

# CHẾ TẠO $\text{TiO}_2$ BẰNG PHƯƠNG PHÁP THỦY NHIỆT ỨNG DỤNG CHO QUÁ TRÌNH PHÂN HỦY XANH METHYLENE

## SYNTHESIS $\text{TiO}_2$ VIA HYDROTHERMAL METHOD FOR METHYLENE BLUE DEGRADATION

Phạm Minh Thúy<sup>1,2</sup>, Đinh Quốc Huy<sup>1</sup>, Vũ Đức Chính<sup>3</sup>, Chu Thị Thu Hiền<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Bộ môn Hóa học, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

<sup>2</sup>Viện Hóa học, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam

<sup>3</sup>Viện Khoa học vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Đến Tòa soạn ngày 05/01/2024, chấp nhận đăng ngày 26/01/2024

**Tóm tắt:** Trong nghiên cứu này, hoạt tính quang xúc tác của  $\text{TiO}_2$  đã được nghiên cứu về khả năng phân hủy xanh methylen dưới bức xạ UV.  $\text{TiO}_2$  được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt ở các nhiệt độ và thời gian phản ứng khác nhau.  $\text{TiO}_2$  chế tạo ở  $160^\circ\text{C}$  trong 8 giờ, hiệu suất xử lý xanh methylen cao nhất trong vòng 180 phút là 80%. Vật liệu tổng hợp này được đặc trưng bởi nhiễu xạ tia X (XRD), kính hiển vi điện tử quét (SEM), phổ hồng ngoại (FTIR), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX). Các mô hình giả bậc nhất, giả bậc hai được sử dụng để phân tích dữ liệu động học thu được ở một số nhiệt độ khác nhau. Quá trình phân hủy MB sử dụng  $\text{TiO}_2$  tổng hợp được mô tả tốt hơn bằng mô hình giả bậc nhất.

**Từ khóa:** Phân hủy xanh methylen, quang xúc tác  $\text{TiO}_2$ , tổng hợp thủy nhiệt.

**Abstract:** In this study, the photocatalytic activity of  $\text{TiO}_2$  was investigated for the degradation of methylene blue under UV irradiation. The  $\text{TiO}_2$  was synthesized via hydrothermal method at vary reaction time and temperature.  $\text{TiO}_2$ , manufactured at  $160^\circ\text{C}$  in 8 hours, was achieved the highest efficiencies of methylene blue within 180 min was 80%. This synthesized material have been characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), infrared spectroscopy (FTIR), energy-dispersing X-ray spectroscopy (EDX). Pseudo-first order, pseudo-second-order models were used to analyze the kinetic data obtained at several different temperatures. The degradation process of MB which used synthesized  $\text{TiO}_2$  is better described by the pseudo-first-order model.

**Keywords:** Methylene blue degradation,  $\text{TiO}_2$  photocatalyst, hydrothermal synthesis.

### 1. GIỚI THIỆU

Mức độ ô nhiễm nguồn nước ở nhiều quốc gia, đặc biệt ở các nước kém hoặc đang phát triển, ngày càng trở nên trầm trọng, ảnh hưởng tiêu cực tới môi trường sống của con người và các sinh vật sống [1, 2]. Do vậy, việc nghiên cứu tìm ra một phương pháp hiệu quả để loại bỏ các chất gây ô nhiễm môi trường càng trở thành một vấn đề cấp thiết. Công nghệ xúc tác

quang với xu hướng sử dụng nguồn năng lượng mặt trời rẻ tiền đã được ưu tiên phát triển trong giai đoạn gần đây nhằm giảm thiểu nguồn năng lượng cũng như chi phí liên quan tới các dây chuyền vận hành xử lý nước thải. Điểm đáng chú ý, so với các phương pháp xử lý môi trường khác, công nghệ xử lý ô nhiễm môi trường bằng các vật liệu quang xúc tác không gây ra ô nhiễm môi trường thứ cấp.

Nhiều loại vật liệu quang xúc tác đã được nghiên cứu như ZnO, TiO<sub>2</sub>, CdS, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>..., trong số đó TiO<sub>2</sub> được dùng nhiều nhất do có khả năng chống ăn mòn, bền vững về mặt hóa học, giá thành rẻ, bền quang và không độc hại [3].

Các phương pháp tổng hợp TiO<sub>2</sub> đã được đưa ra như phương pháp sol - gel, phương pháp nhiệt phân, phương pháp ngưng tụ hơi hóa học CVD, phương pháp điện hóa... [3]. Trong giai đoạn gần đây, phương pháp thủy nhiệt với phản ứng được tiến hành trong bình autoclave và cốc phản ứng được làm từ nhựa Teflon được sử dụng nhiều hơn các phương pháp khác. Quá trình tổng hợp sử dụng dung môi nước và không đòi hỏi nhiệt độ nung cao, do vậy đây là phương pháp không những tiết kiệm chi phí sản xuất mà còn thân thiện với môi trường [3, 5].

## **2. THỰC NGHIỆM**

### **2.1. Tổng hợp vật liệu**

TiO<sub>2</sub> được tổng hợp bằng cách sử dụng phương pháp thủy nhiệt. Quy trình này bắt đầu bằng việc pha chế dung dịch, bao gồm 80 ml nước cất, 2 ml cồn và 5 ml TBOT. Sau đó, dung dịch được khuấy liên tục trong khoảng 15 phút ở điều kiện nhiệt độ phòng và đảm bảo rằng nhiệt độ thay đổi không đáng kể trong suốt quá trình thủy phân.

Trong quá trình tiếp theo, dung dịch được chuyển vào bình thủy nhiệt và được nung trong không khí. Quá trình này diễn ra ở các điểm nhiệt độ khác nhau: 140°C, 160°C, 180°C, 200°C, và thời gian thủy nhiệt thay đổi: 4 h, 6 h, 8 h, 10 h.

Sau khi quá trình thủy nhiệt kết thúc, mẫu được ly tâm và rửa sạch bằng cồn và nước cất. Kết tủa sẽ được sấy khô trong tủ sấy ở nhiệt độ 50-60°C đến khi khối lượng không đổi. Kết

tủa màu trắng thu được là TiO<sub>2</sub> sẽ được nghiền mịn bằng cối sứ để tạo kích thước phù hợp. Cuối cùng, vật liệu được bảo quản trong bình hút ẩm và được sử dụng cho các bước tiếp theo trong quá trình nghiên cứu.

### **2.2. Các phương pháp vật lý nghiên cứu đặc trưng vật liệu**

Vật liệu xúc tác quang thu được từ quá trình tổng hợp ở trên sẽ được xác định các tính chất đặc trưng bao gồm: hình thái bề mặt, cấu trúc tinh thể, khả năng hấp thụ quang nhờ vào các phương pháp phân tích lý hóa như phương pháp nhiễu xạ tia X (Bruker AXS D8 Advance), phổ hồng ngoại (FT-IR), kính hiển vi điện tử quét (SEM), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) và phổ hấp thụ quang UV-Vis.

### **2.3. Đánh giá khả năng loại bỏ MB của vật liệu**

Thí nghiệm đánh giá khả năng loại bỏ xanh methylene (MB) của các mẫu TiO<sub>2</sub> đã tổng hợp được thực hiện trong các bình phản ứng với cùng một lượng thể tích dung dịch MB nồng độ 5 ppm và hàm lượng xúc tác là 1 g/l. Trong 30 phút đầu tiên các bình phản ứng được tiến hành trong điều kiện tối và 180 phút, sau đó, bình phản ứng được chiếu sáng bằng ánh sáng UV. Khoảng cách từ đèn UV tới bề mặt dung dịch là 30 cm. Nồng độ MB còn lại trong dung dịch sẽ được xác định bằng phương pháp đường chuẩn bằng máy quang phổ UV-Vis tại bước sóng 664 nm.

## **3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

### **3.1. Khả năng xúc tác quang hóa của TiO<sub>2</sub>**

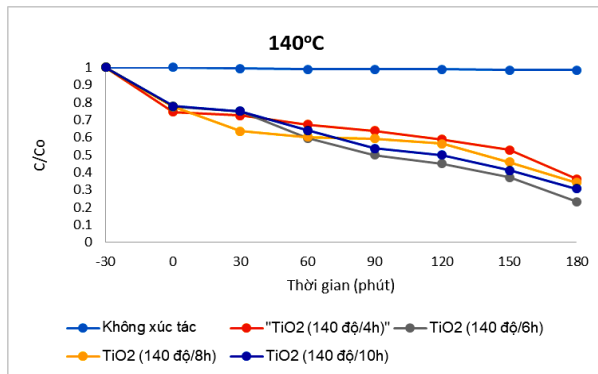
Khi chiếu chùm tia đơn sắc đi qua một dung dịch chứa chất phân tích. Cường độ ánh sáng đi qua mẫu tuân theo định luật Lambert – Beer theo phương trình:

$$\lg \frac{I_0}{I} = A = \varepsilon \cdot l \cdot C$$

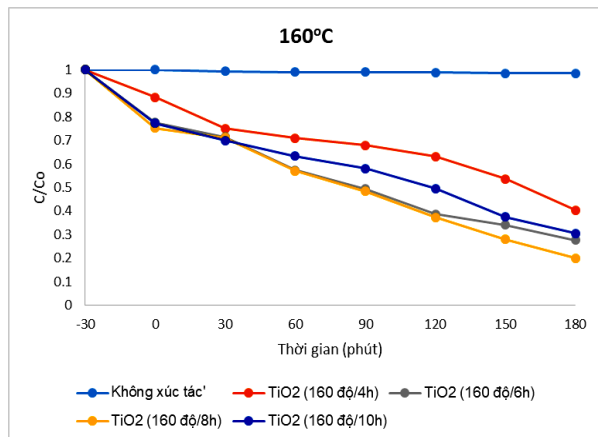
Trong đó:  $I_0$ : Cường độ ánh sáng chiếu tới;  
 $I$ : Cường độ ánh sáng truyền qua;  $A$ : Độ hấp thụ quang;  $\varepsilon$ : Hệ số suy giảm mol hay độ hấp thụ riêng của chất phân tích;  $l$ : Chiều dài quãng đường ánh sáng truyền qua mẫu;  
 $C$ : nồng độ của mẫu phân tích.

Hiệu suất phân hủy xanh methylene là:

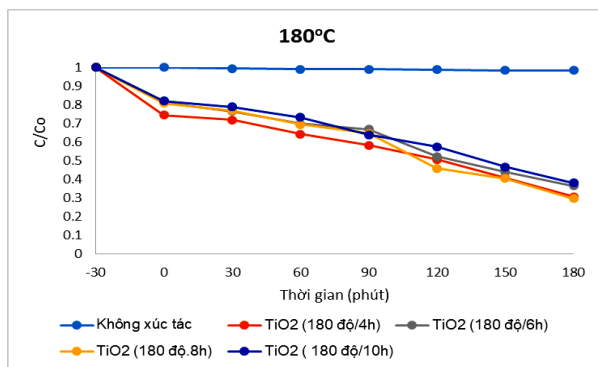
$$H = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100\% \quad \text{hay} \quad H = \frac{A_0 - A}{A_0} \cdot 100\%$$



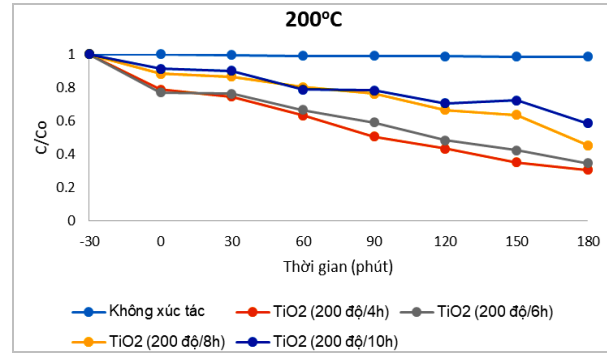
(a)



(b)



(c)



(d)

**Hình 1. Đồ thị  $C/C_0$  nồng độ xanh methylene sau 180 phút chiếu sáng UV của  $TiO_2$  chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt thời gian 4, 6, 8 và 10 giờ tại nhiệt độ**

**(a) 140°C; (b) 160°C; (c) 180°C và (d) 200°C**

Từ hình 1 có thể thấy rằng các mẫu phân hủy MB có sử dụng xúc tác  $TiO_2$  tổng hợp trong thời gian 4; 6; 8 và 10 giờ tại tất cả nhiệt độ khảo sát bao gồm 140; 160; 180 và 200°C đều phân hủy xanh methylene tốt hơn so với mẫu không sử dụng xúc tác dưới sự chiếu xạ của tia UV. Cụ thể, tất cả các mẫu sử dụng xúc tác  $TiO_2$  có khả năng phân hủy xanh methylene trên 40%, trong khi đó quá trình phân hủy không sử dụng xúc tác chỉ đạt được hiệu suất 1,6% sau thời gian 180 phút chiếu sáng (hình 1).

Dữ liệu ở hình 1 cũng chỉ ra rằng đối với các mẫu được tổng hợp tại nhiệt độ 140°C, mẫu  $TiO_2$  được chế tạo trong thời gian 6 giờ có hiệu quả quang xúc tác tốt hơn so với các mẫu  $TiO_2$  còn lại. Hiệu suất phân hủy MB sau 180 phút chiếu sáng UV của mẫu  $TiO_2$  ở 140°C trong 6 giờ đạt 76,6%, trong khi đó các mẫu ở 4, 8 và 10 giờ có hiệu suất thấp hơn lần lượt là 63,7; 65,7 và 69,3%.

Khi đánh giá khả năng phân hủy xanh methylene của các mẫu  $TiO_2$  được tổng hợp tại nhiệt độ 160°C trong thời gian 4, 6, 8 và 10 giờ. Có thể thấy rằng, mẫu được tổng hợp trong thời gian 8 giờ cho hiệu quả phân hủy cao nhất đạt 80% trong 180 phút chiếu tia UV cao hơn 20,3%; 7,5% và 10,5% lần lượt so

với các mẫu 4, 6 và 10 giờ.

Với các mẫu tổng hợp tại nhiệt độ 180°C, mẫu được chế tạo trong thời gian 4; 6; 8; 10 giờ có khả năng phân hủy xanh methylene không khác nhau nhiều. Trong cùng điều kiện, TiO<sub>2</sub> được chế tạo ở nhiệt độ 180°C trong thời gian 10 giờ có khả năng phân hủy xanh methylene thấp nhất (61,9%).

Khi đánh giá khả năng xúc tác quang của các mẫu TiO<sub>2</sub> được chế tạo ở nhiệt độ 200°C, có thể thấy rằng nếu thời gian tổng hợp càng kéo dài thì sản phẩm thu được có hiệu suất xúc tác quang càng kém. TiO<sub>2</sub> được tổng hợp tại 200°C trong 4 giờ có hiệu suất xúc tác cao nhất đạt 69,3% và các mẫu tổng hợp trong 6; 8 giờ hiệu suất giảm còn 65,3% và 54,5%. Mẫu được tổng hợp trong thời gian 10 giờ cho hiệu suất phân hủy xanh methylene thấp nhất chỉ đạt được 41,3% và đây cũng là mẫu có khả năng xúc tác quang kém hiệu quả nhất trong toàn bộ các mẫu được nghiên cứu chế tạo.

**Bảng 1. Bảng so sánh hiệu suất phân hủy MB của các mẫu TiO<sub>2</sub> lần lượt ở các điều kiện 140°C/6h; 160°C/8h; 180°C/8h và 200°C/4h**

Mẫu	Độ hấp thụ quang MB		Hiệu suất (%)
	Ban đầu	180 phút chiếu UV	
140°C /6h	0.501	0.117	76,6
160°C /8h	0.501	0.100	80
180°C /8h	0.501	0.149	70,3
200°C /4h	0.501	0.154	69,3

Sau khi lựa chọn được các mẫu vật liệu tốt nhất được tổng hợp tại các điểm nhiệt độ khác nhau. Khả năng phân hủy MB của các mẫu này sẽ được so sánh với nhau (bảng 1). Vật liệu TiO<sub>2</sub> được chế tạo ở điều kiện nhiệt độ 160°C trong thời gian 8 giờ cho hiệu suất phân hủy MB cao nhất, cao hơn các mẫu TiO<sub>2</sub> (140°C/6h); mẫu TiO<sub>2</sub> (180°C/8h); mẫu TiO<sub>2</sub>

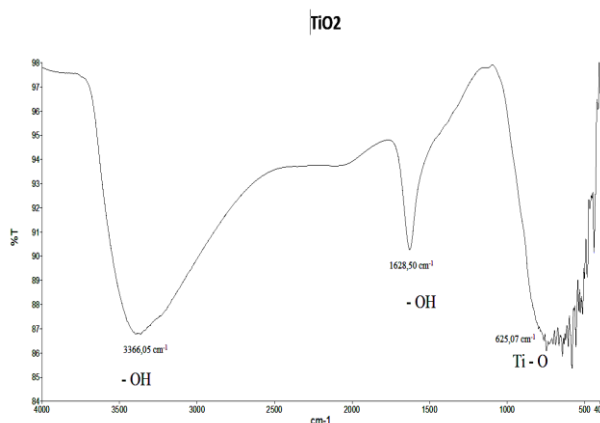
(200°C/4h) lần lượt là 3,4%; 9,7% và 10,7%.

Như vậy, trong tất cả khoảng nhiệt độ và thời gian đã khảo sát, vật liệu TiO<sub>2</sub> được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt ở điều kiện 160°C trong thời gian 8 giờ cho hiệu quả tối ưu nhất.

#### 2.4. Nghiên cứu đặc trưng của vật liệu TiO<sub>2</sub> tổng hợp ở nhiệt độ 160°C trong thời gian 8 giờ

##### Phổ hồng ngoại FT-IR

Mẫu vật liệu TiO<sub>2</sub> đã được chế tạo ở điều kiện nhiệt độ 160°C trong thời gian 8 giờ sẽ được đem đi phân tích phổ FT-IR nhằm xác định cấu tạo hóa học của mẫu thu được. Kết quả được chỉ ra như trong hình 2.

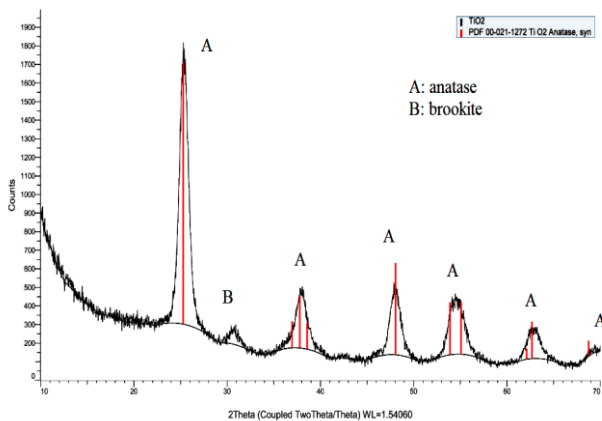


**Hình 2. Ảnh phổ FT-IR của TiO<sub>2</sub> tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt ở 160°C/8 giờ**

Trong hình ảnh phổ FT-IR (hình 2) xuất hiện ba vùng hấp thụ cực đại. Tín hiệu hấp thụ cực đại tại số sóng gần 600cm<sup>-1</sup> tương ứng với dao động hóa trị của liên kết Ti-O. Ngoài ra, trong phổ còn xuất hiện thêm hai vùng hấp thụ cực đại tại vị trí 3366,05cm<sup>-1</sup> và 1628,5cm<sup>-1</sup> lần lượt tương ứng với dao động hóa trị và dao động biến dạng của liên kết -O-H [6]. Điều này chứng tỏ rằng, vật liệu TiO<sub>2</sub> đã được chế tạo thành công bằng phương pháp thủy nhiệt và trên bề mặt của vật liệu có hấp phụ các phân tử nước.

### Giản đồ nhiễu xạ tia X

Giản đồ nhiễu xạ tia X được sử dụng để phân tích cấu trúc pha tinh thể của mẫu  $\text{TiO}_2$  tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt ở điều kiện  $160^\circ\text{C}$  trong thời gian 8 giờ (hình 3). Các đỉnh nhiễu xạ cực đại xuất hiện tại vị trí  $2\theta = 25,3^\circ$ ;  $37,9^\circ$ ;  $48,1^\circ$  và  $55,1^\circ$  tương ứng với mặt phẳng mạng (101), (004), (200), và (211) của pha anatase. Ngoài ra, xuất hiện thêm một đỉnh nhiễu xạ tại vị trí  $30,8^\circ$  tương ứng với mặt phẳng mạng (121) của pha brookite [7].



**Hình 3. Giản đồ XRD của  $\text{TiO}_2$  tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt ở  $160^\circ\text{C}$ / 8 giờ**

Dựa vào giản đồ nhiễu xạ tia X trên hình 3 có thể tính toán kích thước trung bình của các hạt  $\text{TiO}_2$  đã chế tạo được bằng cách sử dụng phương trình Scherrer [8]:

$$D = \frac{k \cdot \lambda}{B \cdot \cos\theta}$$

Trong đó:

D: Kích thước hạt tinh thể (nm);

k: Hằng số Scherrer (thường lấy giá trị 0,9);

$\lambda$ : Bước sóng tia X ( $\lambda = 0,15418$  nm);

B: Độ bán rộng hay độ rộng tại vị trí  $\frac{1}{2}$  đỉnh nhiễu xạ (rad);

$\theta$ : Góc nhiễu xạ Bragg (rad).

Xét pic đặc trưng tại vị trí  $2\theta = 25,3^\circ$

Góc nhiễu xạ  $\theta = 25,3 : 2 = 12,65^\circ$

Độ bán rộng của pic đặc trưng là:

$$B = 0,55 \cdot \frac{\pi}{180} = 0,0096 \text{ (rad)}$$

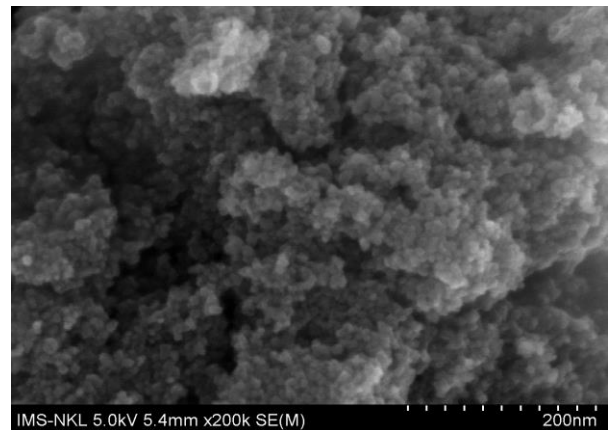
Kích thước trung bình của hạt  $\text{TiO}_2$  là:

$$D = \frac{k \cdot \lambda}{B \cdot \cos\theta} = \frac{0,9 \cdot 0,15418}{0,0096 \cdot \cos(\text{radian}(12,65))} = 15\text{nm}$$

Như vậy, vật liệu  $\text{TiO}_2$  đã chế tạo được là các hạt nano có kích thước khoảng 15 nm và tồn tại hai pha tinh thể anatase và brookite.

### Kính hiển vi điện tử quét (SEM)

Hình thái cấu trúc bề mặt của vật liệu  $\text{TiO}_2$  được xác định bằng phương pháp SEM và được thể hiện trong hình 4.

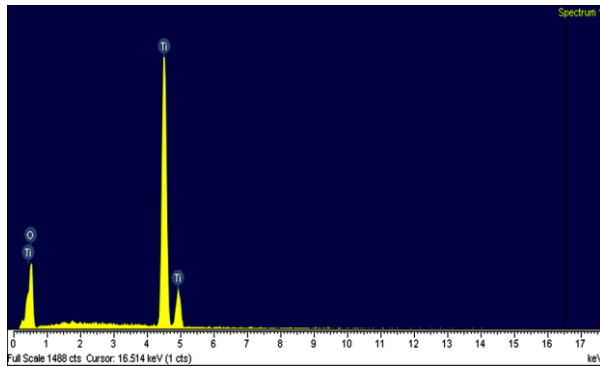


**Hình 4. Ảnh SEM của  $\text{TiO}_2$  chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt ở  $160^\circ\text{C}$ /8 giờ**

Từ hình 4, có thể thấy rằng,  $\text{TiO}_2$  đã chế tạo trong điều kiện  $160^\circ\text{C}$ /8 giờ có cấu trúc là các hạt hình cầu và chúng có xu hướng kết tụ lại với nhau tạo thành các đám hạt có kích thước lớn hơn. Kích thước hạt trung bình của các hạt  $\text{TiO}_2$  được xác định qua hình ảnh SEM khoảng 14-15 nm và hoàn toàn phù hợp với kết quả thu được theo giản đồ XRD.

### Phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX)

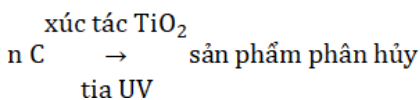
Hình 5 thể hiện phổ EDX của các hạt nano  $\text{TiO}_2$  đã chế tạo được. Các hạt nano đã tổng hợp có thành phần chỉ bao gồm titanium và oxy. Như vậy, sản phẩm thu được là  $\text{TiO}_2$  nguyên chất và có độ tinh khiết cao.



Hình 5. Phổ EDX của  $\text{TiO}_2$  chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt ở  $160^\circ\text{C}/8$  giờ

## 2.5. Nghiên cứu động học phản ứng phân hủy chất màu xanh methylene của $\text{TiO}_2$

Xét phản ứng phân hủy xanh methylene:



Phương trình tốc độ phản ứng có dạng:

$$v = k.C^n$$

Trong đó: C là nồng độ xanh methylene và n là bậc của phản ứng.

Phương trình phụ thuộc nồng độ xanh methylene theo thời gian t được thể hiện theo phương trình dưới đây:

- Động học bậc 1:

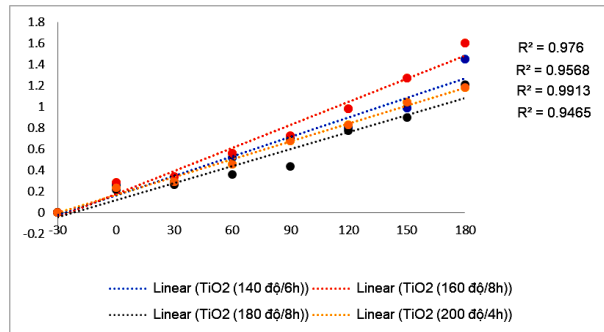
$$-\ln \frac{C}{C_0} = kt$$

- Động học bậc 2:

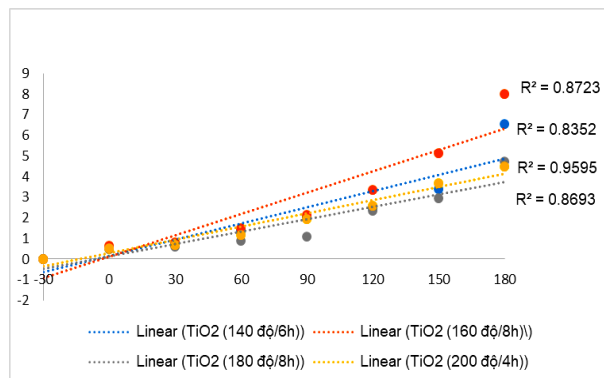
$$\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} = kt$$

Trong đó:  $C_0$  và C là nồng độ xanh methylene tại thời điểm ban đầu và thời điểm t; t là thời gian phản ứng; k là hằng số tốc độ phản ứng.

Do đó, để đánh giá quá trình phân hủy xanh methylene phù hợp với động học bậc 1 hay bậc 2, ta xây dựng đồ thị  $-\ln \frac{C}{C_0}$  và  $\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0}$  theo thời gian t và xét hệ số tương quan  $R^2$ . Giá trị  $R^2$  càng lớn thì mức độ phù hợp càng cao.

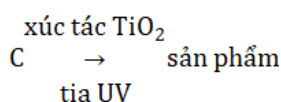


Hình 6. Đồ thị phụ thuộc  $-\ln(C/C_0)$  theo t, động học bậc 1 của quá trình phân hủy xanh methylene sử dụng xúc tác  $\text{TiO}_2$



Hình 7. Đồ thị phụ thuộc  $1/C - 1/C_0$  vào t, động học bậc 2 của quá trình phân hủy xanh methylene sử dụng xúc tác  $\text{TiO}_2$

Các mẫu  $\text{TiO}_2$  tối ưu ở các điểm nhiệt độ bao gồm  $\text{TiO}_2$  ( $140^\circ\text{C}/6\text{h}$ ); mẫu  $\text{TiO}_2$  ( $160^\circ\text{C}/8\text{h}$ ); mẫu  $\text{TiO}_2$  ( $180^\circ\text{C}/8\text{h}$ ) và mẫu  $\text{TiO}_2$  ( $200^\circ\text{C}/10\text{h}$ ) được lựa chọn làm mẫu đại diện và đồ thị động học được thể hiện như hình 6 và hình 7. Xét thấy rằng đồ thị phụ thuộc của  $-\ln(C/C_0)$  có giá trị  $R^2$  lần lượt là 0,976; 0,9568; 0,9913 và 0,9465 cao hơn so với giá trị  $R^2$  của đồ thị phụ thuộc  $1/C - 1/C_0$  vào t tương ứng là 0,8723; 0,8352; 0,9595 và 0,8693. Như vậy, quá trình phân hủy xanh methylene bởi xúc tác  $\text{TiO}_2$  đã chế tạo được mô tả phù hợp hơn với phương trình động học bậc 1 và có dạng như sau:



Trong đó: C là nồng độ dung dịch xanh methylene.

Kết quả thu được phù hợp với các nghiên cứu đã công bố [9, 10].

#### 4. KẾT LUẬN

Vật liệu nano  $\text{TiO}_2$  đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt.  $\text{TiO}_2$  được chế tạo tại  $160^\circ\text{C}$  trong 8 giờ có hiệu quả xúc tác quang cao nhất (80%). Vật liệu  $\text{TiO}_2$  đã chế tạo ở điều kiện này là các hạt nano có độ tinh khiết cao, có cấu trúc là các hạt hình cầu kích thước khoảng 15 nm và chúng có xu hướng kết tụ lại với nhau tạo thành các đám

hạt có kích thước lớn hơn và tồn tại hai pha tinh thể anatase và brookite. Mặt khác, quá trình nghiên cứu động học chỉ ra rằng quá trình phân hủy xanh methylene sử dụng xúc tác quang  $\text{TiO}_2$  đã chế tạo phù hợp với động học bậc 1.

#### 5. LỜI CẢM ƠN

*Nghiên cứu này trân thành cảm ơn sự hỗ trợ về tài chính từ đề tài thuộc Trường Đại học Xây dựng Hà Nội với mã số 02-2023/KHXD-TĐ.*

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Aijaz Panhwar, Abdul Sattar Jatoti, Shaukat Ali Mazari, Aftab Kandhro, Uzma Rashid, Sofia Qaisar (2024), "Water resources contamination and health hazards by textile industry effluent and glance at treatment techniques: A review", Waste Management Bulletin Volume 1, Issue 4, Pages 158-163.
- [2] Liene Siliņa, Inga Dāboliņa and Eva Lapkovska (2024), "Sustainable textile industry – wishful thinking or the new norm: A review", Journal of Engineered Fibers and Fabrics volume 19: 1- 27.
- [3] Thanh Luan Nguyen, Thi Huong Pham, Yusik Myung, Sung Hoon Jung, Man Hieu Tran, Mitesh G. Mapari, Quyet Van Le, Minh Viet Nguyen, Thi Thu Hien Chu, Taeyoung Kim (2022), "Enhanced photocatalytic activity in water splitting for hydrogen generation by using  $\text{TiO}_2$  coated carbon fiber with high reusability", International Journal of Hydrogen Energy, 47, 41621-41630.
- [4] Vishal Verma, Mawaheb Al-Dossari, Jagpreet Singh, Mohit Rawat, Mohamed G. M. Kordy and Mohamed Shaban (2022), "A Review on Green Synthesis of  $\text{TiO}_2$  NPs: Photocatalysis and Antimicrobial Applications", Polymers (Basel) 14(7): 1444.
- [5] Tanya Gupta, Samriti, Junghyun Cho, Jai Prakash (2021), "Hydrothermal synthesis of  $\text{TiO}_2$  nanorods: formation chemistry, growth mechanism, and tailoring of surface properties for photocatalytic activities", Materials Today Chemistry Volume 20, 100428.
- [6] Mohammad Al-Amin, Shaikat Chandra Dey, Taslim Ur Rashid, Md. Ashaduzzaman, Sayed Md. Shamsuddin (2016), "Solar Assisted Photocatalytic Degradation of Reactive Azo Dyes in Presence of Anatase Titanium Dioxide", International Journal of Latest Research in Engineering and Technology Volume 2 Issue 3, pages 14-21.
- [7] Mamoud Hezam, Saif M.H. Qaid, Idriss M. Bedja, Fahhad Alharbi, Mohammad Khaja Nazeeruddin and Abdullah Aldwayyan (2019), "Synthesis of Pure Brookite Nanorods in a Nonaqueous Growth Environment", Crystals 2019, 9(11), 562.  
<https://doi.org/10.3390/cryst9110562>
- [8] Saja S. Al-Taweel and Haider R. Saud (2016), "New route for synthesis of pure anatase  $\text{TiO}_2$  nanoparticles via ultrasound-assisted sol-gel method", Journal of Chemical and Pharmaceutical Research 8(2):620-626.
- [9] Asadollah Mohammadi, Seyed Hossein Mousav (2018), "Enhanced Photocatalytic Performance of  $\text{TiO}_2$  by  $\beta$ -Cyclodextrin for the Degradation of Organic Dyes" J. Water Environ. Nanotechnol., 3(3): 254-264.
- [10] Ibrahim Raheb, Mohammad Sameh Manlla (2021), "Kinetic and thermodynamic studies of the degradation of methylene blue by photo-Fenton reaction", Heliyon 7 e07427.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07427>

Thông tin liên hệ: **Chu Thị Thu Hiền**

Điện thoại: 0989 263 379 - Email: [hienctt@huce.edu.vn](mailto:hienctt@huce.edu.vn)

Bộ môn Hóa học, Khoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.