



Tổng hợp khung hữu cơ kim loại bismuth và axit trimesic với hệ dung môi khác nhau và ứng dụng làm xúc tác quang xử lý thuốc nhuộm Rhodamin B trong nước
 Synthesis of metal-organic framework of bismuth and trimesic acid under different solvent systems and application as photocatalyst for treatment of Rhodamine B dye

Phạm Hoàng Ái Lê¹, Nguyễn Duy Thanh², Lê Hoài Ân¹, Nguyễn Duy Trinh³, Nguyễn Văn Cường^{1,*}

¹ Khoa Công nghệ Hoá học, trường Đại học Công nghiệp TP HCM, 12 Nguyễn Văn Bảo, Gò Vấp, TP HCM, Việt Nam

² Công ty CP Nhiên liệu bay Petrolime, A75/70 Bạch Đằng, Phường 2, Tân Bình, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

³ Viện ứng dụng và phát triển công nghệ bền vững, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Việt Nam

* Email: nvc@iuh.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 30/03/2024

Accepted: 17/05/2024

Published: 30/12/2024

Keywords:

Photocatalyst;
 metal-organic framework;
 Rhodamine dye;
 bismuth

ABSTRACT

In this study, bismuth trimesate materials (Bi-BTC) was successfully synthesized by solvothermal method using different solvents including DMF, methanol, ethanol, acetone, and glycerol. The differences in the crystal structures and morphology of these materials were assessed by X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscope (SEM). The functional groups were studied by a Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy. Furthermore, the photocatalytic activities of the materials were tested by the degradation of Rhodamin B pigment under the visible light. The results showed that as-prepared material under DMF/MeOH (1:1, v/v) exhibited highest photodegradation toward RhB (97%) among all solvents. These results open up a new approach to enhancing the photocatalytic activity of bismuth trimesate materials.

Giới thiệu chung

Khung hữu cơ kim loại (MOFs), là loại vật liệu tinh thể xốp, đã thu hút được sự quan tâm lớn do có nhiều ứng dụng trong lĩnh vực khác nhau, trong đó có ứng dụng để xử lý môi trường. Tuy nhiên, việc chức năng hóa và đa dạng hóa MOF vẫn còn là thách thức và cấp bách đối với việc phát triển các vật liệu dựa trên MOF có hoạt tính cao [1,2]. MOF dựa trên bismuth có hoạt tính xúc tác quang để xử lý chất màu hữu cơ trong nước đã được nghiên cứu thông qua sử dụng các cation Bi trong việc hình thành MOF [3,4]. Sự linh hoạt trong việc thay đổi cấu trúc phân tử của chúng dẫn đến việc tạo ra các vật liệu MOF với cấu trúc đa dạng. Việc ứng dụng bismuth và các phức chất của nó đã có lịch sử 250 năm, nhưng sự xuất hiện của Bi-MOF mới gần

đây. Các MOFs dựa trên Bi ổn định về mặt cấu trúc và một trong số chúng có tiềm năng lớn trong xúc tác quang hóa, cảm biến và y sinh [5]. Vật liệu khung cơ kim loại Bi-BTC từ bismuth và cầu nối hữu cơ H₃BTC (1,3,5-benzenetricarboxylic axit) với cấu trúc tinh thể được điều chỉnh có thể tăng cường hiệu suất phân tách cặp electron-lỗ trống được tạo ra bởi ánh sáng, từ đó cải thiện và tối ưu hóa hiệu quả của vật liệu cho các ứng dụng hiện có và mở ra nhiều ứng dụng tiềm năng mới [6,7]. Dung môi là thành phần không thể thiếu trong quá trình tổng hợp vật liệu MOF. Dung môi đóng vai trò quan trọng trong quá trình tổng hợp MOF cũng như ảnh hưởng đến hình dạng của chúng. Dung môi có thể tương tác với ion kim loại hoặc hoạt động như phân tử lấp đầy không gian trong cấu trúc phân tử MOFs. Ngoài ra, chúng cũng đóng vai trò

<https://doi.org/10.62239/jca.2024.075>

trong việc điều chỉnh cấu trúc của MOF. Dung môi được sử dụng trong quá trình tổng hợp MOF thường có điểm sôi cao và tính chất phân cực, bao gồm dimethyl formamide (DMF), diethyl formamide (DEF), dimethyl sulphoxide (DMSO), dimethyl acetamide (DMA), ethanol, acetone, acetonitrile, và nhiều loại khác [8,9]. Đôi khi, một hỗn hợp dung môi có thể được sử dụng, phụ thuộc vào độ hòa tan của chất phản ứng. Quá trình tổng hợp MOF chịu ảnh hưởng từ môi trường phản ứng do độ phân cực của dung môi và khả năng hòa tan của liên kết hữu cơ. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng sử dụng các hệ dung môi khác nhau trong cùng điều kiện phản ứng có thể tạo ra MOF có hình thái khác nhau. Điều này có thể là do sự khác biệt trong mức độ khử liên kết của các chất liên kết hữu cơ trong các hệ dung môi khác nhau [10,11]. Trong họ Bi-MOF, Bi-BTC được tổng hợp bằng phương pháp nhiệt dung môi sử dụng $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ và H_3BTC . Các nghiên cứu về Bi-BTC cho thấy các ưu điểm: đa dạng về hình dạng và các mô hình phối tử của Bi-BTC từ đó dẫn đến sự khác nhau về tính chất quang xúc tác của vật liệu [6,12].

Trong nghiên cứu này chúng tôi đã sử dụng hệ dung môi DMF, ethanol, methanol, acetone, glycerol để làm dung môi tổng hợp vật liệu khung hữu cơ kim loại Bi-BTC với tiền chất từ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ và H_3BTC bằng phương pháp nhiệt dung môi. Vật liệu Bi-BTC được ứng dụng làm xúc tác quang cho quá trình phân hủy chất màu rhodamin B.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất

H_3BTC (Trimesic acid, 95%, Sigma-Aldrich), $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Bismuth(III) nitrate pentahydrate, 98.0%, Sigma-Aldrich), N,N-dimethylformamide (DMF, acetone, methanol, ethanol, glycol (xuất xứ Fisher – Mỹ), và Rhodamine B (RhB, 95%, Sigma-Aldrich). Các hóa chất và dung môi có độ tinh khiết hóa học và được sử dụng trực tiếp khi mua từ nhà cung cấp.

Tổng hợp vật liệu

Vật liệu khung hữu cơ kim loại bismuth và axit trimetic (Bi-BTC) được tổng hợp theo phương pháp nhiệt dung môi, với hệ dung môi được nghiên cứu DMF: methanol, DMF: ethanol, DMF: acetone, DMF: glycerol. Quy trình tổng hợp Bi-BTC tương tự trong nghiên cứu trước [13], thể hiện ở hình 1. Đầu tiên, cho 0,15 g $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ và 0,75 (g) H_3BTC được hòa tan trong 60 mL hệ dung môi DMF: methanol= 1:1. Tiếp theo, hỗn hợp này được khuấy trong 30 phút ở nhiệt độ phòng để tạo thành hỗn hợp đồng nhất. Hỗn hợp sau khi hòa tan được cho vào ống Teflon có vỏ bọc bằng

thép chịu nhiệt cao và phản ứng được thực hiện trong 24 giờ ở nhiệt độ 120 °C. Sau đó để nguội và hỗn hợp sau phản ứng được ly tâm thu hồi chất rắn. Chất rắn được rửa nhiều lần bằng hỗn hợp DMF/MeOH. Cuối cùng, sản phẩm được sấy trong 24 giờ ở 80 °C bằng tủ sấy chân không, mẫu được ký hiệu: Bi-BTC-Me. Thực hiện điều kiện phản ứng tương tự thay thế hệ dung môi DMF: methanol thành hệ DMF: ethanol, DMF: acetone, DMF: glycerol theo tỷ lệ 1: 1 và ký hiệu mẫu tương ứng Bi-BTC-Et, Bi-BTC-Ac và Bi-BTC-Gl.



Hình 1: Quy trình tổng hợp vật liệu Bi-BTC

Xác định đặc trưng vật liệu

Các vật liệu tổng hợp được đặc trưng với các kỹ thuật hóa lý khác nhau. Nhiễu xạ tia X (XRD) được sử dụng để xác định cấu trúc tinh thể trên máy Shimadzu, Japan XRD LabX XRD-6100 với bức xạ $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0,154$ nm). Các quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) được chụp lại trên thiết bị Hitachi S-4800 FESEM (Nhật Bản) HI-9039-0006, Quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR, Tensor 27-Bruker, Đức). Phổ UV-Vis được ghi trên máy Evolution 60S UV- Visible Spectrophotometer của hãng Thermo. Phổ UV-DRS được đo ở máy UV-Vis Agilent Cary 4000.

Khảo sát hoạt tính quang xúc tác của các vật liệu

Cân 10 mg mẫu vật liệu cho vào bình phản ứng có chứa 100 mL dung dịch RhB 50 mg/L, bọc kín đem đi khuấy trong tối 60 phút để đạt cân bằng hấp phụ. Sau đó, tiến hành chiếu đèn LED Cree® Xlamp® XM-L2 (Cree, Inc., Durham, NC, USA) có công suất tối đa 40 W và công suất ánh sáng tối đa 1052 lumen trong khoảng thời gian 2 h và lấy mẫu ra theo thời gian (15 phút lấy mẫu một lần). Các mẫu sau khi lấy ra được ly tâm để tách xúc tác ra khỏi dung dịch. Nồng độ RhB sau phản ứng ở các thời điểm được xác định bằng phương pháp đo quang trên máy UV-Vis- Evolution 60S tại bước sóng 554 nm. Hiệu suất phân hủy RhB được tính theo công thức sau:

$$H = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\%$$

Trong đó, C_0 là nồng độ RhB tại thời điểm ban đầu; C_t lần lượt là nồng độ RhB tại thời điểm t.

Xác định cơ chế phản ứng bắt điện tử

Thí nghiệm được tiến hành tương tự như thí nghiệm đánh giá hoạt tính quang xúc, có sự thay đổi là sau thời gian đạt cân bằng hấp phụ cần thêm 3 mL chất bắt gốc 1,4-benzoquinone (BQ), $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ và tert-butanol (TBA) là tương ứng là tác nhân bắt $\text{O}_2^{\bullet-}$, h^+ , e^- , $\bullet\text{OH}$ với nồng độ 2 μM vào phản ứng.

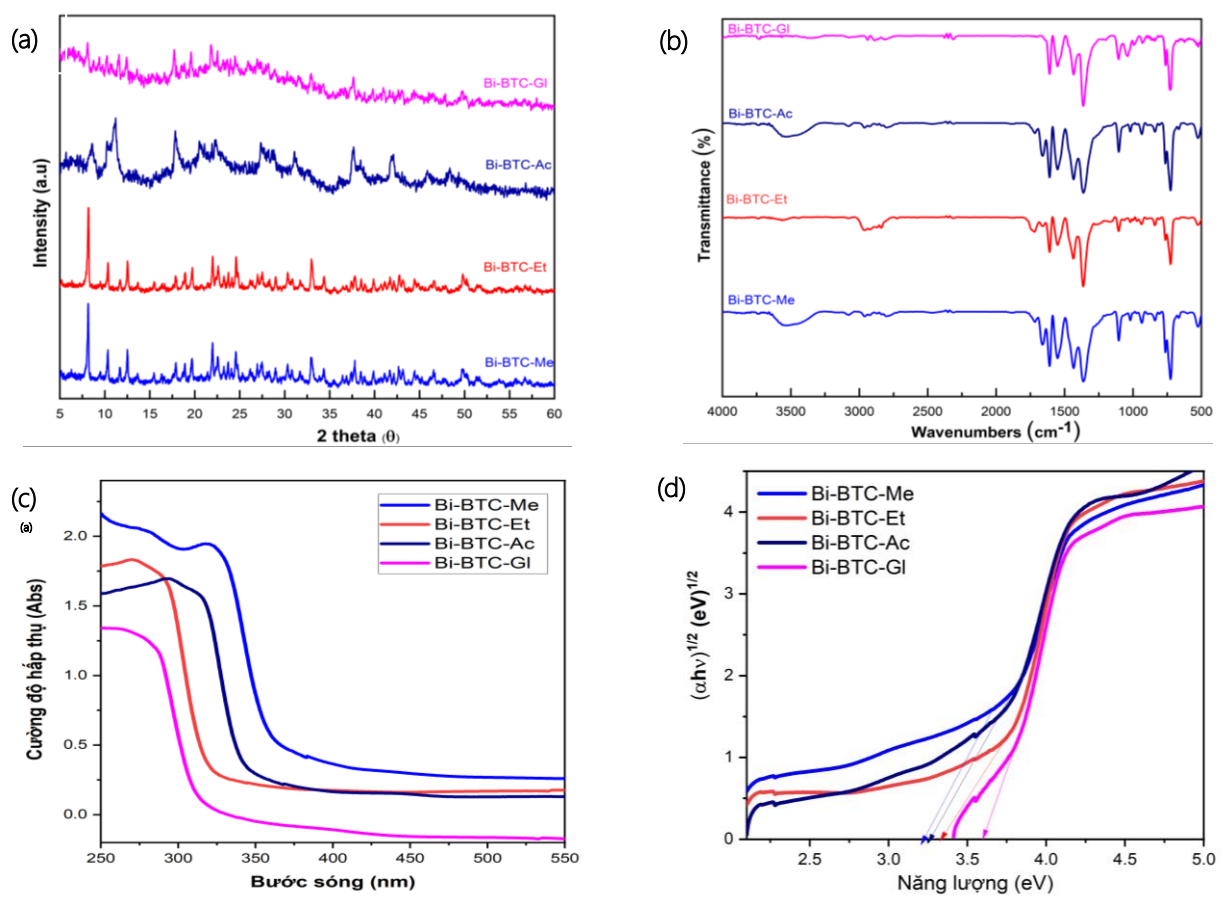
Kết quả và thảo luận

Đặc trưng vật liệu

Sự hình thành Bi-BTC với hệ dung môi khác nhau đã được nghiên cứu bởi giản đồ XRD (hình 2a). Các đỉnh đặc trưng ở 8,2; 9,4; 10,2; 11,65 và 12,4 $^\circ$ tương ứng với mặt mạng (200), (011), (130), (121) và (230) phù hợp với vật liệu khung hữu cơ kim loại bismuth của UU-200 (Uppsala University) [14] đã công bố. Tuy nhiên Bi-BTC-Me, và Bi-BTC-Et có cường độ peak rất mạnh còn đối với Bi-BTC-GI thì cường độ peak thấp. Đối với Bi-BTC kích thước tinh thể trung bình được xác định từ

chiều rộng tại một nửa chiều cao peak (FWHM) của đỉnh nhiễu xạ mặt (200) theo phương trình Scherrer. Kích thước tinh thể của Bi-BTC-Me, Bi-BTC-Et, Bi-BTC-Ac, Bi-BTC-GI được tính toán lần lượt là 10,4; 10,67; 10,47 và 10,35 nm.

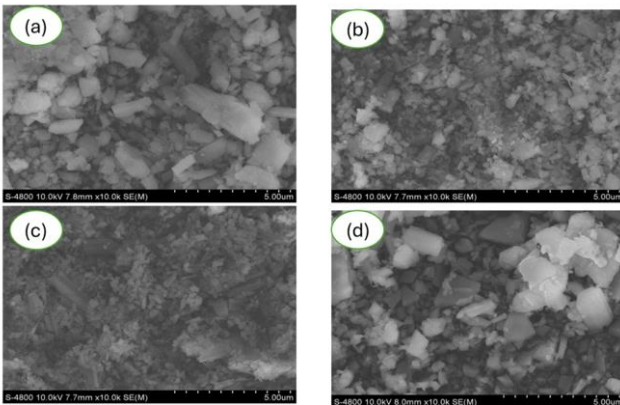
Phân tích kết quả thu được từ phổ FT – IR của vật liệu Bi-BTC (hình 2b) cho thấy ở bước sóng 1700 cm^{-1} cho liên kết $-\text{COOH}$, các mẫu đều cho cường độ peak mạnh tuy nhiên mẫu Bi-BTC-GI cho tín hiệu yếu hơn. Tại vùng bước sóng 1640 cm^{-1} các mẫu đều cho tín hiệu của nhóm $-\text{OH}$. Các đỉnh biến thiên mạnh ở 1560 và 1381,7 cm^{-1} được đánh giá là dao động không đối xứng ($\nu_{\text{as}}(\text{COO})$) và đối xứng ($\nu_{\text{s}}(\text{COO})$) của nhóm cacboxy ($-\text{COO}$), điều này thể hiện sự liên kết của BTC với Bi^{3+} [15]. Tại bước sóng 1475 cm^{-1} cho tín hiệu mũi đôi là liên kết của C-O-H. Tại bước sóng 775 cm^{-1} cho tín hiệu mạnh tương ứng với dao động uốn C-H của benzen. Ở bước sóng 500 cm^{-1} cho tín hiệu của liên kết Bi-O [16,17].



Hình 2: (a) Giản đồ XRD, (b) phổ hồng ngoại, (c) phổ UV-Vis-DRS và (d) định năng lượng vùng cấm E_g theo hàm Tauc của vật liệu Bi-BTC-Me, Bi-BTC-Et, Bi-BTC-Ac, Bi-BTC-GI.

Tính chất quang học của các mẫu vật liệu được nghiên cứu theo phương pháp phổ phản xạ khuếch tán từ ngoại-khả kiến và kết quả đặc trưng UV-Vis-DRS được trình bày ở hình 2c. Kết quả từ hình 2c cho thấy mẫu vật liệu Bi-BTC có vùng hấp thụ ánh sáng trong khoảng từ 300-400 nm, kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về phổ UV-Vis rắn của vật liệu Bi-MOFs [15,18]. Đồng thời, năng lượng vùng cấm (E_g) của mẫu vật liệu Bi-BTC có thể được đánh giá dựa trên đồ thị Tauc [18,19] và kết quả được trình bày ở hình 2d. Năng lượng vùng cấm của Bi-BTC-Me, Bi-BTC-Et, Bi-BTC-Ac, Bi-BTC-GI tương ứng là 3,22; 3,36; 3,29 và 3,51 eV.

Hình thái tinh thể của vật liệu Bi-BTC được nghiên cứu bởi SEM, kết quả ở hình 3 cho thấy mẫu Bi-BTC-Me và Bi-BTC-Et thu được gồm các tinh thể dạng thanh với chiều dài các thanh không đồng nhất. Độ rộng cũng có sự chênh lệch rõ ràng, dao động từ 250 đến 600 nm. Kết quả của Bi-BTC-Ac cho thấy các mẫu có hạt hình cầu nhỏ xếp chồng lên nhau và các que kích thước lớn hơn, kích thước đồng đều hơn, còn đối với vật liệu Bi-BTC-GI ta thấy vật liệu là dạng hình que kích thước không đồng đều và không xếp chồng lên nhau.

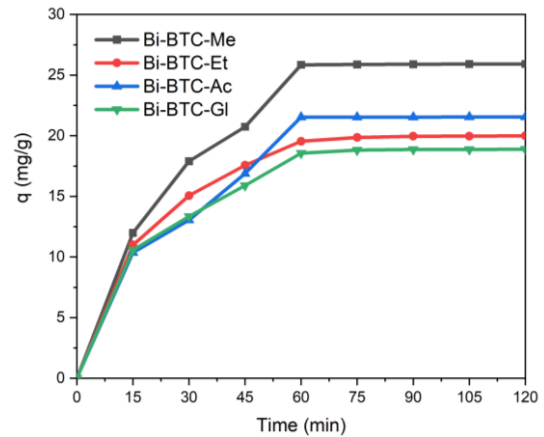


Hình 3: Ảnh SEM của vật liệu Bi-BTC (a) Bi-BTC-Me, (b) Bi-BTC-Et, (c) Bi-BTC-Ac và (d) Bi-BTC-GI

Khảo sát thời gian đạt cân bằng hấp phụ

Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng hấp phụ RhB theo thời gian của mẫu Bi-BTC tạo ra từ hệ dung môi khác nhau thì vật liệu có khả năng hấp phụ RhB khác nhau, nhưng tất cả đều có dung lượng hấp phụ tăng theo thời gian hấp phụ và đạt cân bằng sau 60 phút. Dung lượng hấp phụ của Bi-BTC ở thời điểm 60 phút Bi-BTC-Me, Bi-BTC-Et, Bi-BTC-Ac và Bi-BTC-GI tương ứng với 25,85; 19,54; 21,53 và 18,56 mg/g trong điều kiện thí nghiệm. Vì vậy trong các nghiên cứu tiếp theo, tiến hành hấp phụ RhB trong bóng tối 60 phút trước khi thực hiện phản ứng quang xúc tác.

<https://doi.org/10.62239/jca.2024.075>



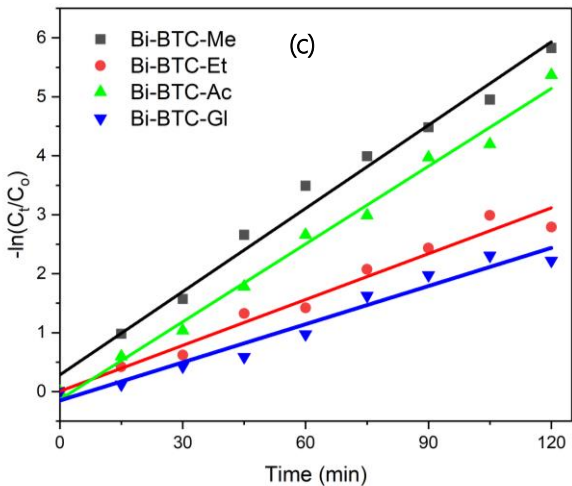
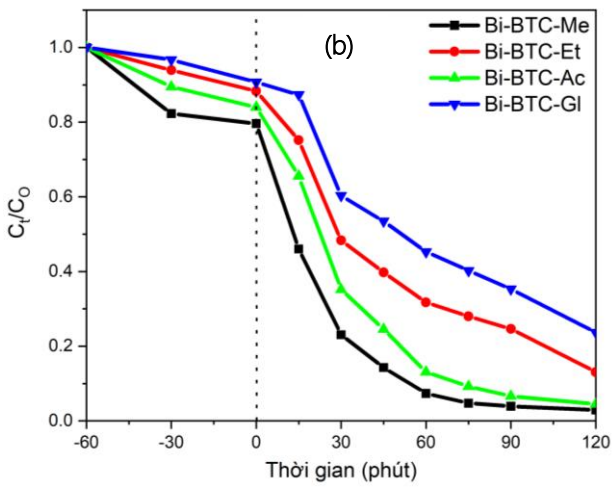
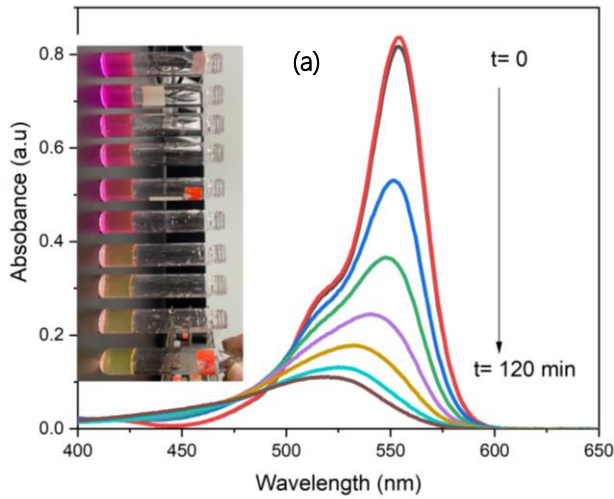
Hình 4: Dung lượng hấp phụ RhB theo thời gian của các mẫu Bi-BTC-Me, Bi-BTC-Et, Bi-BTC-Ac, Bi-BTC-GI (lượng xúc tác: 0.01 g, thể tích dung dịch RhB 50mg/L: 100 mL, thời gian hấp phụ: 120 phút)

Khả năng xúc tác quang của các vật liệu trong phản ứng phân hủy RhB

Sự thay đổi nồng độ RhB theo thời gian được xác định thông qua máy UV-Vis tại bước sóng 554 nm. Kết quả theo thời gian phản ứng khi sử dụng vật liệu Bi-BTC để phân hủy chất màu RhB cho thấy bước sóng hấp thụ tối đa của chất màu RhB đã lùi từ 554 nm về khoảng 525 nm, thấy có sự chuyển dời của bước sóng hấp thụ tối đa của RhB. Sự thay đổi về màu sắc RhB theo thời gian cũng phản ánh điều đó (hình 5a).

Khi có sự hiện diện của xúc tác thì nồng độ của RhB thay đổi đáng kể theo thời gian chiếu sáng và phụ thuộc vào điều kiện xúc tác được tổng hợp. Sau 120 phút chiếu sáng, khi sử dụng vật liệu được tạo ra từ hệ dung môi khác nhau để phân hủy chất màu RhB thì hiệu quả phân hủy cũng có sự thay đổi. Hiệu suất phân hủy RhB khi sử dụng vật liệu Bi-BTC với dung môi khác nhau giảm dần theo thứ tự từ Bi-BTC-Me, Bi-BTC-Et, Bi-BTC-Ac và Bi-BTC-GI lần lượt là 97,1; 86,9; 95,6 và 76,3%. Kết quả cho thấy, Bi-BTC-Me và Bi-BTC-Ac xúc tác quang cho hiệu suất phân hủy cao hơn so với Bi-BTC-GI, điều này phù hợp với kết quả phân tích XRD và hình thái bề mặt của vật liệu (hình 5b).

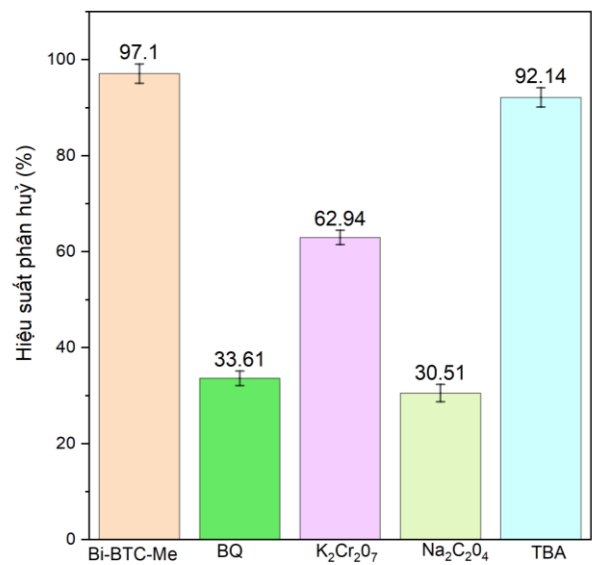
Để so sánh tốc độ phản ứng phân hủy RhB trên các mẫu Bi-BTC, mô hình động học Langmuir-Hinshelwood bậc 1 cũng được sử dụng [20] (hình 5c), hằng số tốc độ phản ứng của Bi-BTC-Me, Bi-BTC-Et, Bi-BTC-Ac và Bi-BTC-GI lần lượt là 0,0447; 0,02592; 0,04397 và 0,02158. Kết quả cho thấy phản ứng quang phân hủy RhB trên mẫu Bi-BTC-Me có hằng số tốc độ cao nhất ($k = 0,0447 \text{ min}^{-1}$) chứng tỏ quá trình diễn ra nhanh hơn nhiều so với vật liệu Bi-BTC khác.



Hình 5: Phổ UV-Vis sản phẩm phân hủy RhB của vật liệu Bi-BTC ở các thời điểm phản ứng khác nhau (a) và Sự thay nồng độ RhB theo thời gian phản ứng đối với các chất xúc tác khác nhau (b). Mô hình động học quang xúc tác (c) (0,01 g xúc tác; thể tích dung dịch RhB (nồng độ 50mg/L): 100 mL; thời gian phản ứng: 120 phút)

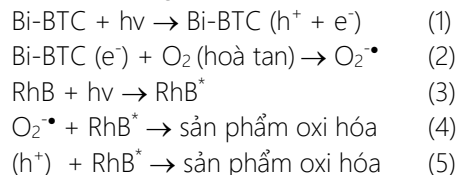
Xác định cơ chế phản ứng bất điện tử

Tiếp theo, cơ chế quang xúc tác của Bi-BTC-Me được nghiên cứu bằng cách xác định các loại oxy hóa chính tham gia vào phản ứng quang xúc tác, chẳng hạn như gốc tự do hydroxyl ($\cdot\text{OH}$), electron (e^-), lỗ trống (h^+), và anion gốc tự do superoxide ($\text{O}_2^{\cdot-}$) [21]. Theo kết quả nghiên cứu (hình 6) khi có mặt TBA thì hiệu quả phân hủy RhB không thay đổi, tuy nhiên hiệu quả phân hủy giảm mạnh khi có mặt $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$, BQ, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Kết quả chỉ ra rằng h^+ , $\text{O}_2^{\cdot-}$, e^- là các dạng hoạt động chính trong quá trình phân hủy RhB, trong đó h^+ và $\text{O}_2^{\cdot-}$ là tác nhân ảnh hưởng mạnh nhất đến quá trình phân hủy RhB, còn electron đóng vai trò thứ cấp trong sự phân hủy của RhB (hình 6).



Hình 6: Hiệu quả phân hủy RhB trên mẫu Bi-BTC-Me dưới ảnh hưởng của các chất bắt gốc tự do khác nhau. (0,01 g xúc tác; thể tích dung dịch RhB (nồng độ 50mg/L): 100 mL; thời gian phản ứng: 120 phút), 3 mL chất bắt gốc nồng độ 2 μM).

Cơ chế xúc tác của Bi-BTC có thể được mô tả sơ bộ như sau [22] (Phương trình 1-5).



Kết luận

Qua kết quả nghiên cứu đã cho thấy vai trò quan trọng của dung môi trong việc hình thành các tinh thể Bismuth cũng như ảnh hưởng đến khả năng phản ứng quang hóa. Chúng tôi đã tổng hợp thành công vật liệu

khung hữu cơ kim loại Bi-BTC với những hệ dung môi khác nhau DMF: Me; DMF: Et, DMF: Ac và DMF: Gl bằng phương pháp nhiệt dung môi và ứng dụng vật liệu làm xúc tác quang để phân hủy chất màu Rhodamin B trong nước. Với hệ dung môi DMF:Me khi tổng hợp vật liệu Bi-BTC cho hiệu suất phân hủy RhB cao nhất 97% trong 120 phút chiếu sáng, đồng thời xác định được chất bắt gốc lỗ trống (h^+), gốc oxy hoá tự do ($O_2^{\cdot-}$) là tác nhân ảnh hưởng mạnh nhất đến quá trình phân hủy RhB

Lời cảm ơn

Tác giả xin cảm ơn Trường đại học Công nghiệp TP HCM đã hỗ trợ cơ sở vật chất để làm nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- C. Zhang, L. Ai, J. Jiang, J. Mater. Chem. A 3 (2015) 3074–3081. <https://doi.org/10.1039/c4ta04622f>
- M.S. Khan, Y. Li, D.S. Li, J. Qiu, X. Xu, H.Y. Yang, Nanoscale Adv. (2023). <https://doi.org/10.1039/d3na00627a>
- F. Ye, Z.X. Wei, J.F. Song, X.H. Wu, P. Yue, Zeitschrift Fur Anorg. Und Allg. Chemie 643 (2017) 669–674. <https://doi.org/10.1002/zaac.201700096>
- G. Wang, Q. Sun, Y. Liu, B. Huang, Y. Dai, X. Zhang, X. Qin, Chem. - A Eur. J. 21 (2015) 2364–2367. <https://doi.org/10.1002/chem.201405047>
- B. Zhang, H. Xu, M. Wang, J. Environ. Chem. Eng. (2022) 108469. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108469>
- Z. Wang, Z. Zeng, H. Wang, G. Zeng, P. Xu, R. Xiao, D. Huang, S. Chen, Y. He, C. Zhou, M. Cheng, H. Qin, Coord. Chem. Rev. 439 (2021) 213902. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213902>
- G. Wang, Y. Liu, B. Huang, X. Qin, X. Zhang, Y. Dai, Dalt. Trans. 44 (2015) 16238–16241. <https://doi.org/10.1039/C5DT03111G>
- O.S. Bull, I. Bull, G.K. Amadi, C. Obaaloghi Odu, E.O. Okpa, Orient. J. Chem. 38 (2022) 490–516. <https://doi.org/10.13005/ojc/380301>
- R. Seetharaj, P. V. Vandana, P. Arya, S. Mathew, Arab. J. Chem. 12 (2019) 295–315. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2016.01.003>
- Z. Song, J. Liu, Y. Hu, S. Li, X. Zhang, L. Ma, L. Chen, Q. Zhang, Catal. Commun. 176 (2023) 106628. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2023.106628>
- W.H. Huang, G.P. Yang, J. Chen, X. Chen, C.P. Zhang, Y.Y. Wang, Q.Z. Shi, Cryst. Growth Des. 13 (2013) 66–73. <https://doi.org/10.1021/cg301146u>
- Q.X. Wang, G. Li, Inorg. Chem. Front. 8 (2021) 572–589. <https://doi.org/10.1039/d0qi01055c>
- H.A. Le Pham, D.T. Nguyen, V.C. Nguyen, T. Ky Vo, Inorg. Chem. Commun. 159 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111822>
- M. Åhlén, E. Kapaca, D. Hedbom, T. Willhammar, M. Strømme, O. Cheung, Microporous Mesoporous Mater. 329 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111548>
- V.H. Nguyen, L. Van Tan, T. Lee, T.D. Nguyen, Sustain. Chem. Pharm. 20 (2021) 100385. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100385>
- V.H. Nguyen, T.D. Nguyen, T. Van Nguyen, Top. Catal. (2020). <https://doi.org/10.1007/s11244-020-01271-6>
- T.A. Vu, G.H. Le, C.D. Dao, L.Q. Dang, K.T. Nguyen, Q.K. Nguyen, P.T. Dang, H.T.K. Tran, Q.T. Duong, T. V. Nguyen, G.D. Lee, RSC Adv. 5 (2015) 5261–5268. <https://doi.org/10.1039/c4ra12326c>
- S. Dong, L. Wang, W. Lou, Y. Shi, Z. Cao, Y. Zhang, J. Sun, Ultrason. Sonochem. 91 (2022) 106223. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106223>
- S. Dong, L. Wang, W. Lou, Y. Shi, L. Li, Z. Cao, Y. Zhang, J. Sun, J. Dispers. Sci. Technol. 44 (2023) 2058–2069. <https://doi.org/10.1080/01932691.2022.2059503>
- B. Ohtani, Photocatalysis by inorganic solid materials: Revisiting its definition, concepts, and experimental procedures, 1st ed., Elsevier Inc., 2011. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385904-4.00001-9>
- V.H. Nguyen, A.L.H. Pham, V.H. Nguyen, T. Lee, T.D. Nguyen, Chem. Eng. Res. Des. 177 (2022) 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.10.043>
- L. Yang, Y. Xin, C. Yao, Y. Miao, J. Mater. Sci. Mater. Electron. 32 (2021) 13382–13395. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05917-3>