Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Phần A: Khoa học tự nhiên, Công nghệ và Môi trường
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.009

HIỆU QUẢ XỬ LÝ MÀU VÀ COD TRONG NƯỚC THẢI DỆT NHUỘM BẰNG TỔ HỢP KEO TỤ VÀ AOPs/UV

Đỗ Thị Mỹ Phượng, Đặng Quốc Gia Bảo, Phan Hoàng Duy Tân, Phan Thị Thanh Tuyền và Nguyễn Xuân Lộc*
Khoa Môi trường và Tài nguyên thiên nhiên, Đại học Cần Thơ, Việt Nam
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): nxloc@ctu.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 06/06/2025
Sửa bài (Revised): 07/07/2025
Duyệt đăng (Accepted): 07/12/2025

Title: *Treatment efficiency of color and COD in textile wastewater using a combined coagulation and AOPs/UV process*

Author: *Do Thi My Phuong, Dang Quoc Gia Bao, Phan Hoang Duy Tan, Phan Thi Thanh Tuyen and Nguyen Xuan Loc**

Affiliation(s): *College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam*

TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá hiệu quả xử lý độ màu và nhu cầu oxy hóa học (COD) trong nước thải dệt nhuộm bằng quy trình kết hợp keo tụ và oxy hóa nâng cao sử dụng tia UV và ozone (AOPs/UV-O_3). Quy trình thực nghiệm gồm ba bước: chế tạo mô hình xử lý, xác định điều kiện tối ưu cho quá trình keo tụ, và khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất AOPs/UV-O_3. Kết quả cho thấy, quá trình keo tụ đạt hiệu quả tối ưu tại pH = 6,5 với liều lượng PAC 600 mg/L và Polymer Anion 4 mg/L, đạt hiệu suất loại bỏ 71,4% độ màu và 55% COD. Giai đoạn AOPs/UV-O_3 thực hiện với thời gian phản ứng 40 phút và chiếu UV liên tục giúp nâng cao hiệu quả xử lý, đạt tổng hiệu suất loại bỏ 81,4% đối với độ màu và 87% đối với COD. Kết quả cung cấp các thông số vận hành hiệu quả, có thể được áp dụng để cải thiện hệ thống xử lý nước thải dệt nhuộm, điều này góp phần định hướng phát triển công nghệ xử lý hiệu quả và thân thiện với môi trường.

Từ khóa: *AOPs/UV, COD, màu, nước thải dệt nhuộm, Ozone*

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the efficiency of color and chemical oxygen demand (COD) removal in textile wastewater by the combined coagulation and advanced oxidation process using UV and ozone (AOPs/UV-O_3). The experimental procedure consisted of three steps: fabrication of a treatment model, determination of optimal conditions for coagulation, and investigation of factors affecting the efficiency of AOPs/UV-O_3. The results showed that the coagulation process achieved optimal efficiency at pH = 6,5 with a dosage of PAC 600 mg/L and Polymer Anion 4 mg/L, achieving a removal efficiency of 71,4% for color and 55% for COD. The AOPs/UV-O_3 stage was performed with a reaction time of 40 minutes and continuous UV irradiation to improve the treatment efficiency, achieving a total removal efficiency of 81,4% for color and 87% for COD. The results provide a set of effective operational parameters that can be applied to enhance the performance of textile wastewater treatment systems, contributing to the advancement of efficient and environmentally friendly treatment technologies.

Keywords: *AOPs/UV, COD, color, Ozone, textile dyeing wastewater*

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, sự phát triển mạnh mẽ của các ngành công nghiệp tại Việt Nam, đặc biệt là ngành công nghiệp dệt may, đã đóng góp quan trọng vào tăng trưởng kinh tế quốc gia (Ho & Watanabe, 2017). Tuy nhiên, đi kèm với sự phát triển này là tình trạng ô nhiễm môi trường do nước thải công nghiệp, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe con người và hệ sinh thái (Hoang et al., 2024). Nước thải từ quá trình dệt nhuộm có thành phần phức tạp, chứa nhiều hóa chất độc hại, hợp chất hữu cơ khó phân hủy và các chất tạo màu bền vững (Vu et al., 2016; Hoang et al., 2024). Đặc biệt, nước thải có nồng độ COD và độ màu cao làm suy giảm oxy hòa tan trong nước, gây ảnh hưởng đến đời sống thủy sinh và quá trình quang hợp (Luong et al., 2022). Ngoài ra, một số hợp chất trong thuốc nhuộm có thể gây độc tính cao như ung thư, dị tật bẩm sinh và bệnh hô hấp (Zhang et al., 2021).

Các phương pháp xử lý truyền thống như keo tụ, hấp phụ và oxy hóa thông thường thường không đạt hiệu quả cao do đặc tính bền vững và khó phân hủy sinh học của các chất ô nhiễm trong nước thải dệt nhuộm. Trong bối cảnh đó, việc kết hợp các công nghệ tiên tiến như quá trình oxy hóa nâng cao (Advanced Oxidation Processes – AOPs) với các phương pháp xử lý truyền thống đã được chứng minh mang lại hiệu quả xử lý vượt trội (Mohajerani et al., 2009; Holkar et al., 2016). Trong đó, sự kết hợp giữa keo tụ và AOPs được xem là một hướng tiếp cận hiệu quả, giúp nâng cao khả năng loại bỏ chất hữu cơ và độ màu trong nước thải (Nguyen et al., 2017; GilPavas et al., 2017).

Quá trình keo tụ đóng vai trò như một bước tiền xử lý quan trọng, giúp loại bỏ các chất rắn lơ lửng và một phần chất hữu cơ, từ đó nâng cao hiệu quả cho các bước xử lý tiếp theo. Trong khi đó, AOPs – đặc biệt là quá trình AOPs/UV sử dụng O_3 – có khả năng tạo ra các chất oxy hóa mạnh như gốc hydroxyl (*OH) với thế oxy hóa cao (2,80 V), giúp phân hủy hiệu quả các hợp chất hữu cơ bền vững (Vu et al., 2016; Nguyen et al., 2020a). Kết quả nghiên cứu của Hassaan and El Nemr (2017) đã chứng minh hiệu quả của tổ hợp keo tụ kết hợp AOPs/UV trong xử lý nước thải dệt nhuộm, với hiệu suất loại bỏ đạt 96% COD và 95% độ màu.

Mặc dù nhiều nghiên cứu đã được tiến hành nhằm khảo sát việc kết hợp keo tụ và AOPs trong xử lý nước thải, các điều kiện tối ưu cho loại nước thải đặc thù của ngành dệt may Việt Nam, đặc biệt với sự kết hợp PAC, Polymer Anion và hệ O_3/UV, vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đóng góp dữ liệu thực nghiệm và bộ thông số vận hành hiệu quả, phục vụ cho việc cải thiện các hệ thống xử lý hiện hữu.

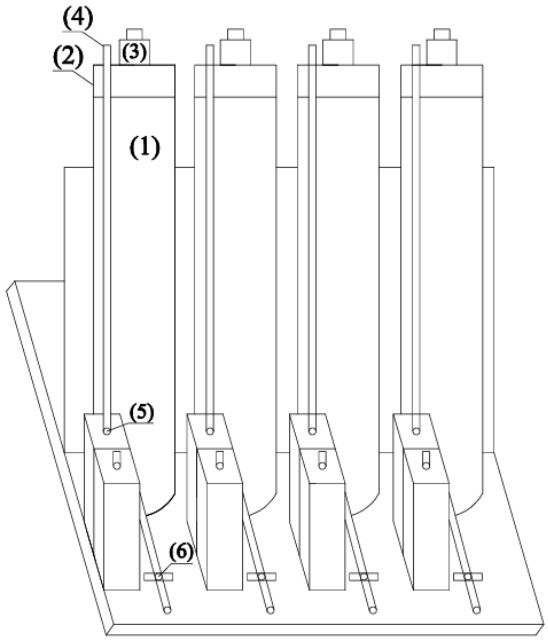
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đặc điểm của nguồn nước được sử dụng

Nước thải được sử dụng trong quá trình nghiên cứu được lấy từ công đoạn xử lý sơ bộ tại bể điều hòa của Công Ty Cổ Phần Songwol Vina tại tỉnh Long An.

2.2. Mô hình thí nghiệm

Mô hình thí nghiệm được thiết kế dạng cột trụ đứng để mô phỏng dòng chảy liên tục trong xử lý nước. Kích thước cột (D = 114 mm, H = 600 mm) được lựa chọn theo nguyên tắc mô hình thu nhỏ, đảm bảo tỷ lệ H/D ≈ 5,26, phù hợp với khuyến nghị 5 – 10 cho cột phản ứng theo Metcalf and Eddy (2003).



Hình 1. Mô hình nghiên cứu trên bản vẽ

Thể tích hình học của cột được tính theo công thức:

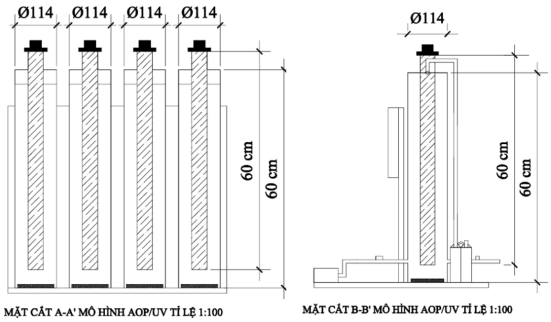
$$V = \pi \times (\frac{D}{2})^2 \times H = \pi \times (0{,}057)^2 \times 0{,}6$$
$$= 0{,}0061\ m^3 = 6.100\ mL$$

Tuy nhiên, để đảm bảo không gian cho lớp vật liệu hấp phụ và dòng chảy không bị tràn khi cấp dòng liên tục, chỉ khoảng 1.000 mL thể tích hữu

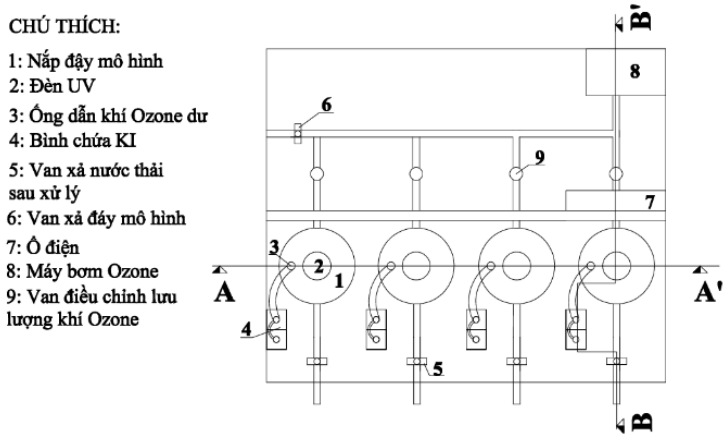
dụng (Vsd) được sử dụng, chiếm khoảng 16,4% thể tích hình học, tương ứng với chiều cao lớp vật liệu khoảng 95 mm (tức gần 1/6 tổng chiều cao cột). Việc chọn ống PVC đường kính 114 mm còn dựa trên yếu tố sẵn có, chi phí thấp, dễ gia công và thuận tiện cho lắp đặt các đầu vào/ra, lớp đệm.

Phía trên mỗi cột phản ứng được bố trí một mặt bích PVC Bình Minh (2) và được khoét 02 lỗ tròn, 01 lỗ tròn có đường kính D = 42 mm (3) ở trung tâm nhằm mục đích dễ dàng lắp hoặc tháo đèn UV khi không sử dụng và 01 lỗ tròn có đường kính D = 12 mm (4) để thoát khí ra, ống thu khí thoát ra được nhúng vào trong dung dịch KI 5% (5) để thu khí O3 dư thừa sau phản ứng.

Phía bên dưới cột phản ứng có vòi cấp khí O_3 bằng đá bọt có gắn van điều chỉnh lưu lượng và có một ống thu nước để lấy mẫu (6).



Hình 2. Mặt cắt mô hình nghiên cứu trên bản vẽ



Hình 3. Mặt bằng mô hình AOPs/UV tỉ lệ 1:100

2.3. Phương pháp phân tích và xử lý số liệu

Phương pháp thu thập, phân tích mẫu được trình bày dưới Bảng 1.

Việc bố trí thí nghiệm được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố pH, liều lượng phèn PAC (mg/L), thời gian phản ứng với O_3 (phút), thời gian chiếu UV (%) đến hiệu suất xử lý độ màu và COD trong nước thải. Mỗi nghiệm thức được lặp lại 3 lần, thể tích mỗi mẫu là 1.000 mL nước thải.

Hiệu suất xử lý (H, %) được tính như sau:

$$H\ (\%) = \frac{(C_0 - C_1) \times 100}{C_0}$$

Trong đó:

H: hiệu suất xử lý (%),

C_0: nồng độ chất ô nhiễm ban đầu (mg/L, NTU, Pt-Co),

C_1: nồng độ chất ô nhiễm sau xử lý (mg/L, NTU, Pt-Co).

Các số liệu được thu thập và tổng hợp trên Excel. Phần mềm SPSS được dùng để phân tích phương sai ANOVA, kiểm định DUNCAN để so sánh các giá trị trung bình ở độ tin cậy 95% giữa các nghiệm thức. Số liệu được kiểm tra phân phối chuẩn và đồng nhất phương sai trước khi phân tích ANOVA.

Bảng 1. Phương pháp và phương tiện phân tích thí nghiệm

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Phương pháp	Thiết bị
1	Độ màu	Pt-Co	Đo trực tiếp	Máy đo độ màu Hanna – HI97727C
2	COD	mg/L	SMEWW 5220 D:2017	Hóa chất và các thiết bị
3	pH	-	Đo trực tiếp	Máy đo pH cầm tay ORP Horiba, F-72G

Bảng 2. Bố trí các thí nghiệm ảnh hưởng

Yếu tố khảo sát	Giá trị khảo sát	Điều kiện cố định*
pH dung dịch	5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8	V = 1.000mL;
Liều lượng phèn PAC (mg/L)	100 - 600	pH thích hợp ở TN1;
Liều lượng Polymer Anion (mg/L)	1 - 6	pH thích hợp ở TN1; Liều lượng phèn PAC thích hợp ở TN2;
Thời gian phản ứng với O_3 (phút)	20, 40, 60, 80	V = 1.000mL, nồng độ khí O_3 35 (mg/L)
Thời gian chiếu UV (%)	25, 50, 75, 100	V = 1.000mL, nồng độ khí O_3 35 (mg/L), Thời gian phản ứng thích hợp từ TN4

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả phân tích nước thải đầu vào

Kết quả phân tích chất lượng nước thải dệt nhuộm được trình bày trong Bảng 2 cho thấy một số thông số ô nhiễm đặc trưng như độ màu và COD vẫn vượt giới hạn cho phép theo QCVN 13-MT:2015/BTNMT đối với nước thải đầu ra của các cơ sở đang hoạt động. Cụ thể, nồng độ COD dao động từ 800 đến 1.120 mg/L, điều này phản ánh sự hiện diện đáng kể của các hợp chất hữu cơ khó phân hủy sinh học trong nước thải. Giá trị độ màu nằm trong khoảng từ 884 đến 1.109 Pt-Co, kết quả này cho thấy nước thải chứa các hợp chất tạo màu có cấu trúc bền vững và khả năng phân hủy thấp. Bên cạnh đó, giá trị pH dao động từ 9,9 đến 10,25 cho thấy nước thải có tính kiềm cao, đặc trưng cho các quá trình xử lý hóa học trong công đoạn nhuộm. Kết quả phân tích nước thải đầu vào được trình bày ở Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả phân tích nước thải đầu vào

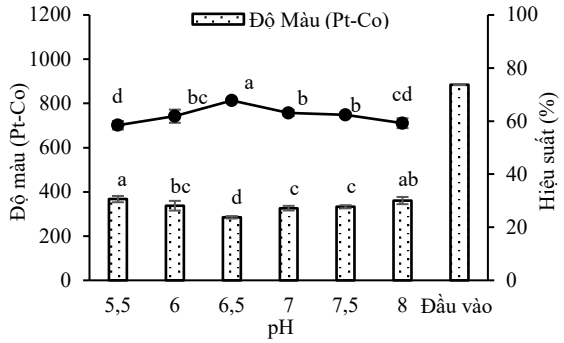
Chỉ tiêu	Đơn vị	Nồng độ	QCVN 13/2015/TT-BTNMT, cơ sở đang hoạt động	
			Cột A	Cột B
pH	-	9,9 – 10,25	6 – 9	5,5 – 9
COD	mg/L	800 – 1.120	100	200
Độ màu	Pt-Co	884 – 1.109	75	200

3.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình keo tụ

3.2.1. Ảnh hưởng của pH dung dịch

Giá trị pH là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả của quá trình keo tụ. pH của môi trường không chỉ tác động đến điện tích bề mặt của các hạt keo mà còn ảnh hưởng đến khả năng trung hòa điện tích, từ đó điều chỉnh tốc độ và hiệu suất keo tụ trong dung dịch (Dao et al., 2016). Do đó, khoảng pH tối ưu được xác định là điều kiện cần thiết nhằm đảm bảo quá trình keo tụ diễn ra hiệu quả.

Kết quả xử lý độ màu bằng keo tụ sử dụng PAC (Hình 4) cho thấy hiệu suất loại bỏ dao động từ 58% đến 68%, phụ thuộc vào pH. Hiệu quả tăng từ pH 5,5 đến 6,5 và giảm khi pH vượt 6,5. Tại pH 6,5, hiệu suất cao nhất đạt 68% (độ màu giảm từ 884 xuống 285 Pt-Co), có ý nghĩa thống kê so với các pH khác.



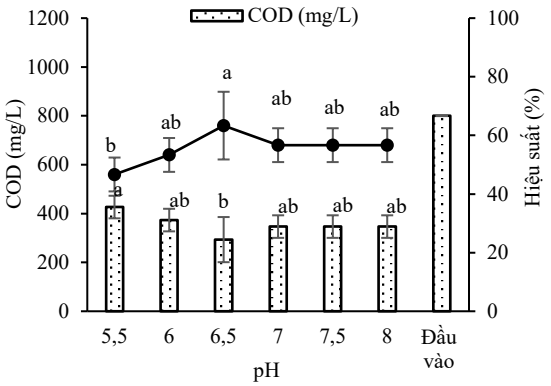
Hình 4. Ảnh hưởng của pH đến hiệu quả xử lý màu

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b, c, d) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức α *= 5%.*

Hiệu quả thấp ở pH 5,5 do quá trình thủy phân PAC hạn chế, dẫn đến hình thành ít polyme nhôm kết tụ, đồng thời điện tích H^+ làm giảm tương tác keo tụ. Tại pH 6 - 6,5, thủy phân PAC hiệu quả, tạo ra các sản phẩm Al_{13}^+ và $Al(OH)_3$ giúp trung hòa điện tích và hình thành bông cặn lớn, ổn định, nâng

cao hiệu quả xử lý. Khi pH > 6,5, ion OH^- làm tăng điện tích âm trên hạt keo, gây lực đẩy tĩnh điện mạnh, giảm kết tụ và hiệu quả loại bỏ màu.

Kết quả phù hợp với các nghiên cứu trước, nhưng với liều lượng PAC 200 mg/L và điều kiện thí nghiệm cố định, pH 6,5 được xác định là điều kiện tối ưu cho hiệu quả xử lý đáng kể và có ý nghĩa thống kê.



Hình 5. Ảnh hưởng của pH đến hiệu quả xử lý COD

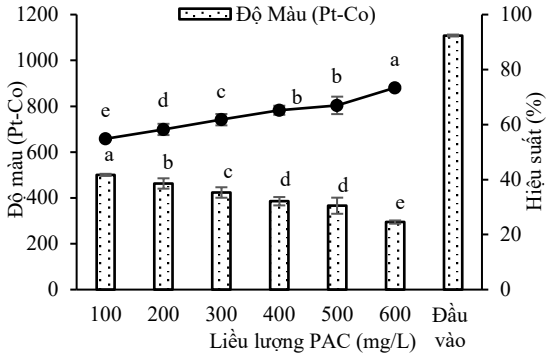
Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức α *= 5%.*

Hiệu quả loại bỏ COD bằng keo tụ PAC (Hình 5) dao động từ 47% đến 63%, tăng từ pH 5,5 đến 6,5 và ổn định ở pH 6,5 – 8,0. Mặc dù pH 6,5 cho hiệu quả cao nhất, sự khác biệt về mặt thống kê giữa các pH không rõ rệt. Ở pH thấp (5,5), thủy phân PAC kém, làm giảm hình thành $Al(OH)_3$ và khả năng kết tụ do điện tích H^+ trung hòa các hạt keo, dẫn đến bông cặn nhỏ, yếu và khó lắng. Khi pH tăng đến 6 – 6,5, thủy phân PAC hiệu quả hơn, tạo các phức Al_{13}^+ và $Al(OH)_3$ hỗ trợ trung hòa điện tích và hấp phụ chất hữu cơ, nâng cao hiệu quả xử lý.

Tại pH trên 6,5, hiệu quả giữ ổn định do cơ chế trung hòa điện tích kém hiệu quả hơn, nhưng bông cặn vẫn duy trì nhờ $Al(OH)_3$. Hiệu quả xử lý phụ thuộc chủ yếu vào khối lượng và độ ổn định bông cặn. Kết quả tương đồng với các nghiên cứu trước, pH 6,5 – 7 được khẳng định là vùng tối ưu cho xử lý COD bằng keo tụ PAC. Kết quả tổng hợp hiệu quả xử lý độ màu và COD cho thấy pH 6,5 là điều kiện tối ưu, phù hợp với vùng hoạt động của PAC và được chọn cho các thí nghiệm tiếp theo.

3.2.2. Ảnh hưởng của liều lượng PAC

Thí nghiệm được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của liều lượng PAC (100 – 600 mg/L) đến hiệu suất loại bỏ độ màu và COD trong nước thải. Các điều kiện khác được giữ cố định gồm pH 6,5, liều Polymer Anion 2 mg/L, khuấy nhanh 120 vòng/phút trong 3 phút và khuấy chậm 20 vòng/phút.

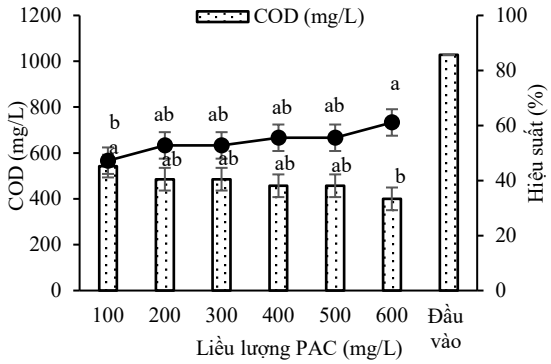


Hình 6. Ảnh hưởng của liều lượng PAC đến hiệu quả xử lý độ màu

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b, c, d, e) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức α *= 5%.*

Kết quả thí nghiệm (Hình 6) cho thấy hiệu quả loại bỏ độ màu tăng từ 55% đến 73% khi liều lượng PAC tăng từ 100 đến 600 mg/L. Liều 600 mg/L đạt hiệu quả cao nhất với sự khác biệt có ý nghĩa thống kê. Cơ chế trung hòa điện tích của PAC giúp các hạt keo âm tạo bông cặn lớn, ổn định, nâng cao khả năng loại bỏ màu (Lee et al., 2014). Ở liều này, độ màu giảm từ 1.109 xuống 295 Pt-Co (73,4%), tương tự kết quả của Awad et al. (2013).

Kết quả thí nghiệm (Hình 7) cho thấy hiệu quả loại bỏ COD dao động từ 47% đến 61% khi tăng liều lượng PAC từ 100 mg/L đến 600 mg/L. Tuy nhiên, kết quả phân tích thống kê cho thấy sự khác biệt giữa các nghiệm thức không có ý nghĩa rõ rệt. Hiệu quả xử lý tăng theo cơ chế trung hòa điện tích: các ion nhôm sinh ra từ quá trình thủy phân PAC giúp kết tụ các hạt keo chứa chất hữu cơ, từ đó giảm COD trong nước thải (Lee et al., 2014). Tại liều lượng 600 mg/L, COD giảm từ 1028 mg/L xuống còn 400 mg/L, đạt hiệu suất 61%, phù hợp với kết quả của Awad et al. (2013).



Hình 7. Ảnh hưởng của liều lượng PAC đến hiệu quả xử lý COD

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức α *= 5%.*

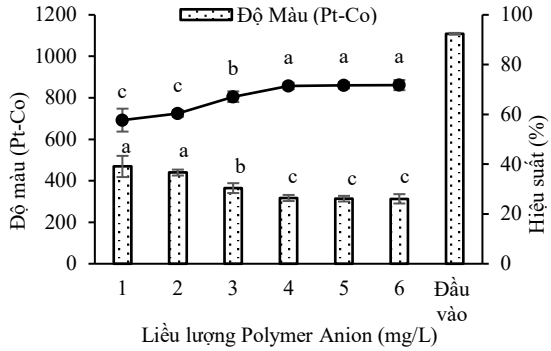
Liều PAC tối ưu xác định trong nghiên cứu này là 600 mg/ L, cao hơn mức 300 - 500 mg/L do Mahmudabadi et al. (2018) và Tianzhi et al. (2021) khuyến nghị cho nước thải công nghiệp và dệt nhuộm có COD 350 – 400 mg/L. Sự khác biệt chủ yếu do COD đầu vào của nghiên cứu (≈720 mg/L) và độ màu (≈2 000 Pt-Co) cao gần gấp đôi. Trong khi đó, Islam and Mostafa (2020) ghi nhận liều PAC 600 mg/L cho nước thải nhuộm có COD 784 mg/L, phù hợp với liều lượng của nghiên cứu này. Như vậy, liều PAC 600 mg/L là hợp lý khi tính đến nồng độ ô nhiễm đầu vào cao hơn và mục tiêu đạt hiệu suất >70 % độ màu và >50 % COD. Đối với trường hợp COD thấp hơn, liều PAC có thể điều chỉnh giảm để tối ưu chi phí.

Tổng hợp kết quả xử lý độ màu (73%) và COD (61%), liều lượng PAC 600 mg/L được đánh giá là phù hợp và được chọn cho các thí nghiệm tiếp theo nhằm nâng cao hiệu quả keo tụ.

3.2.3. Ảnh hưởng của liều lượng Polymer Anion

Thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng của liều Polymer Anion (1–6 mg/L) đến hiệu quả xử lý độ đục, độ màu và COD tại pH 6,5, với PAC 600 mg/L đã được thực hiện. Các điều kiện khuấy và lắng giữ cố định: khuấy nhanh 120 vòng/phút (3 phút), khuấy chậm 20 vòng/phút (5 phút) và lắng 30 phút.

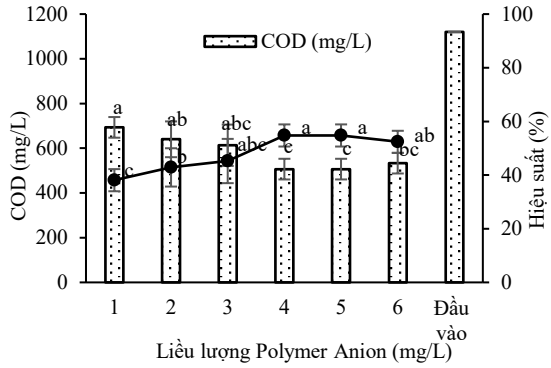
Kết quả tại Hình 8 cho thấy hiệu suất loại bỏ độ màu tăng từ 57,7% lên 71,8% khi liều lượng Polymer Anion tăng từ 1 mg/L đến 6 mg/L, đạt tối ưu tại 4 mg/L (71,4%). Kết quả phân tích thống kê cho thấy hiệu suất tại 4 mg/L không khác biệt ý nghĩa so với 5 – 6 mg/L, nhưng cao hơn rõ rệt so với 1 – 3 mg/L. Do đó, 4 mg/L được xem là liều lượng phù hợp nhằm đảm bảo hiệu quả xử lý và tiết kiệm hóa chất.



Hình 8. Ảnh hưởng của liều lượng Polymer Anion đến hiệu quả xử lý độ màu

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b, c) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức α *= 5%*

Cơ chế xử lý chủ yếu thông qua trung hòa điện tích bởi PAC và tạo cầu nối từ Polymer Anion giúp hình thành bông cặn lớn, tăng khả năng loại bỏ chất gây màu. Tuy nhiên, liều lượng vượt mức tối ưu có thể gây tái ổn định hạt keo, làm giảm hiệu quả kết tụ (Lee et al., 2014; Le & Nguyen, 2018). Vì vậy, 4 mg/L được lựa chọn cho các thí nghiệm tiếp theo.



Hình 9. Ảnh hưởng của liều lượng Polymer Anion đến hiệu quả xử lý COD

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b, c) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức α *= 5%.*

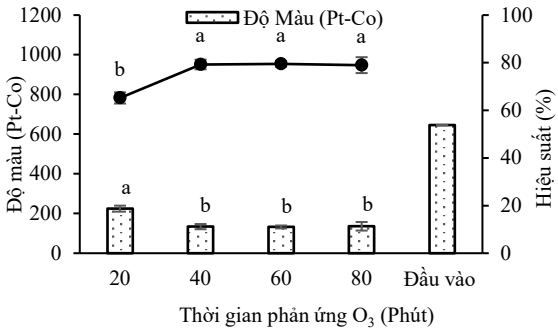
Kết quả được trình bày ở Hình 9 cho thấy hiệu suất loại bỏ COD tăng từ 38% đến 55% khi Polymer Anion tăng từ 1 đến 3 mg/L, sau đó giảm nhẹ ở liều cao hơn; sự khác biệt giữa các nghiệm thức không có ý nghĩa ở 4 mg/L. Cơ chế xử lý dựa trên PAC

trung hòa điện tích âm và Polymer Anion tạo cầu nối bông cặn lớn, tăng hấp phụ chất hữu cơ. Tuy nhiên, khi liều lượng polymer vượt quá mức tối ưu, hiệu suất keo tụ có xu hướng giảm. Điều này được lý giải bởi hiện tượng "tái ổn định hạt keo" – một quá trình xảy ra khi các chuỗi polymer dư thừa bao phủ bề mặt của các bông cặn đã hình thành. Lớp phủ này tạo ra điện tích giống nhau trên bề mặt các bông, dẫn đến lực đẩy tĩnh điện giữa chúng. Hệ quả là các bông khó va chạm và liên kết với nhau để hình thành các cấu trúc lớn hơn, làm chậm quá trình lắng và giảm hiệu quả loại bỏ chất ô nhiễm (Abiola 2018; Vajihinejad et al. 2019). Cơ chế này phù hợp với các nghiên cứu trước đó về ảnh hưởng của quá liều polymer trong xử lý nước (Lee et al., 2014; Le & Nguyen, 2018). Liều Polymer Anion 4 mg/L được chọn làm điều kiện thích hợp với hiệu suất loại bỏ màu và COD lần lượt 71,4% và 55%.

3.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình oxy hóa nâng cao kết hợp tia UV (AOPs/UV)

3.3.1. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng với O_3

Thời gian phản ứng là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến hiệu quả phân hủy ô nhiễm trong AOPs, khi các gốc *OH oxy hóa nhanh hợp chất hữu cơ đơn giản, còn hợp chất bền cần thời gian dài hơn (Nguyen et al., 2020b). Trong nghiên cứu, việc khảo sát ảnh hưởng thời gian phản ứng O_3 (20–80 phút) với hàm lượng cố định 35 mg/L trên nước thải đã keo tụ (PAC 600 mg/L, Polymer Anion 4 mg/L) đến hiệu suất loại bỏ độ màu và COD đã được tiến hành.

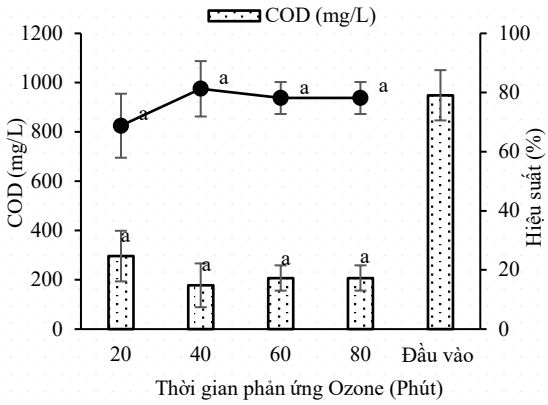


Hình 10. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng với O_3 đến hiệu quả xử lý độ màu

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức ***α*** *= 5%.*

Kết quả ở Hình 10 cho thấy hiệu quả loại bỏ độ màu tăng từ 65,2% đến 79,5%, tăng rõ rệt đến 40 phút và ổn định sau đó. Thời gian 40 phút được chọn với hiệu suất 79,2% do tương đương với 60 và 80 phút nhưng tiết kiệm thời gian. Tương tự, hiệu quả loại bỏ COD (Hình 11) tăng đến 81,3% ở 40 phút và không thay đổi đáng kể về sau. Sau 40 phút phản ứng, hiệu suất xử lý COD không tăng đáng kể, điều này có thể được giải thích dựa trên đặc điểm phản ứng của các gốc hydroxyl (*OH) trong hệ AOPs/UV–O_3. Trong giai đoạn đầu, các gốc *OH – vốn là chất oxy hóa mạnh (E° = 2,80 V) – sẽ phản ứng nhanh chóng với các hợp chất hữu cơ dễ phân hủy trong nước thải, làm tăng hiệu suất xử lý COD (Wang & Xu, 201). Tuy nhiên, khi các chất hữu cơ dễ phân hủy đã bị loại bỏ, phần COD còn lại chủ yếu thuộc về các hợp chất hữu cơ bền vững, khó bị oxy hóa như hợp chất vòng thơm, azo, hoặc chất có liên kết đôi liên hợp (Manna & Sen, 2023). Những chất này đòi hỏi thời gian phản ứng lâu hơn, năng lượng cao hơn hoặc sự hiện diện của xúc tác mới có thể bị phân hủy tiếp (Ghoreishi & Haghighi, 2003). Do đó, sau 40 phút, tốc độ phản ứng giữa *OH và các chất ô nhiễm còn lại bị suy giảm, dẫn đến hiệu suất xử lý COD không tăng đáng kể.

Tổng kết, thời gian 40 phút là điều kiện thích hợp cho AOPs, với hiệu quả loại bỏ độ màu 79,2% và COD 81,3%.



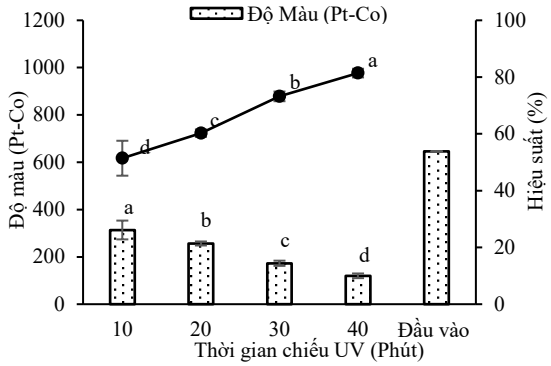
Hình 11. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng với O_3 đến hiệu quả xử lý COD

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức ***α*** *= 5%.*

3.3.2. Ảnh hưởng của thời gian chiếu UV

Thời gian chiếu UV là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến hiệu quả phân hủy chất ô nhiễm qua phản ứng quang hóa kết hợp oxy (Perkowski & Kos, 2003). Thí nghiệm đã được thực hiện nhằm khảo sát ảnh hưởng của thời gian chiếu UV (10, 20, 30, 40 phút tương ứng 25%, 50%, 75% và 100% thời gian phản ứng O_3 40 phút) đến hiệu suất loại bỏ màu và

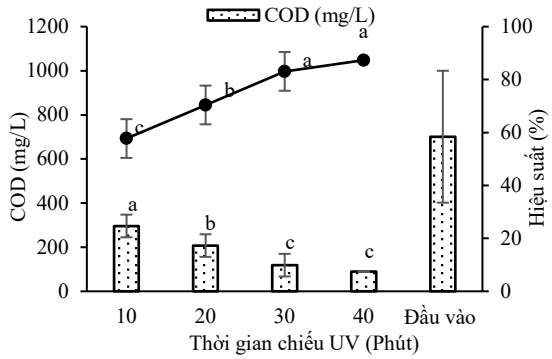
COD. Các điều kiện còn lại gồm O_3 35 mg/L và nước thải đã xử lý keo tụ với PAC 600 mg/L và Polymer Anion 4 mg/L được giữ cố định. Kết quả trình bày tại Hình 12 và Hình 13.



Hình 12. Ảnh hưởng của thời gian chiếu UV đến hiệu quả xử lý độ màu

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức α *= 5%.*

Kết quả được trình bày ở Hình 12 cho thấy hiệu suất loại bỏ độ màu tăng từ 51,4% lên 81,4% khi thời gian chiếu UV kéo dài từ 10 đến 40 phút, với sự khác biệt có ý nghĩa tại 40 phút. Tương tự, hiệu suất loại bỏ COD (Hình 13) tăng từ 58% đến 87%, ổn định sau 30 phút, không có khác biệt ý nghĩa giữa các nghiệm thức. Hiệu quả tăng do liều UV tăng, cải thiện phân hủy hợp chất hữu cơ qua phản ứng quang hóa (Zadeh et al., 2017). Thời gian chiếu UV 40 phút được chọn làm điều kiện thích hợp cho quá trình AOPs/UV.



Hình 13. Ảnh hưởng của thời gian chiếu UV đến hiệu quả xử lý COD

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b, c, d) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức α *= 5%.*

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu đã đánh giá hiệu quả vượt trội của phương pháp kết hợp giữa keo tụ và oxy hóa nâng cao (AOPs) trong xử lý nước thải dệt nhuộm. Kết quả cho thấy, quá trình keo tụ đạt hiệu quả loại bỏ lên đến 71,4% độ màu và 55% COD. Tiếp đó, quá trình xử lý được tiến hành bằng phương pháp AOPs, tổ hợp O_3/UV được sử dụng trên nguồn nước thải keo tụ đã tiếp tục nâng cao hiệu quả xử lý, đạt 81,4% độ màu và 87% COD. Điều này cho thấy việc kết hợp hai công nghệ không chỉ giúp cải thiện đáng kể hiệu suất xử lý, mà còn mang lại tính khả thi cao trong thực tiễn. Từ các kết quả này, việc một nghiên cứu được thực hiện nhằm phân tích chi phí-hiệu quả cho việc triển khai quy mô công nghiệp là hướng đi cần thiết trong tương lai, nhằm cung cấp một giải pháp toàn diện cho các doanh nghiệp dệt nhuộm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

Abiola, O. N. (2018). Polymers for coagulation and flocculation in water treatment. In Polymeric materials for clean water. *Cham: Springer International Publishing*, 77-92. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00743-0_4

Awad, M., Li, F., & Hongtao, W. (2013). Application of natural clays and poly aluminium chloride (PAC) for wastewater treatment. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, *15*(2), 287–291.

Dao, M. T., Nguyen, N. V. C., & Ngo, D. K. (2016). Investigating the effectiveness of chemical coagulants and bio-coagulantsin textile wastewater treatment. *Ho Chi Minh City University of Education Science Journal*, *9*(87), 127 *(in Vietnamese).*

Ghoreishi, S. M., & Haghighi, R. (2003). Chemical catalytic reaction and biological oxidation for treatment of non-biodegradable textile effluent. *Chemical Engineering journal*, *95*(1-3), 163-169. https://doi.org/10.1016/S1385-8947(03)00100-1

GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez-García, M. Á. (2017). Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 191, 189–197. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.015

Hassaan, M. A., & El Nemr, A. (2017). Advanced oxidation processes for textile wastewater treatment. *International Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2(3), 85–93.

Ho, H., & Watanabe, T. (2017). Distribution and removal of nonylphenol ethoxylates and nonylphenol from textile wastewater—A comparison of a cotton and a synthetic fiber factory in Vietnam. *Water*, *9*(6), 386. https://doi.org/10.3390/w9060386

Hoang, H. T. T., Nguyen, H. T., Tran, S. T., & Thai, V. P. (2024). Evaluation of methylene blue dye (MB) removal from aqueous solution using biochar synthesized from disposable bamboo chopsticks. *Can Tho University Journal of Science*, *60*(3), 62–72 *(in Vietnamese)*. https://doi.org/10.22144/ctujos.2024.310

Holkar, C. R., Jadhav, A. J., Pinjari, D. V., Mahamuni, N. M., & Pandit, A. B. (2016). A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches. *Journal of Environmental Management*, 182, 351–366. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090

Islam, M. R., & Mostafa, M. G. (2020). Characterization of textile dyeing effluent and its treatment using polyaluminum chloride. *Applied Water Science*, *10*(5), 1-10. https://doi.org/10.1007/s13201-020-01204-4

Le, V. H., & Nguyen, N. V. C. (2018). *Wastewater Treatment Engineering Textbook (Volume 2).* Can Tho University Publishing House *(in Vietnamese).*

Lee, C. S., Robinson, J., & Chong, M. F. (2014). A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process safety and environmental protection*, *92*(6), 489-508. https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.010

Luong, T. H. V., Cao, H. L. N., Dang, G. H., Tran, Q. T. B., Le, D. T. N., & Pham, Q. T. B. (2022). Evaluation of methylene blue removal using an adsorbent synthesized from coir pith by modified Hummers method. *Can Tho University Science Journal*, *58*(2), 59–101 *(in Vietnamese)*. https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2022.039

Mahmudabadi, Z. T., Ebrahimi, A. A., Eslami, H., Mokhtari, M., Salmani, M. H., Ghaneian, M. T., & Pakdaman, M. (2018). Optimization and economic evaluation of modified coagulation–flocculation process for enhanced treatment of ceramic-tile industry wastewater. *AMB Express*, 8, 1-12. https://doi.org/10.1186/s13568-018-0702-4

Manna, M., & Sen, S. (2023). Advanced oxidation process: a sustainable technology for treating refractory organic compounds present in industrial wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(10), 25477-25505. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19435-0

Metcalf, L., & Eddy, H. P. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill, New York.

Mohajerani, M., Mehrvar, M., & Ein-Mozaffari, F. (2009). An overview of the integration of advanced oxidation technologies and other processes for water and wastewater treatment. *International Journal of Engineering*, *3*(2), 120–146.

Nguyen, A. T., Pham. H. K., & Nguyen, T. T. (2020a). Treating textile wastewater by combination of advanced oxidation process and UV light. *Journal of Science Of Lac Hong University*, 9, 47-52 *(in Vietnamese).*

Nguyen, D. T. P., Lu, Y. T., & Pham, T. N. T. (2020b). Research on the application of advanced oxidation method combining ozone and UV rays in the treatment of textile wastewater in Pho Noi industrial park. *Environmental Magazine*, *IV*(December), 22–26 *(in Vietnamese).*

Nguyen. D. T., Doan, T. T., Dong, O. T., & Nguyen, T. P. (2017). Textile wastewater treatment by fococagulation method combined with advanced fenton oxidation. *Journal of Analytical Chemistry, Physics and Biology*, *22*(4), 89-107 *(in Vietnamese).*

Perkowski, J., & Kos, L. (2003). Decolouration of model dyehouse wastewater with advanced oxidation processes. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, *11*(3), 67–71.

Tianzhi, W., Weijie, W., Hongying, H., & Khu, S. T. (2021). Effect of coagulation on bio-treatment of textile wastewater: Quantitative evaluation and application. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127798. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127798

Vajihinejad, V., Gumfekar, S. P., Bazoubandi, B., Rostami Najafabadi, Z., & Soares, J. B. (2019). Water soluble polymer flocculants: synthesis, characterization, and performance assessment. *Macromolecular Materials and Engineering*, *304*(2), 1800526. https://doi.org/10.1002/mame.201800526

Vu, N. T. B., Hoang, H. T. H., & Trinh H. L. (2016). Practical treatment of textile wastewater color by advanced oxidation method. *VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology*, *32*(4), 97–103 *(in Vietnamese).*

Wang, J. L., & Xu, L. J. (2012). Advanced oxidation processes for wastewater treatment: formation of hydroxyl radical and application. *Critical reviews in Environmental Science and Technology*, *42*(3), 251-325. https://doi.org/10.1080/10643389.2010.507698

Zadeh, K. R. & Malakootian, M. (2017). O_3/UV photo-oxidation for the removal of reactive yellow 3 dye from wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 81, 322–326. https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21178

Zhang, Y., Shaad, K., Vollmer, D., & Ma, C. (2021). Treatment of textile wastewater using advanced oxidation processes—a critical review. *Water*, *13*(24), 3515. https://doi.org/10.3390/w13243515