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

https://jca.edu.vn

Nghiên cứu tổng hợp vật liệu khung hữu cơ lưỡng kim loại MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) và khả năng hấp phụ loại bỏ chất màu Rhodamine B trong môi trường nước.

Synthesis of MIL-100(0.5Fe/0.5Ni) bimetallic organic framework material and its adsorption capacity for removing Rhodamine B dye in aqueous environment.

Đặng Thị Minh Huệ[1,*], Bùi Doãn Anh[1], Nguyễn Hoàng Linh[1], Nguyễn Phú Hưng[1], Đào Thị Hồng Ngát[1], Nguyễn Khánh Linh[1], Hoàng Hữu Nghĩa[1], Nguyễn Thị Tuyết Mai[1], Huỳnh Đăng Chính[1]

[1] *Khoa Hóa học, Trường Hoá và Khoa học Sự sống, Đại học Bách Khoa Hà Nội, số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội, Việt Nam*
** Email: hue.dangthiminh@hust.edu.vn*

ARTICLE INFO

Received: 11/06/2026
Accepted: 30/06/2026
Published: 30/06/2026

Keywords:
MIL-100(0.5Fe/0.5Ni);
bimetallic MOFs;
Rhodamine B;
Adsorption; kinetics.

ABSTRACT

A bimetallic metal–organic framework, MIL-100(0.5Fe/0.5Ni), was successfully synthesized and applied for the adsorption of Rhodamine B (RhB) from aqueous solution. The obtained material was characterized by XRD, FTIR, and SEM analyses. The results confirmed the successful formation of the MIL-100 framework with a porous structure and abundant active sites. The adsorption behavior of RhB was investigated through isotherm and kinetic studies. The adsorption equilibrium was well described by the Langmuir model (R^2 = 0.9942) with a maximum adsorption capacity of 21.91 mg g^{-1}, indicating monolayer adsorption on homogeneous active sites. The adsorption kinetics followed the pseudo-second-order model (R^2 = 0.9815), suggesting that chemisorption was the dominant mechanism. The results demonstrate that MIL-100(0.5Fe/0.5Ni) is a promising adsorbent for dye-contaminated wastewater treatment.

Giới thiệu chung

Trong những năm gần đây, sự phát triển mạnh mẽ của các ngành công nghiệp dệt nhuộm, in ấn, mỹ phẩm, giấy, da giày và dược phẩm đã làm gia tăng đáng kể lượng nước thải chứa chất màu hữu cơ ra môi trường. Nước thải chứa chất màu được xem là một trong những nguồn gây ô nhiễm nghiêm trọng đối với môi trường nước do các hợp chất màu thường có cấu trúc bền vững, khó phân hủy sinh học và có khả năng tồn lưu trong môi trường trong thời gian dài [1,2]. Do đó, nghiên cứu các giải pháp xử lý hiệu quả nước thải chứa chất màu là yêu cầu cần thiết nhằm giảm thiểu ô nhiễm môi trường và bảo vệ nguồn tài nguyên nước.

Rhodamine B (RhB) là chất màu được sử dụng phổ biến trong công nghiệp dệt nhuộm, sản xuất giấy, mực in, nhựa, mỹ phẩm và một số lĩnh vực công nghệ sinh học nhờ khả năng tạo màu mạnh và độ bền tương đối cao [3]. Tuy nhiên, sự hiện diện của RhB trong môi trường nước có thể gây ảnh hưởng bất lợi đến hệ sinh thái và sức khỏe con người. Một số nghiên cứu cho thấy RhB có khả năng gây độc đối với tế bào và sinh vật thủy sinh, đồng thời khó bị phân hủy tự nhiên do cấu trúc vòng thơm bền vững [3,4]. Vì vậy, việc nghiên cứu loại bỏ RhB khỏi nước thải trước khi thải ra môi trường có ý nghĩa khoa học và thực tiễn quan trọng.

Trong số các vật liệu khung hữu cơ – kim loại (Metal–Organic Frameworks, MOFs), MIL-100(Fe) là một trong

©2025 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/).

https://doi.org/10.62239/jca.2026.034

những vật liệu được quan tâm nhờ diện tích bề mặt riêng lớn, cấu trúc mao quản phát triển và độ ổn định tương đối tốt trong môi trường nước [5]. Vật liệu được hình thành từ các cụm Fe_3O liên kết với ligand trimesic acid (H_3BTC), tạo nên hệ mao quản ba chiều với nhiều tâm hoạt tính tiềm năng. Nhờ những đặc điểm này, MIL-100(Fe) đã được nghiên cứu trong các lĩnh vực hấp phụ và xử lý các chất ô nhiễm hữu cơ trong nước [6]. Bên cạnh đó, việc đưa thêm kim loại thứ hai vào cấu trúc MOFs để tạo thành vật liệu MOFs lưỡng kim được xem là một hướng nghiên cứu triển vọng nhằm tăng cường số lượng tâm hoạt tính và cải thiện hiệu quả xử lý chất ô nhiễm [7].

Ion Ni^{2+} có bán kính ion gần với Fe^{3+} và đã được sử dụng trong nhiều hệ MOFs lưỡng kim nhằm tạo hiệu ứng hiệp đồng giữa các tâm kim loại, góp phần gia tăng số lượng vị trí hoạt tính và cải thiện khả năng tương tác với chất ô nhiễm trong nước. Trong nghiên cứu này, vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt và đánh giá khả năng hấp phụ Rhodamine B trong môi trường nước. Các đặc trưng cấu trúc của vật liệu được khảo sát bằng các phương pháp XRD, FT-IR và SEM, đồng thời quá trình hấp phụ RhB được nghiên cứu thông qua các mô hình động học và đẳng nhiệt hấp phụ.

Thực nghiệm

Hóa chất và thiết bị

Benzene-1,3,5-tricarboxylic acid (TMA) (Sigma Aldrich), Iron (II) sulphate heptahydrate ($FeSO_4{\cdot}7H_2O$) (Sigma Aldrich), Nickel(II) nitrate hexahydrate $Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ (Sigma Aldrich), Sodium hydroxide NaOH (Xilong), Ethanol C_2H_5OH (Xilong), nước cất hai lần.

Máy đo nhiễu xạ tia X Siemens D5005 (Cu-K_α radiation, λ = 1,54056 Å), kinh hiển vi điện tử quét Hitachi S4800, máy đo phổ hấp thụ phân tử 8453 UV-VIS Agilent.

Tổng hợp vật liệu

Hòa tan 1,9 gam TMA trong dung dịch NaOH 1,0 M. Thêm từ từ dung dịch TMA/NaOH vào dung dịch chứa hỗn hợp 3,8 gam $FeSO_4.7H_2O$ và 3,98 gam $Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$. Khuấy hỗn hợp trong 24 giờ. Dung dịch chuyển dần sang màu cam và sau đó là màu nâu sẫm. Thu kết tủa, rửa bằng nước và ethanol, sau đó sấy ở nhiệt độ 160°C thu được bột MIL-100(0,5Fe/0,5Ni).

Khảo sát khả năng hấp phụ chất màu Rhodamine B của MIL-100(0.5Fe/0.5Ni).

Vật liệu MIL-100 (0,5Fe/0,5Ni) với khối lượng thích hợp được cho vào 50ml dung dịch RhB nồng độ 10ppm, pH của dung dịch được điều chỉnh bằng dung dịch HCl 0,1M, NaOH 0,1M . Khuấy hỗn hợp trong buồng phản ứng tối. Sau các khoảng thời gian cần khảo sát, nồng độ RhB còn lại được xác định bằng phương pháp phổ hấp thụ phân tử UV- VIS tại bước sóng λ=554 nm. Hiệu suất xử lý RhB được tính theo công thức:

$$H(\%) = (C_0 - C_t)/C_o \times 100\%$$

Trong đó, C_o, C_t là nồng độ của dung dịch RhB ban đầu và nồng độ tại thời điểm xác định.

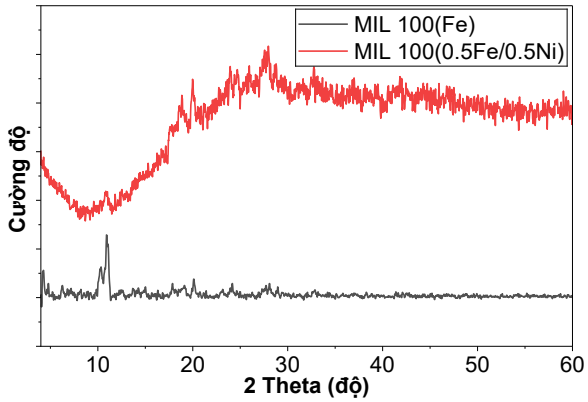
Xác định đẳng nhiệt hấp phụ chất màu Rhodamine B của MIL-100(0.5Fe/0.5Ni).

Lấy 0,015g vật liệu MIL-100 (0,5Fe/0,5Ni) được cho vào 50ml dung dịch RhB với nồng độ lần lượt là 2, 4, 6, 8, 10 ppm. Khuấy hỗn hợp trong buồng phản ứng tối. Sau 60 phút, nồng độ RhB còn lại được xác định bằng phương pháp phổ hấp thụ phân tử UV-VIS tại bước sóng l=554 nm.

Kết quả và thảo luận

Đặc trưng vật liệu

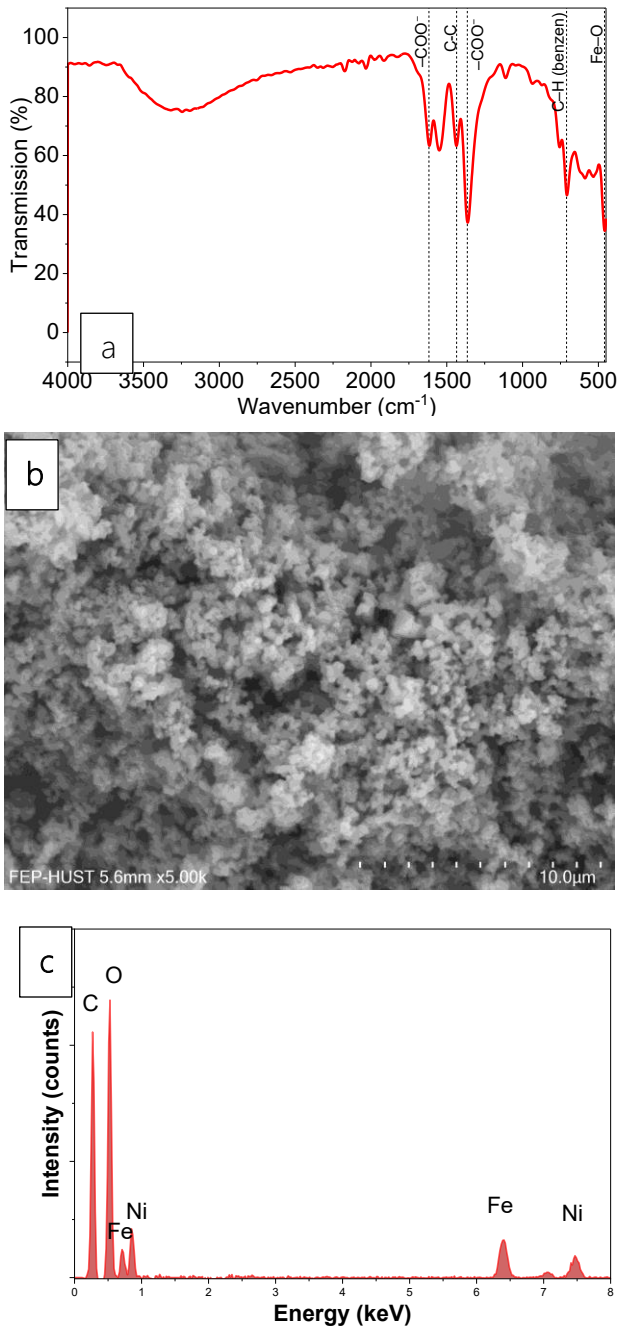
Giản đồ nhiễu xạ tia X của vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) được trình bày trên hình 1. Kết quả cho thấy sự xuất hiện của các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng trong vùng góc thấp 2θ~10-30° phản ánh sự hình thành cấu trúc tinh thể của vật liệu MOFs. So sánh với kết quả nhiễu xạ tia X của MIL-100(Fe) cho thấy vật liệu bimetallic MIL-100 (0,5Fe/0,5Ni) có các đỉnh nhiễu xạ tương đồng với vị trí nhiễu xạ của MIL-100(Fe).



Hình 1 : Giản đồ nhiễu xạ tia X của vật liệu MIL 100 (0,5Fe/0,5Ni)

Giản đồ nhiễu xạ tia X của MIL 100 (0,5Fe/0,5Ni) cho thấy cường độ đỉnh nhiễu xạ không quá sắc nhọn mà có xu hướng mở rộng, chứng tỏ kích thước tinh thể tương đối nhỏ, đồng thời có thể xuất hiện mức độ khuyết tật cấu trúc nhất định sau khi đưa Ni vào khung MIL-100(Fe). Điều này khá phổ biến đối với các hệ bimetallic MOFs do sự thay thế một phần ion Fe bằng Ni có thể gây biến dạng mạng tinh thể và làm giảm độ trật tự dài hạn của cấu trúc [5, 8].

https://doi.org/10.62239/jca.2026.034



Hình 2: Phổ hồng ngoại FT-IR (a), Ảnh SEM (b) , phổ EDS (c) của vật liệu MIL-100 (0,5Fe/0,5Ni).

So với MIL-100(Fe) đơn kim loại, việc bổ sung Ni vào cấu trúc có thể dẫn đến sự dịch chuyển nhẹ vị trí các đỉnh nhiễu xạ, thay đổi cường độ đỉnh, giảm độ kết tinh tương đối. Ngoài ra, không quan sát thấy rõ các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng mạnh của các pha oxide riêng biệt như NiO hoặc Fe_2O_3. Mặt khác, kết quả EDS chứng minh sự có mặt đầy đủ của các nguyên tố Fe, Ni, C và O trong vật liệu tổng hợp được (Hình 2c). Các kết quả trên cho thấy vật liệu bimetallic MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) đã được hình thành.

Phổ hấp thụ hồng ngoại FT-IR của vật liệu được trình bày trong hình 2a. Dải hấp thụ rộng xuất hiện trong khoảng 3200-3600 cm^{-1} được gán cho dao động kéo của nhóm -OH của nước hấp phụ, hoặc nhóm hydroxyl liên kết với cụm kim loại trong cấu trúc MIL-100 (0,5Fe/0,5Ni). Các đỉnh hấp thụ mạnh trong vùng 1600-1700 cm^{-1} và 1350-1450 cm^{-1} được gán cho dao động bất đối xứng và dao động đối xứng của nhóm carboxylate $-COO^-$ trong ligand trimesic acid [9]. Các đỉnh xuất hiện trong vùng 1400-1600 cm^{-1} và 700-900 cm^{-1} liên quan đến dao động khung vòng benzene, và dao động uốn của liên kết C–H vòng thơm. Điều này cho thấy ligand hữu cơ vẫn hiện diện trong cấu trúc vật liệu sau quá trình tổng hợp. Các dao động trong phổ FT-IR của vật liệu MIL-100 (0,5Fe/0,5Ni) khi so sánh với phổ FT-IR của vật liệu gốc MIL-100(Fe) cho kết quả khá tương đồng [10].

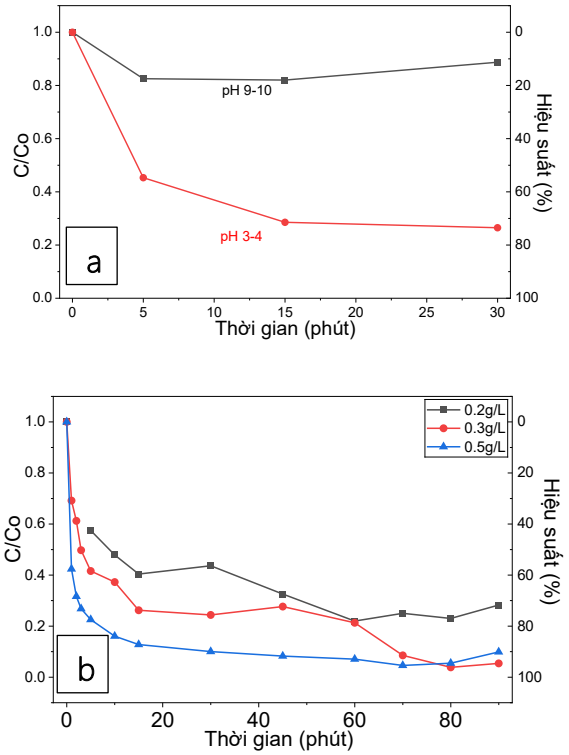
Ảnh SEM của vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) được trình bày trong hình 2b. Ảnh SEM cho thấy vật liệu gồm các hạt kích thước nhỏ kết tụ tạo thành các cụm hạt với bề mặt tương đối gồ ghề và xốp, đây là đặc điểm thường gặp của các vật liệu MOFs có cấu trúc mao quản phát triển [11]. Cấu trúc này có thể tạo điều kiện thuận lợi cho sự khuếch tán và hấp phụ RhB.

Ảnh hưởng của pH và khối lượng vật liệu đến hiệu suất hấp phụ RhB

Ảnh hưởng của pH đến hiệu suất hấp phụ đã được khảo sát và được trình bày trong hình 3a. Kết quả cho thấy pH dung dịch ảnh hưởng đáng kể đến khả năng hấp phụ Rhodamine B của vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni). Tại pH 3–4, giá trị C/C_0 giảm nhanh từ 1,00 xuống khoảng 0,45 sau 5 phút và tiếp tục giảm còn khoảng 0,26 sau 30 phút, chứng tỏ quá trình hấp phụ diễn ra hiệu quả. Ngược lại, tại pH 9–10, giá trị C/C_0 chỉ giảm nhẹ và duy trì ở mức cao trong toàn bộ thời gian khảo sát. Sự khác biệt về hiệu suất hấp phụ có thể liên quan đến ảnh hưởng của pH đối với trạng thái tồn tại của Rhodamine B trong dung dịch cũng như các tương tác giữa chất hấp phụ và chất bị hấp phụ [12]. Kết quả thu được cho thấy môi trường axit có pH 3–4 là điều kiện thuận lợi cho quá trình hấp phụ Rhodamine B bằng vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni).

Hình 3b và bảng 1 trình bày ảnh hưởng của khối lượng vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) đến quá trình hấp phụ Rhodamine B. Kết quả cho thấy hiệu suất loại bỏ RhB tăng khi tăng lượng vật liệu hấp phụ từ 0,2 đến 0,5 g/L. Đối với cả ba khối lượng khảo sát, giá trị C/C_0 giảm nhanh trong những phút đầu tiên và sau đó thay đổi chậm hơn trước khi đạt trạng thái cân bằng. Điều này cho thấy quá trình hấp phụ diễn ra nhanh ở giai đoạn đầu nhờ sự hiện diện của nhiều tâm hấp phụ chưa bị chiếm giữ trên bề mặt vật liệu.

https://doi.org/10.62239/jca.2026.034



Hình 3: Ảnh hưởng của pH (a) và ảnh hưởng của lượng vật liệu MIL-100 (0,5Fe/0,5Ni) đến hiệu suất hấp phụ RhB (b)

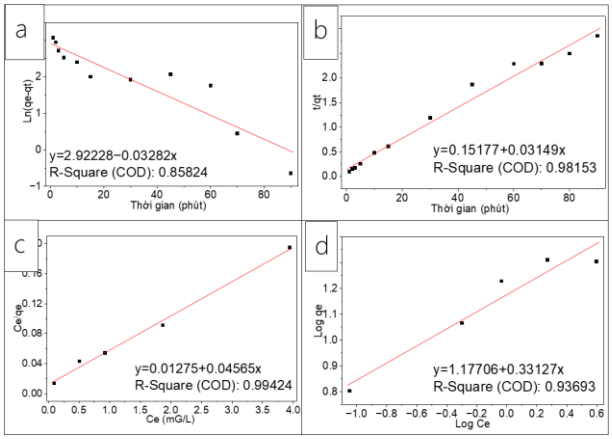
Bảng 1: Hiệu suất hấp phụ RhB của vật liệu MIL 100(0,5Fe/0,5Ni) với lượng vật liệu lần lượt là 0,2; 0,3; 0,5 g/L; pH 3-4.

Thời gian (phút)	Hiệu suất (%)		
	0,2(g/L)	0,3(g/L)	0,5(g/L)
5	42,53	58,40	77,47
10	52,14	62,77	83,95
15	59,61	73,80	87,24
30	56,36	75,62	90,00
45	68,46	72,36	91,77
60	78,04	78,70	92,96
70	74,99	91,48	95,42
80	77,00	96,18	94,55
90	71,75	94,60	90,15

Sự gia tăng hiệu suất hấp phụ khi tăng khối lượng vật liệu có thể được giải thích bởi sự gia tăng số lượng tâm hoạt tính và diện tích bề mặt tiếp xúc giữa vật liệu và dung dịch. Mặt khác, kết quả cũng cho thấy, mẫu sử dụng khối lượng vật liệu 0,5 g/L cho hiệu suất loại bỏ RhB cao nhất, tuy nhiên, mức độ cải thiện so với mẫu 0,3 g/L không đáng kể. Điều này cho thấy tại nồng độ RhB khảo sát, lượng vật liệu 0,3 g/L đã cung cấp đủ số lượng tâm hấp phụ để loại bỏ phần lớn chất màu trong dung dịch. Việc tiếp tục tăng lượng vật liệu lên 0,5 g/L chỉ làm tăng số tâm hấp phụ dư thừa nhưng không mang lại sự gia tăng tương ứng về hiệu suất xử lý. Vì vậy, xét đồng thời hiệu quả xử lý và khả năng tiết kiệm vật liệu, khối lượng 0,3 g/L được lựa chọn là điều kiện tối ưu cho các thí nghiệm tiếp theo.

Nghiên cứu động học và mô hình đẳng nhiệt quá trình hấp phụ RhB của vật liệu.

Kết quả mô phỏng động học hấp phụ Rhodamine B trên vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) cho thấy mô hình giả bậc hai có hệ số tương quan cao nhất (R^2 = 0,98153), cao hơn đáng kể so với mô hình giả bậc một (R^2 = 0,85824). Điều này chứng tỏ mô hình giả bậc hai mô tả tốt hơn dữ liệu thực nghiệm của quá trình hấp phụ RhB (hình 4a,b, bảng 2).



Hình 4: Mô hình động học giả kiến bậc 1 (a), Mô hình động học giả kiến bậc 2 (b), Mô hình đẳng nhiệt Langmuir (c), Mô hình đẳng nhiệt Freundlich (d). của vật liệu MIL-100 (0,5Fe/0,5Ni)

Kết quả mô hình hấp phụ đẳng nhiệt RhB của vật liệu được trình bày trong hình 4c,d và bảng 2. Kết quả cho thấy quá trình hấp phụ Rhodamine B trên vật liệu MIL-100-(0,5Fe/0,5Ni) có độ phù hợp rất cao với mô hình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir [13], thể hiện qua hệ số tương quan R^2=0,99424.

Phương trình tuyến tính Langmuir thu được:

$$C_e/q_e = 0{,}01275 + 0{,}04565C_e$$

Từ phương trình trên, các thông số hấp phụ Langmuir được xác định như dung lượng hấp phụ cực đại q_{max}= 21,91mg/g, hằng số Langmuir K_L=3,58 L/mg. Dung lượng hấp phụ cực đại q_{max}= 21,91 mg/g cho thấy vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) có khả năng hấp phụ RhB khá tốt. So sánh với một số công trình đã công bố về xử lý RhB, vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) trong nghiên cứu này cho giá trị q_{max} lớn hơn [14, 15]. Dung lượng hấp phụ thực nghiệm với khối lượng vật liệu là 0,3 g/L tại thời điểm cân bằng t= 80 phút là $q_{(e,exp)}$ = 32,06 mg/g, giá trị này xấp xỉ $q_{(e,cal)}$ được tính của động học giả kiến bậc

https://doi.org/10.62239/jca.2026.034

2 với giá trị χ^2 = 0,0029. Hằng số Langmuir K_L=3,58 L/mg có giá trị tương đối cao, chứng tỏ ái lực hấp phụ giữa vật liệu và Rhodamine B mạnh. Điều này cho thấy RhB có xu hướng dễ dàng gắn lên bề mặt MIL-100(0,5Fe/0,5Ni), góp phần nâng cao hiệu suất xử lý trong môi trường nước.

Bảng 2: Thông số của các mô hình động học và đẳng nhiệt

Mô hình	R^2	Thông số
Mô hình động học giả kiến bậc 1	0,85824	k_1=0,03282 phút^{-1} $q_{e,cal}$=18,5832 mg/g
Mô hình động học giả kiến bậc 2	0,98153	k_2=0,00653 g/(mg.phút) $q_{e,cal}$=31,7557 mg/g h=6,5887 mg/g.phút
Mô hình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir	0,99424	q_{max}=21,91 mg/g K_L=3,58 L/mg
Mô hình hấp phụ đẳng nhiệt Freundlich	0,93693	K_F=15,03 n=3,02

Kết quả xử lý số liệu theo mô hình đẳng nhiệt Freundlich [16] cho giá trị R^2=0,93693 cho thấy mô hình Freundlich cũng có khả năng mô tả tương đối tốt quá trình hấp phụ Rhodamine B trên vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni). Tuy nhiên, khi so sánh với mô hình Langmuir, mức độ phù hợp của Freundlich thấp hơn đáng kể. Điều này cho thấy quá trình hấp phụ RhB trên MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) có xu hướng xảy ra trên các vị trí hấp phụ tương đối đồng nhất và hình thành lớp hấp phụ đơn phân tử trên bề mặt vật liệu.

Kết luận

Vật liệu khung hữu cơ kim loại lưỡng kim loại MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt. Đặc trưng vật liệu đã được khảo sát qua giản đồ nhiễu xạ tia X, phổ hấp thụ hồng ngoại khả kiến FT-IR, ảnh hiển vi điện tử quét SEM, quang phổ tán xạ năng lượng EDS.

Vật liệu MIL-100(0,5Fe/0,5Ni) đã được ứng dụng để hấp phụ chất màu Rhodamine B trong môi trường nước Nghiên cứu đẳng nhiệt hấp phụ cho thấy dữ liệu thực nghiệm phù hợp tốt với mô hình Langmuir (R^2 = 0,9942), với dung lượng hấp phụ cực đại đạt 21,91 mg/g. Kết quả động học hấp phụ tuân theo mô hình giả bậc hai (R^2 = 0,9815). Những kết quả thu được cho thấy MIL-100 (0,5Fe/0,5Ni) là vật liệu hấp phụ tiềm năng trong xử lý nước thải chứa chất màu hữu cơ, góp phần mở rộng hướng nghiên cứu và ứng dụng các vật liệu MOFs lưỡng kim trong lĩnh vực xử lý môi trường.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách Khoa Hà Nội trong đề tài mã số T2024-PC-073.

Tài liệu tham khảo

1. E. Forgacs, T. Cserháti, G. Oros, Environ. Int., 30 (2004) 953-971. https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.001
2. M.T. Yagub, T.K. Sen, S. Afroze, H.M. Ang, Adv. Colloid Interface Sci., 209 (2014) 172-184. https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002
3. A. Mittal, D. Kaur, A. Malviya, J. Mittal, V.K. Gupta, J. Colloid Interface Sci., 337(2) (2009) 345-354. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.05.016
4. S. Wang, Z.H. Zhu, Dyes Pigments, 75(2) (2007) 306-314. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.06.005
5. G. Férey, C. Mellot-Draznieks, C. Serre, F. Millange, J. Dutour, S. Surblé, I. Margiolaki, Science, 309(5743) (2005) 2040-2042. https://doi.org/10.1126/science.1116275
6. A. Dhakshinamoorthy, A.M. Asiri, H. García, Chem. Soc. Rev., 45(22) (2016) 6144-6172. https://doi.org/10.1039/C6CS00230J
7. T. Jia, Y. Gu, F. Li, J. Environ. Chem. Eng., 10(5) (2022) 108300. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108300
8. K. Wang, X.-L. Lv, D. Feng, J. Li, S. Chen, J. Sun, L. Song, Y. Xie, J.-R. Li, H.-C. Zhou, J. Am. Chem. Soc., 138(3) (2016) 914-919. https://doi.org/10.1021/jacs.5b10881
9. P. Horcajada, S. Surblé, C. Serre, D.-Y. Hong, Y.-K. Seo, J.-S. Chang, J.-M. Grenèche, I. Margiolaki, G. Férey, Chem. Commun., 27 (2007) 2820-2822. https://doi.org/10.1039/B704325B
10. M.H.T. Dang, L.P. Bui, C.D. Huynh, ACS Omega, 11(9) (2026) 15164-15176. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c12227
11. H. Furukawa, K.E. Cordova, M. O'Keeffe, O.M. Yaghi, Science, 341(6149) (2013) 1230444. https://doi.org/10.1126/science.1230444
12. K. Kuśmierek, J. Fronczyk, A. Świątkowski, Water Air Soil Pollut., 234(8) (2023) 531. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06511-5
13. K.Y. Foo, B.H. Hameed, Chem. Eng. J., 156(1) (2010) 2-10. https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013
14. S.N. Handayani, Irmanto, T.S. Widianti, AIP Conf. Proc., 2553(1) (2022) 020049. https://doi.org/10.1063/5.0103723
15. A.A. Oyekanmi, A. Ahmad, K. Hossain, M. Rafatullah, PLoS One, 14(5) (2019) e0216878. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216878
16. H.N. Tran, S.-J. You, A. Hosseini-Bandegharaei, H.P. Chao, Water Res., 120 (2017) 88-116. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014