Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption
Tạp chí xúc tác và hấp phụ Việt Nam

http://jca.edu.vn

Tổng hợp vật liệu lai lưỡng kim MIL-53(Al, Fe) và ứng dụng hấp phụ phẩm nhuộm trong dung dịch nước

Synthesis of MIL-53(Al, Fe) bimetallic hybrid material and its application of dye adsorption in aqueous solutions

Phạm Đình Dũ[1,*]

[1] *Trường Đại học Thủ Dầu Một, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam*
** Email: dupd@tdmu.edu.vn*

ARTICLE INFO

Received: 30/05/2026
Accepted: 29/06/2026
Published: 30/06/2026

Keywords:
Adsorption;
Bimetallic hybrid material;
Methylene blue;
MIL-53(Al, Fe);
Rhodamine B.

ABSTRACT

Metal-organic framework (MOF) materials, which contain mixtures of two or more metals and possess unique properties, offer numerous application opportunities. In this paper, the effect of the Al/Fe molar ratio in the synthesized mixture on the formation of the MOF structure of MIL-53(Al, Fe) material was investigated. The material was used as an adsorbent to remove methylene blue (MB) and rhodamine B (RB) from aqueous solutions. The results showed that the metal-organic framework was formed at different Al/Fe molar ratios, including 5/0, 5/1, 1/1, and 1/5, but hardly formed at the 0/5 ratio. At the ratio of 1/5, the obtained material exhibited high adsorption affinity for both MB and RB. The kinetics and isotherms of the adsorption of MB and RB on this sample were analyzed. The high adsorption capacity of MB and RB indicates that MIL-53(Al, Fe) bimetallic hybrid material is an excellent adsorbent for these dyes.

Giới thiệu chung

Phẩm nhuộm được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng khác nhau, như dệt may, giấy, nhựa, và các ngành công nghiệp thuốc nhuộm [1]. Lượng phẩm nhuộm được sản xuất hàng năm trên thế giới ước tính khoảng 7×10^5 tấn và hơn 100.000 phẩm nhuộm thương mại sẵn có đang được sử dụng với những tính chất vật lý và hóa học khác nhau [2]. Nhiều phẩm nhuộm và các sản phẩm phân hủy của nó là độc hại và gây ung thư, do đó sẽ tạo ra một mối nguy hiểm nghiêm trọng đối với các sinh vật thủy sinh [1], vì vậy việc loại bỏ phẩm nhuộm từ nước thải là vấn đề cần thiết. Methylene blue (MB) và Rhodamine B (RB) thường được xem là chất đại diện cho phẩm nhuộm hữu cơ phổ biến làm ô nhiễm nước thải dệt may và làm giảm khả năng thâm nhập ánh sáng, quang hợp và làm hỏng bản chất thẩm mỹ của bề mặt nước, gây độc tính mãn tính đối với con người và động vật [3, 4].

Vật liệu khung hữu cơ-kim loại (Metal-Organic Frameworks, MOFs) được tổng hợp bởi Férey và cộng sự [5], được đặt với tiền tố là "MIL" và theo sau là một số, ở đây "MIL" là viết tắt của Materials of Institute Lavoisier. Trong số các thành viên của MIL, MIL-53(Al) là một trong các MOFs được quan tâm nhất vì hiệu ứng "hít thở" [6], và có độ bền nhiệt cao, có thể đạt đến 500 °C [7]. MIL-53(Al) được khảo sát rộng rãi trong lĩnh vực lưu trữ khí [6] và xử lý

https://doi.org/10.62239/jca.2026.035

©2026 by the authors. Licensee Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

nước [7]. Vật liệu lưỡng kim MIL-53(Fe, Al) cũng được Huang và cộng sự [8] điều chế và khảo sát tính chất hấp phụ của nó đối với glutathione từ dung dịch nước. Kết quả cho thấy dung lượng hấp phụ của MIL-53(Fe, Al) đối với glutathione cao hơn đáng kể so với MIL-53(Fe) hay MIL-53(Al), và chứng minh rằng MIL-53(Fe, Al) với liên kết lưỡng kim loại không phải là hỗn hợp cơ học đơn giản của MIL-53(Fe) và MIL-53(Al). MIL-53(Fe, Cu) cũng được tổng hợp và ứng dụng hấp phụ methyl orange [9]. Các tác giả này cho rằng sự hấp phụ đạt được là do sự kết hợp của Fe^{3+} và Cu^{2+} trong vật liệu với các phân tử methyl orange để tạo thành phức chất. Do đó, việc điều chế MOFs có thành phần chứa hỗn hợp từ hai kim loại trở lên sẽ mở ra nhiều cơ hội ứng dụng của loại vật liệu mới này với các tính chất độc đáo, như diện tích bề mặt cao, kích thước mao quản lớn, hiệu ứng đồng vận của thành phần hữu cơ và kim loại trong khung mạng của vật liệu.

Trong nghiên cứu này, vật liệu lai lưỡng kim MIL-53(Al, Fe) sẽ được tổng hợp ở các thành phần tỉ lệ mol Al/Fe khác nhau trong hỗn hợp tổng hợp ban đầu. MB và RB được xem là các phẩm nhuộm mô hình để khảo sát quá trình hấp phụ. Động học và đẳng nhiệt của quá trình hấp phụ MB và RB trên MIL-53(Al, Fe) cũng sẽ được phân tích.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất và thiết bị

Aluminium chloride ($AlCl_3$, Merck, Germany), iron (III) chloride hexahydrate ($FeCl_3{\cdot}6H_2O$, Merck, Germany), 1,4-benzenedicarboxylic acid (BDC, C_6H_4–1,4–$(CO_2H)_2$, Acros, Belgium), N'N-dimethylformamide (DMF, C_3H_7NO, Fisher, Korea), methylene blue (MB, $C_{16}H_{18}ClN_3S$, Merck, Germany) và rhodamine B (RB, $C_{28}H_{31}O_3N_2Cl$, HiMedia, India) là những hóa chất tinh khiết và được sử dụng mà không cần tinh chế thêm.

Nhiễu xạ tia X (XRD) được ghi trên máy nhiễu xạ bột Bruker D8 Advance (Germany) với bức xạ Cu Kα (λ = 1,5406 Å). Phổ hồng ngoại (FT-IR) được ghi trên máy Jasco FT/IR-4600 (Japan), mẫu được phân tán trên nền KBr. Hàm lượng các nguyên tố có trong mẫu được phân tích bằng phương pháp phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) trên máy JEOL (JED-2300 AnalysisStation). Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) được quan sát bằng máy S-4800 ở điện áp 10 kV.

Tổng hợp chất hấp phụ

Quy trình tổng hợp được tham khảo và điều chỉnh từ các tài liệu [10-12]. Các bước như sau: Hỗn hợp gồm $AlCl_3$ và $FeCl_3{\cdot}6H_2O$ (với tỉ lệ mol xác định), và 0,027 mol BDC (4,565 g) được hòa tan trong 80 mL DMF. Sau đó, đổ toàn bộ dung dịch vào bình Teflon có bọc thép (dung tích 100 mL) và đặt trong tủ sấy ở 120 ºC trong 3 ngày dưới áp suất tự sinh để thực hiện phản ứng nhiệt dung môi. Sau đó, để nguội bình phản ứng, lọc, lấy sản phẩm rắn rửa với methanol, sấy khô, thu được MIL-53(Al, Fe) mới tổng hợp. Nung MIL-53(Al, Fe) mới tổng hợp trong không khí ở 280 °C trong 8 giờ để loại bỏ các dạng BDC không tham gia phản ứng, thu được vật liệu MIL-53(Al, Fe) tinh khiết. Số mol Al/Fe được cho vào hỗn hợp phản ứng lần lượt là 0,055/0, 0,055/0,011, 0,033/0,033, 0,011/0,055 và 0/0,055. Các mẫu được kí hiệu tương ứng là AF(5/0), AF(5/1), AF(3/3), AF(1/5) và AF(0/5).

Thực nghiệm hấp phụ

Một lượng vật liệu xác định, *m* (g), được cho vào *V* (mL) dung dịch RB (hoặc MB) với nồng độ xác định (C_0 nằm trong khoảng 0,05–0,5 mmol/L) và pH xác định (giá trị pH của dung dịch được điều chỉnh bằng HCl 0,1 M hoặc NaOH 0,1 M), tiến hành khuấy từ ở nhiệt độ phòng (27–32 °C). Sau một thời gian nhất định, một lượng xác định dung dịch được lấy ra, lọc để loại bỏ chất hấp phụ, nồng độ phẩm nhuộm còn lại trong dung dịch được xác định bằng phương pháp UV-Vis tại λ_{max} = 554 nm đối với RB, và tại λ_{max} = 664 nm đối với MB.

Hiệu suất hấp phụ, *R*%, được tính theo công thức (1).

$$R\% = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Dung lượng hấp phụ ở thời điểm *t*, q_t (mmol/g), được tính theo công thức (2).

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{m} \quad (2)$$

Dung lượng hấp phụ ở thời điểm cân bằng, q_e (mmol/g), được tính theo công thức (3).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (3)$$

Trong đó: C_0, C_t và C_e (mmol/L) là nồng độ của phẩm nhuộm tương ứng lúc ban đầu, ở thời điểm *t* và lúc cân bằng; *V* (L) và *m* (g) lần lượt là thể tích dung dịch và khối lượng chất hấp phụ dùng cho mỗi lần hấp phụ.

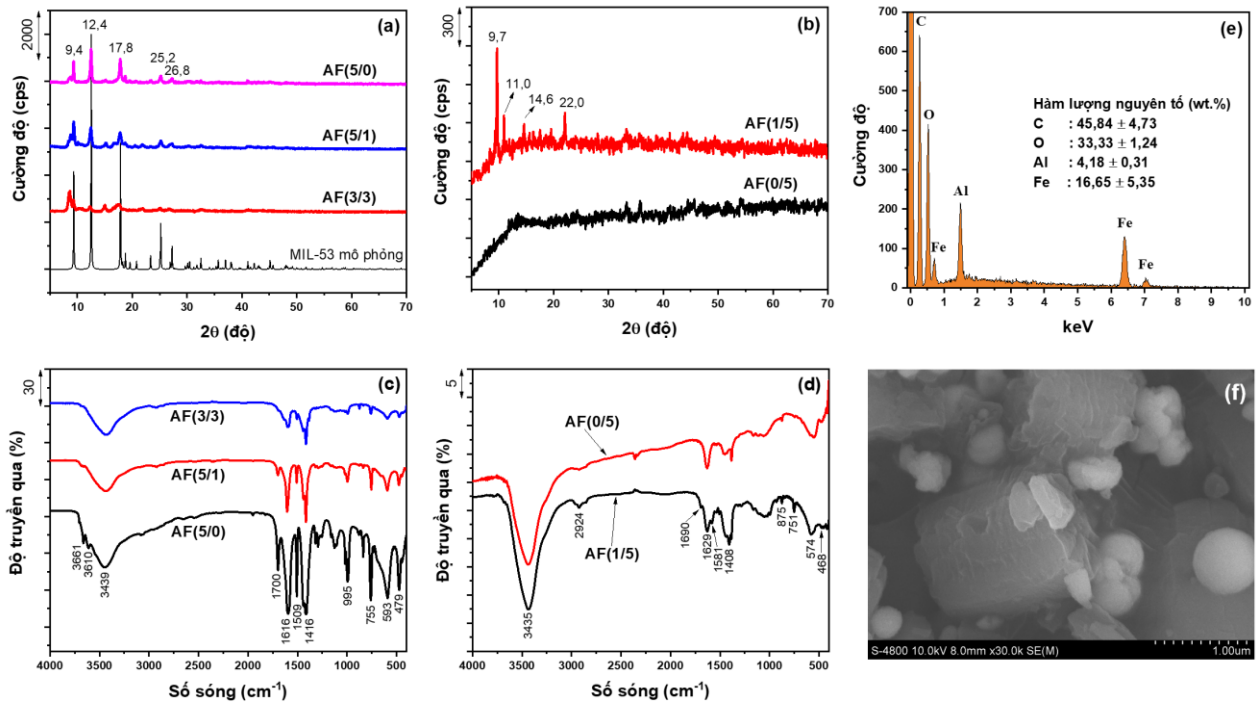
Kết quả và thảo luận

Tính chất đặc trưng và khả năng hấp phụ phẩm nhuộm của vật liệu

Giản đồ XRD của mẫu AF(5/0) cho thấy các đỉnh nhiễu xạ với 2θ ở 9,4, 12,4, 17,8, 25,2 và 26,8º, phù hợp với XRD mô phỏng của MIL-53 từ cơ sở dữ liệu CCDC

https://doi.org/10.62239/jca.2026.035

220477 (Hình 1a). Mặc dù cường độ đỉnh khá thấp so với dữ liệu mô phỏng, nhưng các đỉnh rất giống với mẫu XRD của MIL-53(Al) thương mại (Sigma-Aldrich, Basolite A100) được công bố bởi Rehman và cộng sự [13]. Đối với mẫu AF(5/1) và AF(3/3), XRD cũng cho thấy các đỉnh tương tự như mẫu AF(5/0); Nhưng đỉnh chính ở 2θ ~ 8,7° của mẫu AF(3/3) có cường độ cao hơn, trong khi các đỉnh còn lại có cường độ thấp hơn. Đối với mẫu AF(1/5), giản đồ XRD quan sát thấy các đỉnh ở 9,7, 11,0, 14,6 và 22,0° (Hình 1b). Các nhiễu xạ này chứng tỏ rằng khung kim loại-hữu cơ đã được hình thành. Sự chuyển dịch các đỉnh nhiễu xạ có thể là do việc bổ sung Fe^{3+} vào tiền chất tổng hợp đã tạo ra sự cạnh tranh phối hợp với các ion Al^{3+}, do đó thúc đẩy sự phát triển của một số bề mặt tinh thể, dẫn đến sự thay đổi một phần cấu trúc tinh thể. Tuy nhiên, hầu như không có đỉnh nhiễu xạ nào trên giản đồ XRD của mẫu AF(0/5). Lý do có thể là do tỷ lệ mol Fe(III)/BDC và nhiệt độ tổng hợp trong nghiên cứu này không phù hợp cho sự hình thành cấu trúc MIL-53 [14]. Dữ liệu XRD trong phạm vi 2θ từ 5 đến 70° cũng xác nhận rằng không có sự hình thành pha tinh thể của các dạng kim loại trong các sản phẩm thu được.



Hình 1: Giản đồ XRD: a) Mẫu AF(5/0), AF(5/1) và AF(3/3), b) Mẫu AF(1/5) và AF(0/5); Phổ FT-IR: c) Mẫu AF(5/0), AF(5/1) và AF(3/3), d) Mẫu AF(1/5) và AF(0/5); Phổ EDX (e) và ảnh SEM (f) của mẫu AF(1/5)

Phổ FT-IR của mẫu AF(5/0) (Hình 1c) cho thấy một dải dao động rộng tập trung ở 3439 cm^{-1} chủ yếu do dao động hóa trị của nhóm hydroxyl có trong vật liệu [15]. Dao động của nhóm chức carboxyl của liên kết hữu cơ xảy ra trong khoảng 1700–1400 cm^{-1}. Các đỉnh ở 1616, 1509 và 1416 cm^{-1} tương ứng với các dao động hóa trị bất đối xứng và đối xứng của nhóm $-COO^-$. Các dải dao động này cho thấy liên kết phối hợp của nhóm $-COO^-$ với các trung tâm kim loại Al, điều này làm sáng tỏ cấu trúc của MIL-53(Al) [12], [15], [16]. Đỉnh hấp thụ yếu ở 1700 cm^{-1} được cho là do dao động hóa trị của nhóm C=O của các phân tử BDC tự do gắn bên trong mao quản của cấu trúc ở dạng proton hóa ($–CO_2H$) [12].

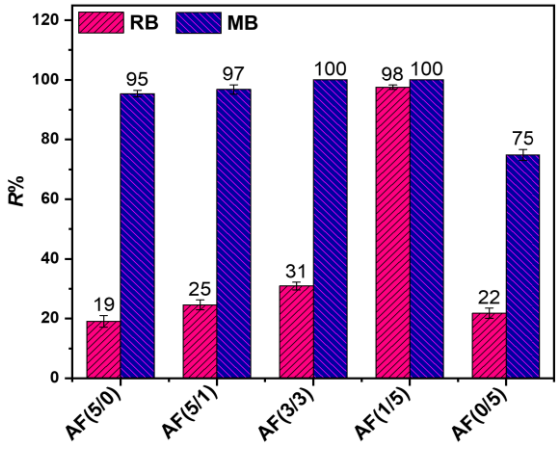
Ngoài ra, các đỉnh hấp thụ trong khoảng 755 đến 995 cm^{-1} thuộc về dao động hóa trị của C–H, chỉ ra sự hiện diện của cấu trúc vòng benzene trong vật liệu. Đỉnh dao động trong vùng sóng thấp 479–593 cm^{-1} là do sự hiện diện của Al–O trong MIL-53(Al) [16]. Có thể thấy rằng các dao động đặc trưng trên phổ FT-IR của mẫu AF(5/1), AF(3/3) và AF(1/5) tương tự như của mẫu AF(5/0) (Hình 1c, d), nhưng cường độ giảm dần, chỉ ra rằng cấu trúc MIL-53 hình thành giảm khi tăng dần hàm lượng sắt trong hỗn hợp phản ứng. Đối với mẫu AF(0/5) (Hình 1d), cường độ các dải hấp thụ trong vùng 1700–1400 cm^{-1} là rất thấp, cho thấy rằng cấu trúc khung MIL-53 chỉ được hình thành kém ở điều kiện tổng hợp này. Kết quả này cũng phù hợp với các giản đồ XRD được trình bày trong Hình 1a, b.

Thành phần nguyên tố của mẫu AF(1/5) đã được phân tích bằng EDX (Hình 1e). Các nguyên tố chính có trong

https://doi.org/10.62239/jca.2026.035

vật liệu là C, O, Al và Fe. Đáng chú ý, tỷ lệ số mol Al/Fe trong vật liệu tổng hợp (xấp xỉ 1/2) lớn hơn nhiều so với tỷ lệ khi được đưa vào hỗn hợp phản ứng (tỷ lệ này trong hỗn hợp phản ứng là 1/5). Điều này chứng minh rằng kim loại nhôm có khả năng tạo thành khung hữu cơ-kim loại cao hơn kim loại sắt trong điều kiện tổng hợp này. Ảnh SEM cho thấy vật liệu AF(1/5) bao gồm các khối hình trụ tròn có kích thước khoảng 1 µm xuất hiện xen kẽ với các hạt nhỏ hình cầu (Hình 1f).

Hiệu suất hấp phụ RB và MB trên các mẫu vật liệu được trình bày ở Hình 2. Nhìn chung, các mẫu đều có ái lực hấp phụ MB cao hơn so với RB. Hình 2 cũng cho thấy sự tăng hàm lượng Fe trong vật liệu lai MIL-53(Al, Fe) cũng thúc đẩy khả năng hấp phụ RB. Nguyên nhân có thể là do khả năng tạo phức cao của Fe^{3+}đối với RB [9]. Đối với mẫu AF(0/5), hiệu suất đạt được là thấp nhất, nguyên nhân được cho là do ảnh hưởng của cấu trúc vật liệu. Trong đó, hiệu hấp phụ của cả RB và MB trên mẫu AF(1/5) là cao nhất và gần bằng nhau. Điều này chỉ ra rằng vật liệu MIL-53(Al, Fe) được tổng hợp với tỉ lệ mol Al/Fe = 1/5 trong điều kiện này là thích hợp để tạo ra vật liệu có ái lực hấp phụ cao cho cả RB và MB. Do đó, mẫu AF(1/5) được lựa chọn để thực hiện cho các thí nghiệm tiếp theo.



Hình 2: Hiệu suất hấp phụ RB và MB của các mẫu vật liệu (Điều kiện thực nghiệm: m = 0,05 g; V = 50 mL; C_0 (RB) = 0,05 mmol/L; C_0 (MB) = 0,05 mmol/L; pH = 7; t = 120 phút; nhiệt độ môi trường; Mỗi thí nghiệm được lặp lại ba lần)

Động học hấp phụ

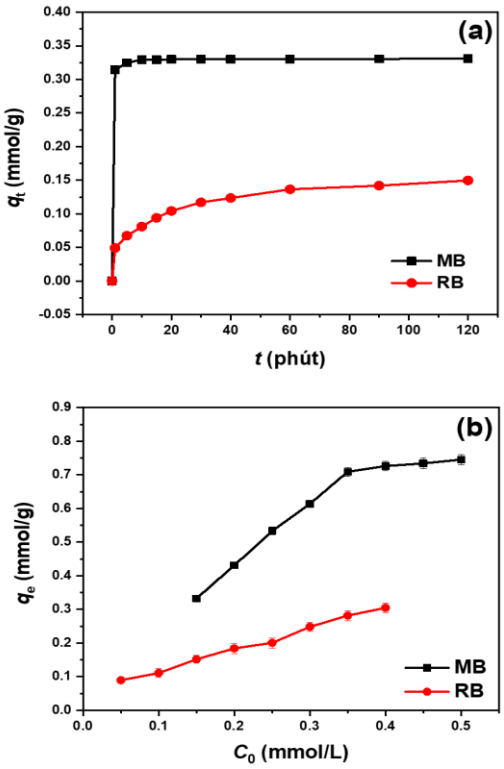
Hình 3a biểu diễn dung lượng hấp phụ của AF(1/5) đối với MB và RB theo thời gian hấp phụ. Có thể thấy rằng quá trình hấp phụ MB xảy ra rất nhanh và đạt trạng thái cân bằng ngay sau khi tiếp xúc. Đối với RB, dung lượng hấp phụ tăng nhanh trong khoảng 20 phút đầu, sau đó, tăng chậm đến 60 phút, và giữ gần như không đổi đến 120 phút tiếp xúc. Như vậy, thời gian cần thiết để quá trình hấp phụ đạt đến trạng thái cân bằng là khoảng 60 phút đối với RB.

Hai mô hình động học hấp phụ thường được sử dụng để đánh giá dữ liệu thực nghiệm là mô hình động học biểu kiến bậc nhất và động học biểu kiến bậc hai (phương trình 4 và 5) [17].

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_1 - k_1 \times t \quad (4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \times q_2^2} + \frac{1}{q_2} \times t \quad (5)$$

Trong đó: k_1 (phút^{-1}) và k_2 (g·mmol^{-1}·phút^{-1}) tương ứng là hằng số tốc độ của mô hình động học hấp phụ biểu kiến bậc nhất và bậc hai, q_1 và q_2 (mmol/g) là dung lượng hấp phụ cực đại tương ứng với mỗi mô hình.



Hình 3: a) Ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc (Điều kiện thực nghiệm: m = 0,03 g; V = 100 mL; C_0 (MB) = 0,1 mmol/L; C_0 (RB) = 0,05 mmol/L; pH = 7; nhiệt độ môi trường); b) Ảnh hưởng của nồng độ ban đầu (Điều kiện thực nghiệm: m = 0,02 g; V = 50 mL; pH = 7; t = 120 phút; nhiệt độ môi trường; Mỗi thí nghiệm được lặp lại ba lần)

Các kết quả trình bày trong Bảng 1 cho thấy rằng quá trình hấp phụ MB và RB trên AF(1/5) tuân theo phương trình biểu kiến bậc hai, vì giá trị hệ số xác định (R^2) xấp xỉ bằng đơn vị và giá trị q_2 gần giống với dung lượng hấp phụ cân bằng thực nghiệm, q_e. Ngoài ra, dựa vào giá trị k_2, có thể thấy rằng tốc độ của quá trình hấp phụ MB xảy ra nhanh hơn đáng kể so với RB. Điều này hoàn toàn phù hợp với kết quả quan sát được ở Hình 3a.

https://doi.org/10.62239/jca.2026.035

Bảng 1: Thông số động học của quá trình hấp phụ MB và RB trên mẫu AF(1/5)

Phẩm nhuộm	q_e (mmol/g)	Động học biểu kiến bậc nhất			Động học biểu kiến bậc hai		
		k_1 (phút^{-1})	q_1 (mmol/g)	R^2	k_2 (g/mmol·phút)	q_2 (mmol/g)	R^2
MB	0,3312	0,0251	0,0042	0,5184	32,9917	0,3311	1,0000
RB	0,1496	0,0292	0,0885	0,9797	0,7778	0,1564	0,9954

Đẳng nhiệt hấp phụ

Hình 3b cho thấy dung lượng hấp phụ cân bằng MB tăng mạnh trong khoảng nồng độ ban đầu từ 0,15 đến 0,35 mmol/L, sau đó đạt bão hòa và chỉ tăng nhẹ trong khoảng nồng độ ban đầu 0,35–0,5 mmol/L. Đối RB, dung lượng hấp phụ cân bằng tăng đều khi nồng độ ban đầu tăng dần từ 0,05 đến 0,4 mmol/L.

Trong phần này, mô hình đẳng nhiệt Freundlich và Langmuir được sử dụng để phân tích dữ liệu thực nghiệm đẳng nhiệt hấp phụ MB và RB trên mẫu AF(1/5). Hai mô hình đẳng nhiệt được mô tả theo phương trình (6) và (7) [17].

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \times \ln C_e \quad (6)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} \times C_e + \frac{1}{K_L \times q_m} \quad (7)$$

Trong đó: q_e (mmol/g) là dung lượng hấp phụ cân bằng, C_e (mmol/L) là nồng độ của chất bị hấp phụ tại thời điểm cân bằng, q_m (mmol/g) là dung lượng hấp phụ cực đại đơn lớp, K_L (L/mmol) là hằng số hấp phụ Langmuir, K_F và n là các hằng số hấp phụ Freundlich.

Quá trình hấp phụ có các thông số đặc trưng thuận lợi, cụ thể là thông số cân bằng không thứ nguyên, R_L đối với phương trình đẳng nhiệt Langmuir và n đối với phương trình đẳng nhiệt Freundlich. $R_L = 1/(1 + K_L C_0)$, trong đó K_L là hằng số Langmuir và C_0 là nồng độ ban đầu của chất bị hấp phụ trong dung dịch. Giá trị của R_L cho biết loại đường đẳng nhiệt là không thuận nghịch ($R_L = 0$), thuận lợi ($0 < R_L < 1$), tuyến tính ($R_L = 1$) hoặc không thuận lợi ($R_L > 1$); Độ lớn của số mũ n cho biết mức độ thuận lợi của quá trình hấp phụ. Người ta thường cho rằng các giá trị n trong khoảng 2–10 thể hiện đặc tính hấp phụ tốt, 1–2 thể hiện mức độ khó trung bình và nhỏ hơn 1 thể hiện đặc tính hấp phụ kém [18]. Bảng 2 liệt kê kết quả xác định các thông số đẳng nhiệt. Các giá trị R_L được xác định nằm trong khoảng 0,04–0,12 đối với MB và 0,23–0,71 đối với RB; giá trị n tương ứng là 3,1437 và 2,3414 (Bảng 2), cho thấy quá trình hấp phụ xảy ra thuận lợi. Giá trị R^2 cao cũng chỉ ra rằng cả hai mô hình đẳng nhiệt đều thích hợp để mô tả các quá trình hấp phụ. Tuy nhiên, mô hình Langmuir thích hợp hơn để mô tả cho quá trình hấp phụ MB, ngược lại, quá trình hấp phụ RB thích hợp hơn với mô hình Freundlich. Điều đó chỉ ra rằng quá trình hấp phụ MB ưu tiên xảy ra theo kiểu đơn lớp, trong khi, kiểu đa lớp lại ưu tiên cho quá trình hấp phụ RB.

Bảng 2: Các thông số đẳng nhiệt của quá trình hấp phụ MB và RB trên mẫu AF(1/5)

Mô hình	Thông số	Phẩm nhuộm	
		MB	RB
Langmuir	K_L	47,6056	8,3084
	q_m	0,8369	0,3991
	R^2	0,9947	0,8421
	R_L	0,04–0,12	0,23–0,71
Freundlich	K_F	1,4103	0,4678
	n	3,1437	2,3414
	R^2	0,8517	0,9131

Bảng 3: So sánh dung lượng hấp phụ của các chất hấp phụ khác nhau đối với MB và RB

Chất hấp phụ	Dung lượng hấp phụ (mg/g)		TLTK
	MB	RB	
MIL-53(Al, Fe)	267,7	191,2	Nghiên cứu này
Biocarbon	85	48	[4]
Cu-BTC	39,674	–	[19]
Modified biochar	50,27	–	[22]
Chitosan/activated carbon@curcumin	158,37	–	[23]
RM-MIL-53(Fe)	167,8	–	[17]
UiO-67	–	50,5	[20]
UiO-66	–	30,69	[20]
MIL-101(Fe)	–	186,6	[20]
MIL-101(Cr)	–	42,07	[20]
MIL-101-NDC	–	98,3	[21]

https://doi.org/10.62239/jca.2026.035

Dung lượng hấp phụ cực đại đơn lớp của MB và RB trên AF(1/5), được xác định từ đường đẳng nhiệt Langmuir, lần lượt là 0,8369 và 0,3991 mmol/g (tương đương với 267,7 và 191,2 mg/g). Bảng 3 so sánh dung lượng hấp phụ của vật liệu MIL-53(Al, Fe) với các chất hấp phụ khác đối với MB và RB. Rõ ràng là vật liệu MOF nói chung và MIL-53(Al, Fe) có khả năng hấp phụ tuyệt vời đối với cả MB và RB. Đáng chú ý là vật liệu lai lưỡng kim loại MIL-53(Al, Fe) có khả năng hấp phụ cao hơn đáng kể so với một số vật liệu MOF đơn kim loại, như Cu-BTC [19], RM-MIL-53(Fe) [17], MIL-101(Fe) và MIL-101(Cr) [20], MIL-101-NDC [21].

Kết luận

Trong nghiên cứu này, vật liệu lai lưỡng kim MIL-53(Al, Fe) đã được tổng hợp thành công và ứng dụng để hấp phụ phẩm nhuộm MB và RB trong dung dịch nước. Các nghiên cứu đặc trưng vật liệu cho thấy cấu trúc khung kim loại-hữu cơ vẫn được hình thành ở tỉ lệ mol Al/Fe = 1/5 trong hỗn hợp tổng hợp ban đầu. Ở tỉ lệ này, vật liệu MIL-53(Al, Fe) thu được có ái lực hấp phụ tốt đối với cả MB và RB. Quá trình hấp phụ MB và RB trên MIL-53(Al, Fe) tuân theo mô hình động học hấp phụ biểu kiến bậc hai; và cả hai mô hình đẳng nhiệt hấp phụ, gồm Langmuir và Freundlich, đều mô tả tốt các quá trình hấp phụ. Dung lượng hấp phụ cực đại đơn lớp của vật liệu đối với MB và RB cao, giá trị tương ứng là 0,8369 và 0,3991 mmol/g. Do đó, vật liệu này có thể được xem là một chất hấp phụ tiềm năng trong xử lý môi trường nước bị ô nhiễm bởi phẩm nhuộm.

Tài liệu tham khảo

1. D. Dai, H. Liang, D. He, H. Potgieter, M. Li, J. Solgel Sci. Technol., 97(2) (2021) 329-339. https://doi.org/10.1007/s10971-020-05452-3
2. S.J. Allen, G. Mckay, J.F. Porter, J. Colloid Interface Sci., 280(2) (2004) 322-333. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.078
3. T.R.B. Barros, T.S.B. Barbosa, T.L.A. Barbosa, M.G.F. Rodrigues, Catal. Res., 3(1) (2023) 1-20. https://doi.org/10.21926/cr.2301010
4. R. Wolski, A. Bazan-Wozniak, A. Nosal-Wiercińska, R. Pietrzak, Molecules, 29(17) (2024) 4022. https://doi.org/10.3390/molecules29174022
5. G. Férey, Chem. Soc. Rev., 37(1) (2008) 191-214. https://doi.org/10.1039/B618320B
6. T.K. Trung, P. Trens, N. Tanchoux, S. Bourrelly, P.L. Llewellyn, S. Loera-Serna, C. Serre, T. Loiseau, F. Fajula, G. Férey, J. Am. Chem. Soc., 130(50) (2008) 16926-16932. https://doi.org/10.1021/ja8039579
7. D.V. Patil, P.B.S. Rallapalli, G.P. Dangi, R.J. Tayade, R.S. Somani, H.C. Bajaj, Ind. Eng. Chem. Res., 50(18) (2011) 10516-10524. https://doi.org/10.1021/ie200429f
8. D. Huang, Y. Liu, Y. Liu, D. Di, H. Wang, W. Yang, New J. Chem., 43(19) (2019) 7243-7250. https://doi.org/10.1039/C9NJ00433E
9. X. Yang, C. Wang, B. Zhou, S. Cheng, J. Anal. Methods Chem., (2023) 1-13. https://doi.org/10.1155/2023/9985984
10. J.J. Du, Y.P. Yuan, J.X. Sun, F.M. Peng, X. Jiang, L.G. Qiu, A.J. Xie, Y.H. Shen, J.F. Zhu, J. Hazard. Mater., 190(1-3) (2011) 945-951. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.029
11. E. Rahmani, M. Rahmani, Ind. Eng. Chem. Res., 57(1) (2018) 169-178. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b04206
12. T. Loiseau, C. Serre, C. Huguenard, G. Fink, F. Taulelle, M. Henry, T. Bataille, G. Férey, Chem. - Eur. J., 10(6) (2004) 1373-1382. https://doi.org/10.1002/chem.200305413
13. T.U. Rehman, S. Agnello, F.M. Gelardi, M.M. Calvino, G. Buscarino, M. Cannas, J. Phys.: Condens. Matter, 36(31) (2024) 315401. https://doi.org/10.1088/1361-648X/ad43a4
14. P.D. Du, H.T. Danh, P.N. Hoai, N.M. Thanh, V.T. Nguyen, D.Q. Khieu, J. Chem., (2020) 1-13. https://doi.org/10.1155/2020/1474357
15. M. Majumder, R.B. Choudhary, A.K. Thakur, A. Khodayari, M. Amiri, R. Boukherroub, S. Szunerits, Electrochim. Acta, 353 (2020) 136609. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136609
16. J.F. Liu, J.C. Mu, R.X. Qin, S.F. Ji, Pet. Sci., 16(4) (2019) 901-911. https://doi.org/10.1007/s12182-019-0334-6
17. S. Wu, X. Wang, Y. Ma, L. Ma, ACS Omega, 11(10) (2026) 16128-16140. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c11138
18. O. Hamdaoui, E. Naffrechoux, J. Hazard. Mater., 147(1-2) (2007) 381-394. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.021
19. Y. Li, C. Gao, J. Jiao, J. Cui, Z. Li, Q. Song, ACS Omega, 6(49) (2021) 33961-33968. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05299
20. S. Jiang, L. Xu, Y. Lyu, J. Zhang, F. Wu, X. Zhang, W. Xiong, B. He, H. Yi, Sep. Purif. Technol., 363 (2025) 132056. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132056
21. K.M.V. Nguyen, A.V.N. Phan, N.T. Dang, T.Q. Tran, H.K. Duong, H.N. Nguyen, M.V. Nguyen, Mater. Adv., 4(12) (2023) 2636-2647. https://doi.org/10.1039/D3MA00123G
22. J. Wang, Y. Tan, H. Yang, L. Zhan, G. Sun, L. Luo, Sci. Rep., 13(1) (2023) 21174. https://doi.org/10.1038/s41598-023-48373-1
23. A.A. Kouzoutzoglou-Efremidou, A.K. Tolkou, K.N. Maroulas, R.I. Kosheleva, I.A. Katsoyiannis, G.Z. Kyzas, Langmuir, 41(5) (2025) 3603-3622. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c04769