

DOI:10.22144/ctujs.2026.148

XỬ LÝ MÀU VÀ COD TRONG NƯỚC THẢI DỆT NHUỘM BẰNG PHƯƠNG PHÁP H_2O_2/O_3 KẾT HỢP UV

Nguyễn Xuân Lộc, Lê Mai Hồng Kiêm, Trần Thị Bảo Ngọc, Đỗ Thị Mỹ Phượng và Phan Thị Thanh Tuyền*

Khoa Môi trường và Tài nguyên Thiên nhiên, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): ptttuyen@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 14/11/2025

Sửa bài (Revised): 23/12/2025

Duyệt đăng (Accepted): 28/06/2026

Title: Color and COD removal from textile dyeing wastewater using the H_2O_2/O_3 /UV advanced oxidation process

Author(s): Nguyen Xuan Loc, Le Mai Hong Kiem, Tran Thi Bao Ngoc, Do Thi My Phuong and Phan Thi Thanh Tuyen*

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

TÓM TẮT

Đối mặt với những hạn chế của các phương pháp xử lý truyền thống, phương pháp oxy hóa bậc cao (AOPs) nổi bật nhờ khả năng tạo ra các gốc hydroxyl ($\cdot OH$) có tính oxy hóa mạnh, giúp xử lý hiệu quả các hợp chất hữu cơ khó phân hủy. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm tập trung đánh giá hiệu quả xử lý độ màu và COD trong nước thải dệt nhuộm bằng phương pháp H_2O_2/O_3 kết hợp UV. Các yếu tố ảnh hưởng như hàm lượng O_3 , pH, tỷ lệ H_2O_2/O_3 , thời gian phản ứng và thời gian chiếu UV đã được khảo sát để tối ưu hóa hiệu suất. Kết quả cho thấy điều kiện khảo sát tốt nhất là: $O_3 = 40$ mg/L, pH = 8, tỷ lệ $H_2O_2:O_3 = 1:1$, thời gian phản ứng 60 phút, chiếu UV 75% tổng thời gian. Dưới điều kiện này, hiệu suất loại bỏ độ màu đạt 70% (từ 1060 Pt-Co xuống 317 Pt-Co) và COD giảm 67,2% (từ 1380 mg/L xuống 452 mg/L). Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu đã chứng minh tiềm năng ứng dụng của quá trình H_2O_2/O_3 /UV trong xử lý nước thải dệt nhuộm, cho thấy hiệu quả xử lý cao, từ đó làm cơ sở khoa học cho việc nghiên cứu triển khai công nghệ ở quy mô thí điểm hoặc trong thực tế nhà máy.

Từ khóa: COD, H_2O_2/O_3 /UV, khử màu, nước thải dệt nhuộm, quá trình oxy hóa nâng cao

ABSTRACT

Facing the limitations of conventional treatment methods, advanced oxidation processes (AOPs) have emerged as a promising alternative due to their ability to generate highly reactive hydroxyl radicals ($\cdot OH$), which possess strong oxidizing power and can effectively degrade refractory organic compounds. This study focused on evaluating the efficiency of color and COD removal from textile dyeing wastewater using the combined H_2O_2/O_3 and UV process. The influencing factors, including O_3 concentration, pH, $H_2O_2:O_3$ ratio, reaction time, and UV irradiation time, were investigated to optimize treatment performance. The results indicated that the optimal operating conditions were $O_3 = 40$ mg/L, pH = 8, $H_2O_2:O_3 = 1:1$, reaction time = 60 min, and UV irradiation time = 75% of the total reaction time. Under these conditions, color removal efficiency reached 70% (from 1060 Pt-Co to 317 Pt-Co), and COD removal achieved 67.2% (from 1380 mg/L to 452 mg/L). The study demonstrates the strong potential of the H_2O_2/O_3 /UV process for textile wastewater treatment, showing high treatment efficiency and providing a scientific basis for pilot-scale studies and practical industrial implementation.

Keywords: Advanced oxidation process, COD, color removal, H_2O_2/O_3 /UV, textile dyeing wastewater

1. GIỚI THIỆU

Ngành sản xuất dệt may đóng vai trò then chốt trong nhiều nền kinh tế trên thế giới, đặc biệt ở các quốc gia đang phát triển như Trung Quốc, Ấn Độ và Việt Nam, nơi ngành này không chỉ tạo việc làm mà còn đóng góp đáng kể vào GDP và xuất khẩu (Al-Mamun et al., 2019; Karci, 2014). Tuy nhiên, quá trình sản xuất này đồng thời tạo ra một lượng lớn nước thải công nghiệp độc hại. Kết quả ước tính cho thấy mỗi năm có khoảng 700.000 tấn nước thải phát sinh, trong đó gần 200.000 tấn chưa qua xử lý được xả trực tiếp vào môi trường, gây áp lực lớn lên hệ sinh thái và các nguồn nước mặt (Holkar et al., 2016; Siddique et al., 2017).

Nước thải dệt nhuộm chứa nhiều hợp chất hữu cơ khó phân hủy sinh học, điển hình là các phẩm nhuộm azo, phenol và các dẫn xuất hữu cơ khác, cùng với nồng độ pH và nhu cầu oxy hóa học (COD) cao (Kishor et al., 2021). Các hợp chất này không chỉ gây ô nhiễm môi trường nghiêm trọng mà còn tác động trực tiếp tới sức khỏe con người, như kích ứng da, rối loạn hệ hô hấp và nguy cơ ung thư (Khan & Malik, 2014). Đồng thời, khi xả ra môi trường, chúng làm giảm khả năng quang hợp của thực vật thủy sinh, dẫn tới suy thoái hệ sinh thái nước và ảnh hưởng tiêu cực tới đất canh tác, góp phần làm giảm năng suất nông nghiệp.

Do tính chất độc hại và khó phân hủy của nước thải dệt nhuộm, việc áp dụng các phương pháp xử lý hiệu quả trước khi xả ra môi trường trở thành yêu cầu cấp thiết, vừa bảo vệ sức khỏe cộng đồng vừa đảm bảo phát triển bền vững cho ngành công nghiệp dệt may. Việc nghiên cứu các công nghệ tiên tiến, như oxy hóa bậc cao (Advanced Oxidation Processes – AOPs), đóng vai trò quan trọng trong việc giải quyết vấn đề này, đồng thời hỗ trợ mục tiêu kinh tế tuần hoàn và quản lý chất thải hiệu quả.

Hiện nay, nhiều phương pháp xử lý nước thải công nghiệp đã được áp dụng, bao gồm keo tụ – tạo bông các hạt rắn và tạp chất, màng lọc – loại bỏ cơ học các hạt và vi sinh vật, oxy hóa – phá vỡ các hợp chất hữu cơ bằng các chất oxy hóa mạnh, hấp phụ – hấp thụ các chất ô nhiễm vào bề mặt vật liệu như than hoạt tính, và AOPs. Trong số này, AOPs được đánh giá là một trong những phương pháp tiềm năng nhất nhờ khả năng tạo ra các gốc hydroxyl (*OH) – những gốc tự do có tính oxy hóa cực mạnh, có thể tấn công và phân hủy nhanh hầu hết các chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy mà không sinh ra các sản phẩm phụ độc hại (Perkowski & Ledakowicz, 2002).

Cơ chế hoạt động của AOPs dựa trên sự sinh ra các gốc *OH , có khả năng oxy hóa gần như tất cả các hợp chất hữu cơ, kể cả các chất màu và các hợp chất có COD cao trong nước thải dệt nhuộm. Kết quả các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy AOPs đặc biệt hiệu quả trong việc loại bỏ màu và giảm COD của nước thải dệt nhuộm so với các phương pháp truyền thống, nhờ khả năng phá vỡ cấu trúc phức tạp của các chất nhuộm và hợp chất hữu cơ ổn định (Al-Kdasi et al., 2004; Pourgholi et al., 2018). Ngoài ra, AOPs còn có ưu điểm linh hoạt trong việc kết hợp với các quá trình khác, như keo tụ hoặc màng lọc, giúp nâng cao hiệu quả xử lý và giảm thiểu chi phí vận hành.

Trong số các kỹ thuật AOPs, sự kết hợp giữa hydro peroxide (H_2O_2), ozone (O_3) và bức xạ UV được xem là một trong những phương pháp hiệu quả nhất trong xử lý nước thải dệt nhuộm. Cơ chế chính của phương pháp này dựa trên việc tạo ra các gốc *OH cực mạnh từ phản ứng giữa H_2O_2 và O_3 dưới tác dụng của ánh sáng UV, giúp oxy hóa nhanh chóng các hợp chất hữu cơ phức tạp, bao gồm các chất nhuộm khó phân hủy và các hợp chất đóng góp vào COD. Theo Pourgholi et al. (2018), phương pháp này có thể loại bỏ tới 89,2% màu và 76,7% COD trong nước thải dệt nhuộm.

Bên cạnh đó, kết quả các nghiên cứu khác cũng củng cố hiệu quả vượt trội của phương pháp này. Azbar et al. (2004) chỉ ra rằng hệ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3/\text{UV}$ có khả năng loại bỏ COD và màu lần lượt đạt 99% và 96%, cao hơn hầu hết các AOPs khác như O_3/UV , Fenton hoặc TiO_2/UV . Những kết quả này không chỉ chứng minh tiềm năng kỹ thuật mà còn mở ra hướng ứng dụng thực tiễn trong các nhà máy dệt nhuộm, giúp giảm đáng kể ô nhiễm môi trường, đáp ứng các tiêu chuẩn xả thải và có khả năng kết hợp linh hoạt với các quá trình xử lý trước hoặc sau nhằm tối ưu hóa hiệu quả xử lý và chi phí vận hành.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá hiệu quả của các quá trình oxy hóa nâng cao (AOPs), đặc biệt là hệ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3/\text{UV}$, trong xử lý nước thải dệt nhuộm; tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu trước đây được thực hiện trên nước thải mô phỏng hoặc nước thải thực tế trong điều kiện phòng thí nghiệm được kiểm soát chặt chẽ, với thành phần tương đối đồng nhất và điều kiện vận hành được tối ưu hóa cao (Azbar et al., 2004; Pourgholi et al., 2018). Trong khi đó, nước thải dệt nhuộm thực tế tại Việt Nam thường có đặc tính phức tạp, tải lượng ô nhiễm cao và biến động lớn về thành phần hữu cơ, dẫn đến hiệu quả xử lý trong thực tế thường thấp hơn so với các báo cáo trước đây.

Xuất phát từ khoảng trống này, nghiên cứu hiện tại được thực hiện với mục tiêu tập trung đánh giá vai trò và hiệu quả của hệ $H_2O_2/O_3/UV$ đối với nước thải dệt nhuộm thực tế thu từ nhà máy, phản ánh sát hơn điều kiện vận hành trong thực tiễn. Kết quả nghiên cứu cho thấy, ngay cả trong điều kiện nước thải có độ màu và COD cao, việc bổ sung tia UV vào hệ H_2O_2/O_3 vẫn giúp cải thiện rõ rệt hiệu quả xử lý. Điều này khẳng định tiềm năng ứng dụng của hệ $H_2O_2/O_3/UV$ như một công đoạn xử lý bậc cao hoặc tiền xử lý nâng cao, góp phần nâng cao hiệu quả tổng thể của hệ thống xử lý nước thải dệt nhuộm tại Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nguồn gốc của nước thải thí nghiệm

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, nhằm mô phỏng dòng chảy liên tục trong quá trình xử lý nước thải bằng hệ AOPs ($H_2O_2/O_3/UV$). Cột được chế tạo bằng ống PVC có đường kính trong $D = 114 \text{ mm}$ và chiều cao $H = 600 \text{ mm}$, bảo đảm tỷ lệ $H/D \approx 5,26$, nằm trong khoảng 5 – 10 được khuyến nghị cho cột phản ứng theo Metcalf and Eddy (2003).

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

$$V = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times H = \pi \times (0.057)^2 \times 0.6 = 0.0061 \text{ m}^3 = 6100 \text{ mL}$$

Trong đó:

- D là đường kính trong của cột (m),
- H là chiều cao của cột (m),
- V là thể tích hình học của cột (m^3 hoặc mL).

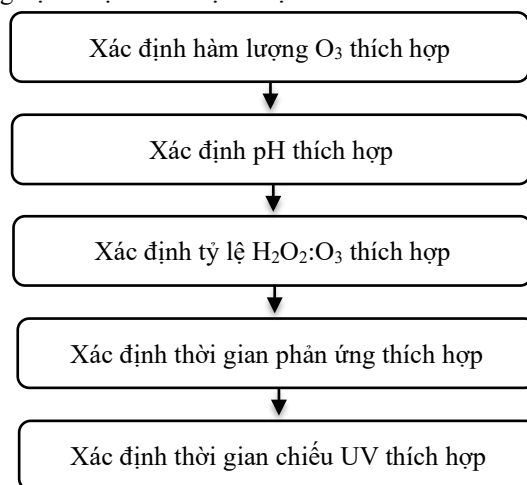
Ống PVC được lựa chọn nhờ giá thành thấp, dễ gia công, sẵn có và thuận tiện cho lắp đặt các đầu vào – đầu ra, đệm và nắp đáy.

Cấu tạo mô hình thí nghiệm được thể hiện ở Hình 1, gồm các bộ phận chính:

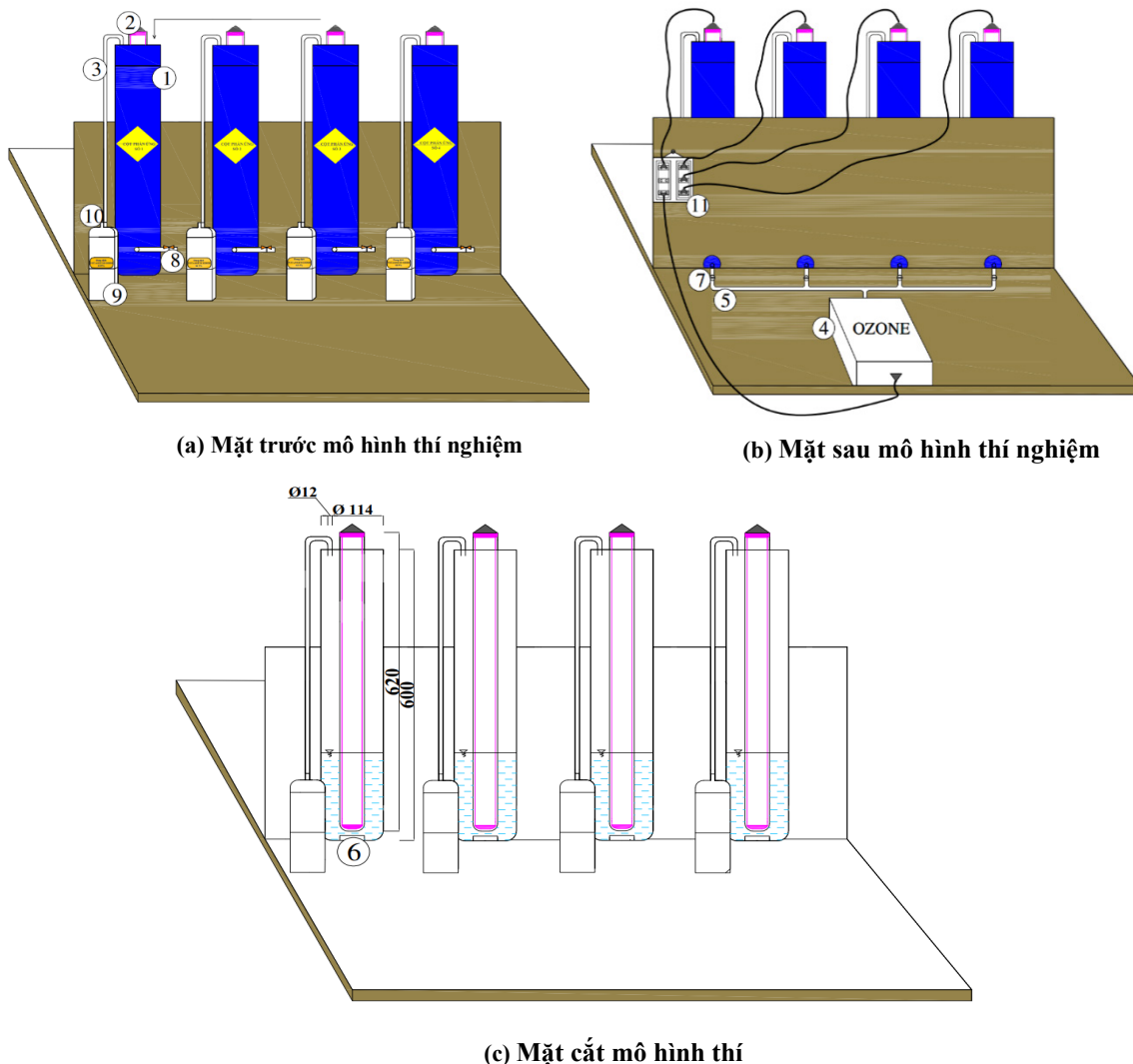
1. Cột phản ứng (1): hình trụ, $D = 114 \text{ mm}$, $H = 600 \text{ mm}$, thể tích thực 5000 mL, thể tích hữu ích 4000 mL.
2. Đèn UV (2): công suất 40 W, cung cấp năng lượng cho quá trình quang phân.
3. Đường ống thoát khí O_3 dư (3): gắn trên nắp cột.
4. Máy phát ozone (4): cung cấp khí O_3 .
5. Đường ống dẫn khí O_3 (5): vận chuyển khí vào cột.
6. Đĩa sục khí (6): phân phối đều khí O_3 trong cột phản ứng.
7. Van điều chỉnh (7): kiểm soát lưu lượng O_3 .
8. Ống xả (8): thu nước sau xử lý ở đáy cột.
9. Bình hấp thụ KI 5% (9): hấp thụ khí O_3 dư, dùng làm chỉ thị xác định lượng O_3 còn lại.
10. Bình hấp thụ KI thứ hai (10): xử lý phần O_3 còn sót, chuyển hóa hoàn toàn thành O_2 trước khi thoát ra ngoài.

2.3. Xác định các điều kiện ảnh hưởng đến thí nghiệm

Việc nghiên cứu khả năng loại bỏ màu và COD khi sử dụng kết hợp H_2O_2/O_3 và H_2O_2/O_3 với UV đối với nước thải dệt nhuộm đã được thực hiện, dưới các điều kiện ảnh hưởng của pH, tỷ lệ $H_2O_2:O_3$, thời gian phản ứng và khi kết hợp chiếu UV. Các thí nghiệm được bố trí cụ thể tại Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ bố trí thí nghiệm



Hình 2. Sơ đồ cấu tạo mô hình thí nghiệm cột phản ứng liên tục hệ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3/\text{UV}$ (tỉ lệ 1:100)

Ghi chú: 1: cột phản ứng, 2: đèn UV, 3: đường ống dẫn khí O_3 dư, 4: máy phát O_3 , 5: đường ống dẫn khí O_3 , 6: đĩa thổi khí, 7: van điều chỉnh khí O_3 , 8: ống lấy nước đầu ra, 9: bình KI, 10: đường khí O_3 thoát ra, 11: ổ điện.

Thuyết minh mô hình:

Mô hình phản ứng trong thí nghiệm được mô tả ở Hình 2, bao gồm 4 cột phản ứng (1) có dạng hình trụ tròn, với các thông số kích thước cụ thể như sau: đường kính $D = 114$ mm, chiều cao $H = 600$ mm, thể tích thực của mỗi cột phản ứng là $V = 5000$ mL, và thể tích hữu ích $V_{\text{hữu ích}} = 4000$ mL. Mỗi cột phản ứng được trang bị một đèn UV (2) có công suất 40 W để cung cấp năng lượng cho quá trình quang phân.

Các cột phản ứng (1) được thiết kế có thể tháo lắp dễ dàng, giúp thuận tiện trong việc châm nước thải vào từng mẻ. Ngoài ra, trên nắp mỗi cột phản

ứng được khoan một lỗ dùng để lắp đặt đường ống dẫn khí O_3 dư (3) thoát ra ngoài. Khí O_3 được cung cấp từ máy phát ozone (4) qua đường ống dẫn (5) phân phối vào cột phản ứng qua đĩa sục khí (6), đi kèm với van điều chỉnh (7) để kiểm soát lưu lượng khí O_3 , đảm bảo quá trình xử lý diễn ra hiệu quả và ổn định.

Sau khi quá trình phản ứng hoàn tất, nước thải đã xử lý được lấy ra ngoài qua đường ống nằm dưới đáy cột phản ứng (8). Để đảm bảo kiểm soát chính xác nồng độ khí O_3 dư, bình chứa dung dịch Potassium Iodide (KI 5%) đã được sử dụng, giúp hấp thụ khí O_3 dư và hoạt động như một chất chỉ thị,

xác định lượng khí O₃ còn lại trong hệ thống. Nếu khí O₃ chưa được hấp thụ hoàn toàn tại bình phản ứng đầu tiên (bình 1) thì phần khí dư được chuyển sang bình thứ hai (bình 2), nơi dung dịch KI hấp thụ toàn bộ khí O₃, chuyển hóa thành khí O₂, thoát ra ngoài qua đường ống dẫn khí (10).

2.4. Phương pháp phân tích và xử lý số liệu

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

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

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Phương pháp	Thiết bị, hãng sản xuất, model máy	TCVN
1	pH	-	Đo trực tiếp	Máy đo pH ORP Horiba F-72G	TCVN 6491:1999
2	Độ màu	Pt-Co	Đo trực tiếp	Máy đo độ màu Hanna – HI97727C	TCVN 6185:2015
3	COD	mg/L	SMEWW 5220 D:2017	Hóa chất và các thiết bị	TCVN 6491:1999

Việc bố trí thí nghiệm đã được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố pH, hàm lượng O₃ (mg/L), tỷ lệ H₂O₂/O₃, thời gian phản ứng (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 1000 mL nước thải.

Bảng 2. Bố trí các thí nghiệm ảnh hưởng

Yếu tố khảo sát	Giá trị khảo sát	Điều kiện cố định
Xác định hàm lượng O ₃	30 mg/L, 35 mg/L, 40 mg/L, 45 mg/L	V = 1000 mL, pH 6, thời gian phản ứng 60 phút
Xác định pH	4, 6, 8, 10	V = 1000 mL, hàm lượng O ₃ thích hợp ở TN1, thời gian phản ứng 60 phút
Xác định tỷ lệ H ₂ O ₂ :O ₃	0,5, 1, 1,5, 2	V = 1000mL, thời gian phản ứng 60 phút, hàm lượng O ₃ thích hợp ở TN1, pH thích hợp ở TN2
Xác định thời gian phản ứng (phút)	30, 60, 90, 120	V = 1000 mL, thời gian phản ứng 60 phút, hàm lượng O ₃ thích hợp ở TN1, pH thích hợp ở TN2, tỷ lệ H ₂ O ₂ :O ₃ thích hợp ở TN3
Thời gian chiếu UV (%)	25, 50, 75, 100	V = 1000 mL, hàm lượng O ₃ thích hợp ở TN1, pH thích hợp ở TN2, tỷ lệ H ₂ O ₂ /O ₃ thích hợp ở TN3, thời gian phản ứng ở TN4

Công thức tính hiệu suất xử lý (%)

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

Trong đó:

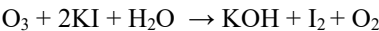
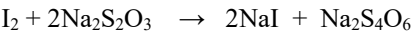
H là hiệu suất xử lý (%),

C₀ là nồng độ chất ô nhiễm ban đầu (mg/L, NTU, Pt-Co),

C₁ là nồng độ chất ô nhiễm sau xử lý (mg/L, NTU, Pt-Co).

Phương pháp tính hàm lượng O₃:

Để xác định hàm lượng O₃ cung cấp, dòng khí chứa O₃ được sục qua dung dịch KI, tạo dung dịch vàng do I₂ sinh ra. Lượng I₂ được xác định bằng chuẩn độ với Na₂S₂O₃. Dựa trên các phản ứng:



Từ đó:

$$n_{O_3} = \frac{C_{Na_2S_2O_3} \times V_{Na_2S_2O_3}}{2}$$

$$m_{O_3} = n_{O_3} \times 48$$

Trong đó: C là nồng độ (mol/L), V là thể tích dung dịch chuẩn độ (L).

Hàm lượng O₃ (mg/L khí) được tính theo:

$$C_{O_3} = \frac{m_{O_3} \times 1000}{V_{gas}}$$

Trong đó: m_{O₃} là khối lượng khí O₃ (mol/L), V_{gas} là thể tích dòng khí (L).

Các số liệu được thu thập và tổng hợp trên Excel. Dùng phần mềm SPSS 18.0 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 tổng hợp từ các thí nghiệm lặp lại và trình bày dưới dạng giá trị trung bình; do số lần lặp còn hạn chế nên việc kiểm định giả định phân phối chuẩn và đồng nhất phương sai trước khi phân tích không được tiến hành.

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 đầu vào được trình bày trong Bảng 3. Nước thải có mức độ ô nhiễm cao với các thông số đặc trưng đều vượt giới hạn cho phép theo QCVN 13-MT:2015/BTNMT. Cụ thể, giá trị COD trung bình đạt 1.380 mg/L (dao động 1.302–1.490 mg/L), cao gấp khoảng 13,8 lần và 6,9 lần giới hạn cột A và cột B, phản ánh hàm lượng lớn các hợp chất hữu cơ, trong đó có nhiều thành phần khó phân hủy sinh học. Độ màu trung bình đạt 1.060 Pt–Co (996–1.100 Pt–Co), vượt khoảng 14,1 lần và 5,3 lần so với giới hạn tương ứng của cột A và cột B, cho thấy sự hiện diện của các hợp chất tạo màu có cấu trúc bền vững, chủ yếu là các thuốc nhuộm hoạt tính chứa nhóm azo hoặc anthraquinone. Bên cạnh đó, nước thải có tính kiềm mạnh với pH trung bình 9,98 (9,83–10,17), cao hơn giới hạn quy chuẩn, đặc trưng cho nước thải phát sinh từ công đoạn nhuộm và xử lý hóa học trong ngành dệt nhuộm. Những đặc điểm này cho thấy nước thải có khả năng phân hủy sinh học thấp và cần áp dụng các công nghệ oxy hóa nâng cao để nâng cao hiệu quả xử lý.

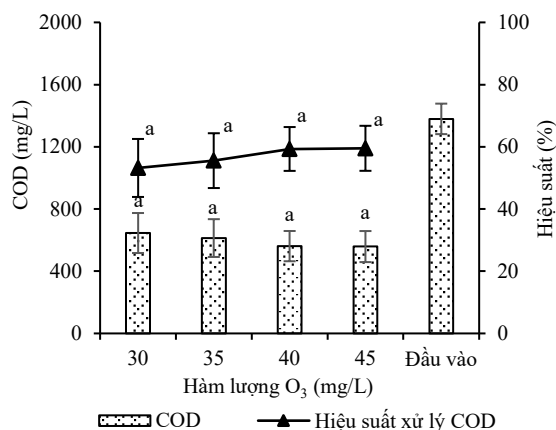
Bảng 3. Kết quả phân tích nước thải đầu vào

Chỉ tiêu	Đơn vị	Nồng độ trung bình	QCVN 13/2015/TT-BTNMT	
			Cột A	Cột B
pH	-	9,98	6 - 9	5,5 - 9
COD	mg/L	1.380	100	200
Độ màu	Pt-Co	1.060	75	200

3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng O₃ đến hiệu suất xử lý độ màu và COD

Hàm lượng ozone (O₃) là một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả khử màu và loại bỏ COD trong quá trình xử lý nước thải dệt nhuộm. Ozone có thể oxy hóa cao, có khả năng phá vỡ các vòng thơm bền vững trong cấu trúc thuốc nhuộm, từ đó thúc đẩy quá trình phân hủy và loại bỏ chất màu (Hassaan & El Nemr, 2017). Do đó, việc xác định hàm lượng O₃ tối ưu là cần thiết để đạt được hiệu quả xử lý cao nhất. Trong nghiên cứu này,

thí nghiệm được tiến hành với các mức hàm lượng O₃ khác nhau gồm 30, 35, 40 và 45 mg/L, trong điều kiện pH = 6 và thời gian phản ứng là 60 phút. Kết quả ảnh hưởng của hàm lượng O₃ đến hiệu suất xử lý độ màu và COD được trình bày lần lượt ở Hình 3 và Hình 4.



Hình 3. Ảnh hưởng của hàm lượng O₃ lên hiệu suất xử lý độ màu

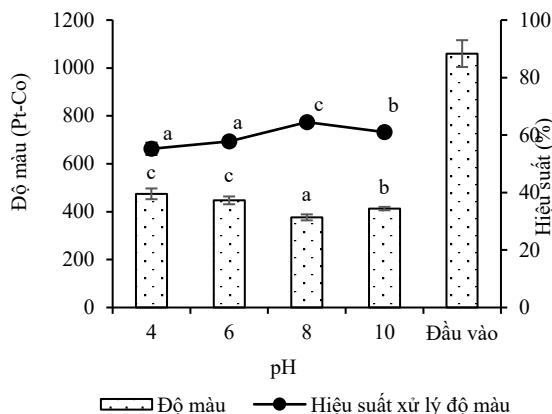
Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình ± độ lệch chuẩn, n = 3. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b, c, d) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức $\alpha = 5\%$.

Kết quả ở Hình 3 cho thấy hiệu suất xử lý độ màu tăng dần khi tăng hàm lượng O₃ và đạt giá trị cực đại tại 40 mg/L. Cụ thể, khi tăng hàm lượng O₃ từ 30 mg/L lên 40 mg/L, hiệu suất xử lý tăng từ 53% lên 64%. Tuy nhiên, khi tiếp tục tăng lên 45 mg/L, hiệu suất không thay đổi đáng kể.

Hiệu suất xử lý không tiếp tục tăng khi hàm lượng O₃ được nâng từ 40 lên 45 mg/L có thể liên quan đến giới hạn của quá trình chuyển khối giữa pha khí và pha lỏng. Khi tốc độ cấp ozone vượt quá khả năng hòa tan của hệ thống, chỉ một phần O₃ được chuyển vào dung dịch và tham gia phản ứng oxy hóa, trong khi phần còn lại thoát khỏi bề mặt chất lỏng trước khi kịp phản ứng. Vì vậy, việc tăng lượng ozone cấp vào không đồng nghĩa với sự gia tăng tương ứng của nồng độ O₃ hòa tan – tác nhân trực tiếp tham gia oxy hóa các hợp chất hữu cơ trong nước thải. Hiện tượng này đã được ghi nhận trong nhiều nghiên cứu về quá trình ozone hóa, trong đó hiệu quả sử dụng ozone phụ thuộc đáng kể vào đặc tính truyền khối khí–lỏng và điều kiện vận hành của hệ phản ứng (Zhou & Smith, 2000; Beltrán, 2004; Gottschalk et al., 2010).

Ở giai đoạn đầu của quá trình xử lý, khi nồng độ các hợp chất tạo màu còn cao, lượng O_3 hòa tan được sử dụng chủ yếu để phá vỡ các liên kết chromophore của thuốc nhuộm, làm cho hiệu suất khử màu tăng nhanh. Tuy nhiên, khi phần lớn các hợp chất này đã bị phân hủy, các sản phẩm trung gian như acid hữu cơ mạch ngắn, hợp chất phenolic hoặc dẫn xuất aniline bắt đầu tích lũy và cạnh tranh với các chất ô nhiễm ban đầu trong phản ứng oxy hóa. Đồng thời, các ion vô cơ như HCO_3^- , CO_3^{2-} hoặc Cl^- có thể tiêu hao một phần các gốc hydroxyl ($\bullet OH$), làm giảm khả năng oxy hóa của hệ $O_3/H_2O_2/UV$. Do đó, mặc dù lượng ozone cấp vào tiếp tục tăng, hiệu suất xử lý chỉ cải thiện rất ít và dần đạt trạng thái ổn định (Ngọc và ctv., 2016).

Kết quả phân tích thống kê cho thấy tại hàm lượng 40 mg/L, hiệu suất loại bỏ màu đạt cao nhất (64%), giảm từ 1.060 Pt-Co xuống còn 381 Pt-Co, và có sự khác biệt có ý nghĩa so với các nghiệm thức 30 mg/L và 35 mg/L ($p < 0,05$). Điều này cho thấy 40 mg/L là hàm lượng O_3 thích hợp để đạt hiệu quả xử lý màu cao nhất trong điều kiện thí nghiệm.



Hình 4. Ảnh hưởng của hàm lượng O_3 lên hiệu suất xử lý COD

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình $\pm$ 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 $\alpha = 5\%$.

Đối với hiệu quả loại bỏ COD (Hình 4), hiệu suất xử lý tăng dần theo hàm lượng O_3 trong khoảng 30 – 40 mg/L, từ 53% lên 59%. Tuy nhiên, khi tăng lên 45 mg/L, hiệu suất chỉ tăng nhẹ lên 60% và không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các nghiệm thức ($p > 0,05$). Khi hàm lượng O_3 tăng cao, tốc độ khuấy trộn và tần suất va chạm giữa các bọt khí tăng, dẫn đến sự hợp nhất tạo thành các bọt khí lớn, làm giảm tổng diện tích tiếp xúc giữa pha khí và pha lỏng, từ đó hạn chế khả năng khuếch tán O_3 vào

dung dịch (Anh và ctv., 2020). Do đó, lượng O_3 thực tế tham gia vào quá trình oxy hóa các hợp chất hữu cơ không tăng tương ứng với lượng O_3 được cấp thêm.

Việc so sánh với nghiên cứu của Anh và ctv. (2020) cho thấy khi nước thải dệt nhuộm được xử lý bằng các quá trình oxy hóa nâng cao (O_3 , H_2O_2 , O_3/H_2O_2 , $O_3/H_2O_2/UV$), hiệu quả loại bỏ màu và COD lần lượt đạt 53,4% và 42% với hàm lượng O_3 35,2 mg/L. Trong nghiên cứu này, hiệu suất đạt 64% và 59% tương ứng tại 40 mg/L, cao hơn đáng kể so với kết quả trước. Sự khác biệt có thể do sự thay đổi về hàm lượng O_3 , thời gian phản ứng và đặc tính nguồn nước thải.

Như vậy, hàm lượng O_3 có ảnh hưởng rõ rệt đến hiệu quả xử lý độ màu, trong khi ảnh hưởng đến COD không đáng kể. Hàm lượng O_3 ở mức 40 mg/L được xác định là phù hợp nhất, cho hiệu quả khử màu cao nhất (64%) và đảm bảo cân bằng giữa hiệu quả xử lý và tiêu thụ năng lượng. Do đó, giá trị này được lựa chọn cho các thí nghiệm tiếp theo.

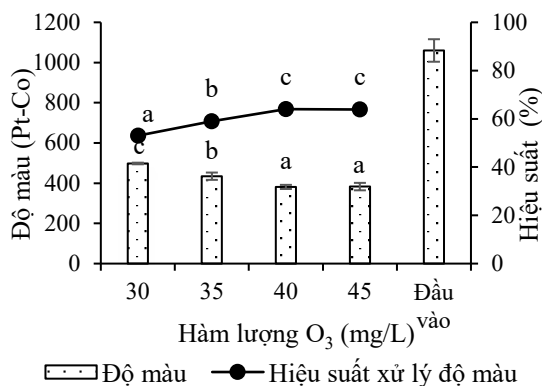
3.3. Ảnh hưởng của pH đến hiệu suất xử lý độ màu và COD

Độ pH là một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng khử màu và tốc độ phản ứng trong quá trình xử lý nước thải dệt nhuộm. Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của pH đến hiệu suất xử lý độ màu và COD được khảo sát tại bốn mức pH khác nhau (4, 6, 8 và 10), trong điều kiện cố định hàm lượng O_3 là 40 mg/L và thời gian phản ứng 60 phút. Kết quả được trình bày trong Hình 5 và Hình 6.

Kết quả tại Hình 5 cho thấy hiệu suất xử lý độ màu tăng từ 55% lên 65% khi pH tăng từ 4 đến 8, nhưng giảm còn 61% khi pH tiếp tục tăng lên 10. Hiệu suất cao nhất đạt được tại pH 8, với giá trị giảm từ 1.060 Pt-Co xuống còn 376 Pt-Co, tương ứng giảm 2,8 lần so với mẫu đầu vào. Kết quả phân tích thống kê cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa giữa nghiệm thức pH 8 so với các nghiệm thức còn lại ($p < 0,05$).

Khi pH của dung dịch tăng, cân bằng cacbon vô cơ trong nước chuyển dịch theo hướng làm tăng hàm lượng các ion HCO_3^- và CO_3^{2-} . Sự hiện diện của các ion này làm thay đổi môi trường phản ứng do chúng có khả năng tương tác với các gốc hydroxyl ($\bullet OH$), chuyển một phần các gốc có hoạt tính oxy hóa rất mạnh thành các gốc có hoạt tính thấp hơn. Hệ quả là lượng $\bullet OH$ sẵn sàng tham gia oxy hóa các hợp chất hữu cơ giảm, làm hạn chế quá trình phân hủy các chất tạo màu và các hợp chất hữu cơ khó phân hủy.

Vì vậy, mặc dù môi trường kiềm có thể thúc đẩy sự phân hủy ozone để tạo $\cdot\text{OH}$, khi pH vượt quá giá trị tối ưu, các phản ứng tiêu hao gốc tự do trở nên đáng kể hơn và hiệu quả xử lý có xu hướng giảm (Lucas et al., 2010).



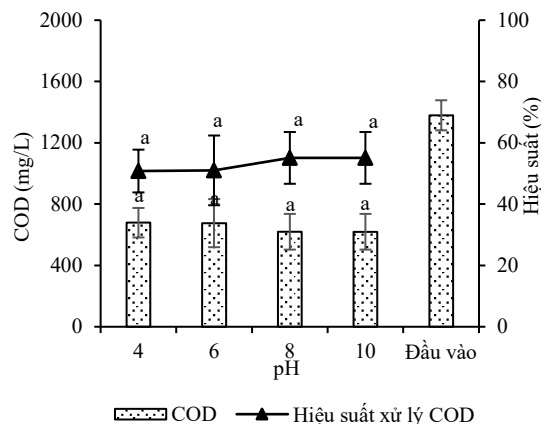
Hình 5. Ảnh hưởng của pH đến hiệu suất xử lý độ màu

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình $\pm$ 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 $\alpha = 5\%$.

Do đó, mặc dù môi trường kiềm ở mức vừa phải có thể thúc đẩy sự hình thành các gốc oxy hóa thông qua việc tăng tốc độ phân ly của H_2O_2 và hoạt hóa O_3 , nhưng khi pH vượt quá ngưỡng tối ưu, các phản ứng cạnh tranh giữa $\cdot\text{OH}$ và các ion $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ trở nên chiếm ưu thế. Kết quả là hiệu suất xử lý màu bị suy giảm, thể hiện xu hướng giảm nhẹ hiệu quả khử màu ở vùng pH cao.

Kết quả tại Hình 6 cho thấy hiệu suất loại bỏ COD tăng dần khi pH tăng từ 4 lên 8, từ khoảng 50% đến 55%, đạt giá trị tối ưu tại pH 8. Khi pH tiếp tục tăng lên 10, hiệu suất COD không thay đổi đáng kể. Hiệu quả xử lý cao ở pH 8 có thể giải thích là do trong môi trường trung tính – kiềm nhẹ, các hợp chất hữu cơ chủ yếu tồn tại ở dạng phân tử, tạo điều kiện thuận lợi cho phản ứng oxy hóa giữa O_3 và các gốc $\cdot\text{OH}$.

Tuy nhiên, khi pH vượt quá 8, một phần hợp chất hữu cơ chuyển sang trạng thái ion hóa, làm giảm hoạt tính phản ứng do tính ổn định hóa học cao hơn hoặc do các tương tác điện tích không thuận lợi với các chất oxy hóa (Beltrán et al., 1992). Kết quả phân tích thống kê cũng cho thấy sự khác biệt về hiệu suất loại bỏ COD giữa các giá trị pH khảo sát không có ý nghĩa thống kê ($p > 0,05$), cho thấy hiệu suất COD tương đối ổn định trong phạm vi pH từ 4 đến 10.



Hình 6. Ảnh hưởng của pH đến hiệu suất xử lý COD

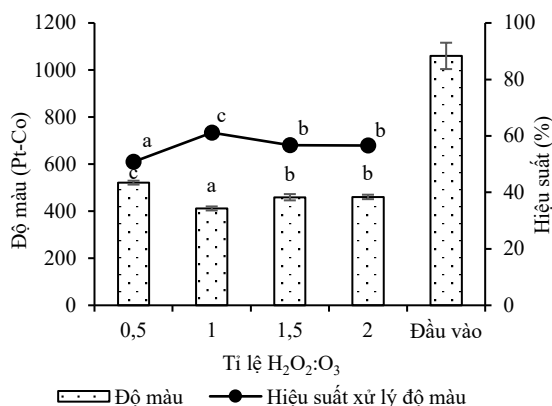
Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn, $n = 3$. Những giá trị trong cùng một cột có kí tự (a, b) khác nhau thì khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức $\alpha = 5\%$.

Kết quả nghiên cứu này cho thấy hiệu quả xử lý độ màu và COD cao hơn so với nghiên cứu của Anh và ctv. (2020); trong đó, nước thải dệt nhuộm được xử lý bằng các quá trình oxy hóa nâng cao như O_3 , H_2O_2 , $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ và $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$. Cụ thể, tại pH 8 và hàm lượng O_3 35,2 mg/L trong thời gian 40 phút, kết quả nghiên cứu của Anh và ctv. (2020) đạt hiệu suất loại bỏ độ màu và COD lần lượt là 53,4% và 42% (Anh và ctv., 2020). Trong khi đó, kết quả nghiên cứu hiện tại ghi nhận hiệu suất cao hơn, với giá trị tương ứng là 65% và 55%. Sự chênh lệch này có thể được giải thích bởi các yếu tố khác nhau giữa hai nghiên cứu, bao gồm hàm lượng O_3 sử dụng, thời gian phản ứng, cũng như đặc tính và thành phần của nước thải đầu vào.

Tóm lại, pH không ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất loại bỏ COD, nhưng tác động rõ rệt đến khả năng khử màu. Trong điều kiện thí nghiệm, pH 8 cho hiệu suất cao nhất đối với cả độ màu (65%) và COD (55%), do đó được chọn làm pH thích hợp cho các thí nghiệm tiếp theo.

3.4. Ảnh hưởng của tỷ lệ $\text{H}_2\text{O}_2:\text{O}_3$ đến hiệu suất xử lý độ màu và COD

Tỷ lệ $\text{H}_2\text{O}_2:\text{O}_3$ là yếu tố quan trọng quyết định hiệu quả của quá trình oxy hóa nâng cao và cần được xác định tối ưu. Thí nghiệm được thực hiện với bốn nghiệm thức có tỷ lệ $\text{H}_2\text{O}_2:\text{O}_3 = 0,5:1$; $1:1$; $1,5:1$ và $2:1$, trong đó nồng độ O_3 cố định 40 mg/L, pH = 8, thời gian phản ứng 60 phút tại nhiệt độ phòng. Kết quả được trình bày ở Hình 7 và Hình 8.

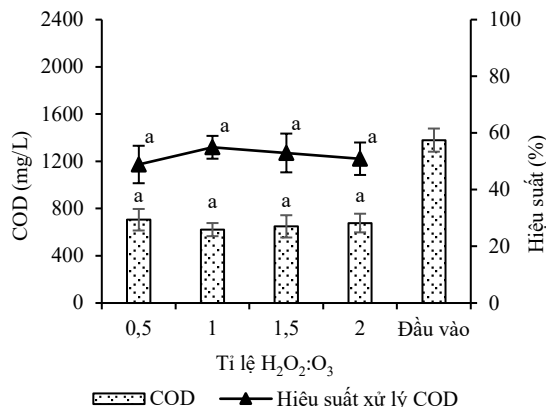


Hình 7. Ảnh hưởng tỷ lệ $H_2O_2:O_3$ đến hiệu suất xử lý độ màu

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình $\pm$ 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 $\alpha = 5\%$.

Hiệu suất xử lý nước thải theo tỷ lệ $H_2O_2:O_3$ cho thấy độ màu giảm từ 49% đến 61%, tăng dần khi tỷ lệ $H_2O_2:O_3$ từ 0,5:1 $\rightarrow$ 1:1, sau đó giảm nhẹ ở các tỷ lệ 1,5:1 và 2:1. Kết quả phân tích thống kê cho thấy tỷ lệ 1:1 khác biệt có ý nghĩa ($\alpha = 5\%$) so với các tỷ lệ còn lại, với hiệu suất xử lý độ màu cao nhất đạt 61%, làm giảm giá trị từ 1.060 Pt-Co xuống 412 Pt-Co, tương đương giảm 2,5 lần so với ban đầu. Đối với COD, hiệu suất xử lý đạt từ 49% đến 55% và không có sự khác biệt có ý nghĩa giữa các tỷ lệ. Tại tỷ lệ 1:1, COD giảm từ 1.380 mg/L xuống 822 mg/L, tương đương giảm 1,6 lần so với giá trị ban đầu, cho thấy tỷ lệ $H_2O_2:O_3 = 1:1$ là điều kiện tối ưu để cải thiện hiệu quả xử lý độ màu trong khi vẫn duy trì hiệu quả giảm COD ổn định.

Sự cải thiện hiệu quả xử lý khi tỷ lệ $H_2O_2:O_3$ tăng từ 0,5:1 lên 1:1 cho thấy việc bổ sung H_2O_2 ở mức thích hợp đã làm tăng hiệu suất của hệ oxy hóa nâng cao. Trong điều kiện này, H_2O_2 thúc đẩy quá trình phân hủy ozone, tạo ra nhiều gốc hydroxyl ($\bullet OH$) hơn. Với thể oxy hóa rất cao, các gốc $\bullet OH$ có khả năng phản ứng không chọn lọc với nhiều hợp chất hữu cơ, bao gồm các phân tử thuốc nhuộm có cấu trúc bền vững, qua đó thúc đẩy quá trình phá hủy liên kết tạo màu và oxy hóa các chất hữu cơ, góp phần nâng cao hiệu quả loại bỏ độ màu và COD (Al-Kdasi et al., 2004).



Hình 8. Ảnh hưởng tỷ lệ $H_2O_2:O_3$ đến hiệu suất xử lý COD

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình $\pm$ 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 $\alpha = 5\%$.

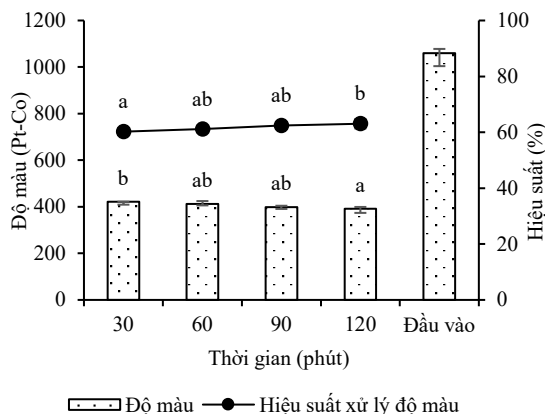
Ngược lại, khi tỷ lệ $H_2O_2:O_3$ vượt quá 1:1, hiệu quả xử lý có xu hướng giảm. Điều này có thể được giải thích bởi sự mất cân bằng giữa quá trình hình thành và tiêu thụ các gốc $\bullet OH$. Lượng H_2O_2 dư không tiếp tục làm tăng số lượng gốc oxy hóa mà ngược lại còn tham gia các phản ứng cạnh tranh với $\bullet OH$, tạo thành các gốc hydroperoxyl ($HO_2\bullet$) có hoạt tính oxy hóa thấp hơn. Do đó, lượng gốc $\bullet OH$ hiệu dụng dành cho quá trình oxy hóa các chất ô nhiễm giảm, làm hạn chế khả năng phân hủy các hợp chất hữu cơ và các chất tạo màu trong nước thải xử lý, việc sử dụng H_2O_2 vượt nhu cầu phản ứng còn làm tăng lượng hóa chất tiêu thụ, kéo theo chi phí vận hành và yêu cầu kiểm soát lượng H_2O_2 dư trước khi xả thải hoặc chuyển sang các công đoạn xử lý tiếp theo.

Xu hướng biến thiên của hiệu suất xử lý trong nghiên cứu này phù hợp với kết quả được Fahmi et al. (2011) công bố, khi tỷ lệ $H_2O_2:O_3$ bằng 1:1 cũng được xác định là điều kiện vận hành mang lại hiệu quả cao nhất. Mặc dù giá trị loại bỏ COD và độ màu giữa hai nghiên cứu không hoàn toàn giống nhau, sự tương đồng về xu hướng cho thấy tỷ lệ $H_2O_2:O_3$ có ảnh hưởng quyết định đến khả năng tạo gốc $\bullet OH$ và hiệu quả của quá trình oxy hóa nâng cao.

Trên cơ sở các kết quả thực nghiệm, tỷ lệ $H_2O_2:O_3 = 1:1$ được xem là điều kiện vận hành phù hợp nhất trong nghiên cứu này. Ở tỷ lệ này, hệ phản ứng đạt hiệu quả khử màu cao nhất đồng thời duy trì khả năng loại bỏ COD ổn định, vì vậy được lựa chọn cho các thí nghiệm tiếp theo.

3.5. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến hiệu suất xử lý độ màu và COD

Thời gian phản ứng là một trong những thông số quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả của quá trình oxy hóa nâng cao. Thí nghiệm được tiến hành nhằm xác định thời gian phản ứng tối ưu, với các mốc thời gian lần lượt là 30, 60, 90 và 120 phút. Nước thải dệt nhuộm được xử lý trong mô hình thí nghiệm với các điều kiện cố định: hàm lượng $O_3 = 40 \text{ mg/L}$, tỷ lệ $H_2O_2:O_3 = 1:1$ và $pH = 8$. Kết quả được thể hiện tại Hình 9 và Hình 10.



Hình 9. Ảnh hưởng thời gian phản ứng đến hiệu suất xử lý độ màu

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình $\pm$ 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 $\alpha = 5\%$.

Hiệu suất xử lý độ màu của hệ thống dao động trong khoảng 60 – 63%, cho thấy khả năng loại bỏ các hợp chất tạo màu tương đối ổn định và có xu hướng tăng dần theo thời gian phản ứng. Sau 60 phút phản ứng, hiệu quả xử lý đạt mức cao nhất với hiệu suất 61%, tương ứng với việc giảm độ màu từ 1.060 Pt-Co xuống còn 422 Pt-Co. Kết quả này phản ánh quá trình oxy hóa diễn ra hiệu quả hơn ở giai đoạn cuối, khi các chất hữu cơ phức tạp dần bị phân hủy thành các hợp chất đơn giản hơn.

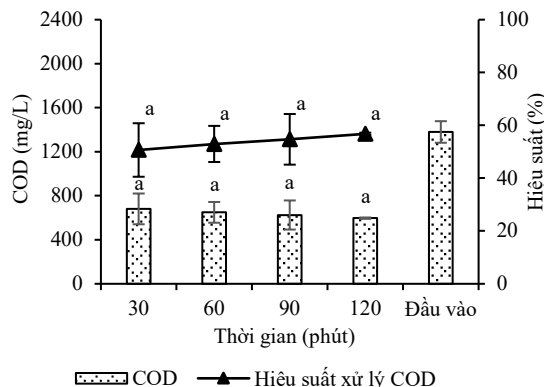
Đối với chỉ tiêu COD, hiệu suất xử lý ghi nhận trong khoảng 51 – 57%, cho thấy khả năng loại bỏ chất hữu cơ của hệ thống ở mức khá. Tuy nhiên, sự khác biệt về thời gian phản ứng không thể hiện ý nghĩa thống kê rõ rệt, cho thấy quá trình xử lý COD đạt trạng thái cân bằng tương đối sớm. Ở thời gian phản ứng 60 phút, giá trị COD giảm từ 1.380 mg/L xuống còn 649 mg/L, tương đương mức giảm khoảng 2,1 lần so với ban đầu, phản ánh khả năng phân hủy đáng kể các hợp chất hữu cơ trong mẫu nước thải.

Sự cải thiện hiệu suất xử lý khi kéo dài thời gian phản ứng cho thấy quá trình oxy hóa cần đủ thời gian để các tác nhân O_3 và H_2O_2 tiếp xúc và phản ứng với các hợp chất ô nhiễm trong nước thải. Trong giai đoạn đầu, nồng độ chất hữu cơ và thuốc nhuộm còn cao nên xác suất va chạm giữa các chất ô nhiễm với ozone và các gốc hydroxyl ($*OH$) lớn, làm cho các phản ứng oxy hóa diễn ra nhanh và hiệu quả loại bỏ độ màu cũng như COD tăng rõ rệt. Khi phản ứng tiếp tục, các hợp chất hữu cơ phức tạp dần bị chuyển hóa thành các sản phẩm trung gian có cấu trúc đơn giản hơn, đồng thời mức độ khoáng hóa của hệ thống cũng được cải thiện.

Tuy nhiên, sau khoảng 60 phút, việc kéo dài thời gian phản ứng đến 90 hoặc 120 phút chỉ mang lại mức cải thiện rất nhỏ. Kết quả này cho thấy tốc độ phản ứng đã giảm đáng kể do phần lớn các hợp chất dễ oxy hóa đã được loại bỏ, trong khi lượng ozone và H_2O_2 còn lại không đủ để duy trì tốc độ hình thành gốc $*OH$ như ở giai đoạn đầu. Vì vậy, hệ thống dần đạt trạng thái ổn định và hiệu suất xử lý không còn tăng tương ứng với thời gian vận hành (Anh và ctv., 2020). Xu hướng tương tự cũng đã được ghi nhận trong các nghiên cứu về quá trình oxy hóa nâng cao, trong đó việc kéo dài thời gian phản ứng vượt quá giá trị tối ưu thường không mang lại lợi ích đáng kể về hiệu quả xử lý nhưng lại làm tăng nhu cầu năng lượng và hóa chất (Pourgholi et al., 2018).

So với nghiên cứu của Pourgholi et al. (2018), thời gian phản ứng tối ưu trong nghiên cứu này dài hơn. Nhóm tác giả trên ghi nhận hiệu quả xử lý cao nhất khi vận hành hệ H_2O_2/O_3 trong khoảng 30 phút, trong khi nghiên cứu hiện tại đạt hiệu quả tối ưu sau 60 phút. Sự khác biệt này cho thấy thời gian phản ứng tối ưu phụ thuộc vào điều kiện cụ thể của từng hệ thống xử lý, bao gồm đặc tính của nước thải, nồng độ các chất ô nhiễm, điều kiện vận hành và cấu hình thiết bị phản ứng. Do đó, thời gian lưu thích hợp cần được xác định thông qua thực nghiệm đối với từng loại nước thải thay vì áp dụng một giá trị cố định từ các nghiên cứu trước.

Từ các kết quả thu được, thời gian phản ứng 60 phút được xem là phù hợp trong điều kiện nghiên cứu này vì đạt hiệu quả xử lý tương đương các thời gian dài hơn nhưng giúp hạn chế tiêu thụ năng lượng và hóa chất, góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế của quá trình xử lý.



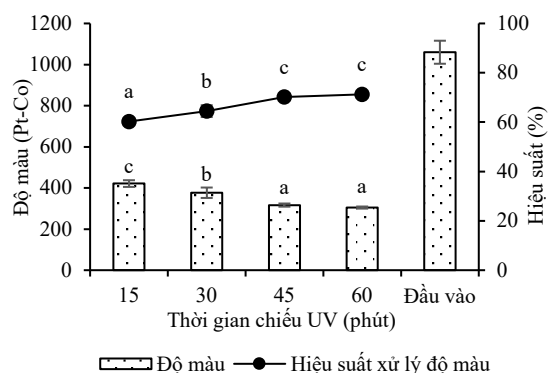
Hình 10. Ảnh hưởng thời gian phản ứng đến hiệu suất xử lý COD

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình $\pm$ 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 $\alpha = 5\%$.

3.6. Ảnh hưởng của thời gian chiếu UV đến hiệu suất xử lý độ màu và COD

Việc kết hợp các tác nhân oxy hóa mạnh như O_3 , H_2O_2 và UV giúp tăng tốc quá trình hình thành gốc OH, từ đó nâng cao hiệu quả xử lý ô nhiễm. Do đó, thời gian chiếu đèn UV phù hợp được lựa chọn không chỉ giúp tối ưu hiệu quả xử lý mà còn góp phần tiết kiệm năng lượng. Trong nghiên cứu này, thời gian chiếu đèn UV được khảo sát ở các mức 25%, 50%, 75% và 100% của tổng thời gian phản ứng (tương ứng với 15, 30, 45 và 60 phút), trong điều kiện cố định: hàm lượng $O_3 = 40$ mg/L, pH = 8, tỷ lệ $H_2O_2:O_3 = 1:1$ và thời gian phản ứng tổng cộng là 60 phút. Kết quả được thể hiện tại Hình 11 và Hình 12.

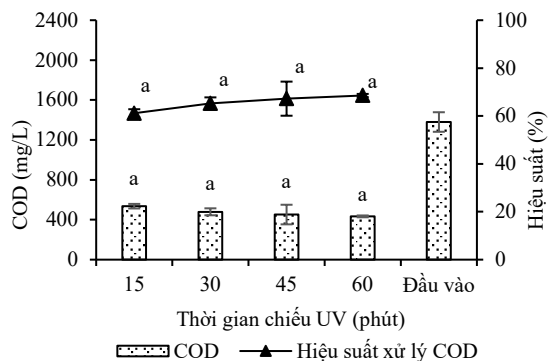
Kết quả thí nghiệm cho thấy hiệu suất xử lý tăng tỷ lệ thuận với thời gian chiếu đèn UV, phản ánh vai trò quan trọng của quá trình kích hoạt quang hóa trong việc tạo ra các gốc $\cdot OH$. Hiệu suất loại bỏ độ màu dao động trong khoảng 60 – 71%, với sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các mức thời gian chiếu UV, ngoại trừ giữa 45 và 60 phút, cho thấy hiệu quả xử lý đạt ngưỡng bão hòa sau 45 phút chiếu sáng. Ở điều kiện 45 phút chiếu UV, hiệu quả xử lý độ màu cao nhất đạt 70%, tương ứng giảm độ màu từ 1.060 Pt-Co xuống còn 317 Pt-Co, tức giảm khoảng 3,3 lần so với giá trị ban đầu.



Hình 11. Ảnh hưởng thời gian chiếu đèn UV đến hiệu suất xử lý độ màu

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình $\pm$ 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 $\alpha = 5\%$.

Đối với chỉ tiêu COD, hiệu suất xử lý dao động từ 61 đến 69%, nhưng không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các mức thời gian chiếu UV. Điều này cho thấy thời gian chiếu UV không ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng phân hủy các hợp chất hữu cơ khó oxy hóa, vốn đòi hỏi sự kết hợp đồng thời của các cơ chế oxy hóa nâng cao khác. Ở thời gian 45 phút chiếu UV, hiệu suất xử lý COD đạt 67%, tương ứng giảm từ 1.380 mg/L xuống còn 452 mg/L, tức giảm khoảng 3,1 lần so với đầu vào.



Hình 12. Ảnh hưởng thời gian chiếu đèn UV đến hiệu suất xử lý độ COD

Ghi chú: Số liệu trình bày là giá trị trung bình $\pm$ 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 $\alpha = 5\%$.

Kết quả thí nghiệm cho thấy việc kéo dài thời gian chiếu UV giúp cải thiện hiệu quả xử lý, phản ánh vai trò quan trọng của bức xạ UV trong hệ oxy hóa nâng cao. Dưới tác động của tia UV, ozone và H_2O_2 bị quang phân, tạo điều kiện hình thành liên

tục các gốc hydroxyl (*OH) có hoạt tính oxy hóa rất mạnh. Sự gia tăng mật độ các gốc tự do này làm tăng khả năng tấn công và phân hủy các hợp chất hữu cơ cũng như các phân tử thuốc nhuộm có cấu trúc bền, từ đó nâng cao hiệu quả loại bỏ độ màu và COD (Al-Kdasi et al., 2004).

Mặc dù vậy, khi thời gian chiếu tăng từ 45 lên 60 phút, hiệu suất xử lý hầu như không thay đổi. Điều này cho thấy quá trình oxy hóa đã tiến gần đến giới hạn của hệ phản ứng, khi phần lớn các hợp chất dễ phân hủy đã được loại bỏ và các chất còn lại có tốc độ phản ứng chậm hơn hoặc khó bị oxy hóa hơn. Vì vậy, việc tiếp tục kéo dài thời gian chiếu chỉ làm tăng mức tiêu thụ năng lượng mà không mang lại sự cải thiện đáng kể về hiệu quả xử lý (Talaiekhosani et al., 2017).

Kết quả nghiên cứu hiện tại có cùng xu hướng với báo cáo của Anh và cộng sự (2020), trong đó việc kết hợp UV với O_3 và H_2O_2 đều góp phần nâng cao khả năng xử lý nước thải dệt nhuộm. Tuy nhiên, hiệu suất loại bỏ độ màu và COD trong nghiên cứu của Anh và cộng sự cao hơn so với kết quả thu được ở nghiên cứu này. Tương tự, Azbar et al. (2004) cũng ghi nhận hệ $H_2O_2/O_3/UV$ đạt hiệu quả xử lý rất cao đối với cả COD và màu trong điều kiện phòng thí nghiệm.

Sự khác biệt về giá trị hiệu suất giữa các nghiên cứu phản ánh ảnh hưởng của điều kiện thực nghiệm và đặc tính nguồn nước thải. Thành phần thuốc nhuộm, nồng độ chất hữu cơ, sự hiện diện của các ion vô cơ có khả năng bắt gốc tự do, cùng với cấu hình thiết bị phản ứng, cường độ bức xạ UV và liều lượng các chất oxy hóa đều có thể làm thay đổi tốc độ hình thành cũng như hiệu quả sử dụng các gốc *OH trong quá trình oxy hóa nâng cao. Do đó, điều kiện vận hành tối ưu cần được xác lập riêng cho từng hệ thống thay vì áp dụng trực tiếp từ các nghiên cứu khác.

Dựa trên kết quả thực nghiệm, thời gian chiếu UV 45 phút được lựa chọn là điều kiện vận hành thích hợp cho hệ phản ứng trong nghiên cứu này. Mặc dù kéo dài thời gian chiếu đến 60 phút không làm tăng đáng kể hiệu suất xử lý, nhưng lại làm tăng

mức tiêu thụ điện năng. Vì vậy, lựa chọn thời gian chiếu 45 phút vừa đảm bảo hiệu quả xử lý cao, vừa góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế của quá trình.

KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, việc đánh giá hiệu quả khử màu và loại bỏ COD trong nước thải dệt nhuộm đã được thực hiện bằng quá trình oxy hóa bậc cao (AOPs) sử dụng hệ H_2O_2/O_3 kết hợp với tia UV. Kết quả cho thấy các điều kiện vận hành tối ưu bao gồm: nồng độ $O_3 = 40$ mg/L, pH = 8, tỷ lệ $H_2O_2:O_3 = 1:1$, thời gian phản ứng = 60 phút và thời gian chiếu UV = 45 phút. Ở các điều kiện này, hiệu suất xử lý độ màu và COD đạt trên 67%, cho thấy khả năng loại bỏ đáng kể các hợp chất hữu cơ và chất tạo màu trong nước thải dệt nhuộm. So với quá trình H_2O_2/O_3 đơn lẻ, việc kết hợp thêm tia UV giúp nâng cao rõ rệt hiệu quả xử lý, với hiệu suất khử màu và loại bỏ COD đạt trên 61%. So với quá trình H_2O_2/O_3 đơn lẻ, việc bổ sung tia UV vào hệ phản ứng giúp cải thiện đáng kể hiệu quả xử lý, với hiệu suất khử màu đạt 61 – 71% và hiệu suất loại bỏ COD đạt 61 – 69%. Kết quả này cho thấy vai trò đóng góp tích cực của tia UV trong việc thúc đẩy các phản ứng oxy hóa, thông qua việc tăng cường phân hủy H_2O_2 và O_3 để tạo ra các gốc hydroxyl (*OH), vốn là tác nhân oxy hóa chủ yếu đối với các hợp chất hữu cơ khó phân hủy. Tuy nhiên, để đánh giá đầy đủ mức độ tương tác giữa các tác nhân oxy hóa, các nghiên cứu tiếp theo cần được thiết kế với việc so sánh hệ $H_2O_2/O_3/UV$ với đầy đủ các tổ hợp thành phần như H_2O_2/UV và O_3/UV , cũng như tiến hành phân tích định lượng khả năng hình thành gốc *OH, nhằm làm rõ hơn cơ chế tác động và khả năng cộng hưởng của hệ thống.

Kết quả nghiên cứu cho thấy quá trình $H_2O_2/O_3/UV$ có thể được xem là một công đoạn xử lý bậc cao hoặc tiền xử lý nâng cao trong hệ thống xử lý nước thải dệt nhuộm. Sau công đoạn này, nước thải nên được xử lý tiếp bằng các quá trình sinh học hoặc hấp phụ nhằm loại bỏ triệt để COD còn lại và các sản phẩm oxy hóa trung gian. Cách tiếp cận xử lý tích hợp này giúp nâng cao hiệu quả xử lý tổng thể và tăng tính khả thi khi áp dụng ở quy mô thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Al-Kdasi, A., Idris, A., Saed, K., & Guan, C. T. (2004). Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes—a review. *Global NEST. International Journal*, 6(3), 222-230. <https://doi.org/10.30955/gnj.000288>
- Al-Mamun, M., Kader, S., Islam, M., & Khan, M. (2019). Photocatalytic activity improvement and

application of UV-TiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103248. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103248>

Anh, N. T., Hồng, P. K., & Thương, N. T. (2020). Xử lý nước thải dệt nhuộm bằng phương pháp

- oxy hóa bậc cao kết hợp UV. *Tạp chí Khoa học Lạc Hồng*, 9, 47-52.
- Azbar, N., Yonar, T., & Kestioglu, K. (2004). Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent. *Chemosphere*, 55(1), 35-43.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.046>
- Beltrán, F. J. (2004). *Ozone reaction kinetics for water and wastewater systems*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9780203509173>
- Beltrán, F. J., Gomez-Serrano, V., & Duran, A. (1992). Degradation kinetics of p-nitrophenol ozonation in water. *Water Research*, 26(1), 9-17.
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(92\)90105-D](https://doi.org/10.1016/0043-1354(92)90105-D)
- Đức, T., V (2021). *Nghiên cứu xử lý chất bảo vệ thực vật gốc lân-hữu cơ bằng công nghệ Peroxone* (Luận văn thạc sĩ). Viện Khoa học và Công Nghệ.
- Fahmi, M. R., Abidin, C. Z. A., & Rahmat, N. R. (2011). Characteristic of colour and COD removal of azo dye by advanced oxidation process and biological treatment. In *International conference on biotechnology and environment management* (IPCBE, Vol. 18, pp. 13–18). IACSIT Press.
- Gottschalk, C., Libra, J. A., & Saupe, A. (2010). *Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its applications*. John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/9783527628926>
- Hassaan, M. A., & El Nemr, A. (2017). Advanced oxidation processes for textile wastewater treatment. *International Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2(3), 85-93.
- 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>
- Karci, A. (2014). Degradation of chlorophenols and alkylphenol ethoxylates, two representative textile chemicals, in water by advanced oxidation processes: the state of the art on transformation products and toxicity. *Chemosphere*, 99, 1-18.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.034>
- Khan, S., & Malik, A. (2014). Environmental and health effects of textile industry wastewater. In A. Malik, E. Grohmann, & R. Akhtar (Eds.), *Environmental Deterioration and Human Health: Natural and Anthropogenic Determinants* (pp. 55–71). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-7890-0_4
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Ferreira, L. F. R., Bilal, M., Chandra, R., & Bharagava, R. N. (2021). Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105012.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Lucas, M. S., Peres, J. A., & Puma, G. L. (2010). Treatment of winery wastewater by ozone-based advanced oxidation processes (O₃, O₃/UV and O₃/UV/H₂O₂) in a pilot-scale bubble column reactor and process economics. *Separation and Purification Technology*, 72(3), 235-241.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.01.016>
- Metcalf, L., & Eddy, H. P. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill, New York.
- Ngọc, V. T. B., Huế, H. T. H., Hùng, T. L. (2016). Xử lý màu nước thải dệt nhuộm thực tế bằng phương pháp oxy hóa nâng cao. *Tạp chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội: Khoa học Tự nhiên và Công nghệ*, 32(4).
- Perkowski, J., & Ledakowicz, S. (2002). Decomposition of anthraquinone dye in the aqueous solution during advanced oxidation processes. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 10(4), 68-72.
- Pourgholi, M., Jahandizi, R. M., Miranzadeh, M., Beigi, O. H., & Dehghan, S. (2018). Removal of Dye and COD from textile wastewater using AOP (UV/O₃, UV/H₂O₂, O₃/H₂O₂ and UV/H₂O₂/O₃). *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 621-629.
<https://doi.org/10.18502/jehsd.v3i4.223>
- Siddique, K., Rizwan, M., Shahid, M. J., Ali, S., Ahmad, R., & Rizvi, H. (2017). Textile wastewater treatment options: a critical review. *Enhancing cleanup of environmental pollutants: 2(Non-biological approaches)*, 183-207.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-55423-5_6
- Talaiekhazani, A., Eskandari, Z., Talaei, M. R., & Salari, M. (2017). Hydrogen sulfide and organic compounds removal in municipal wastewater using ferrate (VI) and ultraviolet radiation. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 4(1), 7-14.
<https://doi.org/10.15171/EHEM.2017.02>
- Zhou, H., & Smith, D. W. (2000). Ozone mass transfer in water and wastewater treatment: experimental observations using a 2D laser particle dynamics analyzer. *Water research*, 34(3), 909-921.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00196-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00196-7)