

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Hoàng Minh Tạo

**NGHIÊN CỨU LỰA CHỌN DUNG DỊCH LÔI CUỐN
SỬ DỤNG TRONG CÔNG NGHỆ
MÀNG THẨM THẤU CHUYỂN TIẾP ĐỂ XỬ LÝ
NƯỚC NHIỄM MẶN THÀNH NƯỚC SINH HOẠT**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT MÔI TRƯỜNG

Mã số: 9 52 03 20

Hà Nội - Năm 2025

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện
Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học:

- 1. Người hướng dẫn 1: TS. Bùi Quang Minh, Trung tâm Nghiên cứu và Phát triển công nghệ cao
- 2. Người hướng dẫn 2: PGS. TS. Nguyễn Ngọc Tùng, Trung tâm Nghiên cứu và Phát triển công nghệ cao

Phản biện 1:
.....

Phản biện 2:
.....

Phản biện 3:
.....

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện
hợp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công
nghệ Việt Nam vào hồi giờ phút, ngày tháng năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- 1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- 2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Từ thời xa xưa, nước ngọt vẫn luôn được con người coi là một nguồn tài nguyên vô cùng quan trọng, bởi nó đóng vai trò thiết yếu trong việc duy trì sự sống và sự phát triển bình thường của cả bản thân con người lẫn các loài vật nuôi và cây trồng. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, dưới tác động kết hợp của nhiều yếu tố khách quan cũng như chủ quan, thì trên thế giới nói chung và tại Việt Nam nói riêng đang xuất hiện tình trạng thiếu nước ngọt phục vụ nhu cầu sinh hoạt và sản xuất của người dân, đặc biệt là trong những tháng mùa khô.

Trước tình hình thực tiễn đó, phát triển các công nghệ khử mặn mới nhằm sản xuất nước ngọt hiện đang trở thành một xu hướng phát triển tất yếu trên thế giới, và Việt Nam cũng không thể là ngoại lệ. Tuy nhiên, những công nghệ khử mặn đang được sử dụng phổ biến hiện nay (bao gồm công nghệ bay hơi – ngưng tụ và công nghệ thẩm thấu ngược) đều tồn tại một số nhược điểm nhất định, đòi hỏi cần phát triển những công nghệ khử mặn mới hiệu quả và thân thiện hơn với môi trường [1,2]. Một trong những giải pháp tiềm năng được đưa ra chính là công nghệ màng thẩm thấu chuyển tiếp, bởi so sánh với những công nghệ khử mặn truyền thống khác, thì công nghệ này có ưu điểm là tiêu thụ năng lượng thấp hơn và cho phép vận hành ổn định hơn, nhưng vẫn duy trì chất lượng nguồn nước đầu ra đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật khắt khe đối với nước sinh hoạt [3–5].

Yếu tố quan trọng nhất trong một hệ thống màng thẩm thấu chuyển tiếp chính là dung dịch lõi cuốn – bởi, động lực chủ yếu cho quá trình chuyển khối của nước từ phía dòng cần xử lý qua màng bán thấm vào dung dịch lõi cuốn chính là mức chênh lệch về mặt áp suất thẩm thấu tự nhiên giữa dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn. Do đó, việc lựa chọn dung dịch lõi cuốn phù

hợp (hay cụ thể hơn, chất lõi cuộn phù hợp) là một công việc hết sức quan trọng, quyết định hiệu quả vận hành chung của các hệ thống khử mặn sản xuất nước ngọt sử dụng công nghệ màng thẩm thấu chuyển tiếp [6,7]. Nhìn chung, một chất lõi cuộn hay dung dịch lõi cuộn lý tưởng cho hệ thống khử mặn sản xuất nước ngọt ứng dụng công nghệ màng thẩm thấu chuyển tiếp cần phải đáp ứng ba yêu cầu cơ bản sau: (1) sở hữu áp suất thẩm thấu tự nhiên cao; (2) gây ra hiện tượng thẩm thấu ngược qua màng không đáng kể, và (3) dễ hoàn nguyên. Ngoài ra, do hiện tượng thẩm thấu ngược chất lõi cuộn qua màng là không thể tránh khỏi, nên một chất lõi cuộn lý tưởng cũng cần phải tương đối an toàn đối với sức khỏe con người nói riêng, cũng như đối với toàn bộ hệ sinh thái và môi trường nói chung [8].

Bởi vậy, có thể khẳng định đề tài “*Nghiên cứu lựa chọn dung dịch lõi cuộn sử dụng trong công nghệ màng thẩm thấu chuyển tiếp để xử lý nước nhiễm mặn thành nước sinh hoạt*” là một hướng nghiên cứu đầy tiềm năng, đáp ứng được nhu cầu thực tiễn của xã hội, cũng như bắt kịp xu hướng nghiên cứu chung trên thế giới. Cụ thể, nghiên cứu tập trung vào khảo sát tìm kiếm những dung dịch lõi cuộn mới sở hữu khả năng lõi cuộn cao, mà đáng chú ý nhất trong số đó là dung dịch lõi cuộn chứa hỗn hợp chất lõi cuộn trinitrat α -DL-alanin diacetat và axit citric. Ngoài ra, nghiên cứu cũng đã khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành và thời gian vận hành lên hiệu quả hoạt động của hệ thống màng thẩm thấu chuyển tiếp sử dụng các chất lõi cuộn mới này, từ đó thu được cái nhìn mang tính khái quát và toàn diện và tiềm năng ứng dụng của chúng trong thực tiễn sản xuất nước ngọt từ những nguồn nước bị nhiễm mặn.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Lựa chọn một số dung dịch lõi cuốn tiềm năng sử dụng trong công nghệ màng thẩm thấu chuyển tiếp để xử lý nước nhiễm mặn thành nước sinh hoạt, và xác định ảnh hưởng của các yếu tố điều kiện vận hành và thời gian vận hành lên đặc trưng lõi cuốn của những chất lõi cuốn tiềm năng này trong quy mô phòng thí nghiệm.

3. Nội dung nghiên cứu

- Khảo sát đặc trưng lõi cuốn cơ bản của một số dung dịch lõi cuốn tiềm năng được lựa chọn.
- Khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành (bao gồm: tốc độ dòng vào, chênh lệch áp suất dòng vào, và nhiệt độ dòng vào) lên hiệu quả lõi cuốn của những dung dịch lõi cuốn tiềm năng được lựa chọn, và tối ưu hoá các yếu tố điều kiện vận hành này nhằm thu được hiệu quả lõi cuốn tốt nhất.
- Khảo sát ảnh hưởng của yếu tố thời gian vận hành kéo dài lên hiệu quả hoạt động và đặc trưng nhiễm bẩn của màng thẩm thấu chuyển tiếp khi sử dụng những dung dịch lõi cuốn tiềm năng được lựa chọn, và hiệu quả làm sạch màng thẩm thấu chuyển tiếp của phương pháp rửa xuôi.
- Khảo sát khả năng xử lý nước nhiễm mặn thành nước sinh hoạt của hệ thống màng thẩm thấu chuyển tiếp sử dụng những dung dịch lõi cuốn tiềm năng được lựa chọn.
- Khảo sát khả năng lõi cuốn của những dung dịch lõi cuốn tiềm năng được lựa chọn trên đối tượng nguồn nước cần xử lý là nước nhiễm mặn thực tế.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

1.1. Công nghệ khử mặn sản xuất nước ngọt

1.1.1. Nước ngọt và tầm quan trọng của nước ngọt

1.1.2. Thực trạng nguồn tài nguyên nước tại Việt Nam

1.1.3. Các công nghệ khử mặn sản xuất nước ngọt

1.2. Công nghệ màng thẩm thấu chuyển tiếp

1.2.1. Quá trình thẩm thấu và phân loại các quá trình thẩm thấu

1.2.2. Tình hình nghiên cứu chung trong nước và trên thế giới

1.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả vận hành của hệ thống màng thẩm thấu chuyển tiếp

1.3.1. Màng bán thấm

1.3.2. Dung dịch lõi cuốn

1.3.3. Hiện tượng phân cực nồng độ trong các quá trình thẩm thấu

1.3.4. Các yếu tố điều kiện vận hành

1.4. Nhiễm bẩn màng, các phương pháp kiểm soát và khắc phục nhiễm bẩn màng

1.4.1. Nhiễm bẩn màng

1.4.2. Các phương pháp kiểm soát nhiễm bẩn màng

1.4.3. Giải pháp xử lý nhiễm bẩn màng

1.5. Định hướng nghiên cứu của Luận án

CHƯƠNG 2: PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

- **Dung dịch phía dòng cần xử lý:** Nước de-ion, dung dịch nước mặn mô phỏng pha từ muối NaCl tinh chế với độ mặn 5‰ – 25‰, dung dịch nước nhiễm mặn thực tế đã qua tiền xử lý nhằm loại bỏ thành phần chất rắn không hoà tan có kích thước $\geq 5 \mu\text{m}$.

- **Dung dịch lõi cuốn:** Dung dịch MGDA, dung dịch MAL, và dung dịch PVP. Luận án này tập trung vào nghiên cứu một số tính chất lõi cuốn quan trọng của các dung dịch lõi cuốn, cũng như ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành và thời gian vận hành lên hiệu quả lõi cuốn của các dung dịch lõi cuốn.

- **Hệ thống thí nghiệm:** Các nghiên cứu trong Luận án này được thực hiện trên modul thí nghiệm Forward Osmosis CF042 Cell Assembly, là modul thí nghiệm cho hệ thống màng FO quy mô phòng thí nghiệm với diện tích tiếp xúc màng thiết kế 42 cm^2 , phần thân được chế tạo chủ yếu từ vật liệu nhựa acetal đồng trùng hợp nhằm hạn chế tối đa ảnh hưởng của vật liệu lên các tính chất riêng của dòng cần xử lý cũng như dung dịch lõi cuốn.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Hoá chất

2.2.2. Thiết bị và dụng cụ

2.2.3. Phương pháp thực nghiệm chung

2.2.4. Phương pháp thực nghiệm cụ thể cho từng nội dung nghiên cứu

2.2.5. Phương pháp tính toán và xử lý số liệu

Hiệu quả lõi cuốn của dung dịch lõi cuốn được đánh giá dựa trên ba thông số chính, bao gồm thông lượng nước thẩm thấu qua màng (J_w), thông lượng chất lõi cuốn thẩm thấu ngược qua màng (J_s), và hệ số tổn hao chất lõi cuốn do thẩm thấu ngược qua màng (R_{ds}) của hệ thống màng FO. Các thông số trên được tính toán dựa trên kết quả thử nghiệm thực tế trên hệ thống lọc quy mô phòng thí nghiệm, cụ thể như sau:

$$J_w = \frac{m_0 - m_t}{A \times t \times \rho} \quad \text{(Phương trình 1)}$$

$$J_s = \frac{C_t \times (V_0 - J_w \times t \times A)}{t \times A} \quad \text{(Phương trình 2)}$$

$$R_{ds} = \frac{J_s}{J_w} \quad \text{(Phương trình 3)}$$

Đối với những khảo sát thực hiện trong thời gian vận hành ngắn, thí nghiệm được tiến hành lặp lại tối thiểu năm lần và được phân tích ANOVA trên phần mềm Microsoft Excel 2016 nhằm đảm bảo độ tin cậy của kết quả trên 95%. Trong trường hợp xuất hiện giá trị kết quả bất thường, thí nghiệm sẽ được tiếp tục tiến hành lặp lại theo từng nhóm ba lần và loại bỏ những giá trị kết quả bất thường, sao cho giá trị kết quả trung bình cuối cùng sở hữu độ tin cậy trên 95%.

Đối với những khảo sát thực hiện trong thời gian vận hành kéo dài, mỗi thí nghiệm chỉ được tiến hành một lần không lặp lại. Kết quả khảo sát sau đó sẽ được xử lý trên phần mềm Microsoft Excel 2016 và phần mềm Design Expert 12 nhằm so sánh sự khác biệt giữa các giá trị thay đổi theo thời gian.

Bên cạnh đó, phương pháp bề mặt đáp ứng xây dựng trên cơ sở thiết kế thí nghiệm Box–Behnken 3 cấp độ cũng đã được sử dụng nhằm tối ưu hoá điều kiện vận hành của hệ thống màng FO. Khoảng khảo sát được lựa chọn

là các khoảng giá trị xung quanh giá trị phù hợp nhất đã xác định trong những nghiên cứu tương ứng, và sẽ được trình bày cụ thể tại các mục liên quan thuộc Chương 3. Kết quả và thảo luận. Quá trình thiết kế và xử lý số liệu thí nghiệm được thực hiện một cách tự động trên phần mềm Design Expert 12.

2.2.6. Phương pháp phân tích tính chất của màng FO

Bên cạnh phương pháp thực nghiệm như đã trình bày, ảnh hưởng của quá trình vận hành kéo dài lên cấu trúc bề mặt của màng FO còn được đánh giá thông qua phương pháp phân tích kính hiển vi điện tử quét (SEM). Trước tiên, màng FO được lấy ra khỏi hệ thiết bị thử nghiệm ngay sau khi khảo sát kết thúc, sau đó được rửa nhanh bằng nước de-ion nhằm loại bỏ phần dung dịch dòng cần xử lý hoặc dung dịch lõi cuốn còn bám lại trên bề mặt màng, rồi được làm khô bằng giấy lọc và mạ một lớp hợp kim vàng – paladin lên bề mặt sử dụng thiết bị lắng đọng phún xạ. Ảnh SEM của mẫu bề mặt màng FO được chụp trên thiết bị phân tích kính hiển vi điện tử quét Jeol SM-6510LV (Jeol, Nhật Bản) tại điện áp gia tốc trong khoảng 8 – 12 kV và độ phóng đại trong khoảng 500 – 2.000 lần.

CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc trưng thẩm thấu của màng bán thấm

Dựa vào các kết quả khảo sát, có thể thấy được rằng không tồn tại khác biệt đáng kể giữa kết quả khảo sát trong Luận án này, và kết quả khảo sát do Nghiên cứu sinh thu được trong khuôn khổ một số nhiệm vụ trước đó [46]. Điều này cho thấy màng TFC được sử dụng trong nghiên cứu này sở hữu tính ổn định cao, cho phép so sánh những kết quả khảo sát thu được từ nghiên cứu này với kết quả khảo sát khả năng lôi cuốn của các chất lôi cuốn khác từng được công bố.

Cụ thể, khi vận hành liên tục hệ thống màng FO đến khoảng thời gian 150 phút, thì thể tích nước thẩm thấu qua màng tăng dần đều theo thời gian tại mọi nồng độ dung dịch lôi cuốn NaCl. Điều này chứng minh được rằng hệ thống thử nghiệm đã được thiết kế một cách phù hợp, cho phép quá trình vận hành hệ thống màng FO diễn ra một cách ổn định trong khoảng thời gian đến 150 phút và thể tích nước thẩm thấu qua màng đến 154 mL, mà không tạo thành ảnh hưởng đáng kể lên hiệu quả lôi cuốn của dung dịch lôi cuốn. Nói cách khác, hiện tượng pha loãng dung dịch lôi cuốn gây ra bởi sự thẩm thấu của nước qua màng bán thấm đã không tạo thành ảnh hưởng đáng kể đến các kết quả khảo sát được thực hiện trong giới hạn thời gian vận hành dưới 150 phút và thể tích nước thẩm thấu qua màng dưới 154 mL.

Đáng chú ý hơn, tồn tại một “khoảng chừng” về hiệu quả lôi cuốn khi dung dịch lôi cuốn có nồng độ NaCl nằm trong khoảng 20 – 30 %. Sự thay đổi này có thể được giải thích trên cơ sở hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ trong màng (ICP) và hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ ngoài màng (ECP). Cụ thể, khi khả năng lôi cuốn của dung dịch lôi cuốn vượt quá một ngưỡng nhất định, hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ sẽ trở nên đặc biệt nghiêm trọng, dẫn tới mức độ gia tăng của trở lực thẩm thấu gây ra bởi hiện

tượng phân cực nồng độ cục bộ trở nên cân bằng với mức độ gia tăng của áp suất thẩm thấu do dung dịch lõi cuộn tạo thành. Điều này khiến cho hiệu quả lõi cuộn chung của dung dịch lõi cuộn chỉ gia tăng không đáng kể [58].

Tuy nhiên, do dung dịch dòng cần xử lý được sử dụng trong khuôn khổ khảo sát này là nước de-ion, nên hiện tượng phân cực nồng độ chỉ chủ yếu xảy ra tại phía dung dịch lõi cuộn. Đồng thời, khả năng tạo thành trở lực thẩm thấu của hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ cũng phụ thuộc nhiều vào hiệu quả chuyển khối của nước bên trong dung dịch lõi cuộn. Bởi vậy, khi nồng độ dung dịch lõi cuộn tăng vượt quá ngưỡng 30‰, thì mức độ gia tăng trở lực thẩm thấu gây ra bởi hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ đã không thể duy trì cân bằng với mức độ gia tăng của áp suất thẩm thấu do dung dịch lõi cuộn tạo thành, dẫn tới kết quả thông lượng J_w tiếp tục tăng khi tăng nồng độ dung dịch lõi cuộn.

Bên cạnh đó, cũng có thể thấy được rằng thể tích nước thẩm thấu qua màng sau mỗi khoảng thời gian (cụ thể là sau mỗi 15 phút) không phải là một giá trị ổn định, mà xuất hiện sự dao động nhất định xung quanh đường giá trị trung bình dạng tuyến tính. Nhiều yếu tố khác nhau có thể dẫn tới hiện tượng trên, tuy nhiên chủ yếu nhất là do những thay đổi liên tục về mặt nồng độ dung dịch lõi cuộn trong suốt quá trình vận hành, cũng như những thay đổi về mặt chế độ dòng bên trong modul thử nghiệm gây ra bởi thiết kế đường dẫn dòng vào của modul thử nghiệm và chế độ vận hành của bơm.

Nhìn chung, màng TFC trong khuôn khổ nghiên cứu này được xác định là sở hữu tính chất thẩm thấu tương đối phù hợp với công bố của nhà sản xuất, với mức chênh lệch tại nồng độ chất lõi cuộn tương đương (dung dịch NaCl nồng độ 60‰, tương đương 1 mol/L) chỉ khoảng 2,2%.

3.2. Khả năng lõi cuộn của một số loại dung dịch lõi cuộn

Nhằm đánh giá đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn PVP, dung dịch lõi cuộn MAL, và dung dịch lõi cuộn MGDA, Nghiên cứu sinh đã tiến hành một số thử nghiệm màng thẩm thấu xuôi kết hợp hoàn nguyên bằng màng NF với nồng độ của dung dịch lõi cuộn thay đổi trong khoảng 5 – 30 % và nồng độ muối trong dung dịch cần xử lý thay đổi trong khoảng 5 – 25 %.

Nhìn chung, có thể thấy rằng với cả ba loại dung dịch lõi cuộn, giá trị thông lượng J_w chỉ tăng đáng kể khi nồng độ dung dịch lõi cuộn tăng đến một ngưỡng nhất định, còn nếu vượt qua ngưỡng này thì thông lượng J_w tiếp tục tăng lên không đáng kể. Xu hướng trên đặc biệt rõ ràng khi dòng cần xử lý là nước muối mô phỏng, và có thể giải thích là do sau một ngưỡng nồng độ nhất định thì hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ đã xảy ra nghiêm trọng hơn đáng kể, nâng cao trở lực đối với sự thẩm thấu của nước qua màng và làm giảm hiệu quả cải thiện thông lượng J_w khi tăng nồng độ dung dịch lõi cuộn.

Bên cạnh đó, khi độ mặn của dòng cần xử lý tăng lên thì giá trị thông lượng J_w cũng giảm xuống, do độ chênh lệch về mặt áp suất thẩm thấu tự nhiên giữa dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuộn giảm xuống. Đặc biệt, ngay tại ngưỡng độ mặn của dòng cần xử lý tăng lên đến 15 – 20 % thì thông lượng J_w thường giảm xuống rất thấp (dưới 5 LMH) tại mọi nồng độ dung dịch lõi cuộn, cho thấy các dung dịch lõi cuộn được khảo sát không đạt hiệu quả cao trong ứng dụng khử mặn cho nước nhiễm mặn với độ mặn quá cao (độ mặn ban đầu của dòng cần xử lý dưới 10%).

Nhằm mục đích thu được cái nhìn toàn diện hơn về các dung dịch lõi cuộn hiện đang được nghiên cứu trong khuôn khổ Luận án này, Nghiên cứu sinh đã thực hiện một số khảo sát bổ sung liên quan đến hiệu quả lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn trên trong khoảng độ mặn của dòng cần xử lý dưới 10%.

Kết quả khảo sát cho thấy, trong khoảng độ mặn của dòng cần xử lý 0 – 10‰ thì thông lượng J_w thu được của toàn bộ ba loại dung dịch lồi cuốn đã khảo sát đều thay đổi một cách tương đối tuyến tính, và giảm dần theo chiều tăng lên của độ mặn dòng cần xử lý. Khi độ mặn dòng cần xử lý tăng từ 0‰ lên tới 10‰, nhìn chung thông lượng J_w thu được của toàn bộ ba loại dung dịch lồi cuốn đều giảm khoảng 37 – 48%, trong đó mức độ giảm lớn nhất thuộc về dung dịch lồi cuốn MAL 20%.

Cụ thể, khi độ mặn dòng cần xử lý tăng từ 0‰ lên tới 10‰ thì thông lượng J_w của dung dịch lồi cuốn MAL 20% đã giảm từ 10,61 LMH xuống còn 5,51 LMH – tương đương mức giảm khoảng 48%. Điều này có thể giải thích là do đã tồn tại tương tác hóa – lý nhất định giữa dung dịch lồi cuốn MAL 20% và dung dịch dòng cần xử lý, khiến cho khả năng lồi cuốn của dung dịch lồi cuốn giảm nhanh khi tăng độ mặn của dung dịch lồi cuốn. Hiện tượng tương tự cũng xảy ra khi dung dịch lồi cuốn là dung dịch muối NaCl 60‰ (dung dịch lồi cuốn đối chứng), với giá trị thông lượng J_w giảm từ 16,19 LMH xuống còn 7,62 LMH – tương đương mức giảm khoảng 53%. Ngược lại, cả dung dịch lồi cuốn PVP 20% và dung dịch lồi cuốn MGDA 25% đều cho hiệu quả lồi cuốn tương đối ổn định khi độ mặn của dòng cần xử lý nằm trong khoảng 0 – 10‰, với mức độ suy giảm thông lượng J_w lần lượt là khoảng 42% và 37%.

Bên cạnh đó, hiện tượng chất lồi cuốn thẩm thấu ngược qua màng xảy ra đặc biệt nghiêm trọng đối với chất tổ hợp lồi cuốn muối MGDA-3Na và axit citric, với giá trị thông lượng J_s và hệ số tổn hao R_{ds} của dung dịch lồi cuốn MGDA cao hơn đáng kể so với dung dịch lồi cuốn đối chứng muối NaCl 60‰. Hiện tượng trên có thể được giải thích là do, đã tồn tại tương tác hóa – lý nhất định giữa các thành phần chất tan trong dung dịch lồi cuốn MGDA và thành phần vật liệu cấu tạo nên màng bán thấm, khiến cho mức độ chọn lọc thẩm thấu của màng bán thấm đối với các thành phần chất tan

này trở nên kém hơn mức độ chọn lọc thẩm thấu của màng bán thấm đối với muối NaCl. Bởi vậy, các thành phần chất tan trong dung dịch lõi cuộn MGDA đã dễ dàng di chuyển qua màng bán thấm sang phía dòng cần xử lý hơn so với các phân tử muối NaCl, mặc dù muối NaCl có thể phân ly thành những ion có kích thước nhỏ hơn. Ngoài ra, cũng cần lưu ý rằng dung dịch lõi cuộn NaCl 60% sở hữu nồng độ chất tan tính theo khối lượng thấp hơn rất nhiều so với dung dịch lõi cuộn MGDA 25%.

Ngược lại, giá trị thông lượng Js và hệ số tổn hao Rds của cả dung dịch lõi cuộn MAL và dung dịch lõi cuộn PVP đều tương đối thấp. Hiện tượng trên có thể được giải thích là do cả polyvinylpyrrolidon và maltodextrin đều là những hợp chất cao phân tử với kích thước phân tử tương đối lớn và không phân ly trong dung dịch, bởi vậy khả năng di chuyển qua màng bán thấm về phía dòng cần xử lý của những phân tử chất lõi cuộn này thường kém hơn so với những phân tử sở hữu kích thước tương đối nhỏ, hoặc có thể phân ly trong dung dịch thành những ion sở hữu kích thước tương đối nhỏ (ví dụ muối MGDA-3Na hay axit citric). Đặc biệt, hệ số tổn hao chất lõi cuộn do thẩm thấu ngược của dung dịch lõi cuộn PVP chỉ cao bằng khoảng 50% so với của dung dịch lõi cuộn MAL, cho thấy tính ổn định và tính an toàn vượt trội của loại chất lõi cuộn này trong các ứng dụng màng thẩm thấu chuyển tiếp.

3.3. Ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành khác lên đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn

Kết quả khảo sát cho thấy, khi chênh lệch áp suất dòng vào giữa phía dòng cần xử lý và phía dung dịch lõi cuộn tăng lên thì thông lượng Jw cũng tăng lên. Đặc biệt, khi áp suất phía dung dịch lõi cuộn cao hơn phía dòng cần xử lý thì thông lượng Jw xuất hiện sự giảm mạnh. Do lưu lượng dòng vào của cả hai phía đều được duy trì trong khoảng phù hợp, nên hiện tượng trên

có thể được xác định là do ảnh hưởng của sự thay đổi về mức chênh lệch áp suất giữa phía dòng cần xử lý và phía dung dịch lõi cuốn.

Cụ thể, động lực của phần lớn các quá trình lọc qua màng – bao gồm cả quá trình màng FO – là sự chênh lệch về mặt áp suất giữa hai dung dịch chảy qua hai phía của màng bán thấm. Riêng đối với các quá trình màng FO thì động lực này là sự kết hợp giữa mức chênh lệch về mặt áp suất thẩm thấu tự nhiên và áp suất thủy lực giữa phía dòng cần xử lý và phía dung dịch lõi cuốn [36]. Hai loại chênh lệch áp suất này có thể tạo thành tác động tương hỗ nhau (tác dụng theo cùng hướng) hoặc triệt tiêu lẫn nhau (tác dụng theo ngược hướng), từ đó ảnh hưởng đến thông lượng J_w . Bên cạnh đó, việc tăng áp suất phía bên dòng cần xử lý cũng có thể khiến muối NaCl bị đẩy vào cấu trúc vi xốp từ mặt lớp trung gian của màng bán thấm, gây cản trở sự dịch chuyển của các phân tử nước – chủ yếu thông qua hiện tượng phân cực nồng độ trong màng (ICP).

Ngược lại, khi chênh lệch áp suất giữa phía dòng cần xử lý và phía dung dịch lõi cuốn tăng lên thì thông lượng J_s lại giảm xuống. Điều này có thể giải thích là do khi đó, áp suất thủy lực đã thay đổi ngược chiều so với dòng chuyển khối của chất lõi cuốn qua màng bán thấm, bởi vậy gây cản trở cho hiện tượng chất lõi cuốn thẩm thấu ngược qua màng. Ngoài ra, cũng có thể thấy rằng xu hướng thay đổi của các thông số hiệu quả vận hành là khá tương đồng giữa hai trường hợp dòng cần xử lý là nước de-ion và dòng cần xử lý là dung dịch muối NaCl nồng độ 10‰, cũng như giữa ba trường hợp các dung dịch lõi cuốn khác nhau, chứng minh tính chính xác của các kết quả khảo sát.

Tương tự, điều kiện nhiệt độ của dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn có thể tạo thành ảnh hưởng tương đối đáng kể lên hiệu quả vận hành của hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO. Cụ thể, với cả ba loại dung dịch lõi cuốn được khảo sát, khi nhiệt độ dòng vào tăng từ 10°C lên 30°C thì

thông lượng J_w và thông lượng J_s đều có xu hướng tăng dần, khiến cho hiệu suất tổn hao chất lỏng cuốn do hiện tượng thẩm thấu ngược qua màng gần như không thay đổi. Tuy nhiên, nếu nhiệt độ dòng vào tiếp tục tăng từ 30°C lên 40°C thì cả thông lượng J_w và thông lượng J_s tạo thành bởi cả ba loại dung dịch lỏng cuốn đều có xu hướng giảm.

Hiện tượng trên có thể được giải thích là do sự thay đổi về mặt nhiệt độ đã dẫn đến sự thay đổi về mặt áp suất thẩm thấu tự nhiên của cả dung dịch lỏng cuốn lẫn dòng cần xử lý, đồng thời cũng tạo thành ảnh hưởng đến tính chất thẩm thấu của bản thân màng lọc [105-107]. Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng, mặc dù mối quan hệ giữa nhiệt độ dòng vào và giá trị thông lượng thông lượng J_w , cũng như giá trị thông lượng J_s , thu được từ các thử nghiệm trong khuôn khổ Luận án này là giống với những gì được mô tả trong nhiều công bố trước đó trong khoảng nhiệt độ dưới 30°C, tuy nhiên mối quan hệ này lại xuất hiện sự khác biệt đáng kể khi nhiệt độ dòng vào tăng từ 30°C lên đến 40°C.

Nguyên nhân dẫn tới hiện tượng trên có thể là do sự biến đổi về mặt tính chất của màng lọc phụ thuộc vào điều kiện nhiệt độ. Cụ thể, khi nhiệt độ tăng cao, rất có thể cấu trúc lỗ xốp của màng đã xuất hiện sự thay đổi nhất định về mặt kích thước cũng như độ tương hợp hoá học, gây cản trở quá trình chuyển khối của nước và các phân tử chất tan khác qua màng. Kết quả này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc khảo sát cụ thể các tính chất liên quan của màng bán thấm nhằm giúp đảm bảo thu được hiệu quả cao nhất khi vận hành các hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO.

Cuối cùng, kết quả nghiên cứu cho thấy khi lưu lượng dòng vào quá thấp (dưới 200 mL/phút) hoặc quá cao (trên 500 mL/phút) đều sẽ khiến thông lượng J_w . Hiện tượng này có thể được giải thích là do tốc độ dòng chảy là yếu tố quan trọng quyết định động lực học chất lỏng, từ đó ảnh hưởng đến hiệu suất khuếch tán của các thành phần chất tan có trong dòng cần xử lý và

dung dịch lõi cuộn. Cụ thể, do quá trình chuyển khối của nước qua màng bán thấm, nồng độ dung dịch lõi cuộn và dòng cần xử lý vào tại khu vực gần bề mặt màng lọc sẽ thấp hơn hoặc cao hơn so với nồng độ dung dịch tuần hoàn, dẫn tới suy giảm hiệu quả lọc. Để hạn chế tình trạng này, dòng chất lỏng di chuyển trong hệ thống màng FO cần tạo thành tác động khuấy trộn phù hợp, thúc đẩy sự khuếch tán của các thành phần chất tan giữa khu vực gần bề mặt màng bán thấm và khu vực bên trong dòng chất lỏng.

Tại ngưỡng lưu lượng dòng vào thấp, không tồn tại những dòng chảy rối vuông góc với hướng dòng chảy hay những khu vực chảy xoáy, gây hạn chế khả năng trộn lẫn theo chiều ngang giữa các lớp chất lỏng chảy liền kề nhau của dòng chất lỏng (chế độ chảy tầng). Hiện tượng này có thể dẫn đến sự phân cực nồng độ cục bộ gần bề mặt và bên trong cấu trúc của màng bán thấm, làm giảm đáng kể thông lượng J_w . Ngược lại, lưu lượng dòng vào cao hơn có thể tạo thành chế độ chảy rối, khuyến khích sự trộn lẫn theo chiều ngang giữa các lớp chất lỏng chảy liền kề nhau của dòng chất lỏng. Tuy nhiên, khi dòng chảy rối trở nên quá dữ dội do lưu lượng dòng vào tăng cao, điều kiện áp suất thủy lực bên trong hệ thiết bị màng FO sẽ có xu hướng trở nên thiếu ổn định, hình thành những khu vực áp suất thủy lực tăng cao hoặc giảm thấp bất thường, ảnh hưởng tiêu cực đến quá trình chuyển khối của nước qua màng bán thấm và làm giảm thông lượng J_w [141].

Hiện tượng trên cũng có thể giải thích cho sự thay đổi của thông lượng J_s . Cụ thể, khi lưu lượng dòng cần xử lý tăng từ 100 mL/phút đến 300 mL/phút thì thông lượng J_s của chất lõi cuộn polyvinylpyrrolidon và chất lõi cuộn maltodextrin cũng có xu hướng tăng dần, tuy nhiên khi lưu lượng dòng cần xử lý tiếp tục tăng từ 300 mL/phút đến 650 mL/phút thì thông lượng J_s của chất lõi cuộn polyvinylpyrrolidon và chất lõi cuộn maltodextrin lại có xu hướng giảm dần. Dẫu vậy, nhìn chung thì hệ số tổn hao R_{ds} của chất lõi cuộn

maltodextrin và chất lõi cuộn polyvinylpyrrolidon là không đổi quá nhiều trong khoảng lưu lượng dòng cần xử lý được khảo sát.

Đối với tổ hợp chất lõi cuộn MGDA và axit citric, mặc dù giá trị thông lượng J_s thay đổi theo quy luật không quá rõ ràng trong khoảng lưu lượng dòng cần xử lý được khảo sát, tuy nhiên giá trị hệ suất tổn hao R_{ds} của tổ hợp chất lõi cuộn này cũng dao động trong một khoảng khá hẹp tương tự như đối với hai chất lõi cuộn maltodextrin và chất lõi cuộn polyvinylpyrrolidon.

3.4. Tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO

Trên cơ sở kết quả khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành khác lên đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn, nghiên cứu sinh đã thực hiện tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO sử dụng phương pháp thiết kế thí nghiệm Box–Behnken 3 cấp độ trên phần mềm hỗ trợ Design Expert 12.

Nhìn chung, thông qua đánh giá kết quả kiểm tra tổng bình phương mô hình tuần tự và kiểm tra thống kê mô hình tổng hợp, có thể xác định được rằng mô hình bậc hai là phù hợp nhất để mô tả mối quan hệ giữa các biến đầu vào được khảo sát (điều kiện vận hành của hệ thống màng FO) và các kết quả đánh giá (thông lượng J_w và hệ số tổn hao R_{ds}) đối với cả ba loại dung dịch lõi cuộn. Bên cạnh đó, kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cũng xác nhận mô hình phương trình bậc hai được lựa chọn có thể dự đoán và tối ưu hoá ảnh hưởng của các biến đầu vào lên các kết quả đánh giá trong không gian thiết kế thực nghiệm Box–Behnken được lựa chọn.

Kết quả phân tích bề mặt đáp ứng cho thấy nhiệt độ vận hành là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến cả thông lượng J_w và hệ số tổn hao R_{ds} khi sử dụng các dung dịch lõi cuộn được khảo sát. Ngược lại, chênh lệch áp suất dòng vào có ảnh hưởng tương đối nhỏ đến cả thông lượng J_w và hệ số tổn hao R_{ds} , đặc biệt là khi lưu lượng dòng vào được giữ cố định và chỉ thay đổi

hiệu suất vận hành. Tương tự, lưu lượng dòng vào cũng chỉ tạo thành ảnh hưởng đáng kể lên thông lượng J_w và hệ số tổn hao R_{ds} khi chênh lệch áp suất dòng vào được giữ cố định và chỉ thay đổi nhiệt độ vận hành.

Với mục tiêu đạt được giá trị thông lượng J_w cao nhất và giá trị hệ số tổn hao R_{ds} thấp nhất, một số tính toán tối ưu hóa đã được tiến hành tự động trên phần mềm Design Expert 12 và đưa ra kết quả các giá trị thông số điều kiện vận hành tối ưu nhất như sau:

- Đối với dung dịch lõi cuộn MAL 20%: chênh lệch áp suất dòng vào = 0,17 bar (phía dòng cần xử lý), nhiệt độ vận hành = 27,5°C, và lưu lượng dòng vào = 260 mL/phút. Giá trị thông lượng J_w và giá trị hệ số tổn hao R_{ds} thu được khi vận hành tại các điều kiện này được dự đoán lần lượt là 10,86 LMH và 0,238 g/L. Năm thí nghiệm xác nhận đã được tiến hành tại các điều kiện vận hành tối ưu theo tính toán, với giá trị thông lượng J_w và giá trị hệ số tổn hao R_{ds} thu được lần lượt là $10,858 \pm 0,137$ LMH và $0,2372 \pm 0,0029$ g/L.

- Đối với dung dịch lõi cuộn PVP 20%: chênh lệch áp suất dòng vào = 0,40 bar (phía dòng cần xử lý), nhiệt độ vận hành = 26,0°C, và lưu lượng dòng vào = 270 mL/phút. Giá trị thông lượng J_w và giá trị hệ số tổn hao R_{ds} thu được khi vận hành tại các điều kiện này được dự đoán lần lượt là 14,78 LMH và 0,124 g/L. Năm thí nghiệm xác nhận đã được tiến hành tại các điều kiện vận hành tối ưu theo tính toán, với giá trị thông lượng J_w và giá trị hệ số tổn hao R_{ds} thu được lần lượt là $14,816 \pm 0,121$ LMH và $0,1244 \pm 0,0012$ g/L.

- Đối với dung dịch lõi cuộn MGDA 25%: chênh lệch áp suất dòng vào = 0,40 bar (phía dòng cần xử lý), nhiệt độ vận hành = 30,0°C, và lưu lượng dòng vào = 250 mL/phút. Giá trị thông lượng J_w và giá trị hệ số tổn hao R_{ds} thu được khi vận hành tại các điều kiện này được dự đoán lần lượt là 9,97

LMH và 0,359 g/L. Năm thí nghiệm xác nhận đã được tiến hành tại các điều kiện vận hành tối ưu theo tính toán, với giá trị thông lượng J_w và giá trị hệ số tổn hao R_{ds} thu được lần lượt là $9,996 \pm 0,192$ LMH và $0,3580 \pm 0,0020$ g/L.

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng các thông số điều kiện vận hành tối ưu trên chỉ có độ tin cậy cao nhất trong phạm vi khảo sát cụ thể của Luận án, và cần thiết phải xác minh lại nếu áp dụng ngoài phạm vi này. Ngoài ra, dựa trên những kết quả khảo sát trước đó, tồn tại cơ sở khoa học để cho rằng những kết quả tối ưu hoá với dòng cần xử lý là nước de-ion cũng hoàn toàn có thể áp dụng cho trường hợp dòng cần xử lý là nước nhiễm mặn với độ mặn lên đến 10‰.

3.5. Ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn và hiệu quả của phương pháp làm sạch màng

Kết quả nghiên cứu cho thấy, khả năng lõi cuộn của cả ba loại dung dịch lõi cuộn đều xuất hiện xu hướng giảm dần theo thời gian vận hành kéo dài. Cụ thể, sau 700 giờ vận hành không liên tục, giá trị thông lượng J_w khi sử dụng các dung dịch lõi cuộn đã giảm lần lượt như sau: dung dịch lõi cuộn MGDA 25% giảm từ 5,97 LMH xuống còn 4,87 LMH (tương đương khoảng 18%), dung dịch lõi cuộn PVP 20% giảm từ 8,16 LMH xuống còn 5,49 LMH (tương đương khoảng 33%), và dung dịch lõi cuộn MAL 20% giảm từ 5,64 LMH xuống còn 3,16 LMH (tương đương khoảng 44%). Điều này có thể được giải thích là do trong quá trình vận hành kéo dài, trên bề mặt và bên trong màng bán thấm đã xảy ra tình trạng nhiễm bẩn, dẫn tới giảm diện tích hiệu quả của màng lọc cũng như gây cản trở khả năng thẩm thấu của nước qua màng [147].

Nhằm đánh giá chính xác hơn đặc trưng gây nhiễm bẩn màng của các loại dung dịch lõi cuộn được khảo sát, Nghiên cứu sinh đã tiến hành kiểm

chúng thông qua ảnh SEM chụp bề mặt màng bán thấm sau 700 giờ vận hành không liên tục (tương đương khoảng 01 tháng vận hành liên tục).

Cụ thể, trong trường hợp dung dịch lõi cuộn PVP 20% thì cơ chế nhiễm bẩn màng chủ yếu xảy ra tại phía tiếp xúc với dung dịch lõi cuộn là do sự lắng cặn của chất lõi cuộn cả trên bề mặt lẫn bên trong cấu trúc của màng bán thấm. Do bản chất riêng của chất lõi cuộn polyvinylpyrrolidon, các hạt cặn lắng sở hữu kích thước tương đối lớn (khoảng trên 10 μm) và cấu trúc khá phức tạp. Nguyên nhân dẫn tới hiện tượng này có thể được giải thích là do, đã xuất hiện tương tác nhất định giữa các phân tử polyvinylpyrrolidon và các phân tử NaCl (hoặc các ion Na^+ và/hoặc ion Cl^-), làm giảm khả năng hoà tan của chất lõi cuộn tại khu vực xung quanh bề mặt của màng bán thấm [198,199]. Ngược lại, tại phía màng bán thấm tiếp xúc với dòng cần xử lý, thì cơ chế nhiễm bẩn chủ yếu lại là do sự phát triển của các loài vi sinh vật, với một phần diện tích đáng kể trên bề mặt màng bán thấm đã bị bao phủ bảo những cấu trúc hình cầu với kích thước khoảng trên 2 μm . Theo Tang và cộng sự, dạng cấu trúc hình cầu như vậy thường tương ứng với tình trạng nhiễm bẩn màng gây ra bởi sự phát triển của các loài vi sinh vật. Chính sự tồn tại của lớp “màng sinh học” này đã làm ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chuyển khối của nước, cũng như của chất lõi cuộn qua màng bán thấm [157].

Nhận xét tương tự cũng có thể được đưa ra đối với dung dịch lõi cuộn MAL 20%. Cụ thể, trong trường hợp dung dịch lõi cuộn MAL 20% thì cơ chế nhiễm bẩn màng xảy ra tại phía tiếp xúc với dung dịch lõi cuộn vẫn chủ yếu là do sự lắng cặn của chất lõi cuộn cả trên bề mặt lẫn bên trong cấu trúc của màng bán thấm. Tuy nhiên, do tương tác giữa các phân tử maltodextrin và các phân tử NaCl (hoặc các ion Na^+ và/hoặc ion Cl^-), cấu trúc cặn lắng hình thành là tương đối phức tạp và không giống với cấu trúc vi mô thông thường của maltodextrin (dạng hạt cầu bất đối xứng) [200,201].

Ngược lại, tại phía màng bán thấm tiếp xúc với dòng cần xử lý, thì cơ chế nhiễm bẩn chủ yếu lại là do sự phát triển của các loài vi sinh vật, với một phần diện tích đáng kể trên bề mặt màng bán thấm đã bị bao phủ bởi những cấu trúc hình cầu với kích thước khoảng trên 2 μm , tương đương với ngưỡng kích thước trung bình của các loài vi sinh vật [157]. Chính sự tồn tại của lớp “màng sinh học” này đã làm ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chuyển khối của nước, cũng như của chất lồi cuốn qua màng bán thấm. Đáng chú ý, do maltodextrin là một hợp chất gốc đường nên có thể đóng vai trò nguồn dinh dưỡng phù hợp hơn cho các loài vi sinh vật, dẫn tới hiện tượng lớp “màng sinh học” hình thành trên bề mặt màng bán thấm trở nên dày hơn và giá trị thông lượng J_w giảm mạnh hơn sau thời gian dài vận hành liên tục.

Đáng chú ý, trong trường hợp dung dịch lồi cuốn MGDA 25%, bề mặt màng lọc tại phía dung dịch lồi cuốn là tương đối sạch, gần như không xuất hiện cặn lắng với kích thước lớn hay những vùng vi sinh vật đặc biệt phát triển. Hiện tượng này có thể giải thích là do muối MGDA-3Na vốn là một tác nhân tẩy rửa, do vậy khi thẩm thấu ngược qua màng có thể giúp cản trở sự xâm nhiễm của vi sinh vật lên bề mặt màng lọc, nhờ vậy giúp hạn chế tình trạng nhiễm bẩn sinh học tại phía dòng cần xử lý và muối MGDA-3Na là muối hữu cơ của natri, phân ly thành ion Na^+ tương tự như NaCl, bởi vậy không xuất hiện tương tác bất lợi với các phân tử NaCl thẩm thấu ngược qua màng gây giảm khả năng hoà tan trong dung dịch. Tuy nhiên, tại phía dòng cần xử lý, có thể quan sát thấy sự xuất hiện của các cấu trúc kết tinh dạng lập phương với kích thước khoảng trên 10 μm . Đây có thể là những tinh thể muối kết tinh, hình thành do sự thẩm thấu ngược qua màng của ion Na^+ từ phía dung dịch lồi cuốn, cũng như hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ gần khu vực bề mặt màng bán thấm, khiến cho nồng độ của ion Na^+ tại khu vực xung quanh bề mặt màng bán thấm tăng cao, thúc đẩy sự kết tinh của tinh thể NaCl.

Thử nghiệm liên quan đến hiệu quả làm sạch bằng phương pháp rửa xuôi cho thấy, phương pháp này đã cho phép hồi phục đến 98% giá trị thông lượng J_w trong trường hợp dung dịch lõi cuộn MGDA 25%, 82% giá trị thông lượng J_w trong trường hợp dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và 78% giá trị thông lượng J_w trong trường hợp dung dịch lõi cuộn MAL 20%. Điều này có thể được giải thích là do, trong trường hợp dung dịch lõi cuộn MGDA 25% thì nguyên nhân gây nhiễm bẩn chủ yếu là các hạt tinh thể muối với kích thước lớn lắng trên bề mặt màng bán thấm – bởi các hạt tinh thể muối này sở hữu khả năng dễ dàng hoà tan trở lại vào dòng rửa xuôi, nên quá trình rửa xuôi đã cho phép loại bỏ gần như hoàn toàn các hạt tinh thể muối kết tinh này, từ đó giúp khôi phục gần như hoàn toàn tính chất thấm thấu của màng bán thấm.

Ngược lại, trong trường hợp dung dịch lõi cuộn MAL 20% và dung dịch lõi cuộn PVP 20%, do tình trạng nhiễm bẩn của màng bán thấm tại cả phía dòng cần xử lý và phía dung dịch lõi cuộn đều tương đối nghiêm trọng, nên phương pháp rửa xuôi chỉ cho phép khôi phục một phần nhất định tính chất thấm thấu của màng bán thấm. Thành phần cặn lắng tồn tại bên trong cấu trúc của màng và lớp “màng sinh học” chưa bị rửa trôi hoàn toàn sẽ tiếp tục đóng vai trò ngăn cản quá trình chuyển khối của nước qua màng, khiến cho giá trị thông lượng J_w không thể khôi phục lại như ban đầu, đồng thời tạo điều kiện cho quá trình nhiễm bẩn tiếp theo càng trở nên nghiêm trọng hơn.

3.6. Hiệu quả vận hành trên mẫu nước nhiễm mặn thực tế của các dung dịch lõi cuộn

Kết quả khảo sát thông lượng J_w cho thấy, không tồn tại khác biệt đáng kể về mặt đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn được khảo sát giữa khi dung dịch dòng cần xử lý là mẫu nước nhiễm mặn thực tế đã được

tiền xử lý, và khi dung dịch dòng cần xử lý là mẫu nước mặn mô phỏng với độ mặn tương đương (độ mặn tính theo NaCl = 10‰).

Kết quả phân tích tính chất của các mẫu nước sạch thu được sau hoàn nguyên dung dịch lõi cuộn cho thấy, cả ba loại dung dịch lõi cuộn đều có thể được hoàn nguyên một cách hiệu quả bằng phương pháp NF, với sản phẩm nước sạch thu được sau hoàn nguyên đáp ứng một số yêu cầu kỹ thuật chính theo khuyến nghị trong Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt.

Bảng 3.1 Chất lượng nước sạch thu được sau khi hoàn nguyên các dung dịch lõi cuộn, so sánh theo Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT

Chỉ tiêu phân tích		Dung dịch lõi cuộn sử dụng			Yêu cầu theo QCVN 01-1:2018/BYT
		MAL 20%	PVP 20%	MGDA 25%	
Độ pH	-	6,7	6,7	6,9	6,0 – 8,5
TDS	‰	373	291	436	< 1.000
Natri (Na)	mg/L	10	10	120	< 200
Clorua	mg/L	0,4	0,4	0,4	0,2 – 1,0

KẾT LUẬN

L luận án đã hoàn thành các nội dung nghiên cứu được đưa ra, bao gồm:

- **Nghiên cứu đặc trưng lõi cuộn cơ bản của một số dung dịch lõi cuộn tiềm năng được lựa chọn**, bao gồm dung dịch lõi cuộn chứa tổ hợp muối trinati α -DL-alanin diacetat và axit citric (dung dịch MGDA) với tỷ lệ tính theo khối lượng = 85/15, cũng như hai loại dung dịch lõi cuộn tiềm năng khác là dung dịch maltodextrin (MAL) và dung dịch polyvinylpyrrolidon (PVP), với kết quả thu được tương đối tốt.

- **Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành lên hiệu quả lõi cuộn của những dung dịch lõi cuộn tiềm năng được lựa chọn**. Nghiên cứu đã xác định ảnh hưởng của tốc độ dòng vào, chênh lệch áp suất dòng vào, và nhiệt độ dòng vào lên hiệu quả hiệu quả lõi cuộn của ba loại dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%; xác định xu hướng thay đổi của thông lượng J_w và thông lượng chất lõi cuộn thẩm thấu ngược qua màng J_s phụ thuộc vào ba yếu tố điều kiện vận hành được nghiên cứu; cũng như so sánh kết quả thu được với những công bố quốc tế liên quan.

- **Nghiên cứu tối ưu hoá các yếu tố điều kiện vận hành này nhằm thu được hiệu quả lõi cuộn tốt nhất cho ba loại dung dịch lõi cuộn được lựa chọn**. Cụ thể, nghiên cứu đã áp dụng phương pháp thiết kế thí nghiệm Box–Behnken và phương pháp bề mặt đáp ứng nhằm đánh giá sâu hơn ảnh hưởng của tốc độ dòng vào, chênh lệch áp suất dòng vào, và nhiệt độ dòng vào lên hiệu quả hiệu quả lõi cuộn của ba loại dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%, từ đó đề xuất mô hình toán học phù hợp mô tả ảnh hưởng của các yếu tố điều kiện vận hành này lên đặc trưng lõi cuộn của ba loại dung dịch lõi cuộn. Ngoài ra, nghiên cứu cũng đã xác định được điều kiện vận hành tối ưu cho ba loại

dung dịch lồi cuốn, và thành công xác minh thông qua phương pháp thực nghiệm tính tin cậy của những kết quả tối ưu hoá này.

- **Nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên hiệu quả hoạt động và đặc trưng nhiễm bẩn của màng thẩm thấu chuyển tiếp khi sử dụng những dung dịch lồi cuốn tiềm năng được lựa chọn và hiệu quả làm sạch màng thẩm thấu chuyển tiếp của phương pháp rửa xuôi.** Cụ thể, nghiên cứu đã xác định dung dịch lồi cuốn MGDA 25% có thể vận hành tương đối ổn định trong khoảng thời gian 700 giờ, với mức độ suy giảm thông lượng Jw khoảng 18%. Ngược lại, trong cùng điều kiện thì mức độ suy giảm thông lượng Jw của dung dịch lồi cuốn MAL 20% và dung dịch lồi cuốn PVP 20% đã đạt tới lần lượt khoảng 44% và 33%.

Kết quả nghiên cứu hiệu quả làm sạch cho thấy, phương pháp rửa xuôi cho hiệu quả hồi phục thông lượng Jw đặc biệt tốt khi dung dịch lồi cuốn được sử dụng là dung dịch MGDA 25%, đạt tới 98% giá trị ban đầu. Ngược lại, trong cùng điều kiện nghiên cứu, hiệu quả hồi phục đối với dung dịch lồi cuốn MAL 20% và dung dịch lồi cuốn PVP 20% chỉ đạt lần lượt 78% và 82%.

- **Nghiên cứu khả năng lồi cuốn của những dung dịch lồi cuốn tiềm năng được lựa chọn trên đối tượng nguồn nước cần xử lý là mẫu nước nhiễm mặn thực tế.** Kết quả nghiên cứu cho thấy, cả ba loại dung dịch lồi cuốn đều thể hiện khả năng lồi cuốn tương đương giữa khi đối tượng nguồn nước cần xử lý là mẫu nước nhiễm mặn thực tế, và khi đối tượng nguồn nước cần xử lý là nước nhiễm mặn mô phỏng. Kết quả trên đã chứng minh tiềm năng ứng dụng thực tế của ba loại dung dịch lồi cuốn này. Bên cạnh đó, nước sạch thu được từ quá trình hoàn nguyên ba loại dung dịch lồi cuốn bằng phương pháp NF đã đáp ứng một số yêu cầu chính của Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Công bố trên tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCIE:** Novel draw solution system based on trisodium dicarboxymethyl alaninate for water desalination applications, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 5327–5340, 2025 (chất lượng tính đến năm 2023: IF = 3,0 theo WoS, Q1 theo SJR). <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05984-z>

2. **Chương sách của nhà xuất bản quốc tế có mã ISBN:** Recent Trends in the Development of Draw Solutions for Forward Osmosis Based Desalination, *Advances in Water Quality Research (Volume 2)*, AkiNik Publications, New Delhi, 59–85, 2024. Mã ISBN: 978-93-6135-266-9. <https://doi.org/10.22271/ed.book.2808>

3. **Công bố trên tạp chí trong nước:** Investigating membrane fouling characteristics and cleansing strategies in forward osmosis desalination using polyvinylpyrrolidone K17, *Tạp chí Phân tích Hóa, Lý và Sinh học*, 30(3), 65–73, 2024 (chất lượng tính đến năm 2023: tạp chí thuộc danh mục tính điểm của Hội đồng Giáo sư Nhà nước).

4. **Công bố trên tạp chí trong nước:** Influence of operational parameters on the efficiency of forward osmosis desalination systems using polyvinylpyrrolidone K17, *Tạp chí Phân tích Hóa, Lý và Sinh học*, 30(4), 77–84, 2024 (chất lượng tạp chí tính đến năm 2023: tạp chí thuộc danh mục tính điểm của Hội đồng Giáo sư Nhà nước).

5. **Công bố trên hội nghị trong nước có mã ISBN:** Ứng dụng của maltodextrin trong hệ thống khử mặn bằng màng thẩm thấu xuôi: Đặc trưng nhiễm bẩn màng và hiệu quả làm sạch, *Tuyển tập báo cáo hội nghị: Thương mại hoá kết quả nghiên cứu – Cơ hội và giải pháp*, Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và công nghệ, 336–342, 2025. Mã ISBN: 978-604-357-367-1.

6. **Công bố trên tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCIE** (đã qua vòng phản biện thứ nhất): Potential application of the draw solution system based on trisodium α -DL-alanine diacetate in forward osmosis desalination systems, *Membrane and Water Treatment* (chất lượng tính đến năm 2024: IF = 0,8 theo WoS, Q3 theo SJR).