

## Nghiên cứu hiệu quả xử lý Mononitrotoluen trong môi trường nước bằng quá trình Sono-Photo-Fenton kết hợp xúc tác dị thể nano sắt hóa trị 0 (nZVI)

Phạm Sơn Tùng<sup>1\*</sup>, Nguyễn Văn Huông<sup>1</sup>, Phạm Hoài Nam<sup>1</sup>,  
Đoàn Công Danh<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Dung<sup>1</sup>, Vũ Thị Vui<sup>1</sup>,  
Nguyễn Thành Trung<sup>2</sup>, Phạm Thị Thúy<sup>2</sup>, Nguyễn Văn Hoàng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Viện Công nghệ mới, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, Số 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam;  
<sup>2</sup>Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, Số 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam.

\*Tác giả liên hệ: sontung231@gmail.com

Nhận bài: 04/9/2024; Hoàn thiện: 10/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.274-279>

### TÓM TẮT

Nước thải chứa thành phần Mononitrotoluene (MNT) có ảnh hưởng đến sức khỏe con người, sinh vật và môi trường xung quanh. Trong nghiên cứu này, hiệu quả xử lý MNT trong môi trường nước của quá trình Sono-Photo-Fenton-like kết hợp vật liệu nano sắt hóa trị 0 (nZVI) được nghiên cứu đánh giá. Trong đó, ảnh hưởng của các yếu tố pH, nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, nồng độ nZVI, thời gian phản ứng đến hiệu quả xử lý được nghiên cứu đánh giá thông qua quy hoạch thực nghiệm bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM). Kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu quả xử lý MNT bằng quá trình Sono-Photo-Fenton kết hợp nZVI đạt 100% tại điều kiện pH = 2, C<sub>0</sub><sup>MNT</sup> = 100 mg/L, C<sub>nZVI</sub> = 0,5 mM; C<sub>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub> = 5 mM, thời gian phản ứng 30 phút.

**Từ khóa:** Mononitrotoluen; Sono-Photo-Fenton-like; nZVI; RSM.

### 1. MỞ ĐẦU

Mononitrotoluen (MNT) là hợp chất thuộc nhóm nitrotoluen, thường xuất hiện trong nước thải từ quá trình sản xuất TNT, gây ảnh hưởng đến sức khỏe của con người và môi trường xung quanh. Tiếp xúc với MNT có thể gây kích ứng da, mắt, gây viêm nhiễm, tác động đến hệ thống thần kinh, gan và thận [1].

Một số phương pháp đã được nghiên cứu phát triển để xử lý nước thải có chứa MNT, bao gồm đốt, oxy hóa không khí ẩm, hấp phụ vi sinh vật và phân hủy [2-4],... Mỗi phương pháp này đều có những thách thức riêng. Ví dụ, quá trình đốt cháy dẫn đến ô nhiễm thứ cấp trong khí quyển. Trong khi, chi phí cao và vận hành phức tạp của quá trình oxy hóa không khí ẩm cản trở việc triển khai rộng rãi. Trong thời gian gần đây, quá trình Sono-Photo-Fenton-like đã thu hút được sự chú ý nhờ khả năng phân hủy các hợp chất hữu cơ phức tạp. Phương pháp này kết hợp siêu âm (sono), ánh sáng (photo), quá trình Fenton với vật liệu xúc tác dị thể, đã cho thấy tiềm năng lớn trong việc xử lý hiệu quả các chất ô nhiễm khó phân hủy. Trong quá trình Fenton-like, một loại xúc tác thường được nghiên cứu sử dụng là nano sắt hóa trị 0 (nZVI). Khi tham gia xử lý chất ô nhiễm trong quá trình Fenton-like, nZVI có thể thực hiện nhiều vai trò như chất khử trong phản ứng trực tiếp với chất ô nhiễm nhóm nitro (NO<sub>2</sub>), nguồn tái tạo ion Fe<sup>2+</sup> cho phản ứng Fenton [5],... Siêu âm giúp tạo nhiều gốc tự do thông qua hiện tượng xâm thực âm thanh, đồng thời làm sạch bề mặt xúc tác và kích thích phân tán hạt. Ngoài ra, sự kết hợp ánh sáng UV và siêu âm cũng tạo thành các gốc oxy hóa mạnh. Sự kết hợp này không chỉ nâng cao hiệu quả phân hủy mà còn giảm thiểu các sản phẩm phụ độc hại, mang lại giải pháp bền vững và thân thiện với môi trường.

Trên cơ sở đó, nhóm tác giả tiến hành đánh giá hiệu quả xử lý MNT trong môi trường nước bằng quá trình Sono-Photo-Fenton-like kết hợp nZVI. Trong đó, ảnh hưởng của một số yếu tố bao gồm pH (1 - 5), nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (0 - 10 mM), nồng độ nZVI (0,1 - 0,9 mM), thời gian phản ứng (0 - 40 phút) được nghiên cứu đánh giá bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM).

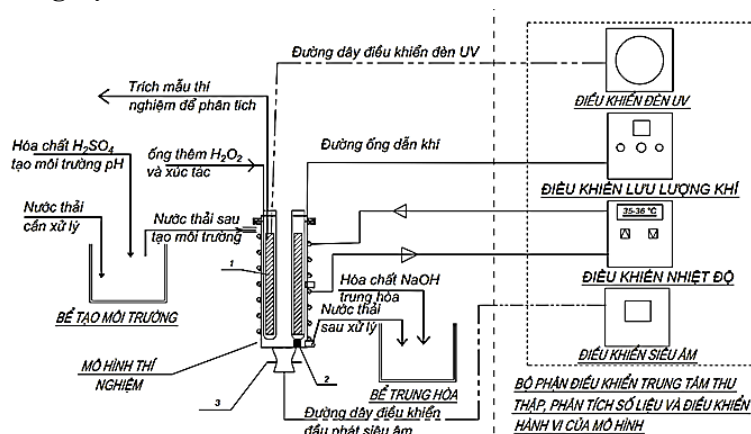
## 2. THỰC NGHIỆM

### 2.1. Hóa chất

Các hóa chất hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) 30%, NaOH và  $H_2SO_4$  98% được mua từ Merck (Mỹ), hóa chất 4-Mononitrotoluen được mua từ S.I Analytics (Trung Quốc).

Vật liệu nano sắt hóa trị 0 (nZVI) được tổng hợp bằng phương pháp khử tại phòng thí nghiệm của Viện Công nghệ mới, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự [6]. Hóa chất sử dụng để tổng hợp vật liệu nZVI bao gồm  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ,  $NaBH_4$  được mua từ Merck, Mỹ.

### 2.2. Mô hình thí nghiệm



**Hình 1.** Mô hình thí nghiệm phương pháp Sono-Photo-Fenton.

Ghi chú: 1 - Đèn UV; 2 - Đầu phân phối không khí; 3 - Đầu phát siêu âm.

Mô hình thí nghiệm nghiên cứu hiệu quả của quá trình Sono-Photo-Fenton được thiết kế dựa trên nghiên cứu [6]. Bình phản ứng dung tích 1,2 lít, đáy vát để tăng cường hiệu quả truyền sóng siêu âm. Đầu phát siêu âm được gắn vào đáy bình phản ứng và được kết nối với thiết bị tạo sóng siêu âm tần số 40 kHz và cường độ. Đèn UV bước sóng 254 nm công suất 10 W được đặt trong ống thạch anh lắp thẳng đứng bên trong bể phản ứng. Nhiệt độ trong bình phản ứng có thể kiểm soát thông qua cảm biến đo nhiệt độ và hệ thống đường dẫn nước làm mát.

### 2.3. Quy trình thí nghiệm

Thí nghiệm được tiến hành trong cùng điều kiện đối với 1,0 lít nước chứa MNT, nhiệt độ dung dịch trong khoảng  $30 \pm 1$  °C. Các yếu tố: pH thay đổi từ 1 - 5, thời gian phản ứng từ 0 đến 40 phút, liều lượng nano sắt hóa trị 0 trong khoảng 0,1 - 0,9 mM và lượng  $H_2O_2$  từ 0 - 10 mM. Đánh giá hiệu quả xử lý MNT thông qua thiết kế thí nghiệm trên phần mềm Design Expert 13 bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) với thiết kế mô hình lập tâm 5 điểm (CCD). Mô hình và phương trình hồi quy được kiểm tra mức độ phù hợp với thực nghiệm bằng kiểm định ANOVA (giá trị P-value = 0,05). Tổng cộng tiến hành 30 thí nghiệm (bảng 1).

**Bảng 1.** Các yếu tố để thiết kế thí nghiệm.

Biến	Đơn vị	Ký hiệu	Mức				
			-2	-1	0	1	2
A: pH	-	$X_1$	1	2	3	4	5
B: Lượng nZVI	mM	$X_2$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
C: Lượng $H_2O_2$	mM	$X_3$	0	2,5	5	7,5	10
D: Thời gian	phút	$X_4$	0	10	20	30	40

### 2.4. Phương pháp phân tích

Nồng độ MNT trong dung dịch được phân tích bằng thiết bị sắc ký lỏng hiệu năng cao HPLC

(Agilent, USA, 1100 Series) với cột Hypersil C18 (200 x 4 mm), pha động của methanol và nước 65/35, áp suất 120 bar, pH = 7.

### 2.5. Phương pháp đánh giá

Hiệu quả xử lý được đánh giá thông qua nồng độ MNT trong mẫu thí nghiệm.

$$H\% = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Công thức tính hiệu quả phản ứng được thể hiện trong phương trình (1). Trong đó: H là hiệu quả xử lý,  $C_0$  và  $C_t$  là nồng độ của MNT tại thời điểm ban đầu và thời điểm t, mg/L.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

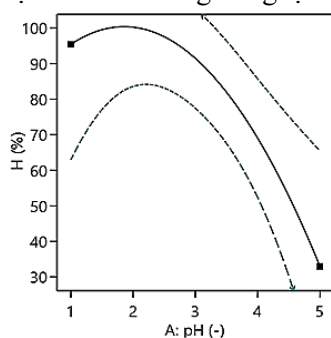
### 3.1. Mô hình quy hoạch thực nghiệm

Kết quả thí nghiệm được phân tích hồi quy và phương trình đa thức bậc hai được phần mềm đề xuất để mô hình hóa. Phân tích phương sai (ANOVA) được thực hiện trên mô hình đề xuất. Giá trị F của mô hình là 5,72, giá trị P = 0,0009 cho thấy phương trình hồi quy có ý nghĩa về mặt thống kê và dự đoán ảnh hưởng của các yếu tố đến hiệu quả xử lý. Mô hình bậc hai được thể hiện trong phương trình (2). Trong đó:  $X_1, X_2, X_3, X_4$  lần lượt là các ký hiệu cho các biến ở bảng 1.

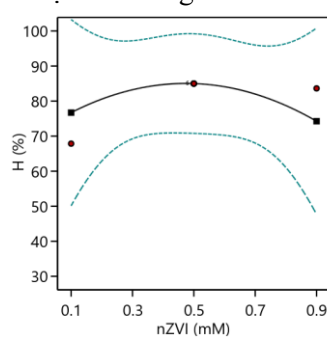
$$\begin{aligned} \%H = & - 73.57768 + 36.76448 X_1 + 166.62760 X_2 + 9.34946 X_3 + 4.86111 X_4 - 35.38437 \\ & X_1 * X_2 - 1.56625 X_1 * X_3 + 0.468688 X_1 * X_4 + 8.23625 X_2 * X_3 - 2.26094 X_2 * X_4 - \\ & 0.016625 X_3 * X_4 - 6.816145 X_1^2 - 59.49740 X_2^2 - 0.615383 X_3^2 - 0.088161 X_4^2 \end{aligned} \quad (2)$$

### 3.2. Ảnh hưởng của pH

Kết quả khảo sát trong hình 2 cho thấy sau thời gian phản ứng là 30 phút, với nồng độ MNT ban đầu là 100 mg/L, hiệu quả xử lý tăng dần từ pH = 1 lên pH = 2 và sau đó giảm dần tại pH = 3, 4 và 5. Tại thời điểm 30 phút phản ứng, có thể thấy rõ ở pH = 2 thì hiệu quả xử lý MNT đạt cao nhất là 100%. Trong khi đó, hiệu quả xử lý đạt 90% tại pH = 3. Nghiên cứu của Nguyễn Văn Hoàng và cộng sự cho thấy hệ Sono-Photo-Fenton đạt hiệu quả xử lý TNT tối đa tại pH = 2 - 3 [6]. Tại pH > 3 diễn ra sự lắng đọng của hydroxit sắt, các gốc có hoạt tính quang học thấp như  $Fe^{3+}(OH)^{2+}$ ;  $Fe_2^{3+}(OH)_2^{4+}$  và  $Fe_3^{3+}(OH)_5^{5+}$  thường chiếm ưu thế [7]. Trong khi đó, ở môi trường pH < 2,1, hình thành các gốc oxonium ions ( $H_3O_2^+$ ) và ion  $[Fe(H_2O)_6]^{3+}$  từ đó làm giảm độ hoạt động của ion  $Fe^{2+}$  và  $H_2O_2$  [8, 9]. Theo nghiên cứu của Zhu và cộng sự, quá trình hình thành hydroxyl tự do từ các bong bóng tạo thành bởi sóng siêu âm bị ảnh hưởng với điều kiện pH [10].



**Hình 2.** Ảnh hưởng của pH đến hiệu quả xử lý MNT tại  $C_{nZVI} = 0.5 \text{ mM}$ ,  $C_{H_2O_2} = 5 \text{ mM}$ .



**Hình 3.** Ảnh hưởng của nồng độ nZVI tại pH = 3,  $C_{H_2O_2} = 5 \text{ mM}$ , 20 phút phản ứng.

### 3.3. Ảnh hưởng của nồng độ nZVI

Ảnh hưởng của nồng độ nZVI đến hiệu quả xử lý MNT được nghiên cứu ở các nồng độ 0,1 mM, 0,3 mM, 0,5 mM, 0,7 mM, 0,9 mM. Các kết quả như trong hình 3 tại mốc thời gian 20 phút cho thấy khi tăng liều lượng vật liệu nZVI thì hiệu quả xử lý MNT tăng lên. Cụ thể, khi nồng độ nZVI tăng từ 0,1 mM lên 0,5 mM, hiệu quả xử lý tăng từ 75% lên 85%. Tuy nhiên hiệu quả xử lý MNT

giảm khi tăng nồng độ lên 0,9 mM. Theo Thomas và cộng sự, yếu tố hạn chế ứng dụng của vật liệu nano sắt hóa trị 0 trong quá trình Fenton-like là độ phân tán kém [5]. Trong quá trình Sono-Photo-Fenton-like, dưới tác động của siêu âm, các hạt nano sắt đã được phân tán tốt vào môi trường, từ đó làm tăng hiệu quả xử lý [11]. Đồng thời, khi tăng lượng vật liệu sẽ làm gia tăng sự hình thành các bong bóng cavitation trên bề mặt vật liệu, từ đó làm tăng nồng độ hydroxyl tự do [12]. Nồng độ nZVI tăng cũng làm tăng khả năng hấp phụ và phản ứng trên bề mặt vật liệu. Tuy nhiên, hiệu quả xử lý có thể bị suy giảm khi sử dụng nồng độ xúc tác cao hơn do có thể dẫn đến sự phản ứng của ion sắt và gốc hydroxyl tạo thành trên bề mặt vật liệu [13].

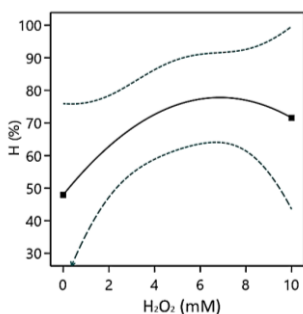
**3.4. Ảnh hưởng của nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

Thí nghiệm nghiên cứu khoảng nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> thay đổi từ 0 - 10 mM. Kết quả tại hình 4 cho thấy khi tăng nồng độ từ 2 đến 7 mM thì hiệu quả xử lý MNT tăng từ 72,5% đến 87,5%. Tuy nhiên, khi nồng độ tiếp tục tăng đến 10 mM thì hiệu quả xử lý giảm còn 81,7%. Khi tăng lượng H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bị phân hủy bởi UV làm tăng số lượng OH<sup>•</sup>. Tuy nhiên, khi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> thừa có thể làm giảm hiệu quả phản ứng do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> hoạt động như một chất loại bỏ gốc hydroxyl tự do (phương trình 3). Từ đó làm giảm sự sẵn có của các gốc hydroxyl dẫn đến việc suy giảm khả năng phân hủy MNT [14]. Đồng quan điểm này, theo Zang và cộng sự, nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> cao có thể ảnh hưởng tiêu cực đến quá trình Fenton-like [15].

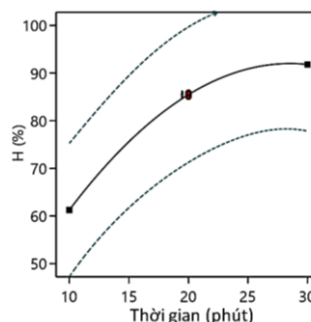


**3.5. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng**

Kết quả nghiên cứu tại hình 5 cho thấy, tại điều kiện pH = 3, nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ban đầu bằng 5 mM, lượng vật liệu nano sắt hóa trị 0 bằng 0,5 mM, hiệu quả xử lý MNT tăng từ 61% lên 91,5% khi tăng thời gian phản ứng từ 10 phút lên 30 phút. Sau 30 phút, hiệu quả xử lý MNT tăng nhưng không đáng kể.



**Hình 4.** Ảnh hưởng của nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tại điều kiện C<sub>nZVI</sub> = 0.5 mM, pH = 3, sau 20 phút phản ứng.

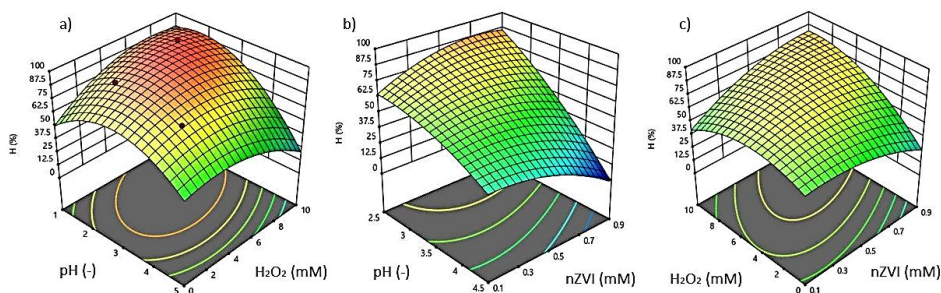


**Hình 5.** Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến hiệu quả xử lý MNT.

**3.6. Ảnh hưởng của các yếu tố kết hợp**

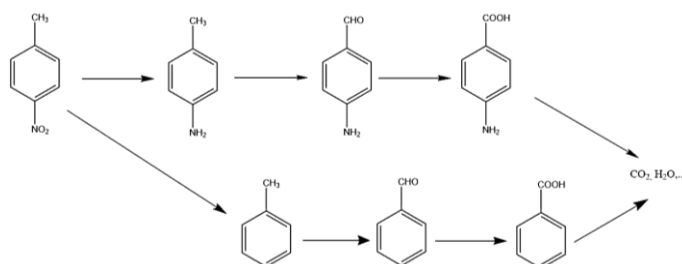
Từ hình 6a có thể thấy rằng, tại điều kiện C<sub>nZVI</sub> = 0,5 mM, 20 phút phản ứng, hiệu quả xử lý tăng lên khi tăng nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> và giảm độ pH. Theo nghiên cứu của Shafieiyoun và cộng sự, hiệu quả của quá trình Fenton tăng lên khi tăng nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ban đầu và giảm độ pH của dung dịch ban đầu [16]. Ngoài ra, một số nghiên cứu đã chỉ ra ảnh hưởng của pH đến nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tối ưu cho quá trình Fenton. Khi ở nồng độ pH cao làm gia tăng kết tủa trên bề mặt vật liệu từ đó làm thay đổi nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tối ưu [17]. Đồng thời, giá trị pH đóng vai trò quan trọng trong sự ổn định của H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Vì vậy, ở mỗi giá trị pH khác nhau sẽ có một nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tối ưu [18].

Từ hình 6b có thể thấy hiệu quả xử lý MNT tăng lên khi giảm đồng thời độ pH và tăng nồng độ nZVI. Tuy nhiên, tại mỗi giá trị pH thì hiệu quả xử lý MNT sẽ đạt tối đa tại một nồng độ nZVI nhất định. Hình 6c cho thấy hiệu quả xử lý tăng lên khi tăng liều lượng nZVI và H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Xu hướng gia tăng hiệu quả phân hủy khi nồng độ nZVI và nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ban đầu tăng lên đã được quan sát thấy trong nghiên cứu được thực hiện bởi Devi và cộng sự [19].



Hình 6. Ảnh hưởng đến hiệu quả xử lý MNT của nồng độ nZVI và pH (a), của pH và nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (b), của nồng độ nZVI và H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (c).

### 3.7. Đề xuất cơ chế phân hủy MNT bằng quá trình Sono-Photo-Fenton kết hợp nZVI



Hình 7. Cơ chế phân hủy Mononitrololuen bằng quá trình Sono-Photo-Fenton kết hợp nZVI.

Quá trình phân hủy MNT được đề xuất theo hai cơ chế. Trong quá trình đầu tiên, nhóm nitro bị chuyển thành amin trong phản ứng với nZVI. Sản phẩm của quá trình đầu tiên là Amino Toluen. Tiếp đó, dưới tác dụng của gốc •OH, quá trình oxy hóa Fenton diễn ra và hình thành axit 4-aminbenzoic. Các sản phẩm phụ này sẽ tiếp tục phân hủy dần thành các sản phẩm cuối cùng là nước và CO<sub>2</sub>. Một quá trình phân hủy khác được đề xuất là quá trình loại bỏ nhóm nitro khỏi vòng benzen (denitration). Gốc •OH giúp phân cắt liên kết giữa vòng thơm và nhóm nitro tạo thành toluen. Quá trình oxy hóa tiếp tục xảy ra, tạo thành sản phẩm là benzaldehyde. Sau đó, quá trình decarboxyl hóa tạo axit benzoic diễn ra và cuối cùng được khoáng hóa sẽ tạo ra các sản phẩm cuối cùng là nước và CO<sub>2</sub>,...

## 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu ảnh hưởng của pH, nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, nồng độ nZVI, thời gian phản ứng cho thấy hiệu quả xử lý MNT bằng phương pháp Sono-Photo-Fenton kết hợp vật liệu nZVI. Trong đó, tại nồng độ C<sup>o</sup><sub>MNT</sub> = 100 mg/L sau 30 phút phản ứng với điều kiện tối ưu ở môi trường pH = 2, nồng độ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ban đầu bằng 5 mM, nồng độ nZVI bằng 0,5 mM đạt hiệu quả xử lý 100%. Đây là cơ sở đề nhóm nghiên cứu tiếp tục nghiên cứu tối ưu quy trình xử lý nước thải chứa thành phần MNT và nước thải công nghiệp nói chung.

**Lời cảm ơn:** Nhóm tác giả cảm ơn Phòng Công nghệ môi trường/Viện Công nghệ mới đã tạo điều kiện về cơ sở vật chất phòng thí nghiệm cho nghiên cứu này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. "Toxicology and carcinogenesis studies of p-nitrotoluene (CAS no. 99-99-0) in F344/N rats and B6C3F(1) mice (feed studies)," Natl Toxicol Program Tech Rep Ser, no. 498, pp. 1-277, (2002).
- [2]. R. Kumar, P. B. Wagh, S. V. Ingale, and K. D. J. D. S. J. Joshi, "Degradation of Mononitrotoluene by Electrochemical Method," (2021).
- [3]. M. Rostami, H. Mazaheri, A. Hassani Joshaghani, and A. Shokri, "Using Experimental Design to Optimize the Photo-degradation of P-Nitro Toluene by Nano-TiO<sub>2</sub> in Synthetic Wastewater," International Journal of Engineering, vol. 32, no. 8, pp. 1074-1081, (2019).

- [4]. C. Xia *et al.*, "Removal of organic pollutants from mononitrotoluene (MNT) wastewater by reduced pressure distillation," *Separation and Purification Technology*, vol. 120, pp. 1-5, (2013).
- [5]. N. Thomas, D. D. Dionysiou, and S. C. Pillai, "Heterogeneous Fenton catalysts: A review of recent advances," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 404, p. 124082, (2021).
- [6]. H. Nguyen, S. Pham, T. Vu, H. Nguyen, and D. La, "Effective treatment of 2,4,6-trinitrotoluene from aqueous media using a sono-photo-Fenton-like process with a zero-valent iron nanoparticle (nZVI) catalyst," *RSC Advances*, vol. 14, pp. 23720-23729, (2024.).
- [7]. E. C. A. Rubio-Clemente, G.A. Peñuela, "Petrochemical wastewater treatment by photo-Fenton process," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 226, p. 62, (2015).
- [8]. J. M. Monteagudo *et al.*, "Ultrasound-assisted homogeneous photocatalytic degradation of Reactive Blue 4 in aqueous solution," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 152-153, pp. 59-67, (2014).
- [9]. Q. Zhou *et al.*, "Degradation kinetics of sodium alginate via sono-Fenton, photo-Fenton and sono-photo-Fenton methods in the presence of TiO<sub>2</sub> nanoparticles," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 135, pp. 111-120, (2017).
- [10]. Y. Zhu *et al.*, "A critical review on metal complexes removal from water using methods based on Fenton-like reactions: Analysis and comparison of methods and mechanisms," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 414, p. 125517, (2021).
- [11]. A. Khataee *et al.*, "Heterogeneous sono-Fenton process using pyrite nanorods prepared by non-thermal plasma for degradation of an anthraquinone dye," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 32, pp. 357-370, (2016).
- [12]. X. Zhong *et al.*, "Mesoporous silica iron-doped as stable and efficient heterogeneous catalyst for the degradation of C.I. Acid Orange 7 using sono-photo-Fenton process," *Separation and Purification Technology*, vol. 80, no. 1, pp. 163-171, (2011).
- [13]. C. Lai *et al.*, "Fabrication of novel magnetic MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/bio-char composite and heterogeneous photo-Fenton degradation of tetracycline in near neutral pH," *Chemosphere*, vol. 224, pp. 910-921, (2019).
- [14]. M. Dukkanci, "Sono-photo-Fenton oxidation of bisphenol-A over a LaFeO<sub>3</sub> perovskite catalyst," *Ultrason Sonochem*, vol. 40, pp. 110-116, (2018).
- [15]. C. C. W. Qu *et al.*, "Electron-rich/poor reaction sites enable ultrafast confining Fenton-like processes in facet-engineered BiOI membranes for water purification," *Appl. Catal. B Environ*, vol. 304, p. 120970, (2022).
- [16]. S. Shafieiyoun, Ebadi, T., & Nikazar, M., "Treatment of landfill leachate by Fenton process with nano sized zero valent iron particles," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 6, pp. 119-128, (2012).
- [17]. Z. G. X. Pan *et al.*, "Preparation of biochar and biochar composites and their application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: a review," *Sci. Total Environ.*, vol. 754, p. 142104, (2021).
- [18]. G. Z. J. Zhang *et al.*, "Carbon nanodot-modified FeOCl for photo-assisted Fenton reaction featuring synergistic in-situ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production and activation," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 266, p. 118665, (2020).
- [19]. L. G. Devi *et al.*, "Kinetic modeling based on the non-linear regression analysis for the degradation of Alizarin Red S by advanced photo Fenton process using zero valent metallic iron as the catalyst," *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, vol. 314, pp. 88-94, (2009).

### ABSTRACT

#### **Study on the efficiency of mononitrotoluene treatment in aqueous environments using the Sono-Photo-Fenton process combined with zero-valent iron nanoparticle (nZVI) catalysts**

The wastewater containing Mononitrotoluene (MNT) has adverse effects on human health, living organisms, and the surrounding environment. In this study, the efficiency of MNT treatment in water using the Sono-Photo-Fenton-like process combined with zero-valent iron nanoparticles (nZVI) was evaluated. The effects of pH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration, nZVI concentration, and reaction time on the treatment efficiency were investigated using experimental design through the Response Surface Methodology (RSM). The study results showed that the treatment efficiency of MNT using the Sono-Photo-Fenton process combined with nZVI reached 100% under the conditions of pH = 2, initial MNT concentration of 100 mg/L, nZVI concentration  $C_{nZVI} = 0.5$  mM,  $C_{H_2O_2} = 5$  mM and a reaction time of 30 minutes.

**Keywords:** Mononitrotoluen; Sono-Photo-Fenton-like; nZVI; RSM.