

DOI: 10.58490/ctump.2025i93.4180

CHẾ TẠO VÀ KHẢO SÁT MỘT SỐ TÍNH CHẤT CỦA VẬT LIỆU TiO₂ TRONG QUANG XÚC TÁC PHÂN HỦY XANH METHYLENE

Trần Xuân Huy, Trần Quang Ngọc Sang, Vương Thị Thanh Thảo, Ngô Ngọc Uyên*

Trường Đại học Y Dược Cần Thơ

*Email: nnuyen@ctump.edu.vn

Ngày nhận bài: 12/9/2025

Ngày phản biện: 20/11/2025

Ngày duyệt đăng: 25/11/2025

TÓM TẮT

Đặt vấn đề: Công nghệ quang xúc tác vật liệu nano TiO₂ dạng dây trên ống (TNWs/TNAs) mọc trực tiếp trên đế titan được cho là có hiệu suất cao trong quang phân hủy xanh methylene - tác nhân ảnh hưởng xấu gây ô nhiễm nguồn nước và sức khỏe con người. **Mục tiêu nghiên cứu:** 1) Chế tạo vật liệu nano TiO₂ dạng dây trên ống bằng phương pháp anod hóa; 2) Khảo sát tính chất TNWs/TNAs trong quá trình quang xúc tác phân hủy xanh methylene (hình thái, thành phần hoá học, khả năng tái sử dụng của TNWs/TNAs trong quang xúc tác phân hủy xanh methylene). **Đối tượng và phương pháp nghiên cứu:** Chế tạo TNWs/TNAs bằng phương pháp anod hóa. Khảo sát tính chất vật liệu: dùng phổ nhiễu xạ tia X sử dụng bức xạ Cu K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), công thức Scherrer, kính hiển vi điện tử quét (SEM, JEOL JSM-6500), phổ phân tán năng lượng tia X (EDS) được trang bị SEM. Đánh giá tính ổn định của vật liệu dựa trên TiO₂ trong quang xúc tác phân hủy xanh methylene sau 5 chu kỳ sử dụng dựa trên quy luật động học Langmuir-Hinshelwood sau 2 giờ chiếu xạ UV. **Kết quả:** Tổng hợp thành công TNWs/TNAs pha anatase tinh khiết (kích thước tinh thể ~28,12 nm). Cấu trúc TNWs/TNAs (đường kính ~124,55 nm, độ dày màng ~4,8 μm) duy trì ổn định sau quá trình quang xúc tác. Hiệu suất phân hủy xanh methylene đạt ~59% sau 2 giờ chiếu xạ UV, và hằng số tốc độ phản ứng duy trì ~94,4% giá trị ban đầu sau 5 chu kỳ. **Kết luận:** TNWs/TNAs được tổng hợp sở hữu cấu trúc bền vững và thể hiện hiệu suất quang xúc tác ổn định trong phân hủy xanh methylene.

Từ khóa: TiO₂, TNWs/TNAs, quang xúc tác, xanh methylene.

ABSTRACT

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF TiO₂ FOR PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF METHYLENE BLUE

Tran Xuan Huy, Tran Quang Ngọc Sang, Vương Thị Thanh Thảo, Ngô Ngọc Uyên*

Can Tho University of Medicine and Pharmacy

Background: Photocatalytic technology using TiO₂ Nanowires on TiO₂ Nanotubes Arrays (TNWs/TNAs) grown directly on a titanium substrate is believed to have high efficiency in the photodegradation of methylene blue - a harmful agent causing water pollution and posing risks to human health. **Objectives:** 1) To synthesize TiO₂ Nanowires on TiO₂ Nanotubes Arrays by the anodization method; 2) To investigate the properties of TNWs/TNAs during the photocatalytic degradation of methylene blue (morphology, chemical composition, and reusability of TNWs/TNAs). **Material and methods:** TNWs/TNAs were synthesized using the anodization method. The material's properties were characterized using X-ray Diffraction (XRD) with Cu K α radiation ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) and the Scherrer formula, Scanning Electron Microscopy (SEM, JEOL JSM-6500), and Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) equipped on the SEM. The stability of the TiO₂-based material was evaluated in the photocatalytic degradation of methylene blue after 5 usage cycles, based on the Langmuir-Hinshelwood kinetic model after 2 hours of UV irradiation. **Results:** Pure anatase phase TNWs/TNAs was successfully synthesized (crystallite size ~ 28.12 nm). The TNWs/TNAs

structure (diameter ~ 124.55 nm, film thickness ~ 4.8 μ m) remained stable after the photocatalytic process. The methylene blue degradation efficiency reached approximately 59% after 2 hours of UV irradiation, and the reaction rate constant maintained about 94.4% of its initial value after 5 cycles. **Conclusion:** The synthesized TNWs/TNAs possesses a durable structure and exhibits stable photocatalytic efficiency in the degradation of methylene blue.

Keywords: TiO_2 , TNWs/TNAs, photocatalysis.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành dệt nhuộm tại Việt Nam phát triển nhanh nhưng gây ô nhiễm nghiêm trọng nguồn nước do chất thải nhuộm. Trong đó, methylene blue (MB) là thuốc nhuộm tổng hợp phổ biến trong ngành dệt may, thuộc nhóm thuốc nhuộm bazơ dị vòng thơm, tan tốt trong nước và bền ở điều kiện thường cũng như trong vùng ánh sáng khả kiến [1]. Tuy nhiên, việc xả thải MB vào nguồn nước với lượng lớn có thể gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe con người và hệ sinh thái [1]. Để xử lý các chất ô nhiễm trong nước, những năm gần đây, các vật liệu bán dẫn quang xúc tác như Titanium dioxide (TiO_2), Zinc oxide (ZnO), Cadmium sulfide (CdS) và Tungsten trioxide (WO_3) đã thu hút nhiều sự quan tâm trong lĩnh vực xử lý môi trường [2-4]. Khi được kích thích bởi ánh sáng, các hệ vật liệu này có khả năng hình thành các loài oxy hóa hoạt tính mạnh như $\bullet\text{OH}$ và $\text{O}_2\bullet^-$, góp phần thúc đẩy quá trình phân hủy các chất ô nhiễm hữu cơ trong nước. Vật liệu nano TiO_2 được quan tâm nhờ hiệu quả cao và tính an toàn [5]. Dạng bột nano TiO_2 có diện tích bề mặt lớn nhưng dễ bị kết dính hạt, làm giảm khả năng phân tách điện tích. Ngược lại, màng ống nano (TNAs) và đặc biệt là cấu trúc dây nano trên ống nano (TNWs/TNAs) trên nền titan khắc phục hạn chế này, tăng diện tích bề mặt, truyền tải điện tử tốt và dễ tái sử dụng [6]. Các nghiên cứu cho thấy TiO_2 chế tạo bằng anod hóa phân hủy $\sim 90\%$ MB sau 20 giờ chiếu UV [7], hoặc 70% MB trong 2 giờ, trong khi quá trình quang phân chỉ đạt 1% trong cùng điều kiện [8]. Ngoài hiệu suất cao, vật liệu còn bền và tái sử dụng tốt: g-NGQDs/ TiO_2 còn 72% sau 3 lần [8], trong khi GQDs/TNAs, GQD/ TiO_2 NTs và GGO-TNAs duy trì $>95\%$ sau nhiều chu kỳ [9].

Có thể thấy, ứng dụng quang xúc tác vật liệu dựa trên TiO_2 là điểm sáng vì tính trơ, không độc, tài nguyên dồi dào và có hiệu quả quang xúc tác cao [5]. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu chứng minh vật liệu nano TiO_2 đem lại hiệu quả quang xúc tác rất cao nhưng còn rất hạn chế các nghiên cứu về tính ổn định của vật liệu dạng màng dây trên ống nano mọc trên đế titan. Vì thế nghiên cứu này tập trung chế tạo và khảo sát một số tính chất của vật liệu màng dây trên ống nano mọc trên đế titan trong quang xúc tác phân hủy xanh methylene.

II. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Vật liệu nano TiO_2 dạng dây trên ống mọc trên đế titan.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Chế tạo vật liệu nano TiO₂ dạng dây trên ống mọc trên đế titan bằng phương pháp anod hóa



Hình 1. Quá trình anod hóa TiO₂

Vật liệu nano TiO₂ dạng dây trên ống (TNWs/TNAs) được chế tạo trên đế titan tinh khiết 99,7% (1 × 2,5 cm, dày 0,5 mm) bằng phương pháp anod hóa (thí nghiệm được bố trí như hình 1). Trước anod hóa, đế được làm sạch và sấy khô. Quá trình anod hóa tiến hành trong hệ hai điện cực (Ti làm anode, thép không gỉ SS304 làm cathode) hình 2.1 với dung dịch điện phân gồm ethylene glycol 99,5%, 3% nước DI và 0,5% NH₄F, ở 30V trong 5 giờ bằng dòng DC. Sau đó, mẫu được rửa sạch, sấy khô và nung 400 °C trong 2 giờ để thu được pha anatase.

2.2.2. Khảo sát tính chất vật liệu

Để xác định cấu trúc tinh thể, kích thước hạt và độ kết tinh của vật liệu được xác định bằng phổ nhiễu xạ tia X (XRD, Bruker D2, Bruker, Đức) sử dụng bức xạ Cu K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$).

Hình thái và độ dày màng của các mẫu được xác định bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM, JEOL JSM-6500). Kính hiển vi điện tử quét (SEM) sử dụng chùm electron hội tụ (10-30 kV) quét bề mặt, cho ảnh độ phân giải nanomet.

Phổ tán sắc năng lượng tia X (EDS) dùng để xác định thành phần hóa học của các mẫu vật liệu và thường kết hợp với SEM. EDS phân tích thành phần nguyên tố dựa trên bức xạ X đặc trưng phát ra khi chùm electron ion hóa nguyên tử mẫu.

2.2.3. Đánh giá tính ổn định của vật liệu dựa trên TiO₂ trong QXT phân hủy MB sau 5 chu kỳ sử dụng dựa trên quy luật động học Langmuir-Hinshelwood sau 2 giờ chiếu xạ UV

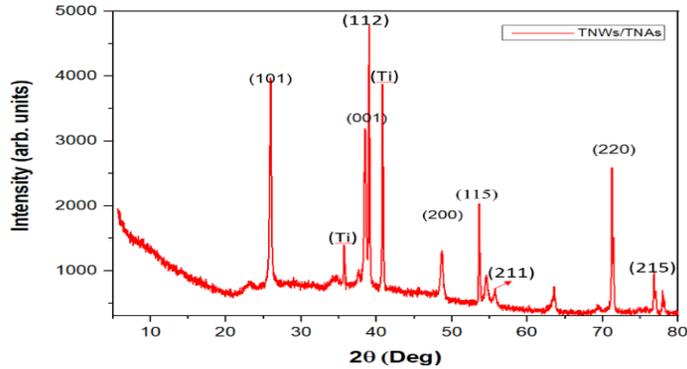
Dung dịch MB giả lập được pha ở nồng độ 10 mg/L⁻¹, dùng 30mL trong buồng phản ứng quang xúc tác với TNWs/TNAs nhúng hoàn toàn. Mẫu được chiếu bằng đèn Xenon 100W (100 mW/cm²) trong điều kiện 32 ± 2 °C, sau đó lấy 1mL dung dịch để phân tích bằng quang phổ UV-VIS.

Động học QXT trong phân hủy MB được xác định dựa trên tốc độ động học Langmuir-Hinshelwood [10, 11]. Với nồng độ MB dùng trong nghiên cứu thấp nên quá trình quang phân và QXT phân hủy chất cần xử lý tuân theo quy luật động học: $C_t = C_0 \cdot e^{-kt}$, trong đó C_t là nồng độ chất cần xử lý ở thời điểm t (mg/l), C_0 nồng độ ban đầu (mg/l), k là hằng số tốc độ phản

ứng (min^{-1}). Bằng cách thực hiện so khớp tuyến tính trên đồ thị của $-\ln(C_i/C_0)$ theo thời gian t , ta có thể tính được k .

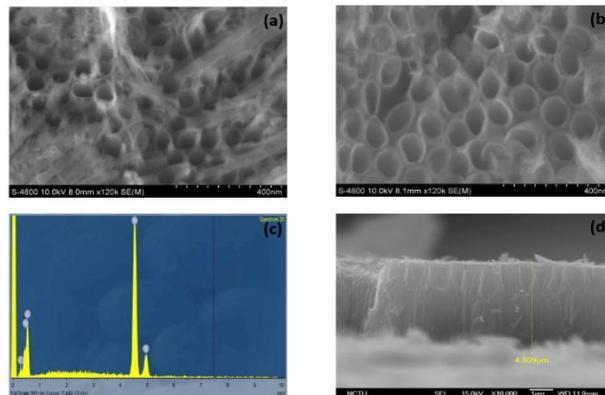
III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Tính chất cấu trúc, hình thái, quang học và thành phần của vật liệu nano TiO_2



Hình 2. Phổ XRD của TNWs/TNAs

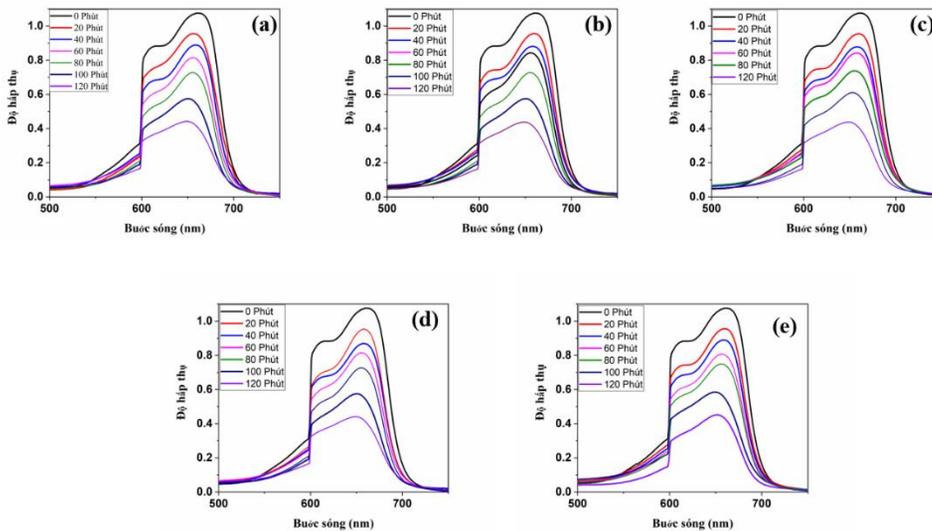
Nhận xét: Phổ nhiễu xạ tia X (XRD) của mẫu TNWs/TNAs được thể hiện trong Hình 2. Các đỉnh nhiễu xạ rõ rệt được quan sát tại các góc 2θ khoảng $25,3^\circ$, $37,9^\circ$, $48,0^\circ$ và $70,3^\circ$, tương ứng với các mặt phẳng tinh thể (101), (004), (200) và (220). Những đỉnh này đặc trưng cho pha anatase của titanium dioxide (TiO_2) theo tiêu chuẩn JCPDS số 21-1272 và các nghiên cứu trước đó [12]. Không ghi nhận đỉnh đặc trưng của rutile hay brookite, chứng tỏ mẫu tồn tại chủ yếu ở pha anatase. Đây là dạng tinh thể quan trọng của TiO_2 với hoạt tính xúc tác quang cao, ứng dụng trong xử lý môi trường và chuyển đổi năng lượng. Kích thước tinh thể (D) được tính theo phương trình Scherrer: $D = 0,9\lambda/\beta\cos\theta$, với $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ (tia X Cu $K\alpha$), β và θ lần lượt là độ rộng nửa cực đại và góc Bragg 2θ của đỉnh (004). Kết quả thấy kích thước trung bình đạt khoảng $28,12\text{nm}$, cấu trúc tinh thể có độ kết tinh tốt. Điều này chứng minh quá trình tổng hợp đã thành công trong việc tạo pha anatase chất lượng cao.



Hình 3. Hình ảnh SEM nhìn từ trên xuống và hình ảnh cắt ngang (d) của TNW/TNA. Hình a, b là hình ảnh SEM tương ứng trước và sau khi QXT. Hình (c) hiển thị phổ EDS của TNW/TNA với phần trăm nguyên tử của Ti và O được chỉ ra trong phổ

Nhận xét: Để đánh giá hình thái bề mặt và kích thước ống TiO₂ trước và sau quang xúc tác, ảnh SEM của các mẫu đã được khảo sát. Hình 3(a) cho thấy mẫu trước quang xúc tác (S1) với đường kính ống trung bình ~89,57nm, trong khi Hình 3(b) cho thấy mẫu sau quang xúc tác (S2) với đường kính trung bình ~124,55 nm. Sự gia tăng này có thể do các phản ứng oxy hóa khử mạnh dưới chiếu xạ UV tạo ra gốc •OH và O₂•⁻, vừa phân hủy chất ô nhiễm vừa ăn mòn nhẹ bề mặt vật liệu, cũng như do các bước xử lý mẫu (rửa, sấy khô), sự tái sắp xếp cấu trúc tinh thể hoặc vi nứt gãy làm tăng kích thước ống [13]. Hình 3.2(d) thể hiện mặt cắt ngang của vật liệu với bề dày ~4,809μm. Phân tích EDS ở Hình 3.2(c) cho thấy thành phần nguyên tử gồm [Ti] ≈ 65,4 at.%, [O] ≈ 28,7 at.% và các nguyên tố khác ≈ 5,9 at.%, phù hợp với pha tinh thể TiO₂ được xác nhận từ kết quả XRD.

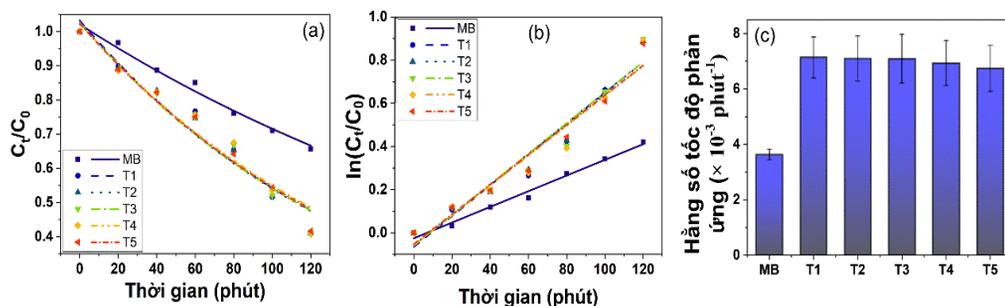
3.2. Hiệu suất phân hủy quang xúc tác của vật liệu TNWs/TNA



Hình 4. Định hấp thụ đặc trưng của MB thay đổi theo thời gian phản ứng quang phân (photolysis) và QXT dùng vật liệu nano TNWs/TNAs sau 5 chu kỳ tái sử dụng

Nhận xét: Hình 4 cho thấy quá trình phân hủy xanh methylene bằng cách sử dụng TNWs/TNA dưới sự chiếu xạ UV-Vis của đèn xenon 100W. Nồng độ xanh methylene giảm dần theo thời gian sau quá trình phân rã theo hàm mũ, được mô tả bằng phương trình: $C_t = C_0 \cdot e^{-kt}$, trong đó C_t là nồng độ chất cần xử lý ở thời điểm t (mg/l), C_0 nồng độ ban đầu (mg/l), k là hằng số tốc độ phản ứng (min^{-1}). Kết quả cho thấy đỉnh hấp thụ đặc trưng của của MB tại $\lambda_{\text{max}} \sim 663 \text{ nm}$.

Kết quả quang xúc tác cho thấy vật liệu nano TiO₂ dạng dây trên ống (TNWs/TNAs) phân hủy xanh methylene (MB) hiệu quả hơn nhiều so với quá trình quang phân. Thật vậy, sau 120 phút phản ứng trong buồng QXT, hiệu suất phân hủy khi sử dụng vật liệu TNWs/TNAs đạt ~59% (hình 5a) so với ~32% của quang phân, với hằng số tốc độ phản ứng k dao động từ 7,1 đến $6,7 \times 10^{-3} \text{ phút}^{-1}$ qua 5 chu kỳ, cao gấp đôi so với quang phân ($\sim 3,5 \times 10^{-3} \text{ phút}^{-1}$) (hình 5c). Đặc biệt, hoạt tính xúc tác duy trì ổn định, giữ được ~94,4% so với ban đầu sau 5 lần tái sử dụng (hình 5b). Những kết quả này chứng tỏ TNWs/TNAs có tốc độ phản ứng vượt trội, bền và tái sử dụng tốt, hứa hẹn ứng dụng tiềm năng trong xử lý ô nhiễm môi trường bằng quang xúc tác.



Hình 5. (a) Biểu đồ biểu diễn sự suy giảm nồng độ tương đối (C_t/C_0) của MB theo thời gian phản ứng quang phân và QXT bằng vật liệu TNWs/TNAs dưới chiếu xạ UV. (b) Đồ thị mô tả sự tuyến tính của $\ln(C_t/C_0)$ theo thời gian. (c) Biểu đồ cột hằng số tốc độ phản ứng (k) cho MB và sau 5 chu kỳ tái sử dụng chất xúc tác. Biểu đồ này thể hiện giá trị hằng số tốc độ phản ứng (k) của quá trình phân hủy methylene blue (MB) sử dụng xúc tác quang sau 5 lần tái sử dụng (T1-T5).

IV. BÀN LUẬN

Titan dioxide (TiO_2) là vật liệu bán dẫn bền, ổn định và có hoạt tính quang xúc tác cao, đặc biệt ở dạng nano nhờ diện tích bề mặt lớn [7]. Vật liệu nano TiO_2 dạng dây trên ống (TNWs/TNAs) đạt hiệu suất phân hủy xanh methylene (MB) ~59% sau 120 phút chiếu UV-VIS, với hằng số tốc độ phản ứng $7,1-6,7 \times 10^{-3} \text{ phút}^{-1}$ qua 5 chu kỳ, duy trì ~94,4% hiệu suất ban đầu. So với các nghiên cứu trong nước, hiệu suất của TNWs/TNAs thấp hơn một số vật liệu như TiO_2 từ xỉ titan (94,3%/90 phút), ZnO (93,1%/75 phút) hay $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ (89,7%/3 giờ) [14], nhưng nổi bật ở khả năng tái sử dụng ổn định. So với quốc tế, PoPD/ TiO_2 ($k = 9,8 \times 10^{-3} \text{ phút}^{-1}$) và CS- TiO_2 (98,2%/80 phút; $k \approx 0,0398 \text{ phút}^{-1}$) có hiệu suất cao hơn nhưng thiếu dữ liệu về độ bền, trong khi Ti-ZnO ($k \approx 2,54 \times 10^{-3} \text{ phút}^{-1}$) hay TiO_2/GO (~90%/60 phút, giảm mạnh sau 3 chu kỳ) cho thấy độ bền thấp [9, 13-15]. Như vậy, TNWs/TNAs có tiềm năng ứng dụng thực tế nhờ tính bền và khả năng tái sử dụng, song vẫn cần cải thiện hiệu suất dưới ánh sáng khả kiến, độ bền lâu dài và sự đồng nhất hình thái. Hướng nghiên cứu tương lai nên tập trung vào tăng cường ổn định, kết hợp với vật liệu dẫn điện (graphene, CNTs) và áp dụng phương pháp tổng hợp xanh để nâng cao hiệu quả và giảm chi phí [16].

V. KẾT LUẬN

TNWs/TNAs đã được tổng hợp thành công với pha anatase tinh khiết, kích thước tinh thể ~28,12 nm, cấu trúc sợi nano bền vững và độ kết tinh cao (XRD). Ảnh SEM cho thấy đường kính trung bình ống nano thay đổi từ ~89,57nm (trước quang xúc tác) lên ~124,55nm (sau quang xúc tác), độ dày màng ~4,809 μm và vẫn ổn định. Vật liệu có diện tích bề mặt lớn, thuận lợi cho xúc tác, trong khi phân tích EDS xác nhận thành phần Ti và O đúng cấu trúc TiO_2 . Về hiệu suất, TNWs/TNAs phân hủy MB với hằng số tốc độ phản ứng giảm nhẹ từ $7,1 \times 10^{-3}$ xuống $6,7 \times 10^{-3} \text{ phút}^{-1}$ sau 5 chu kỳ, vẫn giữ ~94,4% so với ban đầu và hiệu quả phân hủy đạt ~59% sau 2 giờ. Những kết quả này khẳng định TNWs/TNAs là vật liệu tiềm năng cho xử lý ô nhiễm môi trường bằng quang xúc tác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Khan I., *et al.* Review on methylene blue: its properties, uses, toxicity and photodegradation. *Water*. 2022.14(2), 242, <https://doi.org/10.3390/w14020242>.

2. Ayati A., *et al.* A review on catalytic applications of Au/TiO₂ nanoparticles in the removal of water pollutant. *Chemosphere*. 2014.107, 163-174, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.01.040>
 3. Baig A., Siddique M., and Panchal S. A review of visible-light-active zinc oxide photocatalysts for environmental application. *Catalysts*. 2025.15(2), 100, <https://doi.org/10.3390/catal15020100>.
 4. Tahir M.B., *et al.* Nanostructured-based WO₃ photocatalysts: recent development, activity enhancement, perspectives and applications for wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2017.14(11), 2519-2542, <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1307-8>.
 5. Hoffmann M.R., *et al.* Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical reviews*. 1995.95(1), 69-96, <https://doi.org/10.1021/cr00033a004>.
 6. Uyen N.N., *et al.* TiO₂ nanowires on TiO₂ nanotubes arrays (TNWs/TNAs) decorated with au nanoparticles and au nanorods for efficient photoelectrochemical water splitting and photocatalytic degradation of methylene blue. *Coatings*. 2022.12(12), 1957, <https://doi.org/10.3390/coatings12121957>.
 7. Hsu M.-Y., Hsu H.-L., and Leu J. TiO₂ nanowires on anodic TiO₂ nanotube arrays (TNWs/TNAs): Formation mechanism and photocatalytic performance. *Journal of The Electrochemical Society*. 2012.159(8), H722-H727, <https://doi.org/10.1149/2.063208jes>
 8. Sun X., *et al.* Visible-light driven TiO₂ photocatalyst coated with graphene quantum dots of tunable nitrogen doping. *Molecules*. 2019.24(2), 344, <https://doi.org/10.3390/molecules24020344>.
 9. Huynh T.P., Do T.C.M.V., and Le P.H. TiO₂ nanotube arrays decorated with graphene/graphite oxide nanocomposite for the photocatalytic degradation of anticancer drugs in the aquatic environment. *ACS Applied Nano Materials*. 2024.7(17), 20012-20023, <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c02377>.
 10. Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. *Journal of the American chemical society*. 1916.38(11), 2221-2295, <https://doi.org/10.1021/ja02268a002>.
 11. Rideal E.K. The kinetics of chemical change. *Nature Publishing Group UK London*. 1940.
 12. Le P.H., *et al.* Development of a UPLC-MS/MS method for pesticide analysis in paddy water and evaluation of anodic TiO₂ nanostructured films for pesticide photodegradation and antimicrobial applications. *Nanoscale advances*. 2025.7(11), 3344-3357, <https://doi.org/10.1039/D4NA00997E>.
 13. Tran S.T., *et al.* Vật liệu TiO₂/than hoạt tính từ tro trấu và khả năng hấp phụ xanh methylene. *Hue University Journal of Science: Natural Science*. 2022.131(1A), 27-34, <https://doi.org/10.26459/hueunijns.v131i1A.6448>.
 14. Wongrerkdee S., *et al.* Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue using Ti-doped ZnO nanoparticles synthesized by rapid combustion. *Toxics*. 2022.11(1), 33, <https://doi.org/10.3390/toxics11010033>.
 15. Van Chinh T., *et al.* Study on photocatalytic degradation of methylene blue by TiO₂ synthesized from titanium slag using a new decomposition agent. *Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption*. 2022.11(1), 88-92, <https://doi.org/10.51316/jca.2022.013>.
 16. Farghaly A., *et al.* Synergistic photocatalytic degradation of methylene blue using TiO₂ composites with activated carbon and reduced graphene oxide: a kinetic and mechanistic study. *Applied Water Science*. 2024.14(10), 228, <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02286-0>.
-