



## Nghiên cứu khả năng quang xúc tác phân hủy Rhodamine B của vật liệu Zeolitic imidazolate frameworks-8 (ZIF-8)

### The photocatalytic degradation of Rhodamine B using Zeolitic imidazolate frameworks-8 (ZIF-8) material

Trần Nguyên Tiến<sup>a,b\*</sup>, Nguyễn Thị Thu<sup>c</sup>, Nguyễn Hạ Vi<sup>b</sup>  
Tran Nguyen Tien<sup>a,b\*</sup>, Nguyen Thi Thu<sup>c</sup>, Nguyen Ha Vi<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Trung tâm Hóa học Tiên tiến, Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ cao, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>a</sup>Center for Advanced Chemistry, Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

<sup>b</sup>Khoa Môi trường và Khoa học tự nhiên, Trường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>b</sup>Faculty of Environmental and Natural Sciences, School of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

Khoa Dược, <sup>c</sup>Khối Y Dược, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>c</sup>Faculty of Pharmacy, Medicine & Pharmacy Division, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

(Ngày nhận bài: 08/05/2025, ngày phản biện xong: 29/05/2025, ngày chấp nhận đăng: 28/06/2025)

#### Tóm tắt

Vật liệu khung hữu cơ-kim loại (MOFs), một nhóm vật liệu tinh thể lỗ xốp mới, đã được chú ý đến như một ứng viên đầy tiềm năng trong công nghệ xanh và xử lý môi trường. ZIF-8, một loại MOFs có cấu trúc linh hoạt được cấu tạo từ ion  $Zn^{2+}$  và cầu nối imidazolate, đã được chọn làm chất xúc tác quang trong nghiên cứu này để phân hủy Rhodamine (RhB) dưới tác dụng của tia UV. Các tinh thể nano hình thoi mười hai mặt thu được thể hiện khả năng xử lý RhB cao với 92% RhB bị phân hủy sau 30 phút chiếu tia UV, cao gần gấp ba lần so với  $TiO_2$  thương mại. Bên cạnh đó, các thí nghiệm vòng lặp quang xúc tác đã cho thấy độ ổn định và khả năng tái sinh tuyệt vời của vật liệu xúc tác quang với năm vòng lặp được thực hiện. Nghiên cứu này có thể cung cấp một phương pháp tiềm năng cho quá trình phân hủy RhB trong công nghệ xử lý nước thải dệt nhuộm làm sạch môi trường.

**Từ khóa:** Vật liệu khung cơ kim; ZIF-8; Rhodamine B; quang xúc tác.

#### Abstract

Metal-organic frameworks (MOFs), a new group of porous crystalline materials, have drawn more and more attention as a promising candidate for environmental remediation. ZIF-8, a well-known flexible MOFs material constructed by  $Zn^{2+}$  ion and imidazolate ligands, was used as a photocatalyst in this work to degrade Rhodamine (RhB) in aqueous solutions under UV irradiation. The resulting rhombic dodecahedron nanocrystals exhibited high removal efficiency of 92% for RhB under 30 min light irradiation, which was three times higher than that of  $TiO_2$ . Besides, the photostability and reusability of the photocatalyst were investigated by performing five consecutive cycles for degradation of RhB under the optimized condition. The present study may provide an effective approach for RhB degradation in textile industry effluent treatment techniques.

**Keywords:** Metal organic frameworks; ZIF-8; Rhodamine B; photocatalyst..

\*Tác giả liên hệ: Trần Nguyên Tiến

Email: trannguyentien@duytan.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Thuốc nhuộm hữu cơ không phân hủy sinh học rất phổ biến trong nhiều ngành công nghiệp như dệt may, nhựa, giấy, thực phẩm và y học. Trong số này, riêng ngành công nghiệp dệt may tiêu thụ gần 60% thuốc nhuộm để sản xuất sắc tố trong vật liệu vải [1]. Trong đó, khoảng 15% thuốc nhuộm bị thất thoát và thải ra môi trường. Chất thải nhuộm từ các ngành công nghiệp này là nguồn ô nhiễm môi trường nghiêm trọng [2]. Nó gây ra thiệt hại đến hệ sinh thái ở trong nước [3] và các nguy cơ gây đột biến và ung thư đối với con người [4]. Để loại bỏ các rủi ro liên quan đến sự hiện diện của thuốc nhuộm hữu cơ, nhiều phương pháp khác nhau đã được phát triển bao gồm hấp phụ, quang xúc tác, quá trình oxy hóa tiên tiến, trao đổi ion và phân hủy vi sinh... [5, 6]. Trong số đó, phương pháp quang xúc tác là một trong những kỹ thuật thân thiện với môi trường và hiệu quả nhất để loại bỏ thuốc nhuộm hữu cơ khỏi nước với nhiều ưu điểm như chi phí thấp, hiệu quả cao và dễ vận hành [7]. Hầu hết các phương pháp thông thường như hấp phụ hay sinh học để loại bỏ phẩm màu trong nước đều có những hạn chế như gây ra các chất ô nhiễm thứ cấp vì thuốc nhuộm chỉ bị biến đổi từ pha lỏng thành pha rắn, hoặc chúng đắt tiền đối với phương pháp màng lọc [8]. Trong khi đó, phương pháp quang xúc tác sử dụng chất xúc tác hấp thụ ánh sáng tiếp xúc trực tiếp để phân hủy các chất màu, mà không tạo ra các chất ô nhiễm thứ cấp [9, 10]. Hơn nữa, các chất màu có hại sẽ được chuyển hóa thành các hợp chất thân thiện như carbon dioxide và nước [10].

Metal organic frameworks (MOFs) là một loại vật liệu lỗ xốp được phát triển trong những năm gần đây [11]. Họ vật liệu này bao gồm khung hữu cơ kim loại đẳng hướng (IRMOFs), vật liệu khung kênh dạng túi (PCFs), vật liệu viện Lavoisier (MILs), và vật liệu khung zeolite (ZIFs) [12]. Các loại MOFs này có sự đa dạng về cấu trúc, bao gồm các vị trí kim loại vô cơ có

thể đóng vai trò là trung tâm xúc tác và/hoặc quang xúc tác cũng như liên kết với các phối tử hữu cơ có thể dễ dàng điều chỉnh và chức năng hóa. Dựa trên các đặc điểm này, MOFs cho thấy hứa hẹn trong các ứng dụng khác nhau như hấp phụ khí, phân tách, lưu trữ, xúc tác không đồng nhất, quang xúc tác và cảm biến hóa học [12,13]. Trong số các MOFs này, Zeolite Imidazolate dựa trên ion kẽm là ZIF-8 thể hiện sự ổn định hóa học và nhiệt cao, tổng hợp dễ dàng, diện tích bề mặt riêng và độ xốp lớn, là một vật liệu tiềm năng cho các quá trình quang xúc tác [14].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phương pháp thủy nhiệt đơn giản để tổng hợp các hạt tinh thể ZIF-8 và sử dụng để quang xúc tác phân hủy RhB, một mẫu thuốc nhuộm gây ô nhiễm phổ biến có nhiều trong nước thải của các ngành công nghiệp dệt nhuộm, dưới tác dụng của các tia bức xạ UV. Khả năng phân hủy RhB cũng như sự ổn định quang hóa của các hạt quang xúc tác ZIF-8 sẽ được quan sát và đánh giá kỹ lưỡng bởi nhiều phương pháp khác nhau.

## 2. Thục nghiệm

### 2.1. Hóa chất

Zinc (II) nitrate hexahydrate ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , Aldrich,  $\geq 97\%$ ); 2-Methylimidazole ( $\text{C}_4\text{H}_6\text{N}_2$ , Aldrich, 98%);  $\text{TiO}_2$  (Daejung); rhodamine B (RhB) ( $\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$ , Sinopharm), N,N-dimethylformamide (DMF) và ethanol (EtOH) được mua từ hóa chất Sinopharm, nước cất được sản xuất từ máy MAX Ultra 370 (Young Lin, Korea).

### 2.2. Tổng hợp ZIF-8

ZIF-8 được tổng hợp theo phương pháp thủy nhiệt [15]. 1,18g  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  và 1,3g 2-Methylimidazole được hòa tan lần lượt trong 30 ml nước cất, khuấy trộn trong 5 phút để thu được các dung dịch trong suốt. Sau đó, hai dung dịch này được hòa tan vào nhau và cho vào trong teflon autoclave, phản ứng ở  $80^\circ\text{C}$  trong 6h. Các tinh thể màu trắng sau khi tạo thành sẽ được gạn

và rửa 3 lần với  $H_2O$  và EtOH. Cuối cùng, sản phẩm thu được sẽ sấy ở nhiệt độ  $80^\circ C$  qua đêm.

### 2.3. Xác định đặc trưng vật liệu

Phương pháp hiển vi điện tử quét (SEM) được sử dụng để khảo sát các đặc trưng hình thái học của các hạt tinh thể ZIF-8 trên máy Leo-Supra 55, Germany. Diện tích bề mặt riêng của các hạt tinh thể quang xúc tác được đo bằng phương pháp đẳng nhiệt hấp phụ và khử hấp phụ  $N_2$  (BET) trên máy Micromeritics BELSORP-mini II. Thành phần pha tinh thể của quang xúc tác được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) trên máy Rigaku MAC-18XHF (Nhật Bản). Khả năng hấp thụ ánh sáng của xúc tác được đặc trưng bằng phổ hấp thụ UV-Vis (Optizen POP, Korea).

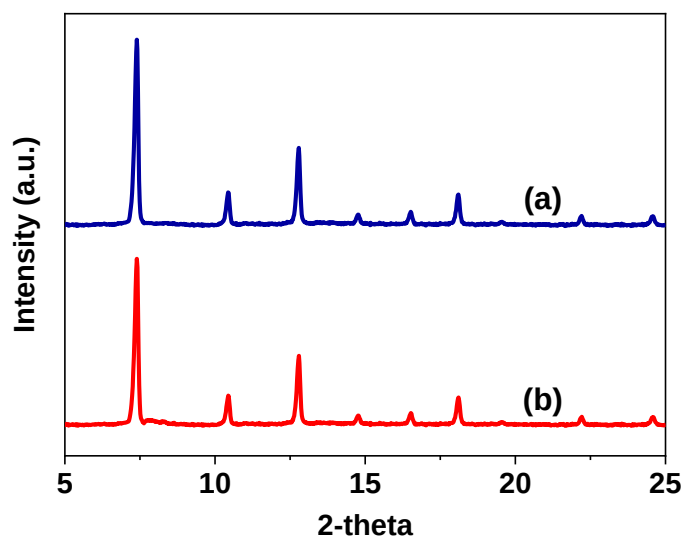
### 2.4. Thực nghiệm phân hủy MO

Các thí nghiệm quang xúc tác phân hủy RhB của các hạt tinh thể ZIF-8 được thực hiện dưới chiếu xạ của đèn 500 W Hg ở điều kiện thường và nhiệt độ phòng. 25 mg chất xúc tác quang ZIF-8 được cho vào 50 mL dung dịch RhB ( $10 \text{ mg L}^{-1}$ ) trong bình 100 mL. Khoảng cách giữa nguồn sáng và cốc chứa hỗn hợp phản ứng được cố định là 5 cm. Trước khi thực hiện chiếu xạ, hỗn hợp được khuấy từ trong bóng tối 30 phút

để đảm bảo thiết lập cân bằng hấp phụ-giải hấp phụ của vật liệu. Trong quá trình phản ứng phân hủy quang học xảy ra, tốc độ khuấy được duy trì để giữ cho hỗn hợp ở trạng thái huyền phù. Trong khoảng thời gian thích hợp, hỗn hợp được đều đặn chiết xuất và sử dụng máy ly tâm để tách các hạt quang xúc tác và tiến hành phân tích. Sự phân hủy của RhB được đo bằng máy quang phổ UV-Vis (Optizen POP, Korea) và theo dõi sự giảm phổ hấp thụ ( $\lambda_{\text{max}} = 554 \text{ nm}$ ) theo thời gian chiếu xạ. Để so sánh, hiệu suất quang xúc tác của  $TiO_2$  thương mại (P25, Deajung) cũng được nghiên cứu ở cùng điều kiện.

### 3. Kết quả và thảo luận

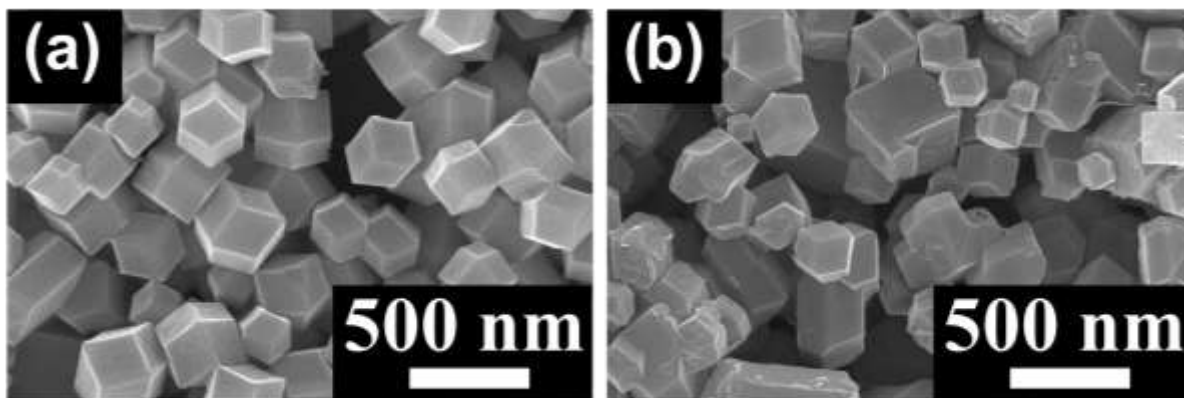
Hình 1 thể hiện phổ XRD của các hạt tinh thể quang xúc tác ZIF-8 trước và sau khi thực hiện phân hủy RhB. Kết quả cho thấy thành phần và cấu trúc pha tinh thể của vật liệu rất phù hợp với các kết quả trước đây [16]. Các đỉnh nhiễu xạ đều sắc nét, rõ ràng, cho thấy vật liệu sau khi tổng hợp có độ tinh khiết và độ kết tinh cao. Các đỉnh đặc trưng của vật liệu ZIF-8 nằm tại  $2\theta = 7,3; 10,7; 12,8; 16,8; \text{ và } 18,0^\circ$ . Bên cạnh đó, phổ XRD sau khi thực hiện phân hủy RhB không có nhiều thay đổi cho thấy độ ổn định cao của vật liệu trong các điều kiện thí nghiệm.



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) của ZIF-8 trước (a) và sau (b) khi thực hiện quang phân hủy RhB.

Hình ảnh SEM của vật liệu được trình bày trong Hình 2. Các hạt tinh thể ZIF-8 là các khối hình thoi 12 mặt với các mặt, cạnh và góc sắc nét, rõ ràng (Hình 2a). Vật liệu có sự phân tán tốt với kích thước trung bình từ 200-400 nm. Hình 2b thể hiện hành thái cấu trúc của ZIF-8

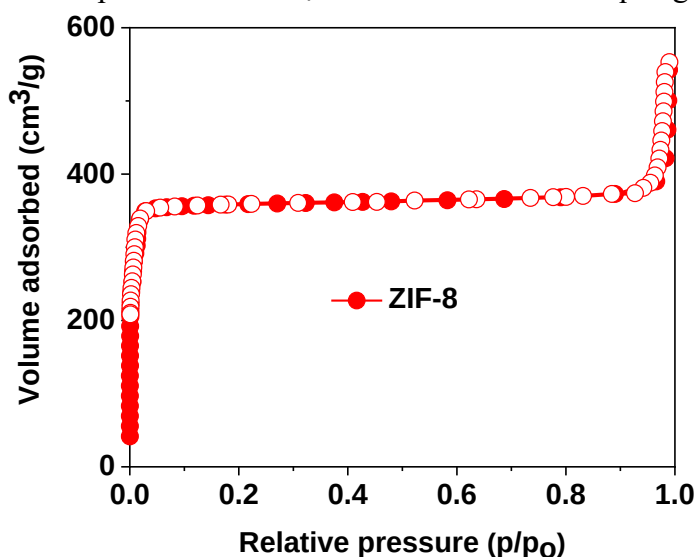
sau khi thực hiện phân hủy RhB, có thể thấy các hạt vật liệu không có sự thay đổi đáng kể ngoại trừ xuất hiện một vài tạp chất trên bề mặt, vẫn phân tán tốt và không chất đông. Điều này khẳng định thêm cho độ bền và ổn định cao của vật liệu như đã nêu ở kết quả XRD.



Hình 2. Hình ảnh SEM của ZIF-8 trước (a) và sau (b) khi thực hiện quang phân hủy RhB.

Hình 3 là các đường đẳng nhiệt hấp phụ-giải hấp phụ  $N_2$  ở 77 K của ZIF-8. Có thể thấy, đường cong hấp phụ của ZIF-8 thuộc loại I tiêu chuẩn đặc trưng cho các vật liệu vi mao quản. Diện tích bề mặt Langmuir, Brunauer–Emmett – Teller (BET) và tổng thể tích lỗ xốp của ZIF-8 được

tính lần lượt là  $1036 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ , và  $0,822 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ . Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng vật liệu với diện tích bề mặt riêng càng lớn sẽ có càng nhiều hơn các tâm hoạt động tham gia vào quá trình phản ứng, do đó cải thiện hiệu quả tốc độ phân hủy chất ô nhiễm của quang xúc tác [10, 14].



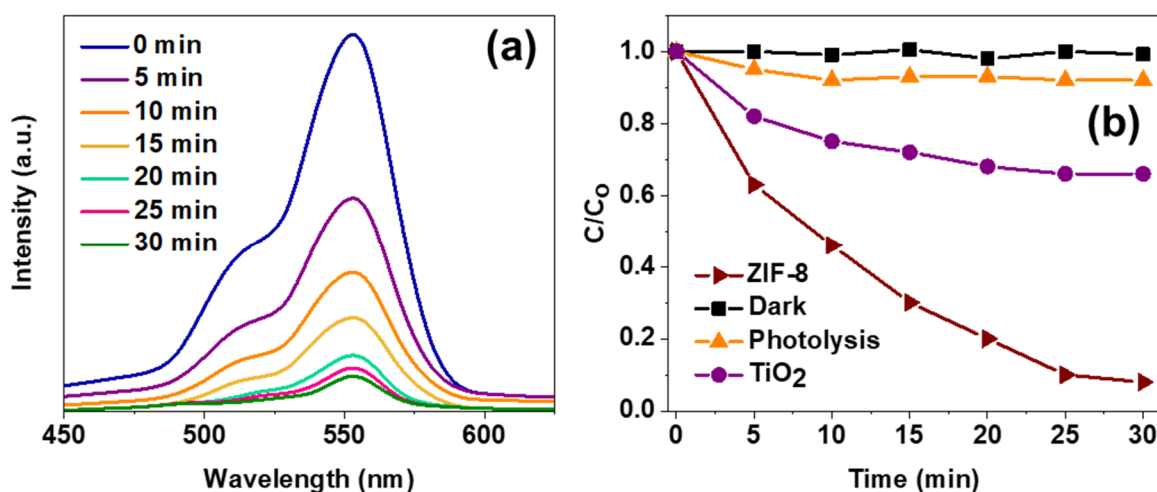
Hình 3. Đường đẳng nhiệt hấp phụ  $N_2$  của ZIF-8

Để đánh giá các khả năng hoạt động của vật liệu quang xúc tác, các tinh thể nano ZIF-8 thu được sau quá trình tổng hợp và  $TiO_2$  thương mại đã được sử dụng để phân hủy chất gây ô nhiễm

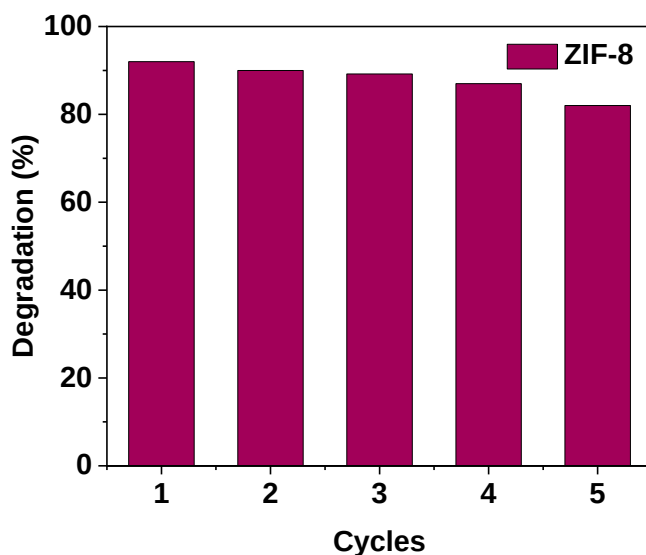
RhB. Thuốc nhuộm và chất xúc tác được khuấy từ liên tục trong 30 phút trong bóng tối trước khi thực hiện chiếu xạ để đảm bảo trạng thái cân bằng hấp phụ được thiết lập. Sau đó, dưới sự

chiếu xạ của tia UV phát ra từ đèn thủy ngân áp suất cao vào các thời điểm khác nhau, độ hấp thụ của dung dịch được đo sau khi ly tâm phân tách các hạt quang xúc tác. Như được hiển thị trong Hình 4a, cường độ hấp thụ UV-Vis của RhB giảm dần khi thời gian chiếu xạ tăng, điều này xác nhận các phân tử RhB đã bị loại bỏ hiệu quả bởi các tinh thể nano ZIF-8. Hình 4b mô tả sự thay đổi của nồng độ RhB với sự gia tăng thời gian chiếu xạ. Trong trường hợp không có quang xúc tác, chỉ có một sự sụt giảm nhẹ về cường độ

hấp thụ của RhB, điều này cho thấy RhB hầu như không bị phân hủy trong môi trường chiếu xạ UV. Trong trường hợp chiếu xạ với sự có mặt của ZIF-8 và  $\text{TiO}_2$ , nồng độ RhB giảm khi tăng thời gian chiếu xạ. Khoảng 92,2% thuốc nhuộm RhB đã bị phân hủy bởi ZIF-8 trong vòng 30 phút, trong khi chỉ có 30,9% RhB bị phân hủy bởi chất xúc tác  $\text{TiO}_2$ . Kết quả này cho thấy hoạt tính quang hóa vượt trội của ZIF-8 so với  $\text{TiO}_2$  dưới sự chiếu xạ của tia UV.



Hình 4. (a) Phổ UV-vis của RhB trong quá trình quang phân hủy bởi ZIF-8 dưới chiếu xạ của tia UV. (b) Sự phân hủy RhB trong các điều kiện khác nhau.



Hình 5. Vòng lặp quang xúc tác phân hủy RhB của vật liệu ZIF-8

Khả năng tái sinh và tái sử dụng của các tinh thể ZIF-8 được thực hiện với khả năng phân hủy RhB trong năm vòng lặp quang hóa. Chất xúc tác được ly tâm, rửa sạch và sấy khô ở 60°C trong 12 giờ để chuẩn bị cho thí nghiệm quang hóa tiếp theo. Hiệu suất phân hủy quang cho năm vòng lặp được thể hiện trong Hình 5. Khả năng quang phân hủy RhB theo từng vòng lặp thí nghiệm quang hóa tương ứng là 92,2; 90,1; 92,0; 87,7 và 82,5%. Điều này cho thấy vật liệu ZIF-8 được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt có độ bền cũng như khả năng tái sử dụng và khả năng quang hóa cao.

Dưới sự chiếu xạ của tia UV, bề mặt của các hạt nano quang xúc tác ZIF-8 bị kích thích và hình thành các cặp điện tử ( $e^-$ ) và lỗ trống quang sinh ( $h^+$ ). Đây là các bước đầu tiên của cơ chế quang phân hủy phẩm màu của chất xúc tác [17,18]. Sau khi ZIF-8 hấp thụ đủ năng lượng, có sự chuyển điện tử từ mức năng lượng của điện tử ở quỹ đạo điện đầy cao nhất (HOMO) đến mức năng lượng của điện tử ở quỹ đạo phân tử chưa điện đầy thấp nhất (LUMO) trong ZIF-8. HOMO chủ yếu được đóng góp bởi orbital liên kết N 2p, và LUMO chủ yếu được đóng góp bởi các orbital trống Zn. Cụ thể, ( $e^-$ ) được kích thích từ LUMO và nhảy vào HOMO, để lại lỗ trống quang sinh ( $h^+$ ) trong LUMO. ( $e^-$ ) và lỗ trống quang sinh ( $h^+$ ) di chuyển đến bề mặt ZIF-8 và khử phân tử oxy thành các gốc oxy ( $O_2^{\bullet-}$ ), và cuối cùng chúng chuyển thành các gốc hydroxyl ( $OH^{\bullet}$ ). Ngoài ra, các lỗ trống quang sinh ( $h^+$ ) cũng oxy hóa phân tử nước thành ( $OH^{\bullet}$ ) [18]. Các gốc hydroxyl ( $OH^{\bullet}$ ) này thực hiện phân hủy RhB một cách hiệu quả để hoàn thành quá trình quang xúc tác.

#### 4. Kết luận

Vật liệu quang xúc tác ZIF-8 đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt đơn giản và sử dụng hiệu quả trong ứng dụng phân hủy phẩm nhuộm RhB trong môi trường nước. Kết quả cho thấy các hạt nano ZIF-8 có

dạng hình thoi mười hai mặt điển hình với độ đồng đều và chất lượng cao. Các thí nghiệm quang xúc tác phân hủy RhB cho thấy khả năng loại bỏ phẩm nhuộm cao của ZIF-8 với 92,2% RhB bị loại bỏ sau 30 phút chiếu tia UV. Kết quả này cao gấp nhiều lần so với  $TiO_2$  ở cùng điều kiện thí nghiệm. ZIF-8 còn cho thấy độ bền, độ ổn định hóa học cũng như khả năng tái sử dụng tuyệt vời sau 5 vòng lặp quang xúc tác. Các kết quả này cho thấy ZIF-8 là một loại vật liệu đầy hứa hẹn cho các quá trình quang xúc tác phân hủy phẩm màu gây ô nhiễm trong môi trường nước.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Z. Carmen, S. Daniel. (2018). "Textile organic dyes – characteristics, polluting effects and separation/elimination procedures from industrial effluents – a critical overview", *Environmental and Analytical Update*, 19, 55–86.
- [2] B. Carney, J. Cartine, C. Jonander. (2021). "Assessing the effects of textile leachates in fish using multiple testing methods: from gene expression to behavior", *Ecotoxicol Environ Saf*, 207, 111523.
- [3] M.M. Aljohani, S.D. Al-Qahtani, M. Alshareef, M.G. El-Desouky, A.A. El-Bindary. (2023). "Highly efficient adsorption and removal bio-staining dye from industrial wastewater onto mesoporous Ag-MOFs", *Appl. Organomet. Chem.*, 37, 7113.
- [4] M.E. Awad, A.M. Farrag, A.A. El-Bindary, M.A. El-Bindary, H.A. Kiwaan. (2023). "Photocatalytic degradation of Rhodamine B dye using low-cost pyrofabricated titanium dioxide quantum dots-kaolinite nanocomposite", *Sci. Total Environ.* 500–501, 250–269.
- [5] A. Ahmad, S. Mohd-Setapar, A. Khatoon, M. Rafatullah. (2015). "Recent Advances in New Generation Dye Removal Technologies: Novel Search for Approaches to Reprocess Wastewater", *RSC Adv.*, 5, 30801–30818.
- [6] R.L. Singh, P.K. Singh, R.P. Singh. (2015). "Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes – a review", *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 104, 21-31.
- [7] M.K.H.M. Nazri, N. Sapawe. (2020). "A short review on photocatalytic toward dye degradation", *Mater. Today Proc.*, 31, A42-A47.
- [8] B. Sarwar, A.U. Khan, T. Fazal, M. Aslam, N.A. Qaisrani, A. Ahmed. (2022). "Synthesis of novel MOF-5 based BiCoO<sub>3</sub> photocatalyst for the treatment of textile wastewater", *Sustainability*, 14, 12885.

- [9] Y. Chen, J. Li, B.Y. Zhai, Y.N. Liang. (2019). "Enhanced photocatalytic degradation of RhB by two-dimensional composite photocatalyst", *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, 568, 429-435.
- [10] Y. Si, X. Li, G. Yang, X. Mie, L. Ge. (2020). "Fabrication of a novel core-shell CQDs@ZIF-8 composite with enhanced photocatalytic activity", *J. Mater. Sci.*, 55, 13049-13061.
- [11] X. Liu, Y. Shan, S. Zhang, Q. Kong, H. Pang. (2023). "Application of metal organic framework in wastewater treatment", *Green Energy & Environment*, 8, 698-721.
- [12] S. Yuan, L. Feng, K. Wang, J. Pang, M. Bosch, C. Lollar, Y. Sun, J. Qin, X. Yang, P. Zhang, Q. Wang, L. Zou, Y. Zhang, L. Zhang, Y. Fang, J. Li, H.-C. Zhou. (2018). "Stable metal-organic frameworks: design, synthesis, and applications", *Adv. Mater.* 30, 1704303.
- [13] A.U. Czaja, N. Trukhan, U. Müller. (2009). "Industrial applications of metal-organic frameworks", *Chemical Society Reviews*, 38, 1284-1293.
- [14] D. Behera, P. Priyadarshini, K. Parida. (2025). "ZIF-8 metal-organic frameworks and their hybrid materials: emerging photocatalysts for energy and environmental applications", *Dalton Trans.*, 54, 2681-2708.
- [15] H. Kaur, G.C. Mohanta, V. Gupta, D. Kukkar. (2017). "Synthesis and characterization of ZIF-8 nanoparticles for controlled release of 6-mercaptopurine drug", *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 41, 106-112.
- [16] L. Bazzi, I. Ayouch, H. Tachallait, S. Hankari. (2022). "Ultrasound and microwave assisted-synthesis of ZIF-8 from zinc oxide for the adsorption of phosphate", *Results in Engineering*, 13, 100378.
- [17] Nasalevich, M. A., van der Veen, M., Kapteijn, F. & Gascon, J. (2014). Metal-organic frameworks as heterogeneous photocatalysts: advantages and challenges. *CrystEngComm*, 16, 4919-4926.
- [18] T. Yao, Y. Tan, Y. Zhou, Y. Chen, M. Xiang. (2022). "Preparation of core-shell MOF-5/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> composite for the enhanced photocatalytic degradation of pollutants", *J. Solid. State Chem.*, 308, 122882.