

DOI:10.22144/ctujos.2026.112

TỐI ƯU THÔNG SỐ VẬN HÀNH CHO HỆ CHUNG CÁT MÀNG TRỰC TIẾP (DCMD) TRONG QUÁ TRÌNH XỬ LÝ NƯỚC BIỂN

Nguyễn Công Nguyên, Phạm Hậu Thanh Việt, Nguyễn Thị Hậu*, Nguyễn Thị Mỹ Lê, Trương Đông Phương, Lê Vũ Trâm Anh và Nguyễn Thị Tô Uyên

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

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

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 21/08/2025

Sửa bài (Revised): 12/09/2025

Duyệt đăng (Accepted): 15/04/2026

Title: Optimizing operation parameters for direct contact membrane distillation (DCMD) system in seawater desalination

Author(s): Nguyen Cong Nguyen, Pham Hau Thanh Viet, Nguyen Thi Hau*, Nguyen Thi My Le, Truong Dong Phuong, Le Vu Tram Anh and Nguyen Thi To Uyen

Affiliation(s): Faculty of Chemistry and Environment, Dalat University, Dalat, Viet Nam

TÓM TẮT

Biến đổi khí hậu đang làm gia tăng xâm nhập mặn và thiếu nước ngọt ở nhiều địa phương, đặt ra nhu cầu về giải pháp khử mặn hiệu quả, bền vững. Trong bối cảnh đó, công nghệ chung cát màng (MD) được xem là giải pháp có nhiều tiềm năng cho chất lượng nước tốt và chi phí thấp nhờ tận dụng được năng lượng mặt trời và nhiệt thải. Tuy nhiên, thách thức còn nằm ở việc lựa chọn màng MD phù hợp và xác lập bộ thông số vận hành tối ưu để đồng thời đạt thông lượng và hiệu suất tách muối cao, ổn định. Do vậy, nghiên cứu này tập trung khảo sát có hệ thống hệ chung cát màng trực tiếp (DCMD) sử dụng màng PVDF-MD tổng hợp bằng dung môi isoamyl alcohol, đánh giá ảnh hưởng của chênh lệch nhiệt độ, tốc độ dòng chảy ngang, nồng độ muối đầu vào và thời gian vận hành. Kết quả cho thấy điều kiện tối ưu ở 70°C (dòng nóng) và 25°C (dòng lạnh) với tốc độ dòng 0,33 m/s, đạt thông lượng 20,5 LMH và hiệu suất tách muối >99,9%, đồng thời hạn chế thấm ướt lỗ màng. Màng vẫn vận hành ổn định với dung dịch nước biển có nồng độ muối cao và sau 30 ngày xử lý nước biển thực, nước thấm duy trì đạt tiêu chuẩn nước uống.

Từ khóa: Bản màng, chung cát màng, khan hiếm nước khử muối, kỹ nước

ABSTRACT

Climate change is intensifying saltwater intrusion and freshwater scarcity in many regions, creating an urgent need for effective, sustainable desalination solutions. In this context, membrane distillation (MD) is regarded as a highly promising option for producing high-quality water at low cost by utilizing solar energy and waste heat. However, key challenges remain in selecting suitable MD membranes and establishing optimal operating parameters to simultaneously achieve high flux and stable salt rejection. Therefore, this study systematically investigates a direct contact membrane distillation (DCMD) system using a PVDF-MD membrane fabricated with isoamyl alcohol as the solvent, evaluating the effects of temperature difference, cross-flow velocity, feed salinity, and operating time. The results indicate optimal conditions of 70 °C (hot/feed) and 25 °C (cold/permeate) with a cross-flow velocity of 0.33 m/s, delivering a permeate flux of 20.5 LMH and salt rejection >99.9% while mitigating pore wetting. The membrane also operated stably with a high concentration of brine and, after 30 days of continuous treatment of real seawater, produced distillate meeting drinking-water standards.

Keywords: Membrane fouling, membrane distillation, water scarcity desalination, hydrophobic

1. GIỚI THIỆU

Biến đổi khí hậu đang làm tình trạng hạn hán, xâm nhập mặn và khan hiếm nước ngọt trên toàn cầu ngày càng trở nên nghiêm trọng, đặc biệt tại các quốc gia có nhiều tỉnh ven biển như Việt Nam. Dự báo đến năm 2030, hàng tỷ người rơi vào nguy cơ thiếu nước sinh hoạt do nhu cầu nước sạch vượt quá nguồn cung (Bamgboye et al., 2025). Do đó, việc phát triển các công nghệ hiệu quả để chuyển hóa nước biển thành nước ngọt là vô cùng cấp thiết. Trong các công nghệ hiện có (chưng cất, điện thẩm tích, thẩm thấu thuận), thẩm thấu ngược (Reverse Osmosis - RO) được sử dụng phổ biến nhất nhờ khả năng tạo ra nước ngọt chất lượng cao với thông lượng nước thẩm lớn (Kim & Hong, 2023; Salari et al., 2025). Tuy nhiên, hệ RO vận hành ở áp suất rất cao, tiêu tốn nhiều năng lượng và dễ gặp vấn đề bám bẩn màng, làm tăng chi phí vận hành cũng như giảm hiệu quả thực tế (Philibert et al., 2024).

Trước thực trạng đó, các giải pháp mới bền vững và tiết kiệm năng lượng cho xử lý nước biển là hết sức cần thiết. Trong đó, chưng cất màng (Membrane Distillation - MD) nổi bật nhờ tận dụng nguồn nhiệt thấp (nhiệt thải, năng lượng mặt trời), loại bỏ muối hiệu quả và vận hành linh hoạt (Joshi et al., 2024). Trong quá trình MD, màng vi xốp kỵ nước là yếu tố then chốt: cho phép hơi nước đi qua, đồng thời giữ lại muối và các chất không bay hơi (Liao et al., 2013; Ngo et al., 2022).

Hiệu quả của quá trình MD không chỉ phụ thuộc vào đặc tính màng mà còn bị chi phối nhiều bởi các thông số vận hành như chênh lệch nhiệt độ, tốc độ dòng chảy, nồng độ muối đầu vào và thời gian vận hành (Eykens et al., 2016; Martínez & Rodríguez-Maroto, 2008). Việc tối ưu các thông số này là điều kiện tiên quyết để nâng cao hiệu quả tách muối, duy trì thông lượng ổn định và kéo dài tuổi thọ màng, những yếu tố quyết định cho ứng dụng rộng rãi công nghệ MD (Gontarek-Castro & Castro-Muñoz, 2024).

Hiện nay, màng MD thường được chế tạo bằng phương pháp đảo pha, kéo sợi hoặc kéo màng nóng chảy để tạo cấu trúc xốp kỵ nước. Trong đó, đảo pha được sử dụng rộng rãi nhất nhờ quy trình đơn giản, dễ kiểm soát về cấu trúc (kích thước/lỗ rỗng, độ xốp, tính kỵ nước) và cho hiệu suất vận hành ổn định. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu cải tiến vật liệu màng (PVDF, PTFE, PP,...), phần lớn màng MD thương mại hiện nay vẫn đối mặt với hai hạn chế lớn: (i) tính kỵ nước chưa đủ cao khiến thông lượng thấp, (ii) độ bền nhiệt kém, dễ thấm ướt và suy giảm hiệu quả khi vận hành ở nhiệt độ cao (Alkhubiri et

al., 2012; Julian et al., 2022; Lou et al., 2025). Một số giải pháp dùng dung môi hữu cơ (methanol, 2-propanol) giúp tăng tính kỵ nước, nhưng lại làm giảm độ bền nhiệt do màng dễ trương nở, biến dạng ở nhiệt độ cao (Nejati et al., 2015).

Trong nghiên cứu trước, màng PVDF-MD sử dụng isoamyl alcohol làm dung môi đồng tụ được tổng hợp thành công cho thấy sự cải thiện rõ rệt về tính kỵ nước (góc tiếp xúc $152 \pm 2,3^\circ$), độ xốp ($84 \pm 2,5\%$), đồng thời duy trì thông lượng ổn định (19.2 LMH) và hiệu suất tách muối cao ($>99,8\%$) ngay cả ở điều kiện nhiệt độ vận hành cao (Thi, et al., 2025). Đặc biệt, do isoamyl alcohol có nhiệt độ sôi cao ($>130^\circ\text{C}$), khác với các dung môi thông thường như methanol hay ethanol ($<80^\circ\text{C}$), nên màng PVDF-MD chế tạo được không bị phồng khi tiếp xúc với dòng dung dịch đầu vào ở nhiệt độ cao. Tuy nhiên, nghiên cứu đó chủ yếu tập trung vào đặc tính vật liệu của màng, trong khi vẫn còn thiếu các khảo sát có hệ thống về ảnh hưởng của các thông số vận hành thực tế (chênh lệch nhiệt độ, tốc độ dòng chảy ngang, nồng độ muối đầu vào) đối với hiệu quả và độ bền lâu dài của hệ MD khi sử dụng loại màng này.

Vì vậy, nghiên cứu này tập trung khảo sát một cách hệ thống ảnh hưởng của các thông số vận hành quan trọng gồm chênh lệch nhiệt độ, tốc độ dòng chảy ngang, nồng độ muối đầu vào và thời gian vận hành đến hiệu quả và độ ổn định lâu dài của hệ thống DCMD sử dụng màng PVDF-MD chế tạo bằng isoamyl alcohol. Kết quả nghiên cứu sẽ đóng góp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng và thương mại hóa công nghệ DCMD trong xử lý nước biển, giải quyết thách thức về biến đổi khí hậu tại Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Màng PVDF-MD sử dụng trong nghiên cứu này được tổng hợp theo quy trình đã công bố trước đây của nhóm nghiên cứu, với các tính chất được tổng hợp ở Bảng 1. Nước lợ và nước biển tổng hợp được chuẩn bị bằng cách hòa tan lần lượt 20, 35, 50, 65 và 80 g NaCl trong 1 lít nước khử ion (DI), tương ứng với nồng độ tổng chất rắn hòa tan (TDS) 20, 35, 50, 65 và 80 g/L. Ngoài ra, nước biển thực được lấy từ vùng ven biển tỉnh Ninh Thuận cũng được sử dụng làm nước đầu vào cho các thí nghiệm DCMD.

Bảng 1. Tính chất của màng PVDF-MD

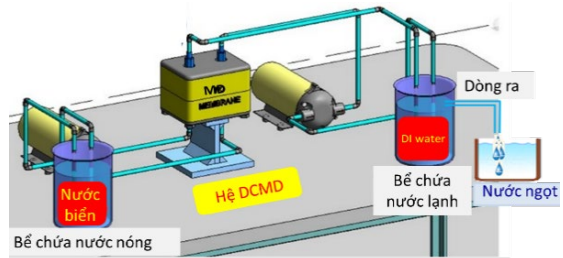
Thông số	Giá trị
Vật liệu ở bề mặt hoạt động	PVDF
Vật liệu ở bề mặt hỗ trợ	Polyethylene terephthalate (PET)
Độ rỗng (%)	84 ± 2,5
Góc tiếp xúc (°)	152 ± 2,3
Kích thước lỗ màng (µm)	0,31 ± 0,06

(Nguồn: Thi et al., 2025)

2.2. Thiết lập thí nghiệm DCMD

Quá trình khử mặn nước biển được tiến hành trên hệ thống chưng cất màng quy mô phòng thí nghiệm dạng dòng chảy ngang (Sterlitech, USA), như minh họa ở Hình 1. Mô-đun DCMD bằng acrylic gồm hai nửa, mỗi nửa chứa một kênh dòng chảy có kích thước 4,5 cm (rộng), 9,2 cm (dài) và 0,2 cm (cao), cho diện tích màng MD hiệu quả là 41 cm². Hai bơm HF-8936 (Đài Loan) được sử dụng để tuần hoàn dòng nước đầu vào và dòng nước thấm qua màng. Nhiệt độ của các bể chứa được kiểm soát bằng hai bể điều nhiệt (D-606, Deng Yng, Đài Loan). Nhiệt độ ở bể lạnh cố định là 25°C, nhiệt độ ở bể nóng (chứa nước muối) được điều chỉnh là 40°C, 50°C, 60°C, 70°C và 80°C để đạt nhiệt độ chênh lệch giữa dòng nóng dòng lạnh lần lượt là 15°C, 25°C, 35°C, 45°C và 55°C. Tốc độ dòng chảy ngang qua mô đun màng MD được thay đổi lần lượt từ 0,22 m/s, 0,33 m/s và 0,66 m/s bằng cách thay đổi lưu lượng bơm cho dòng nóng và dòng lạnh. Trong mỗi thí nghiệm, nước biển từ bể chứa và nước khử ion từ bể thẩm được tuần hoàn liên tục qua hai nửa mô-đun rồi quay lại bể chứa tương ứng. Sự thay đổi khối lượng nước thấm được ghi nhận bằng cân điện tử, từ đó tính toán thông lượng nước thấm. Đối với thí nghiệm khảo sát về ảnh hưởng của nhiệt độ, tốc độ dòng chảy ngang và nồng độ muối đầu vào đối với hiệu quả xử lý, thì mô hình DCMD được đánh giá trong thời gian 10 h. Thí nghiệm đánh giá hiệu quả xử lý nước biển thực của mô hình DCMD tại điều kiện tối ưu được vận hành liên tục trong 30 ngày nhằm kiểm tra tính ổn định của màng MD, ở đó nước biển được châm thêm vào bể chứa nước nóng nhằm duy trì TDS trong khoảng 35 g/L đến 50 g/L.

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



Hình 1. Hệ thống DCMD quy mô phòng thí nghiệm cho khử mặn nước biển

$$J_w = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \tag{1}$$

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

Hiệu quả loại xử lý (R) được tính theo công thức:

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

Trong đó, C_p và C_f lần lượt là TDS trong dòng nước thấm và dòng nước đầu vào. Hiệu ứng pha loãng được tính khi xác định TDS trong dòng nước thấm theo công thức:

$$C_p = \frac{C_1 m_1 - C_0 m_0}{m_1 - m_2} \tag{3}$$

Trong đó, m_0 và m_1 lần lượt là khối lượng nước ban đầu và cuối cùng của dòng nước thấm qua màng MD và C_0 và C_1 là TDS ban đầu và cuối cùng.

2.3. Phương pháp phân tích

Góc tiếp xúc của màng MD được xác định bằng thiết bị đo góc tiếp xúc CAM 100 (Opto-Mechatronics P Ltd., Ấn Độ). Mức độ bám bẩn của màng được phân tích bằng phổ tán xạ tia X năng lượng (EDX, Philips XL30). Tổng chất rắn hòa tan (TDS) trong cả dòng nước đầu vào và dòng thấm được đo bằng máy đo TDS (HANNA HI 98194, USA).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Khảo sát nhiệt độ vận hành tối ưu cho màng MD trên mô hình DCMD

Để đánh giá ảnh hưởng của sự chênh lệch nhiệt độ giữa dòng nóng và dòng lạnh đến hiệu quả vận hành của mô hình DCMD, trong nghiên cứu này, nhiệt độ dòng lạnh được giữ cố định ở 25°C (tương ứng với nhiệt độ phổ biến của nước biển tại Việt Nam), trong khi nhiệt độ dòng nóng được thay đổi từ 45°C đến 80°C (tương ứng với $\Delta T = 15, 25, 35, 45$ và 55°C). Màng MD sử dụng trong thí nghiệm được tổng hợp từ 15% PVDF hòa tan trong hỗn hợp

dung môi DMF và isoamyl alcohol, theo quy trình đã được công bố trong các nghiên cứu trước của nhóm. Tốc độ dòng chảy cắt ngang của dòng nóng và dòng lạnh được duy trì ở 0,22 m/s.

Kết quả được thể hiện tại Hình 2 và 3 cho thấy chênh lệch nhiệt độ (ΔT) tác động mạnh mẽ đến thông lượng nước thẩm (J_w), hiệu suất loại bỏ muối (H%) và chất lượng nước đầu ra (TDS). Cụ thể, khi ΔT tăng từ 15°C lên 55°C, J_w tăng từ 5,2 lên 24,7 LMH, tương ứng với mức tăng khoảng 375%. Đặc biệt, mỗi lần ΔT tăng thêm 10°C, thông lượng nước thẩm đều tăng rõ rệt, ví dụ từ 15°C lên 25°C, J_w tăng 161%; từ 25°C lên 35°C tăng 26%; từ 35°C lên 45°C tăng 19,7% và từ 45°C lên 55°C tăng 20,5%.

Từ các kết quả trên có thể thấy, khi nhiệt độ dòng nóng tăng lên, thông lượng nước thẩm qua màng cũng tăng tương ứng, điều này đã được ghi nhận trong nhiều nghiên cứu trước đây (Khalifa et al., 2017; Luo & Lior, 2017). Nguyên nhân chính là do khi nhiệt độ dòng lạnh được giữ cố định, việc tăng nhiệt độ dòng nóng sẽ làm tăng áp suất riêng phần của hơi nước ở phía này, dẫn đến tăng thông lượng dòng nước thẩm theo phương trình sau:

$$J_w = B_m (p_f - p_p) \quad (4)$$

trong đó, J_w là thông lượng thẩm, B_m là hệ số truyền khối của màng, p_f và p_p lần lượt là áp suất hơi nước ở phía dòng nóng và dòng lạnh. Áp suất hơi nước được xác định bởi phương trình Antoine:

$$p = \exp(23.328 - 3841/(T - 45)) \quad (5)$$

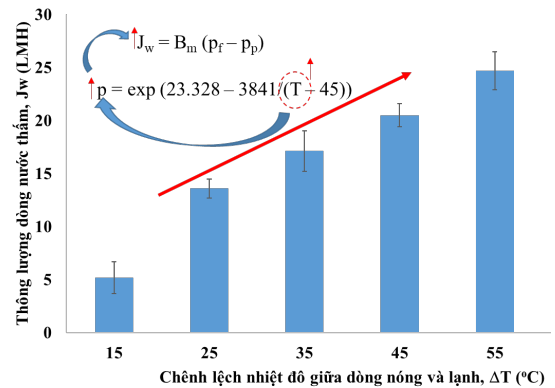
Như vậy, ở cùng điều kiện nhiệt độ dòng lạnh (25°C), khi tăng nhiệt độ dòng nóng sẽ làm tăng đáng kể áp suất hơi nước ở phía này, dẫn đến chênh lệch áp suất hơi nước qua màng lớn hơn, từ đó thúc đẩy thông lượng nước thẩm đạt giá trị cao hơn. Đồng thời, từ phương trình trên có thể thấy, trong cùng một điều kiện nhiệt độ dòng mát ở 25°C, khi áp suất hơi nước dòng vào tăng lên thì thông lượng dòng thẩm đạt được sẽ tăng lên.

Tuy nhiên, khi nhiệt độ dòng nóng tăng quá cao ($\geq 80^\circ\text{C}$, $\Delta T=55^\circ\text{C}$), hiệu quả loại bỏ muối bắt đầu suy giảm nhẹ, từ 99,97% xuống còn 99,89% và TDS trong dòng thẩm tăng từ 12 lên 37 mg/L. Hiện tượng này được lý giải là do ở nhiệt độ cao, màng dễ bị giãn nở nhiệt, giảm sức căng bề mặt dung dịch, tăng nguy cơ thấm ướt lỗ màng và rò rỉ muối qua màng, ảnh hưởng đến chất lượng nước đầu ra và tuổi thọ màng MD.

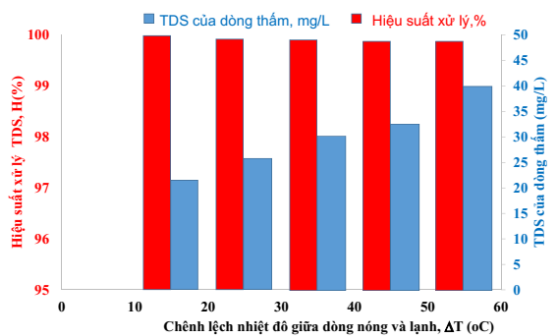
Tại $\Delta T=45^\circ\text{C}$ (nhiệt độ dòng nóng 70°C, dòng lạnh 25°C), thông lượng nước thẩm đạt 20,5 LMH, tăng 296% so với $\Delta T=15^\circ\text{C}$, hiệu suất loại bỏ muối

vẫn duy trì rất cao (99,94%) và TDS chỉ ở mức 22 mg/L, rất thấp so với quy chuẩn QCVN 01-1:2024/BYT (≤ 1000 mg/L). Điều này cho thấy, đây là điều kiện vận hành tối ưu vì vừa đạt thông lượng nước cao, vừa duy trì chất lượng nước đầu ra ổn định (TDS dòng thẩm thấp), đồng thời hạn chế rủi ro kỹ thuật khi vận hành ở nhiệt độ quá cao.

Như vậy, nhiệt độ vận hành tối ưu được lựa chọn cho hệ thống DCMD là dòng nóng 70°C và dòng lạnh 25°C ($\Delta T=45^\circ\text{C}$). Sự lựa chọn này vừa phù hợp với thực tiễn nhiệt độ nước biển tại Việt Nam, vừa đảm bảo hiệu quả tách nước biển cao, chất lượng nước đầu ra ổn định, tiêu tốn năng lượng hợp lý và kéo dài tuổi thọ màng trong điều kiện vận hành lâu dài.



Hình 2. Ảnh hưởng của chênh lệch nhiệt độ tới thông lượng dòng thẩm của màng MD (Thời gian vận hành 10 h)



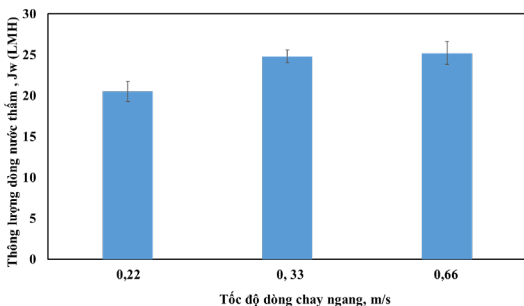
Hình 3. Ảnh hưởng của chênh lệch nhiệt độ tới hiệu quả xử lý của màng MD (Thời gian vận hành 10 h)

3.2. Đánh giá ảnh hưởng của tốc độ dòng chảy ngang tới hiệu quả của mô hình DCMD

Kết quả thí nghiệm cho thấy, tốc độ dòng chảy ngang là một trong những thông số vận hành quan trọng ảnh hưởng trực tiếp tới hiệu suất của quá trình

DCMD. Ở nhiệt độ chênh lệch dòng nóng-lạnh cố định ($\Delta T = 45^\circ\text{C}$), khi tăng tốc độ dòng chảy ngang từ 0,22 lên 0,33 m/s, thông lượng nước thấm (J_w) tăng rõ rệt từ 20,5 lên 24,8 LMH (tăng ~21%), trong khi hiệu suất loại bỏ muối (H%) vẫn duy trì rất cao (> 99,9%) và TDS dòng thấm tăng không đáng kể (32 lên 34 mg/L) được thể hiện ở Hình 4 và 5. Việc tăng tốc độ dòng chảy ngang giúp giảm hiện tượng phân cực nhiệt và nồng độ tại bề mặt màng, qua đó cải thiện truyền nhiệt và khối lượng, dẫn đến tăng thông lượng thấm (Nguyen et al., 2018).

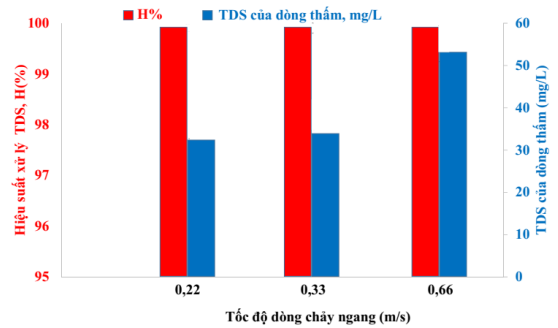
Tuy nhiên, khi tăng tốc độ dòng chảy ngang lên 0,66 m/s, thông lượng chỉ tăng nhẹ lên 25,2 LMH (so với 24,8 LMH ở 0,33 m/s), nhưng hiệu suất loại bỏ muối giảm còn 99,85% và TDS dòng thấm tăng lên 53 mg/L. Đây là dấu hiệu rõ ràng của hiện tượng thấm ướt màng (pore wetting), do vận tốc dòng quá cao tạo áp lực lớn lên bề mặt màng, thúc đẩy nước và ion muối xâm nhập qua lỗ màng, làm giảm chất lượng nước đầu ra. Kết quả được thể hiện ở Bảng 2 cũng cho thấy tại 0,66 m/s, góc tiếp xúc của màng MD giảm mạnh (từ 150° xuống 116°), chứng tỏ màng đã bị ướt và kéo theo muối đi qua cùng với hơi nước. Hiện tượng này phù hợp với các nghiên cứu thực nghiệm trước đây, khẳng định rằng tốc độ dòng chảy quá cao có thể gây thấm ướt màng, làm tăng độ dẫn điện và TDS của dòng thấm, từ đó ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu quả tách muối của hệ thống (Nguyen et al., 2018).



Hình 4. Ảnh hưởng của tốc độ dòng chảy ngang tới thông lượng thấm của mô hình DCMD

(Ghi chú: Thời gian vận hành mô hình DCMD là 10h, chênh lệch nhiệt độ dòng nóng và lạnh = 45°C)

Như vậy, tốc độ dòng chảy ngang 0,33 m/s được xác định là tối ưu trong điều kiện nghiên cứu này. Ở mức này, hệ thống DCMD vừa đạt được thông lượng nước thấm cao, vừa đảm bảo hiệu suất loại bỏ muối và chất lượng nước đầu ra ổn định, hạn chế tối đa nguy cơ thấm ướt màng và tăng chi phí năng lượng không cần thiết. Lựa chọn này đảm bảo sự cân bằng hợp lý giữa hiệu quả vận hành và chi phí năng lượng cho quá trình.



Hình 5. Ảnh hưởng của tốc độ dòng chảy ngang tới hiệu suất xử lý của mô hình DCMD

(Ghi chú: Thời gian vận hành mô hình DCMD là 10h, chênh lệch nhiệt độ dòng nóng và lạnh = 45°C)

Bảng 2. Thay đổi góc tiếp xúc của màng MD sau khi chạy mô hình DCMD

Vận tốc dòng chảy ngang, m/s	Góc tiếp xúc ban đầu	Góc tiếp xúc sau khi chạy thí nghiệm
0,22	$151 \pm 2,4$	$144 \pm 1,8$
0,33	$153 \pm 2,8$	$135 \pm 2,1$
0,66	$150 \pm 2,1$	$116 \pm 1,7$

3.3. Đánh giá ảnh hưởng của nồng độ muối đầu vào tới sự thể hiện của màng MD trên mô hình DCMD

Thí nghiệm được tiến hành nhằm đánh giá tác động của nồng độ muối đầu vào đến hiệu suất màng MD trong mô hình DCMD. Các điều kiện vận hành được giữ cố định với nhiệt độ dòng nóng 70°C , dòng lạnh 25°C ($\Delta T = 45^\circ\text{C}$) và tốc độ dòng chảy cắt ngang là 0,33 m/s. Nồng độ NaCl đầu vào được thay đổi từ 20 g/L đến 80 g/L.

Kết quả cho thấy khi nồng độ muối đầu vào tăng, thông lượng nước thấm (J_w) có xu hướng giảm dần, trong khi hiệu suất loại bỏ muối (H%) luôn duy trì ở mức rất cao (Hình 6). Cụ thể, tại nồng độ 20 g/L, J_w đạt giá trị cao nhất là $25,4 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ và hiệu suất loại bỏ muối đạt 99,88%. Khi tăng nồng độ lên 35 g/L, J_w giảm nhẹ còn $24,8 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$, H% tăng lên 99,90%. Ở nồng độ 50 g/L và 65 g/L, J_w tiếp tục giảm còn $22,1 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ và $20,3 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$, hiệu suất loại bỏ muối vẫn rất cao, lần lượt là 99,92% và 99,93%. Cuối cùng, tại nồng độ 80 g/L, J_w đạt thấp nhất với $17,8 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$, nhưng hiệu suất loại bỏ muối vẫn duy trì ở mức 99,93%.

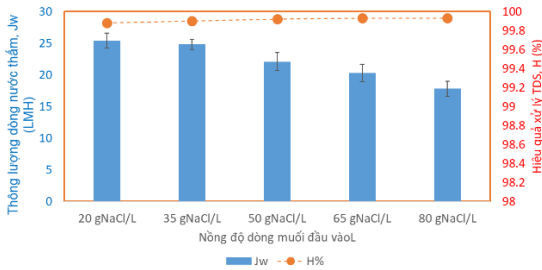
Kết quả chỉ ra rằng thông lượng nước giảm khi nồng độ muối đầu vào tăng do hai cơ chế đồng thời: (i) độ nhớt dung dịch tăng làm giảm hệ số truyền khối và gia tăng phân cực nồng độ tại bề mặt màng; (ii) phân mol nước giảm kéo theo áp suất hơi ở phía

dòng nóng giảm, từ đó làm suy giảm chênh lệch áp suất hơi qua màng và hạn chế quá trình khuếch tán hơi nước qua màng (Wang et al., 2011). Theo phương trình của Khalifa et al. (2017), J_w tỷ lệ thuận với chênh lệch áp suất hơi nước qua màng, trong khi thành phần mol nước giảm dần khi nồng độ muối tăng sẽ làm giảm áp suất hơi nước phía dòng nóng.

$$J_w = B_m \times (p_f \times \gamma_f \times x_f - p_p) \quad (6)$$

$$\gamma_f = 1 - (0,5 \times x_{NaCl}) - (10 \times x_{NaCl}^2) \quad (7)$$

Trong đó, J_w là thông lượng thấm, B_m là hệ số khuếch tán trong cân bằng, p_f và p_p lần lượt là áp suất của hơi nước ở dòng nước nóng vào và dòng thấm tại bề mặt màng, γ_f là hệ số hoạt động, x_f là phần mol của nước trong dung dịch nước mặn đầu vào, x_{NaCl} là phần mol của NaCl trong dung dịch nước mặn đầu vào.



Hình 6. Ảnh hưởng của nồng độ muối đầu vào tới sự thể hiện của màng MD trên mô hình DCMD

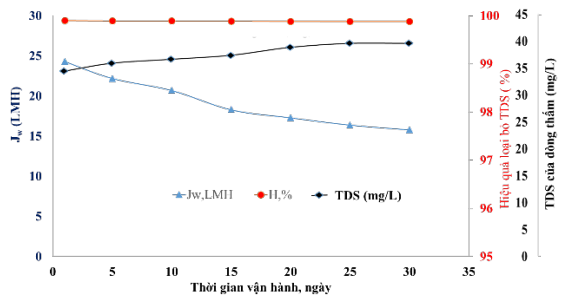
Mặc dù thông lượng nước thấm giảm nhẹ khi tăng nồng độ muối đầu vào, nhưng hiệu suất loại bỏ muối của màng MD vẫn luôn duy trì ở mức gần như tuyệt đối (từ 99,88% đến 99,93%). Điều này khẳng định khả năng vận hành ổn định và hiệu quả của màng MD tổng hợp, kể cả khi xử lý các nguồn nước biển có nồng độ muối cao (tới 80 g/L NaCl). Kết quả này minh chứng tiềm năng ứng dụng mạnh mẽ của công nghệ màng MD trong xử lý nước biển và nước lợ để thu hồi nước ngọt chất lượng cao, là giải pháp tốt ứng biến với sự biến đổi khí hậu hiện nay.

3.4. Đánh giá hiệu quả xử lý nước biển của mô hình DCMD theo thời gian

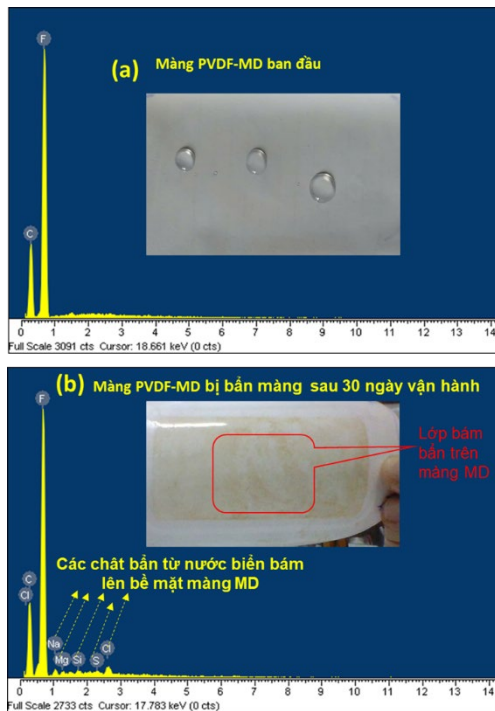
Để đánh giá khả năng vận hành lâu dài của hệ thống DCMD với nguồn nước biển thực tế, thí nghiệm được tiến hành liên tục trong 30 ngày, sử dụng nước biển lấy tại Ninh Thuận với TDS = 34.100 mg/L. Các điều kiện vận hành được giữ cố định, bao gồm chênh lệch nhiệt độ dòng nóng-lạnh 45°C (nóng 70°C, lạnh 25°C) và tốc độ dòng chảy ngang 0,33 m/s.

Kết quả cho thấy, thông lượng nước thấm giảm dần từ 24,3 LMH ở ngày đầu tiên xuống còn 15,8 LMH vào ngày thứ 30, tương ứng với mức suy giảm khoảng 35% sau 30 ngày vận hành (Hình 7). Sự suy giảm này chủ yếu do hiện tượng bẩn màng hình thành trên bề mặt màng trong quá trình tiếp xúc kéo dài với nước biển tự nhiên, vốn chứa nhiều tạp chất hữu cơ và vô cơ gây cản trở quá trình vận chuyển hơi nước. Phân tích EDX (Hình 8) chỉ ra rằng, sau 30 ngày vận hành, trên bề mặt màng MD xuất hiện các thành phần như Na, Cl, Si,... là nguyên nhân chủ yếu gây bẩn màng. Do đó, cần tiếp tục nghiên cứu và áp dụng các biện pháp tiền xử lý như lọc cát hoặc lọc MF nhằm giảm thiểu hiện tượng bám bẩn và kéo dài tuổi thọ của màng MD trong các nghiên cứu tiếp theo. Tuy vậy, tốc độ giảm thông lượng nước thấm tương đối thấp, cho thấy màng MD tổng hợp vẫn duy trì khả năng chống bám bẩn tốt trong điều kiện vận hành liên tục.

Hình 7 cho thấy TDS của dòng thấm luôn được duy trì ở mức rất thấp, dao động từ 34 đến 41 mg/L trong suốt quá trình thí nghiệm. Hiệu suất loại bỏ muối luôn giữ trên 99,88%. Với TDS < 50 mg/L, nước sau xử lý hoàn toàn đáp ứng tiêu chuẩn nước uống theo QCVN 01-1:2024/BYT. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đó, khẳng định hệ thống DCMD có khả năng tạo ra nước ngọt chất lượng cao và vận hành ổn định lâu dài nếu điều kiện vận hành được duy trì hợp lý và kiểm soát tốt hiện tượng bẩn màng. Sau 30 ngày vận hành liên tục với nước biển thực cho thấy hệ thống DCMD không chỉ đảm bảo hiệu quả tách muối rất cao mà còn duy trì chất lượng nước đầu ra ổn định, phù hợp cho mục tiêu cấp nước sinh hoạt tại các khu vực ven biển.



Hình 7. Sự thay đổi thông lượng thấm và hiệu quả xử lý của mô hình DCMD theo thời gian vận hành với nước biển thực



Hình 8. EDX của màng MD ban đầu và màng MD bị fouling

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Alkudhiri, 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>.

Bangboye, T. T., Avellán, T., Klöve, B., & Haghghi, A. T. (2025). Compounding impacts of climate change and urbanisation on water-energy-food nexus in global south countries: A systematic review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 27, 100791. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100791>.

Eykens, L., Hitsov, I., De Sitter, K., Dotremont, C., Pinoy, L., Nopens, I., & Van der Bruggen, B. (2016). Influence of membrane thickness and process conditions on direct contact membrane distillation at different salinities. *Journal of Membrane Science*, 498, 353–364. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.07.037>

Gontarek-Castro, E., & Castro-Muñoz, R. (2024). How to make membrane distillation greener: A review of environmentally friendly and sustainable aspects. *Green Chemistry*, 26(1), 164–185. <https://doi.org/10.1039/D3GC03377E>.

Joshi, S. R., Sinha Ray, S., Kim, S., & Kwon, Y. N. (2024). Potentiality of PLA 3D printed macro-structured feed spacers with a rational and facile

4. KẾT LUẬN

Ảnh hưởng của các thông số vận hành tới khả năng thể hiện của màng MD trong quá trình xử lý nước biển ở quy mô thí nghiệm được điều tra trong nghiên cứu. Kết quả cho thấy màng MD này đạt điều kiện tối ưu tại tốc độ dòng chảy ngang 0,33 m/s, nhiệt độ dòng nóng 70°C và dòng lạnh 25°C ($\Delta T = 45^\circ\text{C}$), nhờ cho thông lượng cao đồng thời ngăn không cho muối qua màng vượt trội. Các điều kiện trên cũng giảm phân cực nồng độ và hạn chế thấm ướt lỗ màng. Hơn nữa, hệ DCMD sử dụng màng PVDF-MD ở điều kiện tối ưu đạt hiệu suất loại bỏ muối gần như 100% ($\geq 99,9\%$), chất lượng nước thấm đạt chuẩn nước uống và duy trì ổn định ngay cả với nồng độ muối tới 80 g/L NaCl trong 30 ngày xử lý nước biển thực. Kết quả này mở ra triển vọng lớn trong ứng dụng công nghệ DCMD cho xử lý nước biển ở các vùng ven biển chịu ảnh hưởng bởi biến đổi khí hậu, góp phần đảm bảo an ninh nước sạch tại Việt Nam.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả xin chân thành cảm ơn Quỹ Đổi mới Sáng tạo Vingroup (VINIF) đã tài trợ kinh phí cho nghiên cứu này thông qua dự án mã số VINIF.2023.DA189.

layout for improved MD desalination performance. *Chemical Engineering Research and Design*, 203, 293–304. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.01.037>.

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, 102615. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102615>.

Khalifa, A., Ahmad, H., Antar, M., Laoui, T., & Khayet, M. (2017). Experimental and theoretical investigations on water desalination using direct contact membrane distillation. *Desalination*, 404, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.009>.

Kim, J., & Hong, S. (2023). Pilot study of emerging low-energy seawater reverse osmosis desalination technologies for high-salinity, high-temperature, and high-turbidity seawater. *Desalination*, 565, 116871. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116871>.

Liao, Y., Wang, R., & Fane, A. G. (2013). Engineering superhydrophobic surface on poly(vinylidene fluoride) nanofiber membranes for direct contact membrane distillation. *Journal of*

- Membrane Science*, 440, 77–87.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.04.006>.
- Lou, M., Meng, L., Li, J., & Li, F. (2025). Review of designing anti-surfactant wetting Janus membranes for membrane distillation: Mechanisms, methods and challenges. *Desalination*, 599, 118448.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118448>.
- Luo, A., & Lior, N. (2017). Study of advancement to higher temperature membrane distillation. *Desalination*, 419, 88–100.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.020>.
- Martínez, L., & Rodríguez-Maroto, J. M. (2008). Membrane thickness reduction effects on direct contact membrane distillation performance. *Journal of Membrane Science*, 312(1–2), 143–156.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.12.048>.
- Nejati, S., Boo, C., Osuji, C. O., & Elimelech, M. (2015). Engineering flat sheet microporous PVDF films for membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 492, 355–363.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.05.033>.
- Ngo, M. T. T., Diep, B. Q., Sano, H., Nishimura, Y., Boivin, S., Kodamatani, H., Takeuchi, H., Sakti, S. C. W., & Fujioka, T. (2022). Membrane distillation for achieving high water recovery for potable water reuse. *Chemosphere*, 288, 132610.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132610>.
- Nguyen, N. C., Chen, S. S., Ho, S. T., Nguyen, H. T., Sinha Ray, S., Nguyen, N. T., Hsu, H. T., Le, N. C., & Tran, T. T. (2018). Optimising the recovery of EDTA-2Na draw solution in forward osmosis through direct contact membrane distillation. *Separation and Purification Technology*, 198, 108–112.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.001>.
- Philibert, M., Villacorte, L. O., Ekowati, Y., Abushaban, A., & Salinas-Rodriguez, S. G. (2024). Fouling and scaling in reverse osmosis desalination plants: A critical review of membrane autopsies, feedwater quality guidelines and assessment methods. *Desalination*, 592, 118188.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118188>.
- Salari, M. E., Zabihi, M., & Murphy, J. (2025). A techno-economic study on the utilisation of airborne wind energy for reverse osmosis seawater desalination. *Heliyon*, 11(2), e41814.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41814>.
- Thi, N. H., Duong, H. C., Chen, S. S., Le Quang, H., Ngo, H. H., Duong Cong, C., Nguyen, C. N., 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, 104029.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104029>.
- Wang, K. Y., Teoh, M. M., Nugroho, A., & Chung, T. S. (2011). Integrated forward osmosis–membrane distillation (FO–MD) hybrid system for the concentration of protein solutions. *Chemical Engineering Science*, 66(11), 2421–2430.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.03.001>.