kết tủa này được lọc, sấy ở 150 °C trong 2 giờ, rồi nung ở 900 °C trong 3 giờ. Sản phẩm cuối cùng được ký hiệu là CuFeO-CP.

Đối với phương pháp sol-gel có hỗ trợ của DPE, quy trình tương tự như trong công bố trước đó¹¹ được sử dụng, nhưng có thay đổi về thời gian nung. Cụ thể, 100 g vỏ thanh long (lấy từ Bình Thuận, Việt Nam) được rửa sạch, nghiền nhỏ và trộn với 300 mL nước cất, sau đó đun hồi lưu trong 1 giờ. Dịch chiết thu được được lọc bỏ phần rắn và để nguội về nhiệt độ phòng. Tiếp đó, 300 mL dịch chiết được trộn với 60 mL dung dịch chứa CuSO₄ và Fe₂(SO₄)₃ cùng có

nồng độ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, hỗn hợp được khuấy ở nhiệt độ phòng trong 2 giờ, sau đó gia nhiệt ở $80 \text{ }^\circ\text{C}$ trong 4 giờ. Quá trình này tạo ra một gel nhớt, gel được sấy ở $150 \text{ }^\circ\text{C}$ trong 16 giờ, nghiền thành bột mịn và nung ở $900 \text{ }^\circ\text{C}$ trong 3 giờ để thu được sản phẩm cuối cùng, ký hiệu là CuFeO-SG.

Phân tích vật liệu xúc tác

Giản đồ nhiễu xạ tia X dạng bột (XRD) của các mẫu xúc tác CuFe_2O_4 được ghi nhận bằng nhiễu xạ kế Bruker D8 Advance với bức xạ $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) ở tốc độ quét $0,0206^\circ \text{ s}^{-1}$ nhằm xác định cấu trúc tinh thể và thành phần pha. Kích thước hạt và hình thái bề mặt được đặc trưng bằng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FESEM) sử dụng kính hiển vi HITACHI S-4800, vận hành ở 1000 V và 9800 nA. Thành phần nguyên tố trên bề mặt được phân tích bằng phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS) với đầu dò X-Max 80 SDD tích hợp trên cùng kính hiển vi. Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) được ghi ở nhiệt độ phòng bằng thiết bị Bruker VERTEX 70 nhằm xác định các nhóm chức và liên kết hóa học trên bề mặt xúc tác. Các thông số từ, bao gồm từ độ bão hòa (M_S), lực kháng từ (H_C) và độ từ dư (M_R), được đo ở nhiệt độ phòng bằng từ kế DMS 880 (ADE Technologies) dưới từ trường ngoài trong khoảng -16000 đến $+16000 \text{ Oe}$.

Oxi hóa chọn lọc BzA

Hoạt tính xúc tác của các mẫu CuFe_2O_4 đã tổng hợp (CuFeO-CE, CuFeO-CP và CuFeO-SG) cho phản ứng oxi hóa chọn lọc BzA được đánh giá như sau: Một dung dịch chứa 10 mmol BzA và 20 mmol $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ trong 250 mL nước cất được chuẩn bị, sau đó 0,12 g bột xúc tác CuFe_2O_4 được thêm vào. Hỗn hợp phản ứng được khuấy ở nhiệt độ phòng, và tại các khoảng thời gian xác định, 10 mL dung dịch được lấy ra và tiến hành chiết lỏng-lỏng bằng ethyl acetate. Pha hữu cơ sau đó được tách ra và làm khan bằng Na_2SO_4 khan. Các thành phần chiết được phân tích bằng sắc ký khí (GC) Hewlett-Packard 5890 Series II, sử dụng cột mao quản SE-54 ($30 \text{ m} \times 0,25 \text{ mm} \times 0,25 \text{ mm}$) và đầu dò ion hóa ngọn lửa (FID), với phenol làm chất nội chuẩn. Độ chuyển hóa BzA (BzA conversion) và độ chọn lọc BzH (BzH selectivity) được xác định theo các công thức sau (Phương trình 1 và Phương trình 2):

$$\text{BzA conversion}(\%) = \frac{C_{BzA0} - C_{BzA}}{C_{BzA0}} \times 100\% \quad (\text{Phương trình 1})$$

$$\text{BzH selectivity}(\%) = \frac{C_{BzH}}{C_{BzH} + C_{BA}} \times 100\% \quad (\text{Phương trình 2})$$

với C_{BzA0} là ký hiệu nồng độ đầu (ppm) của BzA; C_{BzA} , C_{BzH} , và C_{BA} lần lượt là các ký hiệu nồng độ (ppm) của BzA, BzH, và benzoic acid (BA) ở thời điểm t.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Thành phần pha và hành thái bề mặt

Để đánh giá ảnh hưởng của các phương pháp tổng hợp khác nhau đến thành phần pha của mẫu điều chế, các giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) đã được khảo sát và thể hiện trong Hình 1. Thành phần pha của từng mẫu (Bảng 1) được xác định thông qua phương pháp hiệu chỉnh Rietveld bằng phần mềm Fullprof Suite. Mẫu CuFeO-CE cho thấy các đỉnh nhiễu xạ rõ nét tại $18,3^\circ$, $29,8^\circ$, $30,5^\circ$, $34,6^\circ$, $35,8^\circ$, $41,8^\circ$ và $62,1^\circ$, tương ứng với các mặt mạng (101), (112), (200), (103), (211), (004) và (224) của pha spinel tứ phương CuFe_2O_4 (nhóm không gian $I4_1/amd$), vốn xuất phát từ hiện tượng biến dạng Jahn-Teller có liên quan đến ion Cu^{2+} . Dựa trên kết quả hiệu chỉnh Rietveld (Bảng 1), pha này chiếm 72,05% khối lượng mẫu. Ngoài ra, ba pha tinh thể khác trong mẫu này cũng đã được xác định. Theo đó, các đỉnh nhiễu xạ tại $35,5^\circ$ và $42,5^\circ$ được quy cho các mặt (311) và (400) của pha spinel lập phương CuFe_2O_4 (nhóm không gian $Fd3m$, chiếm 5,91% khối lượng), trong khi các đỉnh tại $33,1^\circ$ và $38,6^\circ$ lần lượt tương ứng với mặt (104) của pha hematite Fe_2O_3 (nhóm không gian $R-3c$, chiếm 4,84% khối lượng) và mặt (111) của pha tenorite CuO (nhóm không gian $C2/c$, chiếm 17,21% khối lượng). Sự hiện diện của các pha tạp như hematite Fe_2O_3 và tenorite CuO cho thấy mặc dù phương pháp ceramic có thể tạo ra CuFe_2O_4 , phản ứng pha rắn giữa các tiền chất vẫn chưa hoàn tất, có thể do sự khuếch tán ion hạn chế trong quá trình nung. Đáng chú ý, việc thay đổi phương pháp tổng hợp từ ceramic sang đồng kết tủa đã cải thiện đáng kể sự hình thành pha spinel, thể hiện qua hàm lượng spinel tứ phương CuFe_2O_4 cao hơn (85,39% khối lượng), giảm đáng kể phần tenorite CuO (10,96% khối lượng) và loại bỏ hoàn toàn pha hematite Fe_2O_3 . Tương tự, phương pháp sol-gel có hỗ trợ của DPE đã tạo ra mẫu CuFeO-SG với thành phần chủ yếu là spinel tứ phương CuFe_2O_4 (87,52% khối lượng), chỉ còn lại 12,48% khối lượng tenorite CuO . Những kết quả này chứng minh rằng con đường tổng hợp có ảnh hưởng mạnh mẽ đến thành phần pha của các mẫu. Trong ba phương pháp tổng hợp, đồng kết tủa và sol-gel tỏ ra hiệu quả hơn cho việc hình thành pha spinel, nhờ khả năng phân tán ion kim loại ở cấp độ phân tử. Đặc biệt, thời gian nung cũng được nhận thấy có tác động đến thành phần pha của mẫu, nhất là khi được điều chế bằng phương pháp sol-gel có sự hỗ

trợ của DPE. So với nghiên cứu trước đây¹¹, khi nung ở 900 °C trong 2 giờ, mẫu CuFeO-SG cho thấy có sự hình thành của cả 2 pha spinel, gồm spinel tứ phương (83,61% khối lượng) và spinel lập phương (7,36% khối lượng). Trong khi đó, mẫu CuFeO-SG khi nung trong 3 giờ chỉ thể hiện một pha tinh thể spinel tứ phương với hàm lượng cao (87,52% khối lượng), cho thấy kéo dài thời gian nung giúp chuyển hóa dần pha spinel lập phương thành spinel tứ phương.

Bảng 1: Thành phần pha của các mẫu CuFeO-CE, CuFeO-CP và CuFeO-SG

Mẫu	Thành phần pha (wt%)			
	CuFe ₂ O ₄ (I41/amd)	CuFe ₂ O ₄ (Fd3m)	CuO (C2/c)	Fe ₂ O ₃ (R-3c)
CuFeO-CE	72,05	5,91	17,21	4,84
CuFeO-CP	85,39	3,65	10,96	-
CuFeO-SG	87,52	-	12,48	-

[Nguồn: Nhóm tác giả]

Bên cạnh việc ảnh hưởng đến thành phần pha, các phương pháp tổng hợp khác nhau còn cho thấy tác động đáng kể đến hình thái học (Hình 2a–2c) và kích thước hạt (Hình 2d) của các mẫu CuFeO. Mẫu CuFeO-CE bao gồm các hạt có hình dạng không đồng đều và ở trạng thái kết tụ, với dấu hiệu nóng chảy cục bộ ở các biên hạt, cho thấy quá trình nung ở 900 °C có khả năng đã thúc đẩy sự dính kết giữa các hạt. Hiện tượng tương tự cũng được quan sát thấy ở mẫu CuFeO-CP (Hình 2b), mặc dù kích thước hạt của mẫu này nhỏ hơn so với CuFeO-CE. Cụ thể, kích thước hạt của CuFeO-CE dao động trong khoảng 0,4–1,0 μm, trong khi của CuFeO-CP nằm trong khoảng 0,2–0,8 μm (Hình 2d). Đáng ngạc nhiên, mẫu CuFeO-SG lại thể hiện các hạt có kích thước lớn hơn nhiều (Hình 2c), với kích thước trung bình lên đến 19,4 μm (Hình 2d). Do cả ba mẫu đều được nung trong cùng điều kiện (900 °C, 3 giờ), kích thước hạt lớn bất thường của CuFeO-SG nhiều khả năng bắt nguồn từ các hợp chất thực vật có trong dịch chiết vỏ thanh long. Khi nung, các hợp chất này bị phân hủy hoàn toàn, giải phóng thêm năng lượng, qua đó thúc đẩy quá trình thiêu kết và đẩy kích thước hạt lên rất lớn.

Thành phần nguyên tố và các nhóm chức trên bề mặt

Bảng 2 tóm tắt thành phần nguyên tố bề mặt của ba mẫu, được xác định từ phổ EDS (Hình 3). Tất cả các mẫu đều chứa O, Cu và Fe trên bề mặt, nhưng hàm lượng tương đối của chúng, đặc biệt là các ion kim loại, có sự khác biệt đáng kể. Trong đó, mẫu CuFeO-SG thể hiện hàm lượng Fe trên bề mặt cao nhất, đạt

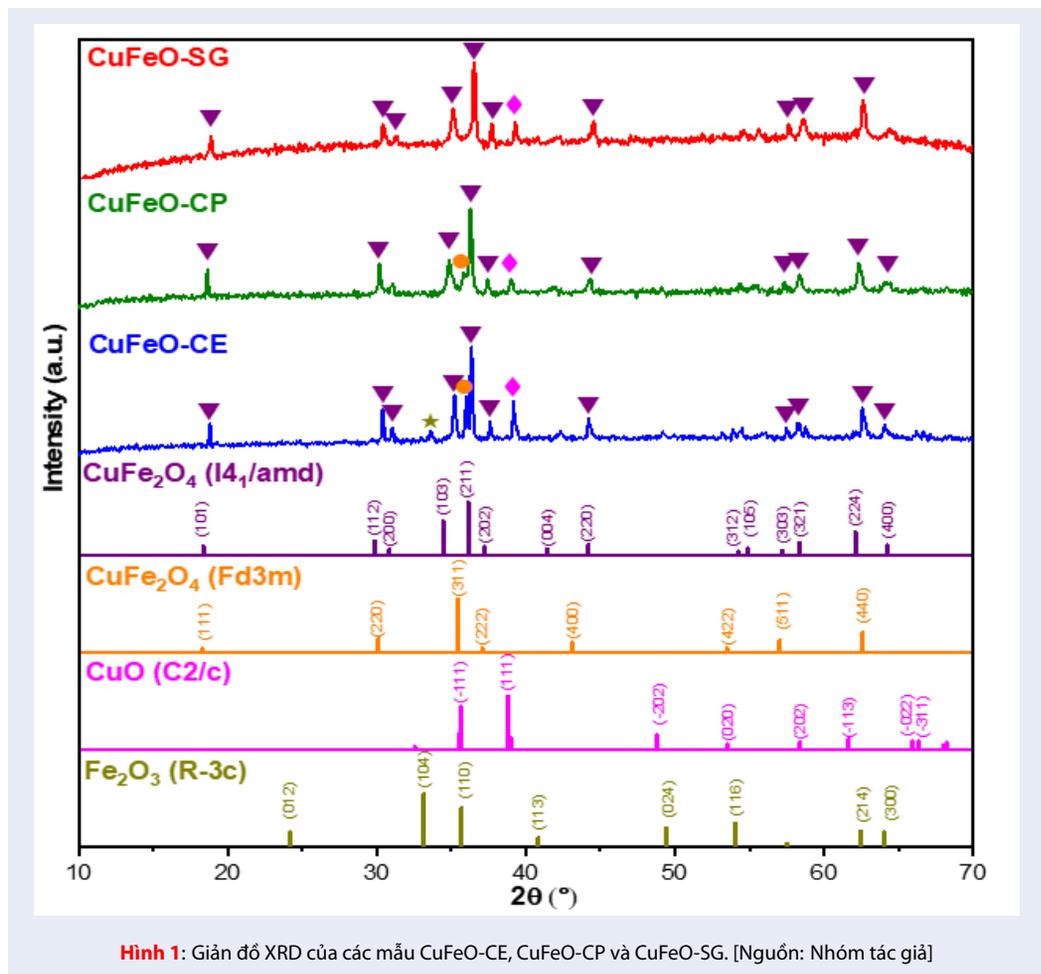
31,90% nguyên tử. Cần lưu ý rằng trong nghiên cứu trước đây¹¹, hàm lượng Fe trên bề mặt chỉ đạt được tối đa 24,18% nguyên tử khi mẫu được tổng hợp bằng phương pháp sol-gel có sự hỗ trợ của DPE với quá trình nung kéo dài trong 2 giờ. Kết quả này cho thấy thời gian nung 3 giờ đã thật sự cải thiện hiệu quả hàm lượng của các ion kim loại trên bề mặt vật liệu. Ở các mẫu CuFe₂O₄ được tổng hợp bằng hai phương pháp còn lại, hàm lượng Fe giảm mạnh xuống còn 22,57–24,97% nguyên tử, đi kèm với sự gia tăng đáng kể hàm lượng Cu trong mẫu CuFeO-CE. Tuy nhiên, mẫu CuFeO-CP lại có hàm lượng cả hai ion kim loại thấp nhất. Những biến đổi về thành phần nguyên tố này được kỳ vọng sẽ ảnh hưởng mạnh mẽ đến hoạt tính xúc tác của các mẫu, điều sẽ được thảo luận trong phần sau của bài báo.

Bảng 2: Thành phần nguyên tố trên bề mặt của CuFeO-CE, CuFeO-CP và CuFeO-SG

Mẫu	Thành phần nguyên tố trên bề mặt (% nguyên tử)		
	Cu	Fe	O
CuFeO-CE	23,44	24,97	51,59
CuFeO-CP	13,47	22,57	63,95
CuFeO-SG	14,90	31,90	53,21

[Nguồn: Nhóm tác giả]

Để phân tích các liên kết hóa học trên bề mặt các mẫu CuFe₂O₄, phổ FTIR của chúng được nghiên cứu (Hình 4). Mẫu CuFeO-CE cho thấy hai đỉnh đặc trưng của cấu trúc spinel: một đỉnh mạnh tại 576 cm⁻¹ ứng với dao động kim loại–oxygen tại các lỗ trống tứ diện, và một đỉnh yếu tại 438 cm⁻¹, được gán cho liên kết kim loại– oxygen tại các lỗ trống bát diện^{17,18}. Mẫu CuFeO-CP cũng thể hiện hai đỉnh này, với vị trí dịch chuyển nhẹ về phía số sóng cao hơn. Ngoài ra, mẫu này còn xuất hiện một dải hấp thụ rộng tại 3441 cm⁻¹ và một đỉnh tại 1628 cm⁻¹, lần lượt liên quan đến dao động hóa trị và dao động biến dạng của các nhóm hydroxyl trên bề mặt^{19,20}. Đối với mẫu CuFeO-SG, một dải hấp thụ mới được quan sát thấy tại 926 cm⁻¹, có thể bắt nguồn từ các hợp chất hữu cơ dư thừa trong dịch chiết vỏ thanh long. Hơn nữa, đỉnh kim loại–oxygen ở lỗ trống tứ diện của mẫu này dịch chuyển rõ rệt về phía số sóng cao hơn (598 cm⁻¹). Sự dịch chuyển đáng kể này nhiều khả năng đến từ sự thay đổi thành phần kim loại trong các lỗ trống tứ diện, bởi số sóng FTIR liên quan trực tiếp đến hằng số lực liên kết. Cần lưu ý rằng liên kết Fe³⁺–O²⁻ bền hơn liên kết Cu²⁺–O²⁻²¹. Do đó, sự dịch chuyển lên số sóng cao phản ánh sự gia tăng hàm lượng Fe tại



các lỗ trống tứ diện trên bề mặt vật liệu, điều này hoàn toàn phù hợp với kết quả EDS được trình bày trước đó.

Thông số từ tính

Hình 5 trình bày đường cong từ trễ của các mẫu CuFeO-CE, CuFeO-CP và CuFeO-SG, qua đó cho phép xác định các thông số từ tính như từ độ bão hòa (M_S), lực kháng từ (H_C) và độ từ dư (M_R) (Bảng 3). Cả ba mẫu đều thể hiện tính chất từ mạnh, thể hiện qua giá trị M_S cao. Trong đó, các mẫu CuFeO-SG và CuFeO-CP có giá trị M_S cao nhất (lần lượt 23,5 và 26,1 emu g^{-1}), phù hợp với hàm lượng pha spinel CuFe_2O_4 cao nhất. Khi hàm lượng pha spinel giảm ở mẫu CuFeO-CE (kèm theo sự gia tăng các pha tạp như tenorite CuO và hematite Fe_2O_3), giá trị M_S giảm rõ rệt xuống còn 18,7 emu g^{-1} . Ngoài ra, mẫu CuFeO-SG có giá trị H_C và M_R thấp nhất, cho thấy mẫu này dễ dàng bị nhiễm từ và khử từ. Những đặc điểm này gợi ý rằng mẫu CuFeO-SG là ứng viên tiềm năng nhất cho các ứng dụng xúc tác từ tính, vì vật liệu này có thể

dễ dàng được thu hồi bằng nam châm và tái phân tán hiệu quả cho các chu kỳ sử dụng tiếp theo.

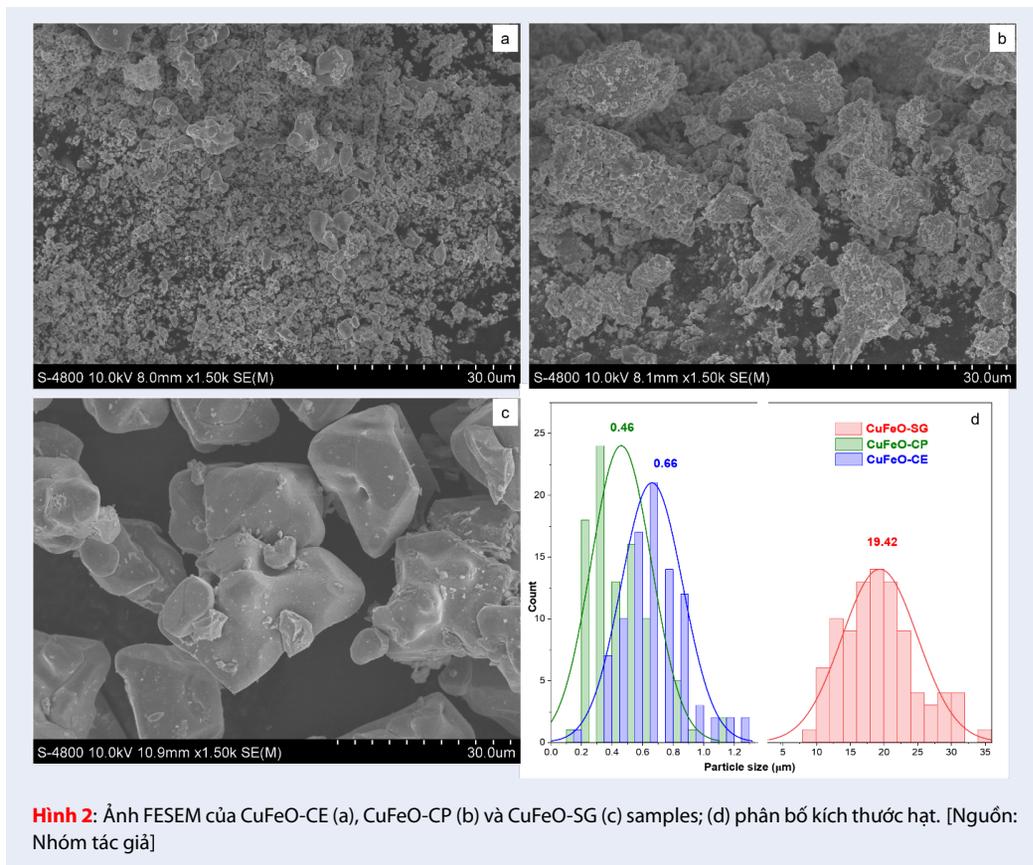
Bảng 3: Các thông số từ tính, M_S , H_C và M_R , của các mẫu CuFeO-CE, CuFeO-CP và CuFeO-SG

Mẫu	Thông số từ tính		
	M_S (emu g^{-1})	H_C (Oe)	M_R (emu g^{-1})
CuFeO-CE	18,7	335,9	6,1
CuFeO-CP	26,1	439,3	9,4
CuFeO-SG	23,5	163,9	4,6

[Nguồn: Nhóm tác giả]

Đánh giá hoạt tính xúc tác cho phản ứng oxy hóa BzA

Hình 6 so sánh các sắc ký đồ GC-FID của dung dịch BzA trong nước biển đổi theo thời gian khi có mặt $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ và các mẫu xúc tác từ tính. Ở nhiệt độ



phòng, cả ba mẫu xúc tác đều kích hoạt hiệu quả ion persulfate, dẫn đến quá trình oxy hóa chọn lọc BzA thành BzH. Thực vậy, trong suốt quá trình phản ứng, mũ tín hiệu tại 14,30 phút (tương ứng với BzA) giảm dần, trong khi mũ tín hiệu đặc trưng của BzH tại 11,25 phút tăng dần về cường độ. Như được tóm tắt trong Bảng 4, sau 24 giờ, hiệu suất chuyển hóa BzA vượt quá 75% với tất cả các xúc tác, kèm theo độ chọn lọc BzH trên 85%. Ngược lại, khi chỉ sử dụng $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ mà không có xúc tác, sau 24 giờ, độ chuyển hóa BzA chỉ đạt khoảng 30%, nhấn mạnh vai trò thiết yếu của các xúc tác trong phản ứng này. Trong số các mẫu, xúc tác CuFeO-SG thể hiện hiệu quả cao nhất, đạt độ chuyển hóa BzA đến 85,68%, trong khi hai xúc tác còn lại chỉ đạt mức 76,98–79,53%.

Để đánh giá thêm hiệu quả của xúc tác, động học phản ứng đã được khảo sát. Hình 7 cho thấy quá trình oxy hóa BzA thành BzH bởi ion persulfate tuân theo động học giả bậc hai, với các hằng số tốc độ được liệt kê trong Bảng 4. Mẫu CuFeO-SG tiếp tục đạt hằng số tốc độ cao nhất ($7,10 \text{ mol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$), vượt qua CuFeO-CE ($4,63 \text{ mol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$) và CuFeO-CP ($3,79 \text{ mol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Những kết quả này chứng minh rằng phương pháp tổng hợp không chỉ ảnh hưởng đến từ tính của

vật liệu CuFe_2O_4 mà còn tác động đáng kể đến hoạt tính xúc tác của chúng.

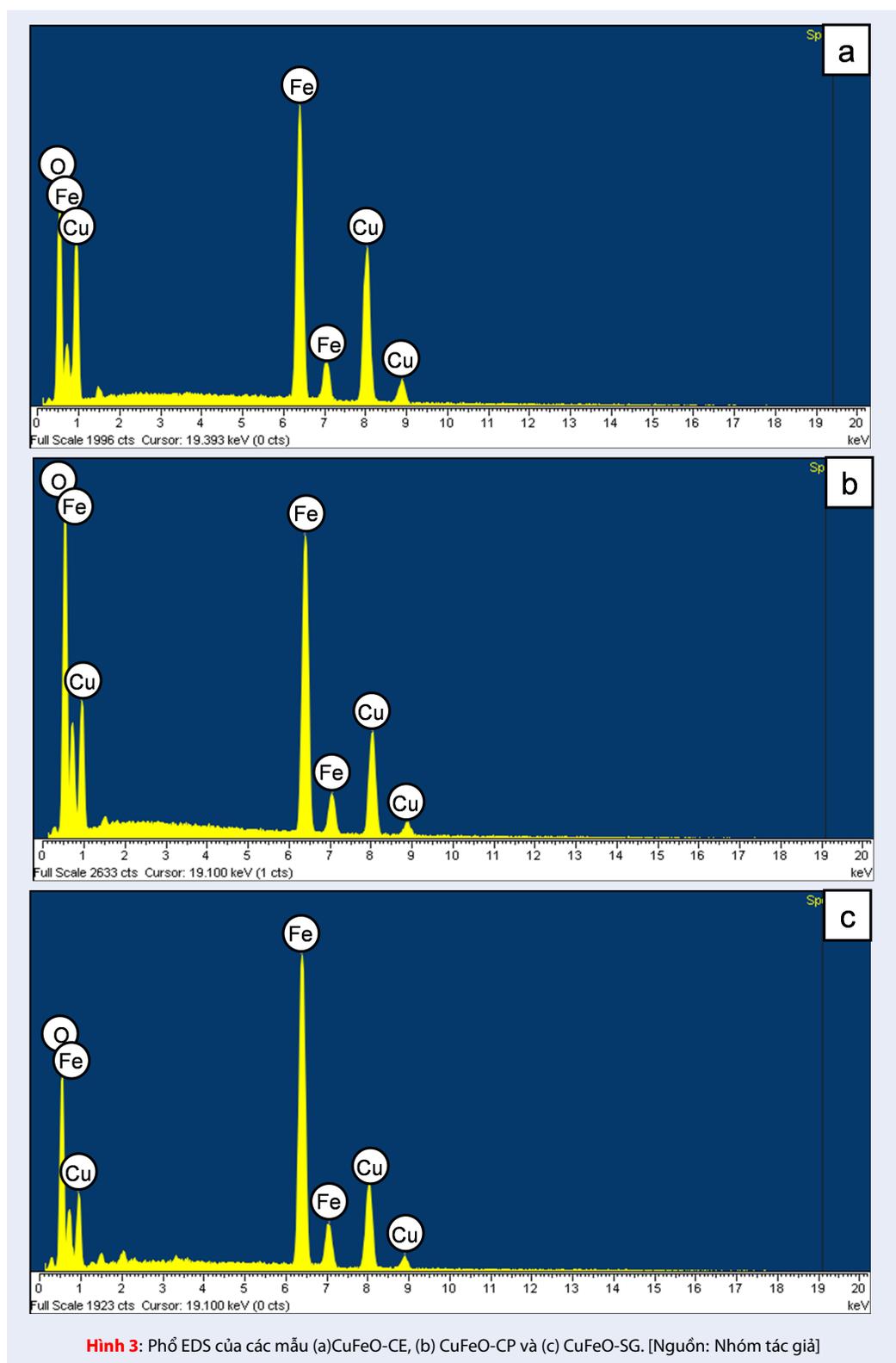
Bảng 4: So sánh độ chuyển hóa BzA, độ chọn lọc BzH và hằng số vận tốc (k) của phản ứng oxy hóa BzA khi sử dụng và khi không sử dụng xúc tác

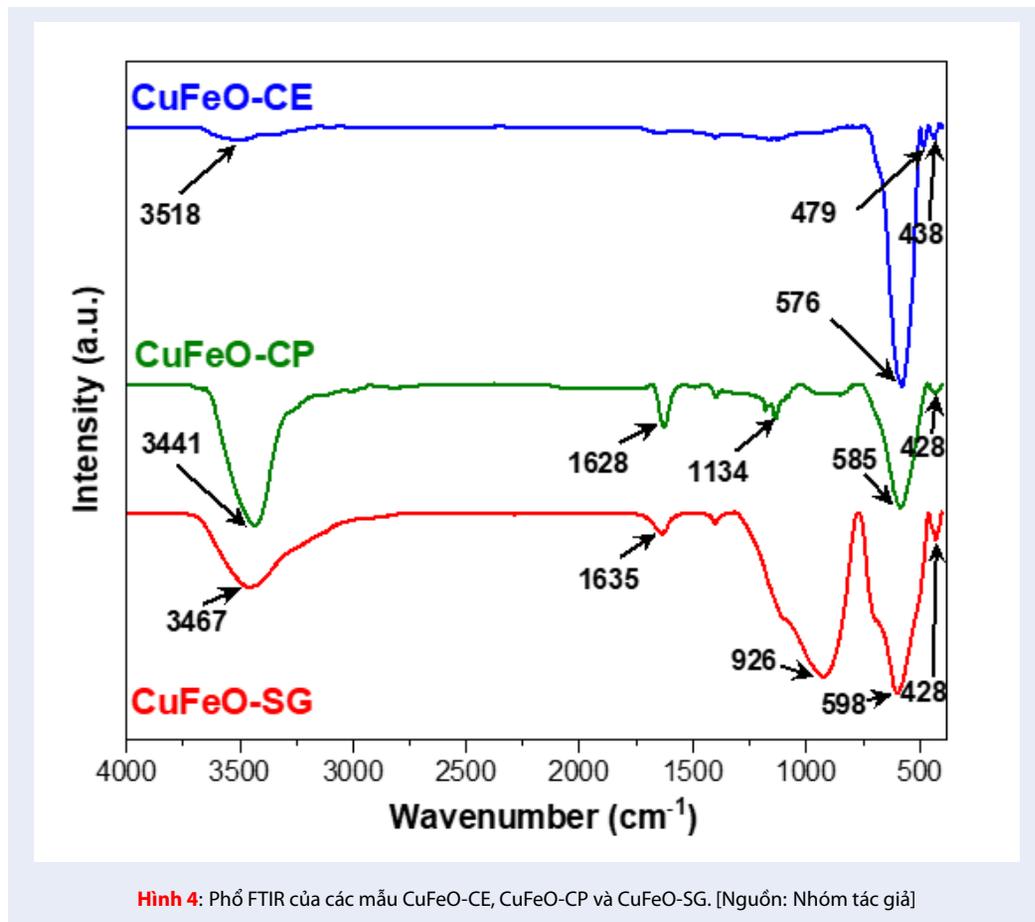
Mẫu	Độ chuyển hóa BzA (%)	Độ chọn lọc BzH (%)	k ($\text{mol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
No catalyst	30,00	90,35	0,74
CuFeO-CE	79,53	88,10	4,63
CuFeO-CP	76,98	90,93	3,79
CuFeO-SG	85,68	87,52	7,10

[Nguồn: Nhóm tác giả]

Thảo luận

Các kết quả thực nghiệm trên đã chứng minh sự kết hợp giữa xúc tác CuFe_2O_4 và $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ hoàn toàn có khả năng chuyển hóa hiệu quả BzA thành BzH trong dung dịch nước ở nhiệt độ phòng. Ngoài việc xác định hiệu quả của hệ xúc tác này, kết quả còn cho thấy hoạt tính của các mẫu phụ thuộc mạnh vào phương pháp

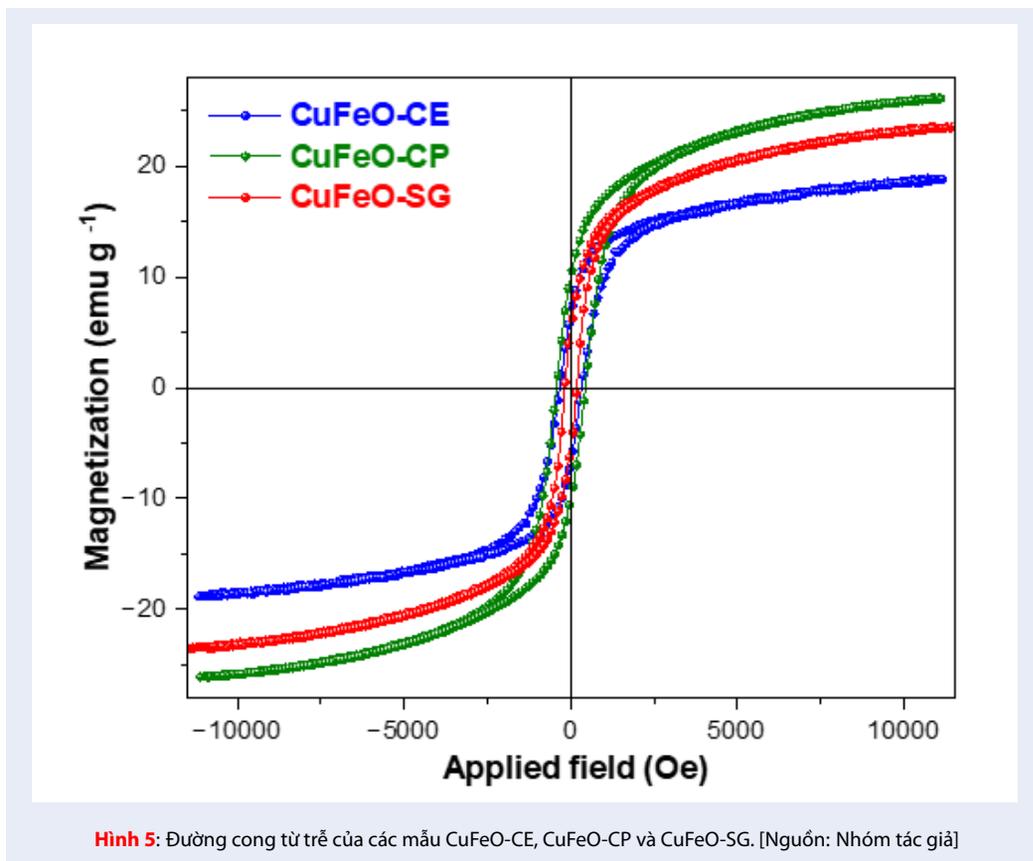




tổng hợp. Trong ba loại xúc tác, CuFeO-SG thể hiện hoạt tính xúc tác cao nhất, mặc dù có kích thước hạt lớn nhất. Thông thường, kích thước hạt lớn làm giảm diện tích bề mặt riêng, từ đó hạn chế hiệu quả xúc tác. Tuy nhiên, hiệu suất chuyển hóa BzA vượt trội của CuFeO-SG cho thấy hoạt tính xúc tác không chỉ bị chi phối bởi kích thước hạt, mà còn chịu ảnh hưởng mạnh từ các yếu tố then chốt khác.

Như đã được chứng minh trong nghiên cứu trước¹¹, các ion Cu^{2+} và Fe^{3+} trên bề mặt có thể phản ứng với ion persulfate để tạo ra gốc tự do sulfate (Phương trình 3–7). Nhờ khả năng oxi hóa mạnh và chọn lọc, các gốc tự do này có thể oxi hóa hiệu quả BzA thành BzH. Do đó, ngoài kích thước hạt và diện tích bề mặt, sự phân bố và hàm lượng ion kim loại hoạt động trên bề mặt chính là yếu tố quan trọng quyết định đến hoạt tính xúc tác. Cụ thể, mặc dù có kích thước hạt lớn hơn so với các mẫu tổng hợp bằng phương pháp ceramic và đồng kết tủa, mẫu CuFeO-SG lại sở hữu sự phân bố tối ưu các ion kim loại trong bề mặt, với hàm lượng Fe^{3+} trên bề mặt cao nhất. Nhiều khả năng trong quá trình tạo sol, các hợp chất hữu cơ đến từ DPE đã

hoạt động như những tác nhân tạo phức, giúp phân bố đồng đều các ion kim loại ở cấp độ phân tử đúng với tỷ lệ hợp thức, từ đó đảm bảo hàm lượng Fe^{3+} trên bề mặt gấp đôi Cu^{2+} . Nhờ vậy, mẫu CuFeO-SG có khả năng tạo ra nhiều gốc tự do sulfate hơn thông qua các phản ứng (3) và (4), dẫn đến hoạt tính xúc tác cao nhất. Đặc biệt, thời gian nung mẫu trong phương pháp sol-gel sử dụng DPE cũng được nhận thấy có tác động đến hoạt tính xúc tác. Khác với nghiên cứu trước¹¹, khi mà các mẫu CuFeO-SG chỉ được nung trong 2 giờ và đạt độ chuyển hóa BzA tối đa là 80,94%, ở nghiên cứu này, nhờ được nung trong 3 giờ, các mẫu CuFeO-SG đã nâng độ chuyển hóa BzA lên đến 85,68%. Sự cải thiện hoạt tính này có thể được giải thích nhờ vào sự gia tăng hàm lượng ion kim loại, nhất là Fe^{3+} , trên bề mặt vật liệu. Đối với mẫu CuFeO-CE, mặc dù hàm lượng Fe^{3+} giảm đáng kể, hàm lượng Cu^{2+} trên bề mặt lại được tăng lên, từ đó đã thúc đẩy các phản ứng (Phương trình 5–7) xảy ra, duy trì quá trình tạo gốc tự do hiệu quả. Ngược lại, mẫu CuFeO-CP có hàm lượng cả ion Cu^{2+} và ion Fe^{3+} thấp nhất, giải thích cho hoạt tính xúc tác kém nhất của mẫu.



$\equiv\text{Fe(III)} + \text{S}_2\text{O}_8^{2-} \rightarrow \equiv\text{Fe(II)} + \text{S}_2\text{O}_8^{\bullet-}$ (Phương trình 3)

$\equiv\text{Fe(II)} + \text{S}_2\text{O}_8^{2-} \rightarrow \equiv\text{Fe(III)} + \text{SO}_4^{2-} + \text{SO}_4^{\bullet-}$ (Phương trình 4)

$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HSO}_5^- + \text{HSO}_4^-$ (Phương trình 5)

$\equiv\text{Cu(II)} + \text{HSO}_5^- \rightarrow \equiv\text{Cu(I)} + \text{SO}_5^{\bullet-} + \text{H}^+$ (Phương trình 6)

$\equiv\text{Cu(I)} + \text{S}_2\text{O}_8^{2-} \rightarrow \equiv\text{Cu(II)} + \text{SO}_4^{2-} + \text{SO}_4^{\bullet-}$ (Phương trình 7)

Tái sử dụng xúc tác

Do là mẫu có hoạt tính xúc tác tốt nhất, mẫu CuFeO-SG được chọn để thử nghiệm tái sử dụng. Cụ thể, sau lần phản ứng đầu tiên, mẫu xúc tác được tách ra khỏi dung dịch phản ứng bằng nam châm, ngâm rửa với 10 mL ethyl acetate và 3 lần với nước cất. Mẫu sau đó được sấy ở 150° C trong 30 phút rồi được sử dụng cho các lần phản ứng tiếp theo trong cùng điều kiện thực nghiệm của lần thứ nhất. Như trình bày trong Bảng 5, hoạt tính xúc tác của xúc tác này giảm dần theo từng chu kỳ, thể hiện qua sự suy giảm độ chuyển hóa BzA, trong khi độ chọn lọc BzH lại tăng nhẹ. Nguyên nhân của sự mất hoạt tính này có thể do quá trình giải hấp

BzH khỏi bề mặt chất xúc tác không hoàn toàn và sự thay đổi hàm lượng ion Cu^{2+} và Fe^{3+} trên bề mặt, vốn không được hoàn nguyên kịp so với tốc độ bị tiêu thụ bởi $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$. Tuy vậy, sau ba chu kỳ tái sử dụng, hiệu suất chuyển đổi BzA vẫn duy trì trên 65%, chứng tỏ mẫu xúc tác CuFeO-SG vẫn có tiềm năng ứng dụng thực tiễn trong các phản ứng chuyển hóa hữu cơ.

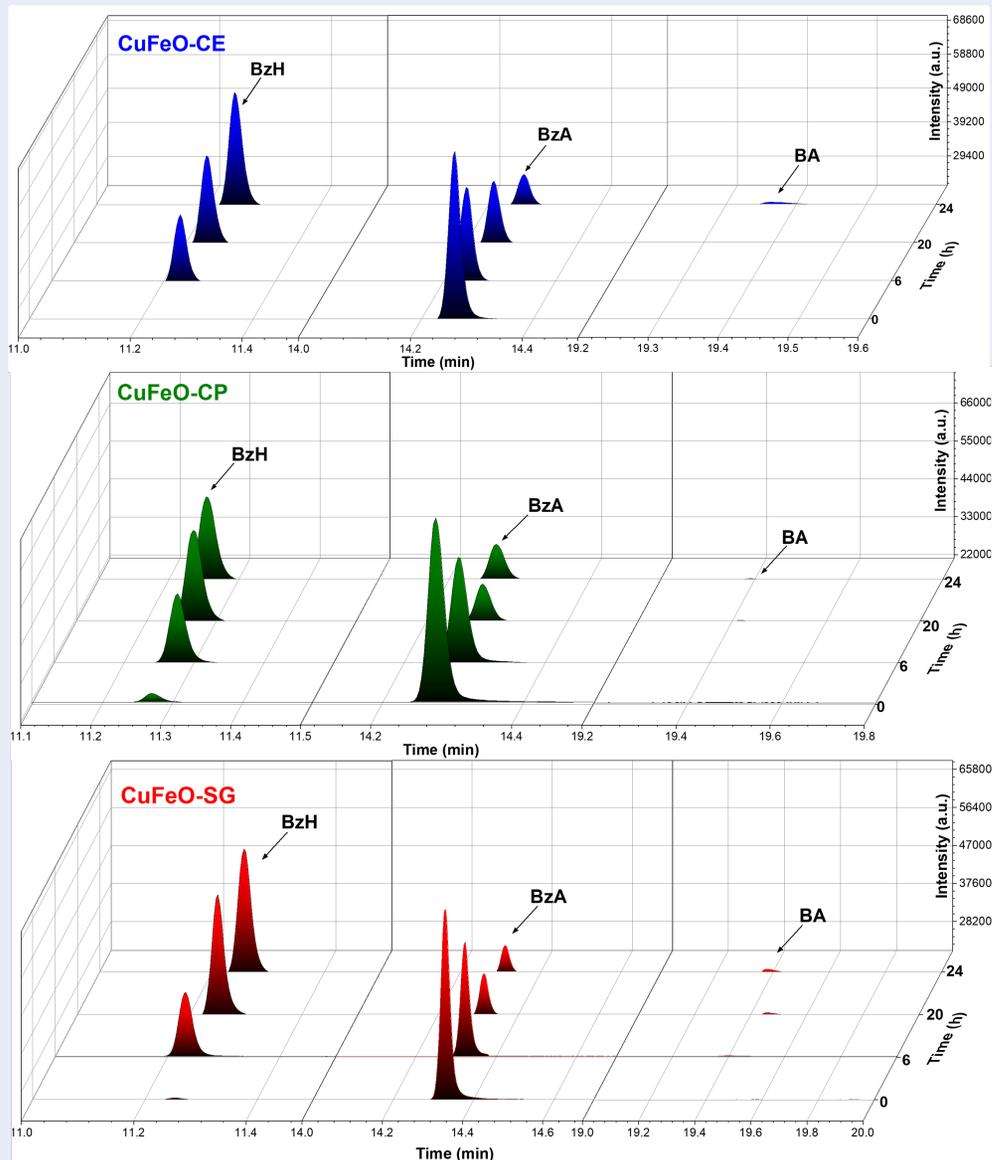
Bảng 5: Độ chuyển hóa BzA và độ chọn lọc BzH của phản ứng oxy hóa BzA khi sử dụng $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ và mẫu xúc tác CuFeO-SG trong các lần thí nghiệm tái sử dụng

	Độ chuyển hóa BzA (%)	Độ chọn lọc BzH (%)
Lần 1	85,68	87,52
Lần 2	79,52	89,01
Lần 3	72,15	91,27
Lần 4	67,51	93,51

[Nguồn: Nhóm tác giả]

KẾT LUẬN

Các mẫu xúc tác từ tính CuFe_2O_4 đã được tổng hợp thành công bằng ba phương pháp đơn giản: ceramic,



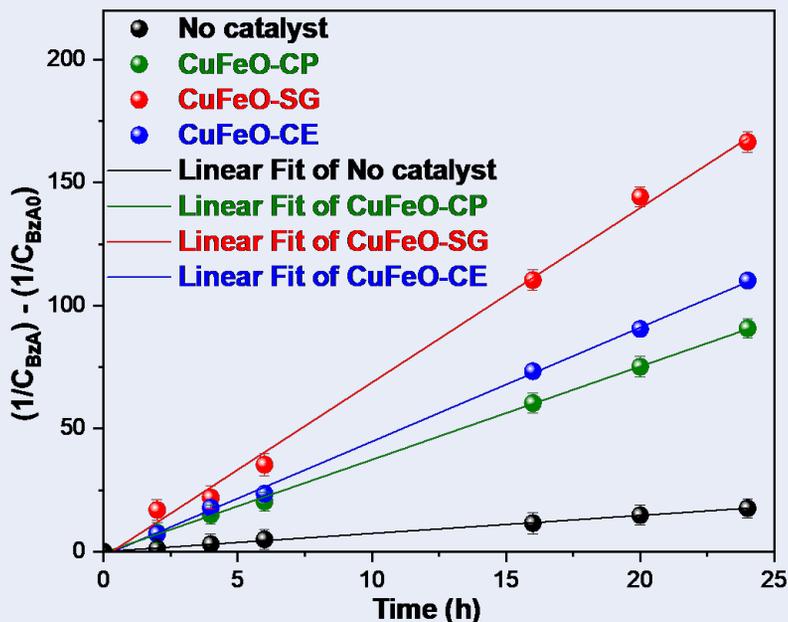
Hình 6: Sắc ký đồ GC-FID cho quá trình oxy hóa chọn lọc BzA bởi $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ trong sự hiện diện của các mẫu xúc tác CuFeO-CE, CuFeO-CP và CuFeO-SG. [Nguồn: Nhóm tác giả]

đồng kết tủa và sol-gel có hỗ trợ của DPE, để thực hiện phản ứng oxy hóa chọn lọc BzA trong dung môi nước ở nhiệt độ phòng. Các chất xúc tác này đã chứng minh khả năng hoạt hóa hiệu quả $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ để chuyển đổi BzA thành BzH thông qua việc hình thành gốc tự do sulfate. Trong số các mẫu, xúc tác được tổng hợp bằng phương pháp sol-gel có hỗ trợ của DPE cho thấy hiệu suất chuyển đổi BzA cao nhất sau 24 giờ, với hằng số vận tốc giả bậc hai là $7,10 \text{ mol L}^{-1} \text{ h}^{-1}$, nhờ hàm lượng ion Fe^{3+} trên bề mặt cao nhất. Bên cạnh hoạt tính xúc tác đầy hứa hẹn, các chất xúc tác này còn có thể dễ dàng tách ra khỏi dung dịch phản ứng nhờ tính

chất sắt từ, cho phép tái sử dụng qua nhiều chu kỳ.

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

- BzA: Benzyl alcohol
- BzH: Benzaldehyde
- BA: Benzoic acid
- XRD: Nhiễu xạ tia X
- FESEM: Kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường
- FTIR: Quang phổ hồng ngoại chuyển hóa Fourier
- EDS: Phổ tán sắc năng lượng tia X
- VSM: Phương pháp từ kế mẫu rung
- GC-FID: Sắc ký khí – Đầu dò ion hóa ngọn lửa



Hình 7: Biến thiên $(1/C_{BzA}) - (1/C_{BzA0})$ theo thời gian trong quá trình oxi hóa BzA bởi $Na_2S_2O_8$ khi sử dụng và khi không sử dụng xúc tác. [Nguồn: Nhóm tác giả]

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số 562-2025-18-06.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Các tác giả tuyên bố rằng họ không có xung đột lợi ích.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Trần Thị Trinh Thi thực hiện các thí nghiệm tổng hợp, khảo sát hoạt tính, và viết bản thảo. Ngô Đức Toàn hỗ trợ khảo sát hoạt tính xúc tác.

Hoàng Châu Ngọc thực hiện đánh giá thành phần pha. Nguyễn Thế Luân thực hiện đánh giá hình thái bề mặt và kích thước hạt.

Trần Thụy Tuyết Mai hỗ trợ phân tích thành phần nguyên tố và các nhóm chức trên bề mặt.

Lưu Thị Xuân Thi hỗ trợ thiết kế hệ phản ứng và phân tích số liệu GC-FID.

Lê Tiến Khoa lên ý tưởng nghiên cứu, thảo luận các kết quả nghiên cứu, và hoàn chỉnh bản thảo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Chetia T, Bora J, Dutta M, Chetia B. Green synthesis of template-free NiFe2O4 nanoparticles: A promising

sustainable catalyst for efficient benzaldehyde and phenolic motifs development. *Journal of Molecular Structure*. 2025;1324:140766. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.140766>.

- Deng S, Chen G, Liang C, Wang L, Xiang B. Selective liquid-phase oxidation of toluene over heterogeneous Mn@ ZIF-8 derived catalyst with molecular oxygen in the solvent-free conditions. *Arabian Journal of Chemistry*. 2023;16(5):104666. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104666>.
- Kalita A, Talukdar AK. Streamlined synthesis of iron and cobalt loaded MCM-48: high-performance heterogeneous catalysts for selective liquid-phase oxidation of toluene to benzaldehyde. *Heliyon*. 2024;10(6). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27296>.
- Wu P, Song L, Wang Y, Liu X, He Z, Bai P, et al. High-performance benzyl alcohol oxidation catalyst: Au-Pd alloy with ZrO2 as promoter. *Applied Surface Science*. 2021;537:148059. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148059>.
- Zhang M, Liu L, Song Y, Hou M, Ma P, Han Q. Designing Sb-bridged polyoxotungstates for efficiently catalytic oxidation of benzyl alcohol. *Journal of Catalysis*. 2025;443:115957. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2025.115957>.
- Bepari RA, Gogoi M, Mochahari N, Paul S, Das BK. Facile synthesis of nanostructured Co3O4 using cobalt fumarate as the precursor and its catalytic exploration in the selective oxidation of benzyl alcohol. *Journal of Chemical Sciences*. 2025;137(2):1–10. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12039-024-02344-9>.
- Iraqi S, Kashyap SS, Rashid MH. NiFe2O4 nanoparticles: an efficient and reusable catalyst for the selective oxidation

- of benzyl alcohol to benzaldehyde under mild conditions. *Nanoscale Advances*. 2020;2(12):5790–802. Available from: <https://doi.org/10.1039/D0NA00591F>.
8. Wang Y, Wang X, Dong Y, Peng M, Guo L, Cui M, et al. Magnetic-responsive Pickering emulsions based on MFe₂O₄ (M= Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn) for green and efficient oxidation of benzyl alcohol. *Green Chemistry*. 2024;26(10):6131–8. Available from: <https://doi.org/10.1039/D4GC00554F>.
 9. Ambika S, Gopinath S, Saravanan K, Sivakumar K, Sukantha TA, Paramasivan P. Preparation and characterization of nanocopper ferrite and its green catalytic activity in alcohol oxidation reaction. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2019;32(4):903–10. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4715-7>.
 10. Chen Y, Tang P, Lu X, Ma J, Li H, Chen H. Preparation of CuFe₂O₄ composite metal oxides and selective oxidation of benzyl alcohol. *Ferroelectrics*. 2023;609(1):57–65. Available from: <https://doi.org/10.1080/00150193.2023.2198952>.
 11. Tran TT, Ngo DT, Nguyen TL, Hoang CN, Tran-Thuy TM, Luu TX, et al. Phyto-synthesis of magnetic CuFe₂O₄ catalyst using pitaya peel extract for the selective persulphate-driven oxidation of benzyl alcohol at room temperature. *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2026;104(1):279–96. Available from: <https://doi.org/10.1002/cjce.25774>.
 12. Pham VT, Vu ND, Nguyen TN, Truong NM, Bui QM, Bui TT, et al. Study of using ultrasonic waves in the producing dried dragon fruit peel processes. *International Journal of Food Sciences*. 2024;2024(1):8619783. Available from: <https://doi.org/10.1155/2024/8619783>.
 13. Xu Z, Zhao W, Bai L, Fan J. The effect of the calcination time on the microstructure and properties of MnZn ferrite powders. *Magnetochemistry (Basel, Switzerland)*. 2024;10(10):68. Available from: <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry10100068>.
 14. Ushani U, Lu X, Wang J, Zhang Z, Dai J, Tan Y, et al. Sulfate radicals-based advanced oxidation technology in various environmental remediation: a state-of-the-art review. *Chemical Engineering Journal*. 2020;402:126232. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126232>.
 15. Faungnawakij K, Shimoda N, Fukunaga T, Kikuchi R, Eguchi K. Crystal structure and surface species of CuFe₂O₄ spinel catalysts in steam reforming of dimethyl ether. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*. 2009;92(3–4):341–50. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.08.013>.
 16. Cui K, Sun M, Gong T, Xu J, Hou L, Yuan C. Construction of single-crystal nanoparticles assembled CuFe₂O₄ spinel microspheres towards high infrared emissivity. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;929:167365. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167365>.
 17. Banda PG, Kurup GB, Mucheria R. Magnetically recoverable CuFe₂O₄ nanocatalyst: dual catalytic action in sonogashira and Chan-Lam coupling reactions. *Journal of Organometallic Chemistry*. 2024;1016:123259. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jorgchem.2024.123259>.
 18. Kumar N, Ansari MR, Khaladkar S, Murya O, Kalekar A, Peta KR, et al. CuFe₂O₄ nanoparticles as potential electrode material for asymmetric supercapacitor applications. *Journal of Power Sources*. 2025;642:236960. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236960>.
 19. Mohammadi H, Mengelizadeh N, Zare MR, Parseh I, Hashemi M, Yousefi M, et al. Effective activation of peroxymonosulfate by MMT-CuFe₂O₄ composite in the degradation of methylene blue from aqueous solutions: characteristics, influence of parameters, and degradation mechanism. *Desalination and Water Treatment*. 2024;317:100221. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100221>.
 20. Madhu H, Prasad SR. Green synthesis and reflux method of CuFe₂O₄ and Clay/CuFe₂O₄ nanocomposite for photocatalysis and antioxidant studies. *Chem Inorg Mater*. 2025;6:100099. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2025.100099>.
 21. Brown ID, Shannon RD. Empirical bond-strength-bond-length curves for oxides. *Acta Crystallographica Section A, Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography*. 1973;29(3):266–82. Available from: <https://doi.org/10.1107/S0567739473000689>.

Synthesis of magnetic CuFe_2O_4 materials by a sol-gel method using dragon fruit peel extract: Comparison of synthesis methods and evaluation of catalytic activity in benzyl alcohol oxidation

Thi Trinh Thi Tran^{1,2}, Duc Toan Ngo^{1,2}, The Luan Nguyen^{1,2}, Chau Ngoc Hoang^{1,2}, Tuyet-Mai Tran-Thuy^{3,2}, Thi Xuan Thi Luu^{1,2}, Tien Khoa Le^{1,2,*}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

¹Faculty of Chemistry, University of Science, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

³Faculty of Chemical Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), 268 Ly Thuong Kiet Street, District 10, Ho Chi Minh City, Vietnam

Correspondence

Tien Khoa Le, Faculty of Chemistry, University of Science, Ho Chi Minh City, Vietnam

Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

Email: ltkhoa@hcmus.edu.vn

History

- Received: 15-9-2025
- Revised: 15-12-2025
- Accepted: 22-12-2025
- Published Online: 26-03-2026

DOI :

<https://doi.org/10.32508/stdjns.v10i1.1478>



Copyright

© VNUHCM Press. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



ABSTRACT

This paper presents the synthesis and evaluation of the catalytic activity of magnetic CuFe_2O_4 powders for the selective oxidation of benzyl alcohol to benzaldehyde under mild and environmentally friendly conditions, in an aqueous medium at room temperature. Three simple preparation routes, including ceramic, co-precipitation, and sol-gel methods, were employed to investigate the influence of synthesis methodology on material characteristics and catalytic behavior. More specifically, the sol-gel method was assisted by a dragon fruit peel extract, which served as a natural gelling agent to facilitate gel formation and enhance the dispersion of metal ions within CuFe_2O_4 lattice. The experimental results showed that the choice of synthetic method significantly impacts several key physicochemical properties, including phase composition, particle size, and importantly, the surface distribution of Cu^{2+} and Fe^{3+} ions. These structural and surface features played a decisive role in governing the catalytic activity during persulfate activation. While all CuFe_2O_4 samples effectively activated persulfate to drive the oxidation of benzyl alcohol following pseudo-second-order kinetics, the sol-gel-derived sample exhibited superior catalytic activity, with benzyl alcohol conversion and benzaldehyde selectivity both exceeding 85% after 24 hours of reaction. This enhanced performance was attributed to the more homogeneous dispersion and optimal surface arrangement of metal ions, which facilitated electron transfer processes and the generation of reactive species during persulfate activation. In addition to high catalytic activity, this prepared CuFe_2O_4 sample exhibited strong magnetic properties, enabling rapid and efficient separation from the solution after reactions. The catalyst also retained its activity over repeated reaction cycles, demonstrating its high stability and reusability. Overall, the CuFe_2O_4 materials could promise magnetically recoverable catalysts for green, selective oxidation processes in aqueous systems, with the bio-assisted sol-gel method emerging as the most effective synthesis route.

Key words: Magnetic CuFe_2O_4 , persulfate activation, dragon fruit peel extract, benzyl alcohol, benzaldehyde.

Cite this article : Thi Tran T T, Ngo D T, T L N, Hoang C N, Tran-Thuy T M, Thi Luu T X, Le T K. **Synthesis of magnetic CuFe_2O_4 materials by a sol-gel method using dragon fruit peel extract: Comparison of synthesis methods and evaluation of catalytic activity in benzyl alcohol oxidation** . *Sci. Tech. Dev. J. - Nat. Sci.* 2026; 10(1):3543-3555.