



Vật liệu nickel ferrite/graphene oxide: tổng hợp và khảo sát hoạt tính quang xúc tác phân huỷ Rhodamine B

Nickel ferrite/graphene oxide material: synthesis and photocatalytic degradation study of Rhodamine B

Nguyễn Quang Mẫn^{1,2}, Lê Lâm Sơn¹, Vũ Ngọc Hoàng¹, Huỳnh Thanh Danh¹, Nguyễn Phước Nhân¹, Nguyễn Thanh Bình¹, Trần Sĩ Thành¹, Nguyễn Thị Vương Hoàn^{3*}, Đinh Quang Khiếu^{1*}

¹Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế

²Trường Đại học Y-Dược, Đại học Huế

³Trường Đại học Quy Nhơn

*Email: nguyenthivuonghoan@qnu.edu.vn, dqkhiu@hueuni.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 08/2/2023

Accepted: 10/4/2023

Published: 30/9/2023

Keywords:

Nickel ferrite, graphene oxide, photocatalyst, Rhodamine B

ABSTRACT

In this work, a simple approach was taken to prepare a nickel ferrite based on graphene oxide magnetic photocatalyst (NF/GO). The NF/GO composite was synthesized by a one-step hydrothermal method and characterized by X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray elemental mapping analysis (EDX-Mapping), vibrating sample magnetometer (VSM) and ultraviolet-visible diffuse reflectance spectroscopy (UV-Vis DRS). The research results showed that the photocatalytic degradation of the Rhodamine B (RhB) by visible light radiation occurs more efficiently when there was a combination of NiFe₂O₄ nanoparticles with graphene oxide sheets compared individual component materials.

Giới thiệu chung

Xử lý nước thải là một vấn đề lớn ở các nước đang phát triển do sự bùng nổ của các ngành công nghiệp trong khi đó kỹ thuật hạ tầng phát triển không theo kịp. Trong số các ngành công nghiệp, ngành nhuộm và bột màu là mối quan tâm chính đối với môi trường vì nước thải chứa nhiều thuốc nhuộm hữu cơ không phân hủy sinh học. Rhodamine B (RhB) là thuốc nhuộm hữu cơ xanthene tổng hợp, hòa tan trong nước, được sử dụng rộng rãi làm chất tạo màu trong ngành dệt, giấy, nhựa, mỹ phẩm, da, thực phẩm dẫn đến lượng nước thải nhuộm lớn. Khi nước thải không được xử lý đúng cách, chúng sẽ trở thành một vấn đề

môi trường nghiêm trọng, ảnh hưởng đến hệ thực vật và động vật cũng như sức khỏe con người. Thuốc nhuộm RhB có thể bức xạ đến mắt và da, ảnh hưởng hệ hô hấp, sinh sản và thần kinh, có khả năng gây ung thư. Hơn nữa, RhB có hại ngay cả ở nồng độ rất thấp và do đó việc xử lý nước thải RhB trở nên rất cần thiết [1][2]. Có nhiều kỹ thuật đã được sử dụng để xử lý nước chứa RhB, chẳng hạn như phân hủy quang xúc tác [3], ozon hóa [4], điện hóa [5], quá trình Fenton [6], v.v.. Ngày nay, quang xúc tác được ưa chuộng hơn các phương pháp khác để phân hủy thuốc nhuộm, bởi vì khi chiếu ánh sáng lên chất bán dẫn, các cặp electron và lỗ trống được tạo ra sẽ được sử dụng cho quá trình oxy hóa và khử [7]. Sự phân hủy quang xúc

tác sử dụng ánh sáng khả kiến (Vis) được mong muốn hơn ánh sáng tử ngoại (UV), vì UV chiếm 4% bức xạ mặt trời, trong khi ánh sáng khả kiến đóng góp khoảng 50% bức xạ mặt trời [8]. Do đó việc sử dụng chất xúc tác quang có độ hấp thụ mạnh trong vùng khả kiến là rất quan trọng.

Trong những năm gần đây, các ứng dụng rộng rãi đã được báo cáo cho các vật liệu nano graphene, các dẫn xuất carbon có cấu trúc tương tự như graphite, bao gồm (i) graphene (các tấm một lớp của mạng carbon lai hóa sp^2); (ii) graphene oxide (GO) chứa các nhóm chức carboxyl, carbonyl, epoxide, và các nhóm hydroxyl trên mặt phẳng và/hoặc các cạnh; (iii) GO dạng khử (rGO)) [9]. Các vật liệu nano graphene đã thể hiện những ưu điểm nổi bật như khả năng hấp phụ cao đối với các chất hữu cơ/vô cơ, độ dẫn điện và độ bền cơ học cao [10][11]. Tuy nhiên, sau khi sử dụng các vật liệu nano graphene để xử lý, cần nhiều năng lượng (phân tách rắn/lỏng bằng cách ly tâm hoặc lọc qua màng) để thu hồi hoặc tái sử dụng chúng từ các dung dịch nước [12]. Để giải quyết những vấn đề này, các ferrite spinel (MFe_2O_4 , M là Co, Cu, Zn, Ni, Mn, v.v.) có thể được kết hợp với vật liệu nano họ graphene. Ferrite MFe_2O_4 là vật liệu từ tính ở trạng thái oxi hóa (II) của M và (III) của Fe có cấu trúc lập phương tâm mặt. Ferrite đã thu hút rất nhiều sự quan tâm do các tính chất từ tính, xúc tác đáng chú ý, hữu ích cho các ứng dụng thực tế đa dạng như sự hấp thụ quang học thuận lợi đối với các photon năng lượng thấp ($h\nu \sim 2$ eV) và thể hiện tăng cường hiệu quả quang xúc tác dựa trên các tâm xúc tác bổ sung của chúng [13]. Các ferrite được hình thành trên các tấm nano graphene có thể ngăn chặn sự kết tụ, trong khi graphene ức chế sự rửa trôi của các hạt nano nguy hại, tăng cường cả hiệu suất hấp phụ và xúc tác quang nhờ diện tích bề mặt riêng lớn, tính ổn định hóa học và vùng cấm điện tử thấp hơn. Ngoài ra, các composite của ferrite trên nền graphene có thể được khôi phục dễ dàng bằng cách sử dụng từ trường bên ngoài sau khi loại bỏ chất gây ô nhiễm và tái sử dụng.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi báo cáo quá trình tổng hợp vật liệu composite nano NF/GO bằng phương pháp thủy nhiệt. Vật liệu composite tổng hợp được đặc trưng bởi các kỹ thuật phân tích hiện đại khác nhau và sử dụng để nghiên cứu khả năng phân hủy quang xúc tác thuốc nhuộm RhB dưới tác dụng của ánh sáng khả kiến.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất

Bột graphite, acid sunfuric (H_2SO_4 , 98%), acid ortho-phosphoric (H_3PO_4 , 85%), kali permanganate ($KMnO_4$, 99%), hydrogen peroxide (H_2O_2 , 30%) và acid ascorbic ($C_6H_8O_6$, 98%), iron (III) chloride hexahydrate ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$, 98%), nickel (II) chloride hexahydrate ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$, 98%), dung dịch ammonia (NH_4OH , 25%) và ethanol (C_2H_5OH , 99%), Rhodamine B (C.I.45170) được mua từ công ty hoá chất Merck, Đức. Tất cả các hóa chất đều thuộc loại tinh khiết phân tích và không cần tinh chế gì thêm trước khi sử dụng.

Tổng hợp vật liệu

Tổng hợp graphene oxide

Graphene oxide (GO) được điều chế theo Marcano và cộng sự với thay đổi nhỏ [14]. Đầu tiên, cho 3,0 g graphite vào hỗn hợp chứa 360 mL H_2SO_4 và 40 mL H_3PO_4 , khuấy đều. Tiếp theo, cho từng lượng nhỏ đến hết 18,0 g $KMnO_4$ vào hỗn hợp trên và tiếp tục khuấy trong 72 giờ. Sau đó, 17 mL H_2O_2 (30%) được thêm nhỏ giọt vào hỗn hợp trên và khuấy thêm 30 phút. Ly tâm hỗn hợp trên, giữ lại phần chất rắn, rửa nhiều lần với HCl 1 M và nước cất. Sản phẩm được sấy ở 60 °C trong 48 giờ, nghiền mịn thu được graphite oxide. Để thu được graphene oxide (GO), graphite oxide được tách lớp bằng kỹ thuật siêu âm với dung môi nước, sấy ở nhiệt độ 60 °C trong 24 giờ, thu được graphene oxide màu nâu đen (kí hiệu là GO).

Tổng hợp nickel ferrite

Quy trình tổng hợp nickel ferrite được tiến hành bằng cách thêm 0,95 g $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ và 2,16 g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ vào hỗn hợp chứa 50 mL nước cất và 30 mL ethanol và khuấy trong 60 phút để thu được dung dịch đồng nhất. Tiếp theo, thêm từng giọt đến hết 15 mL NH_4OH và khuấy thêm 120 phút để thủy phân hoàn toàn dung dịch trên trước khi chuyển vào autoclave có chứa bình Teflon để xử lý thủy nhiệt ở 180 °C trong 12 giờ. Tiếp theo, chất rắn màu nâu sẫm được tách ra bằng cách ly tâm, rửa nhiều lần bằng nước cất và ethanol đến pH 7 và sấy khô trong tủ sấy ở 60 °C trong 24 giờ. Sản phẩm thu được là nickel ferrite (ký hiệu là NF).

Tổng hợp composite nickel ferrit/graphene oxide

Vật liệu composite nickel ferrite/graphene oxide (NF/GO) được điều chế theo cách tương tự như NF với thay đổi nhỏ. 0,3 g GO được chuyển vào hỗn hợp nước-ethanol, siêu âm 60 phút, sau đó thêm hỗn hợp của hai muối vào. Sau khi khuấy liên tục trong 60 phút,

dung dịch NH₄OH được thêm vào và khuấy tiếp 120 phút. Tiếp theo, huyền phù thu được được gia nhiệt ở 180 °C trong 12 giờ để xử lý thủy nhiệt. Chất rắn màu đen được tách ra bằng cách ly tâm ở tốc độ 4000 vòng/phút trong 15 phút và rửa bằng nước cất và ethanol nhiều lần cho đến pH 7. Chất rắn được sấy khô ở 60 °C trong 24 giờ để thu được vật liệu composite NF/GO.

Khảo sát hoạt tính quang xúc tác của các vật liệu

Quy trình được tiến hành như sau: cân 0,05 g các mẫu vật liệu (NF, GO và composite NF/GO) cho vào cốc 250 mL có chứa 100 mL dung dịch RhB 100 mg/L, bọc kín và lắc đều trên máy lắc với tốc độ 50 vòng/phút trong 30 phút để đạt cân bằng hấp phụ. Sau đó, tiến hành chiếu đèn sợi đốt 60W trong khoảng thời gian 4 giờ. Sau mỗi khoảng thời gian 30, 60, 90, 120, 180 và 240 phút, mẫu được lấy ra, tách chất xúc tác ra khỏi dung dịch. Nồng độ RhB sau phản ứng ở các thời điểm được xác định bằng phương pháp đo quang tại bước sóng 663 nm (pha loãng dung dịch sau phản ứng 10 lần). Hiệu suất phân huỷ RhB được tính theo công thức sau:

$$H(\%) = \left(\frac{C_o - C_t}{C_o} \right) \times 100\% \quad (1)$$

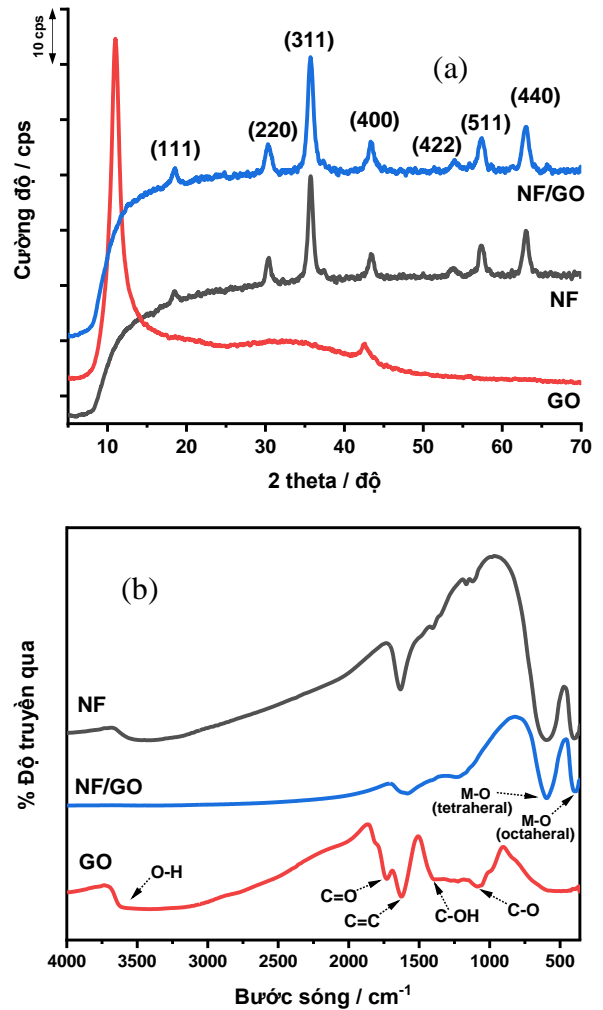
Trong đó, C_o và C_t lần lượt là nồng độ RhB tại thời điểm ban đầu và thời điểm t (30, 60, 90, 120, 180 và 240 phút).

Thiết bị

Các vật liệu tổng hợp được đặc trưng với các kỹ thuật hóa lý khác nhau. Nhiễu xạ tia X (XRD) được sử dụng để xác định cấu trúc tinh thể trên máy D8 Advance Bruker, Đức, với bức xạ CuKα (λ = 0,154 nm). Phổ Raman thu được trên thiết bị Xplora Plus (Horiba, Nhật Bản) với dải tần số từ 200 đến 2000 cm⁻¹ và bước sóng ánh sáng kích thích 785 nm. Các đặc tính từ của mẫu được nghiên cứu trên từ kế mẫu rung Micro Sense (VSM) ở nhiệt độ môi trường. Các quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) và phân tích ánh xạ nguyên tố tia X phân tán năng lượng (EDX-Mapping) được ghi lại trên thiết bị Hitachi S-4800 FESEM (Nhật Bản). Phổ phản xạ khuếch tán tử ngoại-khả kiến (UV-Vis DRS) đạt được trên máy UV-2600, Shimadzu (Nhật Bản).

Kết quả và thảo luận

Đặc trưng vật liệu



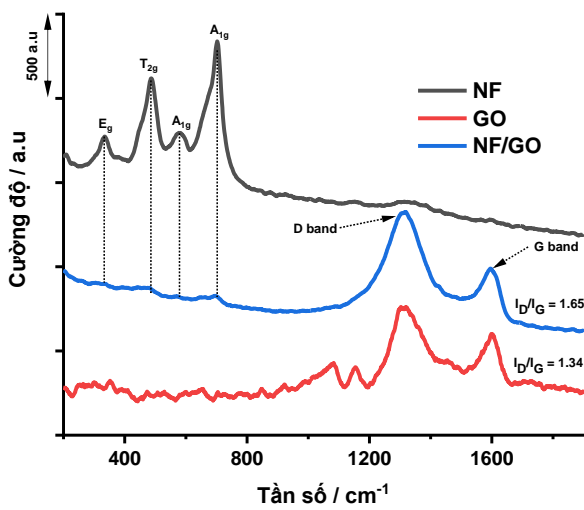
Hình 1: Giản đồ XRD (a) và phổ hồng ngoại (b) của NF, GO và composite NF/GO

Cấu trúc pha của các mẫu tổng được nghiên cứu bởi giản đồ XRD (Hình 1). Có thể thấy, các đỉnh đặc trưng ở 18,0; 30,3; 35,0; 43,4; 53,9; 57,3 và 63,0° được cho là các mặt phẳng tinh thể (111), (220), (311), (400), (422), (511) và (440) tương ứng của nickel ferrite theo JCPDS 10-325, chứng tỏ có sự hình thành nickel ferrite ở các mẫu NF và NF/GO. Đáng chú ý, đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của GO (10.9°) không xuất hiện trong giản đồ XRD của NF/GO, ngụ ý sự thay đổi cấu trúc lớp thông thường của GO do sự phát triển của tinh thể NF giữa các lớp GO [15]. Kích thước tinh thể trung bình của NiFe₂O₄ và NiFe₂O₄ trên nền GO được xác định từ chiều rộng tại một nửa chiều cao peak (FWHM) của đỉnh nhiễu xạ mặt (311) theo phương trình Scherrer:

$$D = K \times \lambda / \beta \times \cos \theta \quad (2)$$

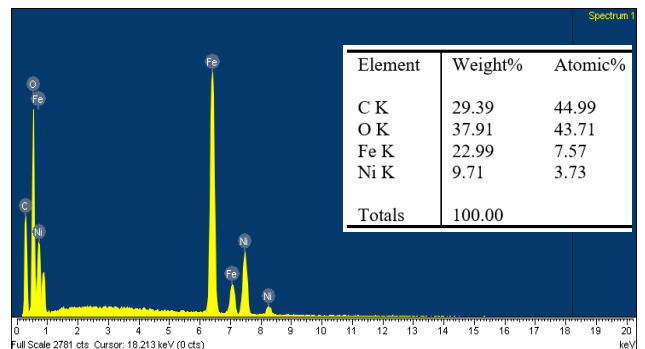
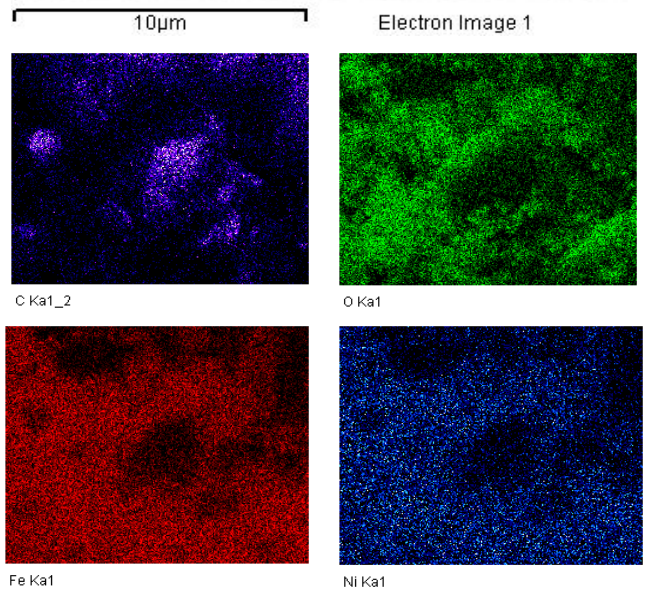
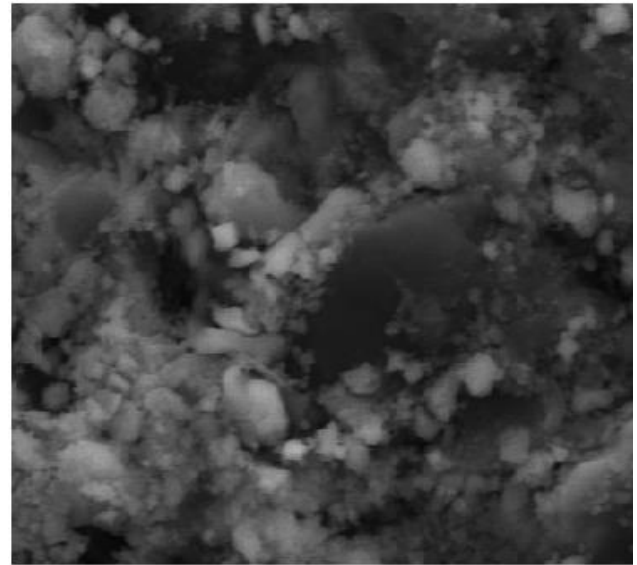
Trong đó D là kích thước tinh thể (nm); β là FWHM; λ là bước sóng tia X của CuKα (0,154 nm); θ là góc nhiễu xạ Bragg. Kích thước tinh thể của NF và NF/GO được tính toán lần lượt là 11,3 và 10,8 nm.

Phổ FT-IR của các mẫu GO, NF và NF/GO được thể hiện trên Hình 1b. Đối với GO, các peak hấp thụ tại các bước sóng 3500, 1732, 1629, 1388 và 1069 cm^{-1} được quy cho sự tồn tại của các nhóm O-H, C=O trong các nhóm carboxyl, các dao động C=C vòng thơm, C-OH, C-O alkoxy [16][17]. Một số peak mất đi của các nhóm C=O, C-OH hoặc cường độ peak giảm xuống của nhóm C-O trong phổ IR của NF/GO chứng tỏ đã xảy ra quá trình khử một phần GO qua quá trình thủy nhiệt. Ngoài ra, phổ IR của cả vật liệu composite NF/GO và NF còn xuất hiện các peak ở số sóng khoảng 599 và 398 cm^{-1} , tương ứng với các dao động hoá trị của liên kết oxy-kim loại dạng tứ diện và liên kết oxy-kim loại dạng bát diện [18][19].



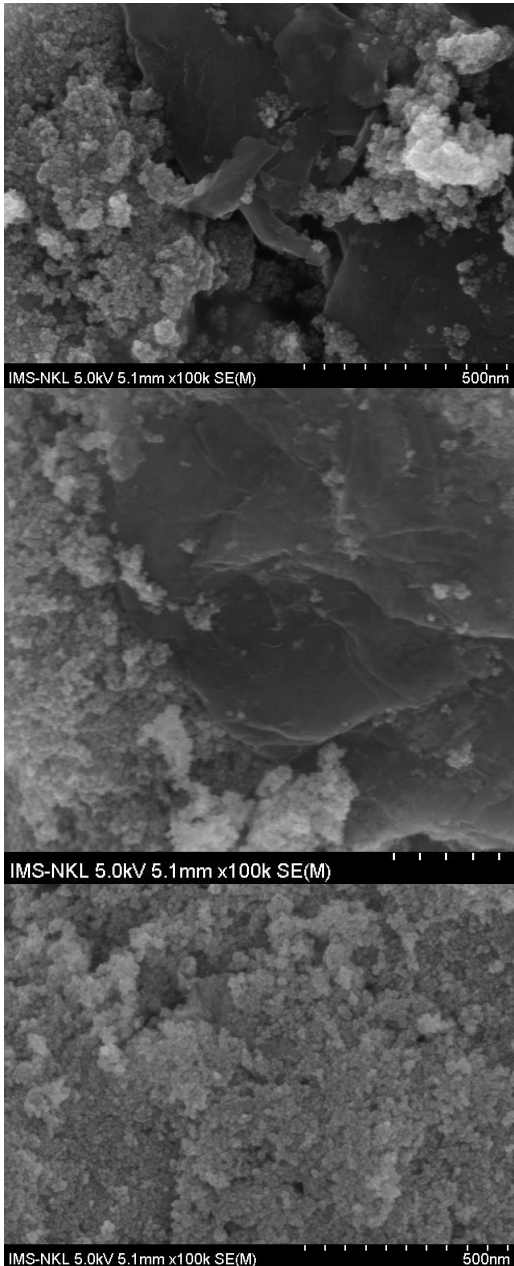
Hình 2: Phổ Raman của NF, GO và NF/GO

Phổ Raman của GO và NF/GO hiển thị các dải D và G điển hình ở khoảng 1307 cm^{-1} và 1581 cm^{-1} (Hình 2). Trong khi dải D được tạo ra bởi chế độ breathing của các photon k-points A_{1g} đối xứng thì dải G phát sinh từ sự dao động hoá trị của liên kết C-C phổ biến đối với tất cả các dạng carbon sp^2 [20]. Do đó, I_D/I_G đại diện cho sự rối loạn cấu trúc lớp của GO. Sự phân tán của nickel ferrite trong các lớp carbon của GO làm tăng đáng kể sự rối loạn trong cấu trúc mạng carbon, chứng minh bằng việc tăng I_D/I_G từ 1,34 trong GO lên 1,65 trong NF/GO. Ngoài ra, phổ Raman của NF và NF/GO xuất hiện một số nhóm đặc trưng của cấu trúc spinel pha đảo như A_{1g} , E_g , and T_{2g} . Chế độ A_{1g} được quy cho sự dao động hoá trị đối xứng của các nguyên tử oxy trong các vị trí tứ diện dọc theo các liên kết Fe-O (và Ni-O) trong khi chế độ E_g được cho là sự dao động biến dạng đối xứng của oxy đối với ion kim loại và chế độ T_{2g} được gán cho sự dao động biến dạng bất đối xứng của liên kết oxy [21].



Hình 3: Giải đồ EDX-Mapping của NF/GO

Hình 3 minh họa sự phân bố các nguyên tố trong NF/GO. Các hình ảnh ảnh xạ cho thấy sự phân bố khá đồng nhất của Fe, Ni, C và O trong vật liệu. Đáng chú ý, phân tích EDX cho thấy tỷ lệ nguyên tử Fe:Ni trong NF/GO là 2,03, gần với tỷ lệ mol của Fe và Ni đưa vào trong hỗn hợp muối ban đầu.

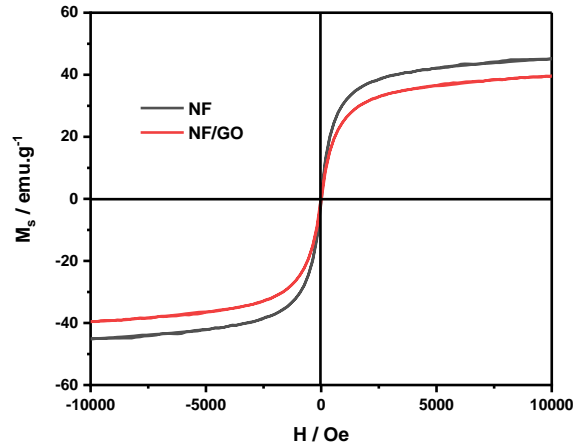


Hình 4: Ảnh SEM của vật liệu NF/GO ở các độ phân giải khác nhau

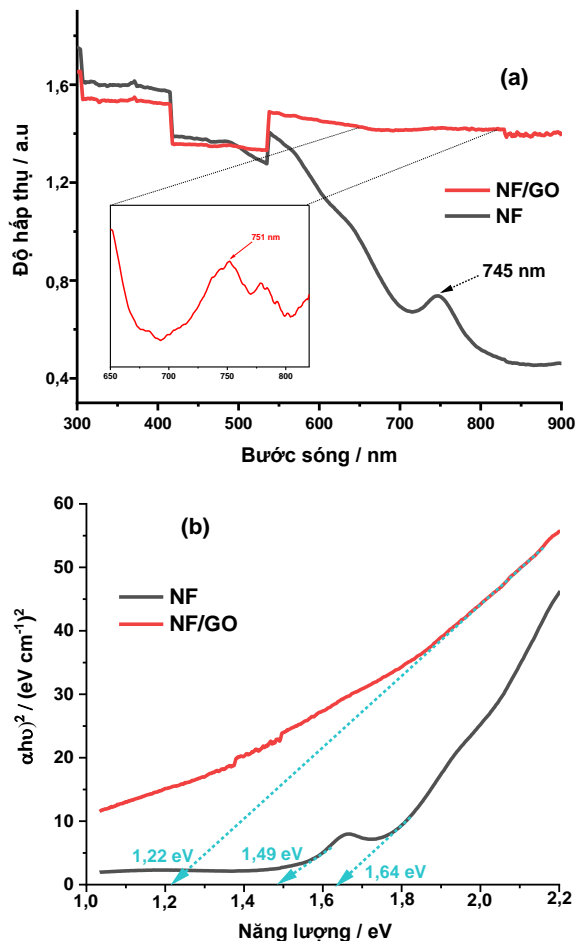
Hình thái của NF/GO được minh họa trong Hình 4. Như có thể thấy, các hạt mịn của nickel ferrite kết tụ lại để tạo thành các cụm lớn hơn do bản chất từ tính của các vật liệu ferrite. Nickel ferrite kết tụ có kích thước khoảng hàng trăm nanomet được phân bố trên các lớp GO để tạo ra composite NF/GO.

Một trong những tính chất quan trọng của vật liệu ferrite spinel là từ tính của chúng. Để xác định từ tính của NF và NF/GO tổng hợp được, tiến hành đo từ kế mẫu rung (VSM) và kết quả được thể hiện trên Hình 5. Đường cong từ trễ của vật liệu composite NF/GO có dạng chữ S, giống vật liệu ferrite spinel NF, có tính chất siêu thuận từ với lực kháng từ nhỏ nhưng có độ từ

bão hòa nhỏ hơn NF. Độ từ bão hòa của NF là 45,3 emu/g, của composite NF/GO là 39,8 emu/g. Giá trị độ từ hóa bão hòa cao, do đó các vật liệu này có thể dễ dàng tách ra khỏi dung dịch nước dưới tác dụng của từ trường ngoài, một đặc tính mong muốn của vật liệu để có thể thu hồi, tái sử dụng.



Hình 5: Đường cong từ tính của vật liệu NF và NF/GO



Hình 6: Phổ UV-Vis DRS (a) và giản đồ Tauc (b) của vật liệu NF và NF/GO

Để đánh giá khả năng quang xúc tác của vật liệu, cần phải xác định độ hấp thụ ánh sáng và năng lượng

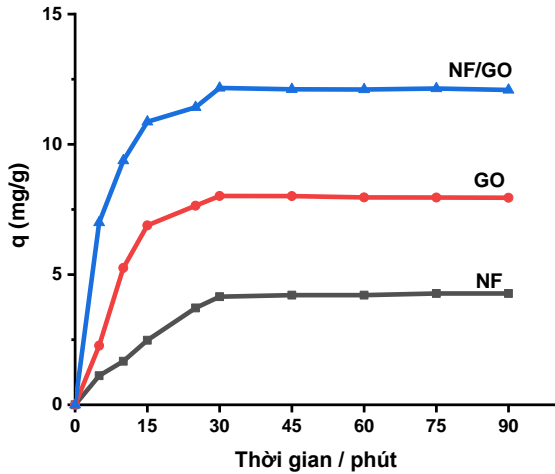
vùng cấm của chúng dựa vào phổ khuếch tán tử ngoại khả kiến (UV-Vis DRS). Trong hình 6a, một số cực đại hấp thụ được quan sát thấy trong dải bước sóng 300–500 nm và sau 550 nm. Một đỉnh mạnh khác ở khoảng 745 nm xuất hiện trong cả hai vật liệu, liên quan đến nickel ferrite có trong vật liệu [22]. Độ rộng vùng cấm của NF và NF/GO được tính toán từ biểu đồ Tauc theo công thức [23]:

$$(\alpha \times h \times \nu)^2 = K \times (h \times \nu - E_g) \quad (3)$$

Trong đó α là hệ số hấp thụ; h là hằng số Plank; ν là tần số ánh sáng; K là hằng số không phụ thuộc năng lượng; E_g là năng lượng vùng cấm. Giá trị E_g thu được bằng cách ngoại suy phần tuyến tính của đường cong $(\alpha \times h \times \nu)^2$ đối với năng lượng photon $E_g (h \times \nu)$. E_g thu được của NF là 1,64 và 1,49 eV, phù hợp với các nghiên cứu trước đây [24][25]. NF/GO có năng lượng vùng cấm là 1,22 eV, thấp hơn so với NF, có thể dẫn đến tăng cường khả năng quang xúc tác của vật liệu trong vùng ánh sáng khả kiến.

Đánh giá hoạt tính xúc tác quang của các vật liệu trong phản ứng phân hủy RhB

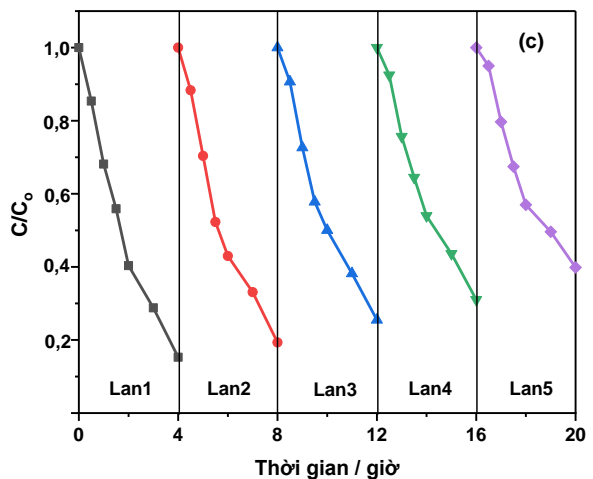
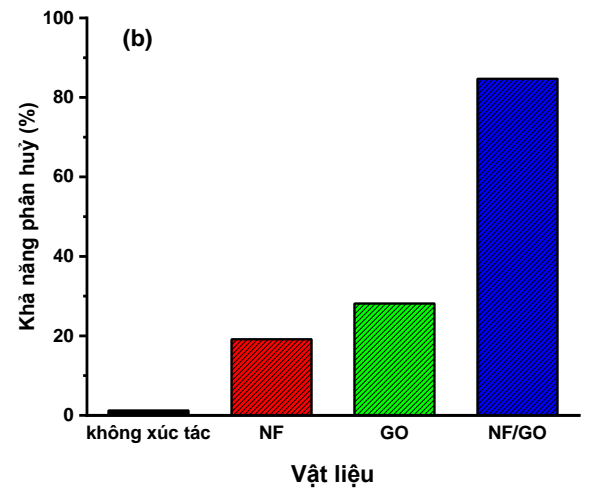
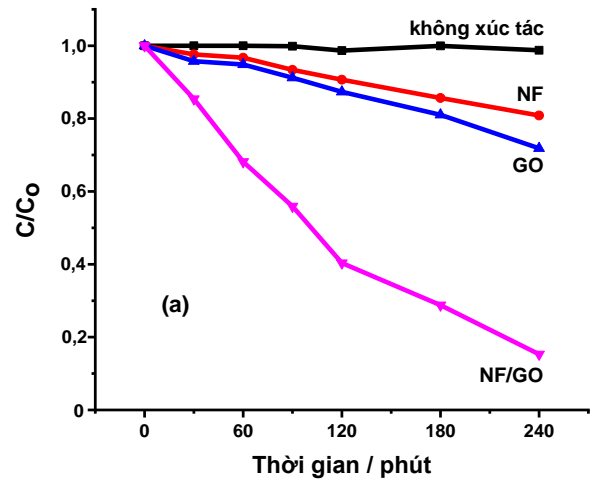
Khảo sát thời gian đạt cân bằng hấp phụ



Hình 7: Dung lượng hấp phụ RhB theo thời gian của các mẫu NF, GO và NF/GO (lượng xúc tác: 0,05 g; thể tích dung dịch RhB 100 mg/L; 100 mL; thời gian hấp phụ: 90 phút).

Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng hấp phụ RhB theo thời gian của các mẫu NF, GO và composite NF/GO khác nhau, nhưng tất cả đều có dung lượng hấp phụ tăng theo thời gian hấp phụ và đạt cân bằng sau 30 phút. Vì vậy trong các nghiên cứu tiếp theo, tiến hành hấp phụ RhB trong bóng tối 30 phút trước khi thực hiện phản ứng quang xúc tác.

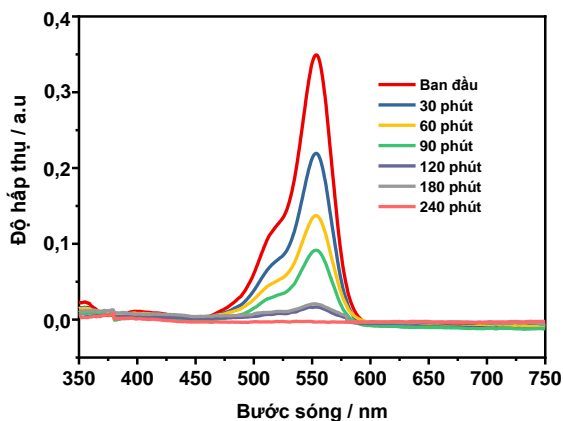
Khả năng xúc tác quang của các vật liệu trong phản ứng phân hủy RhB



Hình 8: Sự thay nồng độ RhB theo thời gian phản ứng đối với các chất xúc tác khác nhau (a,b) và chất xúc tác NF/GO qua 5 chu kỳ tái sử dụng (c) (lượng xúc tác: 0,05 g; thể tích dung dịch RhB (nồng độ 100 mg/L); 100 mL; thời gian phản ứng: 240 phút).

Kết quả khảo sát hoạt tính xúc tác quang của các vật liệu trong phản ứng phân hủy RhB được thể hiện ở

Hình 8a. Có thể nhận thấy, khi không có xúc tác, sự giảm nồng độ dung dịch RhB theo thời gian phản ứng là không đáng kể. Đối với composite NF/GO, sự giảm nồng độ RhB theo thời gian phản ứng khá mạnh so với từng vật liệu riêng rẽ. Sau 240 phút phản ứng, hiệu suất phân hủy RhB của NF/GO đạt 84,70%, trong khi đó GO đạt 28,15% và NF chỉ đạt 19,15% (Hình 8b). Hoạt tính xúc tác của NF/GO được cải thiện rõ rệt trong điều kiện khảo sát, điều này được cho là do khi NF tổ hợp với GO để tạo thành vật liệu NF/GO có khả năng thu nhận ánh sáng cao hơn với vùng hấp thụ được mở rộng trong vùng ánh sáng khả kiến, được quy do có sự hiện diện của graphene [26]. Ngoài ra, hoạt tính quang xúc tác của các vật liệu composite dị thể liên quan đến cấu trúc vùng điện tử (vùng dẫn (CB) và vùng hoá trị (EB)) của các hạt nano đơn thành phần cấu thành, xác định từ sự di chuyển của electron quang sinh (e^-) và thời gian sống của các cặp lỗ trống- e^- ($h-e$). Nghiên cứu của Liang và cộng sự cho thấy rằng, các phân tử MB hấp phụ trên $NiFe_2O_4/rGO$ bằng cách xếp chồng $\pi-\pi$ và tương tác tĩnh điện, bị phân hủy bởi O_2^- , $\cdot OH$, và h^+ dưới sự chiếu sáng ánh sáng nhìn thấy [27]. Trong trường hợp này, GO đóng vai trò là nơi tích tụ cho electron quang sinh (lưu trữ điện tử trong mạng $\pi-\pi$), hạn chế sự tái kết hợp của các electron quang sinh và lỗ trống, tạo điều kiện hình thành các gốc tự do hoạt tính như O_2^- , $\cdot OH$ dẫn đến cải thiện đáng kể hiệu năng quang xúc tác. Ngoài ra, một trong những vấn đề cần quan tâm của vật liệu xúc tác là khả năng thu hồi và tái sử dụng chất xúc tác. Với xúc tác NF/GO, sau khi thực hiện phản ứng phân hủy RhB, xúc tác được thu hồi dưới tác dụng của từ trường ngoài. Kết quả sau 5 lần tái sử dụng, hoạt tính xúc tác quang có giảm nhưng không nhiều, ban đầu hiệu suất phân hủy RhB là 84,70%, sau 5 lần tái sử dụng hiệu suất phân hủy giảm xuống còn 60,16%, thể hiện trên Hình 8c.



Hình 9: Phổ UV-Vis sản phẩm phân hủy RhB của vật liệu NF/GO ở các thời điểm phản ứng khác nhau

Sản phẩm của quá trình phân hủy RhB sau 240 phút phản ứng đối với xúc tác NF/GO được xác định dựa vào kết quả quét phổ UV-Vis của dung dịch sau từng thời điểm phản ứng (Hình 9). Có thể thấy, sau 240 phút, peak mang màu của RhB giảm xuống còn khá thấp trên phổ đồ. Bên cạnh đó, hiệu suất phân hủy RhB của vật liệu cũng được so sánh với một số nghiên cứu gần đây, cho thấy hiệu quả xử lý RhB tương đối cao của composite NF/GO (Bảng 1).

Bảng 1: So sánh hiệu suất phân hủy Rhodamine B của NF/GO so với các công bố gần đây

Vật liệu	Lượng xt (mg)/V(ml)/ C_0 của RhB (mg/L)	Hiệu suất (%)	TLTK
Fe-BiON	100/100/10	98 (120 phút)	[28]
NFAC	50/50/10	99,7 (90 phút)	[29]
Pd-NF/rGO	50/50/20	99,7 (90 phút)	[30]
NF	50/50/20	18,5 (240 phút)	
NF/rGO	50/50/20	89,5 (240 phút)	[31]
GO-ZnO	20/20/10	93,7 (160 phút)	
NF/GO	50/100/100	84,7 (240 phút)	Nghiên cứu này

Kết luận

Một chất xúc tác quang từ tính NF/GO đã được tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tuả-thủy nhiệt. Các kết quả đặc trưng vật liệu cho thấy nickel ferrite tạo thành được phân bố khá đồng đều giữa các lớp graphene oxide. Vật liệu tổng hợp có khả năng phân hủy quang xúc tác Rhodamine B đạt gần 85% sau 240 phút chiếu xạ bằng ánh sáng khả kiến, cao hơn so với nickel ferrite (19%) và graphene oxide (28%) dưới cùng điều kiện thí nghiệm khảo sát. Các kết quả nghiên cứu mở ra triển vọng ứng dụng trong thực tế để thực hiện quá trình phân hủy Rhodamine B bằng bức xạ ánh sáng mặt trời dựa trên vật liệu được tổng hợp.

Tài liệu tham khảo

1. A. I. Borhan, P. Samoila, V. Hulea, A. R. Iordan, and M. N. Palamaru, J. Photochem. Photobiol. A Chem. 279 (2014) 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2014.01.010>
2. P. Nuengmatcha, S. Chanthai, R. Mahachai, and W. C. Oh, J. Environ. Chem. Eng. 4 (2016) 2170-2177. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.03.045>
3. Z. Zhang, S. Zhai, M. Wang, H. Ji, L. He, C. Ye, C. Wang, S. Fang, and H. Zhang, J. Alloys Compd. 659 <https://doi.org/10.51316/jca.2023.047>

- (2016) 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.027>
4. B. Cuiping, X. Xianfeng, G. Wenqi, F. Dexin, X. Mo, G. Zhongxue, and X. Nian, *Desalination* 278 (2011) 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.009>
 5. L. Du, J. Wu, and C. Hu, *Electrochim. Acta* 68 (2012) 69-73. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.02.030>
 6. M. F. Hou, L. Liao, W. De Zhang, X. Y. Tang, H. F. Wan, and G. C. Yin, *Chemosphere* 83 (2011) 1279-1283. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.005>
 7. C. M. Magdalane, K. Kaviyarasu, J. J. Vijaya, B. Siddhardha, and B. Jeyaraj, *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 163 (2016) 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.08.013>
 8. X. Guo, H. Zhu, and Q. Li, *Appl. Catal. B Environ.* 160-161 (2014) 408-414. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.05.047>
 9. Y. A. J. Al-Hamadani, G. Lee, S. Kim, C. M. Park, M. Jang, N. Her, J. Han, D. H. Kim, and Y. Yoon, *Chemosphere* 205 (2018) 719-727. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.129>
 10. D. G. Goodwin, A. S. Adeleye, L. Sung, K. T. Ho, R. M. Burgess, and E. J. Petersen, *Environ. Sci. Technol.* 52 (2018) 4491-4513. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04938>
 11. H. Yi, D. Huang, L. Qin, G. Zeng, C. Lai, M. Cheng, S. Ye, B. Song, X. Ren, and X. Guo, *Appl. Catal. B Environ.* 239 (2018) 408-424. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.07.068>
 12. X. Deng, L. Lü, H. Li, and F. Luo, *J. Hazard. Mater.* 183 (2010) 923-930. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.117>
 13. R. Dom, R. Subasri, K. Radha, and P. H. Borse, *Solid State Commun.* 151 (2011) 470-473. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2010.12.034>
 14. D. C. Marcano, D. V. Kosynkin, J. M. Berlin, A. Sinitskii, Z. Sun, A. Slesarev, L. B. Alemany, W. Lu, and J. M. Tour, *ACS Nano* 4 (2010) 4806-4814. <https://doi.org/10.1021/nn1006368>
 15. R. Tabit, O. Amadine, Y. Essamlali, K. Dânoun, A. Rhihil, and M. Zahouily, *RSC Adv.* 8 (2018) 1351-1360. <https://doi.org/10.1039/c7ra09949e>
 16. P. Khorshidi, R. H. S. M. Shirazi, M. Miralinaghi, E. Moniri, and S. Saadi, *Res. Chem. Intermed.* 46 (2020) 3607-3627. <https://doi.org/10.1007/s11164-020-04164-1>
 17. R. A. Rochman, S. Wahyuningsih, A. H. Ramelan, and Q. A. Hanif, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 509 (2019) 12119. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012119>
 18. M. Salavati-Niasari, F. Davar, and T. Mahmoudi, *Polyhedron* 28 (2009) 1455-1458. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2009.03.020>
 19. M. Mouallem-Bahout, S. Bertrand, and O. Peña, *J. Solid State Chem.* 178 (2005) 1080-1086. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2005.01.009>
 20. K. Krishnamoorthy, *Sci. Adv. Mater.* 5 (2013) 406-410. <https://doi.org/10.1166/sam.2013.1471>
 21. A. Ahlawat and V. G. Sathe, *J. Raman Spectrosc.* 42 (2011) 1087-1094. <https://doi.org/10.1002/jrs.2791>
 22. R. Sankaranarayanan, S. Shailajha, M. S. K. Mubina, and C. P. Anilkumar, *J. Supercond. Nov. Magn.* 33 (2020) 3631-3642. <https://doi.org/10.1007/s10948-020-05617-9>
 23. I. Chakraborty, D. Mitra, and S. P. Moulik, *J. Nanoparticle Res.* 7 (2005) 227-236. <https://doi.org/10.1007/s11051-005-4270-6>
 24. Y. Xia, Z. He, J. Su, B. Tang, K. Hu, Y. Lu, S. Sun, and X. Li, *RSC Adv.* 8 (2018) 4284-4294. <https://doi.org/10.1039/c7ra12546a>
 25. C. Singh, A. Goyal, and S. Singhal, *Nanoscale* 6 (2014) 7959-7970. <https://doi.org/10.1039/c4nr01730g>
 26. H. Moussa, E. Giroto, K. Mozet, H. Alem, G. Medjahdi, and R. Schneider, *Appl. Catal. B Environ.* 185 (2016) 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.12.007>
 27. J. Liang, Y. Wei, J. Zhang, Y. Yao, G. He, B. Tang, and H. Chen, *Ind. Eng. Chem. Res.* 57 (2018) 4311-4319. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b00218>
 28. R. Dulyasucharit, S. Wongkasemjit, S. Nanan, O. Intharaksa, and C. Masingboon, *J. Solid State Chem.* 319 (2023) 123784. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123784>
 29. T. S. Saleh, A. K. Badawi, and R. S. Salama, *Materials.* 16 (2023) 2170. <https://doi.org/10.3390/ma16062170>
 30. Y. Li *et al.*, *Appl. Catal. B Environ.* 190 (2016) 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.02.054>
 31. S. Tanwar, A. Sharma, and D. Mathur, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 128 (2022) 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00339-022-05468-2>