



Original Article

Application of Response Surface Methodology to Optimize Mononitrotoluen Aquatic Removal by Photo-fenton Process

Nguyen Van Huong¹, Pham Son Tung¹, Nguyen Van Hoang¹,
Vu Khanh Vy¹, Le Minh Tri², Nguyen Manh Khai^{3,4,*}

¹*Institute for New Technology, 17 Hoang Sam, Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam*

²*Academy of Military Science and Technology, 17 Hoang Sam, Nghia Do, Cau Giay, Hanoi, Vietnam*

³*Faculty of Environmental Sciences, VNU University of Science,
334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam*

⁴*VNU Key Laboratory of Green Environment, Technology and Waste Utilization (GreenLab),
VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam*

Received 30 July 2024

Revised 03 September 2024; Accepted 23 October 2024

Abstract: In this study, the effectiveness of pH (1-5), hydrogen peroxide concentration (5-10 mM), ion Fe^{2+} concentration (0,1-0,5 mM), and reaction time on treatment of mononitrotoluen by homogeneous Photo-Fenton process was evaluated. The response surface methodology (RSM) was applied to design the experiment and determine the optimal treatment. The results indicated, at optimized pH=3, $C_{\text{MNT}}^0=100$ mg/L, $C_{\text{Fe}^{2+}}=0.4$ mM, $C_{\text{H}_2\text{O}_2}=2.5$ mM, the MNT treatment efficiency reached 99.4% after 5 minutes.

Keywords: Mononitrotoluen, Response surface methodology, Photo-Fenton.

* Corresponding author.

E-mail address: nguyenmanhkhai@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuces.5192>

Tối ưu hóa ảnh hưởng một số thông số đến hiệu quả xử lý mononitrotoluen trong môi trường nước bằng hệ quang Fenton

Nguyễn Văn Huống¹, Phạm Sơn Tùng¹, Nguyễn Văn Hoàng¹,
Vũ Khánh Vy¹, Lê Minh Trí², Nguyễn Mạnh Khải^{3,4,*}

¹Viện Công nghệ mới, 17 Hoàng Sâm, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự, 17 Hoàng Sâm, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

³Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

⁴Phòng thí nghiệm trọng điểm Công nghệ môi trường xanh và Tái chế chất thải,

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,

334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 30 tháng 7 năm 2024

Chỉnh sửa ngày 03 tháng 9 năm 2024; Chấp nhận đăng ngày 23 tháng 10 năm 2024

Tóm tắt: Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tiến hành thử nghiệm ảnh hưởng của các yếu tố pH (1-5), nồng độ H₂O₂ (0-5 mM), nồng độ ion Fe²⁺ (0,1-0,5 mM), thời gian phản ứng (0-10 phút) đến hiệu quả xử lý Mononitrotoluen (MNT) trong môi trường nước bằng hệ quang Fenton. Phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) được sử dụng để thiết kế thí nghiệm và phân tích đánh giá. Kết quả cho thấy, tại pH = 3, C⁰_{MNT} = 100 mg/L, C_{Fe²⁺} = 0,4 mM, C_{H₂O₂} = 2,5 mM, hiệu quả xử lý MNT đạt 99,4% sau 5 phút phản ứng.

Từ khóa: MNT, Quy hoạch thực nghiệm, Quang Fenton.

1. Mở đầu

MNT là một sản phẩm được tạo ra trong quá trình sản xuất thuốc nổ Trinitrotoluen (TNT), đồng thời được dùng trong công nghệ thuốc nhuộm. Khi tiếp xúc với MNT có thể gây kích ứng da và mắt, gây viêm nhiễm và đau nhức. Nếu hít phải hoặc nuốt phải lượng lớn MNT có thể gây ra tác động độc hại đến hệ thống thần kinh, gan và thận [1].

Đã có một số nghiên cứu xử lý MNT trong môi trường nước, bao gồm phương pháp điện hoá [2], phương pháp chưng cất giảm áp suất [3], phương pháp quang xúc tác [4], phương pháp oxy hóa nâng cao [5],... Hiện nay, hướng nghiên

cứu được quan tâm là áp dụng quá trình oxy hoá nâng cao để xử lý nước thải chứa các thành phần hữu cơ khó phân hủy thông qua các phản ứng oxy hóa với các gốc hydroxyl tự do. Trong đó, quá trình Quang Fenton là sự kết hợp giữa tia UV và quá trình Fenton (Fe²⁺ và H₂O₂) đã chứng minh hiệu quả xử lý đối với các hợp chất hữu cơ khó phân hủy nhóm nitrotoluen và nhóm phenol như TNT [6], Dinitrotoluen (DNT) [7], Diazodinitrophenol (DDNP) [8]. Ngoài ra, quá trình Quang Fenton cũng đã được áp dụng để xử lý nước thải vàng tính axit phát sinh từ dây chuyền sản xuất TNT [9]. Kết quả cho thấy hiệu quả xử lý TNT đạt gần 100% sau 120 phút xử lý.

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: nguyenvanmanhkhai@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5192>

Ưu điểm của phương pháp là quá trình xử lý diễn ra nhanh, đạt hiệu quả cao, giảm sự hình thành bùn thải sau xử lý, có thể dễ dàng kết hợp với các phương pháp khác. Một số yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả xử lý nước thải của quang Fenton như nồng độ chất ô nhiễm đầu vào, nồng độ ion Fe^{2+} , nồng độ H_2O_2 , thời gian phản ứng, độ pH dung dịch,...

Trên cơ sở các nghiên cứu đã thực hiện, nhóm tác giả tiến hành đánh giá hiệu quả xử lý MNT trong môi trường nước bằng hệ Quang Fenton. Trong đó, ảnh hưởng của một số yếu tố bao gồm pH (1-5), nồng độ H_2O_2 (0-5 mM), nồng độ ion Fe^{2+} (0,1-0,5 mM), thời gian phản ứng (0-10 phút) đến hiệu suất xử lý MNT trong môi trường nước được nghiên cứu đánh giá bằng phương pháp bề mặt đáp ứng. Phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology - RSM) là một tập hợp các kỹ thuật thống kê và toán học được sử dụng để xây dựng mô hình và phân tích các vấn đề mà kết quả bị ảnh hưởng bởi nhiều biến đầu vào (biến độc lập). Phương pháp này giúp tối ưu hóa các quá trình hoặc hệ thống bằng cách tìm ra các điều kiện hoạt động tối ưu cho đầu ra mong muốn. Nhóm nghiên cứu đã sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) với thiết kế tổ hợp trung tâm (CCD) để nghiên cứu và xây dựng các quy luật thực nghiệm với 4 yếu tố: pH, nồng độ Fe^{2+} , nồng độ H_2O_2 , và thời gian phản ứng. Phương pháp này cho phép xác định các mối quan hệ giữa các yếu tố ảnh hưởng và tối ưu hóa các điều kiện thí nghiệm để đạt được hiệu quả xử lý tốt nhất.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Hóa chất và thiết bị

2.1.1. Thiết bị

- Cân phân tích PA214, Ohaus (USA), độ chính xác $\pm 0,0001$ g.
- Máy đo pH Handyslab 680.
- Máy khuấy từ gia nhiệt 03403-15, Cole-Parmer Instrument Company
- Đèn UV công suất 15 W, bước sóng 254 nm.

- Hệ thống thiết bị sắc ký lỏng hiệu năng cao (HPLC) Model HP 1100, sử dụng detector chuỗi (DAD) do hãng Agilent (Mỹ) sản xuất, đặt tại phòng Công nghệ Môi trường, Viện Công nghệ Mới, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự.

2.1.2. Hóa chất

- 4-Mononitrotoluen loại tinh thể độ sạch phân tích (Xilong Scientific);
- Hydro peroxide (H_2O_2) có độ sạch phân tích, nồng độ 30% (P.a- Merck);
- Ferrous sulfate heptahydrate ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) (P.a- Merck);
- Các dung môi có độ sạch dùng cho phân tích HPLC (axetonitryl, etanol, metanol, hexan) (Merck).

2.1.3. Mô hình thực nghiệm



Hình 1. Mô hình thí nghiệm hệ UV-Fenton

Ghi chú: 1-Đèn UV, 2- ống thạch anh, 3- đầu phân phối khí.

Mô hình thí nghiệm nghiên cứu hiệu quả của hệ UV-Fenton được mô tả trong Hình 1, được thiết kế dựa trên tham khảo thiết kế trong nghiên cứu. Bình phản ứng dung tích 1,0 lít được chế tạo từ vật liệu Inox 304 dày 1 mm. Ở đáy bình được lắp đặt phân phối không khí tốc độ 1 lít/phút. Ở trong bình, tại vị trí chính giữa có 01 đèn UV bước sóng 254 nm, công suất 15 W. Hệ thống có tích hợp kiểm soát được nhiệt độ và theo dõi pH thay đổi trong quá trình phản ứng.

2.2. Xây dựng mô hình thực nghiệm RSM-CCD

Thí nghiệm được tiến hành trong cùng điều kiện đối với 1 lít nước chứa MNT nồng độ

100 mg/L, đèn UV công suất 15 W, nhiệt độ dung dịch trong khoảng 30 ± 1 °C.

Sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) với thiết kế tổ hợp trung tâm (CCD) để nghiên cứu, xây dựng các quy luật thực nghiệm với 4 yếu tố. Dựa trên phần mềm Design

Expert 13, nhóm nghiên cứu xây dựng quy hoạch thực nghiệm dựa trên 4 thông số với phạm vi thay đổi và các thử nghiệm được thiết kế được liệt kê trong Bảng 1. Tổng cộng có 30 thử nghiệm đã được thiết kế và tiến hành.

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: Fe ²⁺	mM	X ₂	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
C: H ₂ O ₂	mM	X ₃	0	1,25	2,5	3,75	5
D: Thời gian	phút	X ₄	0	2,5	5	10	20

2.3. Xây dựng đường chuẩn xác định Mononitrotoluen bằng phương pháp sắc ký lỏng hiệu năng cao

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 acetonitrile và nước 65/35, áp suất 280 bar, pH=7.

2.4. Phương pháp nghiên cứu

Hiệu suất xử lý MNT của hệ Quang Fenton được tính toán theo công thức:

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

Trong đó: H là hiệu suất xử lý, C₀ và C_t là nồng độ của MNT tại thời điểm ban đầu và thời điểm t, mg/L.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Mô hình quy hoạch thực nghiệm

Kết quả của quy hoạch thực nghiệm của các thí nghiệm nghiên cứu hiệu quả xử lý MNT trong môi trường nước bằng hệ Sono-Photo-Fenton được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm hiệu quả xử lý MNT

STT	Thiết kế ma trận				Hiệu suất (H)
	Các yếu tố				
	A: pH	B: Fe ²⁺	C: H ₂ O ₂	D: Thời gian	%
	-	mM	mM	phút	
1	4,00	0,40	3,75	7,50	88,60
2	3,00	0,30	2,5	10,00	100,00
3	2,00	0,40	3,75	2,50	37,50
4	4,00	0,20	3,75	7,50	48,39
5	2,00	0,40	3,75	7,50	49,74
6	3,00	0,30	2,50	5,00	94,10
7	5,00	0,30	2,5	5,00	34,05
8	4,00	0,20	3,75	2,50	27,45
9	4,00	0,20	1,25	7,50	50,21

10	2,00	0,40	1,25	7,50	56,21
11	2,00	0,20	3,75	7,50	40,64
12	4,00	0,40	1,25	7,50	58,60
13	4,00	0,20	1,25	2,50	32,27
14	3,00	0,30	2,50	5,00	94,80
15	3,00	0,30	2,50	0,00	0,00
16	3,00	0,10	2,50	5,00	64,74
17	3,00	0,30	2,50	5,00	93,2
18	3,00	0,30	2,50	5,00	95,60
19	2,00	0,20	1,25	2,50	29,47
20	4,00	0,40	3,75	2,50	53,61
21	2,00	0,20	1,25	7,50	36,77
22	2,00	0,20	3,75	2,50	27,99
23	3,00	0,30	2,50	5,00	93,70
24	1,00	0,30	2,50	5,00	10,69
25	2,00	0,40	1,25	2,50	55,81
26	4,00	0,40	1,25	2,50	48,05
27	3,00	0,50	2,50	5,00	96,93
28	3,00	0,30	0,00	5,00	3,40
29	3,00	0,30	2,50	5,00	95,70
30	3,00	0,30	5,00	5,00	99,52

Sau khi tiến hành hết tất cả các thí nghiệm, phân tích hồi quy được thực hiện trên dữ liệu và phương trình đa thức bậc hai được phân mềm đề xuất để mô hình hóa quy trình. Phân tích phương sai (ANOVA) được thực hiện trên mô hình đề xuất, với giá trị P nhỏ hơn 0,05 cho thấy mô hình có ý nghĩa và lớn hơn 0,10 cho thấy mô hình không có ý nghĩa và bị bỏ qua.

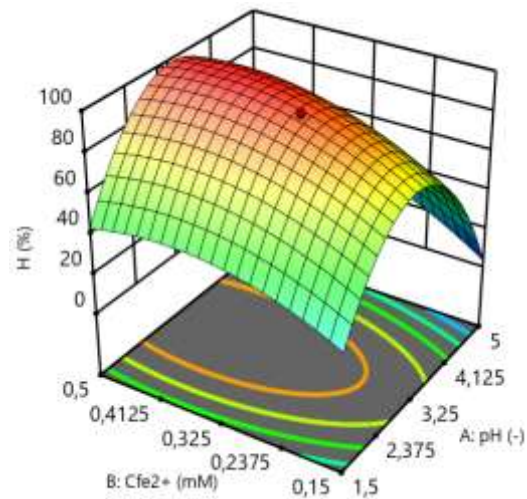
Mô hình bậc hai được đã được hiển thị trong biểu thức 2.

$$\begin{aligned} \%H = & -222,54 + 100,25 X_1 + 277,94 X_2 + 29,24 X_3 + 18,3 X_4 + \\ & 16,34 X_1 * X_2 + 2,56 X_1 * X_3 + 1,29 X_1 * X_4 + 7,51 X_2 * X_3 - \\ & 0,16 X_2 * X_4 + 0,89 X_3 * X_4 - 18,84 X_1^2 - 422,61 X_2^2 - 7.40 X_3^2 - 1,9 X_4^2 \end{aligned} \quad (2)$$

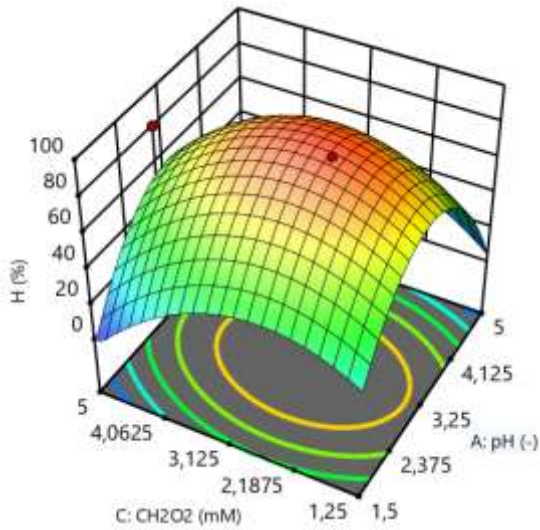
Trong đó: X₁, X₂, X₃, X₄ lần lượt là các ký hiệu cho các biến ở Bảng 2.

Giá trị F của mô hình là 4,71 và giá trị P = 0,0025 cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê và

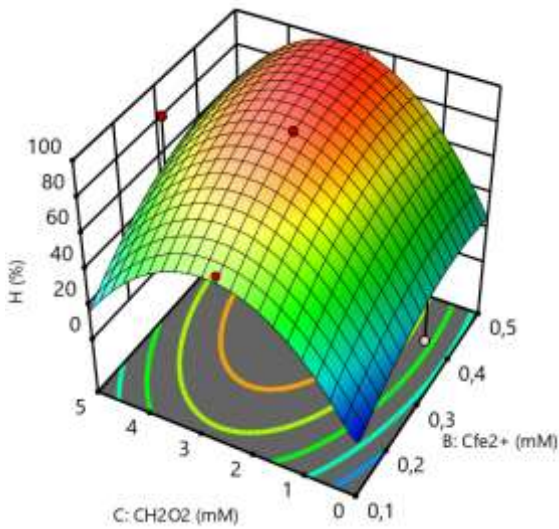
có thể dự đoán ảnh hưởng của các yếu tố đến hiệu quả xử lý MNT. Hình 2-4 mô tả ảnh hưởng của các yếu tố đến hiệu quả xử lý.



Hình 2. Biểu đồ ảnh hưởng của pH và nồng độ ion Fe²⁺ đến hiệu quả xử lý MNT (C_{H₂O₂} = 3,75 mM, thời gian phản ứng 5 phút).



Hình 3. Biểu đồ ảnh hưởng của pH và nồng độ H₂O₂ đến hiệu quả xử lý MNT (C_{Fe²⁺} = 0,3 mM, thời gian phản ứng 5 phút).



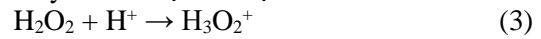
Hình 4. Biểu đồ ảnh hưởng của nồng độ ion Fe²⁺ và nồng độ H₂O₂ đến hiệu quả xử lý MNT (pH=3, thời gian phản ứng 5 phút).

3.2. Ảnh hưởng của pH

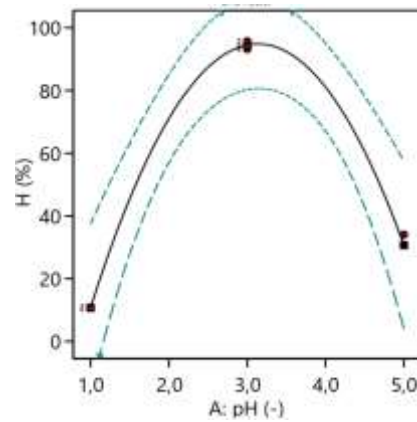
Kết quả khảo sát ảnh hưởng pH được biểu thị trong Hình 5. Từ kết quả cho thấy, tại pH=1, hiệu quả xử lý MNT chỉ đạt 9,11%, khi tăng pH từ 2 đến 3 thì hiệu quả xử lý MNT tăng lên đáng kể đạt 80,68% và 94,54% tương ứng. Tại pH=4 và

pH = 5 thì hiệu quả xử lý giảm đi đáng kể, chỉ đạt 80,66% và 29,12% tại thời điểm 5 phút.

Trong nghiên cứu xử lý TNT bằng quá trình Quang-Fenton của Nguyễn Văn Huống và cộng sự [7], hiệu quả xử lý TNT đạt tối đa tại pH=3. Theo tác giả, tại pH < 2, các gốc tự do hydroxyl có thể bị tiêu thụ bởi chính ion H⁺:

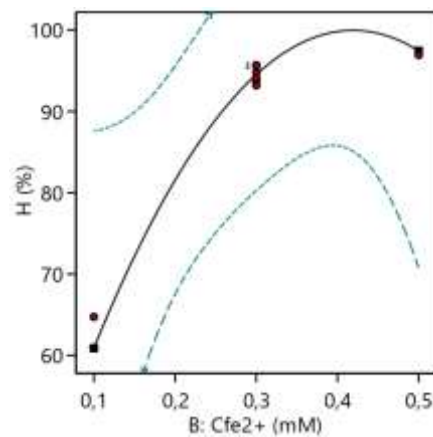


Trong khi đó, tại pH > 4, hydro peoxit bị phân hủy khá nhanh và đây là lý do chính dẫn tới giảm hiệu suất của quá trình xử lý.



Hình 5. Biểu đồ ảnh hưởng của pH đến hiệu quả xử lý MNT (C_{Fe²⁺} = 0,3 mM, CH₂O₂ = 2,5 mM, thời gian phản ứng 5 phút).

3.3. Ảnh hưởng của nồng độ ion Fe²⁺

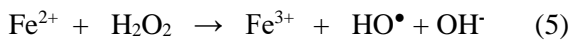


Hình 6. Biểu đồ ảnh hưởng của nồng độ ion Fe²⁺ đến hiệu quả xử lý MNT (pH=3, CH₂O₂ = 2,5 mM, thời gian phản ứng 5 phút).

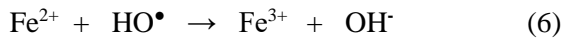
Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ ion Fe^{2+} đến hiệu suất phân hủy MNT được trình bày tại Hình 6.

Khi tăng nồng độ ion Fe^{2+} từ 0,1 đến 0,4 mM, hiệu quả xử lý MNT tăng đáng kể từ 59,33% lên 99,42%. Tuy nhiên khi tăng nồng độ ion Fe^{2+} lên 0,5 mM thì hiệu quả xử lý giảm xuống 95,88%.

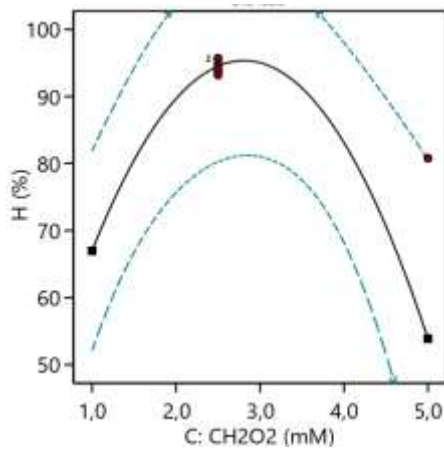
Khi tăng nồng độ ion Fe^{2+} sẽ làm tăng cường quá trình sản sinh gốc hydroxyl tự do. Từ đó làm gia tăng hiệu quả xử lý MNT trong nước.



Tuy nhiên, khi tăng nồng độ ion Fe^{2+} cũng làm tăng cường độ đục của dung dịch, từ đó ảnh hưởng đến sự phát quang của đèn UV và làm giảm hiệu quả xử lý [7]. Đồng thời, ion Fe^{2+} phản ứng trực tiếp với gốc hydroxyl tự do làm giảm nồng độ trong dung dịch.



3.4. Ảnh hưởng của nồng độ H_2O_2

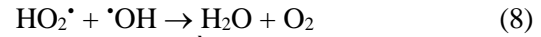
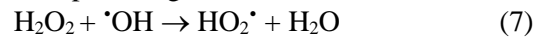


Hình 7. Biểu đồ ảnh hưởng của nồng độ H_2O_2 đến hiệu quả xử lý MNT ($C_{\text{Fe}^{2+}} = 0,4 \text{ mM}$, $\text{pH}=3$, thời gian phản ứng 5 phút).

Nồng độ H_2O_2 là một trong những thông số ảnh hưởng mạnh đến các phản ứng Fenton và việc bổ sung hydro peroxide (H_2O_2) thường làm tăng tốc độ oxy hóa hóa học [10]. Hình 7 cho thấy ảnh hưởng của nồng độ H_2O_2 ở các nồng độ 1 mM - 5 mM. Hiệu quả xử lý MNT tăng lên khi

tăng nồng độ H_2O_2 từ 1 mM lên 2,5 mM. Hiệu quả xử lý MNT tại nồng độ 2,5 mM và 3 mM không khác biệt đáng kể. Tuy nhiên sau đó giảm dần khi tăng nồng độ H_2O_2 tăng từ 3 mM đến 5 mM.

Trong nghiên cứu xử lý TNT bằng Quang Fenton, hiệu quả xử lý TNT tăng lên khi nồng độ H_2O_2 tăng từ 15 mM lên 35 mM [6]. Theo tác giả, khi tăng nồng độ H_2O_2 (tỉ lệ $C_{\text{H}_2\text{O}_2}/C_{\text{Fe}^{2+}}$ tăng), số gốc OH^\bullet tự do tạo ra nhiều hơn. Tuy nhiên, khi nồng độ H_2O_2 quá cao dẫn đến lượng H_2O_2 dư tác dụng với các gốc OH^\bullet làm giảm các tác nhân phản ứng:

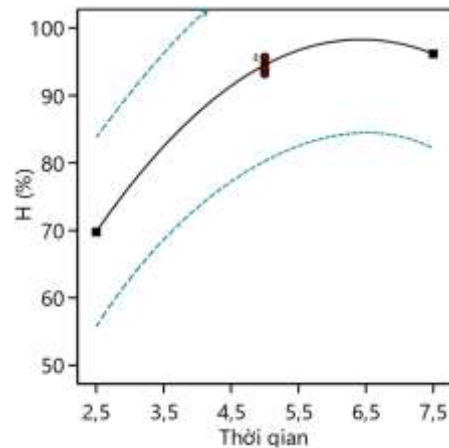


Ngoài ra, khi nồng độ H_2O_2 quá cao còn có khả năng oxy hoá Fe^{2+} thành Fe^{3+} từ đó làm giảm hiệu quả xử lý:



3.5. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng

Thời gian phản ứng là một trong những yếu tố quan trọng quyết định hiệu quả phân hủy MNT. Kết quả khảo sát sự ảnh hưởng thời gian phản ứng đến hiệu suất phân hủy MNT được trình bày trong Hình 8.



Hình 8. Biểu đồ ảnh hưởng của thời gian đến hiệu quả xử lý MNT ($C_{\text{Fe}^{2+}} = 0,3 \text{ mM}$, $C_{\text{H}_2\text{O}_2} = 2,5 \text{ mM}$, $\text{pH}=3$, thời gian phản ứng 5 phút).

Kết quả nghiên cứu cho thấy, tại điều kiện $\text{pH}=3$, nồng độ H_2O_2 ban đầu bằng 2,5 mM,

lượng ion Fe^{2+} bằng 0,3 mM, hiệu quả xử lý MNT đạt 94,8% khi tăng thời gian phản ứng từ 2,5 phút lên 5 phút. Sau 5 phút, hiệu quả xử lý MNT tăng nhưng không đáng kể.

4. Kết luận

Các thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của pH, nồng độ H_2O_2 , nồng độ Fe^{2+} , thời gian cho thấy hiệu suất xử lý MNT trong quá UV-Fenton với nồng độ $C_{\text{MNT}}^0 = 100 \text{ mg/L}$ đạt 99,8 % sau 5 phút phản ứng với điều kiện tối ưu ở môi trường pH = 3, nồng độ H_2O_2 ban đầu bằng 2,5 mM, lượng ion Fe^{2+} bằng 0,4 mM. Đây là cơ sở để nhóm nghiên cứu tiếp tục nghiên cứu tối ưu quy trình xử lý MNT trong nước thải công nghiệp.

Tài liệu tham khảo

- [1] N. T. Program, Toxicology and Carcinogenesis Studies of P-Nitrotoluene (Cas No. 99-99-0) in F344/N Rats and B6c3f (1) Mice (Feed Studies), National Toxicology Program Technical Report Series, Vol. 498, 2002, pp. 1-277.
- [2] R. Kumar, P. Wagh, S. Ingale, K. Joshi, Degradation of Mononitrotoluene by Electrochemical Method, Defence Science Journal, Vol. 71, No. 4, 2021, <https://doi.org/10.14429/dsj.71.16376>.
- [3] C. Xia, Q. Zhao, Z. Ye, W. Zhu, Removal of Organic Pollutants from Mononitrotoluene (Mnt) Wastewater by Reduced Pressure Distillation, Separation and Purification Technology, Vol. 120, 2013, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.09.014>.
- [4] M. Rostami, H. Mazaheri, A. H. Joshaghani, A. Shokri, Using Experimental Design to Optimize the Photo-Degradation of P-Nitro Toluene by Nano-Tio2 in Synthetic Wastewater. International Journal of Engineering, Vol. 32, No. 8, 2019, pp. 1074-1081, <https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.08b.03>.
- [5] M. Trapido, A. Dello, A. Goi, R. Munter, Degradation of Nitroaromatics with the Fenton Reagent/Aromaatsete Nitrouhendite Lagundamine Fentoni Reaktiiviga. Estonian Academy of Sciences: Chemistry, Vol. 52, 2003, pp. 38-48, https://link.gale.com/apps/doc/A198809228/AONE?u=tacoma_comm&sid=googleScholar&xid=658dc268 (accessed on: May 1st, 2024).
- [6] N. V. Huong, P. S. Tung, L. M. Tri, N. L. T. Quynh, Treatment of Tnt Contained Water Using Uv-Fenton Process, Journal of Military Science and Technology, Vol. 82, 2022, pp. 98-104, <https://doi.org/10.54939/18591043.j.mst.82.2022.98-104> (in Vietnamese).
- [7] P. S. Tung, D. B. Minh, A. D. Thang, N. V. Huong, N. V. Hoang, Study Some Factors Affecting the Efficiency of Treatment of 2,4-Dinitrotoluene (Dnt) in Water by Uv-Fenton Method, Journal of Military Science and Technology, 2023, pp. 209-215, <https://doi.org/10.54939/18591043.j.mst.FEE.2023.209-215> (in Vietnamese).
- [8] N. V. Huong, N. M. Khai, N. N. Son, N. V. Hoang, Study on the Treatment Potential of Diazo Dinitrophenol in Aqueous Environment Using the Photo-Fenton Method, Journal of Military Science and Technology, Vol. 54, 2018, pp. 210-218 (in Vietnamese).
- [9] N. V. Huong, P. S. Tung, L. M. Tri, L. T. Duong, The Effectiveness of Tnt Yellow Wastewater Treatment by Using Photo-Fenton Process, Journal of Military Science and Technology, Vol. 88, No. 88, 2023, pp. 87-94, <https://doi.org/10.54939/18591043.j.mst.88.2023.87-94> (in Vietnamese).
- [10] Y. W. J. Zhao, H. Liu, Y. Wu, W. Dong, Discrepant Oxidation Behavior of Ferric Ion and Hydroxyl Radical on Syringic Acid and Vanillic Acid in Atmospheric Fentonlike System. Chemosphere, Vol. 287, 2022, pp. 132022, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132022>.