

DOI:10.22144/ctujos.2025.189

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO MÀNG CHUNG CÁT ĐỂ XỬ LÝ VÀ TÁI SỬ DỤNG NƯỚC THẢI DỆT NHUỘM

Nguyễn Thị Hậu¹, Huỳnh Thanh Trúc¹, Nguyễn Thị Thu Uyên¹, Mai Thị Nguyệt², Nguyễn Thị Liên³, Võ Thị Hoàng Mỹ⁴, Lê Quang Huy¹ và Nguyễn Công Nguyên^{1*}

¹Khoa Hóa học và Môi trường, Trường Đại học Đà Lạt, Việt Nam

²Sở Nông nghiệp và Môi trường tỉnh Lâm Đồng, Việt Nam

³Chi cục Bảo vệ môi trường miền Trung và Tây nguyên, Việt Nam

⁴Viện Nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): nguyennc@dlu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 05/04/2025

Sửa bài (Revised): 13/05/2025

Duyệt đăng (Accepted): 12/08/2025

Title: Study on the fabrication of membrane distillation for treatment and reuse of textile wastewater

Author: Nguyen Thi Hau¹, Huynh Thanh Truc¹, Nguyen Thi Thu Uyen¹, Mai Thi Nguyet², Nguyen Thi Lien³, Vo Thi Hoang My⁴, Le Quang Huy¹ and Nguyen Cong Nguyen^{1*}

Affiliation(s): ¹Faculty of Chemistry and Environment, Dalat University, Dalat, Viet Nam; ²Department of Agriculture and Environment, Lam Dong Province, Viet Nam; ³Sub-Department of Environmental Protection for Central and Central Highlands Region, Viet Nam; ⁴Dalat Nuclear Research Institute, Viet Nam

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm khám phá tiềm năng của công nghệ chưng cất màng (Membrane distillation-MD) như quy trình một bước để xử lý và tái sử dụng nước thải nhuộm từ ngành dệt nhuộm. Trong nghiên cứu, việc tổng hợp màng MD được tiến hành bằng cách sử dụng các dung dịch đảo pha có tỉ lệ thể tích H₂O/Isoamyl alcohol khác nhau nhằm nâng cao tính kỵ nước, tăng thông lượng dòng nước thấm và hiệu suất loại bỏ độ màu. Kết quả cho thấy, màng MD tối ưu, với tỉ lệ thể tích H₂O/Isoamyl alcohol là 50:50, đạt được thông lượng dòng nước thấm cao (18,05 L/m² h) và hiệu quả loại bỏ độ màu 99,69%, cùng với hiệu suất thu hồi nước đạt 60,35% sau 16 giờ vận hành. Ngoài ra, màng MD tổng hợp trong nghiên cứu này cho thông lượng dòng nước thấm cao hơn khoảng 1,3 lần so với màng MD thương mại nhờ vào độ xốp lớn hơn. Kết quả chứng minh rằng isoamyl alcohol có thể cải thiện hiệu quả của màng MD, mang lại giải pháp bền vững cho việc thu hồi phẩm màu và xử lý nước thải trong ngành dệt bằng cách tận dụng nhiệt thải từ nước thải nhuộm. Một cách tổng thể, màng MD tổng hợp trong nghiên cứu này có triển vọng là giải pháp hiệu quả để giải quyết các thách thức về xử lý nước thải trong ngành dệt nhuộm tại thành phố Bảo Lộc hiện nay.

Từ khóa: Chưng cất màng, kỵ nước, loại bỏ độ màu, nước thải nhuộm, phục hồi nước

ABSTRACT

This study explores the potential of membrane distillation (MD) technology as a one-step process for treating and reusing dye textile wastewater. The research synthesizes MD membranes using a novel H₂O/Isoamyl alcohol non-solvent in phase inversion with varying ratios to enhance hydrophobicity, thermal stability, and evaluate water flux and dye removal efficiency. Results showed that the optimal MD membrane, with a 50:50 H₂O/Isoamyl alcohol ratio, achieved high water flux (18.05 L/m² h) and color removal efficiency (99.69%), along with a water recovery of 60.35% after 16 hours of operation. Additionally, the synthesized MD membrane demonstrated approximately 1.3 times higher water flux than the commercial MD membrane due to its greater porosity. The results demonstrated that isoamyl alcohol can improve the long-term performance of MD membranes, offering a sustainable solution for dye recovery and wastewater treatment in the textile industry by utilizing waste heat from dyeing wastewater. Overall, the synthesized MD membrane shows promise as an effective solution to address dye wastewater treatment challenges in Bao Loc's textile sector.

Keywords: Color removal, dye wastewater, hydrophobic, membrane distillation, water recovery

1. GIỚI THIỆU

Thành phố Bảo Lộc của tỉnh Lâm Đồng được biết đến là trung tâm của ngành công nghiệp tơ tằm và dệt nhuộm của Việt Nam, với hơn 330 cơ sở sản xuất đóng góp giá trị xuất khẩu đáng kể, đạt hàng triệu đô la Mỹ mỗi năm. Tuy nhiên, các hoạt động sản xuất này thải ra một lượng lớn nước thải và gây ô nhiễm nguồn nước nghiêm trọng tại Việt Nam (Ho et al., 2024; Rodrigues et al., 2025). Đặc biệt, nước thải từ các cơ sở dệt nhuộm tại Bảo Lộc chứa nhiều hợp chất nhuộm axit hỗn hợp khó phân hủy sinh học, khiến các phương pháp xử lý hiện tại (kết hợp hóa lý và sinh học) gặp khó khăn trong việc đáp ứng tiêu chuẩn xả thải ở cột A, QCVN 13-MT:2015/BTNMT. Chung cất màng (Membrane Distillation - MD) đã nổi lên như một công nghệ xanh đầy triển vọng để xử lý và tái sử dụng nước thải, đặc biệt trong ngành dệt nhuộm. MD là quá trình tách dựa trên nhiệt, sử dụng chênh lệch áp suất hơi nước làm động lực, cho phép loại bỏ hoàn toàn các chất hòa tan không bay hơi và sản xuất nước đạt chất lượng cao (Razaqpur et al., 2021; Santoro et al., 2022; Yadav et al., 2022; Nthunya et al., 2024). Với khả năng hoạt động ở nhiệt độ nguồn cấp vào phổ biến từ 35 đến 85°C, MD có thể tận dụng nhiệt thừa từ nước thải dệt nhuộm, làm tăng tính bền vững của quá trình xử lý. Mặc dù có tiềm năng lớn, các kỹ thuật chế tạo màng MD hiện tại vẫn đối mặt với nhiều hạn chế (Alkhudhiri et al., 2012; Julian et al., 2022; Bamasag et al., 2023; Ngo et al., 2023; Zhang et al., 2023). Thứ nhất, màng MD thường có độ rỗng và tính kỵ nước thấp, dẫn đến thông lượng dòng nước thấm thấp (Yadav et al., 2022; Hou et al., 2023). Thứ hai, sự suy giảm tính chất của màng MD ở nhiệt độ cao gây ra hiện tượng thấm ướt nhanh chóng, làm giảm hiệu quả loại bỏ chất ô nhiễm. Cụ thể, Fortunato et al. (2021) đã ghi nhận thấy rằng khi màng MD được sử dụng để xử lý nước thải dệt nhuộm, thông lượng dòng nước thấm giảm tới 70% theo thời gian do hiện tượng bám bẩn màng ở nhiệt độ cao.

Màng MD vì xốp thường được chế tạo bằng kỹ thuật đảo pha, trong đó dung dịch polymer chuyển từ trạng thái lỏng sang rắn thông qua quá trình tách pha khi được ngâm trong bể đông tụ chứa dung môi không hòa tan như nước (Ravi et al., 2020; Kusuma et al., 2021; Alsebaei et al., 2024). Cụ thể, khi dung dịch polymer tiếp xúc với dung môi không hòa tan, xảy ra hiện tượng khuếch tán ngược: dung môi khuếch tán ra ngoài, trong khi dung môi không hòa tan khuếch tán vào trong, làm giảm khả năng hòa tan của polymer. Khi đạt đến ngưỡng bão hòa, polymer

kết tủa và hình thành mạng lưới polymer rắn, tạo nên cấu trúc màng xốp. Loại chất dung môi đảo pha được sử dụng ảnh hưởng lớn đến tính kỵ nước và cấu trúc lỗ rỗng của màng (Nguyen et al., 2025). Các phương pháp đông tụ truyền thống sử dụng nước làm dung môi trong kỹ thuật đảo pha thường tạo ra màng MD có độ rỗng thấp và kích thước lỗ nhỏ và góc tiếp xúc bề mặt chỉ trong khoảng 90° – 107°, từ đó làm hạn chế hiệu suất xử lý của màng (Fontananova et al., 2006). Kết quả nghiên cứu của Yadav et al. (2024) chỉ ra rằng, nước được sử dụng làm dung môi đảo pha để tổng hợp màng MD thì hiệu suất loại bỏ muối tối đa chỉ đạt khoảng 98%. Ngược lại, các loại rượu như methanol hoặc ethanol được sử dụng làm dung môi đảo pha thì tính kỵ nước được cải thiện (góc tiếp xúc lên đến 165°), nhưng nhiệt độ điểm sôi thấp (64,7°C đối với methanol) gây ra sự bất ổn nhiệt, dẫn đến hiện tượng màng MD bị phồng rộp và giảm hiệu suất xử lý ở nhiệt độ cao (Enamul et al., 2024; Nguyen et al., 2025). Trong các nghiên cứu trước đây, nhóm nghiên cứu của chúng tôi đã tiến hành tổng hợp màng MD bằng phương pháp đảo pha với dung môi là isoamyl alcohol, qua đó đạt được màng có góc tiếp xúc cao (152±2,3°) (Nguyen et al., 2025). Tuy nhiên, thông lượng dòng thấm qua màng giảm nhanh trong quá trình vận hành do hiện tượng bám bẩn màng MD nghiêm trọng.

Vì vậy, nước và isoamyl alcohol đã được sử dụng kết hợp làm dung môi đảo pha nhằm tạo ra màng MD có hiệu suất xử lý cao, duy trì ổn định thông lượng dòng thấm và giảm thiểu hiện tượng bám bẩn trên bề mặt màng. Với ưu điểm về điểm sôi cao (131°C), isoamyl alcohol được kỳ vọng sẽ nâng cao độ bền nhiệt và khả năng hoạt động ổn định của màng dưới áp suất và nhiệt độ kéo dài. Trong khi đó, việc bổ sung nước vào dung môi đảo pha giúp thúc đẩy nhanh quá trình đông tụ, tạo bề mặt màng có tính chất ưa nước phù hợp, qua đó hạn chế đáng kể mức độ bám bẩn của màng MD trong quá trình vận hành. Đây là nghiên cứu đầu tiên được thực hiện bằng cách sử dụng isoamyl alcohol kết hợp với nước trong dung môi đảo pha để tổng hợp màng MD mà không cần sử dụng chất phụ gia hay biến tính polymer. Nghiên cứu này được tiến hành nhằm tổng hợp màng MD và ứng dụng công nghệ MD vào việc thu hồi thuốc nhuộm và tái sử dụng nước từ nước thải dệt nhuộm tại Bảo Lộc. Các mục tiêu cụ thể bao gồm: (i) khảo sát ảnh hưởng của tỷ lệ H₂O/Isoamyl alcohol đến thông lượng dòng nước thấm và hiệu quả loại bỏ độ màu, (ii) đánh giá tác động của nhiệt độ đến hiệu suất MD và (iii) kiểm tra khả năng thu

hồi thuốc nhuộm và nước từ nước thải nhuộm dệt Bảo Lộc theo thời gian vận hành của hệ thống MD.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Trong nghiên cứu này, polymer Polyvinylidene Fluoride (PVDF) với khối lượng phân tử 534 kDa và dung môi N-Methyl-2-Pyrrolidone (NMP) được cung cấp bởi Sigma Aldrich. Isoamyl Alcohol (độ tinh khiết 99%) được mua từ Hebei Yanxi Chemical Co., Ltd để sử dụng trong quá trình tổng hợp màng MD. Nước thải từ hoạt động nhuộm vải được lấy từ nhà máy dệt nhuộm Bảo Lộc, tại số 116 đường Phan Đình Phùng, phường Lộc Tiến, thành phố Bảo Lộc, tỉnh Lâm Đồng. Trong quá trình sản xuất, nhà máy dệt nhuộm Bảo Lộc đã pha 11 g sản phẩm màu R-SO₃Na trong 50 lít nước để tạo ra độ màu gốc ban đầu là 3500 PtCo, phục vụ cho quá trình nhuộm 3 kg vải/mê. Sau khi nhuộm, một phần phẩm màu được gắn vào vải, phần còn lại được thải ra theo dòng nước thải với các thông số độ màu = 1536 ± 41 PtCo, COD = 1225 ± 19 mg/L, nhiệt độ = $65 \pm 5^\circ\text{C}$ và độ dẫn điện (EC) = 1200 ± 12 $\mu\text{S/cm}$ và pH = $8,31 \pm 0,45$.

Ngoài ra, trong nghiên cứu này, màng MD thương mại (sản xuất tại Đài Loan) cũng được sử dụng để so sánh với màng MD tự tổng hợp. Tính chất của màng MD thương mại được trình bày chi tiết trong Bảng 1.

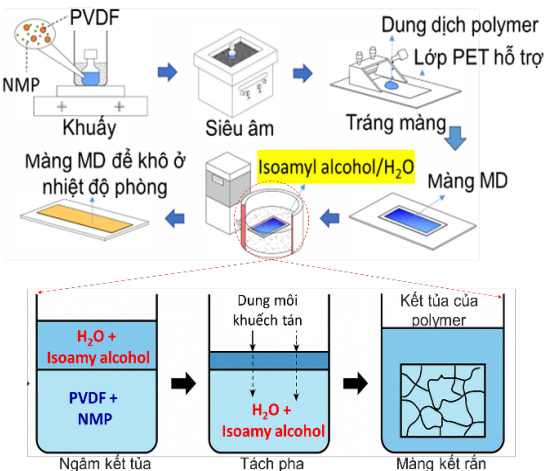
Bảng 1. Tính chất của màng MD thương mại

Thông số	Giá trị
Vật liệu lớp bề mặt hoạt động	Polytetrafluoroethylene (PTFE)
Vật liệu lớp hỗ trợ	Polyethylene terephthalate (PET)
Góc tiếp xúc ($^\circ$)	$123,6 \pm 0,8$
Kích thước lỗ màng (μm)	0,45

2.2. Quy trình tổng hợp màng MD

PVDF được hòa tan trong NMP ở nhiệt độ 65°C với nồng độ 13% trọng lượng polymer. Sau đó, dung dịch polymer được xử lý bằng bể siêu âm trong 3 giờ nhằm mục đích khử hết bọt khí. Một lớp vải không dệt PET có độ dày 90 μm (xuất xứ Đài Loan), được sử dụng làm vật liệu hỗ trợ để tăng độ bền cho màng MD. Dung dịch polymer được đổ lên bề mặt kính có lớp hỗ trợ gắn sẵn, sử dụng dao kéo màng với độ dày 500 μm tại nhiệt độ 25°C . Các mẫu màng MD đã đúc được ngay lập tức được ngâm trong các dung môi đảo pha, bao gồm hỗn hợp H₂O/Isoamyl alcohol theo các tỷ lệ thể tích 90:10,

50:50 và 10:90, ở nhiệt độ 15°C trong 24 giờ. Sau đó, màng MD được lấy ra và để khô ở nhiệt độ phòng trong 24 giờ. Sơ đồ quy trình tổng hợp màng MD được trình bày trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ quy trình tổng hợp màng MD

2.3. Phân tích đặc tính của màng MD tổng hợp

Độ rỗng của màng MD được đánh giá theo phương pháp trọng lượng bằng cách đo lượng chất lỏng giữ lại trong các lỗ màng. Kích thước lỗ được ước tính bằng phương pháp điểm bọt và phân bố kích thước lỗ được xác định cùng với các phép đo độ thấm khí, cả hai đều dựa trên phương pháp điểm bọt và phương trình Laplace. Góc tiếp xúc của các màng MD được đo bằng thiết bị CAM 100 (Opto-Mechatronics P Ltd., Ấn Độ). Hình thái và sự bám bản của màng được phân tích bằng kính hiển vi điện tử quét và phổ tia X tán xạ năng lượng (Scanning Electron Microscopy - Energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX)) với hệ thống Philips XL30.

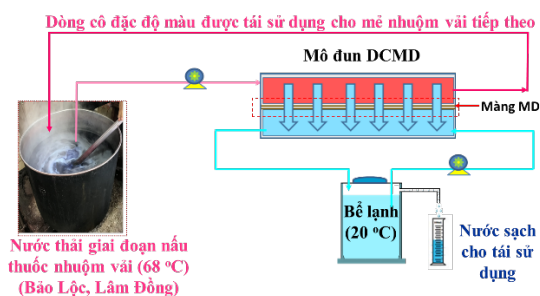
2.3. Thiết kế thí nghiệm cho mô hình chưng cất màng tiếp xúc trực tiếp

Hình 2 trình bày sơ đồ của hệ thống chưng cất màng tiếp xúc trực tiếp (Direct Contact Membrane Distillation-DCMD) dùng để xử lý nước thải dệt nhuộm và thu hồi thuốc nhuộm. Mô-đun DCMD được thiết kế từ vật liệu acrylic, gồm hai khoang rỗng đối xứng có kích thước $4,5 \times 9,2 \times 0,2$ cm (rộng $\times$ dài $\times$ cao). Màng MD được sử dụng trong nghiên cứu là màng phẳng, có diện tích hiệu dụng là 41 cm², được lắp đặt cố định ở giữa hai khoang để tạo vùng tiếp xúc cho dòng cấp và dòng thấm. Để đảm bảo độ kín và ngăn ngừa rò rỉ trong suốt quá trình vận hành, hai roan cao su chịu nhiệt được lắp chặt ở mép trong của mô-đun, giữa các tấm acrylic và mép màng. Hai

máy bơm HF-8936 (Đài Loan) tuần hoàn dòng nước chung cất và dòng nước thải dệt nhuộm qua các kênh tương ứng, trong khi hai bể nước (D-606, Deng Yng, Đài Loan) duy trì nhiệt độ lạnh của bể chung cất và nhiệt nóng trong bể chứa nước thải dệt nhuộm. Nước thải dệt nhuộm chứa trong bể có thể tích 1500 mL và nước tinh khiết (1500 mL) được bơm tuần hoàn liên tục với lưu lượng 1.800 mL/phút qua các kênh tương ứng và quay lại các bể chứa. Dòng hơi nước thẩm được ngưng tụ tại bể lạnh được thu qua ống chảy tràn vào ống đóng thể tích nước thẩm để tính thông lượng dòng nước thẩm. Sau khi xử lý của hệ thống MD, nước được lấy ra theo định kỳ thời gian để đo độ màu và độ dẫn điện nhằm đánh giá hiệu quả xử lý. Các thông số chính vận hành cho hệ DCMD được thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 2. Thông số vận hành cho hệ DCMD

Thông số	Đơn vị	Giá trị
Nhiệt độ dòng nóng	°C	70
Nhiệt độ dòng lạnh	°C	20
Thời gian chạy thí nghiệm	h	16
Lưu lượng bơm của dòng nóng và lạnh	mL/phút	1.800



Hình 2. Hệ thống DCMD quy mô phòng thí nghiệm dùng để xử lý nước thải dệt nhuộm

Thông lượng dòng nước thẩm (J_w) được tính toán dựa trên sự thay đổi thể tích của nước thẩm qua màng MD theo công thức sau:

$$J_w = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \quad (1)$$

Trong đó, ΔV là sự thay đổi thể tích nước thẩm (L), Δt là thời gian (giờ) và A là diện tích màng hiệu quả (m²).

Hiệu quả loại bỏ độ màu và độ dẫn điện (R) được tính theo công thức:

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100\% \quad (2)$$

Trong đó, C_p và C_f lần lượt là độ màu hoặc độ dẫn điện (EC) trong dòng nước thẩm và dòng nước thải đầu vào. Hiệu ứng pha loãng được tính khi xác định độ màu và độ dẫn điện trong dòng nước thẩm theo công thức:

$$C_p = \frac{C_1 m_1 - C_0 m_0}{m_1 - m_0} \quad (3)$$

Trong đó, m_0 và m_1 lần lượt là khối lượng nước ban đầu và cuối cùng của dòng nước thẩm qua màng MD, C_0 và C_1 là độ màu hoặc độ dẫn điện ban đầu và cuối cùng.

Tỉ lệ phục hồi nước (r) ở hệ thống DCMD được tính theo công thức sau:

$$r = \frac{V_{\text{permeate}}}{V_{\text{feed}}} \times 100\% \quad (4)$$

Trong đó: V_{permeate} là thể tích nước sạch thu được qua màng MD và V_{feed} là thể tích nước thải dệt nhuộm ban đầu cấp vào hệ thống DCMD.

Độ màu của nước thải đầu vào và dòng thẩm được phân tích bằng máy quang phổ UV-Vis. Độ hấp thụ của độ màu được đo ở bước sóng 455 nm. Độ dẫn điện của mẫu nước được đo bằng máy độ dẫn điện cầm tay.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của tỉ lệ thể tích H₂O/Isoamyl alcohol trong dung môi đảo pha đến hiệu quả của màng MD

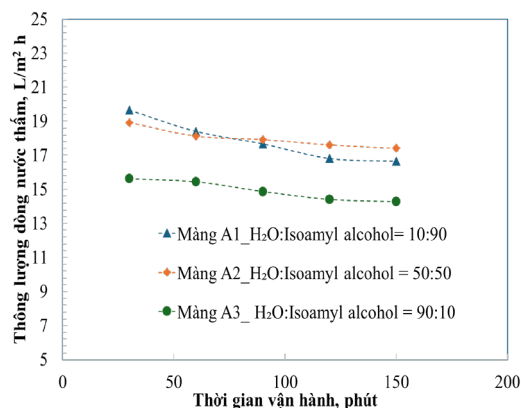
Trong quá trình tổng hợp màng MD bằng kỹ thuật đảo pha, việc xác định điều kiện ngâm tối ưu trong bể chứa dung môi đảo pha là rất quan trọng để đạt được thông lượng thẩm cao và duy trì hiệu suất xử lý ổn định. Điều này được lý giải là vì điều kiện ngâm màng MD ảnh hưởng trực tiếp đến sự chuyển đổi của dung dịch polymer từ pha lỏng sang pha rắn, tạo thành cấu trúc màng xốp. Kết quả nghiên cứu được trình bày ở Hình 3 và Bảng 3 chỉ ra rằng, màng A2 đạt được thông lượng dòng thẩm cao hơn ($J_w^{\text{Trung bình}} = 18,05 \text{ L/m}^2 \text{ h}$) so với màng A3 ($J_w^{\text{Trung bình}} = 14,93 \text{ L/m}^2 \text{ h}$). Nguyên nhân có thể là do ảnh hưởng của độ rỗng và kích thước lỗ màng MD được tạo ra khi ngâm màng trong bể chứa các dung môi đảo pha ở các tỉ lệ khác nhau giữa H₂O/Isoamyl alcohol. Bảng 3 chỉ ra rằng, ở tỉ lệ thể tích 50:50, màng A2 có độ rỗng lớn hơn ($78,1 \pm 1,3\%$) và kích thước lỗ lớn hơn ($0,31 \pm 0,09 \mu\text{m}$) so với tỉ lệ 90:10 của màng A3, nơi màng có độ rỗng nhỏ hơn ($75,2 \pm 0,8\%$) và kích thước lỗ nhỏ hơn ($0,28 \pm 0,05 \mu\text{m}$).

Sự gia tăng độ xốp (ε) và kích thước lỗ màng (d) này có mối tương quan trực tiếp với thông lượng nước cao hơn (J_w), như được mô tả bởi phương trình sau:

$$J_w = \frac{\varepsilon d}{3RT\tau\delta} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{1/2} (P_m - P_p) \quad (5)$$

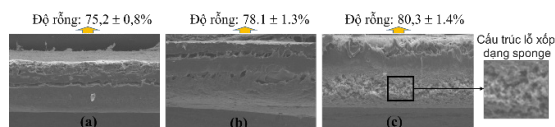
Theo đó: R là hằng số khí, T là nhiệt độ đầu vào, τ là độ nghiêng ngoài của lỗ và δ là độ dày của màng. M biểu thị khối lượng phân tử của nước, trong khi p_p và p_m lần lượt là áp suất ở phía thấm và phía dòng cấp vào. Phương trình (5) cho thấy, khi ε và d của màng MD tăng dẫn đến J_w tăng theo. Tuy nhiên, việc xây dựng mô hình hồi quy từ dữ liệu thực tế được tiến hành để đánh giá đóng góp của từng tham số và hỗ trợ dự đoán, tối ưu thiết kế màng MD là cần thiết trong nghiên cứu tiếp theo. Ban đầu, màng A1 cho thông lượng nước thấm cao hơn ($J_w^{30 \text{ phút}} = 19,66 \text{ L/m}^2 \text{ h}$) so với màng A2 ($J_w^{30 \text{ phút}} = 18,92 \text{ L/m}^2 \text{ h}$). Tuy nhiên, trong quá trình vận hành từ 30 đến 150 phút, thông lượng của màng A1 giảm mạnh hơn (từ 19,66 xuống còn 16,66 $\text{L/m}^2 \text{ h}$), trong khi màng A2 chỉ giảm nhẹ (từ 18,92 xuống 17,42 $\text{L/m}^2 \text{ h}$). Do đó, thông lượng thấm trung bình của màng A2 cao hơn và ổn định hơn so với màng A1 trong suốt thời gian vận hành. Khi tỷ lệ thể tích Isoamyl alcohol trong bể chứa dung môi đảo pha tan tăng lên, cả độ rỗng và góc tiếp xúc của màng MD đều tăng (Bảng 3). Cụ thể, góc tiếp xúc cao nhất của màng A1 là $139,1^\circ$ tiếp theo là $135,6^\circ$ đối với màng A2 và $112,4^\circ$ đối với màng A3. Độ rỗng cao nhất của màng MD được quan sát thấy ở tỉ lệ thể tích của $\text{H}_2\text{O}:\text{Isoamyl alcohol} = 10:90$ ($80,3 \pm 1,4\%$). Hiện tượng này có thể giải thích bởi sự có mặt nhiều của Isoamyl alcohol trong bể chứa dung môi đảo pha, đã làm chậm quá trình kết tủa màng MD vì so với nước thì isoamyl alcohol ít hòa tan trong NMP dẫn đến độ rỗng cao hơn của màng. Ngoài ra, trong quá trình đảo pha, việc tăng tỷ lệ isoamyl alcohol có thể làm thay đổi quá trình kết tinh và sắp xếp lại các chuỗi polymer, dẫn đến sự hình thành cấu trúc lỗ rỗng dạng sponge và bề mặt màng trở nên thô nhám hơn (Hình 4a, Hình 4b và Hình 4c). Những quan sát thực nghiệm trong nghiên cứu này cho thấy ở hàm lượng isoamyl alcohol cao, bề mặt màng đã đủ thô và xốp để duy trì trạng thái thấm ướt kiểu Cassie-Baxter, thể hiện qua góc tiếp xúc nước rất lớn (Bảng 3). Trạng thái Cassie-Baxter này đặc biệt có lợi cho màng MD, vì màng gần như không bị ướt bởi dung dịch nguồn, ngăn ngừa sự xâm nhập của nước lỏng vào các lỗ xốp và do đó tăng khả năng chống thấm ướt. Thật vậy, Rauter et al. (2021) đã chỉ ra rằng

màng rất kỵ nước (góc tiếp xúc $\sim 125^\circ$) có xu hướng duy trì trạng thái Cassie-Baxter với không khí nằm trong các lỗ rỗng. Ngược lại, sự hiện diện của nước trong dung môi đảo pha làm tăng tốc quá trình kết tủa, dẫn đến độ rỗng của màng MD thấp hơn.



Hình 3. Sự thay đổi thông lượng dòng nước thấm khi sử dụng các tỷ lệ thể tích khác nhau giữa $\text{H}_2\text{O}:\text{Isoamyl alcohol}$ trong quá trình đảo pha

Điều kiện thí nghiệm: nhiệt độ đầu vào của nước nóng = 60°C , nhiệt độ đầu vào của dòng làm mát = 20°C , tốc độ dòng chảy ngang 28 cm/s.



Hình 4. (a), (b) và (c) lần lượt là hình ảnh SEM mặt cắt ngang của màng A3, A2 và A1

Hơn nữa, hiệu quả loại bỏ độ màu và độ dẫn điện của tất cả các màng MD đều cao ($> 99\%$) trong suốt 150 phút vận hành. Màng A3 đạt hiệu quả loại bỏ màu cao nhất (99,78%), tiếp theo là màng A2, và màng A1 (99,42%). Nguyên nhân chính của xu hướng này là do kích thước lỗ màng nhỏ hơn, dẫn đến hiệu quả loại bỏ màu cao hơn (Bảng 3). Do đó, điều kiện tối ưu để chế tạo màng MD là ngâm màng trong bể chứa dung môi đảo pha với tỷ lệ thể tích $\text{H}_2\text{O}:\text{Isoamyl alcohol} = 50:50$, tạo ra màng MD có hiệu suất cao với hiệu quả loại bỏ màu đạt 99,69%, đồng thời duy trì thông lượng nước thấm ổn định trong quá trình vận hành (J_w dao động từ 18,92 đến 17,42 $\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$). Kết quả này cho thấy việc sử dụng isoamyl alcohol trong dung dịch đảo pha giúp duy trì thông lượng ổn định hơn so với ethanol, trong đó J_w giảm mạnh từ 29,12 xuống còn 5,01 $\text{L/m}^2 \text{ h}$ (Nguyễn et al., 2025).

Bảng 3. So sánh hiệu quả xử lý và tính chất màng MD ở các điều kiện tổng hợp khác nhau

Thành phần trong dung môi đảo pha	Màng MD	Góc tiếp xúc (°)	Kích thước lỗ màng (μm)	Độ rỗng màng MD, %	Hiệu quả loại bỏ độ màu (%)	Hiệu quả loại bỏ độ dẫn điện (%)
Tỷ lệ thể tích của H ₂ O: Isoamyl alcohol = 10:90	A1	139,1	0,38±0,07	80,3±1,4%	99,42	99,49
Tỷ lệ thể tích của H ₂ O: Isoamyl alcohol 50:50	A2	135,6	0,31±0,09	78,1±1,3%	99,69	99,58
Tỷ lệ thể tích của H ₂ O: Isoamyl alcohol = 90:10	A3	112,4	0,28±0,05	75,2±0,8%	99,78	99,64

3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ tới hiệu quả xử lý của màng MD

Ảnh hưởng của sự chênh lệch nhiệt độ giữa dòng nóng của nước thải dệt nhuộm và dòng nước làm lạnh đối với thông lượng dòng thấm của màng MD được đánh giá bằng cách sử dụng màng MD được ngâm trong bể chứa dung môi đảo pha với tỉ lệ thể tích H₂O:Isoamyl alcohol = 50:50. Hình 5 thể hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ đến thông lượng dòng thấm và khả năng loại bỏ độ màu trong nước thải dệt nhuộm. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng thông lượng nước tăng lên khi sự chênh lệch nhiệt độ giữa hai bên màng MD tăng (Hình 5a). Thông lượng dòng nước thấm cao nhất là 30,05 L/m² h đạt được ở ΔT₅ = 55°C, tiếp theo là ΔT₄ = 50°C (26,11 L/m² h), ΔT₃ = 45°C (22,42 L/m² h), ΔT₂ = 40°C (18,04 L/m² h) và ΔT₁ = 35°C (6,91 L/m² h). Lý do chính cho sự gia tăng thông lượng dòng nước thấm là do sự chênh lệch nhiệt độ giữa dòng nóng từ nước thải cấp vào và dòng nước lạnh làm tăng lực đẩy của áp suất hơi qua màng MD, như được mô tả trong phương trình sau (Tijing et al., 2015):

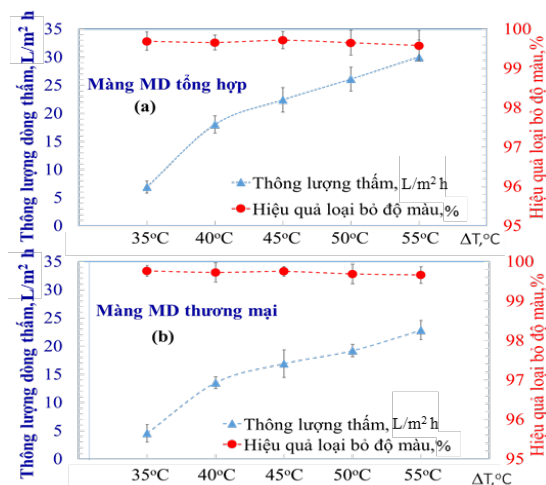
$$J_w = B_m(p_{mf} - p_{mp}) \quad (5)$$

$$p = e^{(23.328 - \frac{3.841}{T-45})} \quad (6)$$

Trong đó J_w đại diện cho dòng nước thấm, B_m là hệ số truyền khối lượng tổng thể, p_{mf} và p_{mp} là áp suất hơi riêng phần ở hai mặt của màng, lần lượt là phía dòng nước nóng cấp vào và phía dòng thấm thấu, T là nhiệt độ Kelvin. Về lý thuyết, khi p_{mf} tăng theo nhiệt độ, sự chênh lệch áp suất hơi ($p_{mf} - p_{mp}$) cũng tăng, từ đó làm tăng lực đẩy và nâng cao thông lượng dòng nước thấm qua màng MD. Tuy nhiên, nhiệt độ quá cao có thể tác động tiêu cực đến sự ổn định của màng. Ở ΔT₅ = 55°C, tương ứng với nhiệt độ nguồn cấp nóng là 75°C, có thể xảy ra hiện tượng giãn nở màng, làm giảm áp suất dòng nạp liệu (LEP) và tăng nguy cơ ứ đọng lỗ màng. Kết quả các nghiên

cứ trước đây của Tan et al. (2016) đã chỉ ra rằng hiện tượng ứ đọng lỗ màng xảy ra khi nhiệt độ vượt quá 70°C. Để cân bằng giữa thông lượng dòng nước thấm cao và sự ổn định của màng, đồng thời giảm thiểu nguy cơ ứ đọng lỗ màng, ΔT₄ = 50°C, tương ứng với nhiệt độ nguồn cấp nóng là 70°C, được chọn là nhiệt độ tối ưu cho hệ thống DCMD này. Kết quả từ Hình 5a cho thấy hiệu suất loại bỏ độ màu của tất cả các nhiệt độ trong hệ thống DCMD gần như đạt 100%, với chất lượng nước cao (độ màu trong dòng nước thấm < 7 PtCo). Điều này là do cơ chế vận chuyển hơi chọn lọc của quá trình DCMD, trong đó màng kỵ nước chỉ cho phép hơi nước đi qua trong khi giữ lại các tạp chất và chất màu không bay hơi trong dòng nước thải đưa vào.

So với màng PTFE-MD thương mại, màng MD tự tổng hợp trong nghiên cứu này cho thông lượng dòng nước thấm cao hơn ở tất cả các nhiệt độ (Hình 5b). Điều này có thể giải thích bởi độ rỗng cao hơn của màng MD tự tổng hợp so với màng PTFE MD thương mại. Cụ thể, tại các mức chênh lệch nhiệt độ (ΔT), thông lượng dòng nước thấm qua màng MD tự tổng hợp luôn vượt trội hơn: tại ΔT₁ (35°C) là 6,91 L/m² h so với 4,57 L/m² h của màng PTFE MD, tại ΔT₂ (40°C) là 18,04 L/m² h so với 13,54 L/m² h, tại ΔT₃ (45°C) là 22,42 L/m² h so với 16,92 L/m² h, tại ΔT₄ (50°C) là 26,11 L/m² h so với 19,23 L/m² h, và tại ΔT₅ (55°C) là 30,05 L/m² h so với 22,85 L/m² h. Kết quả cho thấy màng MD tự tổng hợp trong nghiên cứu này có khả năng đạt hiệu suất xử lý độ màu cao và duy trì được thông lượng dòng nước thấm ổn định, đặc biệt ở các nhiệt độ cao, nhờ vào cấu trúc và độ rỗng tối ưu.

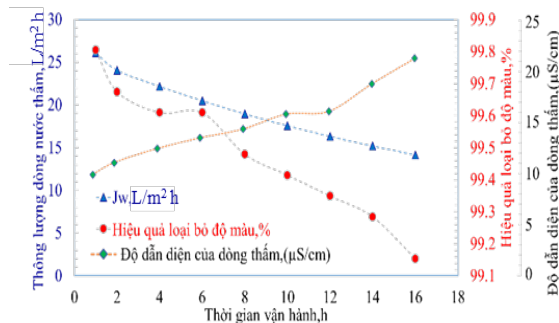


Hình 5 . Thay đổi thông lượng dòng nước thấm và hiệu quả loại bỏ độ màu với nhiệt độ trong quá trình thực hiện của màng MD

Điều kiện vận hành: nước thải dệt nhuộm thực tế được sử dụng làm dòng cấp vào; vận tốc dòng chảy ngang trong mô hình: 28 cm/s; thời gian vận hành: 12h; chênh lệch nhiệt độ: $\Delta T_1 = T_{\text{nóng}} 55^\circ\text{C} - T_{\text{lạnh}} 20^\circ\text{C}$; $\Delta T_2 = T_{\text{nóng}} 60^\circ\text{C} - T_{\text{lạnh}} 20^\circ\text{C}$; $\Delta T_3 = T_{\text{nóng}} 65^\circ\text{C} - T_{\text{lạnh}} 20^\circ\text{C}$; $\Delta T_4 = T_{\text{nóng}} 70^\circ\text{C} - T_{\text{lạnh}} 20^\circ\text{C}$; $\Delta T_5 = T_{\text{nóng}} 75^\circ\text{C} - T_{\text{lạnh}} 20^\circ\text{C}$.

3.3. Khả năng cô đặc độ màu và thu hồi nước sạch từ nước thải dệt nhuộm của mô hình DCMD

Trong nghiên cứu này, màng MD tổng hợp trong điều kiện thực hiện quá trình đảo pha trong bể chứa dung môi đảo pha với tỉ lệ thể tích H_2O :Isoamyl alcohol =50:50 được sử dụng để đánh giá khả năng xử lý nước thải dệt nhuộm và thu hồi nước sạch cho tái sử dụng. Thí nghiệm được thực hiện với nhiệt độ dòng nóng của nước thải dệt nhuộm đầu vào là 70°C và dòng nước lạnh là 20°C trong suốt 16 giờ. Thông lượng dòng nước thấm của hệ thống DCMD giảm đáng kể từ 26,11 $\text{L/m}^2\text{h}$ tại thời điểm 1 giờ xuống còn 14,15 $\text{L/m}^2\text{h}$ sau 16 giờ, tương ứng với mức giảm 45,8% (Hình 6). Sự giảm này chủ yếu do suy giảm sự chênh lệch áp suất hơi qua màng, do độ màu của dòng nước thải dệt nhuộm cấp vào tăng từ 1651 PtCo lên 3862 PtCo (Hình 7). Sự gia tăng độ màu trong nước thải đầu vào phản ánh nồng độ thuốc nhuộm trong dung dịch tăng lên, làm tăng độ nhớt của dung dịch và giảm gradient áp suất hơi, yếu tố chính thúc đẩy quá trình chưng cất màng.

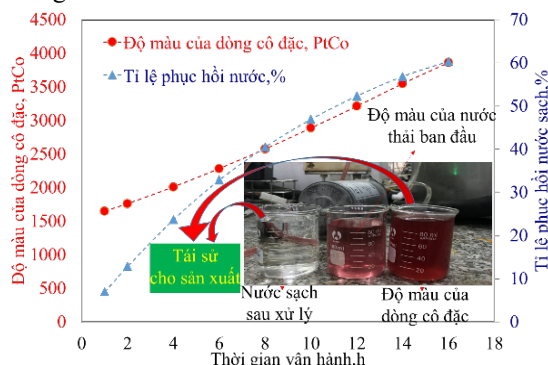


Hình 6. Thay đổi thông lượng thấm, hiệu quả xử lý độ màu và độ dẫn điện của dòng nước sau xử lý với thời gian vận hành

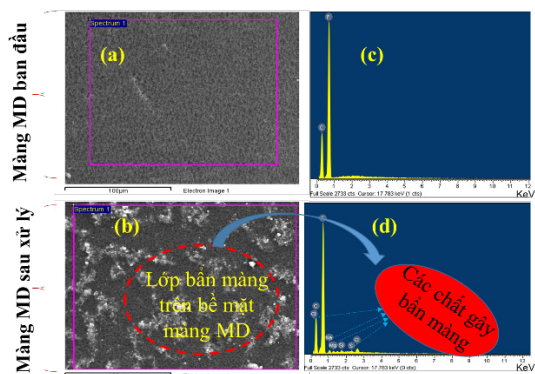
Ngoài ra, bản màng cũng là một yếu tố quan trọng góp phần vào sự giảm thông lượng nước thấm theo thời gian. Kết quả phân tích hình ảnh SEM cho thấy sự hình thành một lớp bẩn trên bề mặt màng MD sau khi xử lý so với màng MD ban đầu (Hình 8a và Hình 8b). Kết quả quan sát hình ảnh EDX cho thấy có sự xuất hiện của các peak mới như Cl, Na, Mg và S ở màng MD sau khi xử lý với nước thải dệt nhuộm (Hình 8d). Điều này có thể là do nước thải dệt nhuộm chứa các hợp chất hữu cơ và chất rắn lơ lửng, có thể bám trên bề mặt màng hoặc trong các lỗ rỗng, làm giảm diện tích bề mặt hiệu quả cho quá trình vận chuyển hơi nước. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về chưng cất màng tiếp xúc trực tiếp trong xử lý nước thải dệt nhuộm (Criscuoli et al., 2008; Ramlow et al., 2017; Yang et al., 2021; Fortunato et al., 2021; Rodrigues et al., 2025). Hình 6 cũng chỉ ra rằng độ dẫn điện của dòng nước thấm tăng dần từ 7,94 $\mu\text{S/cm}$ tại thời điểm 1 giờ lên 19,23 $\mu\text{S/cm}$ sau 16 giờ. Nguyên nhân của sự gia tăng độ dẫn điện của dòng nước thấm là do hiện tượng ướt màng MD. Sau 16h vận hành, góc tiếp xúc của màng MD giảm từ 135° xuống 118° dẫn đến các ion chứa trong nước thải dệt nhuộm (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) có thể đi qua màng cùng với hơi nước, làm tăng EC của dòng nước thấm. Tuy nhiên, với EC vẫn dưới 20 $\mu\text{S/cm}$, chất lượng dòng nước thấm của màng MD có tiềm năng tái sử dụng nước trong ngành sản xuất dệt nhuộm.

Bên cạnh đó, quá trình MD duy trì hiệu quả loại bỏ độ màu vượt quá 99% trong suốt 16 giờ vận hành (Hình 6). Kết quả này cho thấy công nghệ màng MD trong nghiên cứu hiện tại có hiệu suất xử lý độ màu cao hơn so với hệ thống kết hợp ozon và phản ứng sinh học màng động kỵ khí (O_3 -DAMBR) được Berkessa et al. (2020) áp dụng để xử lý nước thải dệt nhuộm, với hiệu suất loại bỏ độ màu đạt 97%. Tuy nhiên, hiệu quả này giảm nhẹ từ 99,80% xuống 99,15% sau 16 giờ. Sự suy giảm nhỏ này có thể là

do màng bị bẩn làm giảm áp suất gia nhập chất lỏng của màng MD, điều này dẫn đến một lượng nhỏ dung dịch chứa thuốc nhuộm đi qua các lỗ rỗng theo thời gian.



Hình 7. Thay đổi độ màu của dòng cô đặc và tỷ lệ phục hồi nước sạch với thời gian vận hành



Hình 8. So sánh mức độ bẩn màng MD

Ghi chú: (a) và (b) hình ảnh SEM bề mặt màng MD lần lượt của màng MD ban đầu và màng MD đã qua sử dụng, (c) và (d) hình ảnh EDX lần lượt của màng MD ban đầu và màng MD đã qua sử dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

- Alkhudhiri, A., Darwish, N., & Hilal, N. (2012). Membrane distillation: A comprehensive review. *Desalination*, 287, 2–18. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.027>
- Alsebaei, M. K., Ahmad, A. L., & Ooi, B. S. (2024). Construction of wetting resistance surface of highly hydrophobic PVDF-HFP/rGO coated supported PVDF hollow fiber composite membrane for membrane distillation. *Chemical Engineering Journal*, 493, 152565. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2024.152565>
- Bamasag, A., Almatrafi, E., Alqahtani, T., Phelan, P., Ullah, M., Mustakeem, M., Obaid, M., & Ghaffour, N. (2023). Recent advances and future prospects in direct solar desalination systems using membrane distillation technology. *Journal*

of *Cleaner Production*, 385. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.135737>

Enamul, H. M., Md Nordin, N. A. H., & Shamsuddin, M. R. (2024). Fabrication and characterization of highly hydrophobic PVDF membrane by phase inversion method with high anti-wettability characteristics. *E3S Web Conf.*, 516. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451602007>

Berkessa, Y. W., Yan, B., Li, T., Jegatheesan, V., Zhang, Y. (2020). Treatment of anthraquinone dye textile wastewater using anaerobic dynamic membrane bioreactor: Performance and microbial dynamics. *Chemosphere*, 238, 124539. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124539>

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, việc chế tạo màng MD sử dụng H₂O:Isoamyl alcohol với tỷ lệ thể tích 50:50 trong quá trình đảo pha để xử lý và tái sử dụng nước thải dệt nhuộm đã được thực hiện thành công. Sau 16 giờ vận hành, hệ thống DCMD đã cô đặc độ màu nước thải từ 1651 PtCo lên 3862 PtCo, đạt mức độ màu tương đương với độ màu pha ban đầu để nhuộm vải tại nhà máy dệt nhuộm Bảo Lộc. Tỷ lệ thu hồi nước sạch đạt 60,35%, với chất lượng nước cao (EC < 20 μ S/cm), cho thấy có tiềm năng cho tái sử dụng nước và tái chế dung dịch thuốc nhuộm hiệu quả. Việc tận dụng nhiệt thải từ nước thải dệt nhuộm để vận hành hệ thống MD cũng góp phần quan trọng vào việc giảm chi phí năng lượng. Những kết quả này cho thấy công nghệ màng MD tổng hợp trong nghiên cứu có triển vọng là một giải pháp xử lý nước hiệu quả và thân thiện môi trường cho ngành dệt nhuộm tại Bảo Lộc.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả xin chân thành cảm ơn Bộ Giáo Dục và Đào Tạo đã tài trợ kinh phí cho nghiên cứu này thông qua dự án mã số B2024-DLA-03.

- Criscuoli, A., Zhong, J., Figoli, A., Carnevale, M. C., Huang, R., & Drioli, E. (2008). Treatment of dye solutions by vacuum membrane distillation. *Water Research*, 42(20), 5031–5037. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2008.09.014>
- Fontananova, E., Jansen, J. C., Cristiano, A., Curcio, E., & Drioli, E. (2006). Effect of additives in the casting solution on the formation of PVDF membranes. *Desalination*, 192(1–3), 190–197. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2005.09.021>
- Fortunato, L., Elcik, H., Blankert, B., Ghaffour, N., & Vrouwenvelder, J. (2021). Textile dye wastewater treatment by direct contact membrane distillation: Membrane performance and detailed fouling analysis. *Journal of Membrane Science*, 636. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119552>
- Ho, Q. P., Truong-Hoang, N., Lam-Phuc, T., Nguyen, T. B. T., Nguyen-Van, D., Pham, H. H. G., & Huynh, L. H. (2024). Optimization of non-thermal plasma process to remove methyl blue towards application in wastewater treatment. *CTU Journal of Innovation and Sustainable Development*, 16(Special issue: ICCEE SE-), 64–73. <https://doi.org/10.22144/ctujoisd.2024.283>
- Hou, C., Du, L., Li, Y., Guo, M., Zhou, J., & Qiao, S. (2023). Superhydrophobic PVDF membrane formed by crystallization process for direct contact membrane distillation. *IScience*, 26(5), 106464. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106464>
- Julian, H., Nurgirisia, N., Qiu, G., Ting, Y. P., & Wenten, I. G. (2022). Membrane distillation for wastewater treatment: Current trends, challenges and prospects of dense membrane distillation. *Journal of Water Process Engineering*, 46. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2022.102615>
- Kusuma, N. C., Purwanto, M., Sudrajat, M. A., Jaafar, J., Othman, M. H. D., Aziz, M. H. A., Raharjo, Y., & Qtaishat, M. R. (2021). Fabrication and characterization of modified PVDF hollow fiber membrane coated with hydrophobic surface modifying macromolecules for desalination application. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105582. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105582>
- Ngo, M. T. T., Nguyen, H. N. M., Nguyen, N. C., Nguyen, P. T., & Bui, X. T. (2023). Applications and challenges of membrane distillation in water reuse. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Membrane Technology for Sustainable Water and Energy Management*, 315–329. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19180-0.00014-6>
- Nthunya, L. N., Chong, K. C., Lai, S. O., Lau, W. J., López-Maldonado, E. A., Camacho, L. M., Shirazi, M. M. A., Ali, A., Mamba, B. B., Osial, M., Pietrzyk-Thel, P., Pregowska, A., & Mahlangu, O. T. (2024). Progress in membrane distillation processes for dye wastewater treatment: A review. *Chemosphere*, 360. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142347>
- Ramlow, H., Machado, R. A. F., & Marangoni, C. (2017). Direct contact membrane distillation for textile wastewater treatment: A state of the art review. *Water Science and Technology*, 76(10), 2565–2579. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.449>
- Rauter, M. T., Schnell, S. K., & Kjelstrup, S. (2021). Cassie–Baxter and Wenzel States and the Effect of Interfaces on Transport Properties across Membranes. *The Journal of Physical Chemistry B*, 125(46), 12730–12740. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c07931>
- Ravi, J., Othman, M. H. D., Matsuura, T., Ro'il Bilad, M., El-badawy, T. H., Aziz, F., Ismail, A. F., Rahman, M. A., & Jaafar, J. (2020). Polymeric membranes for desalination using membrane distillation: A review. *Desalination*, 490, 114530. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2020.114530>
- Razaqpur, A. G., Wang, Y., Liao, X., Liao, Y., & Wang, R. (2021). Progress of photothermal membrane distillation for decentralized desalination: A review. *Water Research*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117299>
- Rodrigues, M. E., Cucciniello, R., Farinha, A., Vrouwenvelder, J., & Fortunato, L. (2025). Wetting challenges in treatment of raw textile wastewater by membrane distillation: A case study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101197. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2025.101197>
- Santoro, S., Avci, A. H., Politano, A., & Curcio, E. (2022). The advent of thermoplasmonic membrane distillation. *Chemical Society Reviews*, 51(14), 6087–6125. <https://doi.org/10.1039/d0cs00097c>
- Tan, Y. Z., Chew, J. W., & Krantz, W. B. (2016). Effect of humic-acid fouling on membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 504, 263–273. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2015.12.051>
- Nguyen, H.T., Duong, H. C., Chen, S. S., Le H.Q., Ngo, H. H., Cong, C. D., Nguyen, N. C., Nguyen, U. T.T., & Huynh, D. D. (2025). Enhancing membrane distillation stability: Isoamyl alcohol coagulation as a novel strategy to mitigate membrane swelling at elevated temperatures. *Environmental Technology and*

- Innovation*, 37(November 2024), 104029.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104029>
- Tijing, L. D., Woo, Y. C., Choi, J. S., Lee, S., Kim, S. H., & Shon, H. K. (2015). Fouling and its control in membrane distillation—A review. *Journal of Membrane Science*, 475, 215–244.
<https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2014.09.042>
- Yadav, A., Labhasetwar, P. K., & Shahi, V. K. (2022). Membrane distillation crystallization technology for zero liquid discharge and resource recovery: Opportunities, challenges and futuristic perspectives. *Science of the Total Environment*, 806.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150692>
- Yadav, M., Upadhyaya, S., & Singh, K. (2024). Preparation and characterization of PVDF Flat sheet membrane for VMD: Effect of different non-solvent additives and solvents in dope solution. *Membrane and Water Treatment*, 15(4), 163–176.
<https://doi.org/10.12989/mwt.2024.15.4.163>
- Yadav, P., Farnood, R., & Kumar, V. (2022). Superhydrophobic modification of electrospun nanofibrous Si@PVDF membranes for desalination application in vacuum membrane distillation. *Chemosphere*, 287.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132092>
- Yang, G., Zhang, J., Peng, M., Du, E., Wang, Y., Shan, G., Ling, L., Ding, H., Gray, S., & Xie, Z. (2021). A mini review on antiwetting studies in membrane distillation for textile wastewater treatment. *Processes*, 9(2), 1–16.
<https://doi.org/10.3390/pr9020243>
- Zhang, X., Koirala, R., Pramanik, B., Fan, L., Date, A., & Jegatheesan, V. (2023). Challenges and advancements in membrane distillation crystallization for industrial applications. *Environmental Research*, 234, 116577.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2023.116577>