

Tổng hợp chất xúc tác quang ZnO/BaTiO₃ với hiệu quả cải thiện sự phân hủy MB dưới ánh sáng mặt trời

Synthesis ZnO/BaTiO₃ heterostructured photocatalyst with improved efficiency in MB degradation under sunlight

Hồ Thị Thành¹, Nguyễn Thị Việt Nga^{2*}, Hoàng Nữ Thủy Liên¹, Nguyễn Văn Kim^{1*}

¹Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Quy Nhơn - 170 An Dương Vương, Quy Nhơn, Bình Định

²Khoa Sư phạm Trường Đại học Quy Nhơn - 170 An Dương Vương, Quy Nhơn, Bình Định

*Email: nguyenvankim@qnu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 22/6/2022

Accepted: 22/7/2022

Published: 30/7/2022

Keywords:

ZnO/BaTiO₃, photocatalyst, methylenblue, sunlight.

ABSTRACT

Heterostructured ZnO/BaTiO₃ composites were successfully prepared with varying contents of BaTiO₃ via a mixed solvent-thermal method. The samples are denoted as ZBTO-x:y, where x:y is weight ratio of ZnO và BaTiO₃ (x:y = 1:2, 1:3 và 1:5) in the reaction mixtures. The obtained materials were characterized by X-Ray diffraction (XRD), infrared spectra (IR), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), scanning electron microscopy (SEM). The photocatalytic activity of ZBTO-x:y samples was assessed by degradation of methylene blue in aqueous solution under sunlight. Among them, ZBTO-1:3 displayed the best photocatalytic activity. The enhancement in photocatalytic activity for the ZBTO-1:3 was observed, which can be attributed to the presence of BaTiO₃ in the materials.

Giới thiệu chung

Xúc tác quang được xem là kỹ thuật “xanh”, gây được sự chú ý lớn về hiệu quả và khả năng ứng dụng rộng rãi để loại bỏ các hóa chất độc hại trong môi trường [1–3].

Gần đây, các vật liệu bán dẫn được sử dụng làm chất xúc tác quang là các oxide kim loại như SnO₂, TiO₂, ZnO, WO₃ [2, 3]. Song song cùng với các oxide, hệ vật liệu có cấu trúc perovskite dạng ABO₃ (với A: Sr, Ba, Pb, Ca và B: Ti) [4–6] mà đặc biệt là BaTiO₃ cũng được nghiên cứu khá nhiều [7, 8].

ZnO và BaTiO₃ được biết đến là vật liệu bán thể hệ thứ hai sau TiO₂. Chúng được ứng dụng nhiều trong các

lĩnh vực khác nhau [9, 10], đặc biệt là lĩnh vực xúc tác quang. ZnO và BaTiO₃ được đánh giá là những vật liệu xúc tác quang đầy tiềm năng. Tuy nhiên, bên cạnh việc sở hữu những ưu điểm nổi bật, chúng là những vật liệu có năng lượng vùng cấm tương đối rộng (3,25 eV đối với ZnO [11] và 3,2 eV đối với BaTiO₃ [12]), phổ hấp thụ ánh sáng chủ yếu nằm ở vùng tử ngoại, có sự tái tổ hợp nhanh cặp electron – lỗ trống quang sinh trong quá trình quang xúc tác. Điều này làm hạn chế khả năng ứng dụng chúng vào thực tiễn ở dạng tinh khiết. Để khắc phục những nhược điểm này, đã có nhiều công trình được công bố bằng cách lai ghép ZnO với BaTiO₃ hoặc với các chất bán dẫn khác nhằm tạo ra những vật liệu có hoạt tính xúc tác quang vượt trội [13, 14].

Trong công bố này, nhóm nghiên cứu tiến hành lai ghép ZnO với BaTiO₃ nhằm tạo ra một loại vật liệu mới, có hoạt tính xúc tác quang tốt, khắc phục những nhược điểm của các vật liệu đơn lẻ. Đây là một hướng đi mới đầy hứa hẹn, đang được các nhà khoa học vật liệu rất quan tâm.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất

Các hóa chất được sử dụng trong nghiên cứu này đều được mua từ hãng Sigma Aldrich (Đức) bao gồm zinc acetate dihydrate (Zn(CH₃COO)₂·2H₂O, ≥ 99,0%), Titanium (IV) chloride (TiCl₄, ≥ 99,9%), barium nitrate (Ba(NO₃)₂, ≥ 99,0%), sodium hydroxide (NaOH, ≥ 97,0%), isopropyl alcohol ((CH₃)₂CHOH, ≥ 99,5%), methylene blue hydrate (C₁₆H₁₈ClN₃S·xH₂O, ≥ 97%), ethanol (C₂H₅OH, ≥ 99,9%), 1,4-benzoquinone (BQ, ≥ 99,5%), ammonium oxalate (AO, ≥ 99%), tert-butyl alcohol (TBA, ≥ 99%), dimethyl sulfoxide (DMSO, ≥ 99,9%). Tất cả các hóa chất đều thuộc loại có độ tinh khiết cao.

Phương pháp tổng hợp vật liệu

Tổng hợp ZnO: Cho 5 gam zinc acetate dihydrate vào cối nghiền đến độ mịn cần thiết, tiến hành nung ở 550 °C trong 4 giờ. Để nguội mẫu tự nhiên đến nhiệt độ phòng. Chất rắn thu được đem rửa sạch nhiều lần bằng ethanol, tiếp tục đem sấy khô mẫu ở 80 °C trong 12 giờ. Nghiền mịn mẫu thu được là ZnO.

Tổng hợp BaTiO₃: Chuẩn bị dung dịch A: cho một lượng Ba(NO₃)₂ hòa tan vào 46,6 mL nước cất đến khi đạt dung dịch bão hòa, ở nhiệt độ phòng. Chuẩn bị dung dịch B: Cho 5,6 mL isopropanol và 2 mL TiCl₄, hòa tan trong 39 mL ethanol khan tạo thành dung dịch trong suốt. Hỗn hợp được khuấy trong 2 giờ. Nhỏ từ từ dung dịch A vào dung dịch B, thêm 10 mL dung dịch NaOH 10M, tiếp tục khuấy trong 1 giờ nữa. Dung dịch thu được cho vào autoclave, đậy kín và đun nóng ở nhiệt độ 200 °C trong 24 giờ. Kết tủa thu được đem ly tâm, rửa sạch bằng nước cất cho đến khi pH = 7. Sau đó, đem sấy ở 80 °C trong 10 giờ. Chất bột thu được là BaTiO₃.

Tổng hợp ZnO/BaTiO₃: Composite ZnO/BaTiO₃ được điều chế bằng phương pháp thủy nhiệt. Hỗn hợp ZnO và BaTiO₃ được trộn theo tỉ lệ khối lượng ZnO:BaTiO₃ là 1:2; 1:3; 1:5. Nghiền hỗn hợp đến độ mịn cần thiết. Hỗn hợp thu được đem phân tán trong 100 mL nước

cất, khuấy từ liên tục trong 4 giờ cho đồng nhất. Chuyển toàn bộ dung dịch vào bộ thủy nhiệt autoclave, đậy kín và gia nhiệt đến nhiệt độ 200 °C và duy trì trong 24 giờ. Tiếp tục đem ly tâm lấy chất rắn, rửa nhiều lần bằng nước cất đến pH=7, sau đó đem sấy khô ở 80 °C trong 24 giờ. Chất rắn thu được kí hiệu ZBTO-1:2, ZBTO-1:3, ZBTO-1:5 tương ứng với thành phần khối lượng của ZnO và BaTiO₃.

Phương pháp đặc trưng

Nhiều xạ tia X (XRD) của các mẫu được đo trên máy Brucker D8 Advance, ống phát tia X bằng Cu có bước sóng λ = 1,540 Å, điện áp 30kV, cường độ dòng ống phát 0,01A. Phổ hồng ngoại (IR) của mẫu vật liệu được ghi trên máy GX - PerkinElmer. Phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS) và ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) được đo trên máy Nova Nano SEM 450. Nồng độ dung dịch MB được xác định bằng phương pháp đo quang trên máy UV-vis Jenway 6800.

Khảo sát hoạt tính xúc tác quang

Nồng độ dung dịch MB được phân hủy bởi quá trình quang xúc tác ở các thời điểm khác nhau dựa trên đường chuẩn được thiết lập bởi mối quan hệ giữa độ hấp thụ theo nồng độ trên máy UV-vis Jenway 6800, tại bước sóng 663 nm. Hiệu suất phân hủy MB của các vật liệu được xác định theo công thức:

$$H = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%$$

trong đó, C₀ là nồng độ đầu của MB tại thời điểm đạt cân bằng hấp phụ – giải hấp phụ và C_t là nồng độ MB tại từng thời điểm khảo sát.

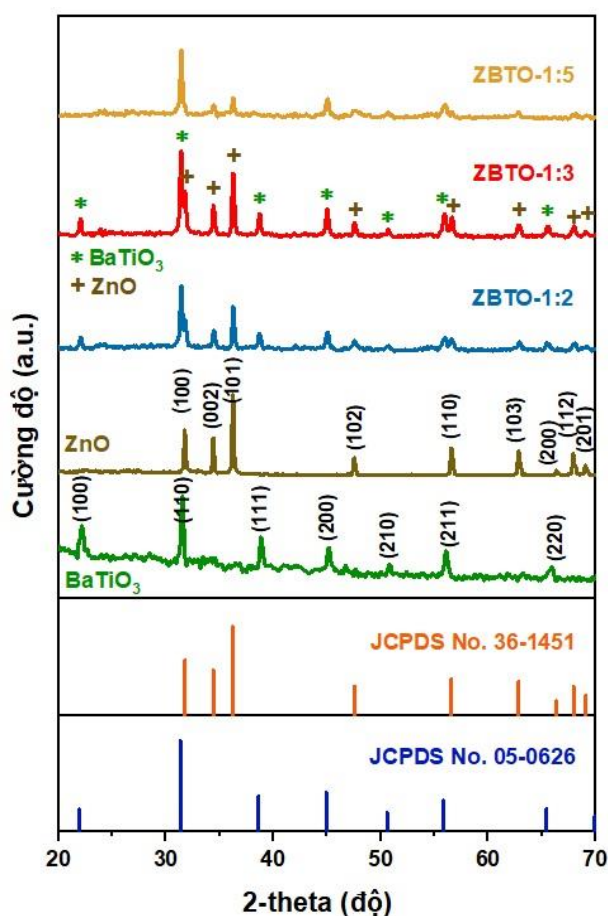
Kết quả và thảo luận

Đặc trưng vật liệu

Kết quả đặc trưng nhiễu xạ XRD của các mẫu ZnO, BaTiO₃ và ZBTO-1:2, ZBTO-1:3, ZBTO-1:5 được bày ở Hình 1.

Trên giản đồ XRD cho thấy, đối với mẫu ZnO, hiển thị đầy đủ các peak tại 2θ = 31,74°; 34,45°; 36,25°; 47,53°; 56,67°; 62,92°; 66,35°; 67,88° và 69,18° tương ứng với các mặt (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112) và (201) là các nhiễu xạ đặc trưng cho cấu trúc lục giác của ZnO (theo chuẩn JCPDS No. 36-1451) [15]. Đối với mẫu BaTiO₃, hiển thị đầy đủ các peak tại 2θ = 22,16°; 31,50°; 38,82°; 45,09°; 50,75°; 56,07° và 65,87° tương

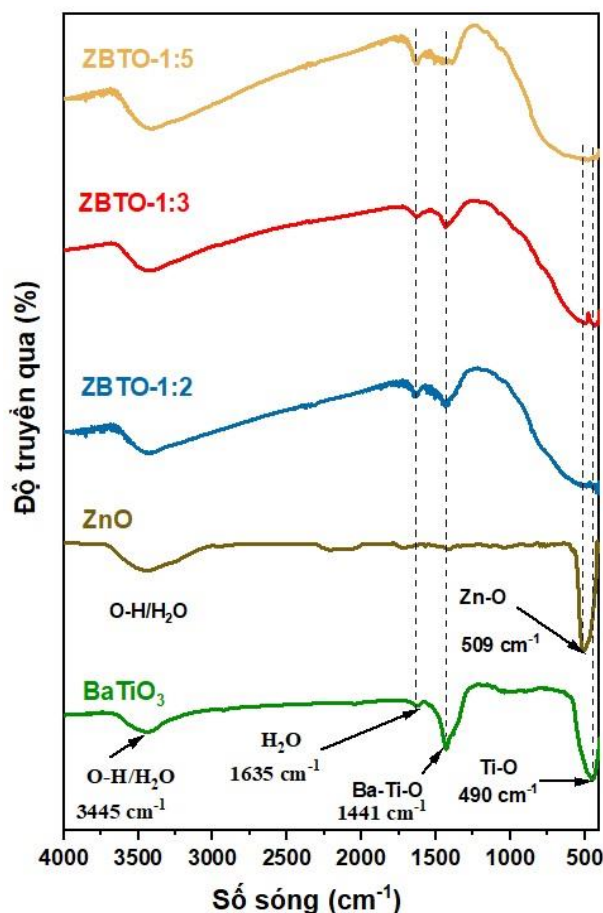
ứng với các mặt (100), (110), (111), (200), (210), (211) và (220) là các nhiễu xạ đặc trưng cho cấu trúc tứ giác của BaTiO₃ (theo chuẩn JCPDS No. 05-0626) [15, 16]. Đối với các mẫu ZBTO, mẫu ZBTO-1:3 chứa đầy đủ các peak nhiễu xạ của ZnO và BaTiO₃. Ngoài ra, trên mẫu này không thấy xuất hiện pha tinh thể của bất kì chất khác. Điều này chứng tỏ, mẫu ZBTO-1:3 chỉ gồm hai thành phần là ZnO và BaTiO₃. Với hai mẫu ZBTO còn lại, các nhiễu xạ của ZnO và BaTiO₃ hiển thị không đầy đủ và khá yếu. Với kết quả này, mẫu ZBTO-1:3 có thể được xem là mẫu tốt nhất trong số các mẫu ZBTO được tổng hợp.



Hình 1: Giản đồ nhiễu xạ XRD của các mẫu vật liệu ZBTO-1:2, ZBTO-1:3, ZBTO-1:5, BaTiO₃ và ZnO

Phổ hồng ngoại của các mẫu ZnO, BaTiO₃, ZBTO-1:2, ZBTO-1:3 và ZBTO-1:5 được trình bày ở Hình 2. Đối với ZnO, dải hấp thụ tại 509 cm⁻¹ là dao động đặc trưng của liên kết Zn-O [17]. Ngoài ra, dải hấp thụ có số sóng từ 3100–3400 cm⁻¹ là dao động hóa trị của nhóm O-H của các phân tử nước hấp phụ vật lý trên bề mặt các hạt ZnO [17]. Đối với mẫu BaTiO₃, một dải hấp thụ rộng ở 3445 cm⁻¹ được quy cho dao động hóa trị của liên kết O-H của các phân tử H₂O hấp phụ trên bề mặt các hạt vật liệu và dao động của các liên kết hydro giữa chúng [18]. Một peak khác được quan sát thấy ở

số sóng 1634 cm⁻¹ cũng là dao động của các phân tử nước vật lý [19]. Hai peak mạnh ở 1441 cm⁻¹ và 490 cm⁻¹ là dao động của liên kết Ba-Ti-O và Ti-O, tương ứng [19, 20]. Đối với các mẫu ZBTO-1:2 và ZBTO-1:5, không xuất hiện dao động đặc trưng của liên kết Zn-O và Ti-O. Tuy nhiên, trên mẫu ZBTO-1:3 hiển thị đầy đủ các dao động đặc trưng của các liên kết này của ZnO và BaTiO₃. Mặt khác, cũng từ đặc trưng này cho thấy, dao động của các liên kết Zn-O và Ti-O trong mẫu ZBTO-1:3 có phần lệch về vùng có số sóng cao hơn so với chúng trong ZnO và BaTiO₃. Điều này chứng tỏ, đã có sự tương tác giữa các đơn phân ZnO và BaTiO₃ trong mẫu ZBTO-1:3. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với kết quả thu được từ nhiễu xạ XRD.

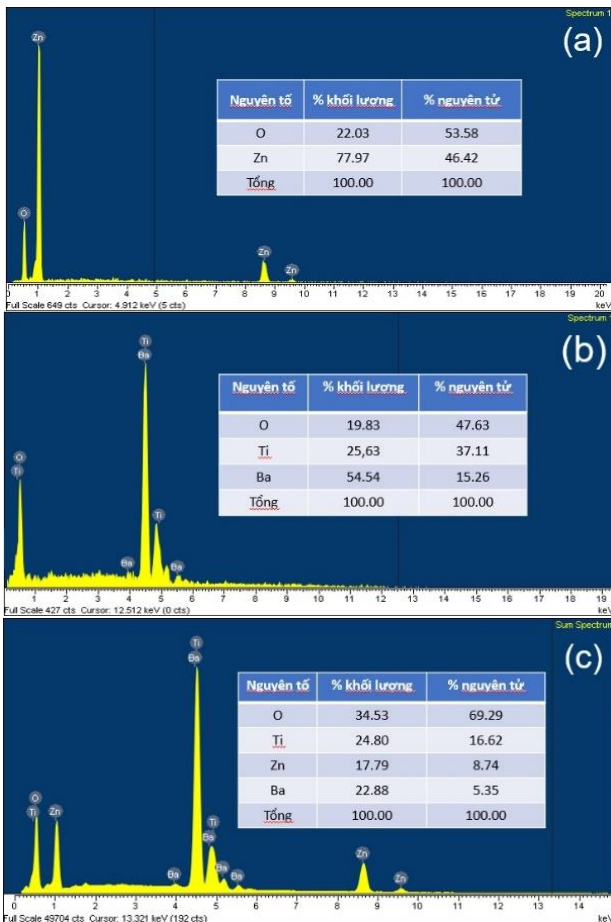


Hình 2: Phổ IR của các mẫu vật liệu ZnO, BaTiO₃, ZBTO-1:2, ZBTO-1:3, ZBTO-1:5

Từ kết quả đặc trưng XRD và IR chứng tỏ rằng, mẫu ZBTO-1:3 là mẫu tốt nhất hình thành composite ZnO/BaTiO₃. Vì vậy mẫu này được chọn để khảo sát các đặc trưng tiếp theo. Thành phần nguyên tố của các mẫu ZnO, BaTiO₃, ZBTO-1:3 được đặc trưng bởi phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS), kết quả được trình bày ở Hình 3.

Trên phổ tán xạ năng lượng tia X của các mẫu ZnO, BaTiO₃ và ZBTO-1:3, về mặt định tính chỉ xuất hiện

peak của các nguyên tố thành phần tương ứng của ZnO, BaTiO₃ và ZBTO-1:3 mà không thấy xuất hiện peak của bất kì nguyên tố nào khác. Kết quả này rất phù hợp với phương pháp đặc trưng XRD, IR. Điều này cho thấy, mẫu ZBTO-1:3 là khá tinh khiết. Đây là một trong những minh chứng bổ sung, chứng minh thêm cho sự tổng hợp thành công vật liệu composite ZnO/BaTiO₃. Cũng theo phương pháp đặc trưng này, thành phần khối lượng của các nguyên tố trong các mẫu cũng được xác định.

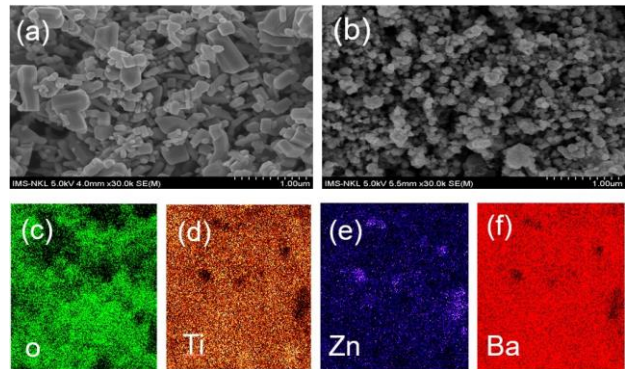


Hình 3: Phổ EDS của mẫu vật liệu ZnO (a) và BaTiO₃ (b), ZBTO-1:3 (c)

Hình thái, kích thước hạt của các mẫu vật liệu được khảo sát bởi kỹ thuật hiển vi điện tử quét (SEM), kết quả được trình bày ở Hình 4a-b.

Từ hình này cho thấy, hình thái bề mặt của hai vật liệu là hoàn khác nhau. Ở Hình 4a, các hạt ZnO có dạng hình trụ, có cạnh sắc nhọn, với kích thước phân bố chủ yếu tập trung khoảng 100–200 nm (tính theo thang đo). Kết quả này khá trùng khớp với một số tài liệu đã được công bố [21, 22]. Tuy nhiên, ở mẫu ZBTO-1:3 (Hình 4b), bề mặt là các hạt hình cầu, có kích thước từ 50–100 nm. Sự khác biệt về hình dạng của hai vật liệu này là do sự có mặt của BaTiO₃ trong ZBTO-1:3 gây

nên. Các hạt BaTiO₃ bao bọc các hạt ZnO để hình thành nên composite ZnO/BaTiO₃.

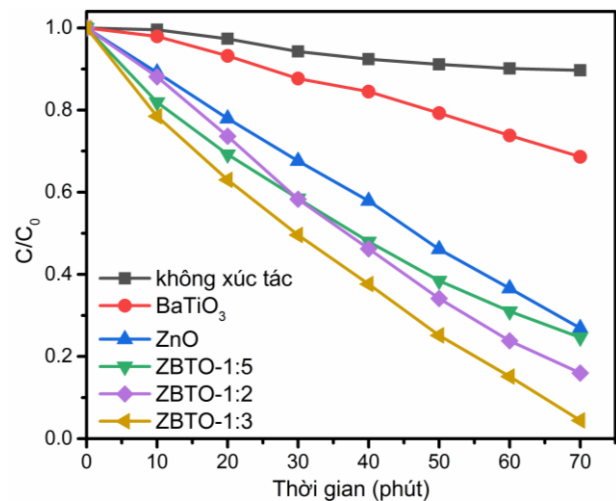


Hình 4: Ảnh SEM của mẫu vật liệu ZnO (a), ZBTO-1:3 (b) và EDS mapping của O, Ti, Zn, Ba

Ngoài ra, sự phân bố của các nguyên tố trong mẫu ZBTO-1:3 cũng được kiểm tra bằng cách sử dụng kỹ thuật EDS-mapping (Hình 4c-f). Từ hình cho thấy, sự phân bố của các nguyên tố O, Ti, Zn và Ba khá đồng đều trong mẫu vật liệu ZBTO-1:3.

Đánh giá hoạt tính xúc tác quang

Trên cơ sở thu được từ việc đặc trưng các vật liệu, nhóm nghiên cứu tiếp tục khảo sát hoạt tính xúc tác quang của vật liệu này bằng phản ứng phân hủy MB (10 mg/L) bởi ánh sáng mặt trời. Kết quả được trình bày ở Hình 5.

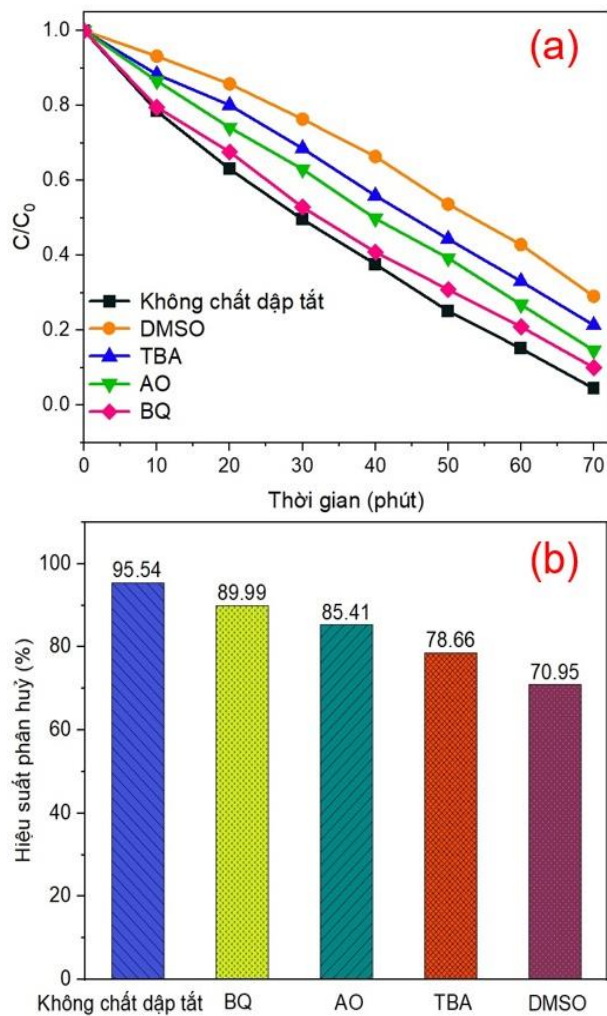


Hình 5: Sự phân hủy MB bởi các vật liệu ZnO, BaTiO₃ và ZBTO dưới sự chiếu xạ ánh sáng mặt trời (lượng xúc tác 0,02 gam, MB 10 mg/L)

Từ Hình 5 cho thấy, mẫu ZBTO-1:3 có hoạt tính xúc tác cao nhất. Sau 70 phút chiếu sáng, sự phân hủy MB trên mẫu này đạt 95,54%, giá trị này cao hơn nhiều so với mẫu ZBTO-1:2 (đạt 84,01%) và mẫu ZBTO-1:5 (đạt 75,36%). Kết quả này cho thấy rằng, các vật liệu ZBTO có hoạt tính quang xúc tác vượt trội so với vật liệu tiền

chất ZnO và BaTiO₃ riêng lẻ. Điều này được giải thích là do tác dụng hiệp trợ của ZnO và BaTiO₃ trong vật liệu ZBTO. Sự hiện diện của ZnO trong các ZBTO đã khắc phục được nhược điểm tái kết hợp electron – lỗ trống quang sinh thường xảy ra trong vật liệu bán dẫn riêng lẻ, vì vậy làm tăng hoạt tính xúc tác quang của vật liệu này mà đặc biệt là đối với mẫu ZBTO-1:3.

Mẫu ZBTO-1:3 được chọn để khảo sát cơ chế quang xúc tác của mẫu composite ZnO/BaTiO₃ đối với sự phân hủy MB. Để thực hiện điều này, vai trò của các gốc tự do được nghiên cứu bằng cách sử dụng chất dập tắt để loại bỏ các gốc tự do [23]. Trong thí nghiệm này, chúng tôi dùng tert-butyl alcohol (TBA) làm chất dập tắt gốc $\cdot\text{OH}$, 1,4-benzoquinone (BQ) dập tắt anion gốc $\cdot\text{O}_2^-$, ammonium oxalate (AO) dập tắt lỗ trống quang sinh h^+ và dimethyl sulfoxide (DMSO) dập tắt electron quang sinh e^- . Các dung dịch chất dập tắt với nồng độ đều 10 mmol/L, thể tích 2 mL được cho vào ngay từ thời điểm bắt đầu chiếu sáng.

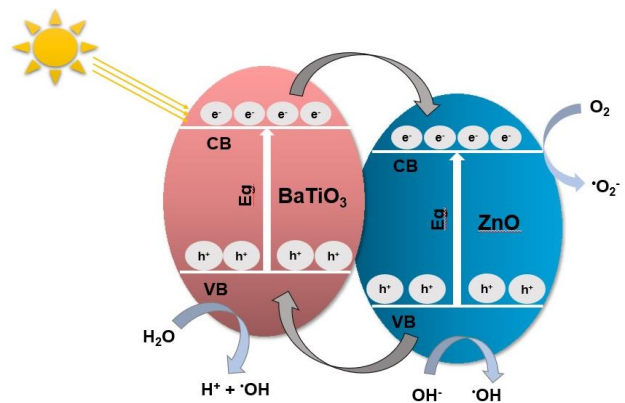


Hình 6: (a)-Ảnh hưởng của các chất dập tắt gốc tự do đến quá trình phân hủy MB bởi mẫu vật liệu ZBTO-1:3 dưới sự chiếu xạ ánh sáng mặt trời (lượng xúc tác 0,02

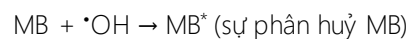
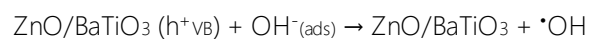
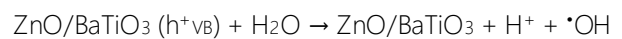
gam, MB 10 mg/L). (b)-Hiệu suất quang phân hủy dưới tác dụng của các chất dập tắt khác nhau

Từ Hình 6 cho thấy, với sự có mặt của các chất bắt gốc tự do, hiệu suất quang xúc tác phân hủy MB của mẫu vật liệu ZBTO-1:3 bị giảm hẳn. Sau khi bổ sung DMSO và TBA, hiệu suất phân hủy MB bởi mẫu vật liệu ZBTO-1:3 đã giảm mạnh từ 95,54% xuống còn 70,95% và 78,66%, tương ứng. Trong khi đó, sự có mặt của AO và BQ, hiệu suất phân hủy MB của mẫu ZBTO-1:3 không thay đổi nhiều, còn 85,41% và 89,99% tương ứng với AO và BQ. Điều này cho thấy, ảnh hưởng của DMSO và TBA là mạnh hơn, chứng tỏ electron quang sinh và $\cdot\text{OH}$ là tác nhân chính quyết định hiệu suất cũng như tốc độ phân hủy của toàn bộ quá trình.

Để làm rõ hơn về quá trình phân tách electron – lỗ trống quang sinh, hình thành các gốc tự do trong vật liệu composite ZnO/BaTiO₃ khi được chiếu sáng, nhóm nghiên cứu dẫn thêm tài liệu đã được công bố [14], kết quả xảy ra như sau:



Hình 7: Sơ đồ giải thích cơ chế phân tách electron – lỗ trống quang sinh của vật liệu ZnO/BaTiO₃ dưới chiếu xạ ánh sáng mặt trời [14]



Theo đó, khi được chiếu sáng, sự phân tách electron – lỗ trống quang sinh xảy ra ở bề mặt của các vật liệu thành phần ZnO và BaTiO₃ của composite ZnO/BaTiO₃. Ở vùng hoá trị (VB), h^+ sẽ tương tác với các phân tử H₂O để hình thành nên các gốc tự do $\cdot\text{OH}$, tiếp tục phân hủy MB. Đồng thời với quá trình này, các e^- sẽ di chuyển lên vùng dẫn (CB), tại đây, do sự chênh lệch thế giữa các vùng CB, electron trên vùng CB của BaTiO₃ thay vì quay trở lại vùng VB (tái kết hợp), nó sẽ di chuyển sang vùng VB của ZnO và di chuyển ra bề mặt vật liệu, điều này làm giảm quá trình tái tổ hợp

electron – lỗ trống quang sinh. Tại đây, các electron này sẽ tương tác với O₂ trong không khí hấp phụ trên bề mặt vật liệu để hình thành nên các gốc *O₂⁻ tiếp tục phân huỷ MB. Quá trình này được gọi là tác dụng hiệp trợ của hai thành ZnO và BaTiO₃ trong vật liệu composite ZnO/BaTiO₃.

Kết luận

Composite ZnO/BaTiO₃ đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt. Sản phẩm được đặc trưng và xác nhận bởi các phương pháp phân tích hóa lý như XRD, IR, EDS-mapping, SEM. Sự phân huỷ MB (10 mg/L) trong vòng 70 phút dưới chiếu xạ ánh sáng mặt trời bởi vật liệu ZnO/BaTiO₃ đạt 95,54%, cao hơn nhiều so với vật liệu riêng lẻ ZnO (73,09%) và BaTiO₃ (31,37%) ở cùng điều kiện khảo sát. Nghiên cứu này chứng minh rằng ZnO/BaTiO₃ là một vật liệu xúc tác quang tốt có thể ứng dụng để xử lý nước thải.

Lời cảm ơn

Các tác giả chân thành cảm ơn đề tài cấp Bộ mã số B2021-DQN-05 đã tài trợ một phần kinh phí cho việc thực hiện bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- Danilo spasio, Raffaele Marotta, Sixto Malato, Pilar Fernandez-Ibanez, Ilaria Di Somma, Applied Catalysis B: Environmental 170 (2015) 90–123. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.12.050>
- Mohammedsmael, Engy Elhaddad, Michael Wark, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 638, 2022, 128288. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128288>
- Ningna Bai, Xiangchun Liu, Zhengguang Li, Xinyu Ke, Kai Zhang & Qi Wu, Journal of Sol-Gel Science and Technology 99 (2021) 92–100. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10971-021-05552-8>
- Yan Y, Yang H, Yi Z, Li R and Wang X, Micromachines 10(4) (2019) 254. <https://doi.org/10.3390/mi10040254>
- Ha M N, Zhu F, Liu Z, Wang L, Liu L, Lu G et al, RSC Adv. 6 (2016) 21111-21118. <https://doi.org/10.1039/C6RA03472A>
- Devi L G and Nithya P M, Inorg. Chem. Front. 5 (2018) 127–138. <https://doi.org/10.1039/C7QI00590C>
- Nageri M, Shalet A B and Kumar V, J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 28 (2017) 9770–9776. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6729-5>
- Yongfei Cui, Joe Brisco, Yaqiong Wang, Nadezda V Tarakina and Steve Dunn, ACS Appl. Mater. Interfaces 9 (2017) 24518–24526. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b03523>
- Jiang, J., Pi, J., & Cai, J., Bioinorganic Chemistry and Applications 2018 (2018) 1–18. <https://doi.org/10.1155/2018/1062562>
- Zhou, Z., Tang, H., & Sodano, H. A., ACS Applied Materials & Interfaces 5(22) (2013) 11894–11899. <https://doi.org/10.1021/am403587q>
- Nguyễn Thị Việt Nga, Đỗ Thị Hồng Trâm, Nguyễn Bích Nhật, Trần Châu Giang, Trần Đình Thịnh, Trương Thanh Tâm, Nguyễn Văn Kim, Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption 10 (2021) 18–23. <https://doi.org/10.51316/jca.2021.084>
- Van Kim Nguyen, Viet Nga Nguyen Thi, Huu Ha Tran, Thu Phuong Tran Thi, Thanh Tam Truong, Vien Vo, Bull Mater Sci 44(1) (2021) 28. <https://doi.org/10.1007/s12034-020-02277-2>
- Shabina Kappadan, Sabu Thomas, Nandakumar Kalarikkal, Materials Chemistry and Physics 255 (2020) 123583. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123583>
- Yong-Por Ong, Li-Ngee Ho, Soon-An Ong, Johar Banjuraizah, Abdul Haqi Ibrahim, Sin-Li Lee, Noradiba Nordin, Chemosphere 219 (2019) 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.004>
- Pengrong Ren, Huiqing Fan, Xin Wang, Catalysis Communications 25 (2012) 32–35. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2012.04.003>
- S. Kappadan, S. Thomas, N. Kalarikkal, Materials Chemistry and Physics 255 (2020) 123583. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123583>
- Devina Rattan Paul, Shubham Gautam, Priyanka Panchal, Satya Pal Nehra, Pratibha Choudhary and Anshu Sharma, ACS Omega 5(8) (2020) 3828–3838. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02688>
- Ni Y, Zheng H, Xiang N, Yuan K and Hong J, RSC Adv. 5(10) (2015) 7245-7252. <https://doi.org/10.1039/C4RA13642J>
- Kappadan S, Gebreab T W, Thomas S and Kalarikkal N, Mater. Sci. Semicond. Process. 51 (2016) 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2016.04.019>
- Wang P, Fan C, Wang Y, Ding G and Yuan P, Mater. Res. Bull. 48 (2013) 869–877

- <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.11.075>
21. Nguyen Van Kim, Nguyen Thi Viet Nga, Tran Thi Thu Phuong, Nguyen Le Tuan, Vo Vien, Vietnam Journal of Chemistry 56(2) (2018) 220-225.
<https://doi.org/10.1002/vjch.201800017>
22. Noor Izzati Md Rosli; Sze-Mun Lam; Jin-Chung Sin; Ichikawa Satoshi; and Abdul Rahman Mohamed, J. Environ. Eng. 144(2) (2018) 04017091.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001300](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001300)
23. Shi L, Liang L, Ma J, Wang F and Sun J, Dalton Trans., 2014, 43, 7236.
<https://doi.org/10.1039/C4DT00087K>