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

https://jca.edu.vn

Kỹ thuật tổng hợp vật liệu UiO-66-NH_2 ứng dụng để xử lý Cr(VI) và MB trong điều kiện chiếu xạ ánh sáng nhìn thấy

Engineering synthesis of UiO-66-NH_2 material applied for the treatment of Cr(VI) and MB under visible light irradiation

Nguyễn Đức Hải[1,*], Vũ Đình Giáp[1]

[1] *Đại học Công nghiệp Hà Nội,*
** Email: haind1@haui.edu.vn*

ARTICLE INFO

Received: 09/03/2026
Accepted: 30/03/2026
Published: 30/03/2026

Keywords:
UiO-66-NH_2; Cr(VI); MB; photocatalyst

ABSTRACT

In this study, the UiO-66-NH_2 material was successfully synthesized via the solvothermal method under conditions of 120 °C and ambient pressure. The UiO-66-NH_2 material was characterized using X-ray Diffraction (XRD), Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX), and the Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area analysis method. The characterization results confirm that the UiO-66-NH_2 material has a particle size of approximately 50–100 nm, a surface area of 344 m^2/g, a pore volume of 0.204 cm^3/g, and a band gap energy of 2.65 eV. The UiO-66-NH_2 material demonstrated the capability to reduce 80.8% of Cr(VI) and 78.4% of Methylene Blue (MB) after 120 and 180 minutes of visible light irradiation under optimal conditions, respectively. The factors influencing the removal of Cr(VI) and MB, including catalyst dosage, initial concentration of Cr(VI) or MB, and pH value, were also investigated.

Giới thiệu chung

Sự hiện diện của các ion kim loại nặng, vi nhựa và các hợp chất hữu cơ độc hại trong môi trường nước đang gây ra những hệ lụy nghiêm trọng đối với sức khỏe con người, động vật và tính bền vững của các hệ sinh thái [1]. Trong đó, Crom(VI) là một trong những ion kim loại nguy hiểm nhất, thường xuất hiện từ các quy trình công nghiệp như mạ điện, thuộc da, dệt may và sản xuất sơn [2]. Sự tồn tại của Cr(VI) trong nguồn nước không chỉ gây ra các bệnh lý về tiêu hóa mà còn làm tăng đáng kể nguy cơ mắc bệnh ung thư gan, thận và da ở con người [3]. Song song đó, các loại thuốc nhuộm như MB, phát sinh từ ngành công nghiệp dệt nhuộm, cũng là nhóm hợp chất hữu cơ bền vững, khó phân hủy, gây ra những tác động tiêu cực về đột biến gen và ung thư cho hệ sinh thái và con người [4]. Để đối phó với tình trạng này, hàng loạt công nghệ xử lý đã được nghiên cứu và phát triển, bao gồm hấp phụ, trao đổi ion, kết tủa hóa học, điện hóa, sử dụng màng lọc, công nghệ sinh học và quang xúc tác nhằm loại bỏ Cr(VI) và thuốc nhuộm khỏi nguồn nước [5], [6]. Trong số các phương pháp kể trên, công nghệ quang xúc tác được xem là giải pháp then chốt nhờ khả năng chuyển hóa Cr(VI) thành Cr(III) ít độc hại hơn với hiệu suất vượt trội, chi phí tối ưu và không gây ô nhiễm thứ cấp. Cụ thể, Wang và cộng sự [7] đã ứng dụng vật liệu $CuInS_2$ để khử được 51% hàm lượng

©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/).

https://doi.org/10.62239/jca.2026.015

Cr(VI) sau 150 phút dưới ánh sáng nhìn thấy. Nhằm tối ưu hóa hiệu quả, Fang Deng cùng cộng sự [8] đã cải tiến cấu trúc này bằng cách kết hợp $CuInS_2$ với chất bán dẫn CdS, giúp tăng cường khả năng hấp thụ ánh sáng cũng như thúc đẩy sự dịch chuyển điện tử. Kết quả nghiên cứu cho thấy tốc độ phản ứng đã tăng gấp 4 lần. Pham và cộng sự [9] phát triển sợi nano TiO_2 pha tạp Fe/chitosan/poly(vinyl alcohol) bằng phương pháp kéo sợi điện ứng dụng để xử lý đến 94% MB bằng quá trình hấp phụ và xúc tác quang. Bên cạnh các vật liệu bán dẫn truyền thống như $CuInS_2$ hay CdS, các khung hữu cơ kim loại (MOFs) đang nổi lên như một giải pháp hứa hẹn nhờ cấu trúc xốp đặc trưng và tính chất có thể điều chỉnh để phù hợp với các ứng dụng thực tiễn. Trong đó, UiO-66-NH_2 được xem là một lựa chọn tối ưu nhờ độ bền hóa học và nhiệt học vượt trội trong môi trường nước, kết hợp với các nhóm chức amin (-NH_2) giúp tăng cường khả năng hấp thụ ánh sáng và cải thiện sự phân tán của các tâm xúc tác. Việc bổ sung nhóm chức -NH_2 không chỉ tạo ra các trung tâm hoạt động mới mà còn giúp thu hẹp vùng cấm (E_g), từ đó tối ưu hóa quá trình tách điện tử – lỗ trống dưới tác động của ánh sáng khả kiến. Với diện tích bề mặt lớn và khả năng thiết kế cấu trúc linh hoạt, UiO-66-NH_2 hứa hẹn sẽ mang lại hiệu suất vượt trội trong việc loại bỏ các chất ô nhiễm bền vững như Cr(VI) và thuốc nhuộm hữu cơ, mở ra hướng đi tiềm năng cho các công nghệ xử lý nước tiên tiến trong tương lai.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tổng hợp chất xúc tác dị thể UiO-66-NH_2 ứng dụng để xử lý hiệu quả Cr(VI) và thuốc nhuộm MB trong điều kiện chiếu xạ ánh sáng nhìn thấy. Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình quang xúc tác như khối lượng chất xúc tác quang, nồng độ Cr(VI), MB và giá trị pH đã được nghiên cứu.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất:

$ZrCl_4$ (Acros, 98%), H_2BDC-NH_2 (Mỹ, 99%), DMF (Trung Quốc, 99,5%), Ethanol (C_2H_5OH), NaOH (Trung Quốc, 96%), HCl (Trung Quốc, 36,5%), Kali dicromat ($K_2Cr_2O_7$), Methylene Blue ($C_{16}H_{18}ClN_3S$).

Tổng hợp vật liệu UiO-66-NH_2

Vật liệu UiO-66-NH_2 được tổng hợp bằng phương pháp nhiệt dung môi. Cụ thể, 3,864 g $ZrCl_4$ được hòa tan hoàn toàn trong 240 mL DMF và thêm từ từ 2,172 g H_2BDC-NH_2 vào hỗn hợp phản ứng trên. Hỗn hợp này cho vào bình Teflon gia nhiệt ở 80 °C trong 8 giờ và ở 120 °C trong 24 giờ. Sau phản ứng, hỗn hợp này được để nguội tự nhiên xuống nhiệt độ phòng, lọc rửa nhiều lần bằng DMF và ethanol để thu được chất rắn màu vàng. Chất rắn màu vàng này được sấy ở 120 °C trong 24 giờ để thu được vật liệu UiO-66-NH_2.

Phương pháp nghiên cứu vật liệu

Các mẫu vật liệu tổng hợp được đặc trưng bằng phương pháp nhiễu xạ tia X ở góc 2θ ~5-60° (D8 ADVANCE, Bruker, Đức) sử dụng Cu Kα1 bức xạ đồng (λ = 0,154 nm), tốc độ quét 3°.min^{-1}. Diện tích bề mặt của các mẫu vật liệu được đánh giá bằng phương pháp hấp phụ N_2 ở nhiệt độ 77 K. Hình thái của vật liệu được chụp bằng S-4800 (SEM, Hitachi, Nhật Bản) và Leica IEO 906E (TEM).

Khảo sát khả năng xử lý MB và Cr(VI) trên vật liệu UiO-66-NH_2

Cho 30 mg vật liệu UiO66-NH_2 lần lượt vào 100 mL dung dịch MB 10 ppm và Cr(VI) 20 ppm. Hệ phản ứng được khuấy đều trong tối 30 phút sau đó chiếu sáng bằng đèn Xenon 300 W. Lấy 4ml mẫu dung dịch phản ứng tại các thời điểm 60, 90, 120, 150, 180, 210 phút. Dung dịch được đo phổ tử ngoại khả kiến (UV-Vis) để xác định nồng độ sau xử lý. Hiệu suất xử lý được tính toán theo nồng độ các chất ban đầu, C_o (mg.L^{-1}) và thời điểm t, C_t (mg.L^{-1}) trong dung dịch phản ứng tại thời điểm phản ứng t (phút):

$$\%H = \frac{C_o - C_t}{C_o}$$

%H: Hiệu suất xử lý Cr(VI) hoặc MB;

C_0: Nồng độ MB/Cr(VI) trong dung dịch trước xử lý

C_t: Nồng độ MB/Cr(VI) trong dung dịch sau xử lý.

Các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng xử lý MB/Cr(VI) như pH, nồng độ MB/Cr(VI) ban đầu và liều lượng mẫu vật liệu đều được khảo sát.

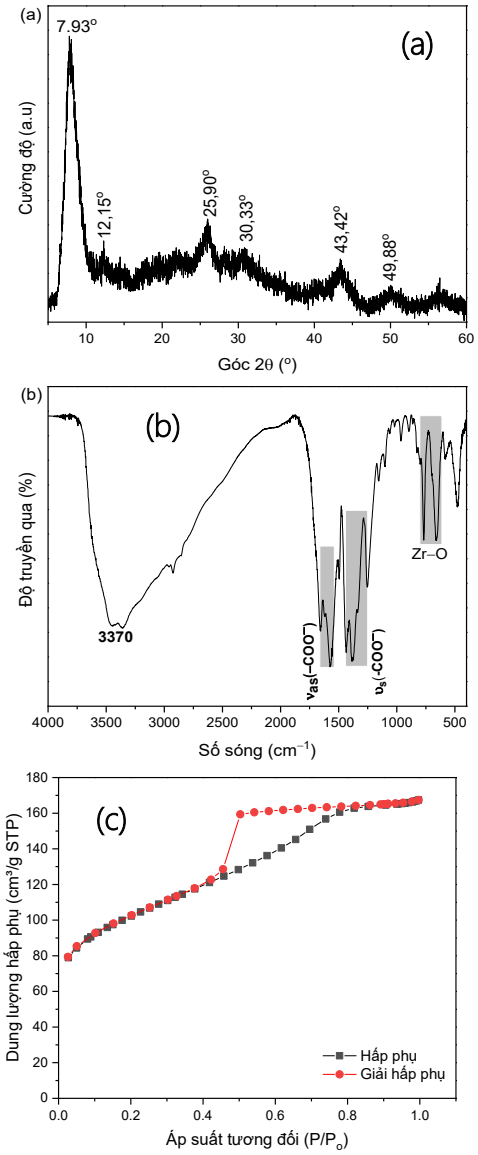
Kết quả và thảo luận

Các phương pháp đặc trưng vật liệu

Giản đồ XRD của vật liệu UiO-66-NH_2 quan sát thấy các đỉnh nhiễu xạ ở 2θ ~ 7,93°, 12,15°, 25,90°, 30,33°, 43,42° và 49,88° được gán cho các peak đặc trưng của UiO-66-NH_2 (Hình 1a) [10]. Ngoài ra, các đỉnh nhiễu xạ của vật liệu UiO-66-NH_2 có độ rộng lớn cho thấy độ kết tinh thấp và kích thước hạt nhỏ.

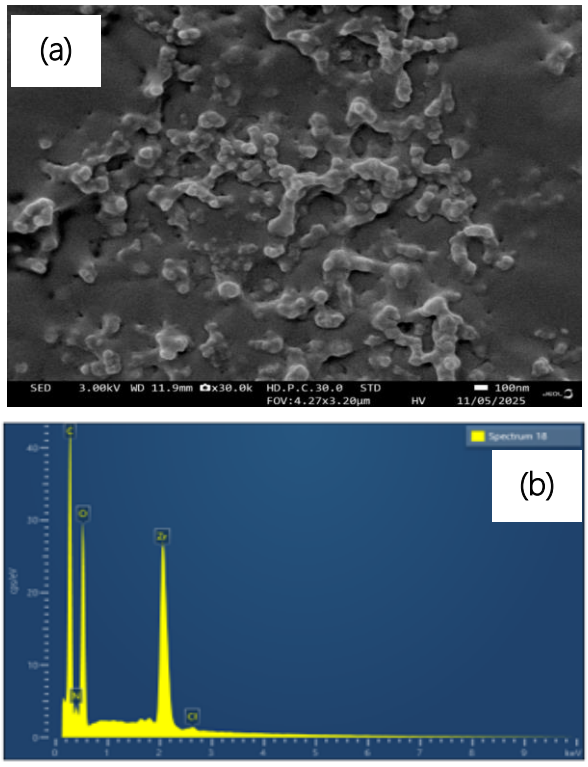
Phổ FTIR của vật liệu UiO-66-NH_2 quan sát thấy các dao động ở số sóng 3370 cm^{-1} được gán cho dao động kéo dài N–H của nhóm chức amin, chứng tỏ sự

hiện diện của axit 2-aminoterephthalic trong vật liệu UiO-66-NH_2. Các dao động trong khoảng số sóng 1400–1600 cm^{-1} được gán cho các dao động C=C thơm, dao động kéo dài C=O và các nhóm carboxylate. Các đỉnh dao động ở 1383 cm^{-1} cho thấy liên kết cộng hóa trị giữa N và C thơm. Các cụm Zr-O được xác nhận bằng các đỉnh dao động ở 765 cm^{-1}, đại diện cho dao động kéo dài μ_3-O của Zr-O trong cấu trúc UiO-66-NH_2 [10].



Hình 1: Giản đồ XRD (a) và phổ FTIR (b) của vật liệu UiO-66-NH_2 và (c) Đường đẳng nhiệt hấp phụ - giải hấp phụ N_2 của vật liệu UiO-66-NH_2

Hình 1c đường đẳng nhiệt hấp phụ - giải hấp phụ N_2 được xếp vào loại IV, phân loại theo IUPAC, kết quả này phù hợp với báo cáo của Manpreet Kaur và cộng sự [10]. Quan sát thấy vòng trễ xuất hiện ở áp suất tương đối cao đặc trưng của vật liệu có kích thước mao quản trung bình. Vật liệu UiO-66-NH_2 có diện tích bề mặt 344 m^2/g và thể tích mao quản 0,204 cm^3/g và kích thước mao quản 3,88 nm.



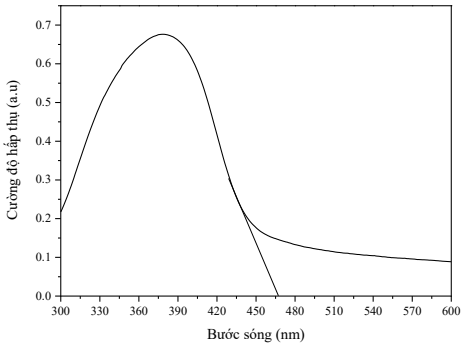
Hình 2: (a) Ảnh SEM và (b) Phổ EDX vật liệu UiO66-NH_2

Ảnh SEM của vật liệu UiO66-NH_2 cho thấy các tinh thể MOFs có kích thước khoảng 50-100 nm và các tinh thể này liên kết với nhau thành các cụm hạt có kích thước hạt lớn hơn (Hình 2a).

Phổ EDX (hình 2b) xác nhận thành phần nguyên tố của vật liệu UiO-66-NH_2 bao gồm C, O, Zr, N và Cl với hàm lượng tương ứng là 48,0%; 28,0%; 16,7%; 7,1% và 0,2%. Sự hiện diện của Cl trong vật liệu UiO-66-NH_2 có khả năng bắt nguồn từ tiền chất $ZrCl_4$ sử dụng trong quá trình tổng hợp, các ion Cl còn tồn dư bị mắc kẹt trong hệ thống mao quản của vật liệu.

Khả năng hấp thụ ánh sáng nhìn thấy và năng lượng vùng cấm của vật liệu UiO-66-NH_2 được xác định bằng phổ UV-Vis DRS được trình bày trong Hình 3. Kết quả tại hình 3 xác nhận vật liệu UiO-66-NH_2 có khả năng hấp thụ vùng ánh sáng nhìn thấy và tử ngoại. Năng lượng vùng cấm của liệu UiO-66-NH_2 được xác định bằng phương pháp Tauc plot khoảng 2,65 eV, rất phù hợp để sử dụng làm chất xúc tác quang. Như vậy, việc gán các nhóm chức –NH_2 trong linker hữu cơ để tổng hợp UiO-66-NH_2 đã làm giảm đáng kể năng lượng vùng cấm của UiO-66 (lưu ý, UiO-66 có năng lượng vùng cấm cao, khoảng 3,4 eV).

https://doi.org/10.62239/jca.2026.015



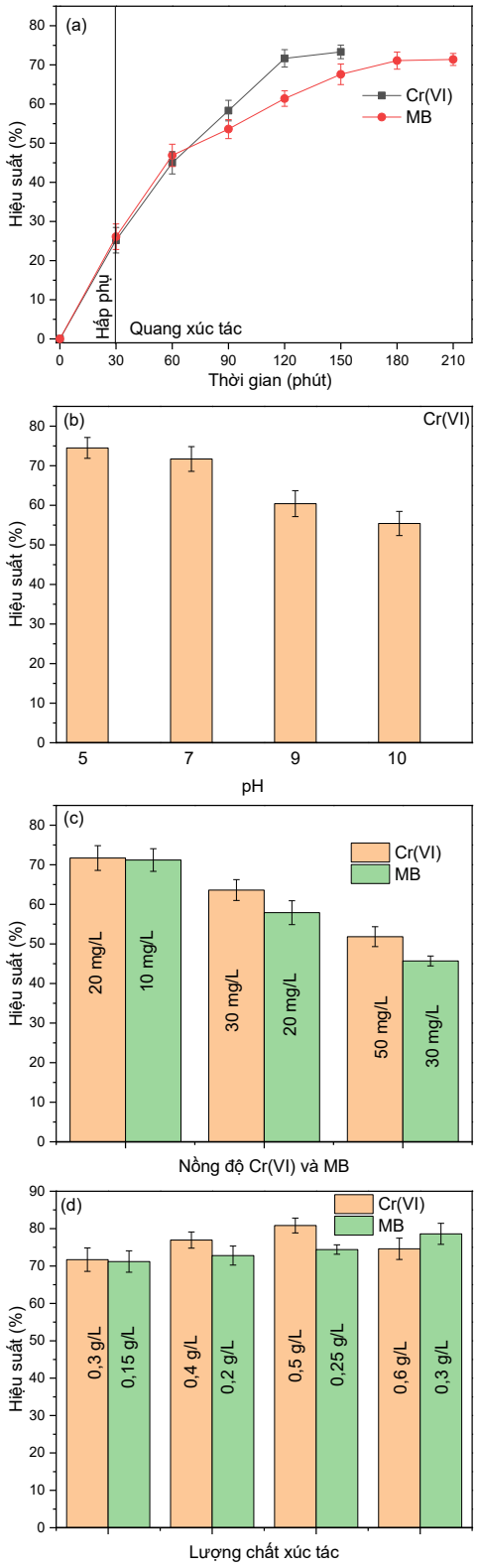
Hình 3: Phổ UV-Vis DRS của UiO66-NH_2

Đánh giá khả năng khử Cr(VI) và xử lý MB

Vật liệu UiO-66-NH_2 được sử dụng để đánh giá khả năng khử Cr(VI) và xử lý MB trong điều kiện chiếu xạ ánh sáng nhìn thấy.

Trong Hình 4a cho thấy vật liệu UiO-66-NH2 có khả năng hấp phụ Cr(VI) và MB đạt hiệu suất 25,2% và 26,1 % sau 30 phút hấp phụ., điều này giải thích bởi vật liệu UiO-66-NH_2 có diện tích bề mặt cao. Hình 4a xác nhận thời gian phản ứng tăng dẫn đến hiệu suất phản ứng khử Cr(VI) tăng lên đến 71,7% sau 120 phút chiếu xạ ánh sáng nhìn thấy. Tương tự, hiệu suất phản ứng quang xúc tác phân hủy MB đạt 71,1% sau 180 phút phản ứng. Tuy nhiên, việc tăng thời gian phản ứng từ 120 lên 150 phút không làm ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả khử Cr(VI), hiệu suất phản ứng tăng từ 71,7% lên 73,3%, tương ứng. Như vậy, việc tăng thời gian phản ứng lên 150 phút và 210 phút không làm tăng đáng kể hiệu quả khử Cr(VI) và xử lý MB, tương ứng. Do đó nghiên cứu này lựa chọn thời gian phản ứng là 120 phút và 180 phút phản ứng để khảo sát ảnh hưởng pH dung dịch phản ứng, nồng độ Cr(VI) và MB và lượng chất xúc tác.

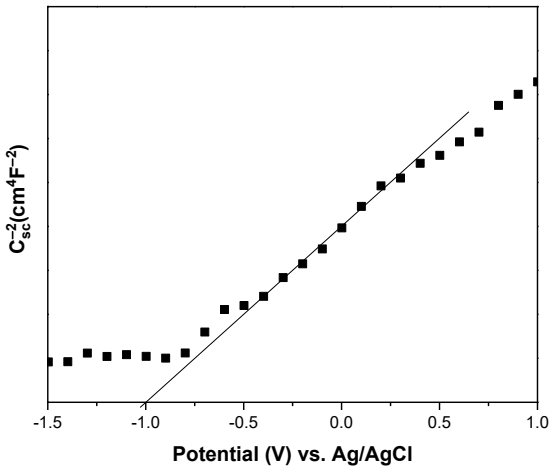
Giá trị pH của dung dịch phản ứng ảnh hưởng đến hiệu quả của quá trình quang xúc tác xử lý Cr(VI), do giá trị pH ảnh hưởng đến diện tích bề mặt của chất xúc tác, dẫn đến sự tương tác của chất xúc tác và Cr(VI) bị ảnh hưởng. Hình 4b cho thấy hiệu quả xử lý Cr(VI) đạt 74.5%, 71,7% và 60.4% khi pH ở 5, 7 và 10, tương ứng. Trong điều kiện hệ phản ứng có tính acid (pH thấp) một lượng lớn ion H^+ tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình chuyển hóa Cr(VI) thành Cr(III) [7]. Ngược lại, trong điều kiện hệ phản ứng có giá trị pH cao (môi trường base), Cr(VI) sau khi bị khử về Cr(III) trong môi trường có giá trị pH cao (môi trường base) dễ dàng hình thành $Cr(OH)_3$, dẫn đến hoạt động xúc tác giảm đáng kể [7]. Kết quả cho thấy khả năng xử lý Cr(VI) ở pH = 5 cao hơn không đáng kể so với ở pH = 7. Do môi trường trung tính (pH = 7) phản ánh sát hơn các điều kiện xử lý nước thải trong thực tế, giá trị này đã được lựa chọn để tiếp tục khảo sát ảnh hưởng của nồng độ Cr(VI) và hàm lượng xúc tác đến hiệu suất loại bỏ Cr(VI) và MB.



Hình 4: (a) Hiệu quả xử lý Cr(VI) và MB trên chất xúc tác UiO-66-NH_2, ảnh hưởng của pH (b), nồng độ ban đầu của MB và Cr(VI) (c) và lượng chất xúc tác (d) trên vật liệu UiO-66-NH_2

Nồng độ Cr(VI) ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả xử lý Cr(VI) và MB của vật liệu UiO-66-NH_2 được trình bày trong Hình 4c. Hình 4c xác nhận rằng khi nồng độ chất ô nhiễm tăng (Cr(VI) hoặc MB), hiệu quả xử lý Cr(VI)/MB giảm do nồng độ Cr(VI) và MB cao thì cần phải có thêm thời gian để xử lý. Cụ thể, hiệu quả xử lý Cr(VI) với các nồng độ Cr(VI) là 20, 30 và 50 mg/L đạt lần lượt 71,7%, 64.2% và 54.6% sau 120 phút phản ứng, tương ứng. Tương tự, hiệu quả xử lý MB với các nồng độ Cr(VI) là 10, 20 và 30 mg/L đạt lần lượt 71,1%, 58,5% và 45,6% sau 180 phút phản ứng, tương ứng.

Ảnh hưởng của khối lượng chất xúc tác quang UiO-66-NH_2 đến hiệu quả xử lý Cr(VI) và MB được trình bày ở Hình 4d. Hình 4d cho thấy khi nồng độ chất xúc tác quang UiO-66-NH_2 tăng từ 0,3 lên 0,5 g/L, hiệu quả xử lý Cr(VI) tăng từ 71,3% lên 80,8%, tương ứng. Tương tự, lượng chất xúc tác quang UiO-66-NH_2 tăng từ 0.15 g/L lên 0.3 g/L, hiệu quả xử lý MB tăng từ 71,7% lên 78,4% sau 180 phút chiếu xạ ánh sáng nhìn thấy, tương ứng. Tuy nhiên, khi khối lượng chất xúc tác quang UiO-66-NH_2 tăng lên 0,6 g/L, hiệu suất xử lý Cr(VI) giảm nhẹ, có thể do nồng độ chất xúc tác quang tăng quá mức làm khả năng hấp thụ ánh sáng hiệu quả của chất xúc tác giảm, dẫn đến quá trình phân tách điện tử và lỗ trống giảm [11]. Như vậy, ở điều kiện tối ưu cho phản ứng khử Cr(VI) thành Cr(III), chất xúc tác quang UiO-66-NH_2 đã loại bỏ 80,8% Cr(VI) sau 120 phút phản ứng và liều lượng chất xúc tác 0.5 g/L, nồng độ Cr(VI) là 20 mg/L, pH = 7, công suất chiếu xạ ánh sáng nhìn thấy đèn Xenon 300 W, ở nhiệt độ 25 °C. Hiệu suất khử Cr(VI) đạt 80.8% của vật liệu UiO-66-NH_2 trong nghiên cứu này hoàn toàn tương đương, thậm chí vượt trội hơn một số nghiên cứu đã công bố trước đây như vật liệu $CuInS_2$ (51%) [7], ZnO/rGO (70%) [12], $ZnFe_2O_4$ (75%) [13].



Hình 5: Đường Mott-Schottky của vật liệu UiO-66-NH_2

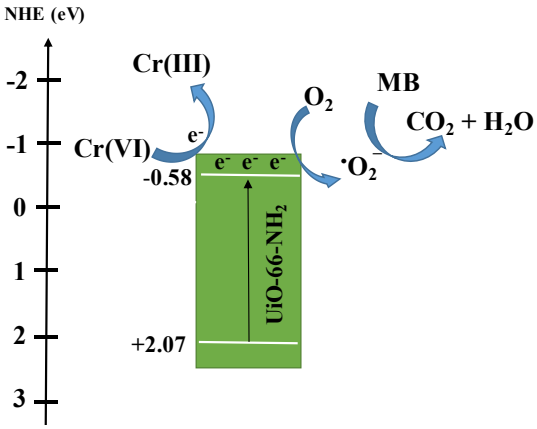
Hình 5 cho thấy vật liệu UiO-66-NH_2 có độ đốc âm chứng minh UiO-66-NH_2 là chất bán dẫn loại n [14]. Điện thế dải phẳng của các vật liệu UiO-66-NH_2 so với điện cực Ag/AgCl là –0,99 eV, tương ứng với -0.38 eV so với điện cực tiêu chuẩn hidro (NHE). Vùng dẫn (CB) của vật liệu bán dẫn loại n có độ rộng dải phẳng nằm trong khoảng từ 0,1 đến 0,2 nên công trình này lựa chọn là 0,2 eV. Giá trị CB, VB được xác định dựa trên mối quan hệ của năng lượng vùng cấm (E_g) với CB và VB theo công thức (2):

$$E_{VB} = E_g - E_{CB} \quad \text{(Eq. 2)}$$

Do đó, giá trị CB và VB của vật liệu UiO-66-NH_2 lần lượt là -0.58 và 2,07 eV, tương ứng.

Trên cơ sở tính toán vùng hóa trị, vùng dẫn, nghiên cứu đề xuất cơ chế hình thành các gốc tham gia phản ứng (Hình 6). Đầu tiên, dưới tác động của ánh sáng nhìn thấy có năng lượng lớn hơn năng lượng vùng cấm của vật liệu UiO-66-NH_2 (2,65 eV, Eq. 3). UiO-66-NH_2 + hv → UiO-66-NH_2 ($e^- + h^+$) (Eq. 3)

Điện tử và lỗ trống bị kích thích và phân tách thành electron và lỗ trống (h^+). Điện tử di chuyển lên vùng dẫn của UiO-66-NH_2 có năng lượng lớn hơn –0,33 eV sẽ tham gia phản ứng với O_2 hấp phụ trên bề mặt chất xúc tác để hình thành gốc $^{\bullet}O_2^-$ hoặc khử Cr(VI) thành Cr(III) (Phương trình 4 và 5).



Hình 6: Đường Mott-Schottky và (b) cấu trúc dải của vật liệu UiO-66-NH_2

$e^- + O_2 \longrightarrow {}^{\bullet}O_2^-$ ($O_2/{}^{\bullet}O_2^- = -0,33$ eV, Eq. 4);

e^- + Cr(VI) → Cr(III) (Eq. 5)

Tại vùng hóa trị của UiO-66-NH_2 (2,07 eV), lỗ trống có năng lượng thấp hơn năng lượng của $H_2O/{}^{\bullet}OH$ (2,4 eV), do đó h^+ không thể phản ứng với H_2O được hấp phụ trên bề mặt để sinh ra gốc $^{\bullet}OH$. Cuối cùng, các gốc phản ứng như gốc $^{\bullet}O_2^-$ và electron tham gia phản ứng khử Cr(VI) thành Cr(III) và phân hủy MB thành các sản phẩm ít độc hại hơn (Eq. 6)

$^{\bullet}O_2^-$ và e^- + Cr(VI) or MB → Cr(III) và sản phẩm (Eq. 6)

https://doi.org/10.62239/jca.2026.015

Kết luận

Trong nghiên cứu này, vật liệu UiO-66-NH_2 đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp nhiệt dung môi có diện tích bề mặt 344 m^2/g, thể tích mao quản 0,204 cm^3/g và năng lượng vùng cấm 2,65 eV. Vật liệu UiO-66-NH_2 có khả năng xử lý 80,8% Cr(VI) và 78,4% MB sau 120 và 180 phút chiếu xạ ánh sáng nhìn thấy trong điều kiện tối ưu.

Tài liệu tham khảo

1. Q. Li, X. Zhang, Z. Xiong, Q. Liao, M. Si, Z. Yang, J. Hazard. Mater., 490 (2025) 137736. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137736
2. C. Wang, X. Du, J. Li, X. Guo, P. Wang, J. Zhang, Appl. Catal. B Environ., 193 (2016) 198-216. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.04.030
3. Z. Li, X. Zhu, X. Wei, H. Zhang, N. Cao, X. Shi, B. Sun, J. Environ. Chem. Eng., 13(1) (2025) 115893. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115893
4. M.B. Nguyen, L.H.T. Nguyen, M.T. Le, N.Q. Tran, N.H.T. Tran, P.H. Tran, A.T.T. Pham, L.D. Tran, T.L.H. Doan, J. Ind. Eng. Chem., 134 (2024) 217-230. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.12.052
5. S. Zhang, L. Li, Z. Zhao, Y. Li, L. Shen, S. Zhang, Sep. Purif. Technol., 362 (2025) 131809. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131809
6. T.T. My, N.M. My, T.T. Quyen, B.T.Q. Truong, N.T. Mai, T.N. Don, Vietnam J. Catal. Adsorpt., 11(3) (2022) 22-27. https://doi.org/10.51316/jca.2022.044
7. F. Wang, Y. Yang, X. Li, W. Huang, K. Lu, S. Ouyang, W. Xiang, C. Zhou, C. Yu, M. Zhou, K. Yang, J. Environ. Chem. Eng., 12(6) (2024) 114788. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114788
8. F. Deng, X. Lu, Y. Luo, J. Wang, W. Che, R. Yang, X. Luo, Chem. Eng. J., 361 (2019) 1451-1461. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.176
9. D. Van-pham, P. Thi, Y. Nhi, T. Vu, B. Long, C. Nguyen, Mater. Lett., 326 (2022) 132930. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132930
10. M. Kaur, S. Kumar, M. Sushil, K. Kansal, Environ. Sci. Pollut. Res., 30(35) (2023) 8464-8484. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18629-w
11. H.T. Vu, G.T.T. Pham, T.L.H. Doan, T.D. Lam, N.T. Van, N.V. Manh, P.T. Quyen, N.D. Hai, H.V. Doan, M.B. Nguyen, J. Taiwan Inst. Chem. Eng., 161 (2024) 105518. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105518
12. S. Srirattanapibul, I. Tang, S. Thongmee, Mater. Res. Bull., 122 (2020) 110705. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2019.110705
13. G. Rekhila, Y. Bessekhouad, M. Trari, Environ. Technol. Innov., 5 (2016) 127-135. https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.01.007
14. X. Rao, H. Dou, D. Long, Y. Zhang, Chemosphere, 244 (2020) 125462. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125462