



Original Article

Evaluation of Photocatalytic Activity and the Role of H_2O_2 in the Treatment of Tetracycline using NiFe_2O_4 Material Synthesized by Co-precipitation Method

Nguyen Duy Tu, Nguyen Thi Hanh*, Ngo Minh Tu, Nguyen Duy Anh,
Vu Duy Ha, Nguyen Thi Phuong Ha, Nguyen Thi Dieu Huyen,
Pham Thi Thuy Duong, Pham Thanh Dong

VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

Received 29th October 2025

Revised 30th July 2026; Accepted 05th August 2026

Abstract: In our research, we employed the co-precipitation technique to fabricate NiFe_2O_4 material, revealing innovative photocatalytic properties in breaking down the antibiotic tetracycline (TC) while showcasing magnetic recoverability. The study further examined the effectiveness of H_2O_2 in acting as an electron (e^-) acceptor to boost the TC degradation via photocatalysis process using NiFe_2O_4 . The material's structure and characteristics were analyzed through techniques such as SEM, XRD, UV-Vis DRS, and VSM. The findings indicated that the prepared material has high purity and consists of nanoparticles approximately 40 nm in size. The synthesized NiFe_2O_4 material exhibited magnetic properties, allowing it to be recovered using an external magnetic field. After 240 minutes, under visible light, 75.75% of TC was removed, with significant degradation through photocatalysis. With the addition of H_2O_2 , this efficiency reached 86.03%. Notably, the photocatalytic activity and magnetic properties of NiFe_2O_4 exhibited stability for at least five cycles. These findings underscore the significant potential of NiFe_2O_4 for practical applications in TC removal in general and organic substances in particular.

Keywords: NiFe_2O_4 ; Photocatalysis; Tetracycline degradation; Co-precipitation method; Magnetic recoverability.

* Corresponding author.

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

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5964>

Đánh giá hoạt tính quang xúc tác và vai trò của H_2O_2 trong xử lý Tetracycline bằng vật liệu NiFe_2O_4 tổng hợp theo phương pháp đồng kết tủa

Nguyễn Duy Tú, Nguyễn Thị Hạnh*, Ngô Minh Tú, Nguyễn Duy Anh,
Vũ Duy Hà, Nguyễn Thị Phương Hà, Nguyễn Thị Diệu Huyền,
Phạm Thị Thùy Dương, Phạm Thanh Đồng

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

Nhận ngày 29 tháng 10 năm 2025

Chỉnh sửa ngày 30 tháng 7 năm 2026; Chấp nhận đăng ngày 05 tháng 8 năm 2026

Tóm tắt: Trong bài báo này, phương pháp đồng kết tủa được sử dụng để tổng hợp thành công vật liệu NiFe_2O_4 ứng dụng trong xử lý tetracycline (TC) đồng thời thể hiện khả năng thu hồi nhờ từ tính. Nghiên cứu tiếp tục kiểm tra vai trò của H_2O_2 , một chất nhận electron giúp tăng cường sự phân hủy TC thông qua quá trình quang xúc tác sử dụng vật liệu NiFe_2O_4 . Đặc trưng tính chất của vật liệu tổng hợp được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD), hiển vi điện tử quét (SEM), phổ hấp thụ phân tử UV-Vis DRS, từ kế mẫu rung (VSM). Kết quả phân tích cho thấy vật liệu tổng hợp có độ kết tinh cao bao gồm các hạt nano có kích thước khoảng 40 nm đồng thời cải thiện khả năng hấp thụ ánh sáng. Ngoài ra, vật liệu NiFe_2O_4 cho thấy tính chất siêu thuận từ, vật liệu có thể được thu hồi bằng từ trường ngoài sau quá trình sử dụng. Sau 240 phút, quá trình quang xúc tác đã xử lý đáng kể lượng TC, đạt hiệu suất loại bỏ 75,75%. Khi bổ sung H_2O_2 , quá trình loại bỏ TC cho thấy hiệu suất đạt 86,03%. Đáng chú ý, hoạt tính quang xúc tác và tính chất từ của NiFe_2O_4 thể hiện sự ổn định trong ít nhất năm chu kỳ tái sinh. Những phát hiện này làm nổi bật tiềm năng đáng kể của NiFe_2O_4 cho các ứng dụng thực tế trong việc loại bỏ TC nói chung và các chất hữu cơ nói riêng.

Từ khóa: NiFe_2O_4 , phương pháp đồng kết tủa, quang xúc tác, từ tính, phân hủy Tetracycline.

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, ô nhiễm kháng sinh đang trở thành một vấn đề môi trường đáng lo ngại trên toàn cầu, đặc biệt hệ sinh thái môi trường nước [1, 2]. Tetracycline (TC), một loại kháng sinh phổ rộng được sử dụng phổ biến trong chăn nuôi giúp điều trị, kiểm soát dịch bệnh và làm phụ gia thức ăn cho gia súc, gia cầm [3-5]. Do khả năng phân hủy sinh học thấp, phần lớn TC sau khi sử dụng không bị phân hủy hoàn toàn mà theo phân và nước tiểu xâm nhập vào môi trường nước [6-8]. Dư lượng

kháng sinh tồn dư trong nước không chỉ gây ảnh hưởng đến vi sinh vật tự nhiên mà còn làm gia tăng tình trạng kháng kháng sinh, một nguy cơ nghiêm trọng đối với sức khỏe con người [9, 10]. Do đó, việc phát triển các phương pháp để loại bỏ dư lượng kháng sinh khỏi môi trường nước là yêu cầu cấp bách cần được giải quyết. Một số công nghệ đã và đang được áp dụng để loại bỏ kháng sinh tồn dư trong môi trường nước như sinh học, quang xúc tác, điện hóa, lọc, hấp phụ [11-14]. Trong số công nghệ AOPs - quá trình quang xúc tác sử dụng vật liệu bán dẫn có thể phá hủy hoàn toàn các hợp chất hữu cơ do các gốc hydroxyl tạo ra từ quá trình xúc tác quang dưới sự kích thích của ánh sáng thích hợp, đã và đang được coi là một phương pháp

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: hanhnguyen@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5964>

xử lý đầy hứa hẹn [15, 16]. NiFe_2O_4 vật liệu bán dẫn ứng dụng công nghệ quang xúc tác, có nhiều ưu điểm như ít độc hại, giá thành rẻ, độ bền cao, năng lượng vùng cấm hẹp có khả năng thúc đẩy quá trình phân hủy các hợp chất hữu cơ tồn dư trong môi trường dù được kích thích bằng ánh sáng khả kiến. Đặc biệt, từ tính mạnh của NiFe_2O_4 cho phép thu hồi vật liệu dễ dàng sau khi sử dụng [17]. Trong công trình công bố trước đây, NiFe_2O_4 được tổng hợp bằng nhiều phương pháp khác nhau như thủy nhiệt, sol gel,... [18, 19]. Tuy nhiên, các phương pháp này thường đòi hỏi nhiệt độ cao, thời gian phản ứng dài hoặc thiết lập phức tạp, hạn chế khả năng ứng dụng của chúng trong thực tế. Ngược lại, phương pháp đồng kết tủa được chọn trong nghiên cứu này vì tính đơn giản, giá cả hợp lý, yêu cầu năng lượng thấp và khả năng tạo ra vật liệu có độ tinh khiết cao trong điều kiện phản ứng không quá khắc nghiệt, khiến nó trở thành một lựa chọn hấp dẫn để tổng hợp các vật liệu xúc tác quang nói chung và vật liệu NiFe_2O_4 nói riêng. Mặc dù có nhiều ưu điểm, quang xúc tác dựa trên NiFe_2O_4 thường bị cản trở bởi sự tái hợp nhanh chóng của các electron được kích thích ánh sáng, làm giảm hiệu suất xử lý. Để giải quyết vấn đề này, các chất nhận (e^-) như H_2O_2 có thể được đưa vào quá trình xử lý để thu giữ các electron được tạo ra, ngăn chặn sự tái hợp các electron và lỗ trống, đồng thời tạo ra các gốc hydroxyl để tăng cường hiệu quả phân hủy [20]. Do đó, trong nghiên cứu này, NiFe_2O_4 được tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa đơn giản, tiết kiệm năng lượng nhằm mở rộng quy mô ứng dụng trong nước thải thực tế, đồng thời đánh giá tính ổn định và khả năng tái sử dụng của vật liệu.

2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

2.1. Tổng hợp vật liệu

Vật liệu NiFe_2O_4 tổng hợp theo phương pháp đồng kết tủa bằng cách hòa tan 2,376 g NiCl_2 (Sigma-Aldrich, 99%) trong 20 mL deion, và hòa tan 5,406 g FeCl_3 (Sigma-Aldrich, 99%) trong 20 mL deion, khuấy trong 30 phút. Sau đó, 6,304 g axit citric được hòa tan với 30 mL deion rồi chia đều vào 2 hỗn hợp trên. Tiếp tục

trộn hỗn hợp thu được với nhau và khuấy đều trong 3 giờ. Độ pH được duy trì ở pH 12 bằng cách sử dụng dung dịch NaOH. Sau đó, hỗn hợp được để già hóa trong 24 giờ. Sau khi hoàn tất quá trình già hóa hỗn hợp, sản phẩm sẽ được thu hồi bằng nam châm và rửa sạch để trung hòa pH trước khi sấy khô trong 20 giờ ở 80 °C và sau đó nung trong 2 giờ ở 400 °C

2.2. Đặc trưng tính chất vật liệu

Cấu trúc của vật liệu tổng hợp được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (D8 Advance, Bruker). Hình thái bề mặt của vật liệu được xác định bằng phương pháp hiển vi điện tử quét SEM (S-4800, Hitachi). Khả năng hấp thụ ánh sáng của xúc tác được đặc trưng bằng phổ phản xạ khuếch tán từ ngoại khả kiến UV-Vis-DRS (Lambda 750, Perkinelmer). Từ tính của vật liệu được xác định bằng phương pháp từ kế mẫu rung VSM (PNA 8326, Agilent).

2.2. Khảo sát khả năng phân hủy Tetracycline

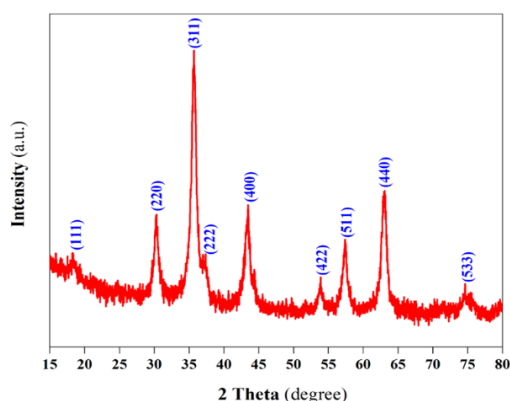
Cho 50 mg xúc tác và 200 mL dung dịch Tetracycline 20 ppm (pH = 6) vào cốc 250 mL, khuấy đều cốc trên máy khuấy từ. Quá trình loại bỏ TC được tiến hành trong 240 phút dưới các điều kiện khác nhau trong bóng tối hoặc tiếp xúc với ánh sáng từ đèn compact Rang Dong 35W, có hoặc không có sự hiện diện của H_2O_2 . Sau các khoảng thời gian 30 phút, lấy 2 mL hỗn hợp phản ứng đem đi ly tâm ở tốc độ 12000 vòng/phút trong 6 phút và lọc qua đầu lọc PTFE. Dung dịch TC thu được được phân tích thông qua hệ thống HPLC bằng máy sắc ký Shimadzu LC-20A trang bị đầu dò UV/Vis SPD-20A đặt ở bước sóng 358 nm.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc trưng vật liệu

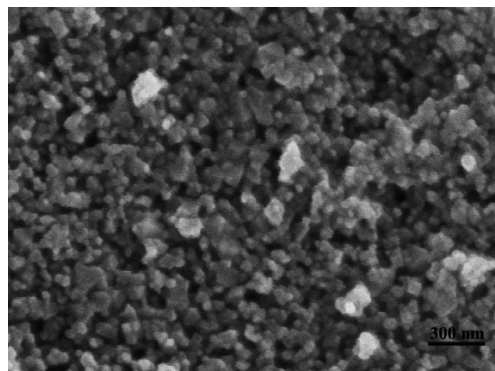
Hình 1 trình bày giản đồ nhiễu xạ tia X của vật liệu NiFe_2O_4 tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa. Kết quả cho thấy vật liệu NiFe_2O_4 tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa có độ kết tinh cao. Giản đồ nhiễu xạ của vật liệu xuất hiện đầy đủ các đỉnh đặc trưng của spinel khối lập phương, các đỉnh nhiễu xạ ở vị trí góc 2

theta lần lượt là 30.2° , 35.6° , 37.2° , 43.3° , 53.8° , 57.2° và 62.8° tương ứng với các mặt phản xạ (220), (311), (222), (400), (422), (511), và (440) [21]. Hơn nữa, kết quả XRD cho thấy không có các đỉnh nhiễu xạ ngoại lai, không thấy đỉnh lạ của $\text{NiO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$, xác nhận sự vắng mặt của các tạp chất như hematit hoặc oxit sắt. Từ dữ liệu XRD, kích thước tinh thể của NiFe_2O_4 được tính toán theo công thức Scherrer có kích thước là 20.9 nm. Kết quả phân tích này cho thấy vật liệu NiFe_2O_4 được tổng hợp thành công bằng phương pháp đồng kết tủa với độ kết tinh cao.



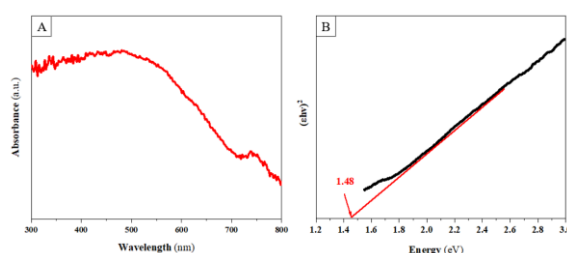
Hình 1. Giản đồ XRD của vật liệu NiFe_2O_4 tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa.

Ảnh SEM cho thấy vật liệu NiFe_2O_4 tổng hợp có hình dạng cầu, với các hạt nano phân bố tương đối đồng đều trên bề mặt (Hình 2). Kích thước hạt trung bình khoảng 40 nm. Kết quả kích thước hạt này có sự khác biệt (lớn hơn) so với kích thước tinh thể được tính toán theo công thức Scherrer (20.9 nm) từ kết quả XRD, điều này có thể được giải thích do các hạt tinh thể NiFe_2O_4 đã bị kết tụ ở một mức độ nào đó, điều này thường thấy ở các hạt nano từ tính do tương tác lưỡng cực – lưỡng cực. Sự kết tụ này có thể góp phần vào độ ổn định của vật liệu và tạo điều kiện thu hồi thông qua quá trình từ trường ngoài. Sự phân bố kích thước đồng đều và hình dạng cầu rõ ràng của các hạt nano NiFe_2O_4 cho thấy phương pháp đồng kết tủa đã kiểm soát hiệu quả sự phát triển của hạt, tạo ra một vật liệu có các đặc tính mong muốn cho các ứng dụng quang xúc tác.



Hình 2. Hình ảnh kính hiển vi điện từ quét của mẫu vật liệu NiFe_2O_4 .

Khả năng hấp thụ quang và năng lượng vùng cấm (Eg) của vật liệu NiFe_2O_4 được trình bày trong Hình 3. Phổ hấp thụ UV-Vis trong Hình 3A chỉ ra rằng vật liệu có dải hấp thụ quang rộng, trải dài từ vùng tử ngoại đến vùng khả kiến. Đáng chú ý, rìa hấp thụ chủ yếu nằm trong dải bước sóng xanh lam của quang phổ mặt trời, cho thấy tiềm năng sử dụng ánh sáng khả kiến của vật liệu. Đặc tính này đặc biệt có lợi cho các ứng dụng trong thực tế, vì nó cho phép vật liệu sử dụng một phần lớn hơn ánh sáng mặt trời tự nhiên. Trong Hình 3B, năng lượng vùng cấm (Eg) của vật liệu NiFe_2O_4 được xác định bằng phương trình Kubelka-Munk kết hợp với đồ thị Tauc. Giá trị Eg được xác định là 1,48 eV, phù hợp với các nghiên cứu trước đây (1,4–2,2 eV).

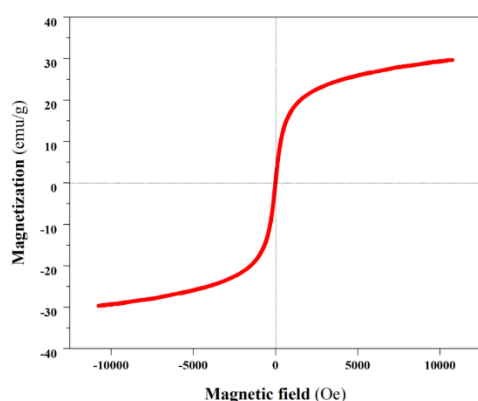


Hình 3. Phổ UV-VIS và đồ thị Tauc của vật liệu NiFe_2O_4 được tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa.

Kết quả này xác nhận rằng NiFe_2O_4 có vùng cấm hẹp, cùng với khả năng hấp thụ ánh sáng khả kiến tốt, cho thấy vật liệu có tiềm năng đầy hứa hẹn cho hoạt động quang xúc tác hiệu suất cao ở vùng ánh sáng khả kiến, khiến nó trở

thành ứng cử viên phù hợp cho các ứng dụng như phân hủy tetracycline và các chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy khác.

Kết quả phân tích từ kế mẫu rung VSM của vật liệu được trình bày ở Hình 4. Kết quả phân tích chỉ ra rằng đường cong từ trễ của vật liệu thể hiện một vòng lặp hình chữ S, với giá trị lực kháng từ gần bằng không, cho thấy vật liệu có tính chất siêu thuận từ. Bản chất siêu thuận từ cho phép NiFe_2O_4 dễ dàng thu hồi bằng từ trường ngoài sau quá trình sử dụng. Độ từ bão hòa của vật liệu được xác định là 30 emu/g, phù hợp với vật liệu ferit spinel điển hình trong các công bố trước đây [22]. Do đó, NiFe_2O_4 có thể hoạt động như một vật liệu sắt từ mềm, nên có thể tách khỏi dung dịch sau quá trình sử dụng để xử lý sau khi phân hủy các chất ô nhiễm hữu cơ bằng cách sử dụng từ trường ngoài. Do đó, tăng khả năng tái sử dụng của vật liệu và hiệu quả về chi phí trong các ứng dụng thực tế.



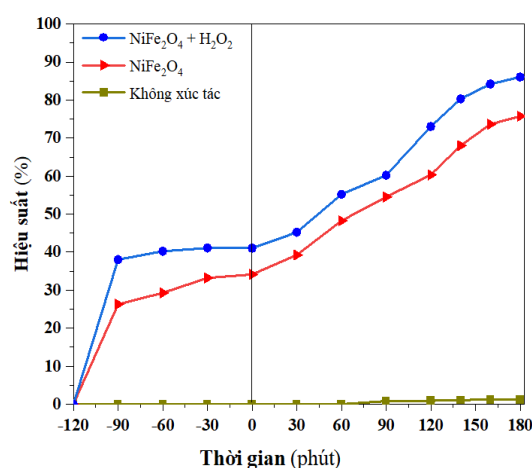
Hình 4. Đường cong từ trễ của vật liệu NiFe_2O_4 .

3.2. Khả năng xử lý Tetracycline vật liệu

Kết quả khảo sát khả năng loại bỏ TC trong điều kiện bóng tối (120 phút) và dưới sự chiếu sáng (180 phút) của vật liệu được trình bày trong Hình 5 nhằm đánh giá hiệu quả xử lý kháng sinh TC của vật liệu. Hình 5 cho thấy hiệu suất xử lý TC tăng dần theo thời gian đối với các hệ có xúc tác. Trong giai đoạn tối, hiệu suất loại bỏ TC tăng nhẹ do quá trình hấp phụ của TC lên bề mặt vật liệu. Kết quả cũng chỉ ra quá trình hấp phụ ban đầu của vật liệu đạt trạng thái bão hòa sau khoảng 60 phút đầu trong bóng

tối. Việc hấp phụ TC trên bề mặt vật liệu nói chung và NiFe_2O_4 nói riêng là một quá trình phức tạp, bao gồm nhiều tương tác khác nhau, trong đó, các ion Ni^{2+} và Fe^{3+} góp phần vào tương tác tĩnh điện với TC. Lực Van der Waals, được tạo ra bởi sự di chuyển electron trong cấu trúc vật liệu đã tăng cường hơn nữa quá trình hấp phụ. Ngoài ra, các nhóm hydroxyl ($-\text{OH}$) trên bề mặt vật liệu hình thành liên kết hydro với các nhóm carbonyl ($\text{C}=\text{O}$) và amin (NH_2) trong TC, làm tăng hiệu quả hấp phụ [23].

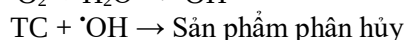
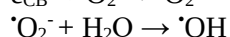
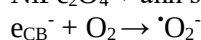
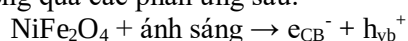
Đáng chú ý, cùng ở điều kiện bóng tối nhưng hiệu suất loại bỏ TC của hệ $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ cao hơn so với hệ chỉ sử dụng NiFe_2O_4 , điều này có thể do ngoài quá trình hấp phụ, H_2O_2 còn được hoạt hóa một phần bởi các tâm Fe trên bề mặt xúc tác, tạo ra một lượng nhỏ gốc $\cdot\text{OH}$ và góp phần oxy hóa TC ngay trong điều kiện không chiếu sáng. Đây chính là quá trình Fenton dị thể. Như vậy, trong giai đoạn tối, sự loại bỏ TC trong hệ $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ là kết quả của sự kết hợp giữa hấp phụ và phản ứng Fenton dị thể, trong khi hệ chỉ có NiFe_2O_4 chủ yếu diễn ra hấp phụ vật lý/hóa học trên bề mặt vật liệu.



Hình 5. Hiệu suất xử lý TC theo thời gian của vật liệu.

Khi bắt đầu chiếu sáng, hiệu suất xử lý TC tăng nhanh hơn so với giai đoạn tối ở cả hai hệ xúc tác, cho thấy vai trò của ánh sáng trong việc thúc đẩy quá trình oxy hóa. Đặc biệt, hệ $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ luôn đạt hiệu quả cao hơn so

với hệ chỉ có NiFe_2O_4 , chứng tỏ sự kết hợp giữa xúc tác và H_2O_2 giúp tăng cường quá trình phân hủy TC. Dưới tác dụng ánh sáng đèn compact, lượng TC đáng kể đã bị loại bỏ thông qua hoạt động quang xúc tác của các vật liệu. Cụ thể, khi chiếu sáng có vật liệu và không có H_2O_2 thì hiệu suất xử lý vẫn tăng đáng kể từ khoảng 31% lên 75% sau 180 phút phản ứng, đây chính là hiệu quả do quá trình quang xúc tác của vật liệu. Hiệu suất xử lý TC đạt khoảng 86% đối với hệ $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$, trong khi hệ NiFe_2O_4 chỉ đạt khoảng 75%, kết quả này cho thấy đối với hệ có vật liệu, có chiếu sáng và có mặt của H_2O_2 có sự tác động hiệp đồng của các quá trình bao gồm hấp phụ, quang xúc tác và Fenton dị thể. Ngược lại, trong hệ không xúc tác, hiệu suất loại bỏ TC gần như không đáng kể trong toàn bộ thời gian khảo sát, cho thấy vai trò quan trọng của xúc tác và tác nhân oxy hóa trong quá trình xử lý. Vật liệu có khả năng hấp thụ ánh sáng có năng lượng lớn hơn hoặc bằng năng lượng vùng cấm của chúng để tạo ra các cặp electron (e^-) và lỗ trống (h^+) quang sinh, trong đó, electron được kích thích lên vùng dẫn, còn lỗ trống được duy trì tại vùng hóa trị [24]. Các electron và lỗ trống được tạo ra phản ứng với O_2 hoặc H_2O , dẫn đến sự hình thành các gốc hydroxyl. Các gốc hydroxyl tạo điều kiện cho quá trình phân hủy TC thành CO_2 và H_2O . Cơ chế xúc tác quang đối với sự phân hủy TC bởi các chất xúc NiFe_2O_4 có thể được giải thích thông qua các phản ứng sau:



Một hạn chế lớn của các vật liệu quang xúc tác, là sự tái tổ hợp nhanh chóng của các cặp electron – lỗ trống quang sinh sau khi được tạo ra. Do đó, các chất nhận electron điển hình như H_2O_2 thường được bổ sung vào hệ phản ứng nhằm hạn chế quá trình tái hợp giữa electron và lỗ trống, qua đó thúc đẩy sự hình thành nhiều gốc hydroxyl hơn. Kết quả Hình 5 còn cho thấy, khi có mặt của H_2O_2 hiệu suất xử lý TC của vật liệu NiFe_2O_4 đạt 86,03%. Nguyên nhân do sự hình thành gốc tự do $\cdot\text{OH}$ từ tương tác giữa NiFe_2O_4 và H_2O_2 đã tạo ra hiệu ứng hiệp

đồng, góp phần khắc phục hạn chế tái tổ hợp nhanh của NiFe_2O_4 . Khi có mặt H_2O_2 , chất này có khả năng nhận electron để sinh ra gốc $\cdot\text{OH}$, vừa làm tăng lượng gốc tự do hình thành vừa ức chế quá trình tái tổ hợp electron – lỗ trống quang sinh, qua đó nâng cao hiệu quả phân hủy TC [20].

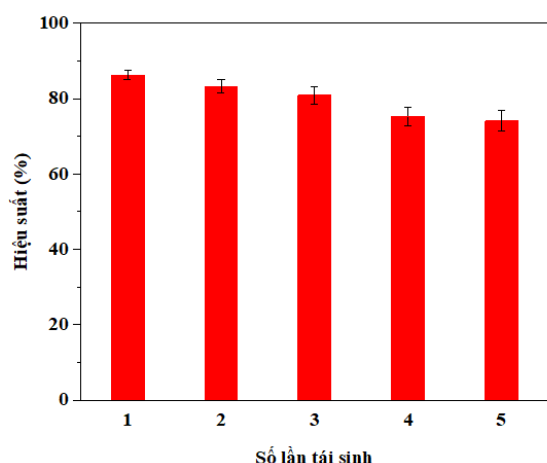
3.3. Khả năng tái sử dụng vật liệu

NiFe_2O_4 thể hiện từ tính mạnh, nên có thể dễ dàng tách khỏi dung dịch bằng nam châm trong vòng 2 phút. Thí nghiệm tái sinh vật liệu được tiến hành bằng cách giữ lại các hạt NiFe_2O_4 trong cốc thủy tinh bằng nam châm bên ngoài. Sau khi cố định vật liệu, thêm lượng TC và H_2O_2 vào cốc thủy tinh, đảm bảo thể tích và nồng độ phù hợp với các thí nghiệm trước đó. Hình 6 thể hiện khả năng tái sử dụng vật liệu NiFe_2O_4 phân hủy TC qua năm chu kỳ thí nghiệm liên tiếp. Với hiệu suất tái sinh cao đạt trên 74,36% sau mỗi chu kỳ. Điều này cho thấy vật liệu NiFe_2O_4 duy trì hoạt tính xúc tác và độ ổn định cấu trúc ngay cả sau nhiều lần sử dụng, với mức suy giảm hiệu suất tối thiểu. Tính chất từ tính mạnh của NiFe_2O_4 giúp dễ dàng thu hồi bằng nam châm bên ngoài, giảm thất thoát vật liệu và đơn giản hóa quá trình tái chế.

Để đánh giá độ ổn định của vật liệu và khả năng rửa trôi kim loại trong quá trình phản ứng, hàm lượng ion Fe trong dung dịch sau phản ứng đã được phân tích bằng phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử (AAS). Kết quả cho thấy không phát hiện ion Fe trong dung dịch trong giới hạn phát hiện của phương pháp, chứng tỏ quá trình rửa trôi kim loại là không đáng kể trong điều kiện thí nghiệm. Điều này chứng tỏ sự rửa trôi kim loại là không đáng kể và phản ứng chủ yếu diễn ra trên bề mặt xúc tác NiFe_2O_4 , đặc trưng cho cơ chế xúc tác dị thể.

Kết quả này cũng phù hợp với thí nghiệm tái sử dụng xúc tác, trong đó hiệu suất phân hủy TC chỉ giảm nhẹ sau các chu kỳ phản ứng, cho thấy vật liệu duy trì được hoạt tính xúc tác và độ ổn định tốt trong quá trình sử dụng lặp lại. Điều này khiến NiFe_2O_4 trở thành ứng cử viên sáng giá cho việc xử lý môi trường thực tế, đặc biệt là trong các hệ thống xử lý nước thải và môi trường bị ô nhiễm kháng sinh hoặc các chất

ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy khác. Sự kết hợp giữa khả năng tái sử dụng cao, dễ phục hồi và hiệu suất phân hủy mạnh mẽ nhấn mạnh tiềm năng của NiFe_2O_4 như một giải pháp tiết kiệm chi phí và bền vững để giải quyết ô nhiễm nước.



Hình 6. Đánh giá khả năng tái sử dụng của vật liệu NiFe_2O_4 .

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã tổng hợp thành công vật liệu NiFe_2O_4 bằng phương pháp kết tủa, tạo ra vật liệu có độ kết tinh cao, khả năng hấp thụ ánh sáng và dễ dàng thu hồi bằng từ trường ngoài. Vật liệu NiFe_2O_4 thể hiện hoạt tính quang xúc tác tốt để phân hủy kháng sinh tetracycline trong nước. Việc bổ sung H_2O_2 đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy quá trình phân hủy TC bằng cách tạo ra nhiều gốc $\cdot\text{OH}$ hơn và ngăn chặn sự tái tổ hợp electron và lỗ trống. Sau 240 phút, NiFe_2O_4 đã loại bỏ 75,75% TC, trong khi hiệu quả loại bỏ TC khi sử dụng NiFe_2O_4 với H_2O_2 đạt 86,03% dưới tác động của ánh sáng. Hơn nữa, NiFe_2O_4 duy trì hiệu suất loại bỏ TC tốt qua năm chu kỳ tái sử dụng, chứng minh tính ổn định và khả năng tái sử dụng của vật liệu. Những kết quả này cho thấy NiFe_2O_4 là vật liệu có hiệu suất cao, bền và có thể tái sử dụng, với tiềm năng phân hủy TC và các chất ô nhiễm hữu cơ khác trong hệ thống xử lý nước thải đáng kể.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 104.05-2021.89.

Tài liệu tham khảo

- [1] X. Dou, Y. Chen, H. Shi, $\text{CuBi}_2\text{O}_4/\text{BiOBr}$ Composites Promoted PMS Activation for the Degradation of Tetracycline: S-scheme Mechanism Boosted $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ Cycle, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 431, 2022, pp. 134054.
- [2] X. Li et al., Efficient Degradation of Tetracycline by CoFeLa -layered Double Hydroxides Catalyzed Peroxymonosulfate: Synergistic Effect of Radical and Nonradical Pathways, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 398, 2020, pp. 122884.
- [3] M. H. T. Tung et al., Construction of Ag Decorated on $\text{InVO}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4$ for Novel Photocatalytic Degradation of Residual Antibiotics, *Journal of Solid State Chemistry*, Vol. 305, 2022, pp. 122643.
- [4] L. Xu et al., Occurrence, Fate, and Risk Assessment of Typical Tetracycline Antibiotics in the Aquatic Environment: A Review, *Science of the Total Environment*, Vol. 753, 2021, pp. 141975.
- [5] Y. Amangelsin et al., The Impact of Tetracycline Pollution on the Aquatic Environment and Removal Strategies, *Antibiotics*, Vol. 12, No. 3, 2023, pp. 440.
- [6] R. Vinayagam, T. Varadavenkatesan, R. Selvaraj, Tetracycline Adsorption Research (2015–2025): A Bibliometric Analysis of Trends, Challenges, and Future Directions. *Results in Engineering*, Vol. 27, 2025, pp. 106383.
- [7] A. Joseph, V. Manirethan, AgTiO_3 Synthesis and Photocatalytic Degradation of Tetracycline. *Materials Today: Proceedings*, 2024.
- [8] S. Li et al., Degradation of Leachate and High Concentration Emerging Pollutant Tetracycline through Electro Oxidation, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 159, 2026, pp. 142-153.
- [9] X. Chen et al., A Comprehensive Review on Biodegradation of Tetracyclines: Current Research Progress and Prospect, *Science of the Total Environment*, Vol. 814, 2022, pp. 152852.
- [10] J. Niu et al., Visible-Light-Mediated $\text{Sr-Bi}_2\text{O}_3$ Photocatalysis of Tetracycline: Kinetics, Mechanisms and Toxicity Assessment. *Chemosphere*, Vol. 93, No. 1, 2013, pp. 1-8.

- [11] X. Si et al., Synergistic Degradation of Tetracycline in Aqueous Solutions via Anodic Oxidation Coupled with Electro-Fenton Process, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 13, No. 5, 2025, pp. 117873.
- [12] D. V. Thuan et al., Development of Indium Vanadate and Silver Deposited on Graphitic Carbon Nitride Ternary Heterojunction for Advanced Photocatalytic Degradation of Residual Antibiotics in Aqueous Environment, *Optical Materials*, Vol. 123, 2022, pp. 111885.
- [13] S. F. Pan et al., Separation of Tetracycline from Wastewater Using Forward Osmosis Process with thin Film Composite Membrane–Implications for Antibiotics Recovery., *Separation and Purification Technology*, Vol. 153, 2015, pp. 76-83.
- [14] X. Li et al., Strong Adsorption of Tetracycline on Carbon Blacks: An In-depth Study of the Adsorption Mechanism, *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 70, 2025, pp. 106784.
- [15] A. Serrà et al., Facile Cost-Effective Fabrication of Cu@ Cu₂O@ CuO–Microalgae Photocatalyst with Enhanced Visible Light Degradation of Tetracycline, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 413, 2021, pp. 127477.
- [16] M. A. Mamun et al., Photocatalytic Activity Improvement and Application of UV-TiO₂ Photocatalysis in Textile Wastewater Treatment: A Review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 7, No. 5, 2019, pp. 103248.
- [17] P. Chavan, L. Naik, Investigation of Energy Band Gap and Conduction Mechanism of Magnesium Substituted Nickel Ferrite Nanoparticles, *Physica Status Solidi (a)*, Vol. 214, No. 1, 2017, pp. 1700077.
- [18] F. Majid et al., Synthesis and Characterization of NiFe₂O₄ Ferrite: Sol–gel and Hydrothermal Synthesis Routes Effect on Magnetic, Structural and Dielectric Characteristics, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 258, 2021, pp. 123888.
- [19] R. Sen et al., Synthesis and Characterization of Nickel Ferrite (NiFe₂O₄) Nanoparticles Prepared by Sol-Gel Method, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, No. 4-5, 2015, pp. 3750-3757.
- [20] Q. Zhang et al., Photocatalytic Degradation of Tetracycline Antibiotics Using Three-Dimensional Network Structure Perylene Diimide Supramolecular Organic Photocatalyst under Visible-light Irradiation, *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 277, 2020, pp. 119122.
- [21] L. Sun et al., Influence of Cu²⁺ Doping on the Structure, Dielectric and Magnetic Properties of NiFe₂O₄ Prepared by the Sol-Gel Method, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 449, 2018, pp. 545-551.
- [22] W. Wang et al., The Magnetic Characteristics of Spinel-Type MnCo₂O₄ at Low Temperatures, *Ceramics International*, Vol. 50, No. 24, 2024, pp. 54482-54489.
- [23] N. N. Tri et al., The Adsorption of Tetracycline, Ciprofloxacin on Reduced Graphene Oxide Surfaces: Role of Intermolecular Interaction, *Chemical Physics*, Vol. 579, 2024, pp. 112207.
- [24] N. Arumugham et al., Nickel Ferrite-Based Composites and its Photocatalytic Application–A Review, *Journal of Hazardous Materials Advances*, Vol. 8, 2022, pp. 100156.