

NGHIÊN CỨU XỬ LÝ NƯỚC THẢI CHẾ BIẾN CÀ PHÊ BẰNG HỆ THỐNG KẾT HỢP KEO TỤ ĐIỆN HÓA VÀ OZONE HÓA LIÊN TỤC

CAO MINH PHƯƠNG¹, NGUYỄN TIỂU BẰNG¹, THÁI PHƯƠNG VŨ¹, HUỖNH THỊ NGỌC HÂN¹

¹Khoa Môi trường, Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP. Hồ Chí Minh

Tóm tắt

Nước thải chế biến cà phê được xử lý bằng hệ thống kết hợp keo tụ điện hóa và ozone hóa liên tục với điều kiện vận hành phù hợp gồm pH 6, cường độ dòng điện 2,5 A, độ dẫn điện 2,5 mS/cm, thời gian lưu nước 16,7 phút tại bể keo tụ điện hóa và tại cột phản ứng ozone hóa: pH 5, 2 lít ozone/phút, liều lượng 10 g/h và 60 phút. Hiệu quả xử lý của hệ thống rất ấn tượng, loại bỏ COD (Chemical Oxygen Demand), độ màu trên 92%, TSS (Total Suspended Solids) đạt hơn 62%. COD, độ màu và TSS sau xử lý lần lượt là 29 mg/L, 45 Pt-Co và 38 mg/L đều đạt cột A QCVN 40:2025/BTNMT.

Từ khóa: Ozone hóa, keo tụ điện hóa, nước thải cà phê.

Ngày nhận bài: 8/11/2025; **Ngày sửa chữa:** 17/11/2025; **Ngày duyệt đăng:** 10/12/2025.

Treatment of coffee wastewater by a hybrid system of electrocoagulation and continuous ozonation

Abstract

Coffee processing wastewater was treated by a combined system of electrocoagulation and continuous ozonation with suitable operating conditions, including pH 6, current intensity 2,5 A, conductivity 2,5 mS/cm, water retention time 16,7 minutes in the electrocoagulation tank, and in the ozonation reaction column: pH 5, 2 liters of ozone/minute, dosage 10 g/h, HRT 60 min. The treatment efficiency of the system was impressive, removing COD (Chemical Oxygen Demand), color over 92% and TSS (Total Suspended Solids) reaching over 62%. The COD, color, and TSS remaining were 29 mg/L, 45 Pt-Co, and 38 mg/L, respectively, less than column A QCVN 40:2025/BTNMT.

Keywords: Ozonation, electrocoagulation, coffee wastewater.

JEL Classifications: O13, Q56, Q58.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cà phê là một trong những ngành đóng góp quan trọng trong doanh thu của ngành Nông nghiệp Việt Nam và GDP quốc gia, tạo ra nhiều công ăn việc làm cho người dân. Sản xuất và xuất khẩu cà phê làm cho quan hệ kinh tế thương mại giữa Việt Nam với các nước được củng cố và phát triển. Bên cạnh những lợi ích kinh tế, ngành Công nghiệp chế biến cà phê còn gây ra tác động tiêu cực đến môi trường, trong đó nước thải phát sinh trong quá trình chế biến là nguồn gây ô nhiễm lớn, đe dọa trực tiếp đến môi trường và các nguồn nước xung quanh. Nước thải chế biến cà phê là tổng hợp các loại nước thải phát sinh trong quá trình sản xuất tại nhà máy gồm các công đoạn chế biến, sản xuất, rửa cà phê. Đặc biệt, nước thải được sinh ra từ các công đoạn rửa và xay cà phê có nồng độ các chất ô nhiễm rất cao như COD (Chemical Oxygen Demand), BOD (Biochemical oxygen Demand), SS (Suspended Solids) và độ pH thấp. Các loại chất ô nhiễm này vượt quá nhiều lần cho phép được quy định trong tài liệu tiêu chuẩn QCVN 40:2011/BTNMT (Báo cáo thị trường nông nghiệp cà phê, Báo Nông nghiệp Việt Nam).

Nước thải chế biến cà phê thường có màu nâu sẫm bao phủ một số lượng lớn các sắc tố dai dẳng được gọi là melanoidin có độc tính cao, ngoan cố và không phân hủy sinh học. Nước thải chế biến cà phê có mùi khó chịu. Bản chất nhiều màu sắc của nước thải chế biến cà phê làm giảm độ sâu và ngăn ánh sáng mặt trời xâm nhập vào các phần sâu hơn của các vùng nước, dẫn đến khử oxy như một tác động tiêu cực bên ngoài. Việc xả thải không phù hợp góp phần đáng kể vào ô nhiễm đất và axit hóa, ức chế sự nảy mầm của hạt và gây thiếu mangan trong đất, gián tiếp gây thiệt hại cho cây trồng nông nghiệp. Nói chung, nước thải chế biến cà phê phải chịu điều trị chính, điều trị thứ cấp và điều trị đại học để loại bỏ các chất hữu cơ. Xử lý sinh học truyền thống có những hạn chế lớn như sản xuất bùn sinh khối không kiểm soát được với đặc tính lắng dao động, bùn tích tụ, nhạy cảm với tải sốc, không có khả năng loại bỏ các chất độc hại (Ijanu và cộng sự, 2020; Nguyễn Kim Huy và cộng sự, 2024).

Hiện nay, nước thải chế biến cà phê tại các nhà máy ở Việt Nam đang được xử lý bằng phương pháp keo tụ tạo bông kết hợp với sinh học. Mặc dù hiệu quả xử lý đạt yêu cầu xả thải nhưng tiêu tốn nhiều hóa chất và



sinh ra lượng bùn lớn. Các nghiên cứu trong và ngoài nước cho thấy rất ít nghiên cứu xử lý nước thải chế biến cà phê (Ijanu và cộng sự, 2020). Công nghệ keo tụ điện hóa được biết đến là công nghệ xử lý TSS, độ màu hiệu quả thông qua quá trình tạo bông, tuyển nổi do chất keo tụ sinh ra từ điện cực cathode và khí H_2 sinh ra từ điện cực anode. pH của nước thải được tăng lên do ion OH^- tạo ra trong quá trình điện hóa do đó giúp hạn chế sử dụng hóa chất điều chỉnh pH cho nước thải đặc biệt là nước thải chế biến cà phê có độ pH thấp. Phương pháp keo tụ điện hóa dạng mẻ xử lý nước thải chế biến cà phê được nghiên cứu cho thấy hiệu quả xử lý độ màu, COD cao (Sahana và cộng sự, 2018; Mahesh và cộng sự, 2014; Nguyễn Kim Huy và cộng sự, 2024). Tuy nhiên, nước thải sau keo tụ điện hóa chưa đạt quy chuẩn xả thải nên cần được xử lý tiếp bằng phương pháp khác.

Các quá trình ozone hóa là công nghệ mới được phát triển trong khoảng 20 năm trở lại đây và thể hiện nhiều ưu điểm trong xử lý nước thải cà phê so với các phương pháp xử lý nước thải truyền thống dựa vào phản ứng tạo ra các gốc tự do hoạt động hydroxyl $\bullet OH$ ngay trong quá trình xử lý. Oxy hóa là quá trình trong đó electron được chuyển từ một chất này sang một chất khác. Điều này tạo ra một hiệu thế được biểu thị bằng volt (V) dựa trên hiệu điện thế cực hydro bằng 0. Mỗi chất (tác nhân) oxy hóa đều có một thế oxy hóa khác nhau và đại lượng này được dùng để so sánh khả năng oxy hóa mạnh hay yếu của chúng. Nhiều tác nhân oxy hóa mạnh đều là gốc “tự do”, trong đó gốc hydroxyl $\bullet OH$ là tác nhân oxy hóa mạnh nhất. Thế oxy hóa gốc hydroxyl $\bullet OH$ là 2,8 eV, cao nhất trong các tác nhân oxy hóa thường gặp. Nếu so với clo, thế oxy hóa của gốc hydroxyl $\bullet OH$ cao gấp 2,05 lần so với ozone thế oxy hóa gốc hydroxyl cao gấp 1,52 lần. Phương pháp oxy hóa bậc cao sử dụng ozone/ TiO_2 /UV, Fenton, H_2O_2 / TiO_2 /UV cho hiệu quả xử lý COD, độ màu cao, trên 90% (Amor và cộng sự, 2019; Van Aken và cộng sự, 2009; Leontieff và cộng sự, 2025).

Như vậy, phương pháp keo tụ điện hóa kết hợp với ozone hóa có tiềm năng ứng dụng vào thực tiễn xử lý nước thải chế biến cà phê. Tuy nhiên, để có thể ứng dụng được vào thực tế cần phải nghiên cứu trên hệ thống xử lý nước thải liên tục. Vì những lý do đó, đề tài “Nghiên cứu xử lý nước thải chế biến cà phê bằng hệ thống keo tụ điện hóa và ozone hóa liên tục” được thực hiện.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Nước thải được lấy sau bể điều hòa Nhà máy cà phê URC, số 2 đường số 29 khu công nghiệp VSIP II-A, phường Vĩnh Tân, TP. Tân Uyên, Bình Dương (cũ). Thành phần, tính chất nước thải đầu vào của nghiên cứu được trình bày theo Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần, tính chất nước thải đầu vào của nghiên cứu

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị
1	pH	-	7,5 - 7,8
2	COD	mg/l	440 - 448
3	Độ màu	Pt-Co	616 - 622
4	TSS	mg/L	100 - 106

2.2. Phương pháp lấy mẫu và phân tích

2.2.1. Phương pháp lấy mẫu

Thao tác lấy mẫu được thực hiện theo đúng TCVN 6663-1:2011 (ISO 5667-1:2006) - Phần 1: Hướng dẫn lập chương trình lấy mẫu và kỹ thuật lấy mẫu; TCVN 5999:1995 (ISO 5667-10:1992) - Hướng dẫn lấy mẫu nước thải.

2.2.2. Phương pháp phân tích mẫu

Việc lấy mẫu được thực hiện theo phương pháp quy định trong TCVN 5999:1995. Độ màu của mẫu nước được xác định bằng phương pháp đo độ hấp thụ quang tại bước sóng 420 nm trên máy đo DR900. Chỉ tiêu COD được phân tích theo phương pháp đun hoàn lưu kín ở nhiệt độ 150°C trong thời gian 2 giờ, tuân thủ TCVN 6822:2019. Hàm lượng chất rắn lơ lửng (TSS) được xác định bằng phương pháp cân khối lượng theo TCVN 14:2008. Các thông số pH, nhiệt độ và độ dẫn điện được đo trực tiếp bằng máy đo pH HANNA HI98107 pHep® và máy đo độ dẫn điện EC COM 100.

2.2.3. Phương pháp bảo quản mẫu

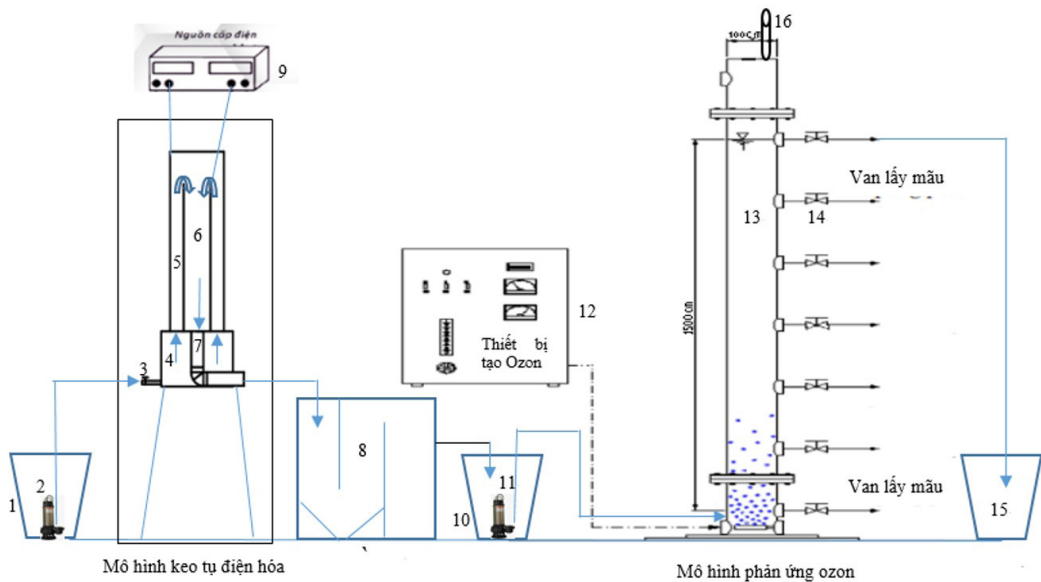
Mẫu nước thải được thực hiện theo đúng TCVN 6663-3:2016 (ISO 5667-3:2012) - Chất lượng nước - Lấy mẫu - Bảo quản và xử lý mẫu nước. Mẫu nước thải được lấy và đựng trong chai PET đã được rửa sạch bằng axit loãng và tráng nhiều lần bằng nước cất. Trong trường hợp mẫu không được sử dụng trong ngày, mẫu sẽ được bọc kín và bảo quản ở nhiệt độ 1-5°C và tránh ánh sáng trực tiếp.

2.2.4. Phương pháp thực nghiệm

Hệ thống keo tụ điện hóa và ozone hóa liên tục được lắp đặt theo sơ đồ Hình 1. Bể phản ứng keo tụ điện hóa dạng cylinder với 2 ống điện cực nhôm đặt cách nhau 2,5 cm và kết nối vào bộ phận phân phối nước thải và kết nối với máy phát điện một chiều. Nước sau keo tụ điện hóa được đưa qua bể lắng có dung tích 20 lít. Nước sau lắng được chứa vào bể trung gian và bơm vào cột phản ứng ozone hóa từ dưới lên. Ozone được cấp từ máy phát ozone qua đĩa tạo bọt khí Ø60 vào cột phản ứng có kích thước 10 cm x 10 cm x 130 cm, thể tích phản ứng 10 lít (Hình 1).

Quá trình thực nghiệm bao gồm:

Đánh giá ảnh hưởng của HRT đến hiệu quả xử



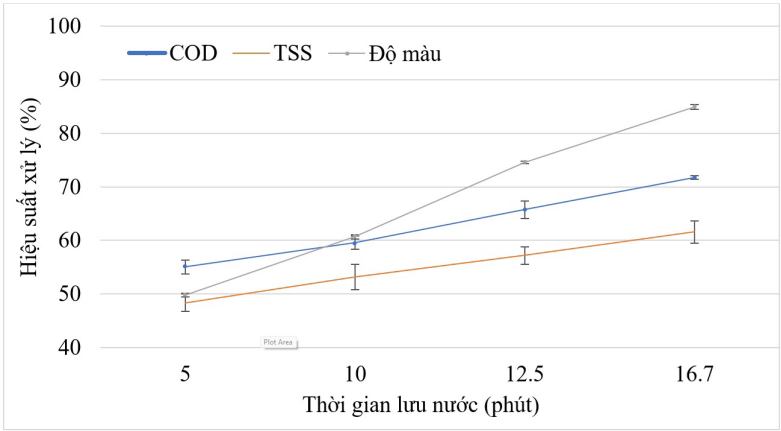
Hình 1. Sơ đồ hệ thống keo tụ điện hóa và ozone hóa kết hợp

Chú thích: 1. Thùng chứa nước thải; 2 và 11. Máy bơm; 3. Bộ phận phân phối nước; 4. Bể keo tụ điện hóa liên tục dạng cylinder; 5 và 6. Ống điện cực; 7. Ống dẫn nước ra; 8. Bể lắng; 9. Máy phát điện 1 chiều; 10. Bể trung gian; 12. Máy phát ozone; 13. Cột phản ứng ozone; 14. Van lấy mẫu; 15. Bể chứa nước sau xử lý.

lý của mô hình keo tụ điện hóa liên tục: Thí nghiệm được thiết kế với lưu lượng nước thải đưa vào bể phản ứng khác nhau ứng với thời gian lưu nước từ 5 phút đến 16,7 phút. Các yếu tố khác giữ cố định gồm pH 6, cường độ dòng điện 2,5 A, độ dẫn điện 2,5 mS/cm (kế thừa từ nghiên cứu trước của Nguyễn Thị Kim Huy và cộng sự, 2024). Nước sau lắng lấy mẫu phân tích các chỉ tiêu: COD, TSS và độ màu.

Đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố vận hành đến hiệu quả ozone hóa: nước sau lắng được đưa vào cột phản ứng ozone hóa để khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố gồm pH từ 3 đến 7, lưu lượng khí ozone cấp vào từ 1 đến 2,5 L/phút, thời gian phản ứng từ 10 đến 60 phút. Nước thải sau xử lý được lấy mẫu để phân tích các chỉ tiêu: COD và độ màu.

Các yếu tố pH, nhiệt độ và độ dẫn điện cũng được giám sát trong nước thải sau xử lý. Mỗi thí nghiệm được thực hiện lặp lại 3 lần để đảm bảo độ tin cậy.



Hình 2. Ảnh hưởng của thời gian lưu nước đến hiệu quả xử lý COD, độ màu, TSS bằng mô hình keo tụ điện hóa liên tục

3. KẾT LUẬN VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của thời gian lưu nước đến hiệu quả xử lý keo tụ điện hóa liên tục

Ảnh hưởng của thời gian lưu nước đến hiệu quả xử lý COD, độ màu, TSS trong nước thải cà phê được vận hành theo mô hình dạng mẻ, sử dụng máy ozone, được khảo sát tại các điều kiện sau: thể tích nước thải cà phê cố định 10 lít, lưu lượng nước thay đổi từ 0,15 L/phút đến 0,5 L/phút tương ứng với thời gian lưu nước từ 5 phút đến 16,7 phút, độ dẫn điện được cố định ở giá trị 2,5 μ S/cm, pH trong nước thải được điều chỉnh ở Ph = 6 (Hình 2).

Kết quả trên cho thấy, lưu lượng nước thải có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất xử lý COD, TSS và độ màu trong quá trình keo tụ điện hóa. Khi lưu lượng thay đổi từ 0,5 L/ph xuống 0,15 L/ph, hiệu suất xử lý của cả ba chỉ tiêu đều tăng đáng kể. Điều này tương tự với một thí nghiệm được khảo sát trước đây, khi thời gian phản ứng của quá trình keo tụ điện hóa tăng, hiệu suất cũng



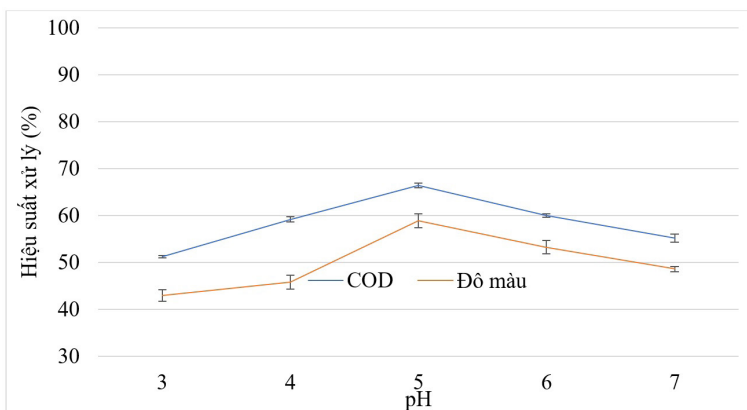
sẽ tăng theo (Mohsen Arbabi và cộng sự, 2022). Cụ thể, ở lưu lượng cao (0,5 L/ph), hiệu suất xử lý COD chỉ đạt khoảng 55%, TSS khoảng 49% và độ màu khoảng 50%. Khi giảm tiếp lưu lượng xuống 0,15 L/ph, hiệu suất xử lý đạt giá trị cao nhất, với COD khoảng 72%, TSS đạt 62% và độ màu đạt 85%. Khi thời gian lưu nước dài hơn lượng ion Al^{3+} , OH^- và bọt khí đi vào nước tăng, tạo điều kiện cho các phản ứng keo tụ, tuyển nổi diễn ra tốt hơn. Các ion kim loại sinh ra từ điện cực có đủ thời gian để thủy phân, hình thành hydroxit kim loại và kết dính các hạt keo, chất rắn lơ lửng cũng như các hợp chất hữu cơ hòa tan. Ngoài ra thời gian tiếp xúc của nước thải với 2 ống điện cực tăng cũng giúp tăng hiệu quả quá trình oxy hóa diễn ra tại bề mặt điện cực (Mohsen Arbabi và cộng sự, 2022). Xu hướng của đồ thị cho thấy, nếu tiếp tục tăng thời gian lưu nước thì hiệu quả xử lý sẽ còn tiếp tục tăng nhưng do giới hạn của thể tích mô hình và lưu lượng kể nên không thể khảo sát thêm ở thời gian lưu nước cao hơn. Nghiên cứu trước cho thấy thời gian lưu nước tốt nhất là 20 phút ở mô hình dạng mẻ (Nguyễn Kim Huy và cộng sự, 2024).

3.2. Khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố vận hành đến hiệu quả ozone hóa

3.2.1. Ảnh hưởng của pH đến hiệu quả ozone hóa

Ảnh hưởng của pH đến hiệu quả ozone hóa nước thải cà phê được vận hành theo mô hình dạng mẻ với các điều kiện sau: thể tích nước thải cà phê sau lắng của keo tụ điện hóa 10 lít, thời gian lưu nước 15 phút, liều lượng ozone được cố định ở 10g/h, lưu lượng khí đi vào 0,75 L/phút. Khảo sát ảnh hưởng của pH trong khoảng từ 3-7, pH nước thải được điều chỉnh bằng dung dịch H_2SO_4 1M và NaOH 1M.

Kết quả trình bày tại Hình 5 cho thấy hiệu suất xử lý COD và độ màu đều thay đổi đáng kể theo giá trị pH. Cả hai chỉ tiêu cùng tăng dần khi pH tăng từ 3 đến 5, đạt giá trị cao nhất tại pH = 5, sau đó giảm nhẹ khi pH tiếp tục tăng đến 7. Ở pH thấp, hiệu suất xử lý COD và độ màu thấp, đạt 51% đối với COD và 43% đối với độ màu ở pH 3. Trong môi trường axit mạnh, ozone chủ yếu tồn tại ở dạng phân tử O_3 có khả năng oxy hóa trực tiếp nhưng tốc độ phản ứng còn chậm, mặt khác khả năng hình thành gốc hydroxyl ($\bullet OH$), tác nhân oxy hóa mạnh trong môi trường này thấp, làm giảm khả năng xử lý tổng thể của hệ thống, dẫn đến quá trình phân hủy các chất hữu cơ và hợp chất tạo màu chưa hiệu quả (Aref Shokri & Kazem Mahanpoor, 2016) (Hình 3).



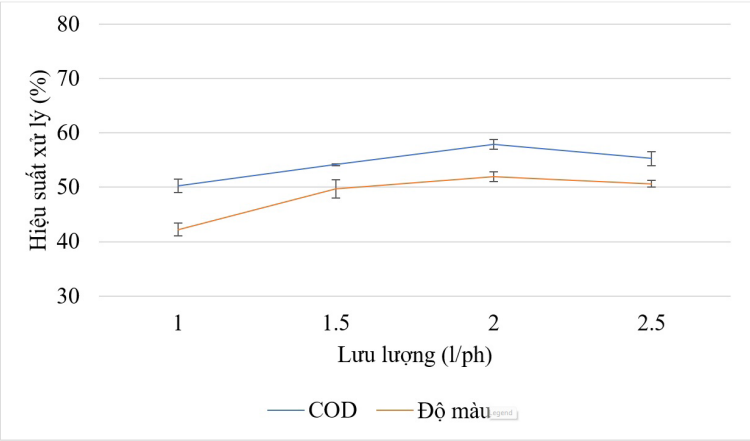
Hình 3. Ảnh hưởng của pH đến hiệu quả xử lý COD, độ màu bằng ozone hóa

Khi pH tăng đến 5, hiệu suất xử lý tăng rõ rệt, COD đạt khoảng 66% và độ màu đạt 59%. Ở giá trị pH này, sự cân bằng giữa dạng ozone phân tử và gốc $\bullet OH$ được duy trì hợp lý, tốc độ phân hủy ozone phân tử không quá nhanh và gốc hydroxyl được hình thành cùng tồn tại và tham gia vào quá trình oxy hóa, giúp nâng cao khả năng oxy hóa các hợp chất hữu cơ và các chất tạo màu (Dr. Christiane Gottschalk và cộng sự, 2009).

Khi pH tăng từ 5 lên 7, hiệu suất xử lý COD và độ màu giảm dần. Trong môi trường trung tính và kiềm, ozone dễ bị phân hủy nhanh chóng, tạo ra nhiều gốc $\bullet OH$ nhưng các gốc này phản ứng không chọn lọc và có thể bị tiêu hao bởi các ion vô cơ ion carbonate hoặc bicarbonate có trong dung dịch (Dr. Christiane Gottschalk và cộng sự, 2009). So sánh hai chỉ tiêu cho thấy hiệu suất loại bỏ COD luôn cao hơn độ màu ở mọi giá trị pH. Điều này chứng tỏ ozone phá vỡ các hợp chất tạo màu chậm hơn các hợp chất hữu cơ khác (Gunten, 2003).

3.2.2. Ảnh hưởng của lưu lượng ozone đến hiệu quả ozone hóa

Thực nghiệm được tiến hành với thể tích nước thải cà phê cố định 10 lít, thời gian lưu nước 10 phút, pH 5 được xác định ở thí nghiệm trước, liều lượng ozone cố định ở 10 g/h, lưu lượng ozone được thay đổi trong khoảng từ 1 L/phút đến 2,5 L/phút. Kết quả cho thấy, khi tăng lưu lượng ozone từ 1 đến 2 L/phút hiệu suất xử lý của quá trình này cũng tăng tuyến tính theo lưu lượng ozone, cụ thể hiệu suất xử lý COD và độ màu đều tăng dần, trong đó COD tăng từ khoảng 50% lên 58%, còn độ màu tăng từ 42% lên 52% (Hình 6). Điều này chứng tỏ rằng việc tăng lưu lượng ozone cấp vào hệ thống giúp tăng nồng độ ozone hòa tan trong nước, tạo điều kiện thúc đẩy quá trình oxy hóa các hợp chất hữu cơ và các chất tạo màu. Khi lượng ozone truyền khối tốt vào nước, khả năng tạo gốc hydroxyl ($\bullet OH$) cũng tăng lên, giúp nâng cao hiệu suất xử lý tổng thể (Tobias Nöthe và cộng sự, 2009). Tuy nhiên, tại lưu lượng quá cao, tốc độ di chuyển của bong bóng khí sẽ tăng, làm giảm hiệu

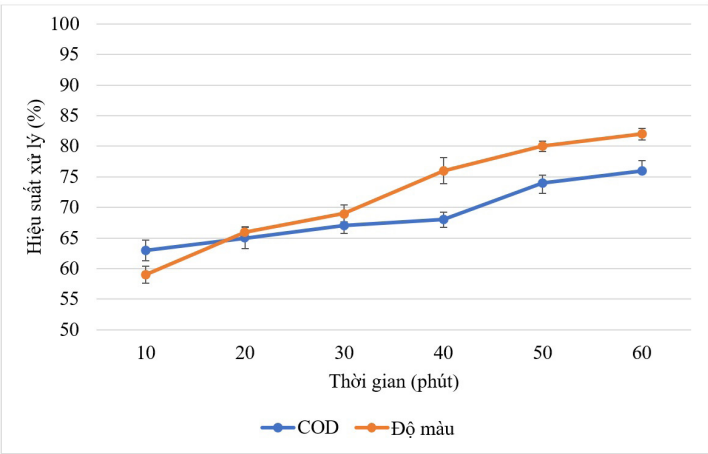


Hình 4. Ảnh hưởng của lưu lượng ozone đến hiệu quả xử lý COD

quả truyền khối. Do đó, việc tăng lưu lượng chỉ hiệu quả đến một mức giới hạn, sau đó hiệu suất có thể không tăng đáng kể hoặc thậm chí giảm do hiệu quả truyền khối kém đi (Angelo Paul và cộng sự, 1997). Kết quả thực nghiệm cho thấy, khi lưu lượng tăng lên 2,5 L/phút, hiệu quả xử lý COD và độ màu bắt đầu giảm nhẹ. Lưu lượng ozone 2 L/phút phù hợp để nghiên cứu tiếp theo.

3.2.3. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến hiệu quả ozone hóa

Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến hiệu quả ozone hóa được vận hành theo mô hình dạng mẻ, sử dụng máy ozone, được khảo sát tại các điều kiện sau: thể tích nước thải cà phê cố định 10 lít, thời gian lưu nước 15 phút, liều lượng ozone được cố định ở



Hình 5. Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến hiệu quả ozone hóa

Bảng 2. Hiệu quả xử lý các chất ô nhiễm qua hệ thống kết hợp keo tụ điện hóa và ozone hóa

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị đầu vào	Hiệu quả keo tụ điện hóa, %	Hiệu quả ozone hóa, %	Hiệu quả hệ thống, %
1	pH	-	7,5			
2	COD	mg/l	440	68 ± 0,816	80,71 ± 2,10	93,86 ± 0,67
3	Độ màu	Pt-Co	610	64,67 ± 2,62	79,70 ± 0,38	92,81 ± 0,13
4	TSS	mg/L	100	56,3 ± 0,94	13,26 ± 1,97	62,13 ± 1,02

10g/h, lưu lượng khí tối ưu xác định ở thí nghiệm trước là 2 L/phút, pH được cố định ở pH 5. Khảo sát ảnh hưởng của thời gian phản ứng trong khoảng từ 10 phút đến 60 phút.

Từ Hình 5 cho thấy hiệu suất xử lý COD và độ màu đều tăng khi kéo dài thời gian phản ứng ozone hóa từ 10 đến 60 phút. Cụ thể, hiệu suất loại bỏ COD tăng từ khoảng 63% ở 10 phút lên đến 76% tại 60 phút, trong khi hiệu suất loại bỏ độ màu tăng mạnh hơn, từ 59% lên đến 82%. Trong 10 phút đầu, hiệu suất loại bỏ COD cao hơn độ màu, nhưng từ phút 20 trở đi hiệu quả xử lý độ màu cao hơn so với COD. Điều này cho thấy 10 phút đầu ozone ưu tiên phản ứng với các chất hữu cơ khác hơn so với chất hữu cơ tạo màu. Từ 20 phút trở đi, hiệu quả xử lý độ màu cao hơn xử lý COD. Nguyên nhân có thể là do khi COD đã giảm xuống thấp, tốc độ phản ứng sẽ giảm theo nồng độ. Lúc này, các chất tạo màu còn nhiều nên tác nhân oxy hóa gồm ozone và gốc hydroxyl (•OH) đã tập trung tấn công chất hữu cơ tạo màu trong nước thải chế biến cà phê.

Tuy nhiên, ở giai đoạn sau tốc độ tăng hiệu suất có xu hướng chậm lại, phản ánh giới hạn động học của quá trình. Nguyên nhân có thể do nồng độ các chất ô nhiễm giảm, dẫn đến khả năng tiếp xúc hiệu quả giữa ozone và chất nền kém hơn. Đồng thời, lượng ozone hòa tan trong dung dịch đạt trạng thái cân bằng và có thể bị tiêu hao bởi các phản ứng phụ hoặc các ion vô cơ đóng vai trò “scavenger” như HCO₃⁻, CO₃²⁻, làm giảm hiệu quả tạo gốc •OH (Beltrán, 2004). Ngoài ra, trong giai đoạn này có thể hình thành các sản phẩm trung gian oxy hóa một phần có thể làm giảm khả năng khoáng hóa tiếp theo và khiến hiệu suất COD không tăng đáng kể (Liu Siqi và cộng sự, 2022).

3.2.4. Đánh giá hiệu quả xử lý của hệ thống

Nước thải được đưa vào hệ thống xử lý kết hợp keo tụ điện hóa và ozone hóa vận hành liên tục với các điều kiện vận hành tại keo tụ



điện hóa gồm pH 6, lưu lượng 0,15 L/phút và thời gian lưu nước 16,7 phút; ozone hóa với pH 5, lưu lượng cấp khí ozone 2 L/phút và thời gian phản ứng 60 phút. Kết quả xử lý của hệ thống được tổng hợp trong Bảng 2.

Kết quả cho thấy, hiệu suất xử lý của hệ thống cao và khá ổn định giữa các lần thử nghiệm. Hiệu quả xử lý COD và độ màu trong thải chế biến cao trên 92%. Cả keo tụ điện hóa và ozone đều có thể xử lý hiệu quả hai chỉ tiêu này. Hiệu suất xử lý TSS của hệ thống đạt $62,13 \pm 1,02\%$, chủ yếu được xử lý tại công đoạn keo tụ điện hóa. Ozone hóa chỉ xử lý hiệu quả COD và độ màu, còn TSS chỉ loại bỏ một phần nhỏ trong quá trình ozone hóa. COD, TSS và độ màu sau xử lý qua hệ thống còn lại cao nhất là 29 mg/L, 38 mg/L và 45 Pt-Co, thấp hơn giá trị cột A QCVN 40:2025/BTNMT, có thể xả thải trực tiếp ra môi trường, không cần qua công đoạn khử trùng.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy, quá trình keo tụ điện hóa kết hợp ozone hóa liên tục là một hướng xử lý hiệu quả trong việc loại bỏ các hợp chất hữu cơ khó phân hủy và chất gây màu trong nước thải chế biến cà phê. Ở các điều kiện vận hành phù hợp với keo tụ điện hóa gồm pH 6, 2,5 A, 2,5 mS/cm, thời gian lưu nước 16,7 phút; với ozone hóa gồm pH 5, lưu lượng khí ozone 2 L/phút, thời gian lưu nước 60 phút. Hệ thống đạt hiệu suất xử lý cao, COD trung bình khoảng 95% và hiệu suất khử màu trên 92%, TSS đạt 62,13%. Hiệu quả xử lý ổn định qua các lần thí nghiệm lặp lại cho thấy mô hình có độ tin cậy cao và có khả năng ứng dụng thực tiễn trong hệ thống xử lý nước thải chế biến cà phê. Chất lượng nước sau xử lý đạt tiêu chuẩn xả thải theo cột A, QCVN 40:2025/BTNMT.

Lời cảm ơn: Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP. Hồ Chí Minh đã cấp kinh phí cho nghiên cứu khoa học sinh viên Nguyễn Tiểu Băng■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Angelo Paul và cộng sự. (1997). *High Efficiency In-Line Pressurized Ozone Contacting With The GDT process*. International Ozone Association 1997.
2. ArefShokri & Kazem Mahanpoor. (2016). *Degradation of ortho-toluidine from aqueous solution by the TiO_2/O_3 process*. International Journal of Industrial Chemistry, Volume 8, pages 101-108, (2017).
3. Beltrán, F. J. (2004). *Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems*. International Standard Book Number 1-56670-629-7, Library of Congress Card Number 2003060323.
4. Dr. Christiane Gottschalk và cộng sự. (2009). *zonation of Water and Waste Water: A Practical*

Guide to Understanding Ozone and its Applications (Wiley-VCH).

5. Gunten, U. v. (2003). *Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation*. Water Research, Volume 37, Issue 7, April 2003, Pages 1443-1467.
6. Liu Siqi và cộng sự. (2022). *Comparison of the formation of aldehydes and carboxylic acids in ozonated and electrochemically treated surface water*. Chemosphere 2022 Nov; 307(Pt 2):135664. doi: 10.1016.
7. Mohsen Arbabi và cộng sự. (2022). *Electrocoagulation Process Using Aluminum Electrodes for Treatment of Baker's Yeast Industry Wastewater*. International Journal of Environmental Health Engineering 11(1):p 3.
8. Tobias Nöthe và cộng sự. (2009). *Ozonation of wastewater: rate of ozone consumption and hydroxyl radical yield*. Environmental science & technology, vol. 43, no. 15, 2009.
9. Báo cáo thị trường nông nghiệp cà phê, Báo Nông nghiệp Việt Nam.
10. Ijanu, E. M., Kamaruddin, M. A., & Norashiddin, F. A. (2020). *Coffee processing wastewater treatment: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative*. Applied Water Science, 10, 11. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1091-9>.
11. Nguyễn Thị Kim Huy, Lý Thị Thy, Huỳnh Thị Ngọc Hân, *Đánh giá hiệu quả xử lý màu trong nước thải chế biến cà phê bằng phương pháp keo tụ điện hóa*, Kỳ 1 - Tháng 10/2024, Tạp chí Tài nguyên và Môi trường.
12. Sahana, M., Srikantha, H., Mahesh, S., & Mahadeva Swamy, M. (2018). *Coffee processing industrial wastewater treatment using batch electrochemical coagulation with stainless steel and Fe electrodes and their combinations, and recovery and reuse of sludge*. Water Science & Technology, 78(2).
13. Mahesh, S., Srikantha, H., & Aashith Loren Lobo. *Performance evaluation of two batch operations using electrochemical coagulation followed by sequential batch reactor in treating coffee wastewater*. January 2014, International Journal of ChemTech Research 6(1):974-4290.
14. Carlos Amor, Leonilde Marchão, Marco S. Lucas and José A. Peres, *Application of Advanced Oxidation Processes for the Treatment of Recalcitrant Agro-Industrial Wastewater: A Review*, Water 2019, 11, 205; doi:10.3390/w11020205.
15. P. Van Aken, K. Van Eyck, N. Lambert, J. Luyten and S. Liers, *Effect of (Partial) Advanced Oxidation Processes (AOPs) on Coloured Wastewaters*, Water Research, 2009.
16. Daniel A. Leontieff, Keisuke Ikehata, Yasutaka Inanaga and Seiji Furukawa, *Ozone for Industrial Wastewater Treatment*, Processes 2025, 13(8), 2331.