

Động học khử màu methylene blue trong dung dịch bằng peracetic acid với điều kiện xúc tác Co^{2+} và tia UV

Nguyễn Thị Kim Giang¹, Vũ Ngọc Duy^{2,3*}

¹Khoa Hóa học, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội, 136 Xuân Thủy, phường Dịch Vọng Hậu, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Trung tâm Nghiên cứu Công nghệ Môi trường và Phát triển Bền vững, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, phường Thanh Xuân Trung, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

³Khoa Hóa học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 19 Lê Thánh Tông, phường Phan Chu Trinh, quận Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 19/9/2024; ngày chuyển phản biện 20/9/2024; ngày nhận phản biện 30/9/2024; ngày chấp nhận đăng 10/10/2024

Tóm tắt:

Tốc độ khử màu methylene blue (MB) bằng peracetic acid (PAA) trong dung dịch với xúc tác Co^{2+} và chiếu ánh sáng UV ở nhiệt độ $25 \pm 1^\circ\text{C}$ đã được khảo sát trong nghiên cứu này. Các thí nghiệm động hóa học được tiến hành với thể tích dung dịch là 0,5 l, trong đó nồng độ PAA cao hơn 100 lần so với nồng độ chất màu. Hai yếu tố chính ảnh hưởng đến tốc độ mất màu là pH và nồng độ ion Co^{2+} được khảo sát. Khả năng tăng cường khử màu khi kết hợp PAA với ánh sáng tử ngoại cũng được đánh giá trong nghiên cứu này. Các số liệu thực nghiệm cho thấy, giá trị pH của dung dịch phản ứng ảnh hưởng lớn đến tốc độ khử màu, khi pH tăng từ 4 lên 6, tốc độ phản ứng tăng lên khoảng 7 lần. Ion Co^{2+} có tác dụng xúc tác cho quá trình phân hủy màu, nồng độ Co^{2+} tăng từ 0,01 đến 0,1 mg/l giúp tốc độ tăng khoảng 11 lần. Khi chiếu ánh sáng UV, tốc độ phản ứng của PAA trong dung dịch nhanh hơn nhiều so với H_2O_2 , hiệu quả khử màu đạt 95% chỉ trong thời gian 420 giây. Hiệu quả này có thể được lý giải nhờ liên kết O—O của phân tử PAA có năng lượng thấp nên rất dễ phân li khi được chiếu tia UV.

Từ khóa: động hóa học, khử màu, methylene blue, peracetic acid, quang xúc tác.

Chỉ số phân loại: 1.4, 2.4, 2.7

Kinetics of decolourising methylene blue by peracetic acid in the presence of Co^{2+} and UV light

Thi Kim Giang Nguyen¹, Ngoc Duy Vu^{2,3*}

¹Faculty of Chemistry, Hanoi University of Education, 136 Xuan Thuy Street, Dich Vong Hau Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

²Research Center for Environmental Technology and Sustainable Development, VNU University of Science, Vietnam National University - Hanoi, 334 Nguyen Trai Street, Thanh Xuan Trung Ward, Thanh Xuan District, Hanoi, Vietnam

³Faculty of Chemistry, VNU University of Science, Vietnam National University - Hanoi, 19 Le Thanh Tong Street, Phan Chu Trinh Ward, Hoan Kiem District, Hanoi, Vietnam

Received 19 September 2024; revised 30 September 2024; accepted 10 October 2024

Abstract:

The kinetics of decolourising methylene blue (MB) by peracetic acid (PAA) in the presence of Co^{2+} ion and ultraviolet (UV) light at the temperature of $25 \pm 1^\circ\text{C}$ were examined in this study. All experiments were conducted with a solution volume of 0.5 l, where the concentration of PAA was over 100 times higher than that of MB. The effects of two main factors (pH and Co^{2+} concentration) on the rate of MB decolourisation, and the enhancement of combining PAA with UV light were examined in this study. The obtained experimental results showed that the pH value of the reaction solution strongly affected the reaction rate of decolourisation. When pH increased from 4 to 6, the reaction rate increased about 7 times. The Co^{2+} ion revealed high catalytic activity for the reaction, concentrations of Co^{2+} varied from 0.01 mg/l to 0.1 mg/l, resulting in a rate increase of nearly 11 times. Under UV light irradiation, PAA exhibited more powerful activity compared to H_2O_2 , achieving a decolourisation efficiency of 95% in 420 seconds. This observation can be explained by the low energy of intramolecular bonding O-O in PAA molecule.

Keywords: decolourisation, kinetics, methylene blue, peracetic acid, photocatalyst.

Classification numbers: 1.4, 2.4, 2.7

*Tác giả liên hệ: Email: duyk44ahoahoc@yahoo.com

1. Đặt vấn đề

Trong những năm qua, ngành dệt may đã góp phần quan trọng vào phát triển nền kinh tế nước ta. Trên cơ sở những thành tựu đạt được, Chính phủ đã đề ra mục tiêu kim ngạch xuất khẩu dệt may năm 2025 là 50-52 tỷ USD và năm 2030 đạt 68-70 tỷ USD [1]. Tuy nhiên, dệt may lại là ngành tạo ra lượng nước thải rất lớn nên có nguy cơ ảnh hưởng tiêu cực đến môi trường nếu không được quản lý và xử lý phù hợp, đặc biệt là công đoạn nhuộm vải. Thành phần của nước thải nhuộm rất phức tạp, trong đó thuốc nhuộm hữu cơ có cường độ màu lớn, bền và độc với hệ sinh thái. Hiện nay, các công nghệ cũ như keo tụ - tạo bông, công nghệ vi sinh đang được sử dụng phổ biến để xử lý nước thải dệt nhuộm, nhưng hiệu quả chưa được triệt để [2]. Các công nghệ tiên tiến hơn như lọc màng, Fenton, oxi hóa quang hóa có khả năng khoáng hóa hoàn toàn các chất ô nhiễm hữu cơ, nhưng chưa được áp dụng do công nghệ phức tạp và chi phí đầu tư lớn. Do vậy, việc tìm ra giải pháp xử lý nước thải hiệu quả có công nghệ đơn giản, phù hợp với điều kiện Việt Nam là cần thiết để thực hiện mục tiêu phát triển ngành dệt may mà Chính phủ đã đề ra. Gần đây, một số nhóm trên thế giới đã nghiên cứu khả năng xử lý nước thải của PAA và cho thấy đây là một tác nhân tiềm năng có tính oxi hóa mạnh, thân thiện với môi trường [3, 4]. Tuy nhiên, các thông tin về động học cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến hoạt tính PAA chưa được công bố nhiều. Peracetic là một peracid hữu cơ có hoạt tính oxi hóa mạnh với thế oxi hóa - khử nằm trong khoảng 1,06-1,96 (V) tùy theo giá trị pH [5]. Tại điều kiện bình thường, PAA ở trạng thái lỏng, không màu, có mùi hăng đặc trưng. Trong dung dịch nước, PAA tồn tại đồng thời với H_2O_2 và CH_3COOH . Hỗn hợp này đã được ứng dụng để tẩy trắng và sát khuẩn từ lâu [6-10]. Khả năng oxi hóa mạnh của PAA được giải thích là do liên kết peroxy (O—O) nội phân tử tương đối yếu và kém bền [5]. Sản phẩm chính trong quá trình phân huỷ/phản ứng của PAA là CH_3COOH , H_2O_2 , O_2 và nước là các chất không có tác động xấu đến môi trường. Vì thế, gần đây một số nghiên cứu đã thử nghiệm xử lý các chất ô nhiễm sử dụng PAA [5, 11, 12]. Ion Co^{2+} đã được công bố có vai trò xúc tác rất tốt cho các phản ứng của PAA [11]. Nhằm mục đích có thêm thông tin về khả năng áp dụng PAA trong xử lý môi trường, nghiên cứu này khảo sát tốc độ khử màu methylene blue bằng PAA với xúc tác là ion Co^{2+} trong nước khi thay đổi pH, nồng độ xúc tác và chiếu ánh sáng tử ngoại.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu

Đối tượng được chọn để đánh giá hiệu quả khử màu là MB. Các hóa chất khác (H_2SO_4 , NaOH, $NaNO_3$, $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) có nguồn gốc của hãng Xilong (Trung Quốc) với độ tinh khiết phân tích, được sử dụng không qua

tinh chế lại. Dung dịch PAA sử dụng hằng ngày cho các thí nghiệm được pha từ dung dịch gốc PAA điều chế theo quy trình ở 2.2. Đèn UV cho thí nghiệm chiếu sáng có công suất 15 W, chiều dài 45 cm được gắn trong ống phản ứng inox với thể tích 1,25 l.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

PAA được điều chế tại phòng thí nghiệm từ acetic acid đặc và hydrogen peroxide (30%) với tỷ lệ thể tích $CH_3COOH:H_2O_2$ là 1,5:1. Nồng độ sản phẩm (PAA) sinh ra được xác định bằng chuẩn độ iodine - thiosulphate. PAA được điều chế trước khi được sử dụng cho các thí nghiệm một ngày.

Động học khử màu MB bằng PAA trong dung dịch được tiến hành ở nhiệt độ $25 \pm 1^\circ C$, thể tích dung dịch 0,5 l có khuấy từ. Nồng độ PAA được sử dụng (2,5 mM), dư hơn nhiều so với nồng độ đầu của chất màu (0,025 mM). Những yếu tố có ảnh hưởng tới tốc độ khử màu được khảo sát bao gồm: nồng độ Co^{2+} , pH và ánh sáng tử ngoại UV. Tốc độ mất màu trong các dung dịch phản ứng được theo dõi qua độ hấp thụ quang tại bước sóng 664 nm, tương ứng với đỉnh hấp thụ cực đại của methylene blue.

2.3. Mô hình động học

Phương trình động học biểu diễn tốc độ mất màu được giả thiết có dạng công thức (1):

$$r = (k + k_{xt}[Co^{2+}]^{n_1})[MB]^{n_2}[PAA]^{n_3}[OH^-]^{n_4} \quad (1)$$

trong đó: n_1 , n_2 , n_3 , n_4 lần lượt là bậc riêng của Co^{2+} , MB, PAA và OH^- .

Vì nồng độ PAA được sử dụng rất dư so với nồng độ chất màu; nồng độ Co^{2+} và pH không đổi nên công thức (1) được chuyển thành công thức (2):

$$r = k'[MB]^{n_2} \quad (2)$$

$$\text{với } k' = (k + k_{xt}[Co^{2+}]^{n_1})[PAA]^{n_3}[OH^-]^{n_4} \quad (3)$$

trong đó k' được coi là hằng số trong quá trình phản ứng.

Giả thiết $n_2=1$, công thức (2) được chuyển thành dạng tích phân:

$$\ln\left(\frac{[MB]_0}{[MB]}\right) = k't \quad \text{hoặc} \quad \ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k't \quad (4)$$

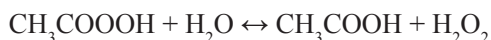
trong đó C là nồng độ MB.

Từ các số liệu thu được về diễn biến biến nồng độ MB theo thời gian, giá trị k' được xác định trên đồ thị sự phụ thuộc của $\ln\left(\frac{C_0}{C}\right)$ theo thời gian (t).

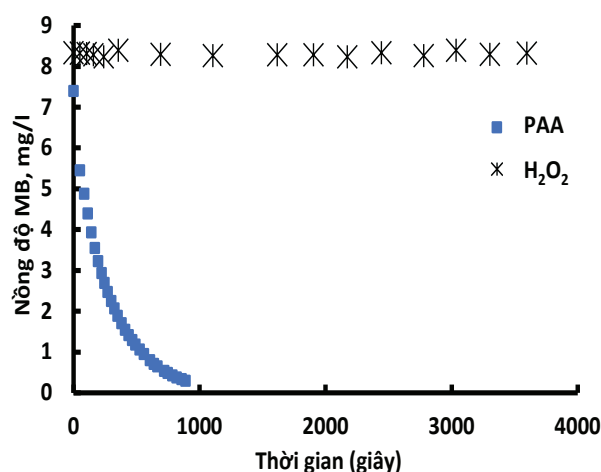
3. Kết quả và bàn luận

3.1. Hoạt tính của PAA so với H_2O_2

Dung dịch PAA luôn chứa H_2O_2 do cân bằng phản ứng:



Nhằm khẳng định hoạt tính của dung dịch là do PAA chứ không phải do H_2O_2 , thí nghiệm này tiến hành đo sự mất màu MB khi sử dụng hai dung dịch PAA và H_2O_2 có cùng nồng độ 2,5 mM (với dung dịch PAA, đây là nồng độ tổng PAA+ H_2O_2), các điều kiện phản ứng khác giống nhau gồm: pH=6, nồng độ MB ban đầu 8,5 mg/l, $[Co^{2+}] = 0,1$ mg/l, và nhiệt độ $25 \pm 1^\circ C$. Diễn biến nồng độ MB theo thời gian ứng với hai dung dịch ôxi hóa được trình bày trên hình 1.



Hình 1. Diễn biến nồng độ màu methylene blue trong hai phản ứng với peracetic acid và H_2O_2 ở cùng nồng độ 2,5 Mm.

Số liệu động học thu được cho thấy, ở điều kiện đã khảo sát, dung dịch H_2O_2 hầu như không làm thay đổi nồng độ MB trong thời gian 3500 (giây). Tuy nhiên, dung dịch PAA đã khử được trên 95% màu trong thời gian 1000 (giây). Do vậy, hoạt tính khử màu của PAA cao hơn nhiều so với H_2O_2 . Kết quả này cũng đã được công bố bởi nhóm nghiên cứu của Z. Zhao và cs (2021) [12] khi khảo sát phản ứng của PAA và H_2O_2 với bisphenol A (BPA). BPA hầu như không phân hủy bởi H_2O_2/Co^{2+} nhưng phân hủy được 93,6% trong thời gian 20 phút bởi hệ PAA/ Co^{2+} . Điểm khác biệt ở chỗ nghiên cứu này đánh giá khả năng phản ứng vào nhóm mang màu còn nghiên cứu của Z. Zhao và cs (2021) [12] đánh giá khả năng phản ứng vào vòng thơm.

3.2. Ảnh hưởng của pH

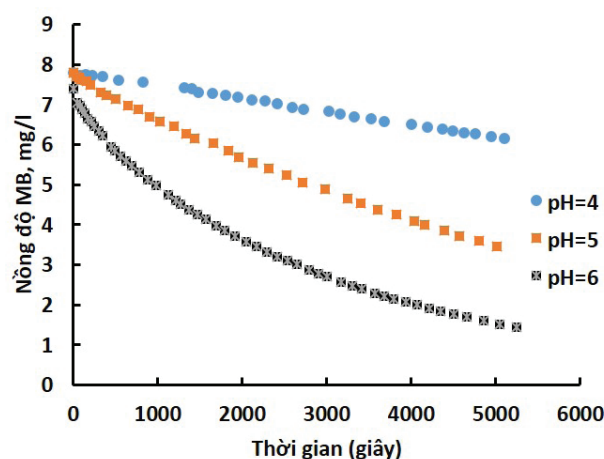
PAA là một axit yếu nên dạng tồn tại (axít hay bazơ liên hợp) phụ thuộc pH của dung dịch phản ứng (tỷ lệ dạng bazơ sẽ tăng ở pH cao). Hoạt tính dạng axít và bazơ của PAA có thể thay đổi theo pH, nên hoạt tính chung của dung dịch PAA

sẽ phụ thuộc vào giá trị pH. Để khảo sát hiện tượng này, các nghiên cứu đo tốc độ mất màu MB được thực hiện tại 3 giá trị pH (4-6) với các điều kiện khác như trong bảng 1.

Bảng 1. Các điều kiện thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng pH.

pH	[MB] (mg/l)	$[Co^{2+}]$ (mg/l)	[PAA](mM)	Nhiệt độ ($^\circ C$)
4, 5, 6	7÷8	0,01	2,5	25 ± 1

Diễn biến nồng độ MB theo thời gian trong các thí nghiệm được trình bày trên hình 2. Hình này cho thấy, tốc độ phản ứng khử màu nhanh hơn khi pH tăng. Do đó, ta có thể kết luận là dạng bazơ của PAA có hoạt tính cao hơn dạng axít.

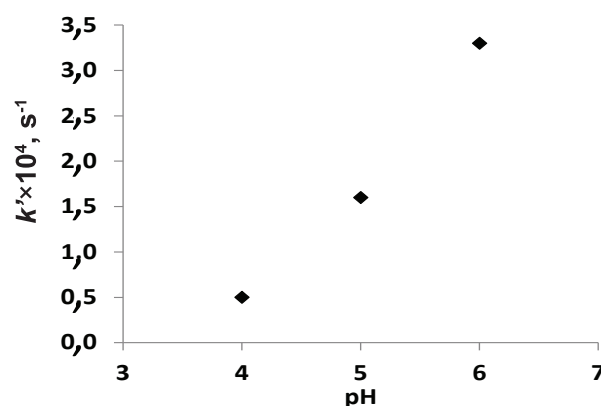


Hình 2. Diễn biến nồng độ methylene blue theo thời gian khi thay đổi pH.

Dựa trên mô hình động học phản ứng được trình bày ở mục 2.3, hằng số tốc độ biểu kiến k' cho từng pH được xác định và trình bày ở bảng 2 và hình 3.

Bảng 2. Hằng số tốc độ phản ứng biểu kiến ở các pH khác nhau.

pH	4	5	6
$k' \times 10^4, s^{-1}$	0,5	1,6	3,3



Hình 3. Hằng số k' khi thay đổi pH.

Hằng số k' tăng theo pH (k' tăng khoảng 7 lần khi pH tăng từ 4 lên 6). Xu hướng này có thể được giải thích như sau: ở pH cao, PAA tồn tại dạng ion PAA^- nhiều hơn. PAA^- lại có khả năng tương tác với PAA để tạo các chất trung gian hoạt động mạnh [13]. Các chất trung gian phản ứng nhanh với MB làm tăng tốc độ mất màu. Kết quả này cho thấy tiềm năng sử dụng PAA để loại bỏ các chất có màu và các chất ô nhiễm hữu cơ ở điều kiện pH gần 7.

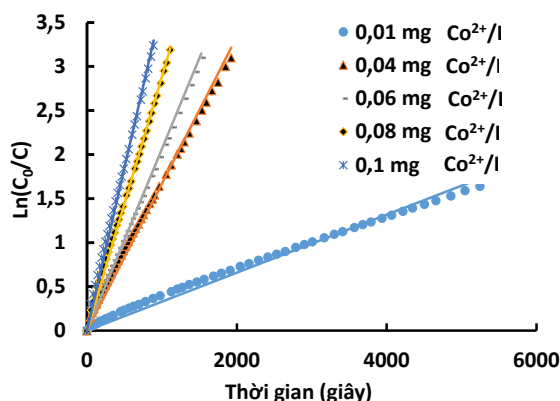
3.3. Ảnh hưởng của nồng độ Co^{2+}

Để thấy rõ vai trò xúc tác của ion Co^{2+} , tốc độ khử màu MB đã được khảo sát khi thay đổi nồng độ Co^{2+} từ 0,01 đến 0,1 mg/l. Các điều kiện khác để thực hiện thí nghiệm như trong bảng 3.

Bảng 3. Điều kiện phản ứng để đánh giá ảnh hưởng của nồng độ Co^{2+} .

[PAA] (mM)	[MB] (mg/l)	[Co^{2+}] (mg/l)	pH	Nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$)
2,5	7,5	0,01; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1	6,0	$25 \pm 1^{\circ}\text{C}$

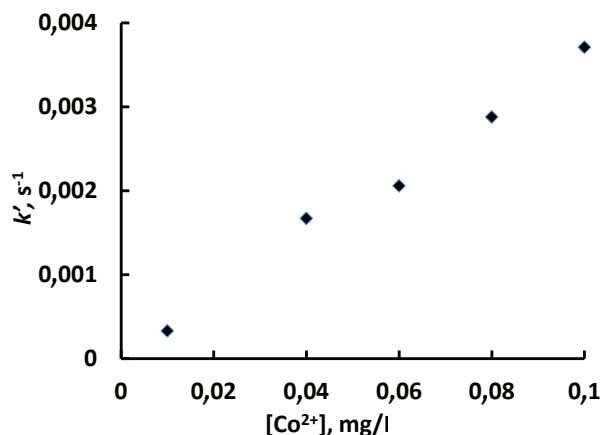
Từ các số liệu về biến thiên nồng độ chất màu theo thời gian cho từng giá trị nồng độ Co^{2+} ta tính và biểu diễn $\ln(C_0/C)$ phụ thuộc thời gian như hình 4.



Hình 4. Diễn biến $\ln(C_0/C)$ phụ thuộc thời gian (t) ở các nồng độ Co^{2+} .

Hình 4 cho thấy, ở các nồng độ xúc tác khác nhau, giá trị $\ln(C_0/C)$ đều phụ thuộc tuyến tính vào thời gian (t). Sự phụ thuộc tuyến tính này khẳng định bậc phản ứng riêng của MB là 1 ($n=1$). Khi nồng độ Co^{2+} tăng thì độ dốc của đường thẳng (hay giá trị k') tăng lên, nghĩa là tốc độ quá trình xảy ra nhanh hơn. Các giá trị k' thu được ứng với các nồng độ xúc tác khác nhau được biểu diễn trên hình 5 cho thấy tốc độ phản ứng tăng tuyến tính theo nồng độ Co^{2+} . Các số liệu này đã chứng minh hoạt tính xúc tác của ion Co^{2+} đối với quá trình xử lý màu MB bằng PAA. Khi so sánh với các giá trị k' ($0,8 \div 11 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) do nhóm nghiên cứu D. Yuan và cs (2022) [14] công bố khi sử dụng xúc tác Fe^{2+} ở pH=3 để xử lý màu MB, kết quả thu được trong nghiên cứu này ($3,3 \div 37 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) cao hơn. Điều đó chứng tỏ xúc tác Co^{2+} hiệu quả hơn so với Fe^{2+} .

Hơn thế nữa, xúc tác Co^{2+} được thực hiện ở pH gần trung hòa nên không tốn chi phí chỉnh pH như trường hợp Fe^{2+} khi được áp dụng thực tiễn.



Hình 5. Sự phụ thuộc k' vào nồng độ Co^{2+} .

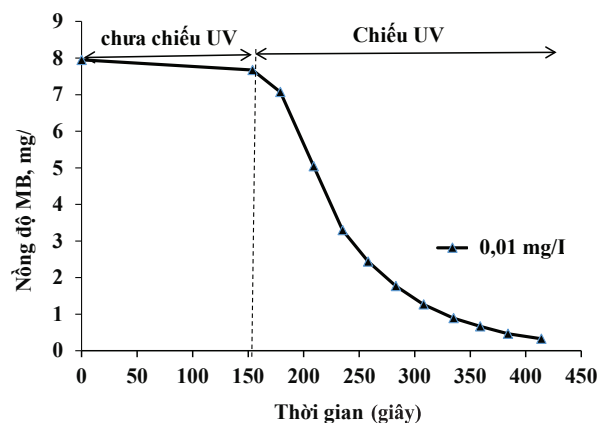
3.4. Ảnh hưởng của ánh sáng tử ngoại

Trong phần mở đầu đã trình bày năng lượng liên kết O-O của phân tử PAA nhỏ hơn so với của phân tử H_2O_2 . Do đó, dưới tác dụng của tia UV, liên kết O—O trong phân tử PAA rất dễ phân li, đồng li để tạo gốc tự do. Nhằm chứng minh khả năng này, thí nghiệm chiếu ánh sáng UV được tiến hành với các điều kiện phản ứng trong bảng 4.

Bảng 4. Các điều kiện thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng của UV.

[PAA] (mM)	[MB] (mg/l)	[Co^{2+}] (mg/l)	pH	UV (W)	Nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$)
2,5	8	0,01	6	15	25 ± 1

Khoảng thời gian 150 (giây) đầu tiên, dung dịch phản ứng được tiến hành khi không có tia UV. Sau khoảng thời gian này, đèn UV được bật chiếu dung dịch phản ứng. Kết quả đo màu theo thời gian trong cả 2 giai đoạn được trình bày ở hình 6.



Hình 6. Diễn biến nồng độ methylene blue trong thí nghiệm chiếu ánh sáng UV.

Hình 6 cho thấy, khoảng thời gian đầu tiên (150 giây) khi chưa có UV, nồng độ màu giảm không đáng kể (<5%). Khi được chiếu UV (từ thời điểm 150-450 (giây)), tốc độ khử màu tăng nhanh, đạt được 95% sau 420 giây. Các kết quả đã cho thấy hoạt tính vượt trội của PAA để xử lý màu khi được chiếu UV và sự có mặt của ion kim loại Co^{2+} làm xúc tác. Nhiều công bố trước đây cũng thu được hiệu quả tương tự như nhóm của M. Cai và cs (2017) [4], Y. Zhu và cs (2023) [15]. Tốc độ phản ứng nhanh khi chiếu UV được giải thích là do liên kết O-O trong phân tử PAA yếu dễ bị phân li để tạo gốc tự do, hiệu suất lượng tử lớn $\Phi_{254\text{nm}}=1,2$ [4].

4. Kết luận

Các số liệu thu được đã chứng minh dung dịch PAA có khả năng xử lý màu của methylene blue rất nhanh. Hoạt tính oxy hóa của PAA mạnh hơn rất nhiều so với tiền chất là H_2O_2 (H_2O_2 không làm mất màu trong khi dung dịch PAA đã khử được trên 95% màu trong thời gian 1000 giây với sự có mặt $[\text{Co}^{2+}]=0,1 \text{ mg/l}$). Tốc độ của phản ứng tăng ở pH cao được giải thích là do hoạt tính dạng bazơ của PAA cao hơn so với dạng axit, khi pH tăng từ 4 lên 6, tốc độ phản ứng tăng lên khoảng 7 lần. Nghiên cứu cũng cho thấy rằng, ion Co^{2+} có vai trò xúc tác rất tốt để tăng cường hoạt động của PAA, nồng độ Co^{2+} tăng từ 0,01 đến 0,1 mg/l giúp tốc độ tăng khoảng 11 lần. Khi kết hợp PAA với chiếu UV, tốc độ mất màu xảy ra nhanh hơn rất nhiều (hiệu quả trên 95% sau 420 giây). Hiệu quả này có thể được lý giải nhờ liên kết O—O của phân tử PAA có năng lượng thấp nên rất dễ phân li khi được chiếu tia UV. Kết quả thu được rất có ý nghĩa trong định hướng sử dụng PAA làm tác nhân xử lý môi trường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] The Prime Minister of the Government (2022), *Decision No. 1643/QĐ-TTg Approving The Strategy for The Development of The Textile, Garment, and Leather-Footwear Industry in Vietnam Until 2030, with A Vision to 2035* (in Vietnamese).

[2] H. Halepoto, T.G. Hafeez, U. Memon (2022), "Current status and research trends of textile wastewater treatments - A bibliometric-based study", *Frontiers in Environmental Science*, **10**, DOI: 10.3389/fenvs.2022.1042256.

[3] S. Rothbart, E.E. Ember, R.V. Eldik (2012), "Mechanistic studies on the oxidative degradation of orange II by peracetic acid catalyzed by simple manganese(II) salts. Tuning the lifetime of the catalyst", *New J. Chem.*, **36**(3), pp.732-748, DOI: 10.1039/C2NJ20852K.

[4] M. Cai, P. Sun, L. Zhang, et al. (2017), "UV/Peracetic acid for degradation of pharmaceuticals and reactive species evaluation", *Environ. Sci. Technol.*, **51**(24), pp.14217-14224, DOI: 10.1021/acs.est.7b04694.

[5] D. Kiejza, U. Kotowska, W. Polńska, et al. (2021), "Peracids - New oxidants in advanced oxidation processes: The use of peracetic acid, peroxymonosulfate, and persulfate salts in the removal of organic micropollutants of emerging concern - A review", *Science of The Total Environment*, **790**, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148195.

[6] M. Kitis (2004), "Disinfection of wastewater with peracetic acid: A review", *Environment International*, **30**(1), pp.47-55, DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00147-8.

[7] S.D. Richardson, M.J. Plewa, E.D. Wagner (2007), "Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research", *Mutation Research/Review in Mutation Research*, **636**(1-3), pp.178-242, DOI: 10.1016/j.mrrev.2007.09.001.

[8] D.P. Barros, V.L. Silva, H. Hamalainen, et al. (2010), "Effect of last stage bleaching with peracetic acid on brightness development and properties of eucalyptus pulp", *Bioresource*, **5**(2), pp.881-898, DOI: 10.15376/biores.5.2.881-898.

[9] D.S.R. Gehr, T.A. Bartrand, L. Liberti, et al. (2007), "Wastewater disinfection by peracetic acid: Assessment of models for tracking residual measurements and inactivation", *Water Environment Research*, **79**(7), pp.775-787, DOI: 10.2175/106143007x156817.

[10] S. Bonetta, C. Pignata, E. Lorenzi, et al. (2017), "Peracetic acid (PAA) disinfection: Inactivation of microbial indicators and pathogenic bacteria in a municipal wastewater plant", *Water*, **9**(6), DOI: 10.3390/w9060427.

[11] J. Kim, P. Du, W. Liu, et al. (2020), "Cobalt/Peracetic acid: Advanced oxidation of aromatic organic compounds by acetylperoxyl radicals", *Environmental Science and Technology*, **54**(8), pp.5268-5278, DOI: 10.1021/acs.est.0c00356.

[12] Z. Zhao, X. Li, H. Li, et al. (2021), "New insights into the activation of peracetic acid by Co (II): Role of Co (II)-peracetic acid complex as the dominant intermediate oxidant", *ACS EST Engg.*, **10**(1), pp.1432-1440, DOI: 10.1021/acsestengg.1c00166.

[13] W.P.D. Silva, T.D. Carlos, G.S. Cavallini, et al. (2020), "Peracetic acid: Structural elucidation for applications in wastewater treatment", *Water Research*, **168**, DOI: 10.1016/j.watres.2019.115143.

[14] D. Yuan, K. Yang, E. Zhu, et al. (2022), "Peracetic acid activated with electro- Fe^{2+} process for dye removal in water", *Coatings*, **12**(4), DOI: 10.3390/coatings12040466.

[15] Y. Zhu, Y. Cao, S. Shu, et al. (2023), "Comparison of medium-pressure UV/Peracetic acid to remove three typical refractory contaminants of textile wastewater", *Processes*, **11**(4), DOI: 10.3390/pr11041183.