



Khả năng loại bỏ xanh metylen của vật liệu tổ hợp MOF-Fe/GNPs bằng quá trình hấp phụ-xúc tác đồng thời

Simultaneous adsorption-catalysis process for methylene blue removal using MOF-Fe/GNPs composites

Nguyễn Thị Lan Anh¹, Vũ Đình Ngo¹, Trần Thị Hằng¹, Mạc Đình Thiết¹, Nguyễn Quốc Duy¹, Lã Đức Dương², Nguyễn Thị Hoài Phương^{2,*}

¹Đại học Công nghiệp Việt Trì, 9 Tiên Sơn, Tiên Cát, Việt Trì, Phú Thọ

²Viện Hóa học và Vật liệu, 17 Hoàng Sâm, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội

*Email: hoaihuong1978@gmail.com

ARTICLE INFO

Received: 15/2/2023

Accepted: 20/4/2023

Published: 30/9/2023

Keywords:

MOF-Fe, GNPs, photocatalysis, dye wastewater treatment.

ABSTRACT

In this study, graphene nanoplatelets (GNPs) were combined with iron-organic framework materials using the ultrasonic method in a water/ethanol solvent. The resulting composite material had a clear crystalline morphology with a size range of 200 to 400 nm. The MOF-Fe particle grew in a particular order on GNPs, forming a uniform structure. The XRD diagram confirmed the presence of GNPs and MOF-Fe, with peaks at 21.103° and 26.728° assigned to GNPs, and peaks at 5.423° and 11.015° typical for MOF-Fe. The BET model estimated the surface area of MOF-Fe/GNPs at $441 \text{ m}^2/\text{g}$. The composite showed high efficiency in treating chromogenic organic compounds through simultaneous adsorption and photocatalysis. Specifically, the material achieved over 80% methylene blue removal via adsorption mechanism after 2 hours, and 100% removal with simultaneous adsorption-photocatalysis treatment mechanism.

Giới thiệu chung

Việt Nam được đánh giá là nước đứng thứ 5 thế giới về xuất khẩu các mặt hàng may mặc. Trong những năm trở lại đây, nước ta đang thu hút được nguồn lực đầu tư lớn cho nhiều ngành công nghiệp, trong đó có ngành dệt may. Tuy nhiên, những hệ lụy môi trường do các dây chuyền dệt nhuộm gây ra ô nhiễm môi trường nghiêm trọng, nó xuất hiện từ những khu công nghiệp lớn, ở những vùng đô thị đến cả ở các làng nghề dệt nhuộm truyền thống vùng nông thôn. Trong quá trình nhuộm,

có khoảng trên 10 % lượng thuốc nhuộm không liên kết màu với vải nhuộm và đi theo nước thải xả ra môi trường. Gần như các hợp chất hữu cơ sử dụng để nhuộm vải đều gây độc với môi trường và sinh vật sống, đặc biệt có thể gây ung thư cho con người. Vì thế, cấp thiết cần có nhiều biện pháp khác nhau để loại bỏ các hợp chất này trước khi xả ra môi trường.

Hiện nay, các phương pháp đã được sử dụng để xử lý nguồn nước thải của các dây chuyền dệt nhuộm công nghiệp thường là những công nghệ khá tiên tiến như khử màu bằng vi khuẩn [1], oxy hóa nâng cao, keo tụ và

kết hợp [2, 3, 4], hấp phụ [5, 6], phân hủy với xúc tác [7, 8] ...

Vật liệu khung kim loại-hữu cơ (MOFs) là họ vật liệu xốp, rỗng khá thú vị hiện nay. Vật liệu được hình thành nhờ các hợp chất hữu cơ làm cầu nối thông qua các nhóm chức với các tâm kim loại thường là kim loại chuyển tiếp. Vật liệu có cấu trúc tinh thể dạng khung khá linh hoạt và đa dạng, với diện tích bề mặt riêng lớn, và hoàn toàn có thể thay đổi được kích thước, hình dạng lỗ xốp dựa vào sự thay đổi của cấu tử hữu cơ và ion kim loại. Với những đặc điểm, tính chất đặc trưng này, MOFs đã thu hút được các nhà khoa học và công nghệ tập trung nghiên cứu chế tạo và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như hấp phụ [9, 10], lưu trữ và phân tách khí [11, 12], cảm biến [13, 14], vật liệu mang thuốc điều trị ung thư [15, 16]... Một trong những hướng nghiên cứu tạo được sự chú ý của các nhà khoa học và công nghệ trên thế giới và trong nước là ứng dụng MOFs vào lĩnh vực hấp phụ cũng như xúc tác hoặc đồng thời nhằm loại bỏ các tác nhân gây độc đối với môi trường.

Tại Việt Nam, các hướng nghiên cứu về MOFs chủ yếu được tập trung vào nghiên cứu chế tạo và khảo sát, đánh giá khả năng ứng dụng của MOFs cũng như MOFs tổ hợp với các hợp chất khác nhau làm vật liệu hấp phụ, xúc tác cho xử lý môi trường và chất mang thuốc [17, 18]. Vật liệu khung kim loại-hữu cơ tổ hợp với nano graphen ít lớp đơn (GNPs) với mục đích có thể kết hợp được tính năng lưu giữ của khung rỗng cũng như hoạt tính xúc tác của tâm kim loại hoạt động trong quá trình phân hủy hợp chất độc hại, từ đó góp phần nâng cao khả năng loại bỏ các tác nhân ô nhiễm trong môi trường của vật liệu tổ hợp. Nghiên cứu này thể hiện các kết quả nghiên cứu chế tạo vật liệu MOF-Fe/GNPs và đánh giá hiệu quả loại bỏ methylene xanh (MB) trong môi trường nước của vật liệu sau khi tổ hợp.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hoá chất, trang thiết bị

Iron (III) chloride hexahydrate 99%; Trimesic acid 99%; Dimethylformamide 99%; Ethanol 98% của Macklin, Trung Quốc, Graphene nanoplatelets 98% nguồn gốc graphite Việt Nam do Công ty VNGraphene cung cấp. Bể siêu âm; Bình autoclave hai lớp; Dụng cụ thủy tinh phòng thí nghiệm; Tủ cấy ánh sáng (Dark-box); Tủ quang hoá với đèn mô phỏng ánh sáng mặt trời (Photocatalytic reaction chamber).

Chế tạo vật liệu

Vật liệu được tổ hợp bằng việc phân tán 100 mg GNPs vào 150 ml dung dịch chứa 5,4g FeCl₃.6H₂O bằng sóng siêu âm và sử dụng kỹ thuật thủy nhiệt thực hiện phản ứng từ hỗn hợp sau phân tán với 4,2g C₉H₆O₆ ở 120°C trong 8 giờ. Vật liệu sau lọc tách được tinh chế với dung môi hỗn hợp etanol/nước cất (tỷ lệ 1/1 về thể tích) và sấy có hỗ trợ hút chân không ở 60°C trong 8 giờ.

Đánh giá đặc trưng tính chất vật liệu

Thành phần hóa học của vật liệu tổ hợp được xác định bằng kỹ thuật phổ nhiễu xạ tia X (XRD) trên thiết bị X'Pert Pro. Hình thái học của vật liệu được quan sát thông qua chụp ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) trên thiết bị Hitachi S-4800. Đặc trưng bề mặt vật liệu được đánh giá nhờ quá trình hấp phụ đẳng nhiệt khí N₂ tính toán theo phương trình BET.

Khảo sát khả năng loại bỏ hợp chất MB

Thí nghiệm đánh giá khả năng loại bỏ MB trong môi trường nước của vật liệu MOF-Fe/GNPs được tiến hành trong điều kiện dung dịch MB nồng độ 10 g/l với tỷ lệ vật liệu sử dụng là 1 g/l. Thử nghiệm hấp phụ được tiến hành trong tủ cấy ánh sáng (dark-box). Thí nghiệm đánh giá khả năng xúc tác quang được thực hiện trong tủ quang hoá sử dụng nguồn sáng Xenon 350 W, khoảng cách nguồn sáng đến bề mặt dung dịch là 20 cm. Sau thời gian cần khảo sát, lọc bỏ vật liệu ra khỏi dung dịch và phân tích nồng độ MB bằng phương pháp trắc quang trên thiết bị UV-Vis DV-8200 (Drawell). Phương trình xác định nồng độ MB đã được xây dựng như sau:

$$C = 8,835.Abs - 0,072 (\lambda=664 \text{ nm}, R^2 = 0,9925)$$

Trong đó: C là nồng độ của dung dịch MB, mg/l; Abs là cường độ hấp thụ ánh sáng. R² là hệ số tương quan của phương trình đường chuẩn xây dựng theo thực nghiệm.

Hiệu suất loại bỏ MB của vật liệu được tính theo công thức:

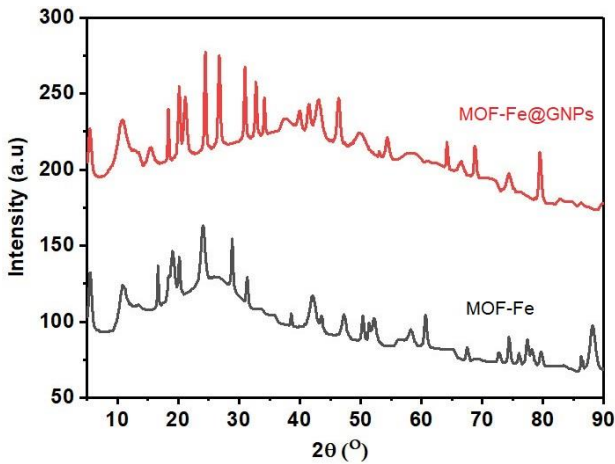
$$H (\%) = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100$$

Trong đó: C₀, C_t là nồng độ của dung dịch MB ban đầu và sau xử lý tương ứng.

Kết quả và thảo luận

Đặc trưng tính chất của vật liệu tổ hợp MOF-Fe/GNPs

<https://doi.org/10.51316/jca.2023.043>



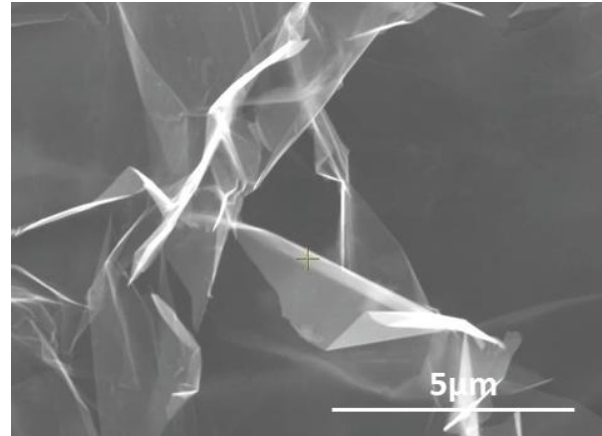
Hình 1: Giản đồ nhiễu xạ tia X của hai mẫu vật liệu MOF-Fe và MOF-Fe/GNPs

Trên hình 1 là giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) của vật liệu MOF-Fe/GNPs sau khi tổ hợp so với giản đồ của vật liệu MOF-Fe quan sát thấy ngoài sự xuất hiện các peak ở $5,423^\circ$ và $11,005^\circ$ đặc trưng cho MOF-Fe [19,20] còn có peak $26,718^\circ$ đặc trưng của GNPs [21]. Điều này minh chứng cho việc hình thành MOF-Fe cùng sự tồn tại của GNPs trong vật liệu tổ hợp. Ngoài ra, sự biến mất của một số peak trong giản đồ XRD của vật liệu MOF-Fe trong tổ hợp cho thấy có thể một số mặt tinh thể đã bị che lấp bởi GNPs khi hình thành vật liệu tổ hợp. Để xác định hình thái học của vật liệu tổ hợp, kỹ thuật chụp ảnh hiển vi điện tử quét được sử dụng và kết quả được trình bày ở hình 3.

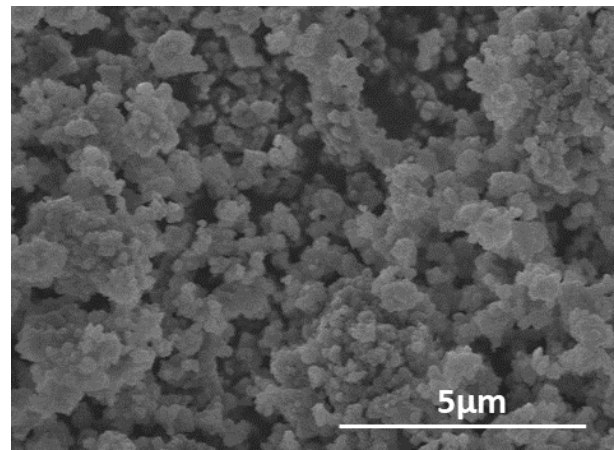
Kết quả chụp SEM được ghi lại trên hình 2 minh chứng cho sự hình thành tinh thể MOF-Fe với hình thái rõ ràng Fe có kích thước từ $200 \div 400$ nm bao bọc hoặc liên kết với các tấm GNPs dạng phiến mỏng một cách đan xen đều đặn (hình 2c). GNPs bị chính sóng siêu âm tác động gãy vụn theo những nếp gấp ở trạng thái màng mỏng nhăn nheo (hình 2a). Hình dạng hạt MOF-Fe vẫn được giữ cấu trúc của vật liệu khung kim loại-hữu cơ với kích thước đồng đều được hình thành và phát triển được tổ hợp với GNPs hình thành nên MOF-Fe/GNPs đan xen đều đặn mà không bị tách rời riêng rẽ. Trên hình ảnh SEM đã khẳng định sự hình thành vật liệu tổ hợp MOF-Fe/GNPs khi sử dụng phương pháp siêu âm thủy nhiệt kết hợp để chế tạo.

Đặc trưng bề mặt của vật liệu tổ hợp được đánh giá thông qua quá trình hấp phụ khí N_2 đẳng nhiệt được ghi lại thông qua giản đồ hấp phụ đẳng nhiệt trên hình 3, trong đó các đại lượng đặc trưng được tính theo phương trình BET. Kết quả thu được tương ứng là diện tích bề mặt $S_{BET} = 441,0$ m^2/g , thể tích lỗ xốp $V_{pore} = 0,267$ cm^3/g và đường kính lỗ xốp $d_{pore} = 2,423$ nm. Những đặc trưng bề mặt này giúp vật liệu tổ hợp có xu

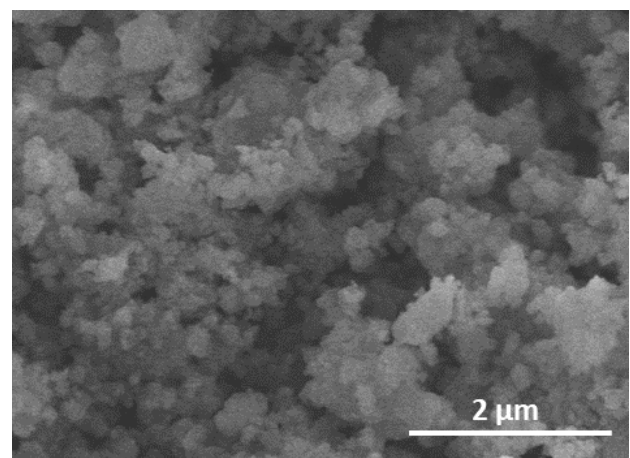
hướng hấp phụ được nhiều vật chất khác nhau trong đó có các hợp chất hữu cơ, các ion tồn tại trong môi trường nước hoặc các hợp chất tồn tại ở trạng thái khí và hơi. Ngoài ra, với khả năng hấp phụ cao, khả năng xúc tác của vật liệu sẽ được phát huy tốt hơn. MOF-Fe được hình thành từ ion Fe^{3+} là thành tố có khả năng thể hiện tính xúc tác quang cho vật liệu sau khi hình thành.



(a)

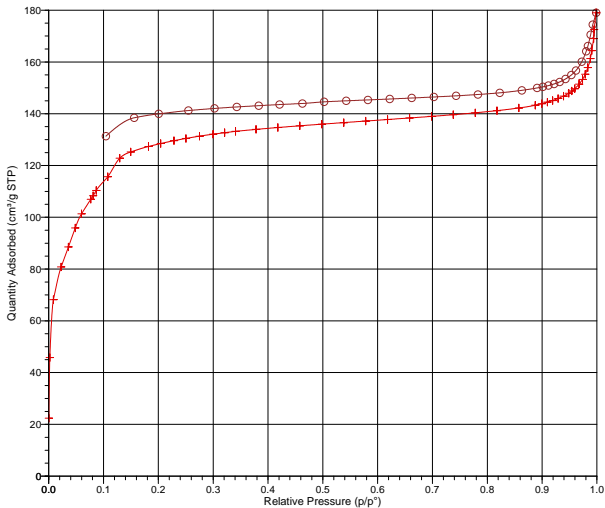


(b)



(c)

Hình 2: Ảnh SEM của GNPs (a), MOF-Fe (b) và MOF-Fe/GNPs (c)



Hình 3: Giản đồ hấp phụ đẳng nhiệt N₂ của vật liệu MOF-Fe/GNPs

Khả năng loại bỏ hợp chất hữu cơ có màu của MOF-Fe/GNPs

Khả năng và cơ chế loại bỏ hợp chất MB của vật liệu MOF-Fe/GNPs được khảo sát và dự đoán thông qua các thí nghiệm hấp phụ riêng lẻ và thí nghiệm hấp phụ-xúc tác quang đồng thời. Điều kiện thí nghiệm được xác định bao gồm: tỷ lệ vật liệu so với lượng dung dịch MB là 1 g/l, nồng độ dung dịch MB ban đầu là 10 mg/l. Kết quả quá trình hấp phụ (tiến hành trong điều kiện không chiếu sáng) được trình bày tại bảng 1 dưới đây:

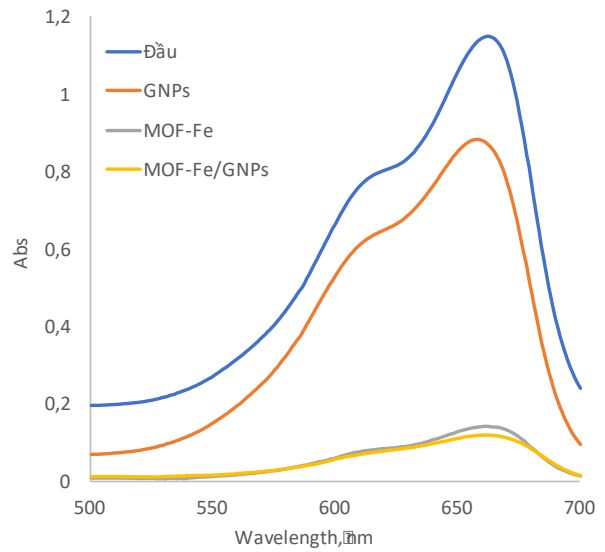
Bảng 1: Hiệu quả loại bỏ MB theo cơ chế hấp phụ của vật liệu tổ hợp MOF-Fe/GNPs

t, phút	Abs	C _t , mg/l	H, %
0	1,148	10,07	0
30	0,587	5,11	49 %
60	0,377	3,26	68 %
90	0,311	2,67	73 %
120	0,264	2,26	78 %
150	0,235	2,01	80 %
180	0,222	1,89	81 %
210	0,209	1,77	82 %
240	0,196	1,66	84 %

Kết quả ở bảng 1 cho thấy rõ vật liệu MOF-Fe/GNPs có hiệu quả loại bỏ MB theo cơ chế hấp phụ do khả năng lôi kéo và lưu giữ mạnh của vật liệu đối với hợp chất hữu cơ mang màu như MB. Sau 30 phút ở điều kiện thí nghiệm đã xác định, hiệu quả loại bỏ MB của vật liệu đã đạt xấp xỉ 50% và đã đạt trên 80% sau 4 giờ.

So sánh khả năng hấp phụ của vật liệu tổ hợp với các vật liệu đơn lẻ, phép thực nghiệm được tiến hành trong cùng điều kiện: nồng độ dung dịch MB: 10 g/l; tỷ lệ vật

liệu sử dụng: 1 g/l; thời gian hấp phụ: 24 giờ. Kết quả được trình bày tại hình 4 và bảng 2 sau đây:



Hình 4: Phổ trắc quang UV-Vis của dung dịch MB sau hấp phụ bởi các vật liệu GNP, MOF-Fe và MOF-Fe/GNPs

Bảng 2: So sánh hiệu quả loại bỏ MB bằng cơ chế hấp phụ của các vật liệu GNP, MOF-Fe và MOF-Fe/GNPs

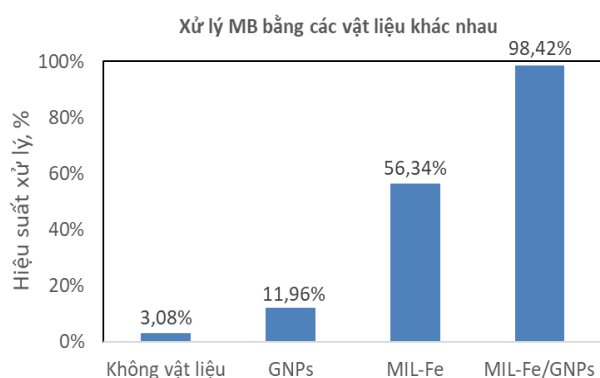
Vật liệu	Đầu	GNPs	MOF-Fe	MOF-Fe/GNPs
Abs	1,148	0,8691	0,1418	0,1213
C, mg/l	10,07	7,61	1,18	1,00
H, %		24 %	88 %	90 %

Tại hình 4 và bảng 2 cho thấy vật liệu MOF-Fe có khả năng hấp phụ MB tốt hơn nhiều so với vật liệu GNPs. Trong khi đó vật liệu MOF-Fe được tổ hợp với vật liệu GNPs có khả năng hấp phụ tốt hơn không nhiều. Các vật liệu đơn và vật liệu sau khi đã tổ hợp bao gồm GNPs, MOF-Fe, MOF-Fe/GNPs có hiệu quả loại bỏ MB trong nước lần lượt là 24%, 88% và 90%. Điều này cho thấy khả năng hấp phụ của vật liệu MOF-Fe/GNPs không được cải thiện nhiều khi tổ hợp MOF-Fe với GNPs. Vật liệu tiếp tục được xem xét khả năng loại bỏ MB theo cơ chế xúc tác quang. Để sát với thực tiễn trong ứng dụng, cần khảo sát khả năng xúc tác quang để xử lý ô nhiễm nguồn phát thải liên tục dưới ánh sáng mặt trời. Hiệu quả loại bỏ MB sử dụng ánh sáng mô phỏng mặt trời theo cơ chế xúc tác quang của vật liệu tổ hợp MOF-Fe/GNPs đã được tiến hành với điều kiện đã xác định và kết quả được ghi nhận tại bảng 3 sau đây:

Bảng 3. Hiệu quả loại bỏ MB theo cơ chế hấp phụ-xúc tác đồng thời của vật liệu tổ hợp MOF-Fe/GNPs.

t, phút	Abs	C _t , mg/l	H, %
0	1,148	10,07	0
30	0,565	4,92	51 %
60	0,291	2,49	75 %
90	0,185	1,56	85 %
120	0,118	0,97	90 %
150	0,078	0,62	94 %
180	0,059	0,45	96 %
210	0,039	0,27	97 %
240	0,026	0,16	98 %

So sánh kết quả của phần hấp phụ loại bỏ MB ra khỏi dung dịch, sau 4 giờ đã loại bỏ được đến 84 % MB ra khỏi dung dịch thì trong kết quả loại bỏ MB trong điều kiện chiếu sáng trực tiếp sau 4 giờ cũng đã loại bỏ được 98 % MB ra khỏi dung dịch. Kết quả thu được cho thấy vật liệu MOF-Fe/GNPs có khả năng loại bỏ MB theo hai cơ chế diễn ra đồng thời là hấp phụ và xúc tác quang trong điều kiện chiếu sáng mô phỏng mặt trời cho hiệu quả đạt trên 50% chỉ sau 30 phút và đạt hiệu suất ~100% sau 4 giờ. Kết quả này cho thấy vật liệu tổ hợp MOF-Fe/GNPs đã thể hiện tính năng hấp phụ và tính năng xúc tác quang dưới ánh sáng mặt trời cùng lúc cho quá trình loại bỏ hợp chất hữu cơ mang màu như MB ra khỏi môi trường nước. Khả năng kết hợp được hai quá trình hấp phụ và xúc tác quang đã làm tăng hiệu quả loại bỏ các chất hữu cơ mang màu trong nước của vật liệu MOF-Fe/GNPs. Kết quả tương tự cũng đã được công bố đối với các hệ vật liệu khung kim loại-hữu cơ có đặc tính hấp phụ - xúc tác quang đồng thời xử lý hợp chất hữu cơ mang màu (Rhodamine B) trong môi trường nước [22].



Hình 5: Hiệu quả xử lý MB dưới điều kiện chiếu sáng của các vật liệu GNPs, MOF-Fe và MOF-Fe/GNPs

Đánh giá so sánh khả năng loại bỏ MB của các vật liệu đơn lẻ và vật liệu tổ hợp dưới điều kiện chiếu sáng, các thí nghiệm được đồng thời tiến hành với 4 mẫu trong đó 1 mẫu không sử dụng vật liệu (chiếu sáng trực tiếp) và 3 mẫu sử dụng các vật liệu lần lượt là GNPs, MOF-Fe và MOF-Fe/GNPs. Tỷ lệ vật liệu sử dụng cho dung dịch

MB cần xử lý cố định 1g/l và nồng độ dung dịch MB ban đầu là 10 mg/l, thời gian chiếu sáng giữ 4 giờ. Kết quả khảo sát được trình bày tại hình 5 dưới đây cho thấy hiệu quả loại bỏ MB trong nước dưới tác động của ánh sáng mặt trời khi có vật liệu cao hơn khi không có sự hỗ trợ của vật liệu. Ngoài ra, khả năng loại bỏ MB của vật liệu MOF-Fe/GNPs cao hơn hẳn so với từng vật liệu tồn tại riêng rẽ khi dung dịch MB được chiếu sáng trực tiếp.

Hiệu quả loại bỏ MB trong nước của các vật liệu GNPs và MOF-Fe lần lượt là 11,96 %, 56,34 % so với vật liệu tổ hợp đạt 98,42 % sau 4 giờ chiếu sáng như nhau. Kết quả cũng cho thấy hợp chất MB trong môi trường nước cũng có khả năng tự phân hủy dưới ánh sáng mặt trời. Điều này cho thấy MB là hợp chất hữu cơ mang màu có thể tự phân hủy trong quá trình xử lý nước thải khi có điều kiện chiếu sáng như ánh nắng mặt trời. Tuy nhiên, khi sử dụng vật liệu hấp phụ hoặc xúc tác (ở nghiên cứu này là xúc tác quang) hoặc kết hợp thì quá trình phân hủy và loại bỏ MB diễn ra nhanh và hiệu quả hơn.

Kết luận

Nghiên cứu đã cho thấy vật liệu MOF-Fe/GNPs được tổ hợp thành công bằng sóng siêu âm và kỹ thuật thủy nhiệt, trong đó các tinh thể MOF-Fe có kích thước nằm trong khoảng từ 200 đến 400 nm đan xen với các tấm nanographene đơn lớp bị bẻ gãy dưới tác động của sóng siêu âm khá đồng đều. MOF-Fe/GNPs có khả năng loại bỏ MB là một trong các hợp chất hữu cơ sử dụng trong công nghệ nhuộm vải theo cả hai cơ chế là hấp phụ và xúc tác quang, đặc biệt khi hai cơ chế này được diễn ra đồng thời. Trong đó, khả năng loại bỏ MB trong môi trường nước với nồng độ ban đầu là 10 mg/l của MOF-Fe/GNPs đạt 84 % theo cơ chế hấp phụ sau 4 giờ và hiệu quả đạt xấp xỉ 100% khi hai quá trình hấp phụ và xúc tác quang được diễn ra cùng lúc. Vật liệu không những thể hiện tính đa chức năng mà khi các chức năng này phối hợp với nhau giúp tăng hiệu quả loại bỏ các chất hữu cơ mang màu của vật liệu này. Điều này mở ra tính ứng dụng khả thi cho vật liệu tổ hợp MOF-Fe/GNPs trong việc xử lý nước thải chứa chất hữu cơ mang màu nói chung và của ngành dệt nhuộm nói riêng.

Lời cảm ơn

Kết quả nghiên cứu này được thực hiện và nhận tài trợ của Phòng Vật liệu Vô cơ, Viện Hoá học học- Vật liệu và Đại học Công nghiệp Việt Trì.

Tài liệu tham khảo

1. N.H. Thuần, N.V. Giang, L.T.V. Anh, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 62(6) (2020) 52-57.
2. N.T. Dũng, Đ.T. Thêm, Đ.T. Oanh, N.T. Phương, *Tạp chí Phân tích Hóa, Lý và Sinh học*, 22(4) (2017) 98-107.
3. L.T.X. Thùy, L.T. Sương, L.H. Thắng, L.T.B. Thảo, K. Oshita, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, 22(11) (2017) 54-59.
4. H.N. Khánh, P.T. Hiếu, N.T.C. Tiên, V.T.T. Thùy, V.T. Hằng, N.N. Huy, *Tạp chí Môi trường*, 3(9) (2021) 83-87.
5. V.N. An, V.T.H. Hoa, L.V. Hiếu, *Tạp chí Khoa học Đại học Đồng Tháp*, 9(3) (2020) 41-51.
6. L.D.P. Nhung, T.T.B. Phương, L.V. Tân, T. Thành, *Tạp chí Tài nguyên và Môi trường*, 1(4) (2021) 18-19.
7. B.X. Hiếu, T.N. Tuấn, L.H. Khoa, N.T.H. Phương, N.T.H. Phương, Đ.T. Dũng, T.X. Tùng, T.V. Chinh, L.Đ. Dương, *Tạp chí Xúc tác và Hấp phụ Việt Nam*, 8(2) (2019) 57-61.
8. T.N. Tuấn, N.T. Thịnh, T.V. Chinh, L.Đ. Dương, N.T.H. Phương, N.T.H. Phương, *Tạp chí Xúc tác và Hấp phụ Việt Nam*, 8(1) (2019) 110-114.
9. S. Norouzbahari, Z.M. Lighvan, A. Ghadimi, B. Sadatnia, *Fuel*, 339 (2023) 127463.
10. G. Lee, Md.A. Hossain, M. Yoon, S.H. Jung, *J Ind. and Eng. Chem.*, 119 (2023) 181-192.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.12.005>
11. E.V. Butyrskaya, *Mat. To Com.*, 33 (2022) 104327.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104327>
12. H.L. Hung, T. Iizuka, X. Deng, Q. Lyu, C.H. Hsu, N. Oe, L.C. Lin, N. Hosono, D.Y. Kang, *Sep. and Pur. Tech.*, 310 (2023) 123115.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123115>
13. J. Parikh, B. Mohan, K. Bhatt, N. Patel, S. Patel, A. Vyas, K. Modi, *Mic. J.*, 184 (2023) 108156.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.108156>
14. W. Niu, K. Kang, Y. Ou, Y. Ding, B. Du, X. Guo, Y. Tan, W. Hu, C. Gao, Y. He, Y. Guo, *Sen. & Act.: B. Chemical*, 381 (2023) 133347.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133347>
15. N.T.H. Phương, L.T. Bac, N.D. Ha and L.D. Duong, *ACS Omega*, 6 (2021) 33419-33427.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03951>
16. L.T. Bac, N.Q. Chau, N.T. Phương, N.D. Ha, L.M. Tri, N.T.H. Phương, L.D. Duong, *ACS Omega*, 7 (2022) 46674-46681.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05614>
17. N.T.H. Phương, L.T.P. Thảo, N.B. Cường, *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự*, 9 (2020) 193-198.
18. N.Đ. Hà, N.Q. Châu, L.T. Bắc, N.T.H. Phương, *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự*, 12 (2022) 230-236.
<https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mstFEE.2022.230-236>
19. L.T. Bac, N.T.H. Phương, L.D. Duong, N.T. Phương, *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự*, 76 (2021) 61-67.
<https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.76.2021.61-67>
20. N.T.H. Phương, N.D. Ha, *Viet J. Sci. Tech.*, 56 (3B) (2018) 219-227.
21. L.D. Duong, N.A. Tuan, N.T. Tung, N.D. Ha, N.T.H. Phương, N.T. Tham, N.D. Anh, D.T. Dung, Eldon R. Rene, Soon Woong Chang, Hien Tran Thi, Dinh Duc Nguyen, *Sustainability*, 11 (2019) 7228.
<https://doi.org/10.3390/su11247228>
22. N.T.H. Phương, N.B. Quan, N.T. Phương, N.B. Cuong, T.V. Chinh, *J. Mil. Sci. Tech.*, 75A (2021) 17-28.
<https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.75A.2021.17-28>