

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**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT MÔI TRƯỜNG

Hà Nội - 2025

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

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT MÔI TRƯỜNG

Mã số: 9 52 03 20

Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ

Người hướng dẫn 1
(Ký, ghi rõ họ tên)

Người hướng dẫn 2
(Ký, ghi rõ họ tên)

TS. Bùi Quang Minh PGS. TS. Nguyễn Ngọc Tùng

Hà Nội - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án “Nghiên cứu lựa chọn dung dịch lồi cuốn sử dụng trong công nghệ màng thẩm thấu chuyển tiếp để xử lý nước nhiễm mặn thành nước sinh hoạt” là công trình nghiên cứu do chính bản thân thực hiện, được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Học viện Khoa học và Công nghệ (Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam) dưới sự hướng dẫn khoa học của TS. Bùi Quang Minh và PGS. TS. Nguyễn Ngọc Tùng. Luận án sử dụng một số thông tin được trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau, và các thông tin trích dẫn này đã được ghi rõ nguồn gốc. Chính vì vậy, những kết quả nghiên cứu trong luận án này đã được đảm bảo là trung thực và khách quan nhất.

Tôi xin cam đoan đề tài nghiên cứu trong luận án này là công trình nghiên cứu của tôi dựa trên những tài liệu, số liệu do chính tôi tự tìm hiểu và nghiên cứu. Những kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận án. Những số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực, và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của chính bản thân tôi.

Tôi xin cam đoan những số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực. Nếu sai, tôi xin hoàn toàn chịu trách nhiệm trước pháp luật.

Hà Nội, ngày 12 tháng 05 năm 2025

Nghiên cứu sinh

Hoàng Minh Tạo

LỜI CẢM ƠN

Sau 3 năm học tập, nghiên cứu để hoàn thành luận án này, ngoài những nỗ lực của bản thân, nghiên cứu sinh đã nhận được sự động viên, giúp đỡ của rất nhiều cá nhân, tổ chức.

Nghiên cứu sinh xin chân thành bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến:

TS. Bùi Quang Minh; PGS.TS. Nguyễn Ngọc Tùng; PGS.TS Nguyễn Quang Trung đã tận tình chỉ bảo và hướng dẫn nghiên cứu sinh trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án tốt nghiệp.

Các thầy cô trong Khoa Công nghệ môi trường, các thầy cô Học viện Khoa học và Công nghệ đã hướng dẫn và tạo mọi điều kiện thuận lợi để nghiên cứu sinh hoàn thành luận án.

Ban lãnh đạo Trung tâm Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ cao, các bạn bè đồng nghiệp tại Trung tâm nơi nghiên cứu sinh công tác đã giúp đỡ, tạo mọi điều kiện thuận lợi trong công tác để nghiên cứu sinh hoàn thành luận án đúng thời hạn.

Xin cảm ơn Cha Mẹ, vợ, con, đồng nghiệp và bạn bè đã động viên, khích lệ nghiên cứu sinh trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Xin chân thành cảm ơn!

Hà Nội, ngày 12 tháng 05 năm 2025

Nghiên cứu sinh

Hoàng Minh Tạo

MỤC LỤC

Lời cam đoan	i
Lời cảm ơn	ii
Mục lục	iii
Danh mục các ký hiệu, chữ viết tắt.....	vii
Danh mục các bảng	x
Danh mục các hình vẽ, đồ thị	xi
MỞ ĐẦU	1
Chương 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU	5
1.1. Công nghệ khử mặn sản xuất nước ngọt.....	5
1.1.1. Nước ngọt và tầm quan trọng của nước ngọt	5
1.1.2. Thực trạng nguồn tài nguyên nước tại Việt Nam	6
1.1.3. Các công nghệ khử mặn sản xuất nước ngọt	8
1.2. Công nghệ màng thẩm thấu chuyển tiếp.....	9
1.2.1. Quá trình thẩm thấu và phân loại các quá trình thẩm thấu	9
1.2.2. Tình hình nghiên cứu chung trong nước và trên thế giới.....	13
1.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả vận hành của hệ thống màng thẩm thấu chuyển tiếp	15
1.3.1. Màng bán thấm	15
1.3.2. Dung dịch lõi cuộn.....	17
<i>1.3.2.1. Dung dịch lõi cuộn chuyển pha</i>	<i>19</i>
<i>1.3.2.2. Dung dịch lõi cuộn không chuyển pha.....</i>	<i>21</i>
<i>1.3.2.3. Dung dịch lõi cuộn nano từ tính</i>	<i>23</i>
<i>1.3.2.4. Dung dịch lõi cuộn không hoàn nguyên</i>	<i>24</i>
1.3.3. Hiện tượng phân cực nồng độ trong các quá trình thẩm thấu	25
<i>1.3.3.1. Hiện tượng phân cực nồng độ ngoài màng.....</i>	<i>26</i>
<i>1.3.3.2. Hiện tượng phân cực nồng độ trong màng.....</i>	<i>27</i>

1.3.4. Các yếu tố điều kiện vận hành	28
1.3.4.1. Nhiệt độ dòng đầu vào	28
1.3.4.2. Tốc độ dòng đầu vào	31
1.3.4.3. Hướng chảy tương đối giữa dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn	33
1.4. Nhiễm bẩn màng, các phương pháp kiểm soát và khắc phục nhiễm bẩn màng.....	34
1.4.1. Nhiễm bẩn màng	34
1.4.2. Các phương pháp kiểm soát nhiễm bẩn màng	37
1.4.2.1. Phương pháp tiền xử lý dòng cần xử lý	37
1.4.2.2. Phương pháp lựa chọn dung dịch lõi cuốn phù hợp.....	39
1.4.2.3. Phương pháp lựa chọn màng bán thấm phù hợp.....	40
1.4.2.4. Phương pháp tối ưu hoá các yếu tố điều kiện vận hành.....	40
1.4.3. Giải pháp xử lý nhiễm bẩn màng	41
1.4.3.1. Phương pháp làm sạch cơ học.....	41
1.4.3.2. Phương pháp làm sạch hoá học.....	42
1.4.3.3. Phương pháp làm sạch sinh học	43
1.5. Tổng quan về các chất lõi cuốn được nghiên cứu	43
Chương 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU.....	47
2.1. Đối tượng nghiên cứu	47
2.2. Phương pháp nghiên cứu	47
2.2.1. Hoá chất	47
2.2.2. Thiết bị và dụng cụ.....	48
2.2.3. Phương pháp thực nghiệm chung.....	49
2.2.3.1. Quy trình rửa	51
2.2.3.2. Quy trình kiểm tra đối chiếu tính chất màng	51
2.2.3.3. Quy trình thực nghiệm đánh giá khả năng lõi cuốn	52
2.2.4. Phương pháp thực nghiệm cụ thể cho từng nội dung nghiên cứu.....	54

2.2.4.1. Nghiên cứu đặc trưng thẩm thấu của màng bán thấm.....	61
2.2.4.2. Nghiên cứu đặc trưng lôi cuốn của một số loại dung dịch lôi cuốn	61
2.2.4.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành khác lên đặc trưng lôi cuốn của các dung dịch lôi cuốn.....	62
2.2.4.4. Nghiên cứu tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO	63
2.2.4.5. Nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên đặc trưng lôi cuốn của các dung dịch lôi cuốn và hiệu quả của phương pháp làm sạch màng	64
2.2.4.6. Nghiên cứu hiệu quả vận hành trên mẫu nước nhiễm mặn thực tế của các dung dịch lôi cuốn	65
2.2.5. Phương pháp tính toán và xử lý số liệu.....	66
2.2.6. Phương pháp phân tích tính chất của màng FO	68
Chương 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN.....	69
3.1. Đặc trưng thẩm thấu của màng bán thấm	69
3.2. Khả năng lôi cuốn của một số loại dung dịch lôi cuốn	72
3.2.1. Khả năng lôi cuốn của dung dịch lôi cuốn MAL	72
3.2.2. Khả năng lôi cuốn của dung dịch lôi cuốn PVP	76
3.2.3. Khả năng lôi cuốn của dung dịch lôi cuốn MGDA	79
3.2.4. So sánh đặc trưng lôi cuốn của các dung dịch lôi cuốn được lựa chọn ..	88
3.3. Ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành khác lên đặc trưng lôi cuốn của các dung dịch lôi cuốn	92
3.3.1. Ảnh hưởng của chênh lệch áp suất dòng vào.....	92
3.3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành	95
3.3.3. Ảnh hưởng của lưu lượng dòng	98
3.4. Tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO.....	102
3.4.1. Tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO sử dụng dung dịch lôi cuốn MAL 20%.....	102
3.4.2. Tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO sử dụng dung	

dịch lôi cuốn PVP 20%	105
3.4.3. Tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO sử dụng dung dịch lôi cuốn MGDA 25%	109
3.5. Ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên đặc trưng lôi cuốn của các dung dịch lôi cuốn và hiệu quả của phương pháp làm sạch màng	112
3.6. Hiệu quả vận hành trên mẫu nước nhiễm mặn thực tế của các dung dịch lôi cuốn	119
KẾT LUẬN	122
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN	125
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	127
PHỤ LỤC	xvii

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
2FI	two-factor interaction	tương tác hai biến
ANOVA	analysis of variance	phân tích phương sai
ATP	adenosine triphosphate	adenosin tri-phosphat
CA-3Na	trisodium citrate	tri-natri citrat
CP	concentration polarization	phân cực nồng độ
CTA	cellulose triacetate	xenlulo tri-axetat
ECP	external concentration polarization	phân cực nồng độ ngoài màng
EDTA	ethylene diamine tetraacetic acid	axit etylen diamin tetra-acetic
FO	forward osmosis	thẩm thấu chuyển tiếp; thẩm thấu xuôi
GMH	$\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$	$\text{g/m}^2 \cdot \text{h}$
ICP	internal concentration polarization	phân cực nồng độ trong màng
IL	ionic liquid	chất lỏng tự phân ly thành ion
Js thông lượng Js	reverse draw solute flux	thông lượng chất lồi cuốn thẩm thấu ngược qua màng bán thấm
Jw thông lượng Jw	water flux	thông lượng nước thẩm thấu qua màng bán thấm

LCST	lower critical solution temperature	nhiệt độ dung dịch tới hạn dưới
LMH	$L/m^2 \cdot h$	$L/m^2 \cdot h$
LPRO	low-pressure reverse osmosis	thẩm thấu ngược áp suất thấp
MAL	maltodextrin	maltodextrin
MGDA	trisodium α -DL-alanine diacetate and citric acid mixture	hỗn hợp trinati α -DL-alanin diaxetat và axit citric
MGDA-3Na	trisodium α -DL-alanine diacetate	trinati α -DL-alanin diaxetat
MNP	magnetic nanoparticle	hạt nano từ tính; hạt từ tính kích thước nano
MSF	multi-stage flash distillation	chưng cất nhanh nhiều cấp
NF	nano-filtration	lọc qua màng kích thước nano
PRO	pressure-retarded osmosis	thẩm thấu chậm áp
PVP	polyvinylpyrrolidone	polyvinylpyrrolidon
Rds hệ số tổn hao Rds	coefficient of draw solute loss	hệ số tổn hao chất lôi cuốn do thẩm thấu ngược qua màng
RO	reverse osmosis	thẩm thấu ngược
SEM	scanning electron microscopy	kính hiển vi điện tử quét
TDS	total dissolved solids	tổng nồng độ chất rắn hoà tan

TFC	thin-film composite	compozit lớp mỏng
TMA	trimethyl amine	tri-metyl amin
UCST	upper critical solution temperature	nhiệt độ dung dịch tới hạn trên
UF	ultra-filtration	siêu lọc

DANH MỤC CÁC BẢNG

	Trang
Bảng 2.1. Các thông số vận hành cho thí nghiệm kiểm tra đối chiếu tính chất màng	51
Bảng 2.2. Thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên đặc trưng lõi cuốn của các dung dịch lõi cuốn	54
Bảng 2.3. Các thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu đặc trưng thẩm thấu của màng bán thấm	61
Bảng 2.4. Thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu đặc trưng lõi cuốn của một số loại dung dịch lõi cuốn	62
Bảng 2.5. Thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố điều kiện vận hành khác lên đặc trưng lõi cuốn của các dung dịch lõi cuốn	63
Bảng 2.6. Thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO khử mặn	64
Bảng 2.7. Các thông số cụ thể của mô hình thí nghiệm Box–Behnken	65
Bảng 2.8. Thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu hiệu quả vận hành trên mẫu nước nhiễm mặn thực tế	66
Bảng 3.1. Kết quả đánh giá ảnh hưởng của các điều kiện vận hành lên hiệu quả lõi cuốn của dung dịch lõi cuốn MAL 20%	102
Bảng 3.2. Kết quả đánh giá ảnh hưởng của các điều kiện vận hành lên hiệu quả lõi cuốn của dung dịch lõi cuốn PVP 20%	106
Bảng 3.3. Kết quả đánh giá ảnh hưởng của các điều kiện vận hành lên hiệu quả lõi cuốn của dung dịch lõi cuốn MGDA 25%	110
Bảng 3.4. Chất lượng nước sạch thu được sau khi hoàn nguyên các dung dịch lõi cuốn, so sánh theo Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT	121

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Trang

Hình 1.1. Hướng dịch chuyển của nước qua màng bán thấm trong các quá trình thẩm thấu FO, RO, và PRO.....	10
Hình 1.2. Mối quan hệ giữa động lực của các quá trình thẩm thấu và hướng thông lượng nước thẩm thấu qua màng.....	12
Hình 1.3. Số lượng bài báo khoa học liên quan đến công nghệ màng FO được công bố qua các năm trong giai đoạn 1999 – 2020	14
Hình 1.4. Tỷ lệ các bài báo khoa học liên quan đến công nghệ màng FO được công bố qua các năm trong giai đoạn 1999 – 2020	14
Hình 1.5. Hiện tượng phân cực nồng độ trong màng xảy ra trên màng bán thấm bất đối xứng.....	27
Hình 1.6. Ảnh hưởng của hướng dòng chảy lên sự chênh lệch nồng độ dung dịch hai phía của màng bán thấm.....	34
Hình 1.7. Cơ chế nhiễm bẩn ngoài màng (trái), và cơ chế nhiễm bẩn trong màng (phải)	35
Hình 1.8. Cấu trúc hoá học của trinitrat α -DL-alanin diacetat.....	44
Hình 1.9. Cấu trúc hoá học của maltodextrin.....	45
Hình 1.10. Cấu trúc hoá học của polyvinylpyrrolidon	45
Hình 2.1. Sơ đồ hệ thống thực nghiệm quy mô phòng thí nghiệm	50
Hình 2.2. Hệ thống thực nghiệm màng FO quy mô phòng thí nghiệm.....	50
Hình 2.3. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu đặc trưng thẩm thấu của màng bán thấm	55
Hình 2.4. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu khả năng lôi cuốn của một số loại dung dịch lôi cuốn.....	56
Hình 2.5. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành khác lên đặc trưng lôi cuốn của các dung dịch lôi cuốn.....	57
Hình 2.6. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO ..	58

Hình 2.7. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên đặc trưng lõi cuốn của các dung dịch lõi cuốn và hiệu quả của phương pháp làm sạch màng	59
Hình 2.8. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu hiệu quả vận hành trên mẫu nước nhiễm mặn thực tế của các dung dịch lõi cuốn	60
Hình 3.1. Thử tích nước thẩm thấu qua màng khi sử dụng dung dịch lõi cuốn với nồng độ NaCl thay đổi trong khoảng 10 – 60 %	69
Hình 3.2. Thông lượng J_w khi sử dụng dung dịch lõi cuốn với nồng độ NaCl thay đổi trong khoảng 10‰ – 60‰	70
Hình 3.3. Thông lượng J_s khi sử dụng dung dịch lõi cuốn với nồng độ NaCl thay đổi trong khoảng 10‰ – 60‰	72
Hình 3.4. Đặc trưng thông lượng J_w của dung dịch lõi cuốn MAL tại những nồng độ dung dịch lõi cuốn và độ mặn dòng cần xử lý khác nhau	73
Hình 3.5. Thông lượng J_s của dung dịch lõi cuốn MAL tại các nồng độ dung dịch lõi cuốn khác nhau	74
Hình 3.6. Hệ số tổn hao R_{ds} của dung dịch lõi cuốn MAL tại các nồng độ dung dịch lõi cuốn khác nhau.....	75
Hình 3.7. Đặc trưng thông lượng J_w của dung dịch lõi cuốn PVP tại những nồng độ dung dịch lõi cuốn và độ mặn dòng cần xử lý khác nhau	77
Hình 3.8. Thông lượng J_s của dung dịch lõi cuốn PVP tại các nồng độ dung dịch lõi cuốn khác nhau.....	78
Hình 3.9. Hệ số tổn hao R_{ds} của dung dịch lõi cuốn PVP tại các nồng độ dung dịch lõi cuốn khác nhau	79
Hình 3.10. Đặc trưng thông lượng J_w của dung dịch lõi cuốn MGDA tại những nồng độ dung dịch lõi cuốn và độ mặn dòng cần xử lý khác nhau	80
Hình 3.11. Thông lượng J_s của dung dịch lõi cuốn MGDA tại các nồng độ dung dịch lõi cuốn khác nhau.....	81
Hình 3.12. Hệ số tổn hao R_{ds} của dung dịch lõi cuốn MGDA tại các nồng độ dung dịch lõi cuốn khác nhau.....	82
Hình 3.13. Đặc trưng thông lượng J_w của dung dịch lõi cuốn MGDA và dung dịch lõi cuốn CA-3Na tại những nồng độ dung dịch lõi cuốn khác nhau.....	83

Hình 3.14. Đặc trưng thông lượng Js của dung dịch lõi cuộn MGDA và dung dịch lõi cuộn CA-3Na tại những nồng độ dung dịch lõi cuộn khác nhau.....	84
Hình 3.15. Đặc trưng tổn hao chất lõi cuộn do thẩm thấu ngược của dung dịch lõi cuộn MGDA và dung dịch lõi cuộn CA-3Na tại những nồng độ dung dịch lõi cuộn khác nhau.....	85
Hình 3.16. Đặc trưng thông lượng Jw của dung dịch lõi cuộn MGDA 25% tại những tỷ lệ muối MGDA-3Na khác nhau.....	86
Hình 3.17. Đặc trưng thông lượng Js của dung dịch lõi cuộn MGDA 25% tại những tỷ lệ muối MGDA-3Na khác nhau	87
Hình 3.18. Đặc trưng tổn hao chất lõi cuộn do thẩm thấu ngược của dung dịch lõi cuộn MGDA 25% tại những tỷ lệ muối MGDA-3Na khác nhau	88
Hình 3.19. Đặc trưng thông lượng Jw của các dung dịch lõi cuộn tại những độ mặn dòng cần xử lý khác nhau.....	89
Hình 3.20. Đặc trưng thông lượng Js của các dung dịch lõi cuộn được lựa chọn ...	90
Hình 3.21. Hệ số tổn hao Rds của các dung dịch lõi cuộn được lựa chọn.....	91
Hình 3.22. Ảnh hưởng của chênh lệch áp suất dòng vào lên đặc trưng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%	92
Hình 3.23. Ảnh hưởng của chênh lệch áp suất dòng vào lên thông lượng Js của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%	93
Hình 3.24. Ảnh hưởng của chênh lệch áp suất dòng vào lên hệ số tổn hao Rds của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%	94
Hình 3.25. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành lên đặc trưng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%.....	96
Hình 3.26. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành lên thông lượng Js của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%	97
Hình 3.27. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành lên hệ số tổn hao Rds của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA	

25%.....	98
Hình 3.28. Ảnh hưởng của lưu lượng dòng vào lên đặc trưng lõi cuốn của dung dịch lõi cuốn MAL 20%, dung dịch lõi cuốn PVP 20%, và dung dịch lõi cuốn MGDA 25%	99
Hình 3.29. Ảnh hưởng của lưu lượng dòng vào lên thông lượng Js của dung dịch lõi cuốn MAL 20%, dung dịch lõi cuốn PVP 20%, và dung dịch lõi cuốn MGDA 25%	100
Hình 3.30. Ảnh hưởng của lưu lượng dòng vào lên hệ số tổn hao Rds của dung dịch lõi cuốn MAL 20%, dung dịch lõi cuốn PVP 20%, và dung dịch lõi cuốn MGDA 25%.....	101
Hình 3.31. Kết quả phân tích bề mặt đáp ứng nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số điều kiện vận hành lên thông lượng Jw (trái) và hệ số tổn hao Rds (phải) khi sử dụng dung dịch lõi cuốn MAL 20%.....	104
Hình 3.32. Kết quả phân tích bề mặt đáp ứng nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số điều kiện vận hành lên thông lượng Jw (trái) và hệ số tổn hao Rds (phải) khi sử dụng dung dịch lõi cuốn PVP 20%	107
Hình 3.33. Kết quả phân tích bề mặt đáp ứng nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số điều kiện vận hành lên thông lượng Jw (trái) và hệ số tổn hao Rds (phải) khi sử dụng dung dịch lõi cuốn MGDA 25%	111
Hình 3.34. Ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên thông lượng Jw của các dung dịch lõi cuốn.....	113
Hình 3.35. Ảnh SEM bề mặt màng lọc phía tiếp xúc với dung dịch lõi cuốn PVP 20% (trên) và phía tiếp xúc với dòng cần xử lý (dưới).....	114
Hình 3.36. Ảnh SEM bề mặt màng lọc phía tiếp xúc với dung dịch lõi cuốn MAL 20% (trên) và phía tiếp xúc với dòng cần xử lý (dưới).....	115
Hình 3.37. Ảnh SEM bề mặt màng lọc phía tiếp xúc với dung dịch lõi cuốn MGDA 25% (trên) và phía tiếp xúc với dòng cần xử lý (dưới).....	116
Hình 3.38. Ảnh hưởng của thời gian vận hành và phương pháp làm sạch rửa xuôi lên thông lượng Jw (dung dịch lõi cuốn MAL 20%)	117
Hình 3.39. Ảnh hưởng của thời gian vận hành và phương pháp làm sạch rửa xuôi lên thông lượng Jw (dung dịch lõi cuốn PVP 20%).....	118
Hình 3.40. Ảnh hưởng của thời gian vận hành và phương pháp làm sạch rửa xuôi	

lên thông lượng J_w (dung dịch lô cuộn MGDA 25%).....	119
Hình 3.41. So sánh hiệu quả vận hành của các dung dịch lô cuộn trên mẫu nước nhiễm mặn thực tế và mẫu nước mặn mô phỏng	120

MỞ ĐẦU

Lý do chọn đề tài

Từ 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 không chỉ bản thân con người, mà còn cả các loài vật nuôi và cây trồng khác. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, dưới tác động kết hợp của nhiều yếu tố khách quan cũng như chủ quan, 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 màng thẩm thấu ngược, đều tồn tại một số nhược điểm nhất định, đòi hỏi cần phát triển các 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].

Nếu không xét đến những yếu tố ảnh hưởng khác, thì 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 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 (hay cụ thể hơn, chất lõi cuốn) 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 dung dịch lõi cuốn (hay cụ thể hơn, chất lõi cuốn) lý tưởng 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 qua màng là không thể tránh khỏi, nên một chất lõi cuốn 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].

Do vậy Luận án “*Nghiên cứu lựa chọn dung dịch lõi cuốn 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, Luận án tập trung vào nghiên cứu và đánh giá hiệu quả lõi cuốn của một số dung dịch lõi cuốn mới tiềm năng sở hữu khả năng lõi cuốn cao, mà đáng chú ý nhất là dung dịch lõi cuốn chứa hỗn hợp muối trinati α -DL-alanin diaxetat và axit citric. Muối trinati α -DL-alanin diaxetat được lựa chọn làm chất lõi cuốn mới tiềm năng do có giá thành rẻ và hiện đang được thương mại hoá tương đối rộng rãi trên thị trường, đồng thời sở hữu khả năng tan tốt dung môi nước, khả năng tạo phức dễ tan với nhiều loại ion kim loại hoá trị cao, cũng như khả năng phân huỷ sinh học trong môi trường tốt và không tạo thành môi nguy hại đáng kể đối với các loài sinh vật bao gồm con người.

Ngoài ra, Luận án cũng đã nghiên cứu 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 những chất lõi cuốn tiềm năng này, từ đó thu được cái nhìn mang tính khái quát và toàn diện về tiềm năng ứng dụng của chúng trong thực tiễn sản xuất nước ngọt từ các nguồn nước bị nhiễm mặn.

Mục tiêu nghiên cứu

Lựa chọn một số dung dịch lõi cuốn mới 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 dung dịch lõi cuốn mới tiềm năng này trong quy mô phòng thí nghiệm.

Nội dung nghiên cứu

- Nghiên cứu đặc trưng lõi cuốn cơ bản của một số dung dịch lõi cuốn mới tiềm năng được lựa chọn.
- Nghiên cứu 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 mới 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.
- Nghiên cứu 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 mới tiềm năng được lựa chọn, và hiệu quả làm sạch màng

thẩm thấu chuyển tiếp của phương pháp rửa xuôi.

- Nghiên cứu khả năng xử lý nước nhiễm mặn thành nước sinh hoạt của hệ thống màng thẩm thấu chuyển tiếp sử dụng những dung dịch lồi cuốn mới tiềm năng được lựa chọn.
- Nghiên cứu khả năng lồi cuốn của những dung dịch lồi cuốn mới tiềm năng được lựa chọn trên đối tượng nguồn nước cần xử lý là nước nhiễm mặn thực tế.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Ý nghĩa khoa học: Luận án đã thành công lựa chọn và xác định được các tính chất cơ bản của một số dung dịch lồi cuốn mới tiềm năng, đặc biệt là dung dịch lồi cuốn chứa hỗn hợp hai chất lồi cuốn trinati α -DL-alanin diaxetat và axit citric, bao gồm: đặc trưng lồi cuốn, đặc trưng gây nhiễm bẩn màng sau thời gian vận hành kéo dài và hiệu quả làm sạch màng của phương pháp rửa xuôi, và ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành lên đặc trưng lồi cuốn của dung dịch lồi cuốn. Trên cơ sở này, Luận án cũng đã thành công tối ưu các yếu tố điều kiện vận hành cho từng loại dung dịch lồi cuốn nhằm thu được hiệu quả lồi cuốn tốt nhất, và xác định được khả năng xử lý nước nhiễm mặn thành nước sinh hoạt của hệ thống màng thẩm thấu chuyển tiếp sử dụng những dung dịch lồi cuốn tiềm năng được lựa chọn. Nhìn chung, kết quả của Luận án mang giá trị tham khảo cao, góp phần bổ sung kho tàng kiến thức liên quan đến công nghệ màng thẩm thấu chuyển tiếp nói riêng, và công nghệ khử mặn sản xuất nước ngọt nói chung.

Ý nghĩa thực tiễn: Kết quả của Luận án cho phép gợi mở một số hướng tiếp cận mới tiềm năng liên quan đến vấn đề khử mặn sản xuất nước ngọt tại Việt Nam, góp phần giải quyết thực trạng thiếu nước ngọt do xâm nhập mặn hiện đang xảy ra tại một số địa phương ven biển nhằm nâng cao chất lượng sống của người dân, cũng như tăng cường khả năng ứng phó của các cộng đồng dân cư ven biển trước những tác động tiêu cực gây ra bởi hiện tượng biến đổi khí hậu toàn cầu.

Những đóng góp mới của Luận án

Luận án có những đóng góp mới nổi bật như sau:

- Đã xác định một dung dịch lồi cuốn mới tiềm năng chưa từng được công bố trước đó chứa hỗn hợp hai chất lồi cuốn trinati α -DL-alanin diaxetat và axit citric, và khảo sát một số đặc trưng lồi cuốn cơ bản của dung dịch lồi cuốn này.
- Đã xác định ảnh hưởng của các yếu tố điều kiện vận hành và thời gian vận hành kéo dài lên đặc trưng lồi cuốn và đặc trưng gây nhiễm bẩn màng của ba loại

dung dịch lõi cuộn tiềm năng, cũng như xác định được hiệu quả làm sạch màng bị nhiễm bẩn của phương pháp rửa xuôi.

- Đã tối ưu hoá các yếu tố điều kiện vận hành cho ba loại dung dịch lõi cuộn tiềm năng được lựa chọn nhằm thu được hiệu quả lõi cuộn tốt nhất.
- Đã xác định khả năng xử lý nước nhiễm mặn thành nước sinh hoạt của hệ thống màng thẩm thấu chuyển tiếp sử dụng ba dung dịch lõi cuộn tiềm năng được lựa chọn.
- Đã xác định khả năng lõi cuộn của những dung dịch lõi cuộn tiềm năng được lựa chọn trên đối tượng nguồn nước cần xử lý là nước nhiễm mặn thực tế.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

1.1. CÔNG NGHỆ KHỬ MẶN SẢN XUẤT NƯỚC NGỌT

1.1.1. Nước ngọt và tầm quan trọng của nước ngọt

Hiện nay, các nguồn nước có thể được phân loại theo nhiều tiêu chí khác nhau, ví dụ phân loại theo đặc trưng nguồn gốc (nước mưa, nước thải sinh hoạt, nước thải công nghiệp...) hay đặc trưng dòng chảy (nước sông, nước hồ, nước ngầm...). Trong đó, một tiêu chí phân loại nguồn nước được sử dụng tương đối phổ biến chính là phân loại nguồn nước trên cơ sở tổng hàm lượng muối vô cơ, mà chủ yếu là muối NaCl và muối KCl, hoà tan trong nước [9–11]:

- **Nước ngọt** được định nghĩa là những nguồn nước chứa tổng hàm lượng muối vô cơ hòa tan thấp hơn 0,05%. Tuy nhiên, trong một số trường hợp nhất định, ngưỡng giới hạn này cũng có thể được chấp nhận lên tới 0,3%.

- **Nước lợ** hay **nước nhiễm mặn** được định nghĩa là những nguồn nước chứa tổng hàm lượng muối hòa tan nằm trong khoảng 0,05% – 3,0%, hay một cách tổng quát hơn là những nguồn nước với độ mặn nằm giữa nước mặn và nước ngọt. Nước lợ thường hình thành một cách tự nhiên tại các khu vực cửa sông, đầm phá, rừng ngập mặn... cũng như biển Baltic và biển Đen.

- **Nước mặn** được định nghĩa là những nguồn nước chứa tổng hàm lượng muối hòa tan nằm trong khoảng 3,0% (tương đương nước biển gần bờ, gần cửa sông...) – 3,5% (tương đương nước biển thông thường).

- **Nước có độ mặn cao** được định nghĩa là những nguồn nước chứa tổng hàm lượng muối hòa tan cao, thông thường từ 3,5% (tương đương nước biển thông thường) cho tới khoảng 26% (nồng độ bão hòa của muối NaCl trong nước). Nước muối cô đặc có thể hình thành một cách tự nhiên dưới dạng hồ muối hoặc vũng muối dưới đáy biển, nhưng thường thấy nhất vẫn là sản phẩm phụ hình thành từ các quá trình công nghiệp, bao gồm cả phần lớn các hệ thống khử mặn.

Trong suốt chiều dài phát triển của lịch sử nhân loại, nước ngọt vẫn luôn được coi là một trong những nguồn tài nguyên đóng vai trò quan trọng hàng đầu và không thể thay thế đối với con người. Trên thực tế, rất nhiều nền văn minh cổ đại đều phát triển xung quanh lưu vực những con sông lớn như sông Ấn, sông Hằng, sông Hoàng Hà, sông Nile... [12], hay như ngay tại Việt Nam là sông Cửu Long và sông Hồng, bởi chúng đều là những nguồn cung cấp nước ngọt hết sức dồi dào.

Nước ngọt là một nguồn tài nguyên có thể tái tạo, nhưng hữu hạn. Theo ước tính của các nhà khoa học, tổng lượng nước trên Trái Đất hiện nay là gần 1,4 tỷ km³, tuy nhiên trong số đó lại có đến 97,25% là nước mặn không phù hợp phục vụ cho nhu cầu sinh hoạt và sản xuất của con người. Ngược lại, nước ngọt chỉ chiếm khoảng 2,75% tổng lượng nước trên Trái Đất, trong đó chủ yếu tồn tại dưới dạng băng tuyết tập trung xung quanh hai vùng địa cực hoặc dưới dạng nước ngầm và ẩm độ trong đất. Nguồn nước ngọt thể lỏng dễ dàng tiếp cận đối với con người (bao gồm nước sông, nước hồ...) chỉ chiếm chưa đến 0,01% tổng lượng nước trên Trái Đất, tương đương khoảng gần 140.000 km³ [9,10]. Con số này mặc dù rất lớn, nhưng thực tế vẫn rất khó đáp ứng được nhu cầu sử dụng nước sạch phục vụ các nhu cầu sinh hoạt và sản xuất thường ngày của con người.

Cụ thể, để đáp ứng những nhu cầu cơ bản nhất bao gồm ăn uống và vệ sinh thân thể, một người trưởng thành bình thường cần sử dụng tối thiểu khoảng 50 L nước sạch mỗi ngày [13]. Bên cạnh đó, nhu cầu sử dụng nước ngọt trong các hoạt động sản xuất nông nghiệp và công nghiệp cũng rất lớn, ví dụ một con bò sữa mỗi ngày có nhu cầu nước ngọt trung bình lên tới 76 L [14], để sản xuất được 1 kg thịt bò cần tiêu thụ đến trên 15.000 L nước ngọt, trong khi con số này đối với các loại ngũ cốc dao động trong khoảng từ 900 – 5.000 L nước ngọt [15]. Khi không được cung cấp đủ nước hoặc gặp phải một số vấn đề bệnh lý cụ thể gây nên tình trạng mất nước cấp tính, cơ thể con người nói riêng và đa phần các loài sinh vật nói chung sẽ xuất hiện hàng loạt triệu chứng từ đau đầu, khó chịu, mệt mỏi, suy giảm nhận thức... cho đến co giật, tăng natri máu, giảm dung lượng máu, hoặc thậm chí là tử vong [16,17]. Bởi vậy, tổ chức Liên Hợp Quốc đã công nhận khả năng tiếp cận với nguồn nước sạch là một quyền cơ bản của con người trong nội dung Nghị quyết A/RES/64/292 [18], cũng như công nhận khả năng tiếp cận với nguồn nước sạch là một trong số 17 mục tiêu chính để phát triển bền vững với tầm nhìn đến năm 2030 trong nội dung Nghị quyết A/RES/70/1 [19].

1.1.2. Thực trạng nguồn tài nguyên nước tại Việt Nam

Việt Nam là một quốc gia sở hữu nguồn tài nguyên nước tương đối phong phú, với mức bình quân đầu người hiện nay là 12.000 m³/năm. Tuy nhiên, khoảng 2/3 lượng nước nói trên lại xuất phát từ vùng thượng lưu những hệ thống sông lớn nằm trên lãnh thổ quốc gia khác, tiêu biểu như thượng lưu sông Hồng (bắt nguồn từ Vân Nam, Trung Quốc) và thượng lưu sông Cửu Long (sông Mê-kông, bắt nguồn từ cao nguyên Thanh Tạng, Trung Quốc và đi qua bốn quốc gia khác trước khi chảy vào Việt Nam). Đồng thời, do đặc điểm địa hình và khí hậu phức tạp nên nguồn tài nguyên nước cũng phân bố không đồng đều trên lãnh thổ Việt Nam [20–22].

Theo thống kê, lượng nước sử dụng hằng năm của nước ta để phục vụ cho sản xuất nông nghiệp là khoảng 93 tỷ m³, cho sản xuất công nghiệp là khoảng 17,3 tỷ m³, cho hoạt động dịch vụ là 2 tỷ m³, và cho sinh hoạt là 3,09 tỷ m³. Dự báo đến năm 2030, cơ cấu dùng nước sẽ thay đổi theo xu hướng sản xuất nông nghiệp chiếm 75%, sản xuất công nghiệp chiếm 16%, và hoạt động tiêu dùng khác chiếm 9%. Nhu cầu dùng nước sẽ tăng gấp đôi, tương đương khoảng 1/10 lưu lượng nước trên hệ thống sông ngòi, 1/3 tổng lượng nước nội địa, và 1/3 tổng lưu lượng nước chảy ổn định. Bên cạnh đó, trên cả nước hiện cũng đang sử dụng 1.000.000 ha mặt nước ngọt, 400.000 ha mặt nước lợ, 1.470.000 ha mặt nước sông ngòi, cùng 14.000.000 ha mặt nước nội thủy và lãnh hải để phục vụ sản xuất và nuôi trồng thủy hải sản – tương đương khoảng 31% diện tích mặt nước ngọt, cùng 12,5% diện tích mặt nước lợ và nước mặn [23–28].

Một vấn đề đặt ra hiện nay là chất lượng nguồn nước tại Việt Nam đang ngày càng đi xuống do ảnh hưởng của ô nhiễm môi trường nước, dẫn đến suy giảm nguồn nước ngọt có thể sử dụng cũng như làm gia tăng chi phí xử lý nước sạch. Cụ thể, hiện nay vẫn tồn tại thực trạng nhiều nguồn nước thải từ các nhà máy, xí nghiệp, khu dân cư, bệnh viện, khu vực sản xuất nông nghiệp... được thải trực tiếp ra ra môi trường thông qua hệ thống thoát nước mà chưa qua xử lý, hoặc được xử lý chưa triệt để. Những nguồn nước thải này có thể mang theo một lượng lớn các chất bồi lắng, chất thải nhựa, hóa chất độc hại, kim loại nặng, cặn dầu, hay thậm chí cả chất phóng xạ... gây ô nhiễm môi trường. Bên cạnh đó, rác thải rắn được thải trực tiếp ra khu vực gần môi trường nước và các hoạt động kinh tế trên mặt nước cũng là những yếu tố ảnh hưởng tiêu cực đến chất lượng môi trường nước tại Việt Nam. Hiện nay, nhiều khu vực nước ta đã ghi nhận hàm lượng các chất hữu cơ độc hại (đặc biệt là hàm lượng các chất bảo vệ thực vật), kim loại nặng, và dầu (đặc biệt là xung quanh những khu vực cảng biển) đạt mức cao, vượt ngưỡng giới hạn cho phép của Tiêu chuẩn Việt Nam và vượt rất xa ngưỡng giới hạn cho phép của các tiêu chuẩn quốc tế [29–34].

Một yếu tố khác đã và đang ảnh hưởng tiêu cực đến chất lượng nguồn nước ngọt tại Việt Nam là hiện tượng hạn hán, nước biển dâng, và xâm nhập mặn gây ra bởi biến đổi khí hậu toàn cầu. Theo số liệu thống kê, trong 50 năm trở lại đây, nước ta có khoảng 36 năm bị hạn với các mức độ khác nhau, đồng thời mức độ hạn hán cũng đang ngày càng diễn ra nghiêm trọng hơn. Đáng chú ý, các khu vực phía Nam mà đặc biệt là Đồng bằng sông Cửu Long hiện đang thường xuyên trải qua tình trạng hạn hán và thiếu hụt nguồn nước ngọt phục vụ cho hoạt động sản xuất nông nghiệp, mà nguyên nhân chính là do sự giảm sút lượng nước trên lưu vực sông Mê-

kông vào mùa khô và hiện tượng xâm nhập mặn tiến sâu vào đất liền. Cụ thể, vào mùa khô năm 2025, chiều sâu ranh mặn 4 g/L lớn nhất tại các cửa sông Cửu Long được dự báo có thể lên tới 70 km, sâu nhất tại hai vực hai sông Vàm Cỏ Đông và Vàm Cỏ Tây. Trên cơ sở này, chiều sâu ranh mặn 1 g/L cũng tiếp tục mở rộng thêm đến 50 km vào sâu trong đất liền, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng nguồn nước cũng như sinh hoạt và canh tác nông nghiệp của người dân [35–41].

Cần chú ý rằng, phần lớn các loài sinh vật không sinh sống trong đại dương (bao gồm cả con người, cùng các loài cây trồng và gia súc – gia cầm do con người canh tác và nuôi dưỡng) đều đã thích nghi với việc sử dụng nguồn nước ngọt để phục vụ cho nhu cầu sinh lý của cơ thể, và thiếu đi khả năng tiêu thụ nước mặn một cách thường xuyên. Con người, khi uống phải lượng nước mặn đáng kể, sẽ xuất hiện các hiện tượng ngộ độc bao gồm mệt mỏi, buồn nôn, rối loạn... cho đến co giật, xuất huyết não, tăng natri máu, hoặc thậm chí là tử vong [42–44], mà nguyên nhân chủ yếu là do ngộ độc natri – một trong hai nguyên tố cấu thành nên muối NaCl, chất phân tán chủ yếu tạo nên độ mặn của nước. Ngay cả khi đang trong tình trạng mất nước, thì việc uống nước mặn cũng không đem lại tác dụng tích cực, mà ngược lại sẽ khiến cho các triệu chứng mất nước càng trở nên nghiêm trọng [45].

Trên cơ sở những điều kiện thực tiễn đã trình bày, có thể thấy được rằng xã hội hiện đang đặt ra nhu cầu cần phát triển những công nghệ sản xuất nước ngọt mới hiệu quả hơn và tận dụng được những nguồn nước khó xử lý hơn. Trong số những công nghệ sản xuất nước ngọt mới hiện đang được nghiên cứu và áp dụng, thì công nghệ khử mặn được đánh giá là một giải pháp đầy tiềm năng.

1.1.3. Các công nghệ khử mặn sản xuất nước ngọt

Trong những năm trở lại đây, công nghệ khử mặn được đánh giá là một giải pháp đầy tiềm năng cho vấn đề thiếu nước ngọt phục vụ sinh hoạt và sản xuất trên thế giới nói chung, và tại Việt Nam nói riêng. Trên toàn thế giới, tổng sản lượng nước ngọt sản xuất thông qua các công nghệ khử mặn được ước tính đạt khoảng trên 100 triệu m³/ngày, và con số này được dự đoán sẽ tiếp tục tăng mạnh trong tương lai gần do hiện tượng suy giảm nguồn nước ngọt hiện đang ngày càng diễn biến phức tạp dẫn đến sự gia tăng chi phí của các phương pháp sản xuất nước sạch truyền thống, đồng thời sự phát triển của các công nghệ tiên tiến lại đang giúp giảm chi phí xây dựng và vận hành của những hệ thống khử mặn. Tại một số khu vực với điều kiện địa lý và khí hậu đặc biệt (ví dụ khu vực Trung Đông), nước sạch thu được qua trình khử mặn đã có thể cạnh tranh một cách thành công với các nguồn tài nguyên nước truyền thống cũng như các phương pháp vận chuyển nước sinh hoạt

(ví dụ như việc xây dựng các đập thủy điện, hồ chứa nước, hay kênh dẫn nước...) [46–48]. Đặc biệt, do sở hữu đường bờ biển dài nên Việt Nam có lợi thế tự nhiên trong lĩnh vực sản xuất nước ngọt từ những nguồn nước bị nhiễm mặn, bao gồm nước lợ và nước biển.

Cùng với tổng năng lực sản xuất tiếp tục gia tăng, nhiều công nghệ khử mặn đã được liên tục phát triển với những ưu điểm và nhược điểm riêng, phù hợp cho từng điều kiện hoàn cảnh cụ thể. Tuy nhiên, hiện nay thì công nghệ chưng cất nhiệt và công nghệ màng vẫn đang là hai công nghệ khử mặn được ứng dụng rộng rãi nhất, lần lượt chiếm khoảng 29% và 65% tổng năng lực khử mặn của toàn thế giới [11]. Trong đó, công nghệ màng (mà phổ biến nhất hiện nay là công nghệ màng thẩm thấu ngược RO) được đánh giá là sở hữu nhiều ưu điểm nổi bật khi so sánh với công nghệ chưng cất nhiệt, bao gồm: mức tiêu thụ điện năng thấp hơn đáng kể (chỉ khoảng 5 kWh/m³ nước sạch, so với trên 17 kWh/m³ nước sạch khi sử dụng công nghệ chưng cất nhiệt), dễ dàng lắp đặt và vận hành, và quy trình bảo dưỡng đơn giản [49–52]. Bởi vậy, có thể thấy rằng đây là một công nghệ khử mặn sản xuất nước ngọt rất thích hợp để áp dụng tại một quốc gia đang phát triển như Việt Nam.

Cụ thể hơn, công nghệ màng khử mặn thông qua lọc màng phổ biến nhất hiện nay là công nghệ lọc thẩm thấu ngược (RO). Nguyên tắc hoạt động chính của công nghệ lọc màng này là thành phần nước có trong nguồn nước mặn được phân tách ra khỏi thành phần muối hoà tan nhờ một màng bán thấm với cấu trúc đặc biệt và dưới điều kiện áp suất cao. Áp suất hoạt động của các hệ thống màng RO thường đạt khoảng 15 – 25 bar khi nguồn nước đầu vào cần xử lý là nước lợ, và khoảng 54 – 80 bar khi nguồn nước đầu vào cần xử lý là nước biển (áp suất thẩm thấu của nước biển là khoảng 25 bar). Tuy nhiên, công nghệ màng RO cũng tồn tại một số nhược điểm nhất định, bao gồm: hiệu suất sử dụng nguồn nước đầu vào tương đối thấp, và dễ bị tắc màng do yêu cầu vận hành tại điều kiện áp suất cao – đặc biệt là khi cần xử lý những nguồn nước với độ mặn ban đầu tương đối cao [50,53]. Điều này đặt ra nhu cầu cần phát triển những công nghệ màng khử mặn mới hiệu quả hơn, mà một ứng viên tiềm năng chính là công nghệ màng thẩm thấu chuyển tiếp (FO).

1.2. CÔNG NGHỆ MÀNG THẨM THẤU CHUYỂN TIẾP

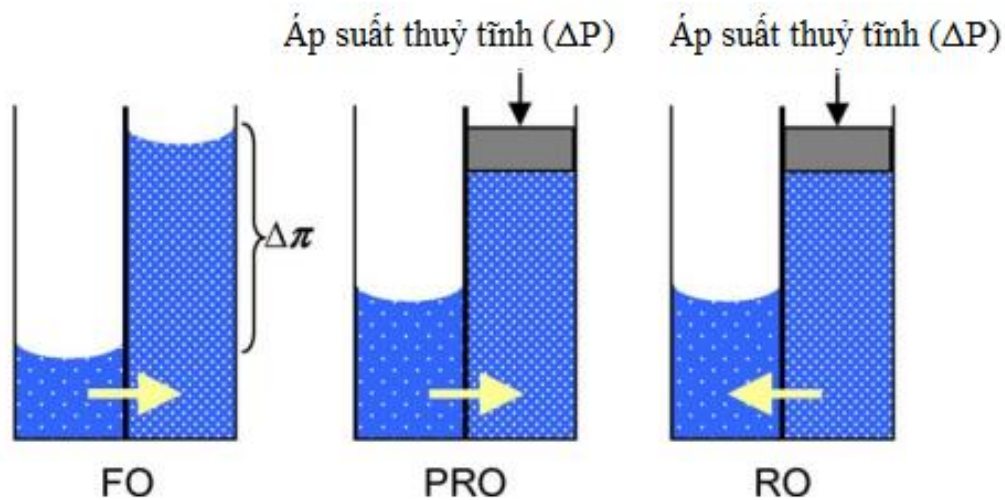
1.2.1. Quá trình thẩm thấu và phân loại các quá trình thẩm thấu

Quá trình thẩm thấu của một chất được định nghĩa là sự chuyển dịch của chất này qua màng bán thấm từ phía có thế năng hóa học cao hơn đến phía có thế năng hóa học thấp hơn, ví dụ sự chuyển dịch của nước từ phía có áp suất thẩm thấu tự nhiên đối với nước thấp hơn đến phía có áp suất thẩm thấu tự nhiên đối với nước

cao hơn.

Dựa theo hướng dịch chuyển của các phân tử nước (hoặc các phân tử tương ứng khác), có thể phân chia quá trình thẩm thấu thành hai loại chính là quá trình thẩm thấu ngược (RO) và quá trình thẩm thấu xuôi, hay quá trình thẩm thấu chuyển tiếp (FO). Trong đó, quá trình FO vận dụng chênh lệch về mặt áp suất thẩm thấu tự nhiên giữa các dung dịch tại hai phía của màng bán thấm làm động lực cho sự dịch chuyển của nước qua màng bán thấm, thay vì vận dụng chênh lệch về mặt áp suất thủy lực giống như trong quá trình RO. Ngoài ra, quá trình thẩm thấu chậm áp (PRO) có thể được xem là trung gian giữa quá trình FO và quá trình RO, trong đó áp suất thủy lực được tác dụng theo chiều ngược lại so với chiều chuyển dịch do thẩm thấu tự nhiên của nước (tương tự như quá trình RO), tuy nhiên nước vẫn dịch chuyển về phía dung dịch lồi cuốn sở hữu áp suất thẩm thấu tự nhiên cao hơn (tương tự như quá trình FO) [54].

Hướng dịch chuyển của nước thẩm thấu qua màng bán thấm trong các quá trình FO, quá trình RO, và quá trình PRO được mô tả trong **Hình 1.1**.



Hình 1.1. Hướng dịch chuyển của nước qua màng bán thấm trong các quá trình thẩm thấu FO, RO, và PRO

Quá trình RO là quá trình thẩm thấu hiện đang được áp dụng nhiều trong các hoạt động sản xuất và đời sống. Tuy nhiên, quá trình RO cũng tồn tại một số nhược điểm nhất định, bao gồm yêu cầu mức tiêu thụ điện năng cao, dễ gây tắc màng, và hiệu suất thu hồi thấp gây lãng phí nguồn nước đầu vào cần xử lý. Bởi vậy, trong khoảng 20 năm trở lại đây, các nhà khoa học đã tập trung nhiều hơn vào nghiên cứu quá trình FO và quá trình PRO, do những quá trình thẩm thấu này có thể khắc phục được một số nhược điểm của quá trình RO về mức tiêu thụ điện năng cao và khả năng gây tắc màng sau thời gian dài sử dụng.

Cụ thể, ưu điểm chủ yếu của quá trình PRO là cho phép chuyển hoá thế năng thẩm thấu của dung dịch lõi cuốn thành dạng năng lượng hữu ích khác thông qua hệ thống thu hồi năng lượng, bởi vậy chủ yếu được nghiên cứu nhằm mục đích ứng dụng sản xuất điện. Ngược lại, ứng dụng chủ yếu của quá trình FO là trong các hệ thống khử mặn sản xuất nước ngọt và các hệ thống cô đặc/các hệ thống cô đặc thu hồi chất tan, do quá trình FO cho phép tạo thành thông lượng nước thẩm thấu qua màng tương đối cao, đồng thời yêu cầu mức tiêu thụ năng lượng thấp và ít gây nhiễm bẩn màng hơn đáng kể khi so sánh với các quá trình thẩm thấu sử dụng động lực là áp suất thủy lực khác như quá trình RO [54].

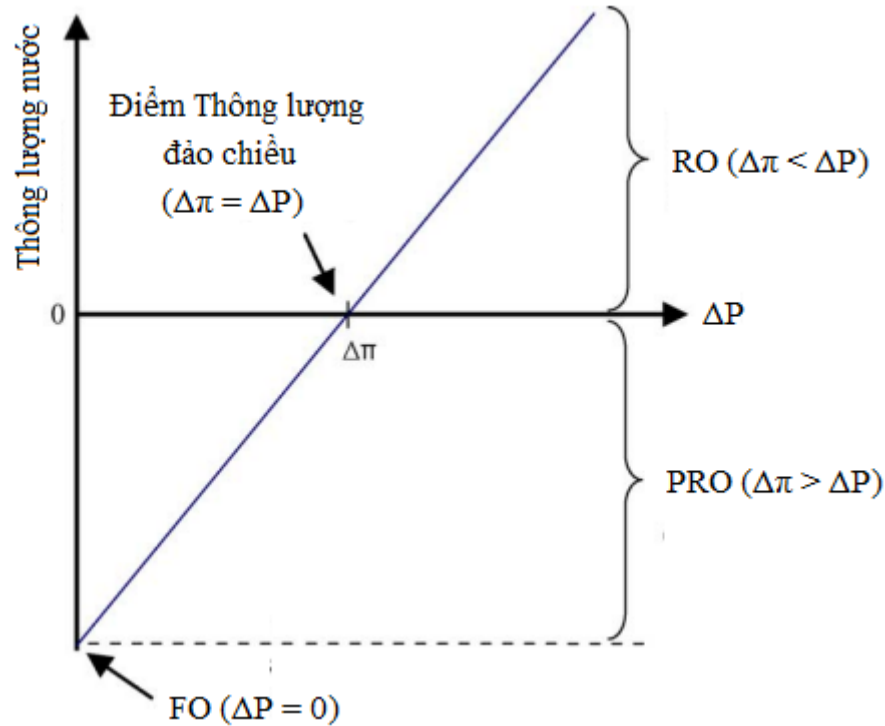
Trong các quá trình thẩm thấu, áp suất thẩm thấu (π) là một thông số đặc biệt quan trọng, quyết định trực tiếp đến hiệu quả dịch chuyển của nước qua màng bán thấm. Áp suất thẩm thấu được định nghĩa là giá trị áp suất cần thiết tác dụng lên một dung dịch nhằm ngăn cản sự dịch chuyển của nước qua màng bán thấm về phía dung dịch này, khi chất lỏng phía bên kia màng bán thấm là nước tinh khiết. Định nghĩa trên cũng có thể được mở rộng cho phần lớn các loại dung môi và dung dịch tương ứng khác [55]. Công thức chung mô tả sự dịch chuyển của nước qua màng bán thấm trong các quá trình FO, quá trình RO, và quá trình PRO được trình bày như sau:

$$J_w = A \times (\sigma \times \Delta\pi - \Delta P) \quad \text{(Phương trình 1)}$$

trong đó:

- J_w : thông lượng nước thẩm thấu qua màng, đặc trưng cho thể tích nước thẩm thấu qua một đơn vị diện tích màng bán thấm trong một đơn vị thời gian xác định (đơn vị: $L/m^2 \cdot h$, LMH);
- A : hệ số thẩm thấu của màng, đặc trưng cho khả năng cho phép nước thẩm thấu qua của màng bán thấm (đơn vị: $L/m^2 \cdot h \cdot Pa$);
- σ : hệ số chọn lọc, đặc trưng cho giữ lại các phân tử chất tan khác của màng bán thấm ($\sigma = 1$ tương ứng với màng bán thấm hoàn toàn giữ lại các phân tử chất tan khác, $\sigma = 0$ tương ứng với màng bán thấm hoàn toàn cho phép các phân tử chất tan khác đi qua);
- $\Delta\pi$: chênh lệch áp suất thẩm thấu giữa hai phía của màng bán thấm, đặc trưng cho động lực thẩm thấu tự nhiên của nước qua màng bán thấm (đơn vị: Pa);
- ΔP : chênh lệch áp suất thủy lực giữa hai phía của màng bán thấm, đặc trưng cho động lực thẩm thấu của nước qua màng bán thấm gây ra bởi áp suất thủy lực (đơn vị: Pa).

Cụ thể, trong quá trình FO thì giá trị ΔP bằng không. Ngược lại, trong quá trình RO thì giá trị ΔP cần lớn hơn giá trị $\Delta\pi$, còn trong quá trình PRO thì giá trị ΔP cần lớn hơn không và giá trị $\Delta\pi$ cần lớn hơn giá trị ΔP . Mỗi quan hệ giữa động lực của các quá trình thẩm thấu và hướng thông lượng nước thẩm thấu qua màng được mô tả trong **Hình 1.2** [56].



Hình 1.2. Mối quan hệ giữa động lực của các quá trình thẩm thấu và hướng thông lượng nước thẩm thấu qua màng

Trong thực nghiệm, để xác định giá trị thông lượng nước thẩm thấu qua màng, người ta tiến hành tính toán trên cơ sở các đại lượng có thể đo đạc được theo công thức sau:

$$J_w = \frac{V}{A_m \times t} \quad \text{(Phương trình 2)}$$

trong đó:

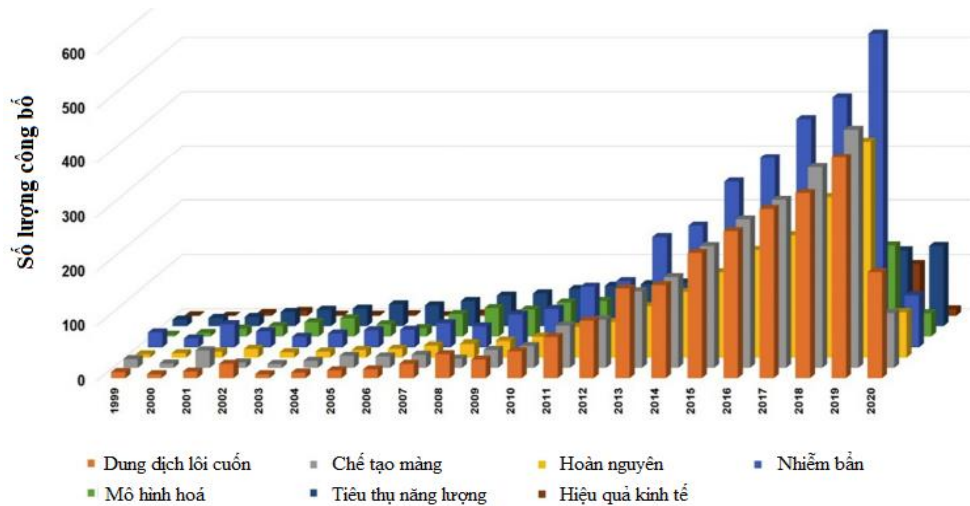
- V : thể tích nước thực tế thẩm thấu qua màng bán thấm trong một đơn vị thời gian t (đơn vị: L);
- A_m : diện tích hiệu quả cho phép nước thẩm thấu qua của màng bán thấm (đơn vị: m^2);
- t : thời gian vận hành thực tế của hệ thống thực nghiệm (đơn vị: h).

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

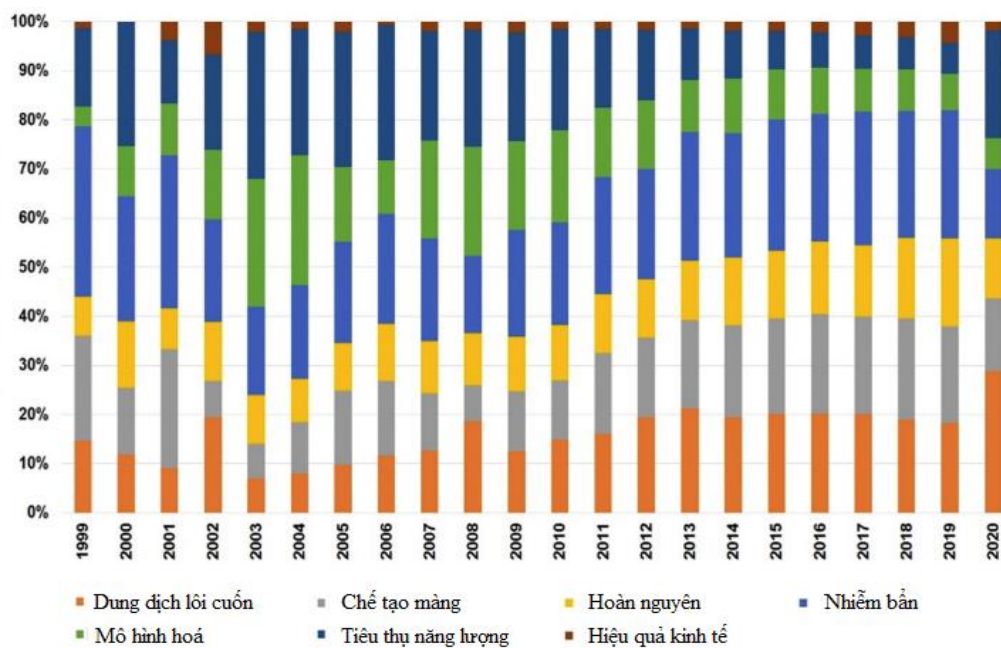
Tính đến nay, đã có khá nhiều kết quả nghiên cứu khoa học – bao gồm hàng loạt đăng ký bảo hộ sở hữu trí tuệ và bằng độc quyền sáng chế – liên quan đến các phương pháp và hệ thống màng FO được công bố trên khắp thế giới, tuy nhiên phần lớn những công nghệ này đều chưa thực sự hoàn thiện và chưa được chứng minh khả năng ứng dụng trong điều kiện thực tiễn [57–62]. Cụ thể, trong giai đoạn 1999 – 2020, đã có 7.175 bài báo khoa học được công bố liên quan đến vấn đề ứng dụng công nghệ màng FO trong xử lý nước nhiễm mặn, trong đó bao gồm 1.522 bài báo khoa học (chiếm khoảng 27%) thực hiện khảo sát đối với các loại màng FO khác nhau. Nhìn chung, có thể thấy số lượng nghiên cứu liên quan đến vấn đề ứng dụng công nghệ màng FO trong xử lý nước nhiễm mặn vẫn đang tiếp tục tăng dần theo từng năm, đặc biệt là trong giai đoạn 2012 – 2020, như thể hiện trong **Hình 1.3** và **Hình 1.4** [63].

Đặc biệt, liên quan đến vấn đề ứng dụng công nghệ màng FO trong xử lý nước nhiễm mặn, những đối tượng nghiên cứu chính hiện đang được các nhà khoa học quan tâm bao gồm dung dịch lồi cuốn và phương pháp hoàn nguyên dung dịch lồi cuốn, chế tạo và biến tính màng bán thấm, hiện tượng nhiễm bẩn màng và phương pháp khắc phục, mô hình hoá, đánh giá mức tiêu thụ năng lượng, cũng như phân tích hiệu quả kinh tế. Loại màng FO được sử dụng trong các nghiên cứu này phần lớn là màng dạng tấm phẳng trên cơ sở xenlulo tri-axetat (màng CTA) và trên cơ sở nhựa polyamit (màng TFC).

Nhìn chung, có thể thấy được rằng công nghệ màng FO là một giải pháp thay thế đầy tiềm năng trong lĩnh vực khử mặn và sản xuất nước sạch – vấn đề mà hiện nay đang rất được quan tâm trên toàn thế giới. Dẫu vậy, để có thể thực sự áp dụng vào điều kiện thực tiễn trên quy mô lớn, thì công nghệ này vẫn còn cần vượt qua hai rào cản lớn, đó là phát triển những loại màng FO mới sở hữu hiệu năng vận hành cao hơn, cũng như tìm kiếm những dung dịch lồi cuốn mới cho phép dễ dàng hoàn nguyên và/hoặc tái cô đặc hơn. Ngoài ra, khi nguồn nước cần xử lý khử mặn là nước biển, thì dung dịch lồi cuốn cũng phải sở hữu áp suất thẩm thấu tự nhiên đủ lớn để có thể tạo thành chênh lệch về mặt áp suất thẩm thấu phù hợp với nguồn nước cần xử lý.



Hình 1.3. Số lượng bài báo khoa học liên quan đến công nghệ màng FO được công bố qua các năm trong giai đoạn 1999 – 2020



Hình 1.4. Tỷ lệ các bài báo khoa học liên quan đến công nghệ màng FO được công bố qua các năm trong giai đoạn 1999 – 2020

Tại Việt Nam, công nghệ thẩm thấu chuyển tiếp vẫn đang là một hướng nghiên cứu tương đối mới, chưa thực sự nhận được sự quan tâm của các nhà khoa học. Năm 2017, PGS.TS. Lê Trường Giang đã được giao chủ nhiệm thực hiện đề tài **“Nghiên cứu, ứng dụng màng thẩm thấu chuyển tiếp trong sản xuất nước sinh hoạt”** (mã số: VAST.CTG.08/14-16), và thu được nhiều kết quả tích cực. Các kết quả nghiên cứu cho thấy, phương pháp FO có thể được sử dụng để khử mặn cho những nguồn nước đầu vào với hàm lượng muối cao, bên cạnh đó hiện tượng tắc

ngheèn màng diễn ra chậm hơn so với các công nghệ lọc màng khác. Nghiên cứu cũng đã phát hiện ra một số dung dịch lõi cuốn mới chưa được công bố trên thế giới, đó là các hợp chất phức sắt – amoni, với thông lượng nước cao nhất khi sử dụng đạt tới trên 11 LMH. Dựa trên những kết quả nghiên cứu trong phòng thí nghiệm, nhóm nghiên cứu đã thiết kế và lắp đặt một hệ thống thiết bị lọc nước mặn thành nước ngọt quy mô pilot trên cơ sở công nghệ lọc FO/NF, với công suất vận hành ổn định đạt trên 11,5 L/h và chất lượng sản phẩm nước đầu ra đạt tiêu chuẩn nước sinh hoạt theo QCVN 02:2009/BYT [64,65].

Tiếp nối những thành công này, NCS. Hoàng Minh Tạo đã được giao chủ nhiệm thực hiện đề tài **“Nghiên cứu hoàn thiện hệ thống lọc nước nhiễm mặn bằng thiết bị lọc nước thẩm thấu chuyển tiếp”** (mã số: UDPTCN 01/2020-2022), và thu được một số kết quả đáng ghi nhận, bao gồm khảo sát sơ bộ tính chất lõi cuốn của hai loại dung dịch lõi cuốn chứa maltodextrin và polyvinylpyrrolidon [66–68], cũng như đăng ký cấp bằng sáng chế phương pháp chế tạo và ứng dụng dung dịch lõi cuốn chứa hạt nano sắt từ. Ngoài ra, đề tài cũng đã hỗ trợ Học viên cao học Nguyễn Thị Thúy thực hiện Luận văn Thạc sĩ **“Nghiên cứu đánh giá tiềm năng ứng dụng của dung dịch lõi cuốn maltodextrin trong quá trình thẩm thấu xuôi để khử mặn”** tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam [68]. Năm 2023, NCS. Hoàng Minh Tạo đã tiếp tục được tin tưởng giao chủ nhiệm thực hiện đề tài **“Nghiên cứu ứng dụng công nghệ lọc thẩm thấu chuyển tiếp (FO) vào sản xuất cốt nước ép cô đặc tại Việt Nam”** (mã số: KHCBHH.02/23-25), dự kiến hoàn thành nghiệm thu vào giữa năm 2026.

Bởi vậy, có thể thấy được tại Việt Nam nói riêng và trên thế giới nói chung, công nghệ khử mặn ứng dụng màng FO là một lĩnh vực nghiên cứu giàu tiềm năng phát triển và mang tính ứng dụng cao. Đặc biệt, tìm kiếm những chất lõi cuốn mới phù hợp trong xử lý nước nhiễm mặn và nước biển là một vấn đề rất đáng quan tâm, bởi đây là một yếu tố hết sức then chốt ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả vận hành và hiệu quả kinh tế của toàn bộ hệ thống công nghệ khử mặn ứng dụng màng FO.

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

Bên cạnh dung dịch lõi cuốn, màng bán thấm là một cấu phần quan trọng khác đóng vai trò thiết yếu trong các hệ thống ứng dụng công nghệ màng FO, tạo thành ảnh hưởng mang tính quyết định lên hiệu quả hoạt động thực tế của các hệ thống màng FO. Màng bán thấm được định nghĩa là những vật liệu dạng màng sở hữu tính

chất thẩm chọn lọc, cho phép một số loại phân tử nhất định dễ dàng dịch chuyển qua cấu trúc của màng, nhưng đồng thời lại ngăn cản sự dịch chuyển của phần lớn những phân tử hoặc ion chất tan khác. Cụ thể, trong trường hợp quá trình thẩm thấu của nước, màng bán thấm cần cho phép các phân tử nước dịch chuyển qua cấu trúc của màng, nhưng đồng thời lại ngăn cản sự dịch chuyển của phần lớn những phân tử hoặc ion chất tan khác trong dung dịch [69].

Nhìn chung, màng bán thấm sử dụng trong công nghệ màng FO cần phải đáp ứng được các tiêu chí cơ bản sau:

- Có khả năng cho nước thẩm qua cao, từ đó cho phép đạt được giá trị thông lượng J_w cần thiết khi vận hành.
- Tính chọn lọc cao đối với các loại chất tan tồn tại trong dòng cần xử lý, đặc biệt là muối NaCl và chất lơ lửng, từ đó đảm bảo hạn chế hiện tượng tắc màng và hiện tượng khuếch tán của các phân tử muối NaCl từ dung dịch cần xử lý sang dung dịch lơ lửng, cũng như hiện tượng khuếch tán của các phân tử chất lơ lửng từ dung dịch lơ lửng sang dung dịch cần xử lý (hiện tượng thẩm thấu ngược qua màng của chất lơ lửng).
- Có độ bền cơ học cao, khả năng chống mài mòn tốt.
- Có khả năng chống ăn mòn bởi các yếu tố hoá học và các yếu tố sinh học tốt.

Do tồn tại những yêu cầu tương đối khắt khe trên, nên hiện nay thị trường màng bán thấm dành riêng cho quá trình FO chỉ chủ yếu tồn tại hai loại sản phẩm chính, bao gồm màng compozit lớp mỏng (màng TFC) và màng xenlulo tri-axetat (màng CTA), với một số cấu dạng modul màng khác nhau như modul dạng tấm phẳng, modul dạng cuộn xoắn, modul dạng sợi rỗng... Trong đó, nhóm sản phẩm màng TFC hiện đang chiếm ưu thế tuyệt đối với khoảng 91% thị phần màng FO toàn cầu, vượt xa đối thủ cạnh tranh thứ hai là nhóm màng CTA. Sở dĩ như vậy là bởi nhóm màng TFC với bản chất hoá học polyamit sở hữu khả năng ngăn chặn sự thẩm thấu của các chất tan đặc biệt tốt cùng độ bền vượt trội, trong khi ưu điểm nổi bật của nhóm màng CTA lại là khả năng chống nhiễm bẩn tốt.

Về cơ bản, một sản phẩm màng TFC dạng tấm phẳng được thiết kế cho ứng dụng trong công nghệ màng FO thường bao gồm ba lớp chính [70–72]:

- Lớp nền với cấu trúc polyeste dạng sợi không dệt dày 120 – 150 μm , đóng vai trò như phần khung cung cấp độ ổn định cho toàn cấu trúc màng. Tuy nhiên, bề mặt lớp nền polyeste thường quá xốp và không đủ đồng nhất, do vậy không thể sử

dụng để tráng phủ trực tiếp lớp màng chọn lọc thẩm thấu siêu mỏng.

- Lớp màng vi xốp trung gian (lớp trung gian) dày khoảng 40 μm , đóng vai trò kết nối và cung cấp một lớp nền ổn định phục vụ cho việc gia công lớp màng chọn lọc siêu mỏng tiếp theo. Lớp màng vi xốp trung gian thường được tạo thành từ nhựa polysulphon gia công theo phương pháp keo tụ nhúng (phương pháp đảo pha) bởi loại vật liệu xốp này có khả năng chịu nén tốt, lưu lượng dòng chảy qua chấp nhận được, và đặc biệt hơn cả là khả năng kháng hóa chất tốt thích hợp với nhiều phương pháp tráng phủ lớp màng chọn lọc thẩm thấu siêu mỏng ngoài cùng đa dạng.

- Lớp màng chọn lọc thẩm thấu siêu mỏng (lớp lọc) trên bề mặt dày khoảng 200 nm, đóng vai trò chính trong việc ngăn chặn sự thẩm thấu của các phân tử và ion muối qua toàn bộ cấu trúc của màng bán thấm. Để đạt được hiệu quả loại bỏ mặn trên 99% thì kích thước lỗ trên lớp màng này thường không vượt quá 0,6 nm. Đồng thời, chiều dày của lớp màng này cũng cần được hạn chế nhằm đảm bảo ảnh hưởng tối thiểu lên khả năng thẩm thấu của nước. Thông thường, trong các hệ thống màng FO, lớp màng chọn lọc thẩm thấu siêu mỏng này thường được cho tiếp xúc trực tiếp với nguồn nước cần xử lý.

Tương tự, nhóm màng CTA cũng có thể được tổng hợp thông qua phương pháp đảo pha, hay cụ thể hơn là phương pháp keo tụ nhúng trên nền kết cấu là nền sợi polyeste. Ưu điểm của nhóm màng này là khả năng chịu clo và chống nhiễm bẩn tốt, nhờ vào đặc tính ưa nước của nguyên liệu chế tạo. Tuy nhiên, nhược điểm của chúng là khả năng loại bỏ muối tương đối kém, vì thế không thực sự thích hợp để đưa vào ứng dụng trong khử mặn sản xuất nước ngọt. Khả năng khử mặn của nhóm màng CTA có thể được cải thiện thông qua phương pháp xử lý nhiệt nhằm mục đích thu nhỏ đường kính lỗ xốp trong cấu trúc màng, tuy nhiên làm như vậy cũng sẽ gây ảnh hưởng tiêu cực đến khả năng cho nước thẩm thấu qua của màng, làm suy giảm hiệu năng sản xuất nước sạch. Một số phương pháp cải tiến mới cũng đã được nghiên cứu, tuy nhiên hiệu quả khử mặn của nhóm màng CTA vẫn chưa thể vượt qua ngưỡng 20 LMH, khiến cho loại màng này khó tìm được chỗ đứng trong các ứng dụng thực tiễn [73–75].

1.3.2. Dung dịch lôi cuốn

Dung dịch lôi cuốn được định nghĩa là những dung dịch sở hữu áp suất thẩm thấu tự nhiên cao đối với nước, được sử dụng làm nguồn động lực thúc đẩy sự dịch chuyển (thẩm thấu) của nước qua màng bán thấm từ phía dòng cần xử lý sang phía dung dịch lôi cuốn trong các quá trình FO. Tương ứng, những chất tan cấu tạo nên

thành phần của dung dịch lõi cuộn được gọi là chất lõi cuộn.

Việc lựa chọn dung dịch lõi cuộn là một yếu tố hết sức quan trọng, quyết định trực tiếp đến hiệu quả vận hành chung của các hệ thống khử mặn sản xuất nước ngọt ứng dụng công nghệ màng FO. Quá trình FO dẫn đến sự cô đặc của dòng dung dịch với áp suất thẩm thấu tự nhiên ban đầu thấp hơn (dòng cần xử lý), và sự pha loãng của dòng dung dịch với áp suất thẩm thấu tự nhiên ban đầu cao hơn (dung dịch lõi cuộn). Bởi vậy, bên cạnh sở hữu áp suất thẩm thấu tự nhiên cao đối với dung môi nước, một dung dịch lõi cuộn (hay cụ thể hơn, chất lõi cuộn) lý tưởng cho các hệ thống khử mặn sản xuất nước ngọt sử dụng công nghệ màng FO cũng cần đáp ứng một số yêu cầu cơ bản khác, bao gồm gây ra hiện tượng thẩm thấu ngược qua màng không đáng kể, và dễ hoàn nguyên.

Ngoài ra, do hiện tượng thẩm thấu ngược chất lõi cuộn qua màng (bao gồm màng FO khi vận hành hệ thống màng thẩm thấu chuyển tiếp, cũng như những loại màng bán thấm khác được sử dụng trong quá trình hoàn nguyên dung dịch lõi cuộn, nếu cần thiết) 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 cũng như môi trường [7]. Hiện nay, mặc dù đã có hàng trăm loại dung dịch lõi cuộn khác nhau được đề xuất sử dụng cho các hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO, tuy nhiên việc tìm kiếm những dung dịch lõi cuộn mới vẫn là đặc biệt cần thiết, do mỗi dung dịch lõi cuộn đều tồn tại những ưu – nhược điểm riêng, chưa thể hoàn toàn đáp ứng mọi yêu cầu được đặt ra đối với một dung dịch lõi cuộn lý tưởng (ví dụ: thông lượng chất lõi cuộn thẩm thấu ngược qua màng quá cao, dễ gây nhiễm bẩn màng, thiếu an toàn đối với sức khỏe con người và/hoặc môi trường...) [61].

Dựa trên phương pháp hoàn nguyên, dung dịch lõi cuộn (hay cụ thể hơn, chất lõi cuộn) dùng trong các hệ thống khử mặn sản xuất nước ngọt sử dụng công nghệ màng FO có thể được phân chia làm bốn nhóm cụ thể, bao gồm [76,77]:

(1) Dung dịch lõi cuộn chuyển pha: là những dung dịch lõi cuộn mà việc phân tách dung môi nước và/hoặc chất tan khỏi dung dịch (quá trình hoàn nguyên dung dịch lõi cuộn/chất lõi cuộn) có thể được thực hiện một cách tương đối dễ dàng thông qua các đặc tính chuyển pha của dung dịch;

(2) Dung dịch lõi cuộn không chuyển pha: là những dung dịch lõi cuộn mà việc phân tách dung môi nước khỏi dung dịch (quá trình hoàn nguyên dung dịch lõi cuộn) chỉ có thể được thực hiện thông qua phương pháp cô đặc bằng cách đun nóng, hoặc thông qua các phương pháp lọc qua màng;

(3) Dung dịch lõi cuộn chứa hạt nano từ tính (MNP): nhờ vào đặc tính riêng

của các hạt MNP kích thước nano, những dung dịch lõi cuộn này có thể được hoàn nguyên dưới tác dụng của từ trường ngoài, cho phép tách các hạt MNP ra khỏi dung dịch lõi cuộn đã bị pha loãng một cách tương đối hiệu quả;

(4) Dung dịch lõi cuộn không hoàn nguyên.

1.3.2.1. Dung dịch lõi cuộn chuyển pha

Như đã đề cập, dung dịch lõi cuộn chuyển pha là những dung dịch lõi cuộn mà việc phân tách dung môi nước và/hoặc chất tan khỏi dung dịch (quá trình hoàn nguyên dung dịch lõi cuộn/chất lõi cuộn) có thể được thực hiện một cách tương đối dễ dàng thông qua các tính chất chuyển pha đặc trưng của dung dịch, ví dụ thông qua sự thay đổi khả năng hoà tan trong nước phụ thuộc vào điều kiện nhiệt độ của một số loại hợp chất dạng khí [77].

Nhìn chung, loại dung dịch lõi cuộn này có một số ưu điểm nổi bật như sau:

- Dễ hoàn nguyên: các tính chất chuyển pha đặc trưng của dung dịch lõi cuộn cho phép thu hồi và tái sử dụng dung dịch lõi cuộn một cách tương đối đơn giản và hiệu quả.
- Hoàn nguyên tại điều kiện nhiệt độ thấp: do quá trình chuyển pha của các dung dịch lõi cuộn thường xảy ra tại điều kiện nhiệt độ thấp hơn so với nhiệt độ sôi của nước, nên những dung dịch lõi cuộn này có thể được hoàn nguyên dưới điều kiện nhiệt độ tương đối thấp (so với các phương pháp nhiệt thông thường khác) và cho phép tận dụng được các nguồn nhiệt thứ cấp cho quá trình hoàn nguyên.

Cụ thể, một số hợp chất dạng khí (ví dụ như khí CO₂, khí SO₂, hay khí NH₃...) có khả năng hòa tan nhiều trong nước tại điều kiện nhiệt độ và áp suất nhất định, tạo thành những dung dịch tương ứng với áp suất thẩm thấu tương đối cao. Tuy nhiên, dạng phức trong dung môi nước của các hợp chất này thường khá nhạy cảm với nhiệt độ, cho phép phân tách chúng một cách đơn giản và hiệu quả khỏi dung dịch tương ứng thông qua phương pháp nhiệt. Dưới tác dụng của điều kiện nhiệt độ cao trong khoảng thời gian và môi trường áp suất phù hợp, chất lõi cuộn sẽ bay hơi hầu như hoàn toàn khỏi dung dịch lõi cuộn tương ứng, lưu lại pha lỏng với hàm lượng chất lõi cuộn hoà tan rất thấp. Tùy thuộc vào bản chất hoá học của chất lõi cuộn, phần chất lỏng này có thể được sử dụng trực tiếp, hoặc cần trải qua một số bước xử lý bổ sung khác nhằm tạo thành sản phẩm nước sạch phù hợp cho từng nhu cầu sử dụng cụ thể. Ngược lại, phần pha khí tách ra khỏi dung dịch có thể một lần nữa được dùng để chuẩn bị dung dịch lõi cuộn tương ứng, hoàn thành một chu kỳ sử dụng – hoàn nguyên của dung dịch lõi cuộn [78–81].

Mặc dù vậy, những chất lôi cuốn này cũng tồn tại nhược điểm là tương đối độc hại và có thể sở hữu tính ăn mòn cao (ví dụ: khí SO_2 , khí NH_3 , các hợp chất amin dễ bay hơi...), đòi hỏi hoàn nguyên trong hệ thống thiết bị khử tách khí tương đối phức tạp, đồng thời mức độ tiêu thụ năng lượng còn tương đối cao, khiến cho phạm vi ứng dụng của chúng trong các quá trình khử mặn sản xuất nước ngọt hiện đại là tương đối hạn chế [79,82,83].

Bên cạnh các hợp chất dễ bay hơi, một số hợp chất gốc amin khác như 1-cyclohexyl piperidin hay N,N-dimetyl cyclohexylamin cũng có thể được sử dụng làm chất lôi cuốn trong các quá trình FO. Cụ thể, khi tồn tại độc lập, những hợp chất này là các dung môi hoàn toàn không thể trộn lẫn với nước, và hỗn hợp với nước của chúng sẽ nhanh chóng xảy ra hiện tượng phân lớp khi ngừng khuấy trộn, hình thành nên hai lớp chất lỏng riêng biệt không trộn lẫn vào nhau. Ngược lại, khi tiếp xúc với khí CO_2 , phức hydro cacbonat của những hợp chất này lại hoà tan rất tốt trong nước, tạo thành dung dịch tương ứng với áp suất thẩm thấu cao. Đặc biệt, tại điều kiện nhiệt độ cao, khí CO_2 sẽ tách khỏi phức hydro cacbonat của những hợp chất này, khiến cho dung dịch đồng nhất ban đầu phân tách một cách tự nhiên thành hai lớp chất lỏng riêng biệt: (1) lớp chất lỏng vô cơ chứa nước cùng lượng vết khí CO_2 hoà tan, và (2) lớp chất lỏng hữu cơ chứa hợp chất gốc amin tương ứng. Nhờ vậy, dung dịch lôi cuốn có thể được hoàn nguyên một cách tương đối dễ dàng. Tuy nhiên, giống như các hợp chất amin dễ bay hơi, những chất lôi cuốn này cũng tương đối độc hại, tạo thành mối nguy cơ đối với sức khỏe con người nếu không thể phân tách hoàn toàn khỏi nguồn nước ngọt đầu ra [84–86].

Bên cạnh đó, nhiều loại muối vô cơ cũng có thể được sử dụng như những chất lôi cuốn chuyển pha cho các hệ thống khử mặn trên cơ sở công nghệ màng FO. Dưới điều kiện thường, những muối vô cơ này (ví dụ MgSO_4 , CuSO_4 ...) sở hữu khả năng hoà tan rất tốt trong nước, tạo thành dung dịch đậm đặc với áp suất thẩm thấu cao. Quá trình sản xuất nước ngọt được thực hiện thông qua việc bổ sung một số loại chất tan khác vào dung dịch (ví dụ Ca(OH)_2 , H_2SO_4 ...) nhằm tạo thành những dạng kết tủa tương ứng. Cuối cùng, những kết tủa này có thể được phân tách khỏi dung dịch thông qua phương pháp lọc đơn giản, cho sản phẩm là nước sạch với hàm lượng chất rắn hoà tan tương đối thấp. Dung dịch lôi cuốn có thể hoàn nguyên bằng cách hoà tan trở lại kết tủa dưới sự hỗ trợ của một số loại axit vô cơ thích hợp [8]. Tuy nhiên, cách tiếp cận này cũng tồn tại nhược điểm là một bộ phận hoá chất sẽ bị chuyển hoá thành các sản phẩm phụ như muối CaSO_4 và muối BaSO_4 , đặt ra yêu cầu phải xây dựng phương án xử lý phù hợp nhằm đảm bảo tính kinh tế cho toàn bộ hệ thống, cũng như giảm thiểu tác động đối với môi trường và sức khỏe con người

[87–91].

Nhằm giải quyết những trở ngại trên, trong vài năm trở lại đây, các nhà khoa học đã chuyển hướng nghiên cứu sang phát triển những chất lõi cuộn chuyển pha thể hệ mới có thể phân tách một cách tự nhiên khỏi dung dịch lõi cuộn khi dung dịch này chịu tác động của các yếu tố kích thích bên ngoài, mà không cần đến sự hỗ trợ của hoá chất khác. Nhiều tác giả đã thành công tổng hợp một số loại vật liệu hydrogel gốc polyme compozit [92–97] hoặc các chất lỏng tự phân ly thành ion (IL) [98–106] với đặc trưng thay đổi các tính chất ưa nước/kỵ nước tại ngưỡng nhiệt độ nhất định gọi là Nhiệt độ dung dịch tới hạn dưới (LCST) hoặc Nhiệt độ dung dịch tới hạn trên (UCST). Cụ thể, tại nhiệt độ dưới ngưỡng LCST (hoặc trên ngưỡng UCST), những hợp chất này có tính ưa nước rất cao, nhờ vậy tạo thành áp suất thẩm thấu cần thiết để thúc đẩy sự dịch chuyển của nước qua màng bán thấm. Tuy nhiên, khi nhiệt độ tăng quá ngưỡng LCST (hoặc giảm quá ngưỡng UCST) thì những hợp chất này lại dần trở nên kỵ nước, thúc đẩy sự phân tách pha của dung dịch lõi cuộn – bao gồm pha hữu cơ chủ yếu chứa hydrogel hoặc IL, và pha vô cơ chủ yếu chứa nước cùng lượng vết chất lõi cuộn, có thể sử dụng trực tiếp mà không cần trải qua bất kỳ bước xử lý bổ sung nào khác.

Bên cạnh đó, một số nhà khoa học cũng đã tổng hợp các loại vật liệu hydrogel với tính chất ưa nước/kỵ nước thay đổi thay đổi khi chịu tác động của điện trường ngoài [107–109], hoặc cho phép phân tách thành phần nước đã hấp thụ thông qua tác động vật lý thông thường mà không ảnh hưởng đến cấu trúc chung của toàn bộ khối vật liệu [77].

1.3.2.2. Dung dịch lõi cuộn không chuyển pha

Dung dịch lõi cuộn không chuyển pha hiện đang là nhóm dung dịch lõi cuộn được sử dụng phổ biến nhất trong các hệ thống ứng dụng công nghệ màng FO quy mô công nghiệp, mặc dù phương pháp hoàn nguyên cho nhóm dung dịch lõi cuộn này (bao gồm: phương pháp bay hơi nhiệt và phương pháp lọc qua màng) thường yêu cầu mức tiêu thụ năng lượng tương đối cao so với những loại dung dịch lõi cuộn khác. Nguyên nhân là bởi, các phương pháp hoàn nguyên trên đều tương đối đơn giản, và có tính tương thích cao đối với nhiều hệ thống trang thiết bị sản xuất công nghiệp thông dụng hiện nay. Bên cạnh đó, hầu hết chất lõi cuộn không chuyển pha đều là những hợp chất với nguồn cung khá dồi dào và/hoặc cấu trúc hoá học đơn giản, không cần được tổng hợp và/hoặc hoàn nguyên qua các quy trình kỹ thuật phức tạp, bởi vậy yêu cầu lượng vốn đầu tư ban đầu thấp hơn đáng kể so với những chất lõi cuộn khác.

Chất lôi cuốn không chuyển pha có thể được phân chia thành chất lôi cuốn không chuyển pha gốc vô cơ và chất lôi cuốn không chuyển pha gốc hữu cơ. Trong đó, chất lôi cuốn không chuyển pha gốc vô cơ thường là muối vô cơ như KCl, K_2SO_4 , hay Na_2SO_4 , sở hữu khả năng hoà tan tốt trong nước và tạo thành dung dịch với áp suất thẩm thấu đặc biệt cao, cho phép hoạt động một cách hiệu quả với vai trò dung dịch lôi cuốn ngay cả khi dòng cần xử lý là nước biển [110]. Tuy nhiên, do kích thước ion phân ly tương đối nhỏ, các chất lôi cuốn dạng muối vô cơ thường dễ xảy ra hiện tượng thẩm thấu ngược qua màng, đồng thời quá trình hoàn nguyên dung dịch bị pha loãng của chúng cũng thường đòi hỏi mức tiêu thụ năng lượng tương đối cao [64]. Bởi vậy, muối vô cơ phân ly thành ion đơn trị hiện thường chỉ được sử dụng trong các hệ thống khử mặn không cần hoàn nguyên dung dịch lôi cuốn.

Ngược lại, do sở hữu kích thước phân tử tương đối lớn, các chất lôi cuốn gốc hữu cơ thường khó thẩm thấu ngược qua màng hơn, đồng thời dung dịch lôi cuốn của chúng cũng thường đòi hỏi mức năng lượng cần tiêu thụ để hoàn nguyên thấp hơn. Bởi vậy, các chất lôi cuốn gốc hữu cơ hiện đang là nhóm chất lôi cuốn được nghiên cứu nhiều nhất, cả trong quy mô phòng thí nghiệm và trong quy mô công nghiệp [111–113]. Đáng chú ý, đây cũng là định hướng chính được Nghiên cứu sinh lựa chọn nghiên cứu trong khuôn khổ nội dung luận án này.

Như đã đề cập, dung dịch lôi cuốn không chuyển pha thường chỉ có thể được hoàn nguyên thông qua phương pháp bay hơi nhiệt hoặc phương pháp lọc qua màng. Tuy nhiên, riêng trong lĩnh vực khử mặn sản xuất nước ngọt, phương pháp bay hơi nhiệt không phải là một cách tiếp cận hiệu quả, do mức năng lượng tiêu thụ và chất lượng nước đầu ra của phương pháp này là không quá khác biệt so với việc cho bay hơi trực tiếp nguồn nước nhiễm mặn cần xử lý [114]. Ngược lại, phương pháp lọc qua màng thường cung cấp hiệu quả đặc biệt vượt trội cả về mặt năng lượng tiêu thụ cũng như chất lượng nước đầu ra, do phần lớn các chất lôi cuốn không đảo pha thông thường đều phân ly thành những ion với kích thước phân tử lớn hơn ion Na^+ và ion Cl^- , nhờ vậy giúp giảm thiểu đáng kể hiện tượng chất tan thẩm thấu qua màng – ngay cả khi màng bán thấm được sử dụng có thích thước lỗ xốp lớn hơn so với màng RO thông thường [112]. Tùy vào đặc trưng của từng loại dung dịch lôi cuốn, một số phương pháp lọc qua màng có thể được lựa chọn, bao gồm phương pháp màng RO áp suất thấp (LPRO) [115–118], phương pháp màng NF [117,119–122], phương pháp màng siêu lọc (UF) [123–127]...

Năm 2011, Yangali-Quintanilla và cộng sự đã đánh giá hiệu quả của phương pháp lọc qua màng RO áp suất thấp (LPRO) trong việc hoàn nguyên dung dịch lôi

cuốn bị pha loãng từ hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO, và đưa ra kết luận rằng hệ thống tổ hợp FO-LPRO cho phép tiết kiệm hơn 60% lượng điện năng cần tiêu thụ khi so sánh với các hệ thống khử mặn ứng dụng trực tiếp công nghệ màng RO [118]. Bên cạnh đó, khi chất lôi cuốn là hợp chất hữu cơ hoặc muối vô cơ phân ly thành ion đa trị, thì các phương pháp lọc qua màng với độ chọn lọc thấp hơn có thể được sử dụng để hoàn nguyên cho dung dịch lôi cuốn bị pha loãng. Ưu điểm của cách tiếp cận này là giúp giảm trở lực của màng bán thấm đối với nước thẩm thấu, từ đó giảm thiểu mức năng lượng cần tiêu thụ cho quá trình hoàn nguyên so với khi áp dụng phương pháp hoàn nguyên bằng màng RO thông thường (lên tới 40%), trong khi vẫn duy trì hiệu quả ngăn chặn sự chuyển khối của chất tan qua màng bán thấm.

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng trong mọi trường hợp, mục đích cuối cùng và quan trọng nhất của tất cả mọi hệ thống khử mặn trên cơ sở công nghệ màng FO đều là nhằm sản xuất nước sạch với chất lượng đáp ứng những tiêu chuẩn kỹ thuật nhất định được đặt ra tùy thuộc từng mục tiêu ứng dụng cụ thể (ví dụ nước sinh hoạt, nước dùng cho canh tác nông nghiệp). Bởi vậy, các nhà nghiên cứu và kỹ sư thiết kế phải luôn ưu tiên cân nhắc yếu tố hiệu suất thu hồi chất lôi cuốn khi lựa chọn phương pháp hoàn nguyên dung dịch lôi cuốn, trong khi yếu tố mức tiêu thụ năng lượng chỉ nên được cân nhắc sau khi đã hoàn toàn đảm bảo chất lượng của nguồn nước đầu ra.

1.3.2.3. Dung dịch lôi cuốn nano từ tính

Như đã đề cập, ưu điểm nổi bật của dung dịch lôi cuốn chứa hạt MNP là khả năng hoàn nguyên dưới tác động của từ trường ngoài mà không cần sử dụng bất kỳ nguồn động lực bổ sung nào khác, nhờ vậy giúp giảm thiểu tối đa mức tiêu thụ năng lượng cho quá trình hoàn nguyên dung dịch lôi cuốn [128]. Cụ thể, các hạt MNP dùng làm chất lôi cuốn thường bao gồm hai bộ phận chính: phần lõi mang từ tính bên trong thường có bản chất hoá học là oxit sắt từ Fe_3O_4 , và phần vỏ mỏng bao bọc bên ngoài có bản chất hoá học là những phối tử hữu cơ sở hữu đặc trưng ưa nước rất mạnh. Do đặc trưng ưa nước rất mạnh của phần vỏ bao bọc bên ngoài, các hạt MNP này thường dễ dàng phân tán trong nước, tạo thành dung dịch lôi cuốn với áp suất thẩm thấu tương đối cao. Tuy nhiên, do đặc trưng mang từ tính của phần lõi bên trong, sự phân bố trong dung dịch của các hạt MNP này cũng chịu ảnh hưởng nhất định khi xuất hiện một từ trường ngoài: chúng sẽ di chuyển về phía hai cực của từ trường, hình thành nên những vùng nhất định trong thể tích dung dịch với nồng độ các hạt MNP đặc biệt thấp, hoặc thậm chí là gần như không chứa hạt MNP. Khi hiện tượng trên xảy ra, nước sạch có thể được sản xuất bằng cách gạn phần chất

lông không chứa hạt MNP ra nhằm tách nó khỏi phần dung dịch lõi cuộn còn phân tán hạt MNP [129].

Nhìn chung, ưu điểm chính của loại dung dịch lõi cuộn này nằm tại kích thước của các hạt MNP: hạt nano sở hữu kích thước đủ lớn để hạn chế hiện tượng thẩm thấu ngược qua màng bán thấm của chất lõi cuộn, những cũng đủ nhỏ để duy trì diện tích bề mặt riêng lớn, nhờ vậy cho phép một lượng đáng kể các phân tử ưa nước có thể gắn trên bề mặt của hạt nano. Do đó, dung dịch lõi cuộn chứa hạt MNP có thể tạo thành áp suất thẩm thấu rất cao, nhưng đồng thời cũng không yêu cầu quá nhiều năng lượng để hoàn nguyên [107,130–139]. Ngược lại, trở ngại chính ngăn cản khả năng ứng dụng của hạt MNP vào các hệ thống khử mặn trên cơ sở công nghệ màng FO quy mô công nghiệp là xu hướng kết tụ của các hạt MNP sau nhiều chu kỳ hoàn nguyên, cũng như hiện tượng thất thoát liên tục của lớp vỏ ưa nước bên ngoài hạt MNP. Bởi vậy, định hướng nghiên cứu quan trọng nhất hiện nay liên quan đến loại dung dịch lõi cuộn này chính là xác định những loại vật liệu phù hợp nhằm phục vụ cho việc chế tạo lớp vỏ ưa nước bên ngoài hạt MNP – chúng không chỉ phải sở hữu tính ưa nước mạnh, mà còn cần tạo thành liên kết hoá học bền với phần lõi sắt từ và cung cấp hiệu quả ngăn chặn hiện tượng kết tụ của hạt MNP.

1.3.2.4. Dung dịch lõi cuộn không hoàn nguyên

Không giống với hầu hết những phương pháp lọc qua màng khác, trong phần lớn trường hợp, các hệ thống khử mặn sử dụng công nghệ màng FO thường không thể trực tiếp sản xuất nước sạch. Thay vào đó, dung dịch lõi cuộn bị pha loãng cần tiếp tục được xử lý nhằm phân tách một phần nước sạch và/hoặc chất lõi cuộn ra khỏi dung dịch, nhờ vậy tạo thành hiệu quả sản xuất nước sạch và hoàn nguyên dung dịch lõi cuộn. Quá trình xử lý sau lọc này là công đoạn đòi hỏi mức tiêu thụ năng lượng cao nhất trong toàn bộ hệ thống khử mặn sử dụng công nghệ màng FO, bởi vậy nếu không cần thiết phải hoàn nguyên dung dịch lõi cuộn sau quá trình sử dụng thì hiệu quả sử dụng năng lượng chung của toàn bộ hệ thống sẽ được cải thiện vô cùng đáng kể. Trên cơ sở hướng tiếp cận này, nhiều ý tưởng đã được đưa ra nhằm cho phép vận dụng trực tiếp dung dịch lõi cuộn bị pha loãng mà không cần trải qua công đoạn hoàn nguyên dung dịch lõi cuộn [140–147].

Phuntsho và cộng sự đã khảo sát tiềm năng ứng dụng của một số tổ hợp phân bón vô cơ trong vai trò chất lõi cuộn cho hệ thống khử mặn nước biển trên cơ sở công nghệ màng FO. Sau quá trình vận hành, dung dịch lõi cuộn bị pha loãng sẽ được trực tiếp sử dụng nhằm mục đích cung cấp dinh dưỡng cho cây trồng nông nghiệp, mà hoàn toàn không cần trải qua công đoạn hoàn nguyên. Các tác giả đã chỉ

ra rằng, thông qua việc kết hợp nhiều loại phân bón khác nhau, thành phần dinh dưỡng có trong dung dịch lồi cuốn bị pha loãng sẽ trở nên cân bằng hơn, nhờ vậy hạn chế nhu cầu phải điều chỉnh hàm lượng dinh dưỡng của nó trước khi sử dụng [140,141].

Tương tự, Bassiouny và cộng sự đã khảo sát ảnh hưởng của việc sử dụng dung dịch lồi cuốn bị pha loãng chứa thành phần phân bón với vai trò nguồn cung cấp dinh dưỡng lên hiệu quả canh tác rau xà lách bằng công nghệ thủy canh. Kết quả nghiên cứu cho thấy, rau xà lách trồng bằng dung dịch lồi cuốn bị pha loãng có kích thước và khối lượng trung bình thấp hơn so với mẫu đối chứng, mặc dù sản lượng chung giữa hai nhóm mẫu là tương đương nhau. Nguyên nhân dẫn tới hiện tượng trên có thể là do sự thiếu cân bằng về mặt dinh dưỡng của dung dịch lồi cuốn bị pha loãng khi so sánh với dung dịch dinh dưỡng tiêu chuẩn, bởi đặc trưng thẩm thấu ngược qua màng bán thấm của từng loại ion trong dung dịch lồi cuốn là khác nhau, dẫn tới những thay đổi khó kiểm soát liên quan đến tỷ lệ tương đối của từng thành phần dinh dưỡng cụ thể so với hỗn hợp chất tan ban đầu [144].

Năm 1975, Kravath and Davis đã đề xuất một thiết bị cung cấp nước ngọt khẩn cấp từ nguồn nước nhiễm mặn sử dụng công nghệ màng FO, với dung dịch lồi cuốn là một dung dịch bão hoà glucose. Sau khi nhúng chìm thiết bị này vào nguồn nước nhiễm mặn trong khoảng thời gian nhất định, người gặp nạn có thể sử dụng trực tiếp dung dịch lồi cuốn bị pha loãng nhằm bổ sung nước và dưỡng chất cho cơ thể [142]. Ngoài glucose, một số loại đường và hợp chất muối khoáng khác cũng có thể được bổ sung vào thành phần dung dịch lồi cuốn của thiết bị cung cấp nước ngọt khẩn cấp này nhằm đáp ứng nhu cầu dinh dưỡng phù hợp [146,147]. Tuy nhiên, do nồng độ chất tan ban đầu trong dung dịch lồi cuốn thường tương đối cao (cần thiết để tạo thành áp suất thẩm thấu cao hơn so với nguồn nước nhiễm mặn cần xử lý), nên dung dịch lồi cuốn sau pha loãng vẫn khá giàu dưỡng chất và muối khoáng, không thích hợp cho tiêu thụ lâu dài hay với tư cách nguồn cung cấp nước ngọt duy nhất.

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

Giá trị thông lượng J_w trong các quá trình thẩm thấu qua màng phụ thuộc vào một số yếu tố như đã mô tả tại **Phương trình 1**. Trong phương trình này, giá trị $\Delta\pi$ biểu thị chênh lệch áp suất thẩm thấu tự nhiên giữa hai dung dịch tại hai phía của màng bán thấm. Tuy nhiên trên thực tế, chênh lệch áp suất thẩm thấu tại hai phía của màng bán thấm trong quá trình vận hành các hệ thống màng thẩm thấu thường luôn thấp hơn rất nhiều so với chênh lệch áp suất thẩm thấu tính toán theo lý thuyết,

khuyến cho thông lượng J_w cũng thấp hơn dự kiến [56,148]. Nguyên nhân dẫn tới tình trạng trên được xác định là bởi một số hiện tượng liên quan đến quá trình chuyển khối qua màng, mà đáng quan tâm nhất là hai loại hiện tượng phân cực nồng độ (CP), bao gồm hiện tượng phân cực nồng độ ngoài màng (ECP) và hiện tượng phân cực nồng độ trong màng (ICP).

1.3.3.1. Hiện tượng phân cực nồng độ ngoài màng

Trong các quá trình chuyển khối qua màng dưới tác dụng của áp suất ngoài, ví dụ quá trình màng RO, thì các phân tử nước có thể dễ dàng di chuyển từ phía dòng cần xử lý sang phía bên kia của màng bán thấm, còn phần lớn các phân tử chất tan khác sẽ được giữ lại bởi màng bán thấm, dẫn tới sự tích tụ của các phân tử chất tan tại khu vực ngay sát bề mặt màng bán thấm. Khi đó, nồng độ các chất tan tại khu vực ngay sát bề mặt màng bán thấm sẽ tăng cao, dẫn tới làm gia tăng giá trị áp suất thuỷ lực cần tác dụng lên dòng cần xử lý nhằm vượt qua được trở lực gây ra bởi chênh lệch áp suất thẩm thấu tự nhiên cục bộ tại hai phía của màng bán thấm [149,150]. Hiện tượng này được gọi là hiện tượng phân cực nồng độ ngoài màng (ECP) cô đặc, và không chỉ giới hạn xảy ra trong các quá trình chuyển khối qua màng dưới tác dụng của áp suất ngoài, mà còn xảy ra trong các quá trình chuyển khối qua màng dưới tác dụng của áp suất thẩm thấu, ví dụ quá trình màng FO.

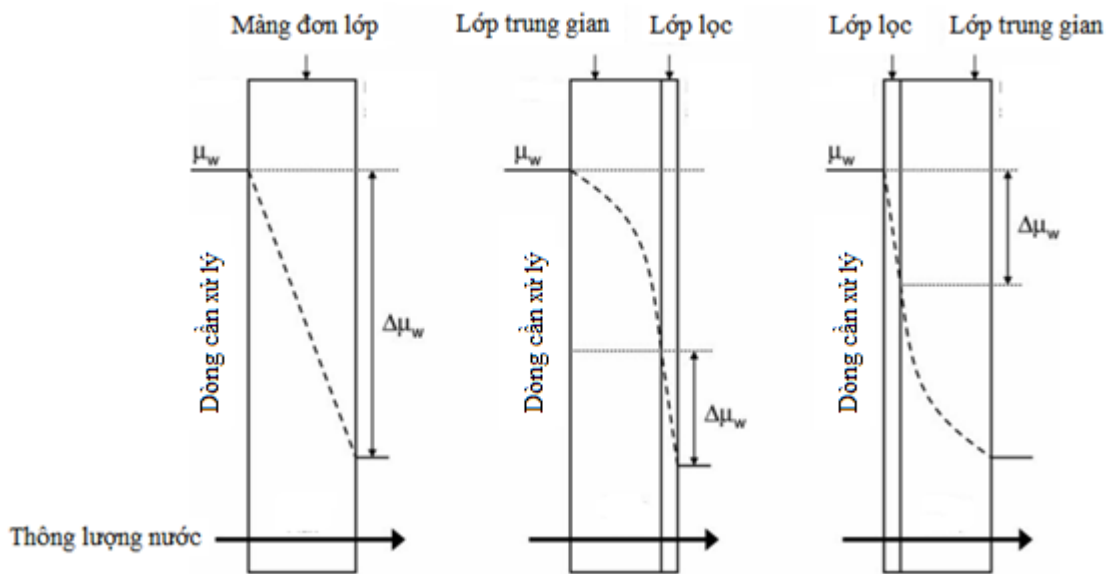
Đáng chú ý, trong các quá trình màng FO, sự dịch chuyển của phân tử nước qua màng bán thấm không chỉ làm tăng nồng độ chất tan cục bộ tại khu vực ngay sát bề mặt màng bán thấm bên phía dòng cần xử lý, mà đồng thời nó còn làm giảm nồng độ chất tan cục bộ tại khu vực ngay sát bề mặt màng bán thấm bên phía dung dịch lồi cuốn. Hiện tượng này cũng góp phần gây suy giảm chênh lệch áp suất thẩm thấu tự nhiên tại hai phía của màng bán thấm, ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu quả chuyển khối của nước qua màng bán thấm, và được gọi là hiện tượng phân cực nồng độ ngoài màng (ECP) pha loãng.

Nhìn chung, ảnh hưởng tiêu cực của hiện tượng ECP đối với các quá trình chuyển khối qua màng dưới tác dụng của áp suất thẩm thấu có thể được hạn chế thông qua tăng lưu lượng đầu vào của dòng cần xử lý và dòng dung dịch lồi cuốn, thông qua thúc đẩy sự nhiễu dòng xảy ra tại khu vực ngay sát bề mặt màng bán thấm, hoặc thông qua điều chỉnh giá trị thông lượng J_w [151]. Tuy nhiên, trong các quá trình màng FO, thông lượng J_w thường chỉ phụ thuộc vào các yếu tố cố định là bản chất của dòng cần xử lý và bản chất của dung dịch lồi cuốn, do vậy việc điều chỉnh giá trị thông lượng J_w là tương đối khó thực hiện [152]. Ngược lại, do không sử dụng áp suất thuỷ lực làm động lực cho quá trình chuyển khối, nên tình trạng

nhiểm bẩn và tắc màng gây ra bởi hiện tượng ECP trong các quá trình màng FO cũng thường kém nghiêm trọng hơn so với trong các quá trình màng RO. Một số nghiên cứu đã chứng minh rằng, hiện tượng ECP thường đóng vai trò không quá quan trọng trong các quá trình chuyển khối qua màng dưới tác dụng của áp suất, bao gồm các quá trình màng FO, và không phải là nguyên nhân chính dẫn tới tình trạng thông lượng J_w thực tế thấp hơn so với thông lượng J_w theo tính toán lý thuyết trong các quá trình này [80].

1.3.3.2. Hiện tượng phân cực nồng độ trong màng

Khi một gradient áp suất thẩm thấu được thiết lập qua tiết diện của một màng bán thấm hoàn toàn đối xứng (màng đơn lớp), như mô tả trong **Hình 1.5**, thì động lực cho quá trình chuyển khối của nước chính là sự chênh lệch về mặt áp suất thẩm thấu tại hai bề mặt của màng thấm – nếu không tính đến ảnh hưởng của hiện tượng ECP. Tuy nhiên, màng bán thấm dùng cho các quá trình màng FO lại thường không đối xứng, khiến cho hiện tượng phân cực nồng độ càng trở nên phức tạp hơn.



Hình 1.5. Hiện tượng phân cực nồng độ trong màng xảy ra trên màng bán thấm bất đối xứng

Khi một màng bán thấm bất đối xứng bao gồm một lớp vật liệu trung gian xốp và một lớp vật liệu lọc với khả năng chọn lọc thẩm thấu cao được sử dụng trong quá trình chuyển khối qua màng dưới tác dụng của áp suất thẩm thấu, thì hai hiện tượng khác nhau có thể xảy ra tùy thuộc vào hướng tiếp xúc của màng bán thấm. Cụ thể, nếu lớp trung gian của màng bán thấm tiếp xúc trực tiếp với dòng cân xử lý, như trong các quá trình màng PRO, thì quá trình chuyển khối qua lớp lọc sẽ dẫn tới sự tích lũy của các phân tử chất tan bên trong lớp trung gian, tạo thành một gradient

nồng độ tăng dần dọc theo tiết diện của lớp trung gian. Hiện tượng này được gọi là hiện tượng ICP cô đặc. Về bản chất, nó tương tự như hiện tượng ECP cô đặc, tuy nhiên lại xảy ra bên trong lớp trung gian của màng bán thấm, và bởi vậy không thể được khắc phục bằng cách điều chỉnh chế độ dòng của dòng cần xử lý [80].

Ngược lại, trong các quá trình màng FO phục vụ khử mặn và sản xuất nước sạch, lớp trung gian của màng bán thấm thường được cho tiếp xúc trực tiếp với dung dịch lõi cuộn, còn lớp lọc của màng bán thấm thì được cho tiếp xúc trực tiếp với dòng cần xử lý. Khi các phân tử nước thẩm thấu qua lớp lọc, một gradient nồng độ giảm dần sẽ hình thành dọc theo tiết diện của lớp trung gian, tạo thành hiện tượng ICP pha loãng.

Nhìn chung, do hiện tượng ECP, giá trị chênh lệch áp suất thẩm thấu qua màng thực tế ($\Delta\pi_m$) thường thấp hơn so với giá trị chênh lệch áp suất thẩm thấu theo tính toán giữa dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuộn ($\Delta\pi_{bulk}$). Đồng thời, do hiện tượng ICP, giá trị chênh lệch áp suất thẩm thấu qua màng hiệu quả ($\Delta\pi_{eff}$) cũng lại càng thấp hơn so với giá trị chênh lệch áp suất thẩm thấu qua màng thực tế. Bên cạnh đó, tương tự như trong các hệ thống trao đổi nhiệt, việc vận hành hệ thống màng FO theo chế độ dòng vào ngược chiều (dòng cần xử lý và dòng dung dịch lõi cuộn chảy song song nhưng ngược chiều tại hai phía của màng bán thấm) sẽ giúp cung cấp chênh lệch áp suất thẩm thấu $\Delta\pi$ ổn định dọc theo toàn bộ chiều dài màng bán thấm, hỗ trợ quá trình chuyển khối của nước diễn ra hiệu quả hơn [153].

1.3.4. Các yếu tố điều kiện vận hành

Bên cạnh yếu tố độ mặn của dòng cần xử lý và nồng độ của dung dịch lõi cuộn, cũng tồn tại một số yếu tố điều kiện vận hành khác có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả của các quá trình màng FO, ví dụ nhiệt độ và lưu lượng các dòng đầu vào... Việc tối ưu hoá những điều kiện vận hành này là một bước cần thiết nhằm nâng cao hiệu quả hoạt động của mọi hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO.

1.3.4.1. Nhiệt độ dòng đầu vào

Bên cạnh độ mặn của dòng cần xử lý và nồng độ của dung dịch lõi cuộn, nhiệt độ là một trong những thông số điều kiện vận hành quan trọng nhất, có khả năng ảnh hưởng đến nhiều tính chất hoá lý của cả dung dịch lõi cuộn lẫn dòng cần xử lý [154], bởi vậy ảnh hưởng đến các đặc trưng thông lượng J_w [155], thông lượng J_s [156], cũng như mức độ gây nhiễm bẩn màng của hệ thống màng FO [157].

Cụ thể, theo Wang và cộng sự thì khi nhiệt độ của dung dịch tăng cao, độ

nhớt của dung dịch cũng thường giảm thấp, đồng thời hiệu quả khuếch tán của các thành phần bên trong dung dịch – bao gồm cả chất tan và dung môi – cũng sẽ được cải thiện đáng kể. Bên cạnh tác động trực tiếp lên thông lượng J_w , hai yếu tố này cũng mang đến tác dụng hạn chế những ảnh hưởng tiêu cực gây ra bởi hiện tượng phân cực nồng độ ICP và ECP [158]. Hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ chính là một yếu tố quan trọng khiến cho thông lượng J_w trong các hệ thống ứng dụng công nghệ màng FO nói chung thường thấp hơn đáng kể so với giá trị tương ứng được tính toán dựa theo công thức lý thuyết.

Kết quả nghiên cứu của Phuntsho và cộng sự chỉ ra rằng, khi tăng nhiệt độ của cả dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn từ 25 °C lần lượt lên đến 35 °C và 45 °C, thì giá trị thông lượng J_w cũng tăng lần lượt 12,3% và 45,4%. Bên cạnh đó, hiệu quả cải thiện thông lượng J_w khi tăng nhiệt độ của dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn từ 35 °C lên đến 45 °C được xác định là cao hơn gấp đôi so với khi tăng nhiệt độ của dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn từ 25 °C lên đến 35 °C. Đồng thời, hiệu quả cải thiện này cũng trở nên rõ ràng hơn tại các ngưỡng nồng độ dung dịch lõi cuốn cao hơn. Đặc biệt, Phuntsho và cộng sự cũng phát hiện rằng, việc chỉ gia nhiệt cho phía dung dịch lõi cuốn thường đem đến hiệu quả cải thiện thông lượng J_w vượt trội so với việc chỉ gia nhiệt cho dòng cần xử lý. Kết quả này giúp chứng minh rằng, các đặc trưng nhiệt động của dung dịch lõi cuốn tồn tại ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả vận hành của hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO [154].

Kết quả tương tự cũng được rút ra bởi Chanukya và cộng sự khi khảo sát đặc trưng lõi cuốn của muối amoni bicacbonat. Cụ thể, khi nhiệt độ vận hành của dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn tăng từ 30 °C lên đến 60 °C, thì giá trị thông lượng J_w cũng tăng lên trong khoảng 23,1% – 53,8% (khi dòng cần xử lý lần lượt là nước cất và nước biển). Theo các tác giả, hiện tượng này có thể được giải thích thông qua phương trình Wilke–Chang, trong đó hệ số khuếch tán của một chất tan được tính toán tỷ lệ thuận với nhiệt độ tuyệt đối và tỷ lệ nghịch với độ nhớt của dung dịch [159]. Bởi vậy, áp suất thẩm thấu của dung dịch thường trở nên cao hơn khi tăng nhiệt độ của dung dịch. Trên cơ sở đó, các tác giả cũng chứng minh được rằng, việc chỉ tăng nhiệt độ phía dung dịch lõi cuốn sẽ giúp tạo thành động lực chuyển khối lớn hơn cho quá trình màng FO – mà cụ thể là giúp nâng cao giá trị chênh lệch áp suất thẩm thấu tự nhiên giữa dung dịch lõi cuốn và dòng cần xử lý – so với việc tăng nhiệt độ tại cả hai phía của màng bán thấm. Điều này không chỉ cải thiện hiệu quả sản xuất nước ngọt nói chung, mà đồng thời còn giúp giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng cần thiết nhằm phục vụ công tác vận hành các hệ thống khử mặn ứng

dụng công nghệ màng FO [160].

Nematzadeh và cộng sự cho rằng, nhiệt độ vận hành sẽ ảnh hưởng mạnh hơn đến thông lượng J_w nếu chất lỏng cuốn là các loại muối vô cơ có khả năng phân ly tốt trong dung dịch, bởi nhiệt độ là một yếu tố ảnh hưởng đến đặc trưng phân ly của các ion trong dung dịch. Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng, việc tăng nhiệt độ vận hành không chỉ giúp cải thiện khả năng chuyển khối qua màng bán thấm của nước, mà còn góp phần làm tăng khả năng thẩm thấu ngược của chất lỏng cuốn, dẫn đến giảm hiệu quả vận hành cũng như hiệu quả kinh tế chung của toàn bộ hệ thống. Liên quan đến vấn đề này, ảnh hưởng của điều kiện nhiệt độ vận hành thường lớn hơn đối với những chất lỏng cuốn sở hữu kích thước phân tử và/hoặc ion phân ly tương đối nhỏ, bởi trở lực tự nhiên mà màng bán thấm gây ra cho những phân tử hay ion này cũng thấp hơn đáng kể so với trở lực tự nhiên mà màng bán thấm gây ra cho những phân tử hay ion sở hữu kích thước lớn hơn [156]. Kết luận tương tự cũng được đưa ra bởi Zhao và cộng sự [161].

Tuy nhiên, bên cạnh những tác động lên thông lượng J_w và thông lượng J_s , thì ảnh hưởng của điều kiện nhiệt độ vận hành đối với đặc trưng nhiễm bẩn của màng bán thấm cũng là một yếu tố đáng được quan tâm. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, điều kiện nhiệt độ vận hành cao có thể giúp làm giảm độ nhớt của dung dịch cũng như hạn chế hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ bên trong và bên ngoài màng bán thấm, nhờ vậy góp phần làm giảm mức độ nghiêm trọng của hiện tượng nhiễm bẩn gây ra bởi cả dung dịch lỏng cuốn và dòng nước đầu vào [157,162]. Cụ thể, khảo sát thực tế đối với hai nguồn gây nhiễm bẩn hữu cơ mô phỏng là axit humic và muối alginat cho thấy, khi tăng điều kiện nhiệt độ vận hành thì lớp cặn hữu cơ hình thành sau quá trình vận hành lâu dài sẽ trở nên mỏng và xốp hơn, nhờ vậy hạn chế ảnh hưởng tiêu cực của nó lên thông lượng J_w , cũng như cho phép vệ sinh màng dễ dàng và hiệu quả hơn.

Hiện tượng trên có thể được giải thích là do tại điều kiện nhiệt độ cao, các chất tan thường tan tốt hơn trong dung môi, nhờ vậy giúp giảm thiểu sự lắng cặn gây ra bởi tình trạng phân cực nồng độ cục bộ gần khu vực bề mặt của màng bán thấm. Bên cạnh đó, khi lưu lượng dòng nước thẩm thấu qua màng tăng cao thì cấu trúc của lớp cặn lắng trên bề mặt của màng cũng chịu ảnh hưởng đáng kể – lớp cặn này bám dính kém hơn lên bề mặt của màng, đồng thời cũng trở nên xốp hơn, không những cho phép vệ sinh màng dễ dàng hơn, mà còn kém hiệu quả hơn trong việc hạn chế sự chuyển khối của phân tử nước qua màng bán thấm [157]. Đặc biệt, Kim và cộng sự còn chỉ ra rằng trong nhiều trường hợp, việc tăng nhiệt độ của dòng cần xử lý thường không ảnh hưởng đến đặc trưng nhiễm bẩn màng, do điều kiện nhiệt

độ cao sẽ thúc đẩy quá trình chuyển khối của cả nước và các chất tan, khiến cho các chất tan có xu hướng lắng cặn lại trên bề mặt của màng nhiều hơn [162].

Nhìn chung, có thể thấy được điều kiện nhiệt độ vận hành có thể ảnh hưởng đến quá trình vận hành hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO theo những khía cạnh sau:

- Khi tăng nhiệt độ phía dung dịch lõi cuộn (mà không tăng nhiệt độ phía dòng cần xử lý) thì thông lượng J_w sẽ được cải thiện đáng kể, nhưng đồng thời cũng tồn tại tác động tiêu cực là làm gia tăng thông lượng J_s và thúc đẩy hiện tượng nhiễm bẩn màng gây ra bởi chất lõi cuộn.
- Khi tăng nhiệt độ phía dòng cần xử lý (mà không tăng nhiệt độ phía dung dịch lõi cuộn) thì thông lượng J_w thường không thay đổi đáng kể, nhưng đồng thời thúc lại đẩy đáng kể hiện tượng nhiễm bẩn màng gây ra bởi các thành phần chất tan tồn tại trong dòng cần xử lý, cũng như làm gia tăng thông lượng J_s .

1.3.4.2. Tốc độ dòng đầu vào

Tương tự như điều kiện nhiệt độ dòng đầu vào, tốc độ dòng đầu vào cũng là một trong những thông số quan trọng có khả năng ảnh hưởng đến các đặc trưng thông lượng J_w [163], thông lượng J_s [164], và mức độ gây nhiễm bẩn màng của hệ thống màng FO [165].

Hau và cộng sự đã khảo sát ảnh hưởng của tốc độ dòng lên thông lượng J_w , khi chất lõi cuộn được sử dụng là muối EDTA-Na. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi tốc độ dòng của dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuộn đồng thời tăng từ 62 cm/phút lên đến 385 cm/phút thì giá trị thông lượng J_w cũng tăng tương ứng, từ 6,13 LMH lên đến 7,12 LMH. Nguyên nhân dẫn tới hiện tượng này có thể là do việc tăng tốc độ dòng chảy sẽ giúp hạn chế hiện tượng tăng/giảm nồng độ cục bộ của các dung dịch tại khu vực gần bề mặt màng bán thấm (gây ra bởi sự chuyển khối của nước qua màng), nhờ vậy giúp duy trì chênh lệch thực tế về áp suất thẩm thấu giữa hai phía của màng bán thấm gần với giá trị theo lý thuyết hơn. Điều này cho phép quá trình chuyển khối của nước qua màng diễn ra một cách ổn định và hiệu quả hơn [166].

Jung và cộng sự đã thực hiện khảo sát sâu hơn liên quan đến vấn đề ảnh hưởng của chế độ dòng chảy lên hiệu quả hoạt động của các hệ thống màng FO. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi lưu lượng của dòng cần xử lý tăng từ 10 mL/phút đến 3.000 mL/phút (lưu lượng của dung dịch lõi cuộn không đổi) thì tốc độ dòng nước thẩm thấu qua màng cũng tăng tương ứng, từ 3,43 m/s lên tới 4,16 m/s, tuy nhiên

hiệu suất thẩm thấu chung của hệ thống lại giảm từ 40,98% xuống còn 0,17%. Đáng chú ý, tốc độ dòng nước thẩm thấu qua màng tăng mạnh nhất khi lưu lượng của dòng cần xử lý tăng trong khoảng giá trị 10 – 100 mL/phút. Theo các tác giả, khi lưu lượng của dòng cần xử lý gia tăng thì hệ số chuyển khối k cũng sẽ được cải thiện, nhờ vậy giúp hạn chế ảnh hưởng tiêu cực gây ra bởi tình trạng ECP. Tuy nhiên, hiệu quả này chỉ thực sự đáng kể trong những khoảng lưu lượng của dòng cần xử lý nhất định – tại những ngưỡng lưu lượng của dòng cần xử lý cao hơn, năng lượng cần cung cấp cho hệ thống bơm sẽ trở nên quá lớn, trong khi tác dụng tăng cường hiệu suất cho toàn bộ quá trình sản xuất nước sạch sẽ không còn đáng kể nữa [167].

Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng, tốc độ dòng quá cao có thể dẫn tới sự thay đổi về mặt chế độ dòng chảy bên trong hệ thống thiết bị màng FO, từ đó gây ảnh hưởng tiêu cực lên khả năng chuyển khối của nước qua màng bán thấm. Cụ thể, khi tốc độ dòng tăng lên quá cao thì dòng chất lỏng di chuyển bên trong hệ thống thiết bị màng FO sẽ chuyển từ chế độ chảy rối sang chế độ chảy dòng – trong trường hợp này, dòng chất lỏng tuần hoàn di chuyển với tốc độ nhanh sẽ chảy song song với bề mặt màng bán thấm, mà không tạo thành hiệu quả khuấy trộn đối với phần dung dịch nằm ngay sát bề mặt màng bán thấm. Điều này dẫn đến hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ tại khu vực gần bề mặt và bên trong màng bán thấm, làm giảm động lực cho quá trình chuyển khối của nước qua màng. Ảnh hưởng này là đặc biệt rõ ràng khi thay đổi lưu lượng dòng phía dung dịch lõi cuộn, do nồng độ chất tan và độ nhớt của dung dịch lõi cuộn thường cao hơn đáng kể so với dòng nước nhiễm mặn cần xử lý [164].

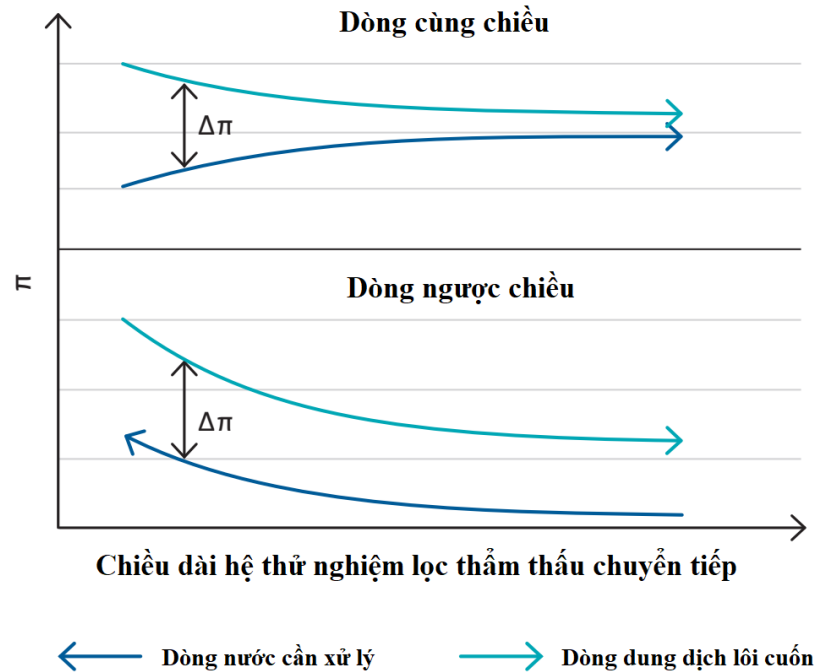
Cơ chế tương tự cũng có thể được sử dụng nhằm giải thích cho ảnh hưởng của tốc độ dòng lên thông lượng J_s và mức độ gây nhiễm bẩn màng của hệ thống màng FO. Cụ thể, việc tăng tốc độ dòng đến một ngưỡng giá trị nhất định sẽ đem lại tác dụng thúc đẩy các quá trình chuyển khối bên trong hệ thống thiết bị màng FO, đồng thời hạn chế sự hình thành của các vùng phân cực nồng độ cục bộ, nhờ vậy giúp làm giảm mức độ hình thành cặn bẩn trên bề mặt cũng như bên trong màng bán thấm, nhưng lại làm tăng giá trị thông lượng J_s . Tuy nhiên, nếu tốc độ dòng tăng lên quá cao thì dòng chất lỏng di chuyển bên trong hệ thống thiết bị màng FO sẽ chuyển từ chế độ chảy rối sang chế độ chảy dòng, khiến cho tình trạng phân cực nồng độ cục bộ tại khu vực xung quanh bề mặt của màng bán thấm trở nên nghiêm trọng hơn. Điều này sẽ góp phần hạn chế hiện tượng chất lõi cuộn thẩm thấu ngược qua màng, nhưng đồng thời cũng làm gia tăng mức độ hình thành cặn bẩn trên bề mặt cũng như bên trong màng bán thấm [155,168]. Ngoài ra, cũng cần lưu ý rằng việc

điều chỉnh tốc độ dòng cấp vào thiết bị cũng ảnh hưởng đến hiệu suất tiêu thụ năng lượng chung của toàn bộ hệ thống, cũng như ảnh hưởng đến sự chênh lệch về mặt áp suất thuỷ tĩnh giữa hai phía của màng bán thấm [169].

1.3.4.3. Hướng chảy tương đối giữa dòng cần xử lý và dung dịch lôi cuốn

Thông thường, các hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO có thể được lắp đặt theo một trong hai chế độ sau dựa trên hướng chảy tương đối của dòng cần xử lý và dung dịch lôi cuốn: chế độ dòng ngược chiều, và chế độ dòng cùng chiều. Cụ thể, trong chế độ dòng cùng chiều thì dòng cần xử lý và dung dịch lôi cuốn sẽ di chuyển theo cùng một hướng, còn chế độ dòng ngược chiều thì dòng cần xử lý và dung dịch lôi cuốn sẽ di chuyển theo hai hướng hoàn toàn ngược nhau. Do quá trình chuyển khối của nước qua màng bán thấm diễn ra liên tục dọc theo toàn bộ chiều dài của thiết bị màng FO, nên việc lựa chọn hướng chảy tương đối giữa dòng cần xử lý và dung dịch lôi cuốn sẽ ảnh hưởng đến sự chênh lệch áp suất thẩm thấu tại những vị trí khác nhau trên toàn bộ diện tích bề mặt màng bán thấm, bởi vậy ảnh hưởng đến động lực của các quá trình chuyển khối [170].

Cụ thể hơn, trong chế độ dòng cùng chiều, sự chênh lệch về mặt áp suất thẩm thấu tự nhiên giữa hai dung dịch sẽ là lớn nhất tại điểm chúng đi vào hệ thí nghiệm màng FO, và giảm dần cho tới điểm chúng đi ra khỏi hệ thí nghiệm. Ngược lại, trong chế độ dòng ngược chiều, sự chênh lệch về mặt áp suất thẩm thấu tự nhiên giữa hai dung dịch sẽ duy trì tương đối ổn định suốt chiều dài hệ thí nghiệm màng FO (**Hình 1.6**). Nhìn chung, sự chênh lệch về mặt áp suất thẩm thấu tự nhiên duy trì ổn định sẽ là có lợi hơn, do tránh được những hiện tượng tiêu cực gây cản trở đến quá trình thẩm thấu của nước qua màng như hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ, hay sự giảm đột ngột động lực thẩm thấu do lực cản tự nhiên từ màng bán thấm. Tuy nhiên, trong phần lớn trường hợp, ảnh hưởng của hướng chảy tương đối giữa dòng cần xử lý và dung dịch lôi cuốn lên thông lượng J_w , thông lượng J_s , cũng như mức độ gây nhiễm bẩn màng của hệ thống màng FO là không quá đáng kể. Nguyên nhân là do, kích thước của các hệ thống thiết bị màng FO thường tương đối nhỏ, do vậy sự thay đổi về mặt nồng độ dung dịch dọc theo chiều dài màng bán thấm là không quá đáng kể – đặc biệt là tại những ngưỡng tốc độ dòng cấp vào tương đối cao [171].



Hình 1.6. Ảnh hưởng của hướng dòng chảy lên sự chênh lệch nồng độ dung dịch hai phía của màng bán thấm

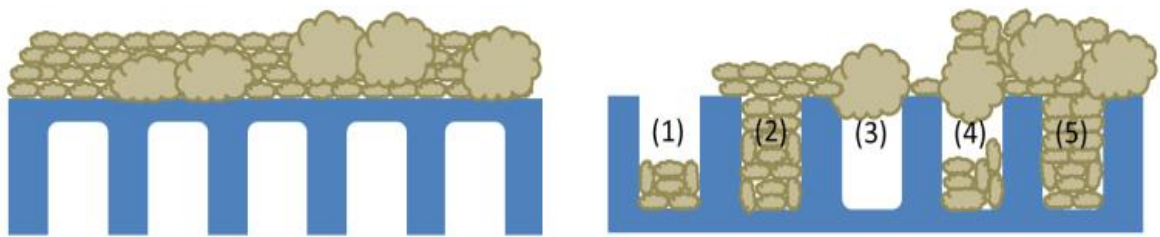
1.4. NHIỄM BẮN MÀNG, CÁC PHƯƠNG PHÁP KIỂM SOÁT VÀ KHẮC PHỤC NHIỄM BẮN MÀNG

1.4.1. Nhiễm bẩn màng

Nhiễm bẩn màng là một hiện tượng thường xảy ra trong các quá trình lọc qua màng, bao gồm cả các quá trình ứng dụng công nghệ màng FO, gây ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu quả vận hành của toàn bộ hệ thống thiết bị. Một cách cơ bản nhất, nhiễm bẩn màng được định nghĩa là hiện tượng lắng đọng hạt huyền phù, hoặc hạt keo, hoặc đại phân tử bản chất hữu cơ, hoặc hợp chất vô cơ khó tan, hoặc sinh khối vi sinh vật, hoặc hỗn hợp của những yếu tố gây nhiễm bẩn này trên bề mặt hay thậm chí là bên trong cấu trúc của màng bán thấm [172]. Hiện tượng nhiễm bẩn màng không chỉ gây suy giảm thông lượng J_w , hiệu suất thu hồi nước sạch, cũng như chất lượng dòng nước đầu ra, mà còn làm tăng chi phí vận hành của hệ thống màng FO và rút ngắn tuổi thọ của màng bán thấm. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, cơ chế gây nhiễm bẩn màng liên quan đến hàng loạt yếu tố tương đối phức tạp, bao gồm tương tác hoá học giữa các thành phần chất tan trong dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuộn, những yếu tố thủy động xảy ra bên trong thiết bị lọc qua màng, cũng như những đặc trưng riêng của màng bán thấm [173].

Nhìn chung, tại phía lớp lọc của màng bán thấm, hiện tượng nhiễm bẩn màng

xảy ra khi các thành phần gây nhiễm bẩn màng lắng đọng trực tiếp lên bề mặt của màng bán thấm, hình thành nên lớp cặn gây cản trở quá trình chuyển khối của nước qua màng. Cơ chế nhiễm bẩn này thường được gọi là **nhiễm bẩn ngoài màng** [174]. Ngược lại, tại phía lớp trung gian hoặc lớp nền của màng bán thấm, hiện tượng nhiễm bẩn thường xảy ra theo cơ chế phức tạp hơn, bởi các thành phần gây nhiễm bẩn màng có thể lắng đọng cả trên bề mặt lẫn bên trong cấu trúc của màng bán thấm. Cụ thể, khi kích thước các hạt gây nhiễm bẩn màng tương đối nhỏ, chúng có thể tiến vào bên trong cấu trúc lỗ xốp của màng bán thấm, sau đó được hấp phụ lên bề mặt thành của những cấu trúc lỗ xốp này, hoặc cuối cùng được giữ lại tại mặt sau của lớp lọc (phía lớp lọc tiếp xúc với lớp trung gian). Cơ chế nhiễm bẩn này thường được gọi là **nhiễm bẩn trong màng**, và có thể dẫn tới tình trạng “tắc lỗ xốp” – cấu trúc lỗ xốp đóng vai trò kênh chuyển khối qua lớp trung gian của màng bán thấm bị lấp đầy bởi các thành phần cặn bẩn, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến khả năng thẩm thấu của nước qua màng bán thấm. Khi xảy ra tình trạng “tắc lỗ xốp”, hoặc khi kích thước các hạt gây nhiễm bẩn màng tương đối lớn, thì các hạt gây nhiễm bẩn màng sẽ tiếp tục lắng đọng trên bề mặt của màng bán thấm, dẫn tới hiện tượng nhiễm bẩn ngoài màng (**Hình 1.7**, phải) [175].



Hình 1.7. Cơ chế nhiễm bẩn ngoài màng (trái), và cơ chế nhiễm bẩn trong màng (phải)

Do chỉ xảy ra trên bề mặt của màng bán thấm, nên hiện tượng nhiễm bẩn ngoài màng thường tương đối dễ khắc phục thông qua việc tối ưu hoá các điều kiện thuỷ động của dòng cặn xử lý và dung dịch lõi cuốn, ví dụ tăng lưu lượng dòng vào, bổ sung tấm ngăn, sử dụng dòng biến tốc, khử cặn lắng bằng khí... [176,177] Bên cạnh đó, khác với trong các hệ thống màng RO, bởi không tồn tại tác động nén ép đến từ áp suất lực nên lớp cặn bẩn hình thành trên bề mặt màng FO cũng thường xốp hơn và có thể dễ dàng được loại bỏ thông qua các phương pháp làm sạch vật lý đơn giản [178].

Ngược lại, nguyên nhân dẫn tới hiện tượng nhiễm bẩn trong màng thường là các thành phần cặn bẩn có trong dòng cặn xử lý, nên trong phần lớn các hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO, lớp lọc của màng thường được đặt

hướng về phía dòng cần xử lý nhằm mục đích hạn chế hiện tượng nhiễm bẩn trong màng, mặc dù điều này có thể làm nghiêm trọng hơn hiện tượng phân cực nồng độ trong màng (ICP) [179]. Sở dĩ như vậy, là do bản thân lớp cặn bẩn bám bên trong cấu trúc của màng cũng có thể tạo thành trở lực đặc biệt lớn cho sự chuyển khối của nước qua màng, đồng thời chúng cũng thường rất khó được làm sạch ngay cả bằng phương pháp dòng thau rửa ngược [180].

Nhìn chung, hiện tượng nhiễm bẩn màng có thể ảnh hưởng đến hiệu quả hoạt động của các hệ thống thiết bị khử mặn trên cơ sở công nghệ màng FO thông qua những cơ chế chính như sau [181]:

- **Làm tăng sức cản thuỷ lực của màng bán thấm.** Bản thân lớp cặn lắng sở hữu sức cản thuỷ lực nhất định, khi bám trên bề mặt của màng bán thấm sẽ làm tăng sức cản thuỷ lực chung của toàn bộ màng bán thấm, gây ảnh hưởng tiêu cực đến khả năng thẩm thấu của nước qua màng. Bởi vậy, trong trường hợp màng bị nhiễm bẩn, giá trị thông lượng J_w sẽ trở nên thấp hơn so với khi màng không bị nhiễm bẩn. Mức độ nghiêm trọng của hiện tượng này được quyết định bởi cấu trúc của lớp cặn lắng, do đó phụ thuộc chủ yếu vào bản chất hoá học của các chất gây nhiễm bẩn và tương tác hoá học giữa các chất gây nhiễm bẩn – bao gồm chất lơ lửng, cũng như thành phần chất tan và hạt rắn huyền phù trong dòng cần xử lý.

- **Gây ra hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ.** Sự tồn tại của lớp cặn lắng có thể làm giảm khả năng khuếch tán các chất tan nằm gần khu vực bề mặt của màng bán thấm trở lại dòng cần xử lý, tạo thành những vùng phân cực nồng độ cục bộ tại khu vực gần bề mặt của màng bán thấm. Hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ sẽ làm giảm động lực cho quá trình chuyển khối của nước qua màng bán thấm, bởi vậy dẫn tới sự suy giảm thông lượng J_w .

- **Làm thay đổi đặc tính của màng.** Trong một số trường hợp, sự tồn tại của lớp cặn lắng có thể dẫn tới những thay đổi liên quan đến khả năng tương tác giữa màng bán thấm và nước, bởi vậy làm giảm thông lượng J_w . Tuy nhiên, trong một số trường hợp cá biệt, hiện tượng nhiễm bẩn trong màng có thể làm giảm kích thước lỗ xốp thuộc lớp trung gian của màng bán thấm, nhờ vậy giúp màng bán thấm ngăn chặn hiệu quả hơn sự chuyển khối của những chất tan sở hữu kích thước phân tử tương đối lớn, đặc biệt là các chất lơ lửng (do lớp trung gian của màng bán thấm thường được đặt hướng về phía dung dịch lơ lửng). Chính do hiện tượng này, nên trong một số trường hợp có thể quan sát thấy sự cải thiện của thông lượng J_w khi màng bán thấm đang bị nhiễm bẩn chưa quá nghiêm trọng.

Bên cạnh phương pháp phân loại dựa trên vị trí hình thành cặn lắng như đã

trình bày phía trên, hiện tượng nhiễm bẩn màng cũng có thể được phân loại dựa trên bản chất hoá học của tác nhân gây nhiễm bẩn màng, mà cụ thể bao gồm: nhiễm bẩn hạt keo, nhiễm bẩn hữu cơ, nhiễm bẩn vô cơ, và nhiễm bẩn sinh học [182]. Trong phần lớn trường hợp, hiện tượng nhiễm bẩn màng được gây ra bởi sự kết hợp của nhiều loại tác nhân gây nhiễm bẩn khác nhau. Tuy nhiên, do cơ chế hình thành nên lớp cặn lắng chứa nhiều loại tác nhân gây nhiễm bẩn khác nhau là tương đối phức tạp, nên hiện nay phần lớn nghiên cứu đều chỉ tập trung vào từng đối tượng tác nhân gây nhiễm bẩn cụ thể.

1.4.2. Các phương pháp kiểm soát nhiễm bẩn màng

Như đã đề cập, tồn tại nhiều yếu tố khác nhau ảnh hưởng đến tính trạng nhiễm bẩn màng trong các hệ thống ứng dụng công nghệ màng FO, bao gồm: thành phần và đặc trưng hoá học của dòng cần xử lý [182–184], thành phần và đặc trưng hoá học của dung dịch lõi cuốn [174,175,185,186], bản chất hoá học, cấu trúc, và tính chất của màng bán thấm [75,182,187], hướng đặt màng bán thấm [188], cũng như một số yếu tố điều kiện vận hành [162,175,179,182,185,189]. Bởi vậy, để có thể kiểm soát hiện tượng nhiễm bẩn màng, cần thiết phải tiến hành tiếp cận trên cơ sở những khía cạnh này.

1.4.2.1. Phương pháp tiền xử lý dòng cần xử lý

Trong phần lớn trường hợp, hiện tượng nhiễm bẩn màng thường xảy ra nghiêm trọng hơn tại phía dòng cần xử lý, bởi dòng cần xử lý thường chứa nhiều thành phần chất tan tương đối phức tạp và khó kiểm soát. Do đó, việc tiến hành tiền xử lý một cách phù hợp đối với dòng cần xử lý hoàn toàn có thể đem lại tác dụng hạn chế đáng kể đối với hiện tượng nhiễm bẩn màng và giúp cải thiện hiệu quả vận hành chung của toàn bộ hệ thống màng FO.

Cụ thể, mục tiêu của việc tiến hành tiền xử lý đối với dòng cần xử lý là nhằm loại bỏ một cách tối đa các tác nhân gây nhiễm bẩn màng đang tồn tại bên trong dòng cần xử lý, cũng như điều chỉnh các đặc trưng hoá học quan trọng của dòng cần xử lý. Quá trình tiền xử lý đối với dòng cần xử lý có thể bao gồm nhiều bước khác nhau, mỗi bước tiền xử lý được thiết kế nhằm loại bỏ một hay một số tác nhân gây nhiễm bẩn màng nhất định. Trong đó, bước lọc thô thường được thực hiện nhằm loại bỏ các thành phần chất rắn không hoà tan sở hữu kích thước hạt tương đối lớn, khoảng trên 1 μm . Một hệ thống lọc thô thường được thiết kế bao gồm nhiều lớp vật liệu lọc khác nhau nhằm tách các thành phần chất rắn không hoà tan khỏi dòng cần xử lý theo kích thước hạt giảm dần, ví dụ bắt đầu bằng lớp cát, sau đó đến lớp than bùn, lớp đất sét nở, lớp sợi thuỷ tinh, lớp than hoạt tính... [189] Tiếp theo, bước xử

lý keo tụ và lắng cặn thường được thực hiện nhằm loại bỏ các thành phần chất rắn không hoà tan sở hữu kích thước hạt nhỏ hơn (khoảng dưới 1 μm), cũng như các thành phần gây nhiễm bẩn dạng hạt keo. Một số tác nhân keo tụ thường được sử dụng bao gồm phèn chua và muối sắt [190].

Bên cạnh các thành phần chất rắn không hoà tan, thì các thành phần chất tan sở hữu kích thước phân tử tương đối lớn, các hạt keo sở hữu kích thước tương đối nhỏ, cũng như các tế bào vi khuẩn, vi nấm, và vi tảo cũng có thể được loại bỏ khỏi dòng cần xử lý thông qua bước lọc tinh sử dụng màng siêu lọc, hoặc lọc qua màng kích thước micro [191,192]. Hiệu quả loại bỏ các tác nhân gây nhiễm bẩn màng của bước lọc tinh phụ thuộc chủ yếu vào thành phần các tác nhân gây nhiễm bẩn màng tồn tại trong dòng cần xử lý, cũng như kích thước lỗ xốp của màng lọc tinh được sử dụng. Cụ thể, phần lớn màng sở hữu khả năng lọc kích thước micro hiện nay đều cho phép loại bỏ các thành phần hạt chất rắn với kích thước đến 0,1 μm , trong khi màng siêu lọc thì cho phép loại bỏ các phân tử với kích thước đến 1 kDa [193]. Ngoài ra, phương pháp trao đổi ion và phương pháp axit hoá cũng có thể được sử dụng nhằm xử lý một số tác nhân gây nhiễm bẩn màng gốc vô cơ, hoặc một số tác nhân gây nhiễm bẩn màng với bản chất hạt keo nhất định [190,194].

Bên cạnh việc loại bỏ các tác nhân gây nhiễm bẩn màng, thì quá trình tiền xử lý cũng có thể được thực hiện nhằm tối ưu hoá một số đặc trưng hoá học quan trọng của dòng cần xử lý, đặc biệt là thành phần dinh dưỡng phù hợp cho sự sinh trưởng của vi khuẩn, vi nấm, và vi tảo. Những yếu tố như độ pH, lực phân ly ion, tỷ lệ từng loại ion cụ thể... có thể ảnh hưởng đáng kể đến đặc trưng tương tác giữa các tác nhân gây nhiễm bẩn màng với nhau, cũng như giữa các tác nhân gây nhiễm bẩn màng với bề mặt của màng bán thấm. Cụ thể, phương pháp axit hoá dòng cần xử lý rất thường được sử dụng nhằm kiểm soát tình trạng lắng cặn trên bề mặt màng nói riêng, cũng như trong toàn bộ hệ thống thiết bị khử mặn nói chung, của các hợp chất vô cơ mang tính kiềm như CaCO_3 hay $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ [195]. Tương tự, nhiều phương pháp nhằm làm giảm độ cứng của dòng cần xử lý (thông qua loại bỏ một phần hoặc hoàn toàn ion Ca^{2+} và ion Mg^{2+}) cũng được chứng minh là có thể giúp giảm thiểu tình trạng nhiễm bẩn màng do các tác nhân vô cơ, hữu cơ, cũng như sinh học [184]. Một số phương pháp phổ biến thường được sử dụng nhằm làm giảm độ cứng của dòng cần xử lý bao gồm phương pháp trao đổi ion, phương pháp kết tủa/keo tụ điện trường, phương pháp kết tủa bằng cách bổ sung ion đồng kết tủa... [196–198]

Sự tồn tại của các thành phần dinh dưỡng là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng sinh trưởng của vi khuẩn, vi tảo, và vi nấm, cũng như khả năng hình thành của lớp “màng sinh học” bao phủ trên bề mặt của màng bán thấm. Theo nhiều

kết quả nghiên cứu đã được công bố, việc bổ sung các phụ gia chống lắng cặn vào dòng cần xử lý nhằm kiểm soát tình trạng nhiễm bẩn do cặn lắng vô cơ, trong một số trường hợp, có thể làm nghiêm trọng thêm tình trạng nhiễm bẩn hữu cơ, hoặc tình trạng nhiễm bẩn do tác nhân sinh học. Nguyên nhân là bởi, phần lớn các loại phụ gia chống lắng cặn hiện đang được sử dụng đều có bản chất hữu cơ, bởi vậy có thể trở thành nguồn dinh dưỡng cung cấp cho sự phát triển của vi khuẩn, vi tảo, và vi nấm [199,200]. Đồng thời, cũng cần lưu ý rằng mặc dù quá trình tiền xử lý đối với dòng cần xử lý có thể giúp hạn chế đáng kể hiện tượng nhiễm bẩn màng, tuy nhiên quá trình này cũng thường yêu cầu tiêu hao rất nhiều năng lượng và/hoặc hoá chất, gây ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu quả chung về mặt kinh tế của các hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO. Ngoài ra, những hoá chất được bổ sung vào dòng cần xử lý cũng có thể tạo thành môi nguy cơ nhất định đối với môi trường và sức khoẻ con người, bởi thông thường dòng sau xử lý sẽ được thải trực tiếp ra môi trường.

Nhìn chung, bên cạnh mục tiêu nhằm kiểm soát tình trạng nhiễm bẩn màng, thì cũng cần cân nhắc đến khía cạnh kinh tế và khía cạnh an toàn môi trường khi lựa chọn các phương pháp tiền xử lý phù hợp.

1.4.2.2. Phương pháp lựa chọn dung dịch lồi cuốn phù hợp

Như đã đề cập, thành phần dung dịch lồi cuốn có thể ảnh hưởng một cách đáng kể đến mức độ nhiễm bẩn của màng bán thấm tại cả phía dung dịch lồi cuốn, lẫn phía dòng cần xử lý. Bởi vậy, trong quá trình lựa chọn dung dịch lồi cuốn, bên cạnh những cân nhắc liên quan đến thông lượng J_w và thông lượng J_s , thì ảnh hưởng của dung dịch lồi cuốn lên tình trạng nhiễm bẩn màng cũng là một yếu tố quan trọng cần được xem xét nhằm đảm bảo hiệu quả vận hành tối ưu nhất cho toàn bộ hệ thống thiết bị khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO [186].

Trước tiên, không nên lựa chọn những chất lồi cuốn có thể trở thành tác nhân gây nhiễm bẩn màng, tác nhân kích thích sự nhiễm bẩn màng, hoặc nguồn dinh dưỡng cung cấp cho sự phát triển của các loài vi sinh vật. Ngoài ra, cũng nên lựa chọn những chất lồi cuốn với khả năng thẩm thấu ngược qua màng thấp, và nên sử dụng dung dịch lồi cuốn với nồng độ thấp hơn giá trị “nồng độ tới hạn”. Điều này sẽ giúp hạn chế tình trạng nhiễm bẩn màng gây ra bởi hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ bên trong và bên ngoài màng bán thấm [174].

Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng thường chỉ có thể kiểm soát một cách chính xác các tính chất của dung dịch lồi cuốn khi dung dịch lồi cuốn (hoặc chất lồi cuốn) được tổng hợp trong quy mô phòng thí nghiệm, đảm bảo độ tinh khiết cao, không

chứa thành phần tạp chất và/hoặc vi sinh vật với khả năng thúc đẩy tình trạng nhiễm bẩn màng. Ngược lại, chất lõi cuộn tổng hợp dùng cho quy mô công nghiệp và chất lõi cuộn nguồn gốc tự nhiên thường chứa nhiều thành phần tạp chất khó làm sạch với khả năng thúc đẩy tình trạng nhiễm bẩn màng.

1.4.2.3. Phương pháp lựa chọn màng bán thấm phù hợp

Như đã đề cập, cấu trúc và bản chất hoá học của màng bán thấm là những yếu tố có thể ảnh hưởng đến mức độ nhiễm bẩn màng trong quá trình vận hành kéo dài, mà đặc biệt là giai đoạn hình thành lớp nhiễm bẩn ban đầu trên bề mặt màng bán thấm. Bởi vậy, hiện đã có nhiều nghiên cứu tập trung vào vấn đề biến tính màng bán thấm nhằm giúp tăng khả năng chống nhiễm bẩn tự nhiên của bản thân màng bán thấm. Những nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào một số khía cạnh cụ thể sau: (1) tăng tính ưa nước của bề mặt màng bán thấm [174,201], (2) giảm độ nhám của bề mặt màng bán thấm [202], (3) giảm điện tích của bề mặt màng bán thấm [203], (4) giảm số lượng các nhóm cacboxyl tự do trên bề mặt màng bán thấm [201], (5) sử dụng những cấu trúc hoá học đặc biệt cho bề mặt màng bán thấm [203], (6) kết hợp những loại hạt nano đặc biệt vào cấu trúc bề mặt màng bán thấm [204], và (7) phủ thêm một lớp lọc bổ sung vào mặt tự do của lớp trung gian màng bán thấm [205].

Trên cơ sở này, trong quá trình lựa chọn màng bán thấm cho các ứng dụng màng FO, có thể trước tiên thực hiện một số phân tích cần thiết nhằm xác định và so sánh những tính chất quan trọng của màng bán thấm như tính ưa nước, độ nhám bề mặt, điện tích bề mặt..., từ đó thu được cái nhìn sơ bộ về khả năng chống nhiễm bẩn của từng loại màng bán thấm mà không cần trước tiên tiến hành các thí nghiệm lọc kéo dài.

1.4.2.4. Phương pháp tối ưu hoá các yếu tố điều kiện vận hành

Cuối cùng, sau khi đã lựa chọn được dung dịch lõi cuộn, phương pháp tiền xử lý dòng cần xử lý, và màng bán thấm phù hợp, cần thiết phải tiến hành tối ưu hoá các yếu tố điều kiện vận hành nhằm đảm bảo thu được thông lượng J_w cao nhất, đồng thời hạn chế tối đa tình trạng nhiễm bẩn màng.

Trong đó, hướng đặt màng là yếu tố đầu tiên cần được cân nhắc. Như đã đề cập, trong phần lớn trường hợp, màng bán thấm cần được đặt theo hướng cho lớp lọc được tiếp xúc trực tiếp với dòng cần xử lý nhằm hạn chế tình trạng nhiễm bẩn xảy ra bên trong màng bán thấm, mà nguyên nhân là do sự xâm nhập của các tác nhân gây nhiễm bẩn vào cấu trúc lỗ xốp với kích thước tương đối lớn của lớp trung gian màng bán thấm. Tuy nhiên, hướng đặt màng này cũng thường khiến cho hiện

tượng phân cực nồng độ cục bộ trong màng diễn ra một nghiêm trọng hơn, ảnh hưởng tiêu cực đến cả thông lượng J_w cũng như mức độ nhiễm bẩn màng.

Thông thường, tốc độ dòng của dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuộn khi tiếp xúc với màng bán thấm càng cao thì sẽ càng giúp hạn chế tình trạng nhiễm bẩn màng, nhờ vào hiệu ứng “rửa trôi” của dòng thủy động. Tuy nhiên, cũng cần tránh vận hành hệ thống tại những ngưỡng tốc độ dòng quá cao, bởi sự hình thành chế độ chảy tầng có thể làm hạn chế khả năng chuyển khối giữa các tầng thủy động, ảnh hưởng tiêu cực đến cả thông lượng J_w cũng như mức độ nhiễm bẩn màng. Trong một số trường hợp, bọt khí và tấm vách ngăn cũng có thể được sử dụng với vai trò những giải pháp hiệu quả nhằm giúp hạn chế tình trạng nhiễm bẩn màng [206–208].

Ngoài ra, nhiệt độ và áp suất dòng vào cũng là một số yếu tố điều kiện vận hành cần được quan tâm [157,162,174].

1.4.3. Giải pháp xử lý nhiễm bẩn màng

1.4.3.1. Phương pháp làm sạch cơ học

Làm sạch cơ học là phương pháp xử lý tình trạng nhiễm bẩn màng thường được sử dụng nhất trong các hệ thống lọc qua màng nói chung, cũng như các hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO nói riêng [209]. Trong đó, phương pháp rửa xuôi được thực hiện với dòng nước sạch chạy song song với bề mặt màng bán thấm nhằm mục đích “rửa trôi” các hạt cặn bẩn bám trên bề mặt màng bán thấm, còn phương pháp rửa ngược được thực hiện với dòng nước sạch thẩm thấu qua màng theo chiều ngược với chiều thông lượng J_w khi vận hành hệ thống màng FO nhằm mục đích “rửa trôi” các hạt cặn bẩn bám bên trong cấu trúc của màng bán thấm, cũng như tách các hạt cặn bẩn ra khỏi bề mặt màng bán thấm [209].

Mi và Elimelech đã tiến hành khảo sát một cách chi tiết hiệu quả của phương pháp rửa xuôi trong việc xử lý tình trạng nhiễm bẩn màng do các tác nhân hữu cơ, và nhận thấy rằng lớp cặn bẩn hình thành từ quá trình vận hành hệ thống màng FO thường xốp hơn so với lớp cặn bẩn hình thành từ quá trình vận hành hệ thống màng RO (do quá trình chuyển khối của nước qua màng không cần đến sự hỗ trợ của áp suất thủy lực), nhờ vậy cũng dễ dàng được loại bỏ hơn bằng phương pháp rửa xuôi. Theo các tác giả, quá trình rửa xuôi bằng nước thực hiện tại điều kiện tốc độ dòng cao và thời gian kéo dài có thể cho phép hồi phục tới 98% thông lượng J_w bị suy giảm do hiện tượng nhiễm bẩn màng, mà không cần bổ sung thêm bất kỳ loại hoá chất tẩy rửa nào khác. Ngoài ra, việc kết hợp bọt khí vào dòng rửa có thể giúp rút ngắn thời gian rửa, đồng thời cho phép hồi phục tới gần 100% thông lượng J_w bị suy giảm do hiện tượng nhiễm bẩn màng [210]. Mặc dù vậy, phương pháp rửa xuôi

cũng tồn tại nhược điểm là cần tiêu tốn một lượng nhất định nước sạch trong quá trình rửa, làm giảm hiệu quả sản xuất nước sạch chung của toàn bộ hệ thống thiết bị khử mặn. Ngoài ra, phương pháp này cũng không hiệu quả trong việc xử lý tình trạng nhiễm bẩn trong màng, do dòng rửa không thể tiến sâu vào các lỗ xốp trong cấu trúc lớp trung gian của màng bán thấm [176].

Trong phương pháp rửa ngược, phía dòng cần xử lý sẽ được thay thế bằng một dung dịch với độ mặn rất cao, còn phía dung dịch lõi cuốn sẽ được thay thế bằng một dung dịch với độ mặn tương đối thấp, hoặc nước sạch, nhằm tạo thành một dòng nước thẩm thấu qua màng ngược với chiều thẩm thấu thông thường của nước khi vận hành hệ thống màng FO. Trong một số trường hợp nhất định, quá trình này cũng có thể được thực hiện bằng cách tạm thời đảo vị trí giữa dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn nhằm hạn chế việc phải sử dụng nước sạch phục vụ cho quá trình rửa màng [211]. Ngoài ra, áp suất thủy lực cũng có thể được sử dụng nhằm cung cấp động lực bổ sung cho quá trình rửa màng [184]. Nhìn chung, ưu điểm của phương pháp này là cho phép xử lý cả thành phần cặn bẩn tồn tại bên trong cấu trúc lỗ xốp của màng bán thấm, cũng như giúp loại bỏ tốt hơn những thành phần cặn bẩn khó rửa trôi trên bám trên bề mặt màng bán thấm. Tuy nhiên, trong phần lớn những trường hợp khác, phương pháp rửa ngược thường đem lại hiệu quả khôi phục thông lượng J_w kém hơn so với phương pháp rửa xuôi.

1.4.3.2. Phương pháp làm sạch hoá học

Trong phần lớn trường hợp, các phương pháp làm sạch cơ học đã được chứng minh là đem lại hiệu quả đáng kể trong việc khắc phục và xử lý tình trạng nhiễm bẩn màng. Tuy nhiên, hiệu quả này sẽ bị suy giảm nếu tồn tại tương tác đủ mạnh giữa tác nhân gây nhiễm bẩn màng và bề mặt màng bán thấm. Năm 2010, Mi và Elimelech đã tiến hành khảo sát hiệu quả loại bỏ lớp cặn bẩn hữu cơ gốc alginate của phương pháp làm sạch cơ học, và phát hiện ra rằng lớp cặn bẩn hữu cơ gốc alginate trên bề mặt màng TFC sở hữu khả năng chống rửa trôi tốt hơn so với lớp cặn bẩn hữu cơ gốc alginate trên bề mặt màng CTA, bởi các thành phần cặn bẩn hữu cơ gốc alginate có thể bám dính tốt hơn trên bề mặt màng TFC [210]. Tương tự, Yoon và cộng sự cho rằng các phương pháp làm sạch cơ học thường không đem lại hiệu quả đáng kể trong việc khôi phục thông lượng J_w đã bị suy giảm do sự hình thành của lớp “màng sinh học” trên bề mặt màng bán thấm. Thay vào đó, lớp “màng sinh học” này đã bị loại bỏ gần như hoàn toàn sau khi màng bán thấm được xử lý bằng dung dịch chlorine. Tuy nhiên, điều kiện tiên quyết đặt ra là bản thân màng bán thấm phải tương đối bền hoá học, và không bị ăn mòn dưới tác động của dung dịch chlorine [212].

Nhìn chung, hầu hết mọi tác nhân tẩy rửa hoá học đều hoạt động theo cơ chế phản ứng hoá học với các thành phần gây nhiễm bẩn màng, nhằm làm suy giảm khả năng bám dính của các thành phần gây nhiễm bẩn màng với bề mặt màng bán thấm. So sánh với phương pháp làm sạch cơ học, phương pháp làm sạch hoá học thể hiện hiệu quả đặc biệt rõ rệt khi thành phần gây nhiễm bẩn màng sở hữu bản chất hữu cơ hoặc sinh học. Một số tác nhân tẩy rửa hoá học hiện đang được sử dụng tương đối phổ biến bao gồm dung dịch NaOH, dung dịch EDTA, và dung dịch NaOCl với nồng độ khoảng 0,5 – 1%. Tuy nhiên, phương pháp làm sạch hoá học cũng tồn tại những nhược điểm nhất định, như thường không thể xử lý các thành phần gây nhiễm bẩn bên trong màng, có thể gây ăn mòn và làm giảm tuổi thọ của màng bán thấm, cũng như tiềm ẩn nguy cơ gây ô nhiễm môi trường [213].

1.4.3.3. Phương pháp làm sạch sinh học

Bên cạnh phương pháp làm sạch cơ học và phương pháp làm sạch hoá học, trong những năm gần đây, một số nhà khoa học cũng đã nghiên cứu phát triển các phương pháp làm sạch sinh học nhằm hạn chế những tác động tiêu cực mà quá trình làm sạch có thể gây ra đối với màng bán thấm, cũng như giải quyết những quan ngại liên quan đến vấn đề mức tiêu thụ năng lượng và/hoặc hoá chất cho quá trình làm sạch [208].

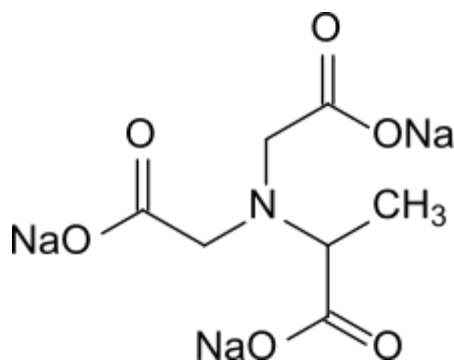
Cụ thể, một số tác giả đã sử dụng các tác nhân enzym nhằm thúc đẩy sự phân huỷ của những đối tượng gây nhiễm bẩn màng nhất định, đặc biệt là những loại “màng polyme sinh học” với bản chất protein và lipid, từ đó làm giảm khả năng bám dính của những đối tượng gây nhiễm bẩn này với bề mặt bán thấm và giúp cải thiện hiệu quả rửa trôi của phương pháp làm sạch cơ học [214,215]. Tương tự, Xu và Liu đã thí nghiệm bổ sung ức chế sinh tổng hợp adenosin tri-phosphat (ATP) vào dòng rửa màng nhằm mục đích gây ảnh hưởng đến hoạt động trao đổi chất của các loài vi sinh vật gây nhiễm bẩn màng, khiến cho lớp “màng sinh học” bám trên bề mặt bán thấm trở nên thiếu ổn định và cuối cùng tự tách ra khỏi bề mặt màng bán thấm [216].

1.5. TỔNG QUAN VỀ CÁC CHẤT LÔI CUỐN ĐƯỢC NGHIÊN CỨU

Đối tượng nghiên cứu trong khuôn khổ Luận án này là ba loại dung dịch lôi cuốn tiềm năng được lựa chọn, bao gồm:

- **Dung dịch lôi cuốn MGDA:** Dung dịch chứa hỗn hợp hai chất tan trinati α -DL-alanin diacetat (MGDA-3Na) và axit citric. Trong đó, MGDA-3Na là một hợp chất muối hữu cơ của natri, sở hữu khả năng tan tốt trong dung môi nước, khả năng tạo phức dễ tan trong dung môi nước với nhiều loại ion kim loại hoá trị cao, và

khả năng phân huỷ sinh học trong môi trường tốt. Đồng thời, MGDA-3Na cũng được xác định là không tạo thành mối nguy hại đáng kể đối với con người và các loài sinh vật thuỷ sinh. Hiện nay, MGDA-3Na đang được thương mại hoá bởi hãng BASF SE (Đức) dưới tên thương mại Trilon M®, với tác dụng chính là làm mềm nước và hỗ trợ tẩy rửa một số loại chất bẩn [217].

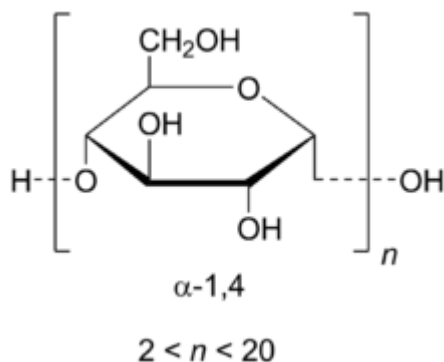


Hình 1.8. Cấu trúc hoá học của trinatri α -DL-alanin diacetat

Tuy nhiên, MGDA-3Na cũng tồn tại một nhược điểm là tạo thành dung dịch với độ pH tương đối cao ($\text{pH} > 11$), có thể gây ảnh hưởng tiêu cực đến tính ổn định của màng bán thấm, đặc biệt là tính ổn định của lớp chọn lọc thẩm thấu. Bởi vậy, Nghiên cứu sinh đã quyết định bổ sung axit citric vào dung dịch với vai trò một tác nhân điều chỉnh độ pH, do dung dịch muối trinatri citrat cũng đã được chứng minh là sở hữu khả năng lôi cuốn cao [218].

- **Dung dịch lôi cuốn MAL:** Dung dịch chứa chất tan maltodextrin (MAL). MAL là một hợp chất polysaccarit sở hữu khối lượng phân tử cao, và tương đối an toàn với sức khoẻ con người [219]. Nhiều nghiên cứu công bố trước đó đã cho thấy được khả năng lôi cuốn tốt của dung dịch các hợp chất monosaccarit như đường glucô hay đường fructô trong các hệ thống khử mặn ứng dụng công nghệ màng FO, tuy nhiên nhược điểm chung của những hợp chất này là sở hữu giá trị thông lượng Js tương đối cao, có thể tạo thành ảnh hưởng tiêu cực lên chất lượng dòng nước mặn cô đặc sau lọc thải ra môi trường [220].

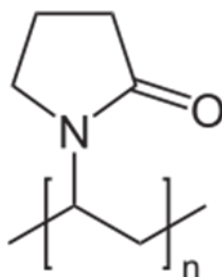
Năm 2021, NCS. Hoàng Minh Tạo và cộng sự đã thực hiện một số khảo sát cơ bản liên quan đến khả năng lôi cuốn của dung dịch MAL, tuy nhiên nội dung nghiên cứu mới chỉ giới hạn trong đánh giá thông lượng J_w và thông lượng J_s , mà chưa khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố điều kiện vận hành cũng như thời gian vận hành kéo dài lên hiệu quả lôi cuốn của dung dịch MAL [66].



Hình 1.9. Cấu trúc hoá học của maltodextrin

- **Dung dịch lồi cuộn PVP:** Dung dịch chứa chất tan polyvinylpyrrolidon (PVP). PVP là một hợp chất cao phân tử tan tốt trong nước và tương đối an toàn với sức khoẻ con người, hiện đang được sử dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực của đời sống – bao gồm cả với vai trò phụ gia thực phẩm với mã số E1201 theo Ủy ban Châu Âu và Ủy ban Tiêu chuẩn thực phẩm quốc tế Codex Alimentarius [221].

Năm 2022, NCS. Hoàng Minh Tạo và cộng sự đã thực hiện một số khảo sát cơ bản liên quan đến khả năng lồi cuộn của dung dịch PVP, tuy nhiên nội dung nghiên cứu mới chỉ giới hạn trong đánh giá thông lượng J_w và thông lượng J_s , mà chưa khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố điều kiện vận hành lên hiệu quả lồi cuộn của dung dịch PVP. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của yếu tố thời gian vận hành kéo dài lên hiệu quả lồi cuộn của dung dịch PVP cũng mới chỉ được khảo sát đến khoảng 100 giờ, và chưa có những đánh giá liên quan đến hiệu quả của các phương pháp làm sạch lên khả năng khôi phục tính chất thẩm thấu của màng bán thấm [67].



Hình 1.10. Cấu trúc hoá học của polyvinylpyrrolidon

Nhìn chung, ba loại chất lồi cuộn này sở hữu ưu điểm là khả năng hoà tan trong nước tốt và tạo thành dung dịch lồi cuộn với áp suất thẩm thấu cao, giá thành thấp và tương đối dễ tiếp cận, có thể sử dụng trực tiếp mà không cần trải qua các bước tổng hợp phức tạp, có thể hoàn nguyên một cách dễ dàng bằng nhiều phương pháp khác nhau, tương đối an toàn với con người và môi trường, bởi vậy phù hợp cho ứng dụng khử mặn tại những quốc gia đang phát triển như Việt Nam. Đặc biệt,

muối MGDA-3Na sở hữu khả năng phân huỷ sinh học tốt và khả năng tạo phức với ion kim loại hoá trị (II), được kỳ vọng có thể giúp hạn chế đáng kể hiện tượng nhiễm bẩn màng FO sau thời gian vận hành kéo dài.

Cụ thể, áp suất thẩm thấu của một dung dịch được xác định theo công thức:

$$\pi = i \times C \times R \times T \quad \textbf{(Phương trình 3)}$$

trong đó:

- π – Áp suất thẩm thấu của dung dịch (đơn vị: atm)
- R – Hằng số khí lý tưởng, xác định = 0,08206 L.atm/mol.K
- T – Nhiệt độ của dung dịch (đơn vị: K)
- C – Nồng độ của chất tan trong dung dịch (đơn vị: mol/L)
- i – Hệ số phân ly van 't Hoff, đại diện cho khả năng phân ly hay số nhóm chức tương đương có trên một phân tử chất tan

Trên cơ sở này, có thể thấy rằng do cả ba loại chất lõi cuộn tiềm năng được khảo sát (bao gồm MGDA-3Na, MAL, và PVP) đều tan tốt trong nước, nên chúng có thể tạo thành những dung dịch lõi cuộn với nồng độ chất tan cao và áp suất thẩm thấu lớn. Trong đó, mặc dù cả PVP và MAL đều là các hợp chất cao phân tử, tuy nhiên mỗi mắt xích trùng hợp của chúng đều mang một hay nhiều nhóm chức tương đối ưa nước và có thể tạo thành liên kết hydro với các phân tử nước, cho phép cải thiện đáng kể áp suất thẩm thấu của những dung dịch này. Tương tự, chất lõi cuộn MGDA-3Na là muối giữa một axit yếu với khối lượng phân tử không cao (axit α -DL-alanin diacetic) và một kiềm mạnh (NaOH), do vậy có thể phân ly yếu trong dung môi nước để tạo thành các cation và anion tương ứng, nhờ vậy giúp cải thiện đáng kể áp suất thẩm thấu tự nhiên của dung dịch.

CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG VÀ 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 cuộn:** Dung dịch MGDA, dung dịch MAL, và dung dịch PVP. Luận án này tập trung vào nghiên cứu một số tính chất lõi cuộn quan trọng của các dung dịch lõi cuộn, cũng như ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành và thời gian vận hành lên hiệu quả lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn.

- **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 cuộn.

2.2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.2.1. Hoá chất

Hoá chất và vật tư thực nghiệm trong nghiên cứu này được sử dụng trực tiếp sau khi mua về mà không cần thực hiện các bước tinh chế hay xử lý nào khác, trừ trường hợp có ghi chú cụ thể. Độ tinh khiết và nguồn gốc xuất xứ của từng loại hoá chất và vật tư thực nghiệm được liệt kê cụ thể tại mục liên quan.

- **Dung môi dùng để chuẩn bị dung dịch lõi cuộn và dung dịch dòng cần xử lý:** Nước de-ion (độ mặn $< 5 \text{ ppm}$) được sản xuất từ thiết bị Direct-Q® 5 UV Remote Water Purification Systems (Merck, Đức) đặt tại Trung tâm Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ cao, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

- **Chất tan dùng để chuẩn bị dung dịch dòng cần xử lý:** Muối tinh (hàm lượng tạp chất không tan $\leq 0,1\%$) xuất xứ Việt Nam. Muối tinh cần được sấy khô trước khi sử dụng nhằm loại bỏ hoàn toàn hàm lượng ẩm, đảm bảo tính chính xác về mặt nồng độ của các dung dịch muối được sử dụng trong nghiên cứu.

- **Chất tan dùng để chuẩn bị dung dịch lõi cuộn:** Axit citric, maltodextrin (MAL, phân tử khối trung bình = 400 Da) độ tinh khiết trên 99% được cung cấp bởi

hãng Sigma-Aldrich (Hoa Kỳ), và polyvinylpyrrolidon K17 (PVP). Trinatri α -DL-alanin diacetat (MGDA-3Na) được cung cấp dưới dạng sản phẩm thương mại Trilon M của hãng BASF SE (Đức).

- **Dung dịch nước nhiễm mặn thực tế:** Nước nhiễm mặn thực tế thu thập tại khu vực cửa Hà Lạn (sông Sò, tỉnh Nam Định) trong khoảng thời gian tháng 04 – 06/2024 được tiền xử lý nhằm loại bỏ thành phần chất rắn không hoà tan có kích thước $\geq 5 \mu\text{m}$, đảm bảo khả năng vận hành ổn định của màng bán thấm [68]. Mẫu nước nhiễm mặn thực tế được tiền xử lý tại chỗ ngay sau khi thu thập, sau đó được chuyển vào trong các phuy nhựa dung tích 200 L (mẫu chung) hoặc chai thủy tinh tối màu dung tích 500 mL (mẫu đối chứng), và được chuyển về bảo quản tại Trung tâm Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ cao, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Trong quá trình nghiên cứu, mẫu chung và mẫu đối chứng sẽ được định kỳ phân tích một số chỉ tiêu chất lượng cơ bản nhằm đảm bảo tính đại diện của kết quả thí nghiệm.

2.2.2. Thiết bị và dụng cụ

Một số dụng cụ và thiết bị thực nghiệm chính trong nghiên cứu sẽ được liệt kê với thông tin nguồn gốc xuất xứ thông số kỹ thuật cụ thể. Toàn bộ dụng cụ và thiết bị thực nghiệm trong nghiên cứu được sử dụng theo phạm vi hướng dẫn sử dụng của nhà sản xuất, hoặc theo nguyên tắc sử dụng chung đối với loại dụng cụ và thiết bị thực nghiệm đó.

- **Modul thí nghiệm dùng cho hệ thống thí nghiệm màng FO và hoàn nguyên dung dịch lõi cuộn:** Modul thí nghiệm Forward Osmosis CF042 Cell Assembly (dùng cho thí nghiệm FO) và modul thí nghiệm Crossflow CF042 Cell Assembly (dùng cho thí nghiệm hoàn nguyên) quy mô phòng thí nghiệm được cung cấp bởi hãng Sterlitech (Hoa Kỳ). Các modul thí nghiệm được chế tạo chủ yếu từ vật liệu nhựa acetal đồng trùng hợp với diện tích tiếp xúc màng thiết kế là 42 cm^2 , và được cung cấp cùng đầy đủ các phụ kiện ráp nối cần thiết đi kèm từ nhà sản xuất.

- **Màng bán thấm dùng cho thử hệ thống thí nghiệm màng FO:** Màng HFFO dạng tấm phẳng được cung cấp bởi hãng Aquaporin (Đan Mạch). Màng được chế tạo từ vật liệu compozit lớp mỏng (màng TFC) dưới dạng tấm khô kích thước $210 \times 297 \text{ mm}$ (khổ giấy A4), được cắt thành từng tấm nhỏ riêng biệt có kích thước $56 \times 115 \text{ mm}$. Trước khi sử dụng lần đầu tiên, các tấm màng được bảo quản trong điều kiện môi trường khô, tránh tiếp xúc trực tiếp với nước và ánh sáng Mặt Trời. Sau khi sử dụng trong thí nghiệm, các tấm màng được duy trì bảo quản trong dung dịch $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 1% và tránh tiếp xúc trực tiếp với ánh sáng Mặt Trời.

- **Màng NF dùng cho hoàn nguyên dung dịch lỏi cuộn:** Màng TS40 dạng tấm phẳng được cung cấp bởi hãng TriSep (Hoa Kỳ). Màng được chế tạo từ vật liệu compozit lớp mỏng (màng TFC) dưới dạng tấm khô kích thước 1016×305 mm. Màng được sử dụng và bảo quản trong các điều kiện tương tự như đối với màng bán thấm dùng cho thử hệ thống thí nghiệm màng FO.

- **Bơm tuần hoàn dùng cho thử hệ thống thí nghiệm màng FO:** Bơm cấp dòng Haedon HF-8377 được cung cấp bởi hãng Haedon (Đài Loan), với hiệu suất bơm tối đa 72 L/h (tương đương 1.200 mL/phút). Hiệu suất hoạt động thực tế của bơm có thể được điều chỉnh thông qua điều chỉnh hiệu điện thế dòng điện cấp cho thiết bị, nhằm đáp ứng tốt nhất nhu cầu về mặt lưu lượng dòng vào của hệ thống thí nghiệm.

- **Bơm tăng áp dùng cho hoàn nguyên dung dịch lỏi cuộn:** Bơm tăng áp Haedon 5G-100 được cung cấp bởi hãng Haedon (Đài Loan), với hiệu suất bơm tối đa 108 L/h và áp suất tăng áp tối đa 1,1 MPa.

- **Hệ thống điều chỉnh nhiệt độ:** Thiết bị làm mát tuần hoàn Recirculating Chiller F-100 được cung cấp bởi hãng Buchi (Thụy Sĩ) cho khoảng nhiệt độ dưới 25 °C, và bộ gia nhiệt trên thiết bị Rotavapor® R-100 được cung cấp bởi hãng Buchi (Thụy Sĩ) kết hợp hệ thống bơm tuần hoàn cho khoảng nhiệt độ trên 25 °C.

- **Thiết bị dùng cho theo dõi hiệu quả vận hành của dung dịch lỏi cuộn:** Cân khối lượng GeeLeaf được cung cấp bởi hãng GeeLeaf (Trung Quốc), với khối lượng cân tối đa là 5 kg và độ chính xác 1 g. Máy đo tích hợp độ mặn, TDS, và độ dẫn điện Ezdo 7021 được cung cấp bởi hãng Ezdo (Pháp).

- **Các thiết bị và dụng cụ phụ trợ khác:** Hệ thống dụng cụ chứa nước, đường ống dẫn nước, van điều tiết, áp kế, đường cấp nhiệt... được lắp đặt phù hợp với yêu cầu của từng thí nghiệm cụ thể.

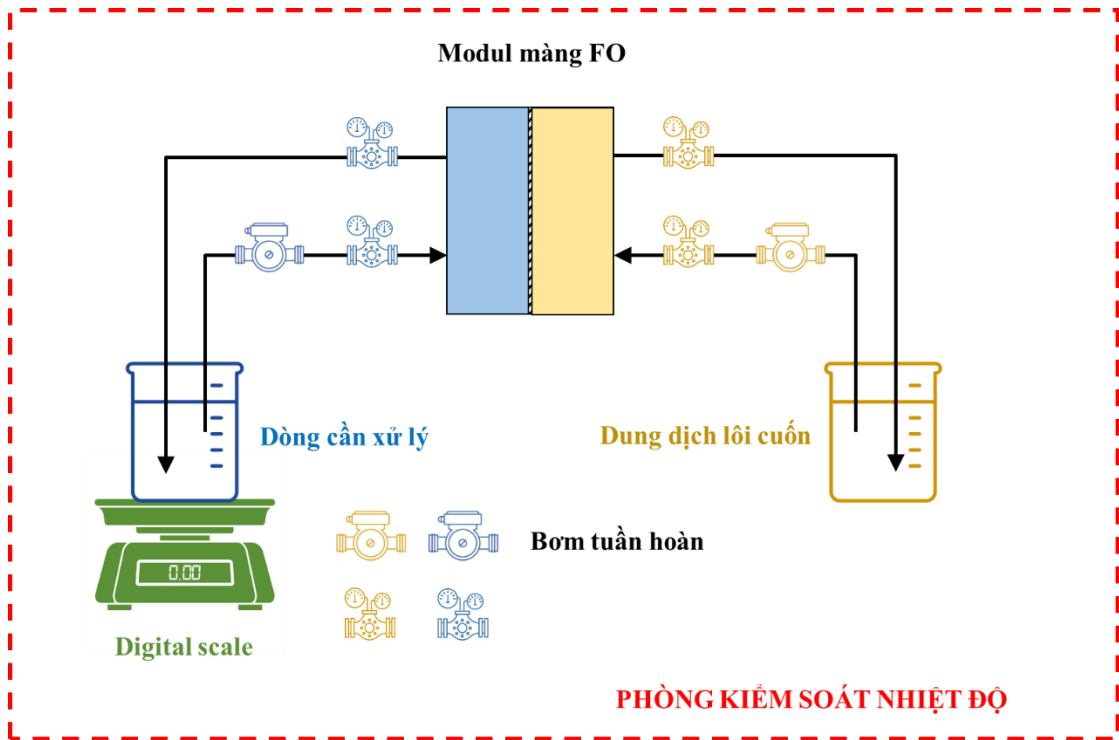
2.2.3. Phương pháp thực nghiệm chung

Sơ đồ hệ thống thực nghiệm quy mô phòng thí nghiệm được mô tả trong **Hình 2.1**, với hình ảnh thực tế của riêng bộ phận thực nghiệm màng FO được trình bày trong **Hình 2.2**. Nhìn chung, quy trình và các điều kiện thực nghiệm sử dụng trong Luận án đã được xây dựng và lựa chọn trên cơ sở những kết quả nghiên cứu liên quan trước đó, bởi vậy đảm bảo tính khoa học cao và phù hợp với hệ thống trang thiết bị thực tế sẵn có [66–68,222].

Nhằm đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy của những kết quả thu được, các thí nghiệm liên quan đến màng FO trong Luận án này đã được thực hiện theo một

hệ thống quy trình vận hành thống nhất, bao gồm [222]:

- (1) quy trình rửa;
- (2) quy trình kiểm tra đối chiếu tính chất màng; và
- (3) quy trình thực nghiệm đánh giá đặc trưng lõi cuộn.



Hình 2.1. Sơ đồ hệ thống thực nghiệm quy mô phòng thí nghiệm



Hình 2.2. Hệ thống thực nghiệm màng FO quy mô phòng thí nghiệm

2.2.3.1. Quy trình rửa

Trước và sau mỗi thí nghiệm, cần thiết phải tiến hành rửa sạch hệ thống thực nghiệm nhằm đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy của các kết quả thu được.

Cụ thể, trước mỗi thí nghiệm, sau khi đã hoàn tất bước lắp đặt hệ thống thực nghiệm theo đúng thiết kế, cần trước tiên tiến hành bước chạy làm sạch tại cả hai phía của hệ thống thực nghiệm bằng nước de-ion trong khoảng 30 phút. Trong quá trình này, có thể tiến hành điều chỉnh trước các thông số điều kiện vận hành liên quan theo yêu cầu của từng thí nghiệm cụ thể, nhằm rút ngắn tối đa thời gian điều chỉnh hệ thống thực nghiệm khi vận hành chính thức và đảm bảo tính tương đồng về mặt quy trình thực nghiệm giữa các thí nghiệm.

Tương tự, sau khi mỗi thí nghiệm kết thúc, hệ thống thực nghiệm cần được chạy rửa với nước de-ion ba lần, mỗi lần kéo dài lần lượt là 5 phút, 10 phút, và 30 phút. Sau khi chạy rửa hoàn tất, hệ thống thực nghiệm có thể được sử dụng trực tiếp cho các thí nghiệm tiếp theo mà không cần chạy làm sạch lại, hoặc được tháo ra để bảo quản. Trong trường hợp hệ thống thực nghiệm được tháo ra để bảo quản, cần thiết phải thực hiện lại bước chạy làm sạch trước khi tiến hành những thí nghiệm tiếp theo. Màng FO sau khi được tháo ra khỏi hệ thống thực nghiệm cần được tráng sạch bằng nước de-ion, rồi ngâm trong dung dịch $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 1% liên tục cho tới lần sử dụng tiếp theo.

2.2.3.2. Quy trình kiểm tra đối chiếu tính chất màng

Quy trình kiểm tra đối chiếu tính chất màng được thực hiện một cách định kỳ sau mỗi 10 thí nghiệm nhằm đánh giá sự thay đổi về mặt tính chất của màng bán thấm, từ đó giúp đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy của những kết quả thu được. Màng bán thấm cần được thay mới nếu kết quả kiểm tra đối chiếu màng xuất hiện sự thay đổi về mặt thông lượng J_w và thông lượng J_s vượt quá 5% so với những giá trị tương ứng ban đầu của màng bán thấm.

Bảng 2.1. Các thông số vận hành cho thí nghiệm kiểm tra đối chiếu tính chất màng

Thông số vận hành	Giá trị
Dung dịch ban đầu: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lõi cuốn	Nước de-ion NaCl 60‰
Lưu lượng dòng vào: • Phía dòng cần xử lý	200 mL/phút

• Phía dung dịch lõi cuộn	230 mL/phút
Thông số điều kiện vận hành khác:	
• Nhiệt độ	30 °C
• Hướng tương đối của dòng vào	Ngược chiều
• Chênh lệch áp suất	0,2 bar (phía dòng cần xử lý)
• Thời gian thí nghiệm	150 phút

Cụ thể, trước mỗi thí nghiệm, cần chuẩn bị khoảng 1.100 mL dung dịch dòng cần xử lý (nước de-ion) và dung dịch lõi cuộn (dung dịch NaCl 60%). Trong trường hợp cần thiết (khi hệ thống thực nghiệm đang trong trạng thái tháo rời), cần tiến hành tráng rửa màng FO bằng nước de-ion rồi lắp đặt hệ thống thực nghiệm theo đúng thiết kế. Hệ thống thực nghiệm cần được rửa theo quy trình như trình bày trong **Mục 2.2.3.1** trước và sau các thí nghiệm kiểm tra đối chiếu tính chất màng.

Sau khi quá trình rửa kết thúc, tiến hành tắt bơm và thay thế nguồn cấp dung dịch dòng cần xử lý cũng như dung dịch lõi cuộn bằng các dung dịch phù hợp (**Bảng 2.1**), với thể tích mỗi dung dịch khoảng 900 mL. Thời điểm bắt đầu thí nghiệm được ghi nhận khi hai bơm của hệ thống thực nghiệm được đồng thời khởi động. Sau khoảng 30 giây, tiến hành bổ sung dung dịch dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuộn một cách phù hợp, sao cho trong dụng cụ chứa tại cả hai bên có mực dung dịch đạt ngưỡng 1.000 mL. Trong năm phút tiếp theo, tiến hành tinh chỉnh lại các thông số điều kiện vận hành liên quan (**Bảng 2.1**), rồi lập tức ghi nhận giá trị khối lượng ban đầu của dụng cụ chứa dung dịch lõi cuộn và độ mặn của dung dịch dòng cần xử lý.

Tiếp theo, sau mỗi 15 phút, tiến hành ghi nhận giá trị khối lượng của dụng cụ chứa dung dịch lõi cuộn và độ mặn của dung dịch dòng cần xử lý nhằm theo dõi sự thay đổi của những thông số này theo thời gian. Thí nghiệm được duy trì trong 150 phút. Sau khi thí nghiệm kết thúc, hệ thống thực nghiệm sẽ được rửa theo quy trình như trình bày trong **Mục 2.2.3.1**.

2.2.3.3. Quy trình thực nghiệm đánh giá khả năng lõi cuộn

Trước mỗi thí nghiệm, cần chuẩn bị khoảng 1.100 mL dung dịch dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuộn với thành phần và hàm lượng chất tan theo yêu cầu của từng thí nghiệm cụ thể. Trong trường hợp cần thiết (khi hệ thống thực nghiệm đang trong trạng thái tháo rời), cần tiến hành tráng rửa màng FO bằng nước de-ion rồi lắp đặt hệ thống thực nghiệm theo đúng thiết kế. Đồng thời, hệ thống thực nghiệm cần được rửa theo quy trình như trình bày trong **Mục 2.2.3.1** trước và sau mỗi thí

nghiệm.

Sau khi quá trình rửa kết thúc, tiến hành tắt bơm và thay thế nguồn cấp dung dịch dòng cần xử lý cũng như dung dịch lõi cuốn bằng các dung dịch phù hợp theo yêu cầu của từng thí nghiệm cụ thể, với thể tích mỗi dung dịch khoảng 900 mL. Thời điểm bắt đầu thí nghiệm được ghi nhận khi hai bơm của hệ thống thực nghiệm được đồng thời khởi động. Sau khoảng 30 giây, tiến hành bổ sung dung dịch dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn một cách phù hợp, sao cho trong dụng cụ chứa tại cả hai bên có mực dung dịch đạt ngưỡng 1.000 mL. Trong năm phút tiếp theo, tiến hành tinh chỉnh lại các thông số điều kiện vận hành liên quan theo yêu cầu của từng thí nghiệm cụ thể, rồi lập tức ghi nhận giá trị khối lượng ban đầu của dụng cụ chứa dung dịch lõi cuốn và độ mặn của dung dịch dòng cần xử lý.

Tiếp theo, trong trường hợp các thí nghiệm với thời gian vận hành ngắn, tiến hành ghi nhận giá trị khối lượng của dụng cụ chứa dung dịch lõi cuốn và độ mặn của dung dịch dòng cần xử lý sau mỗi 15 phút nhằm theo dõi sự thay đổi của những thông số này theo thời gian. Thí nghiệm được duy trì trong 150 phút. Sau khi thí nghiệm kết thúc, hệ thống thực nghiệm sẽ được rửa theo quy trình như trình bày trong **Mục 2.2.3.1**.

Ngược lại, trong trường hợp các thí nghiệm với thời gian vận hành kéo dài, thí nghiệm được tiến hành theo từng mẻ 120 phút, với tổng thời gian thí nghiệm là 700 giờ và các điều kiện thí nghiệm như trình bày trong **Bảng 2.2**. Cụ thể, sau 120 phút vận hành liên tục, tiến hành ghi nhận giá trị khối lượng của dụng cụ chứa dung dịch lõi cuốn và độ mặn của dung dịch dòng cần xử lý nhằm theo dõi sự thay đổi của những thông số này theo thời gian. Tiếp theo, tiến hành tắt bơm và thay thế dụng cụ chứa dung dịch dòng cần xử lý cũng như dụng cụ chứa dung dịch lõi cuốn bằng những dụng cụ chứa mới, rồi thực hiện lặp lại quy trình thí nghiệm như đã trình bày mà không cần trải qua bước rửa hệ thống thực nghiệm.

Quy trình thí nghiệm trên được tiến hành lặp lại khoảng 4 – 5 lần mỗi ngày, 6 ngày mỗi tuần, sao cho tổng thời gian thực hiện thí nghiệm tương đương 700 giờ. Dung dịch dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn trong các thí nghiệm có thể được chuẩn bị bằng cách phân tán chất tan tương ứng vào thể tích phù hợp nước de-ion, hoặc được chuẩn bị trên cơ sở hoàn nguyên những dung dịch hình thành từ quá trình vận hành hệ thống màng FO (dung dịch dòng cần xử lý bị cô đặc được bổ sung thêm nước de-ion để pha loãng về nồng độ ban đầu, còn dung dịch lõi cuốn được hoàn nguyên về nồng độ ban đầu bằng hệ thống màng NF). Trong trường hợp các dung dịch được hoàn nguyên, cần tiến hành phân tích nhằm đảm bảo tính chất của

dung dịch không bị thay đổi đáng kể do sự chuyển khối của các chất tan qua màng bán thấm (hiện tượng chất tan thẩm thấu ngược qua màng). Nhìn chung, các dung dịch dùng trong nghiên cứu này sẽ được hoàn toàn thải bỏ sau tối đa năm lần sử dụng.

Bảng 2.2. Thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn

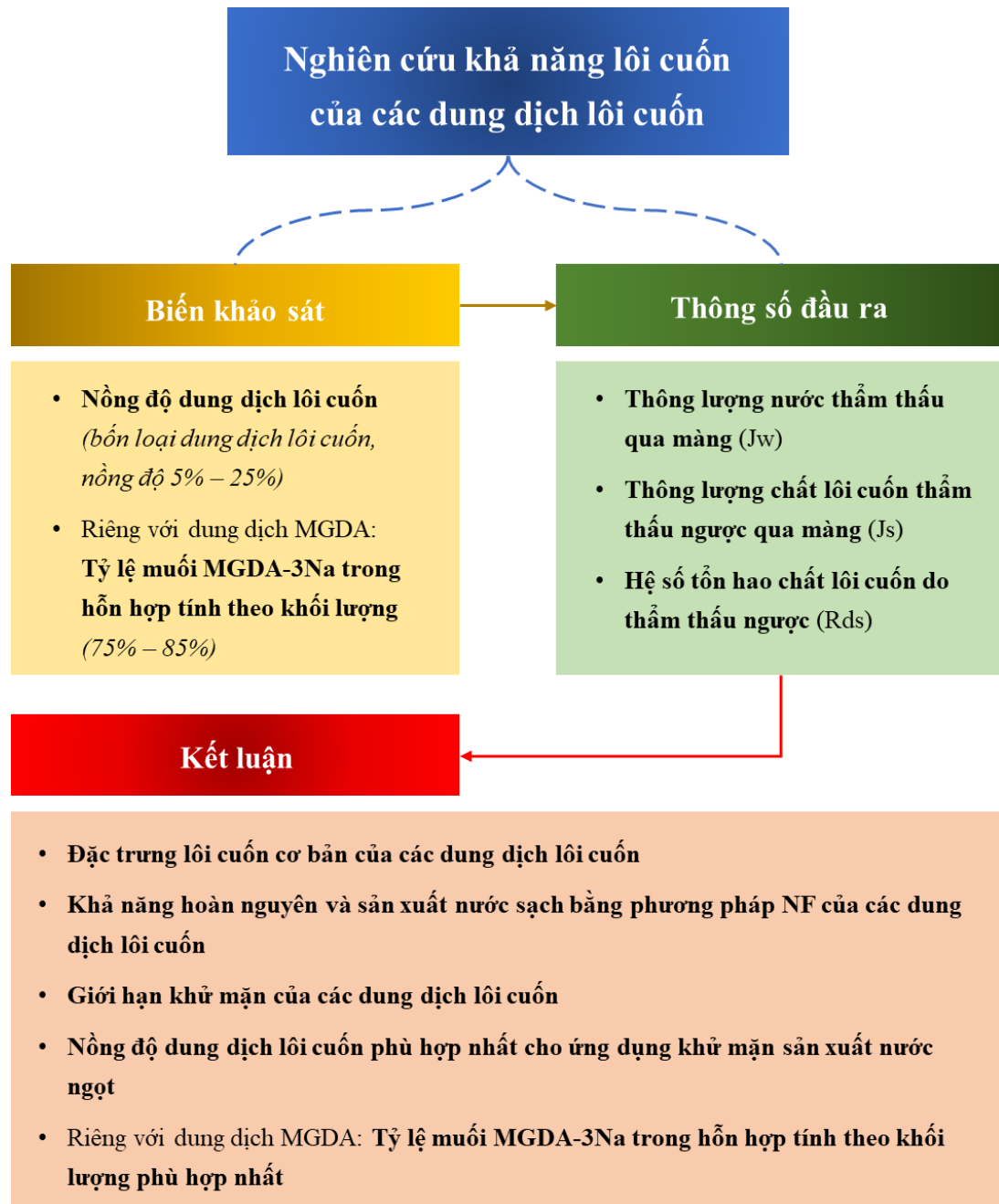
Thông số vận hành	Giá trị
Dung dịch ban đầu: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lõi cuộn	NaCl 10% MGDA 25%, hoặc MAL 20%, hoặc PVP 20%
Lưu lượng dòng vào: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lõi cuộn	250 mL/phút Điều chỉnh theo chênh lệch áp suất
Thông số điều kiện vận hành khác: • Nhiệt độ • Hướng tương đối của dòng vào • Chênh lệch áp suất • Thời gian thí nghiệm	30 °C Ngược chiều 0,2 bar (phía dòng cần xử lý) 120 phút (mỗi thí nghiệm lặp lại) 700 giờ (tổng toàn bộ các thí nghiệm)

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

Trong khuôn khổ Luận án này, sáu nội dung nghiên cứu đã được thực hiện, với các thông tin chung về thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận được thể hiện tóm lược trong **Hình 2.3 – Hình 2.8**.



Hình 2.3. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu đặc trưng thẩm thấu của màng bán thấm



Hình 2.4. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu khả năng lồi cuốn của một số loại dung dịch lồi cuốn



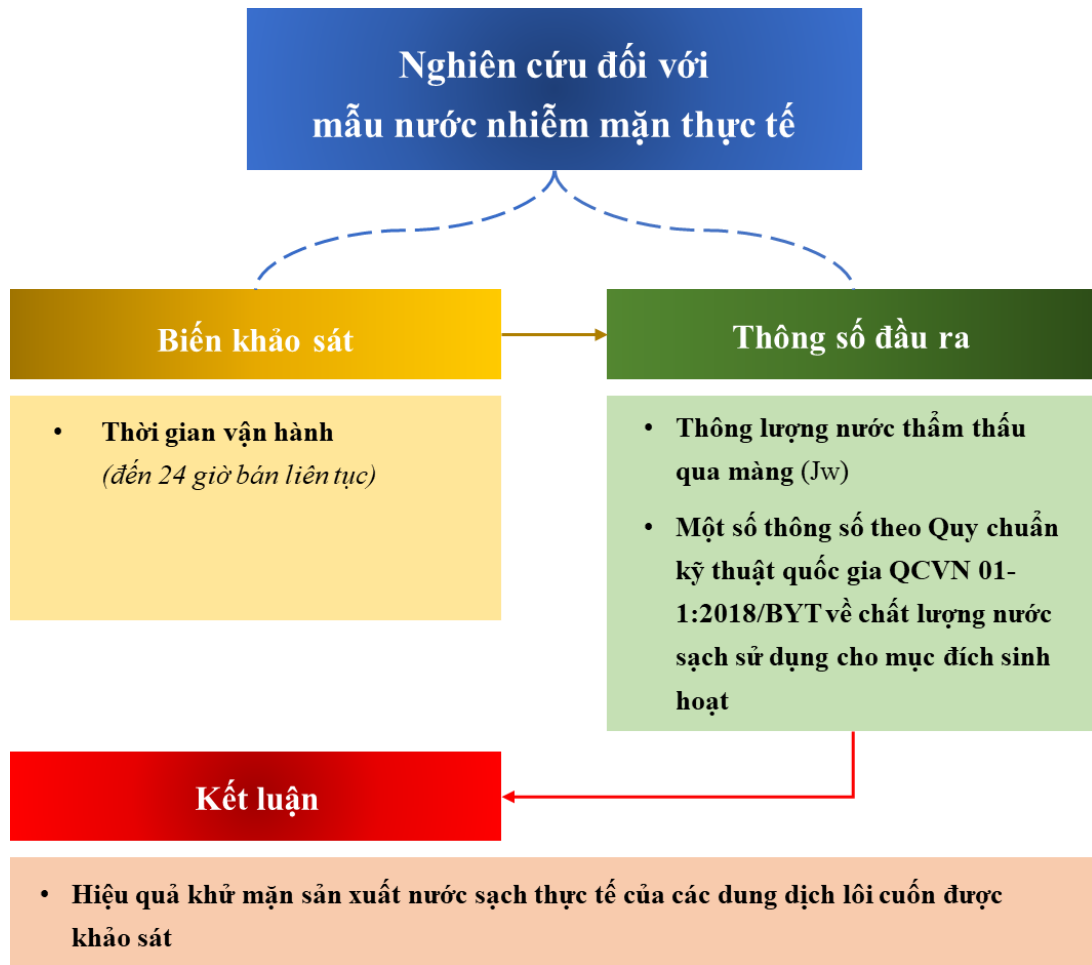
Hình 2.5. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành khác lên đặc trưng lồi cuộn của các dung dịch lồi cuộn



Hình 2.6. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO



Hình 2.7. Các thông số biến khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên đặc trưng lõi cuốn của các dung dịch lõi cuốn và hiệu quả của phương pháp làm sạch màng



Hình 2.8. Các thông số biên khảo sát, thông số đầu ra, và nội dung kết luận của hệ thí nghiệm nghiên cứu hiệu quả vận hành trên mẫu nước nhiễm mặn thực tế của các dung dịch lõi cuộn

2.2.4.1. Nghiên cứu đặc trưng thẩm thấu của màng bán thấm

Thí nghiệm nghiên cứu đặc trưng thẩm thấu của màng bán thấm được thực hiện nhằm đảm bảo tính chính xác, tính tin cậy, và khả năng tái lập của các kết quả nghiên cứu sử dụng màng bán thấm được lựa chọn (màng TFC do hãng Aquaporin cung cấp), thông qua so sánh kết quả thu được tại những thời điểm khác nhau và với thông tin công bố chất lượng do nhà sản xuất cung cấp [68]. Các điều kiện thí nghiệm cụ thể được trình bày trong **Bảng 2.3**. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong **Hình 3.1** và **Hình 3.2**.

Bảng 2.3. Các thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu đặc trưng thẩm thấu của màng bán thấm

Thông số vận hành	Giá trị
Dung dịch ban đầu: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lõi cuộn	Nước de-ion NaCl 10‰ – 60‰
Lưu lượng dòng vào: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lõi cuộn	200 mL/phút 230 mL/phút
Thông số điều kiện vận hành khác: • Nhiệt độ • Hướng tương đối của dòng vào • Chênh lệch áp suất • Thời gian thí nghiệm	30 °C Ngược chiều 0,2 bar (phía dòng cần xử lý) 150 phút

2.2.4.2. Nghiên cứu đặc trưng lõi cuộn của một số loại dung dịch lõi cuộn

Thí nghiệm nghiên cứu đặc trưng lõi cuộn của một số loại dung dịch lõi cuộn đã được thực hiện nhằm xác định một số tính chất lõi cuộn cơ bản (bao gồm: thông lượng J_w , thông lượng J_s , và hệ số tổn hao R_{ds}) của ba loại dung dịch lõi cuộn được lựa chọn (bao gồm: dung dịch MAL, dung dịch PVP, và dung dịch MGDA), cũng như so sánh với một loại dung dịch lõi cuộn tương tự khác (dung dịch CA-3Na). Các điều kiện thí nghiệm cụ thể được trình bày trong **Bảng 2.4**. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong **Hình 3.4** – **Hình 3.18**.

Bảng 2.4. Thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu đặc trưng lõi cuộn của một số loại dung dịch lõi cuộn

Thông số vận hành	Giá trị
Dung dịch ban đầu: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lõi cuộn	Nước de-ion, hoặc NaCl 2‰ – 25‰ Các dung dịch nồng độ 5% – 25%: MAL, hoặc PVP, hoặc CA-3Na, hoặc MGDA (tỷ lệ MGDA-3Na theo khối lượng 75% – 85%)
Lưu lượng dòng vào: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lõi cuộn	200 mL/phút 230 mL/phút
Thông số điều kiện vận hành khác: • Nhiệt độ • Hướng tương đối của dòng vào • Chênh lệch áp suất • Thời gian thí nghiệm	30 °C Ngược chiều 0,2 bar (phía dòng cần xử lý) 150 phút
Thông số điều kiện hoàn nguyên NF: • Áp suất dòng vào • Tỷ lệ dòng thải	10 bar 90%

2.2.4.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành khác lên đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn

Như đã trình bày, bên cạnh yếu tố quan trọng nhất là loại và nồng độ chất lõi cuộn trong dung dịch lõi cuộn, thì các thông số vận hành khác như loại màng bán thấm được sử dụng, thời gian vận hành, lưu lượng và hướng dòng vào, chênh lệch áp suất và nhiệt độ dòng vào (cả dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuộn)... cũng có thể ảnh hưởng tới đặc trưng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn. Bởi vậy, thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành khác lên đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn đã được thực hiện nhằm xác định khoảng điều kiện vận hành phù hợp cho từng loại dung dịch lõi cuộn, cũng như đánh giá tính phù hợp của những dung dịch lõi cuộn tiềm năng này trong điều kiện ứng dụng thực tiễn.

Thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố điều kiện vận hành khác (bao gồm: chênh lệch áp suất dòng vào, nhiệt độ dòng vào, lưu lượng dòng vào) lên

đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn được thực hiện với những thông số kỹ thuật chủ yếu như trình bày trong **Bảng 2.5**. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong **Hình 3.22 – Hình 3.30**.

Bảng 2.5. Thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố điều kiện vận hành khác lên đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn

Thông số vận hành	Giá trị
Dung dịch ban đầu: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lõi cuộn	Nước de-ion, hoặc NaCl 10% MGDA 25%, hoặc MAL 20%, hoặc PVP 20%
Lưu lượng dòng vào: • Phía dòng cần xử lý ❖ Thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng ❖ Thí nghiệm khảo sát khác • Phía dung dịch lõi cuộn	100 – 650 mL/phút 200 mL/phút Điều chỉnh theo chênh lệch áp suất
Thông số điều kiện vận hành khác: • Nhiệt độ ❖ Thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng ❖ Thí nghiệm khảo sát khác • Hướng tương đối của dòng vào • Chênh lệch áp suất ❖ Thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng ❖ Thí nghiệm khảo sát khác • Thời gian thí nghiệm	10 – 40 °C 30 °C Ngược chiều 0 – 0,8 bar (theo cả hai phía) 0,2 bar (phía dòng cần xử lý) 150 phút
Thông số điều kiện hoàn nguyên NF: • Áp suất dòng vào • Tỷ lệ dòng thải	10 bar 90%

2.2.4.4. Nghiên cứu tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO

Trong khuôn khổ Luận án này, ảnh hưởng của chênh lệch áp suất dòng vào, lưu lượng dòng vào, và nhiệt độ vận hành lên hiệu quả lõi cuộn của ba loại dung dịch lõi cuộn MAL 20%, PVP 20%, MGDA 25% đã được khảo sát. Nhằm đánh giá

một cách chính xác hơn ảnh hưởng của những yếu tố này lên hiệu quả lôi cuốn của ba loại dung dịch lôi cuốn, phương pháp thiết kế mô hình thí nghiệm Box–Behnken và phương pháp phân tích bề mặt đáp ứng đã được áp dụng trên ba đối tượng biến số (bao gồm: chênh lệch áp suất dòng vào, lưu lượng dòng vào, và nhiệt độ vận hành lên hiệu quả lôi cuốn) cùng hai đối tượng kết quả đánh giá (bao gồm: thông lượng J_w và hệ số tổn hao R_{ds}).

Các thông số cụ thể của mô hình thí nghiệm Box–Behnken trong khuôn khổ Luận án này được trình bày cụ thể trong **Bảng 2.6** và **Bảng 2.7**. Nhìn chung, tổng cộng 17 thí nghiệm đã được thực hiện cho mỗi loại dung dịch lôi cuốn, với dòng cần xử lý là nước de-ion và thời gian vận hành 150 phút. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong **Bảng 3.1**, **Bảng 3.6**, và **Bảng 3.11**.

2.2.4.5. Nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên đặc trưng lôi cuốn của các dung dịch lôi cuốn và hiệu quả của phương pháp làm sạch màng

Trong khuôn khổ Luận án này, nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên đặc trưng lôi cuốn của các dung dịch lôi cuốn đã được thực hiện với các thông số kỹ thuật chủ yếu như trình bày trong **Bảng 2.2**. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong **Hình 3.37 – Hình 3.43**.

Bảng 2.6. Thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO khử mặn

Thông số vận hành	Giá trị
Dung dịch ban đầu: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lôi cuốn	Nước de-ion MGDA 25%, hoặc MAL 20%, hoặc PVP 20%
Lưu lượng dòng vào: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lôi cuốn	Tham khảo Bảng 2.7 Điều chỉnh theo chênh lệch áp suất
Thông số điều kiện vận hành khác: • Nhiệt độ • Hướng tương đối của dòng vào • Chênh lệch áp suất • Thời gian thí nghiệm	Tham khảo Bảng 2.7 Ngược chiều Tham khảo Bảng 2.7 150 phút

Bảng 2.7. Các thông số cụ thể của mô hình thí nghiệm Box–Behnken

Biến số (variables)	Ký hiệu (factors)	Ngưỡng khảo sát (levels)		
		Thấp (−1)	Trung bình (0)	Cao (+1)
Dung dịch lõi cuộn MAL 20% và Dung dịch lõi cuộn PVP 20%				
Chênh lệch áp suất dòng vào (bar)	X1	0,0	0,2	0,4
Nhiệt độ vận hành (°C)	X2	20	30	40
Lưu lượng dòng vào (mL)	X3	200	250	300
Dung dịch lõi cuộn MGDA 25%				
Chênh lệch áp suất dòng vào (bar)	X1	0,0	0,2	0,4
Nhiệt độ vận hành (°C)	X2	20	30	40
Lưu lượng dòng vào (mL/phút)	X3	250	300	350

2.2.4.6. Nghiên cứu hiệu quả vận hành trên mẫu nước nhiễm mặn thực tế của các dung dịch lõi cuộn

Trong khuôn khổ Luận án này, bên cạnh các nghiên cứu trên đối tượng dòng cần xử lý là mẫu nước mặn mô phỏng, một số thí nghiệm cũng đã được thực hiện trên đối tượng là mẫu nước nhiễm mặn thực tế (đã qua tiền xử lý nhằm loại bỏ thành phần chất rắn không hoà tan có kích thước $\geq 5 \mu\text{m}$). Nghiên cứu được thực hiện với các thông số kỹ thuật chủ yếu như trình bày trong **Bảng 2.8**. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong **Hình 3.44** và **Bảng 3.16**.

Bảng 2.8. Thông số điều kiện vận hành chung cho hệ thí nghiệm nghiên cứu hiệu quả vận hành trên mẫu nước nhiễm mặn thực tế

Thông số vận hành	Giá trị
Dung dịch ban đầu: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lõi cuộn	Mẫu nước nhiễm mặn thực tế (độ mặn khoảng 10‰) MGDA 25%, hoặc MAL 20%, hoặc PVP 20%
Lưu lượng dòng vào: • Phía dòng cần xử lý • Phía dung dịch lõi cuộn	250 mL/phút Điều chỉnh theo chênh lệch áp suất
Thông số điều kiện vận hành khác: • Nhiệt độ • Hướng tương đối của dòng vào • Chênh lệch áp suất • Thời gian thí nghiệm	30 °C Ngược chiều 0,4 bar (phía dòng cần xử lý) 120 phút (mỗi thí nghiệm lặp lại) 24 giờ (tổng toàn bộ các thí nghiệm)
Thông số điều kiện hoàn nguyên NF: • Áp suất dòng vào • Tỷ lệ dòng thải	10 bar 90%

2.2.5. Phương pháp tính toán và xử lý số liệu

Hiệu quả lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn được đánh giá dựa trên ba thông số chính, bao gồm thông lượng J_w , thông lượng J_s , và hệ số tổn hao R_{ds} của hệ thống màng FO. Các thông số trên được tính toán dựa trên kết quả thí nghiệm thực tế trên hệ thống lọc quy mô phòng thí nghiệm, cụ thể như sau [222]:

$$J_w = \frac{m_0 - m_t}{A \times t \times \rho} \quad \text{(Phương trình 4)}$$

trong đó:

- J_w – Thông lượng nước lõi cuộn qua màng trung bình tại thời điểm lấy mẫu t (đơn vị: LMH), giả định ảnh hưởng của hiện tượng thẩm thấu ngược chất tan qua màng bán thấm lên thể tích và khối lượng các dung dịch là không đáng kể
- m_0 – Khối lượng ban đầu của dụng cụ chứa dung dịch cần xử lý (đơn vị: g)
- m_t – Khối lượng của dụng cụ chứa dung dịch cần xử lý tại thời điểm lấy

mẫu t (đơn vị: g)

- t – Thời gian vận hành của hệ thống tính đến thời điểm lấy mẫu (đơn vị: h)
- A – Diện tích hoạt động của màng FO, xác định = 0,0042 m²
- ρ – Khối lượng riêng của nước, xác định = 0,001 g/L

$$J_s = \frac{C_t \times (V_0 - J_w \times t \times A)}{t \times A} \quad \text{(Phương trình 5)}$$

trong đó:

- J_s – Thông lượng chất lồi cuốn thấm thấu ngược qua màng trung bình tại thời điểm lấy mẫu t (đơn vị: GMH), áp dụng riêng cho khi dòng cần xử lý là nước de-ion

- C_t – Hàm lượng muối của dòng cần xử lý tại thời điểm lấy mẫu t (g/L)
- V_0 – Thể tích ban đầu của dòng cần xử lý (L)
- J_w – Thông lượng nước lồi cuốn qua màng trung bình tại thời điểm lấy mẫu t (đơn vị: LMH)
- A – Diện tích hoạt động của màng FO, xác định = 0,0042 m²
- t – Thời gian vận hành của hệ thống tính đến thời điểm lấy mẫu (đơn vị: h)

$$R_{ds} = \frac{J_s}{J_w} \quad \text{(Phương trình 6)}$$

trong đó:

- R_{ds} – Hệ số tổn hao chất lồi cuốn của hệ thống màng FO (đơn vị: g/L nước sạch)
- J_w – Giá trị thông lượng nước lồi cuốn qua màng trung bình được sử dụng để tính toán (đơn vị: LMH)
- J_s – Giá trị thông lượng chất lồi cuốn thấm thấu ngược qua màng trung bình được sử dụng để tính toán (đơn vị: GMH), xác định khi dòng cần xử lý là nước de-ion

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%. Trong trường hợp tiến hành thí nghiệm lặp lại, kết quả sẽ được trình bày theo định dạng Giá trị trung bình $\pm$ Độ lệch chuẩn, hoặc dưới dạng Giá trị trung bình và thanh sai số đại diện cho Độ lệch chuẩn trên đồ thị.

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 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

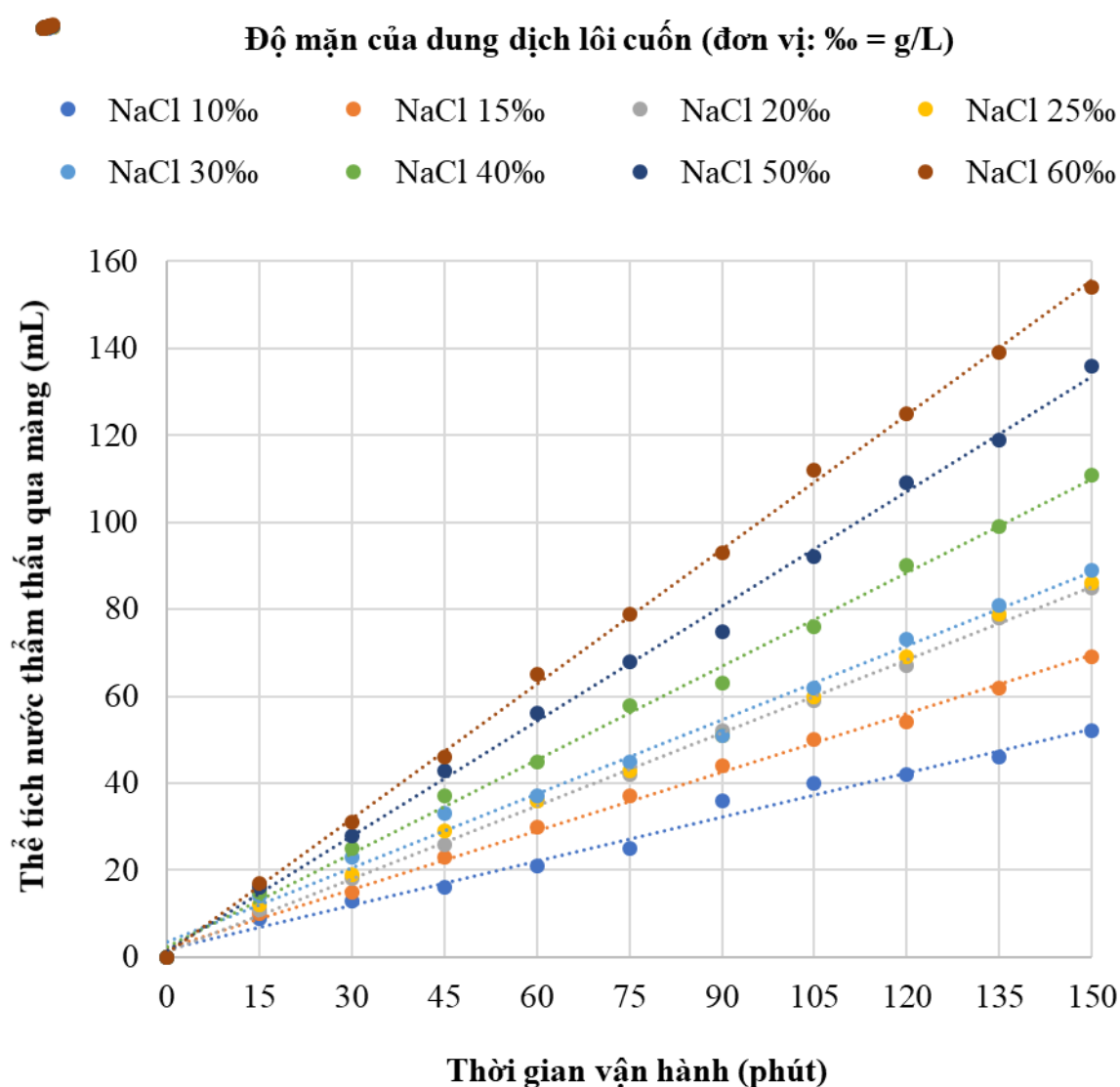
Khả năng thẩm thấu của màng FO được đánh giá thông qua tiến hành một số thí nghiệm trên hệ thống màng FO theo quy trình đã mô tả trong **Mục 2.2.3.2**, với dung dịch dòng cần xử lý là nước de-ion, và dung dịch lõi cuốn là dung dịch muối mô phỏng tại các nồng độ khác nhau. Giá trị thông lượng J_w và thông lượng J_s được so sánh với các giá trị do nhà sản xuất cung cấp, nhằm đánh giá ảnh hưởng của quá trình bảo quản lên tính chất chọn lọc thẩm thấu của màng FO.

Ảnh hưởng của quá trình vận hành kéo dài lên cấu trúc bề mặt của màng FO 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 thí nghiệm ngay sau khi thí nghiệm 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.

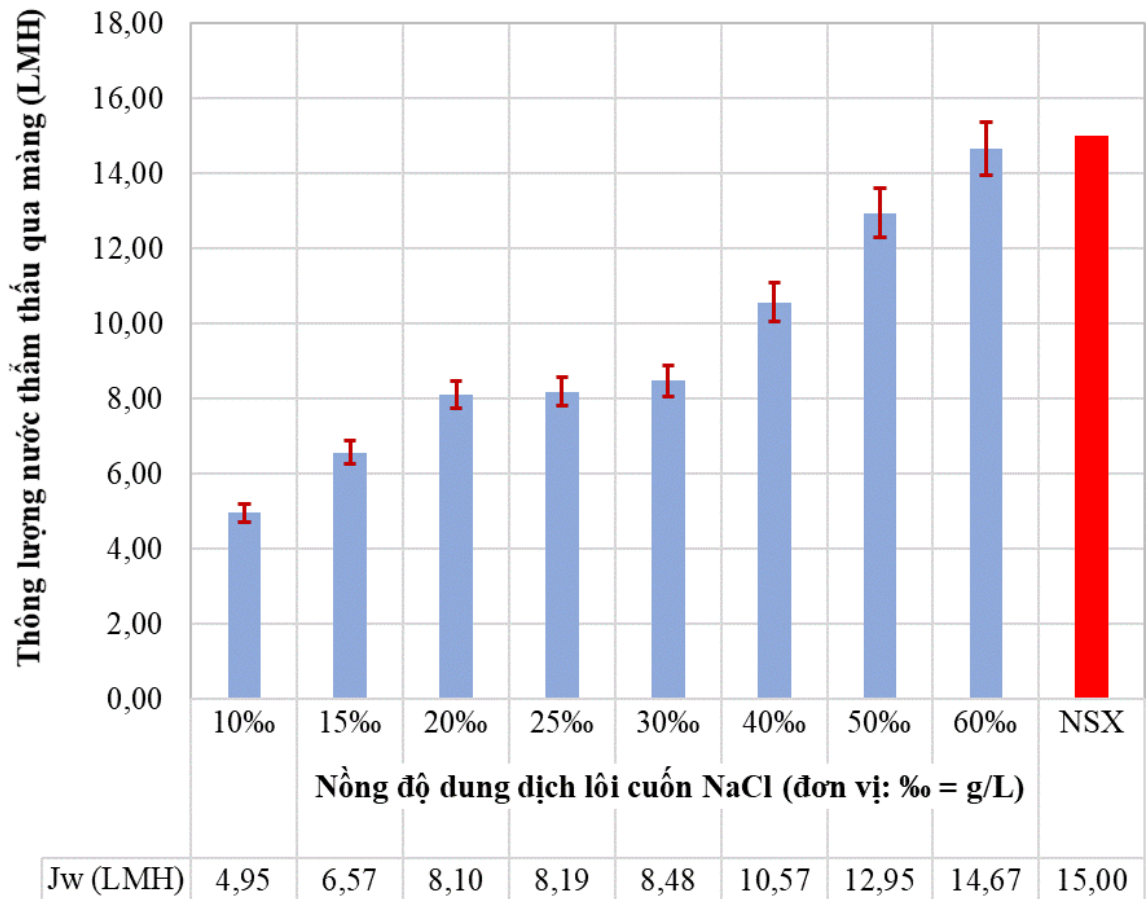
CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. ĐẶC TRƯNG THẨM THẤU CỦA MÀNG BÁN THẤM

Dựa vào **Hình 3.1** và **Hình 3.2**, có thể thấy được rằng không tồn tại khác biệt đáng kể giữa kết quả thí nghiệm thu được trong khuôn khổ Luận án này, và những kết quả thí nghiệm được thực hiện trong một số nghiên cứu trước đó trên cùng đối tượng màng bán thấm [68]. Điều này cho thấy màng TFC được lựa chọn sử dụng trong khuôn khổ Luận án này sở hữu tính ổn định cao, đồng thời cho phép so sánh những kết quả thu được từ nghiên cứu này với kết quả đánh giá khả năng lôi cuốn của một số chất lôi cuốn khác từng được công bố.



Hình 3.1. Thể tích nước thẩm thấu qua màng khi sử dụng dung dịch lôi cuốn với nồng độ NaCl thay đổi trong khoảng 10 – 60 ‰



Hình 3.2. Thông lượng Jw khi sử dụng dung dịch lồi cuộn với nồng độ NaCl thay đổi trong khoảng 10‰ – 60‰

Cụ thể, kết quả nghiên cứu thể hiện trên **Hình 3.1** cho thấy, 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 lồi cuộn NaCl. Điều này chứng minh được rằng hệ thống thí 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 lồi cuộn của dung dịch lồi cuộn. Nói cách khác, hiện tượng pha loãng dung dịch lồi cuộn gây ra bởi sự thẩm thấu của nước qua màng bán thấm đã không tạo thành ảnh hưởng đáng kể đến các kết quả thí nghiệm 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, kết quả nghiên cứu trên **Hình 3.2** cho thấy khi nồng độ dung dịch lồi cuộn NaCl tăng lên trong khoảng 20‰ – 30‰ thì không tồn tại khác biệt thống kê giữa các giá trị thông lượng Jw thu được. Nguyên nhân dẫn tới hiện tượng 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 lôi cuốn tạo thành. Điều này khiến cho mức độ gia tăng hiệu quả lôi cuốn chung của dung dịch lôi cuốn khi tăng nồng độ dung dịch lôi cuốn trở nên không đáng kể, một “khoảng chững” về mặt giá trị thông lượng J_w [80].

Tuy nhiên, do dung dịch dòng cần xử lý được sử dụng trong khuôn khổ nghiên cứu này là nước de-ion, nên hiện tượng phân cực nồng độ chỉ chủ yếu xảy ra tại phía dung dịch lôi cuốn. 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 lôi cuốn. Bởi vậy, khi nồng độ dung dịch lôi cuốn 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 lôi cuốn tạo thành, dẫn tới kết quả thông lượng J_w tiếp tục tăng khi tăng nồng độ dung dịch lôi cuốn.

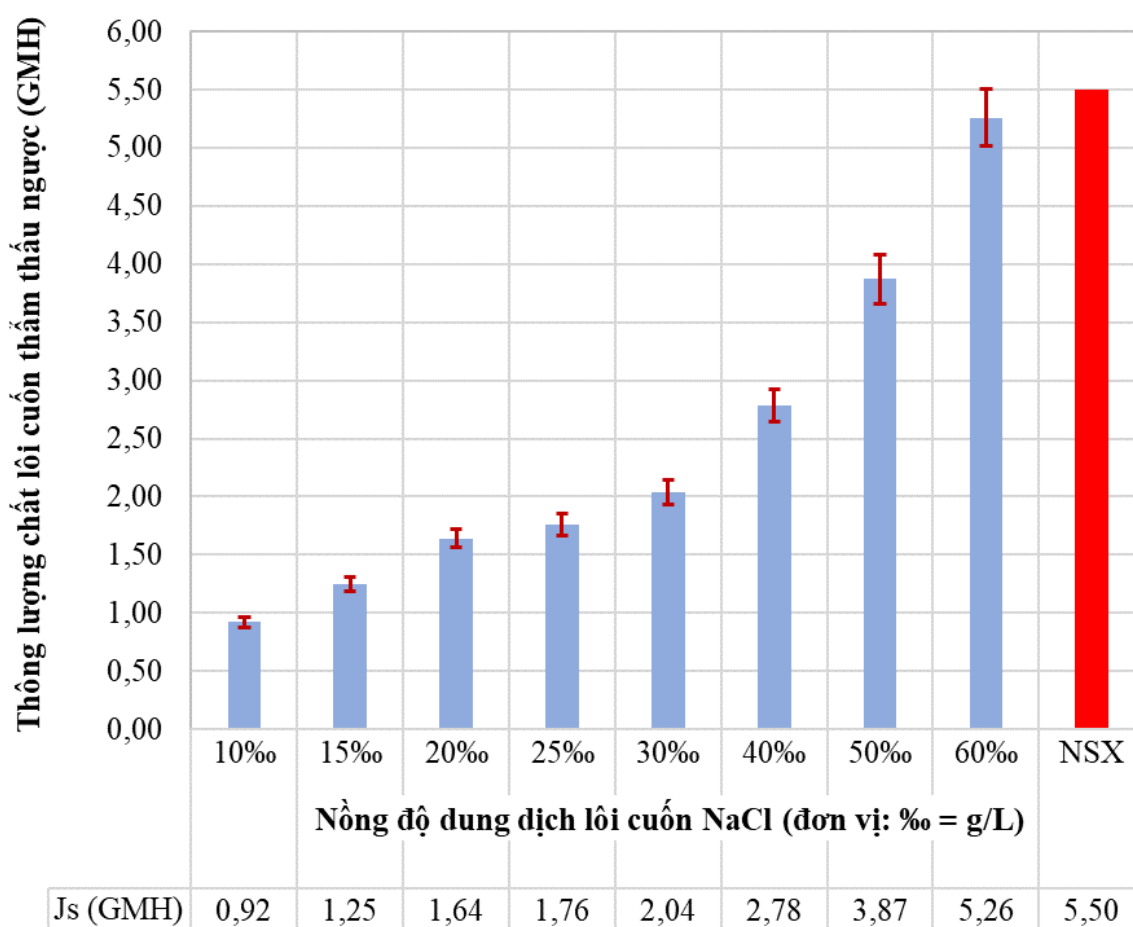
Bên cạnh đó, cũng có thể thấy được rằng thể tích nước thẩm thấu qua màng sau mỗi khoảng thời gian (cụ thể là sau mỗi 15 phút) không phải là một giá trị ổn định, mà xuất hiện sự dao động nhất định xung quanh đường giá trị trung bình dạng tuyến tính. Nhiều yếu tố khác nhau có thể dẫn tới hiện tượng trên, tuy nhiên chủ yếu nhất là do những thay đổi liên tục về mặt nồng độ dung dịch lôi cuốn trong suốt quá trình vận hành, cũng như những thay đổi về mặt chế độ dòng bên trong modul thí nghiệm gây ra bởi thiết kế đường dẫn dòng vào của modul thí 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 lôi cuốn tương đương (dung dịch NaCl nồng độ 60%, tương đương 1 mol/L) chỉ khoảng 2,2%.

Một yếu tố đáng quan tâm khác của quá trình màng FO là thông lượng J_s , với kết quả thí nghiệm được trình bày trong **Hình 3.3**. Cụ thể, khi tăng nồng độ dung dịch lôi cuốn NaCl từ 10% lên 60% thì thông lượng J_s cũng sẽ tăng lên, đặc biệt là sau ngưỡng nồng độ NaCl 30%. Điều này có thể giải thích là do cả dung môi nước và các chất tan khác trong dung dịch đều có xu hướng di chuyển từ nơi có nồng độ cao hơn về nơi có nồng độ thấp hơn. Bởi vậy, trong quá trình vận hành, bên cạnh

dòng nước thẩm thấu xuôi từ dung dịch dòng cần xử lý sang dung dịch lõi cuộn, thì cũng sẽ tồn tại dòng chất lõi cuộn thẩm thấu ngược từ dung dịch lõi cuộn sang dung dịch dòng cần xử lý, đồng thời thông lượng thẩm thấu ngược này sẽ tăng dần theo nồng độ ban đầu của dung dịch lõi cuộn. Đặc biệt, khi chất lõi cuộn có khối lượng phân tử thấp hoặc có khả năng phân ly thành các ion với kích thước tương đối nhỏ, thì hiện tượng thẩm thấu ngược của chất lõi cuộn xảy ra càng nghiêm trọng.

Sự tăng mạnh của thông lượng dòng thẩm thấu ngược sau ngưỡng nồng độ dung dịch lõi cuộn NaCl 30‰ có thể được giải thích là do động lực thẩm thấu tự nhiên đã tăng nhanh vượt quá lực cản chọn lọc từ màng lọc, và/hoặc do nồng độ dung dịch lõi cuộn đã vượt quá ngưỡng thiết kế của màng bán thấm.



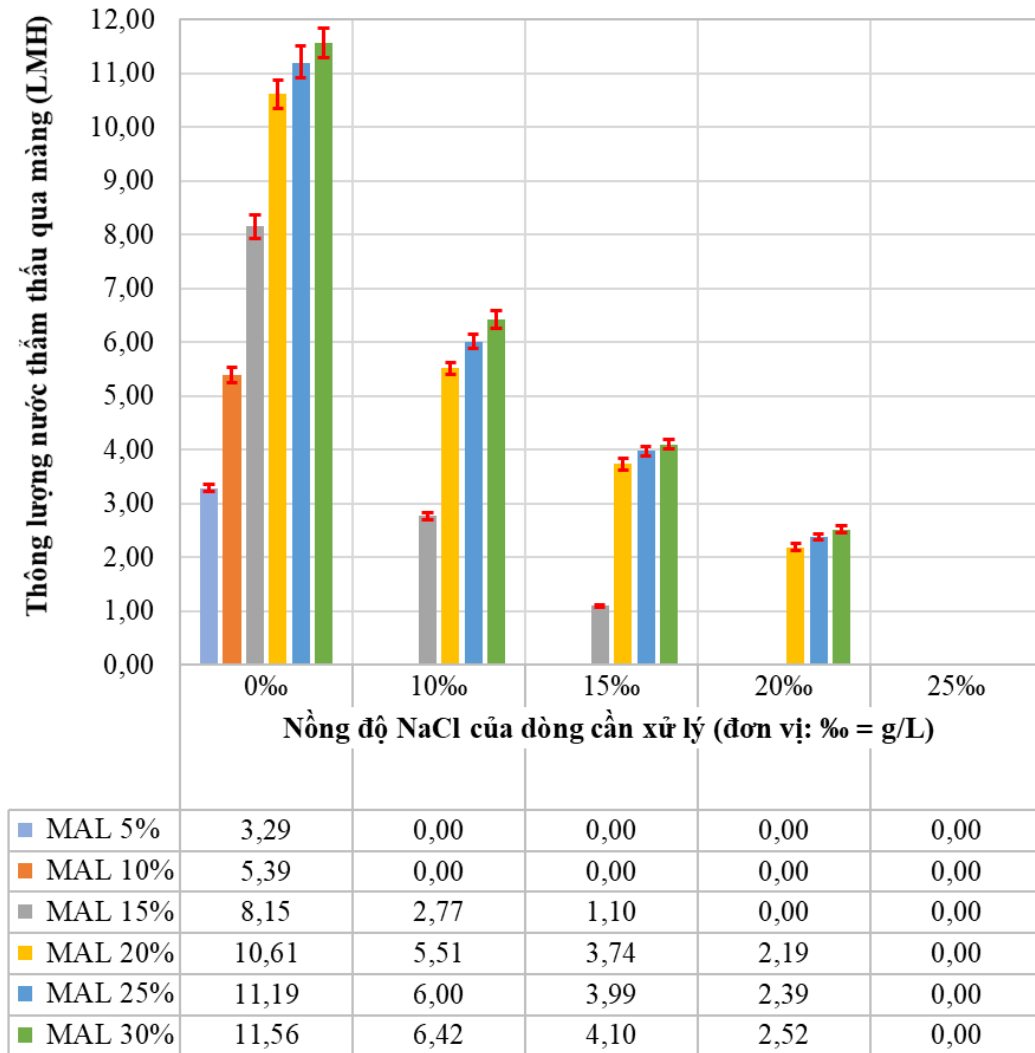
Hình 3.3. Thông lượng Js khi sử dụng dung dịch lõi cuộn với nồng độ NaCl thay đổi trong khoảng 10‰ – 60‰

3.2. KHẢ NĂNG LÔI CUỐN CỦA MỘT SỐ LOẠI DUNG DỊCH LÔI CUỐN

3.2.1. Khả năng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn MAL

Nhằm đánh giá đặc trưng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn, một số thí nghiệm màng thẩm thấu xuôi kết hợp hoàn nguyên bằng màng NF đã được tiến hành với

các điều kiện vận hành chung như trình bày trong **Bảng 2.4**, và nồng độ của dung dịch lồi cuộn MAL thay đổi trong khoảng 5% – 30%. Kết quả nghiên cứu được trình bày cụ thể trong **Hình 3.4** và **Hình 3.5**.



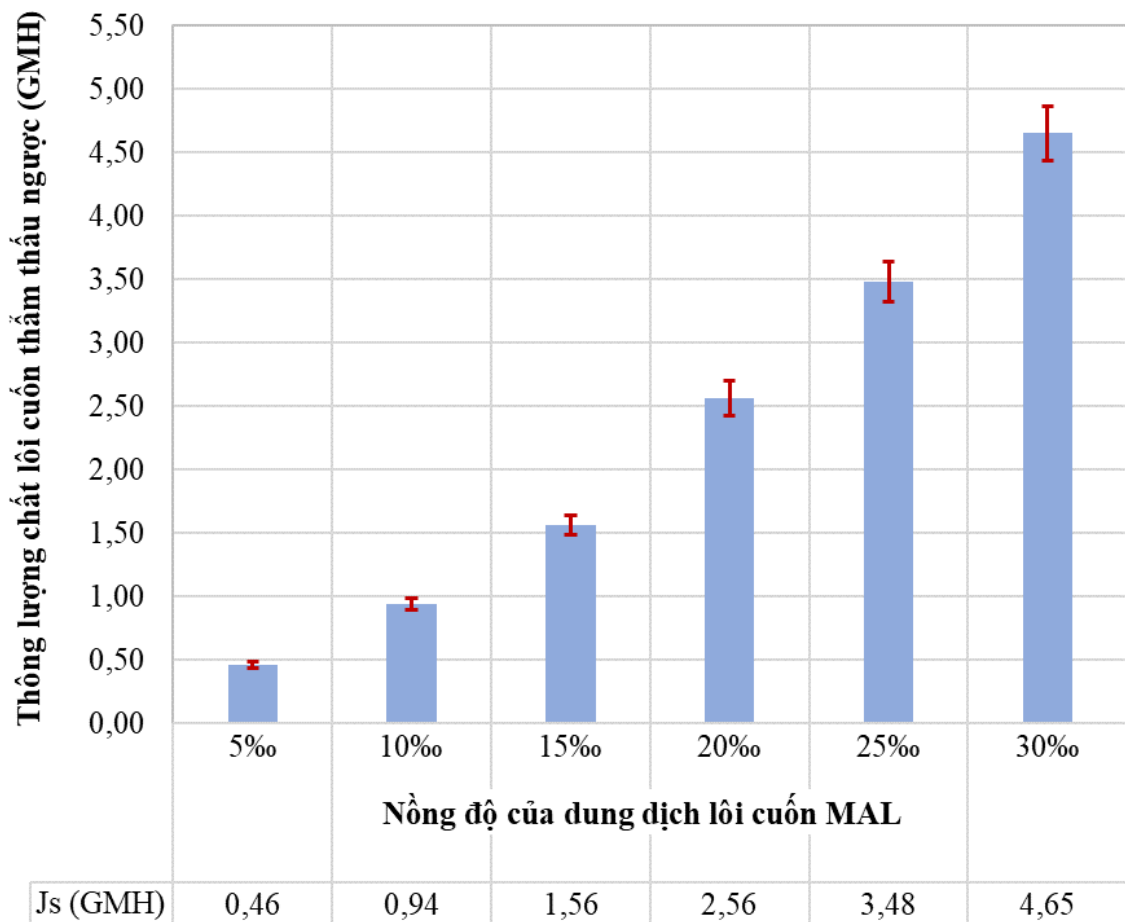
Hình 3.4. Đặc trưng thông lượng J_w của dung dịch lồi cuộn MAL tại những nồng độ dung dịch lồi cuộn và độ mặn dòng cần xử lý khác nhau

* giá trị $J_w = 0,00$ LMH thể hiện không tồn tại dòng thẩm thấu sang phía dung dịch lồi cuộn

Nhìn chung, có thể thấy rằng kết quả nghiên cứu thu được là khá tương đồng với một số kết quả liên quan đã công bố trước đó [66]. Cụ thể, xét về khía cạnh thông lượng J_w (**Hình 3.4**), dung dịch MAL cho giá trị cao nhất là 11,56 LMH tại điều kiện dòng cần xử lý là nước de-ion và dung dịch lồi cuộn có nồng độ 30%. Tuy nhiên, giá trị thông lượng J_w chỉ tăng đáng kể khi nồng độ dung dịch lồi cuộn MAL tăng từ 10% đến 20%, 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 ngưỡng nồng độ MAL 20% 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 cuốn.

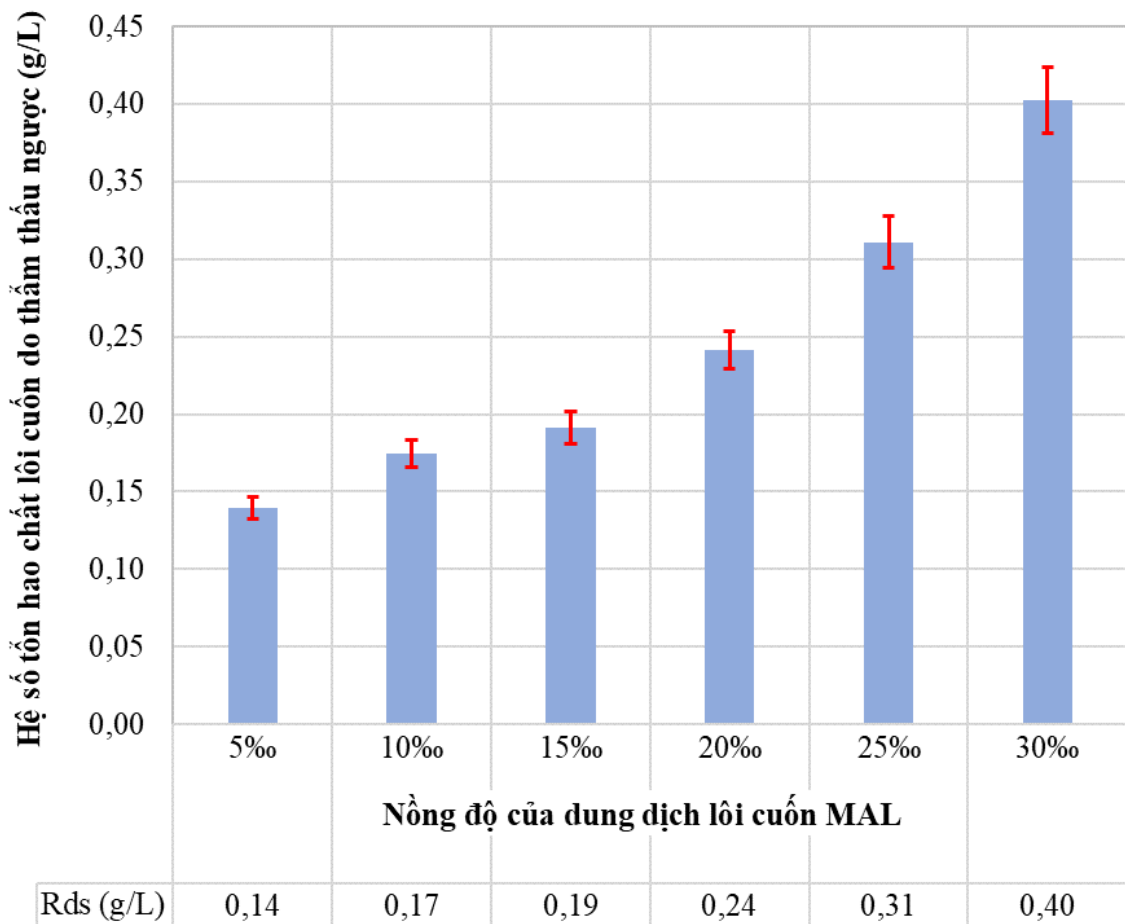
Bên cạnh đó, khi độ mặn của dòng cần xử lý tăng lên thì giá trị thông lượng J_w cũng giảm xuống, do độ chênh lệch về mặt áp suất thẩm thấu tự nhiên giữa dòng cần xử lý và dung dịch lõi cuốn giảm xuống. Đặc biệt, ngay tại ngưỡng độ mặn của dòng cần xử lý là 15‰ thì thông lượng J_w đã giảm xuống dưới 5 LMH tại mọi nồng độ dung dịch lõi cuốn, cho thấy dung dịch lõi cuốn MAL không đạt hiệu quả cao trong ứng dụng khử mặn cho nước nhiễm mặn với độ mặn quá cao. Tại ngưỡng nồng độ của dung dịch lõi cuốn MAL là 30‰ và độ mặn của dòng cần xử lý là 10‰, giá trị thông lượng J_w trung bình sau 150 phút vận hành có thể đạt đến 6,42 LMH.



Hình 3.5. Thông lượng J_s của dung dịch lõi cuốn MAL tại các nồng độ dung dịch lõi cuốn khác nhau

Đáng chú ý, có thể thấy ngay tại ngưỡng nồng độ lên đến 30‰ thì dung dịch lõi cuốn MAL cũng thể hiện giá trị thông lượng J_s khá thấp, đặc biệt là khi so sánh với dung dịch lõi cuốn được chuẩn bị bằng muối NaCl (**Hình 3.3** và **Hình 3.5**).

Điều này có thể giải thích là do chất lõi cuộn maltodextrin có khối lượng phân tử tương đối cao và không phân ly thành các ion với kích thước nhỏ, bởi vậy khó di chuyển qua màng bán thấm hơn so với những chất lõi cuộn có khối lượng phân tử tương đối nhỏ và dễ phân ly thành các ion với kích thước nhỏ như muối NaCl. Dầu vậy, khi nồng độ của dung dịch lõi cuộn tăng lên thì thông lượng Js cũng tăng lên tương ứng, đặc biệt là sau ngưỡng nồng độ 15%.



Hình 3.6. Hệ số tổn hao Rds của dung dịch lõi cuộn MAL tại các nồng độ dung dịch lõi cuộn khác nhau

Hệ số tổn hao Rds được đánh giá dựa trên tỷ số giữa thông lượng Js và thông lượng Jw, như thể hiện trong **Hình 3.6**. Kết quả nghiên cứu cho thấy, màng TFC cho hiệu quả chọn lọc thẩm thấu đối với chất lõi cuộn maltodextrin tương đối tốt, với hệ số tổn hao Rds đạt giá trị thấp nhất khi nồng độ dung dịch lõi cuộn không vượt quá 15%, và tăng mạnh khi nồng độ dung dịch lõi cuộn tăng đến trên 15%. Nguyên nhân dẫn tới xu hướng thay đổi này có thể là do những tác động mang tính kết hợp giữa sự tăng liên tục của thông lượng Js khi nồng độ của dung dịch lõi cuộn tăng lên, và “khoảng chừng” về thông lượng Jw gây ra bởi hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ.

Từ những kết quả trên, dung dịch lõi cuộn MAL với nồng độ 20% đã được lựa chọn để sử dụng cho những thí nghiệm tiếp theo. Khi đó, độ mặn tối đa phù hợp nhất của dòng cần xử lý được xác định là 10‰, với giá trị thông lượng J_w trung bình sau 150 phút vận hành có thể đạt đến 5,51 LMH. Tại bước hoàn nguyên bằng phương pháp lọc qua màng NF áp lực thấp, nguồn nước sạch đầu ra thu được có chỉ số TDS là khoảng 350 mg/L, thấp hơn đáng kể so với ngưỡng tối đa theo hướng dẫn của WHO [223] và quy chuẩn quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT [224] đối với nước sinh hoạt là 1.000 mg/L. Mức độ tổn hao trung bình của chất lõi cuộn tại bước lọc qua màng NF được xác định là khoảng 2,46%.

3.2.2. Khả năng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn PVP

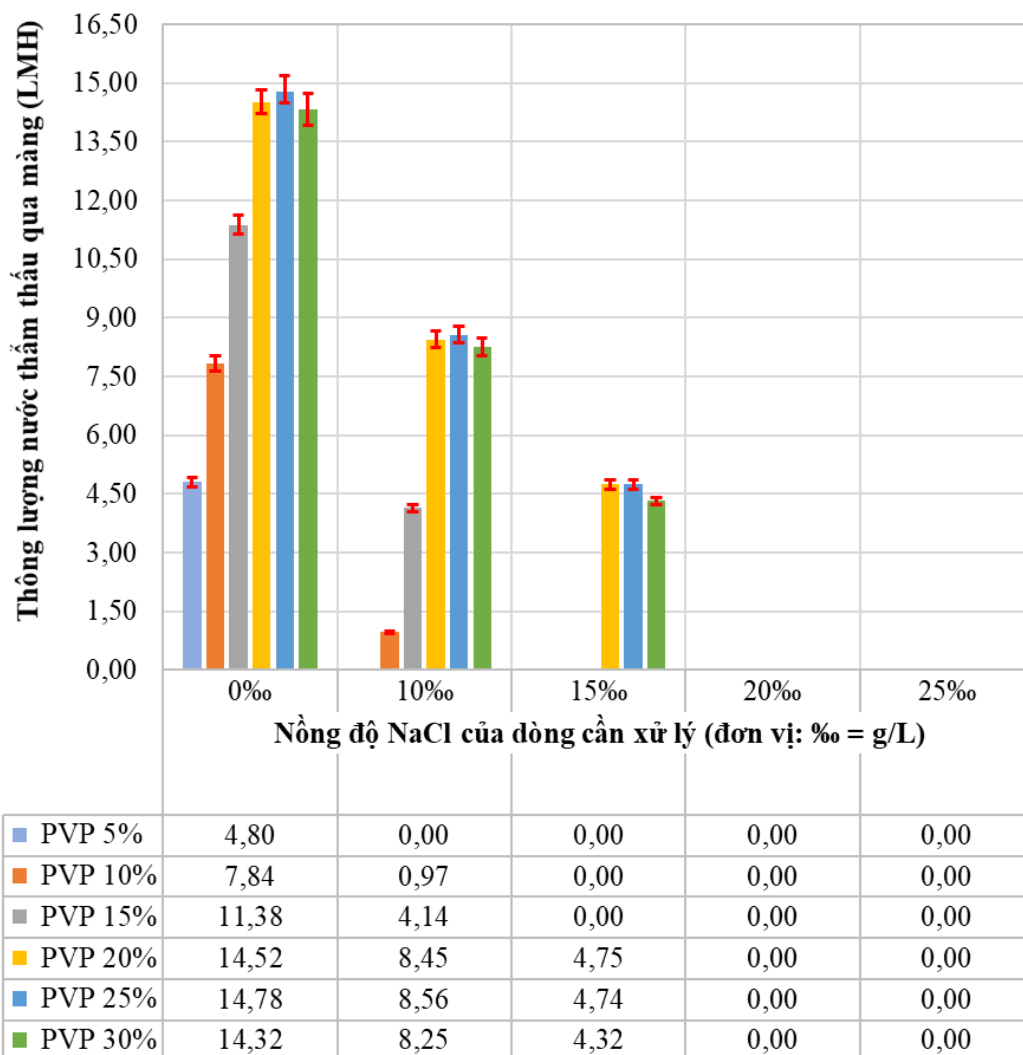
Nhằm đánh giá đặc trưng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn, một số thí nghiệm màng thẩm thấu xuôi kết hợp hoàn nguyên bằng màng NF đã được tiến hành với các điều kiện vận hành chung như trình bày trong **Bảng 2.4**, và nồng độ của dung dịch lõi cuộn PVP thay đổi trong khoảng 5% – 25%. Kết quả thí nghiệm được trình bày cụ thể trong **Hình 3.7** và **Hình 3.8**.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, nhìn chung thì các đặc trưng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn PVP là khá tương đồng so với dung dịch lõi cuộn MAL. Điều này có thể giải thích là do cả PVP và MAL đều là các hợp chất cao phân tử và không có khả năng phân ly thành những ion có kích thước nhỏ, bởi vậy một số tính chất của chúng thể hiện ra khi hoà tan trong nước là khá giống nhau, dẫn tới sự tương đồng giữa đặc trưng lõi cuộn được đánh giá trong khuôn khổ nghiên cứu của Luận án này. Dầu vậy, do sở hữu cấu trúc hoá học khác nhau, nên hai nhóm chất lõi cuộn trên cũng thể hiện một số đặc trưng lõi cuộn không hoàn toàn tương đồng.

Đáng chú ý, khả năng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn PVP là tương đối cao, đạt tới khoảng 14,78 LMH trong trường hợp dung dịch lõi cuộn được sử dụng có nồng độ 25% và dung dịch dòng cần xử lý là nước de-ion. Điều này cho thấy dung dịch PVP sở hữu khả năng lõi cuộn nước tốt hơn đáng kể so với dung dịch MAL. Tuy nhiên, tồn tại một điểm khác biệt, đó là nếu nồng độ dung dịch lõi cuộn PVP tăng vượt quá ngưỡng nhất định (trên 25%), thì thông lượng J_w lại không tiếp tục tăng lên mà thậm chí còn xuất hiện xu hướng giảm xuống. Điều này có thể giải thích là do dung dịch PVP sở hữu độ nhớt tương đối cao, gây ảnh hưởng đến chế độ dòng chảy của dung dịch lõi cuộn bên trong modul thí nghiệm.

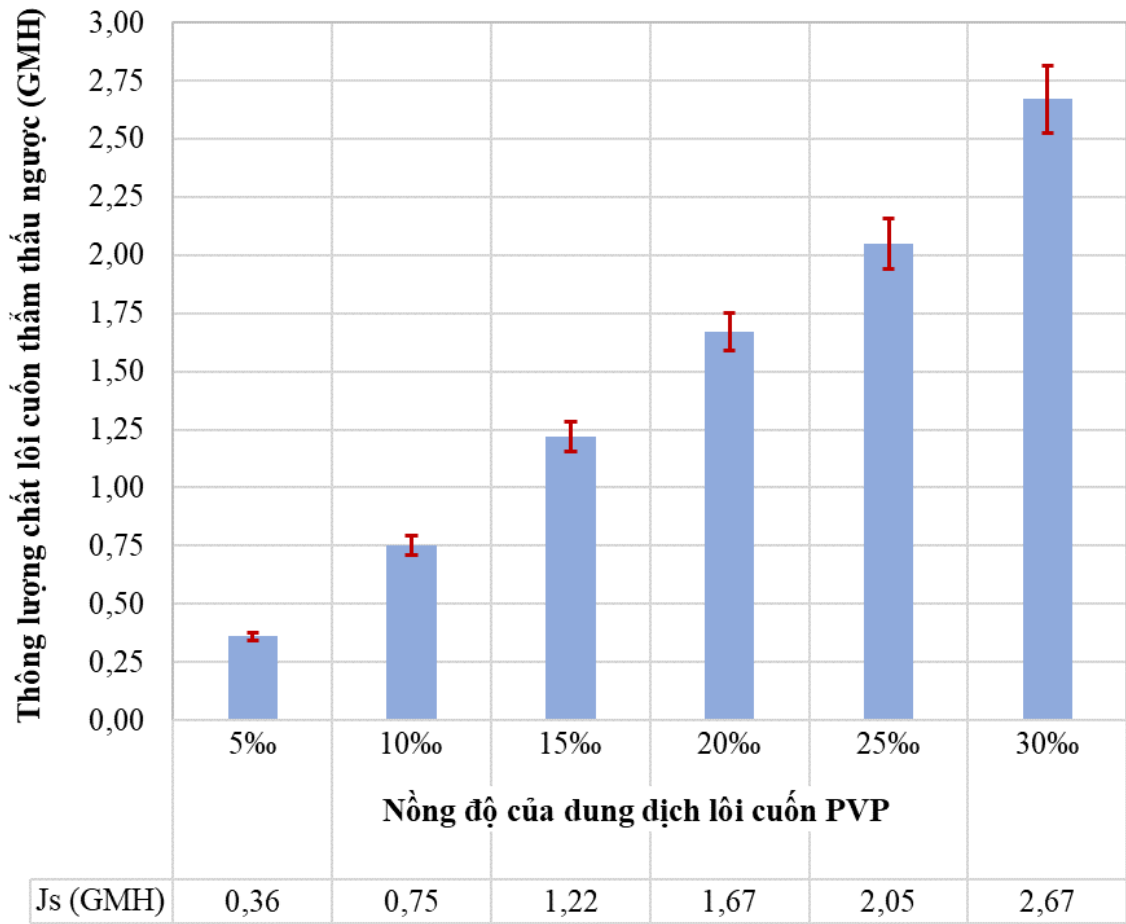
Một khác biệt quan trọng khác giữa dung dịch lõi cuộn PVP và dung dịch lõi cuộn MAL là khi dòng cần xử lý được thay bằng nước nhiễm mặn mô phỏng thì thông lượng J_w tạo thành bởi dung dịch lõi cuộn PVP xuất hiện dấu hiệu giảm

mạnh, xuống còn khoảng 8,56 LMH khi độ mặn đạt 10‰ và khoảng 4,74 LMH khi độ mặn đạt 15‰. Thậm chí, khi độ mặn của dòng cần xử lý tăng đến 20‰ thì dung dịch lõi cuộn PVP đã không còn khả năng cho hiệu quả lõi cuộn đáng kể. Hiện tượng này có thể giải thích là do đã xảy ra tương tác giữa chất lõi cuộn PVP và muối NaCl tại khu vực tiếp xúc giữa hai dung dịch bên trong và xung quanh bề mặt màng bán thấm, gây ra hiện tượng suy giảm khả năng thẩm thấu của màng bán thấm. Nói cách khác, dung dịch lõi cuộn PVP được xác định là không phù hợp để sử dụng trong những ứng dụng khử mặn khi dòng cần xử lý sở hữu độ mặn vượt quá ngưỡng 10‰.



Hình 3.7. Đặc trưng thông lượng J_w của dung dịch lõi cuộn PVP tại những nồng độ dung dịch lõi cuộn và độ mặn dòng cần xử lý khác nhau

* giá trị $J_w = 0,00$ LMH thể hiện không tồn tại dòng thẩm thấu sang phía dung dịch lõi cuộn

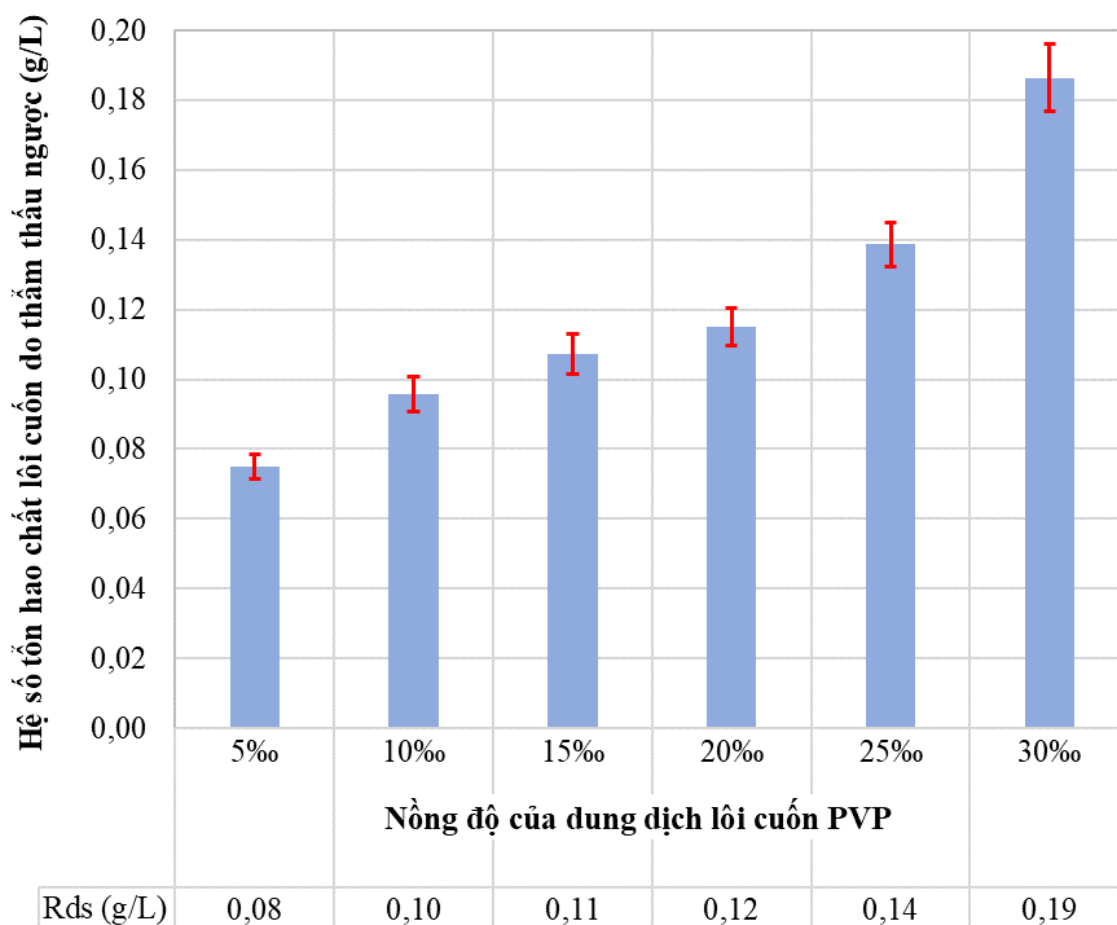


Hình 3.8. Thông lượng Js của dung dịch lõi cuộn PVP tại các nồng độ dung dịch lõi cuộn khác nhau

Xét về đặc trưng tổn hao chất lõi cuộn do hiện tượng chất lõi cuộn thẩm thấu ngược qua màng, có thể thấy rằng màng bán thấm được sử dụng sở hữu khả năng chọn lọc thẩm thấu đối với chất lõi cuộn PVP tốt hơn so với chất lõi cuộn MAL, thể hiện qua việc thông lượng Js của dung dịch lõi cuộn PVP thấp hơn đáng kể so với dung dịch lõi cuộn MAL (**Hình 3.5** và **Hình 3.8**). Điều này có thể giải thích là do, kích thước phân tử trung bình của chất lõi cuộn polyvinylpyrrolidon cao hơn đáng kể so với chất lõi cuộn maltodextrin, và bởi đây là những hợp chất không phân ly khi phân tán trong môi trường nước, nên các phân tử polyvinylpyrrolidon cũng khó di chuyển qua cấu trúc xốp của màng bán thấm hơn so với các phân tử maltodextrin.

Từ những kết quả trên, dung dịch lõi cuộn PVP với nồng độ 20% đã được lựa chọn để sử dụng cho những thí nghiệm tiếp theo. Khi đó, độ mặn tối đa phù hợp nhất của dòng cần xử lý được xác định là 10‰, với giá trị thông lượng Jw trung bình sau 150 phút vận hành có thể đạt đến 8,45 LMH. Tại bước hoàn nguyên bằng phương pháp lọc qua màng NF áp lực thấp, nguồn nước sạch đầu ra thu được có chỉ số TDS là khoảng 275 mg/L, thấp hơn đáng kể so với ngưỡng tối đa theo hướng dẫn

của WHO [223] và quy chuẩn quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT [224] đối với nước sinh hoạt là 1.000 mg/L. Mức độ tổn hao trung bình của chất lõi cuộn tại bước lọc qua màng NF được xác định là khoảng 1,86%.



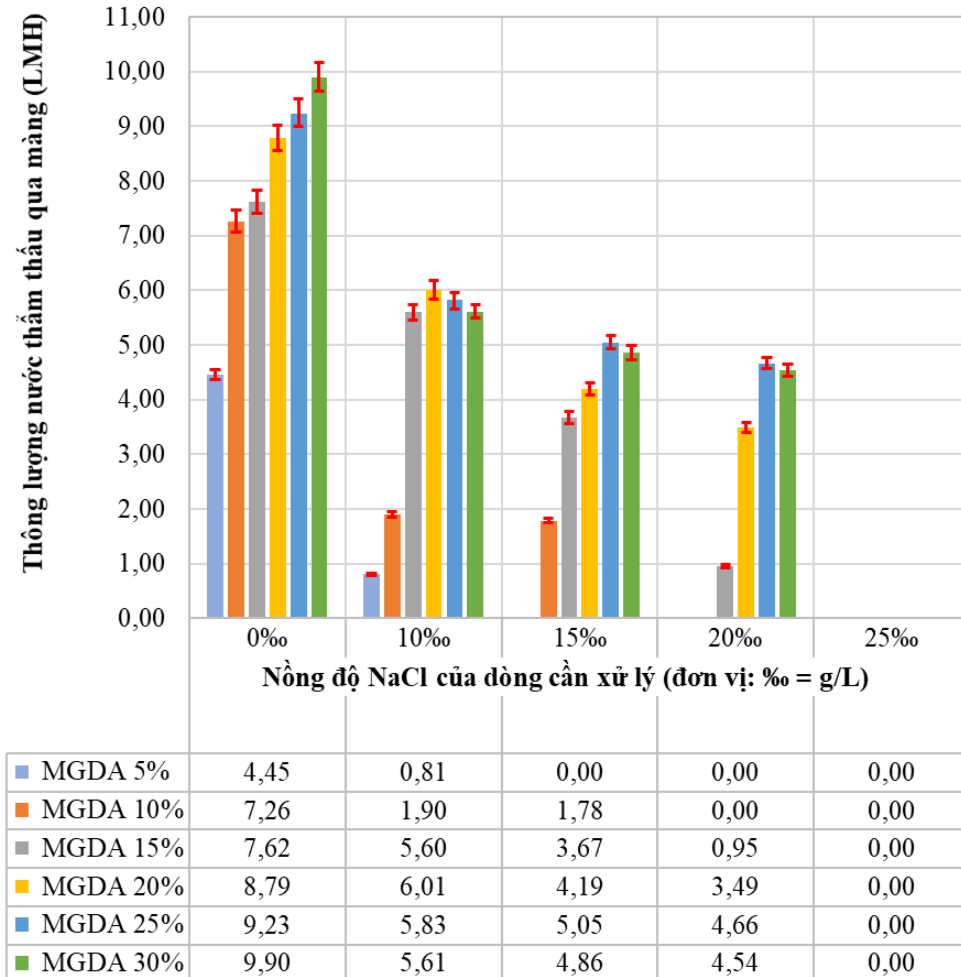
Hình 3.9. Hệ số tổn hao Rds của dung dịch lõi cuộn PVP tại các nồng độ dung dịch lõi cuộn khác nhau

3.2.3. Khả năng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn MGDA

Nhằm đánh giá đặc trưng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn, một số thí nghiệm màng thẩm thấu xuôi kết hợp hoàn nguyên bằng màng NF đã được tiến hành với các điều kiện vận hành chung như trình bày trong **Bảng 2.4**, và nồng độ của dung dịch lõi cuộn MGDA thay đổi trong khoảng 5 – 25 % (tỷ lệ theo khối lượng giữa chất lõi cuộn MGDA-3Na và axit citric được lựa chọn là 85:15, tương ứng với giá trị pH của dung dịch đạt khoảng 9,5). Kết quả thí nghiệm được trình bày cụ thể trong **Hình 3.10** và **Hình 3.11**.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, tại tỷ lệ muối MGDA-3Na được lựa chọn, dung dịch lõi cuộn MGDA thể hiện đặc trưng lõi cuộn khá tương đồng với những loại dung dịch lõi cuộn khác đã biết trước đó, với giá trị thông lượng J_w tăng dần khi

tăng nồng độ dung dịch lô cuộn. Đáng chú ý, hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ được xác định xảy ra trong khoảng nồng độ dung dịch lô cuộn 10% – 15%, thể hiện qua việc thông lượng J_w chỉ tăng không đáng kể khi tăng nồng độ dung dịch lô cuộn từ 10% lên 15% (đối với dòng cần xử lý là nước de-ion).

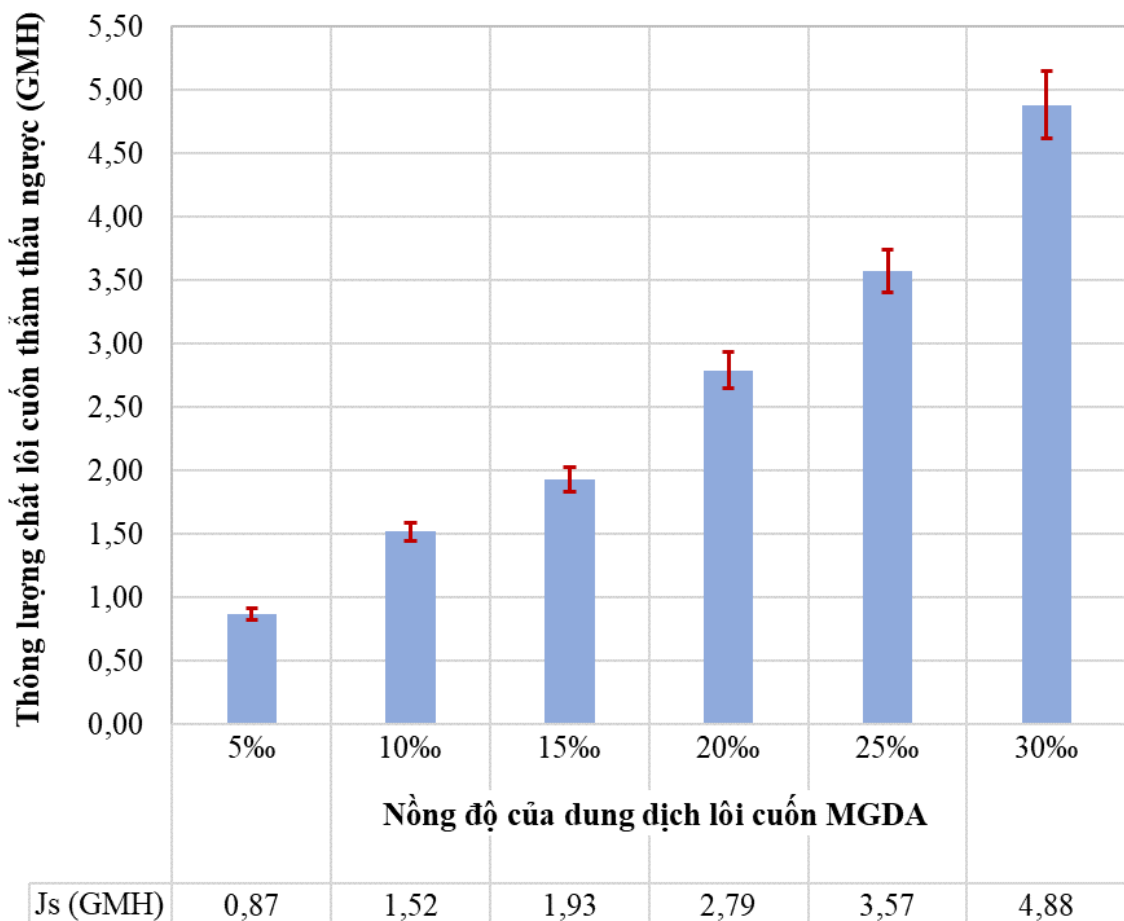


Hình 3.10. Đặc trưng thông lượng J_w của dung dịch lô cuộn MGDA tại những nồng độ dung dịch lô cuộn và độ mặn dòng cần xử lý khác nhau

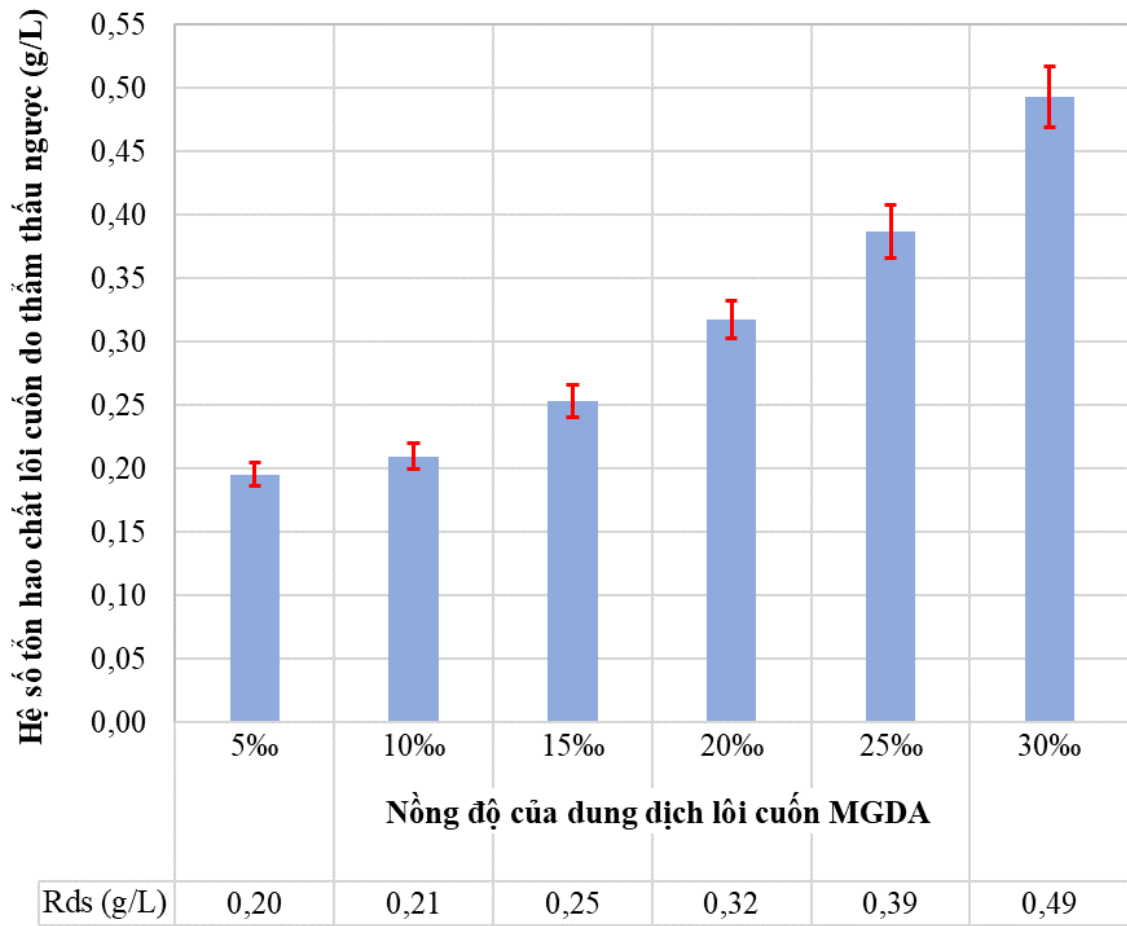
Khi so sánh với các dung dịch lô cuộn khác như dung dịch lô cuộn MAL hay dung dịch lô cuộn PVP, có thể thấy rằng dung dịch lô cuộn MGDA mặc dù cho giá trị thông lượng J_w đối với dòng cần xử lý là nước cất thấp hơn (chỉ khoảng 9,90 LMH tại nồng độ dung dịch lô cuộn 30%), tuy nhiên khả năng lô cuộn của dung dịch lô cuộn MGDA lại duy trì tương đối ổn định khi tăng độ mặn của dòng cần xử lý. Cụ thể, khi độ mặn của dòng cần xử lý tăng từ 0‰ đến 20‰, thông lượng J_w của dung dịch lô cuộn MAL 20% đã giảm từ 10,61 LMH xuống còn 2,19 LMH (giảm khoảng 80%), trong khi thông lượng J_w của dung dịch lô cuộn PVP 20% cũng giảm từ 14,52 LMH xuống còn 0,00 LMH (dung dịch lô cuộn mất khả năng lô cuộn). Ngược lại, dưới cùng điều kiện thí nghiệm, thông lượng J_w của dung dịch

lôi cuốn MGDA 25% chỉ giảm từ 9,23 LMH xuống còn 4,66 LMH (giảm khoảng 50%).

Hiện tượng trên có thể được giải thích trên cơ sở cấu trúc phân tử và đặc trưng phân ly trong dung dịch của các chất lôi cuốn được lựa chọn. Cụ thể, như đã đề cập, cả maltodextrin và polyvinylpyrrolidon đều là những hợp chất cao phân tử ưa nước, có thể trương nở và tạo thành cấu trúc màng dính nhớt khi tiếp xúc với nước, hoặc khi dung dịch của chúng bị tách nước đến mức độ nhất định. Bởi vậy, khi xảy ra hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ bên trong và/hoặc bên ngoài màng, những chất lôi cuốn này có thể tạo thành một số cấu trúc gây cản trở sự chuyển khối của nước, dẫn tới giá trị thông lượng J_w trở nên thấp hơn so với kỳ vọng. Ngược lại, quá trình hoà tan của cả MGDA-3Na và axit citric đều diễn ra một cách trực tiếp hơn, nhờ vậy hạn chế đáng kể ảnh hưởng của hiện tượng phân cực nồng độ cục bộ xảy ra tại những khoảng nồng độ dung dịch lôi cuốn quá cao.



Hình 3.11. Thông lượng J_s của dung dịch lôi cuốn MGDA tại các nồng độ dung dịch lôi cuốn khác nhau



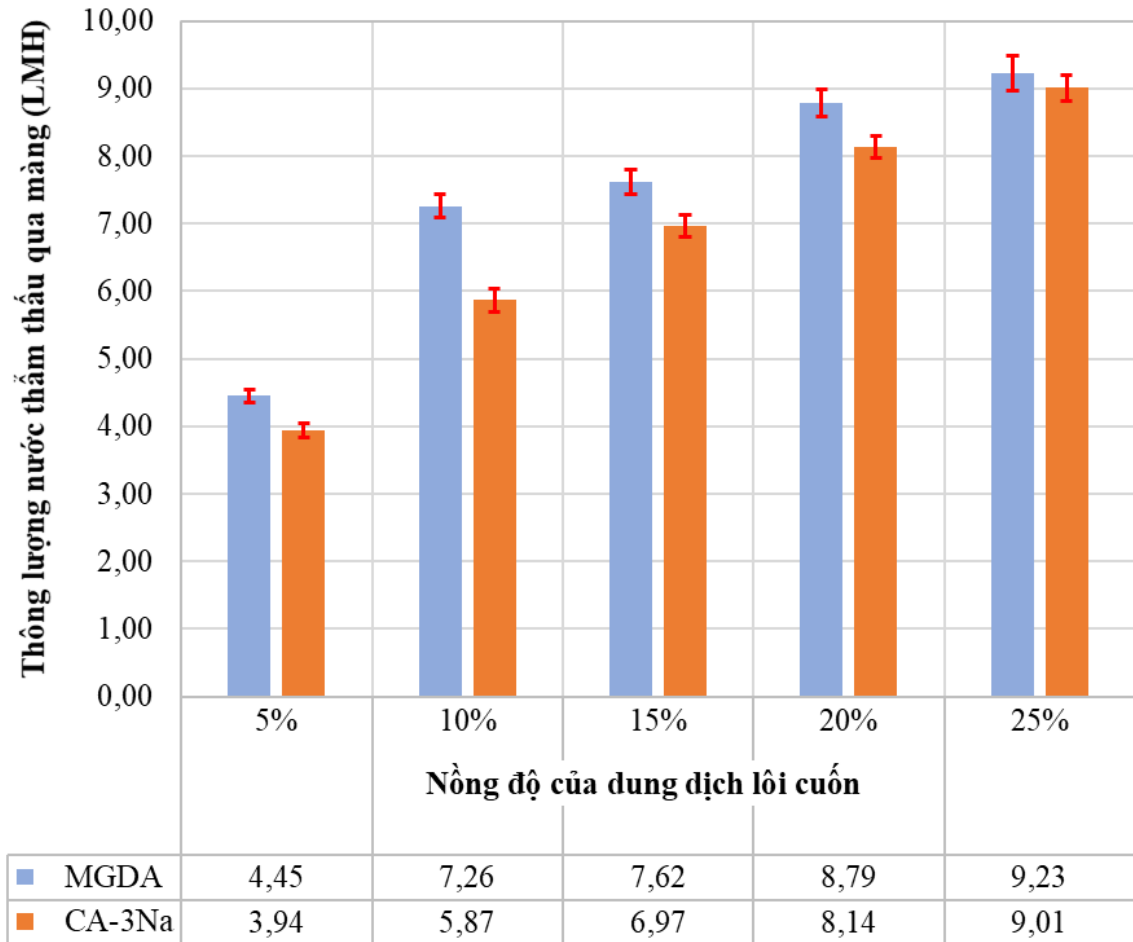
Hình 3.12. Hệ số tổn hao Rds của dung dịch lõi cuộn MGDA tại các nồng độ dung dịch lõi cuộn khác nhau

Ngược lại, khi xét về mặt thông lượng Js và hệ số tổn hao Rds (**Hình 3.11** và **Hình 3.12**), thì dung dịch lõi cuộn MGDA không xuất hiện xu hướng thay đổi quá khác biệt so với dung dịch lõi cuộn PVP và dung dịch lõi cuộn MAL. Nhìn chung, hiện tượng chất lõi cuộn thẩm thấu ngược qua màng trở nên nghiêm trọng hơn khi tăng nồng độ dung dịch lõi cuộn, đặc biệt là sau ngưỡng nồng độ dung dịch lõi cuộn MGDA 25%.

Nhằm đánh giá chính xác hơn hiệu quả của dung dịch lõi cuộn MGDA, một số thí nghiệm so sánh tổ hợp dung dịch lõi cuộn này với dung dịch lõi cuộn chứa muối natri của axit citric (CA-3Na) [218] cũng đã được thực hiện. Kết quả nghiên cứu cụ thể được trình bày trong **Hình 3.13** và **Hình 3.14**.

Đánh giá các kết quả đối với dung dịch lõi cuộn CA-3Na, có thể thấy tồn tại một số khác biệt nhỏ giữa nghiên cứu này, và công bố trước đó của Yang và cộng sự [218]. Hiện tượng trên có thể được giải thích là do tồn tại những khác biệt liên quan đến loại màng bán thấm và điều kiện thí nghiệm giữa hai nghiên cứu. Tuy nhiên, nhìn chung thì xu hướng thay đổi của giá trị thông lượng Jw và giá trị thông

lượng Js khi thay đổi nồng độ dung dịch lõi cuộn CA-3Na là tương đồng giữa hai nghiên cứu, cho thấy hoàn toàn có thể sử dụng những kết quả này để so sánh hiệu quả lõi cuộn giữa hai dung dịch lõi cuộn CA-3Na và dung dịch lõi cuộn MGDA.

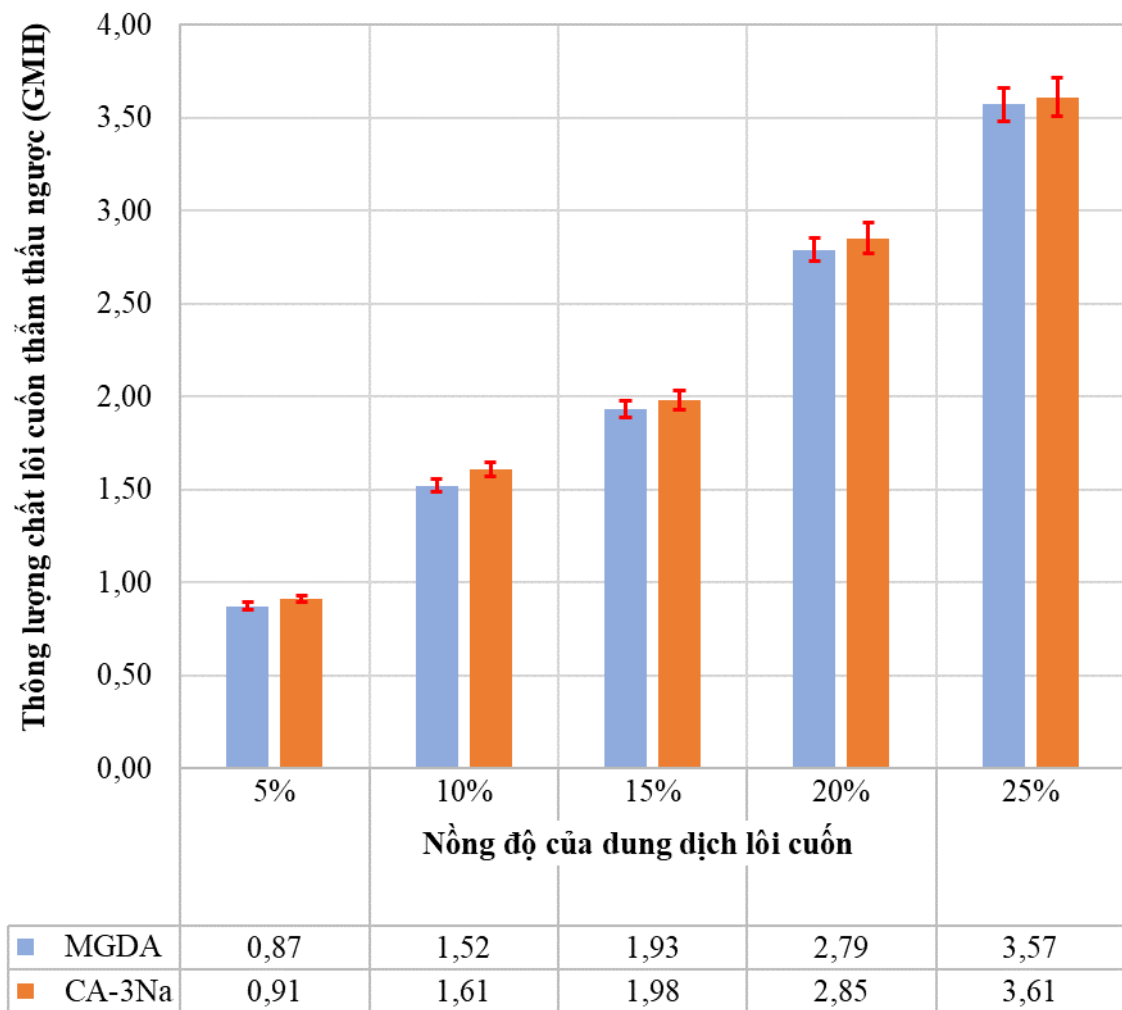


Hình 3.13. Đặc trưng thông lượng Jw của dung dịch lõi cuộn MGDA và dung dịch lõi cuộn CA-3Na tại những nồng độ dung dịch lõi cuộn khác nhau

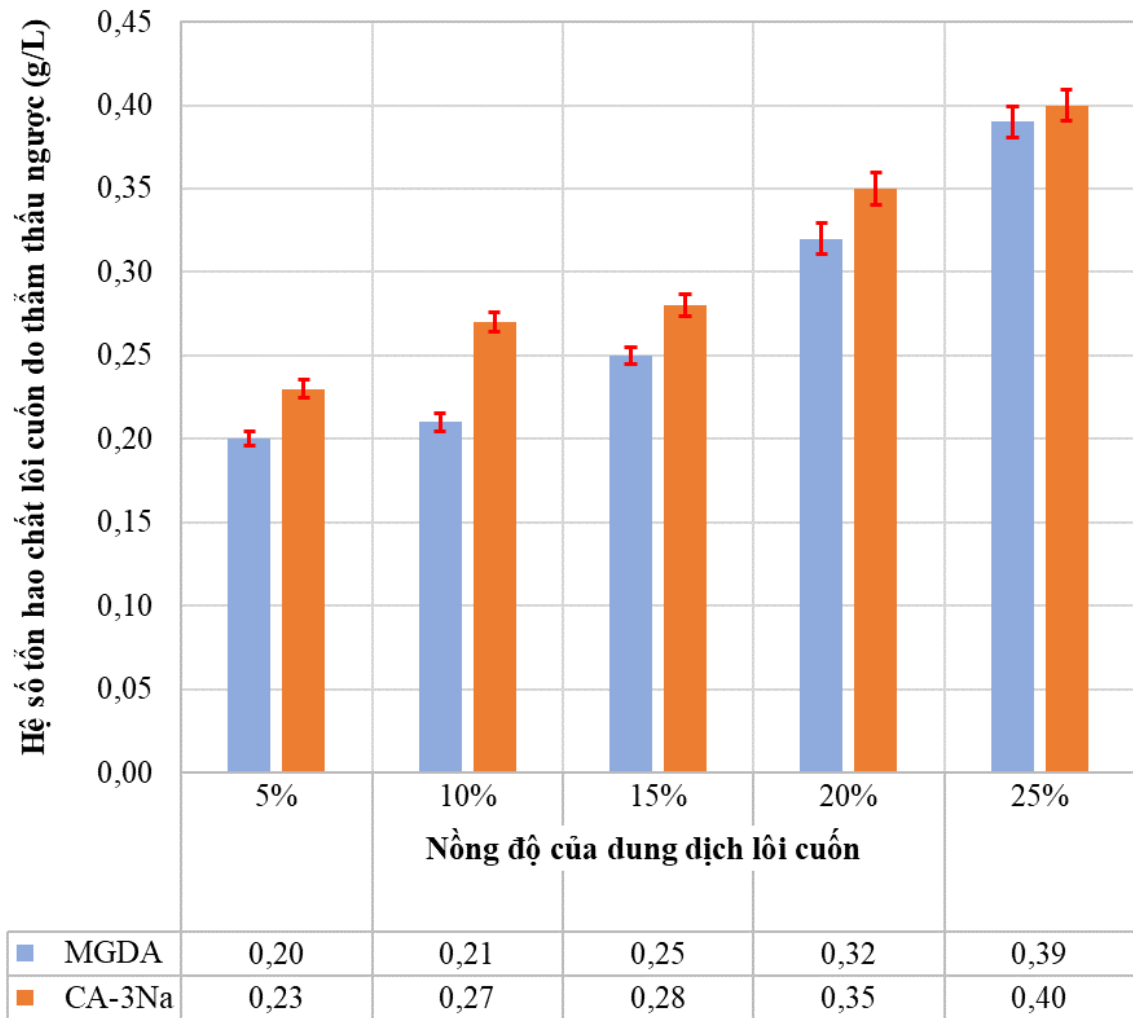
Dựa vào những kết quả đã trình bày, có thể nhận thấy rằng tại cùng ngưỡng nồng độ dung dịch được lựa chọn, dung dịch lõi cuộn MGDA cho hiệu quả lõi cuộn vượt trội so với dung dịch lõi cuộn CA-3Na, thể hiện qua giá trị thông lượng Jw cao hơn và giá trị thông lượng Js thấp hơn. Đặc biệt, khi nồng độ của dung dịch lõi cuộn dưới 25%, tồn tại khác biệt về mặt thống kê giữa thông lượng Jw tạo thành bởi dung dịch MGDA và thông lượng Jw tạo thành bởi dung dịch CA-3Na (**Hình 3.13**). Hiện tượng trên có thể được giải thích là do, tại những ngưỡng nồng độ thấp, hệ chất lõi cuộn MGDA-3Na và axit citric phân ly trong nước tốt hơn so với muối CA-3Na (axit yếu và muối natri của axit yếu chỉ phân ly một phần trong dung dịch), bởi vậy tạo thành dung dịch lõi cuộn với áp suất thẩm thấu hơn. Tuy nhiên, khi nồng độ của dung dịch tăng lên thì đặc trưng phân ly của hai hệ chất lõi cuộn gần trở nên tương đương nhau, dẫn tới giá trị thông lượng Jw tạo thành bởi hai loại dung dịch lõi cuộn

không còn tồn tại khác biệt đáng kể về mặt thống kê.

Mặc dù vậy, do việc bổ sung axit citric nên tại cùng ngưỡng nồng độ chung của dung dịch lõi cuộn thì nồng độ thực tế của muối MGDA-3Na trong dung dịch luôn thấp hơn so với nồng độ của muối CA-3Na, dẫn tới thành phần của ion Na^+ trong dung dịch MGDA có thể thấp hơn so với thành phần của ion Na^+ trong dung dịch CA-3Na với cùng nồng độ. Ngoài ra, do gốc axit hữu cơ của cả muối MGDA-3Na và muối CA-3Na (gốc axit citric) đều sở hữu cấu trúc phân tử tương đối cồng kềnh, hạn chế sự di chuyển của các ion phân ly này qua cấu trúc xốp của màng bán thấm, nên hiện tượng chất lõi cuộn thấm thấu ngược qua màng chủ yếu gây ra bởi sự di chuyển của ion Na^+ (cũng như ion H^+ theo chiều ngược lại) qua màng bán thấm. Bởi những nguyên nhân trên, nên nhìn chung dung dịch lõi cuộn MGDA đã thể hiện giá trị thông lượng Js và hệ số tổn hao Rds thấp hơn không quá đáng kể so với dung dịch lõi cuộn CA-3Na (**Hình 3.14** và **Hình 3.15**).



Hình 3.14. Đặc trưng thông lượng Js của dung dịch lõi cuộn MGDA và dung dịch lõi cuộn CA-3Na tại những nồng độ dung dịch lõi cuộn khác nhau

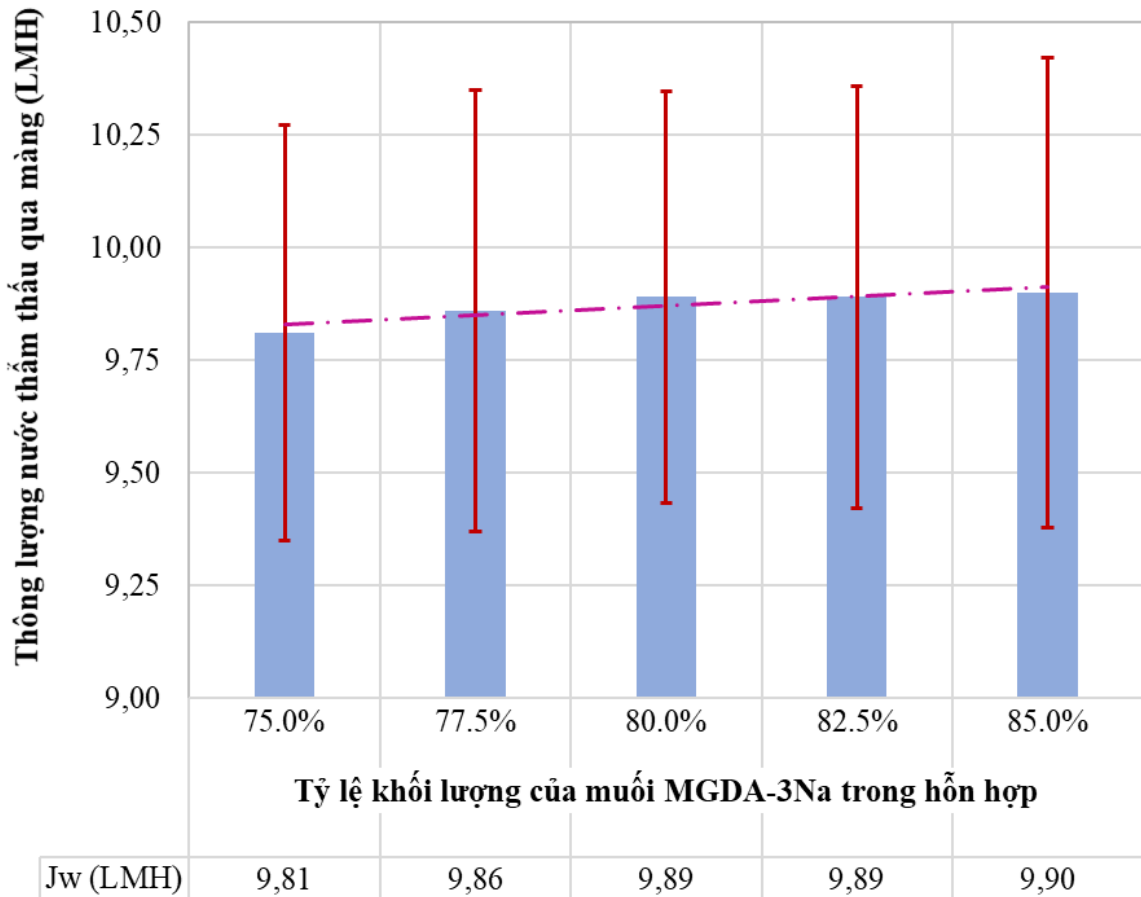


Hình 3.15. Đặc trưng tổn hao chất lõi cuộn do thẩm thấu ngược của dung dịch lõi cuộn MGDA và dung dịch lõi cuộn CA-3Na tại những nồng độ dung dịch lõi cuộn khác nhau

Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ muối MGDA-3Na và axit citric trong dung dịch lõi cuộn MGDA 25% lên đặc trưng lõi cuộn của dung dịch (**Hình 3.16**, **Hình 3.17**, và **Hình 3.18**) cho thấy, khi tỷ lệ muối MGDA-3Na trong dung dịch càng cao thì giá trị thông lượng J_w thu được càng cao, đồng thời giá trị thông lượng J_s và hệ số tổn hao R_{ds} thu được càng thấp. Kết quả này đã góp phần lần nữa khẳng định đặc trưng lõi cuộn ưu việt của muối MGDA-3Na khi so sánh với muối CA-3Na, cũng như khẳng định vai trò phụ trợ nhằm mục đích điều chỉnh độ pH của axit citric trong dung dịch lõi cuộn MGDA. Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng, mặc dù giá trị trung bình của các thông số đánh giá tồn tại xu hướng thay đổi tương đối rõ ràng, nhưng sự khác biệt về mặt thống kê giữa những giá trị này là không đủ đáng kể. Bởi vậy, một số thay đổi nhỏ về mặt tỷ lệ các phân tử và ion phân ly trong dung dịch lõi cuộn MGDA gây ra bởi hiện tượng thẩm thấu và thẩm thấu ngược cũng sẽ không

tạo thành ảnh hưởng đáng kể lên đặc trưng lõi cuốn của dung dịch này.

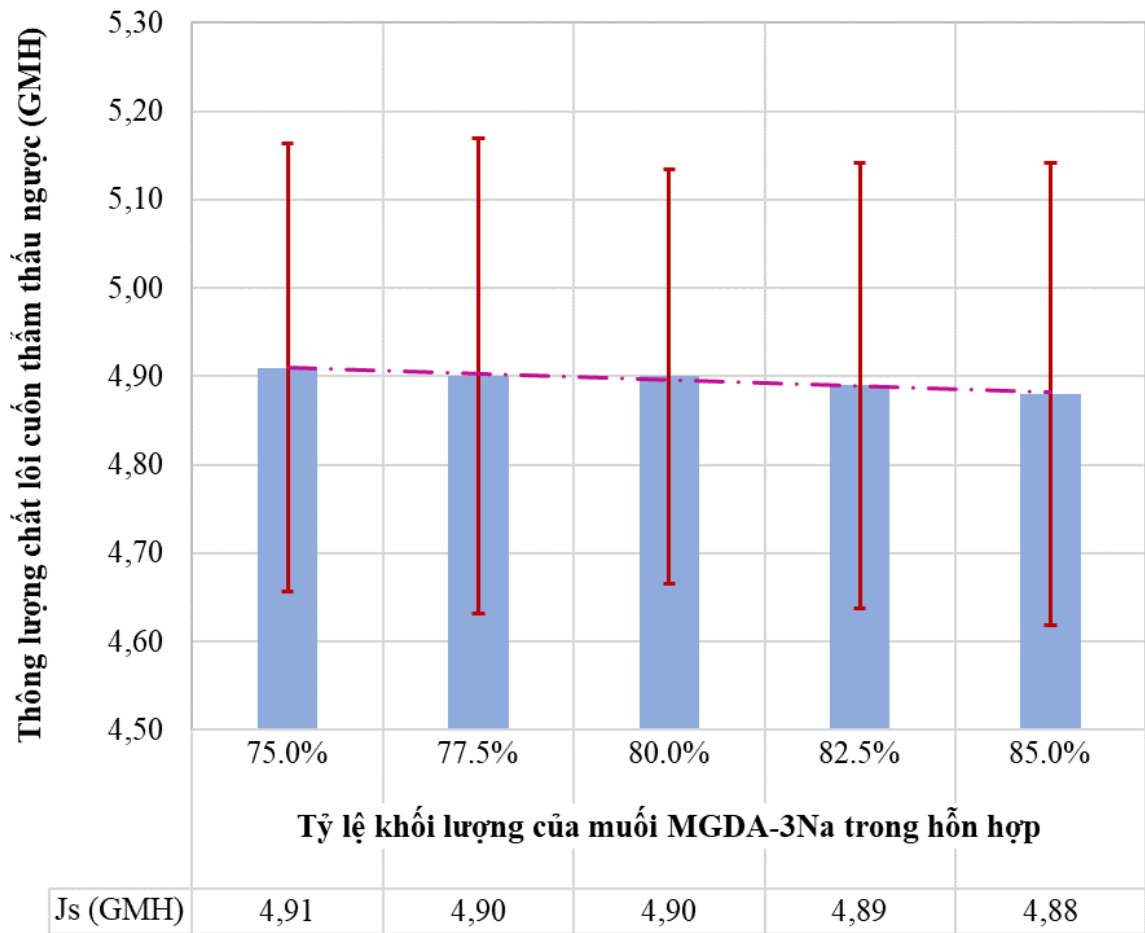
Ngoài ra, khi tỷ lệ khối lượng của axit citric trong dung dịch MGDA quá thấp (khoảng dưới 10%) thì độ pH của dung dịch sẽ tăng lên vượt ngưỡng giới hạn vận hành ổn định của màng bán thấm ($\text{pH} \leq 10$). Một số thí nghiệm sơ bộ đã cho thấy, khi độ pH của dung dịch MGDA vượt qua ngưỡng này, thì lớp lọc của màng bán thấm sẽ nhanh chóng bị tổn hại, dẫn tới hiện tượng thông lượng Js tăng cao bất thường.



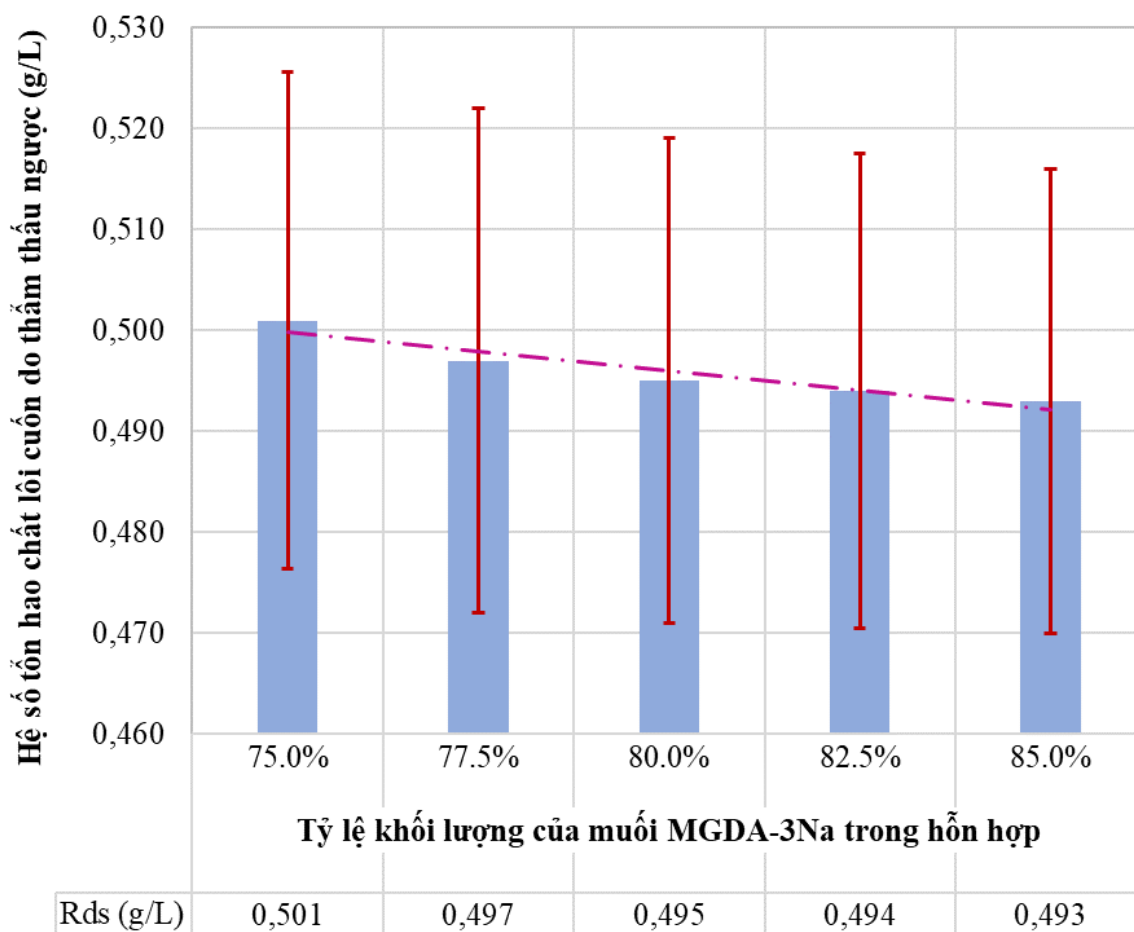
Hình 3.16. Đặc trưng thông lượng Jw của dung dịch lõi cuốn MGDA 25% tại những tỷ lệ muối MGDA-3Na khác nhau

Từ những kết quả trên, dung dịch lõi cuốn MGDA với nồng độ 25% và tỷ lệ theo khối lượng giữa muối MGDA-3Na và axit citric = 85:15 đã được lựa chọn để sử dụng cho những thí nghiệm tiếp theo. Khi đó, độ mặn tối đa phù hợp nhất của dòng cần xử lý được xác định là 15‰, với giá trị thông lượng Jw trung bình sau 150 phút vận hành có thể đạt đến 5,05 LMH. Tại bước hoàn nguyên bằng phương pháp lọc qua màng NF áp lực thấp, nguồn nước sạch đầu ra thu được có chỉ số TDS là khoảng 415 mg/L, thấp hơn đáng kể so với ngưỡng tối đa theo hướng dẫn của WHO [223] và quy chuẩn quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT [224] đối với nước sinh hoạt là

1.000 mg/L. Mức độ tổn hao trung bình của chất lõi cuộn tại bước lọc qua màng NF được xác định là khoảng 2,78%.



Hình 3.17. Đặc trưng thông lượng Js của dung dịch lõi cuộn MGDA 25% tại những tỷ lệ muối MGDA-3Na khác nhau



Hình 3.18. Đặc trưng tổn hao chất lõi cuộn do thẩm thấu ngược của dung dịch lõi cuộn MGDA 25% tại những tỷ lệ muối MGDA-3Na khác nhau

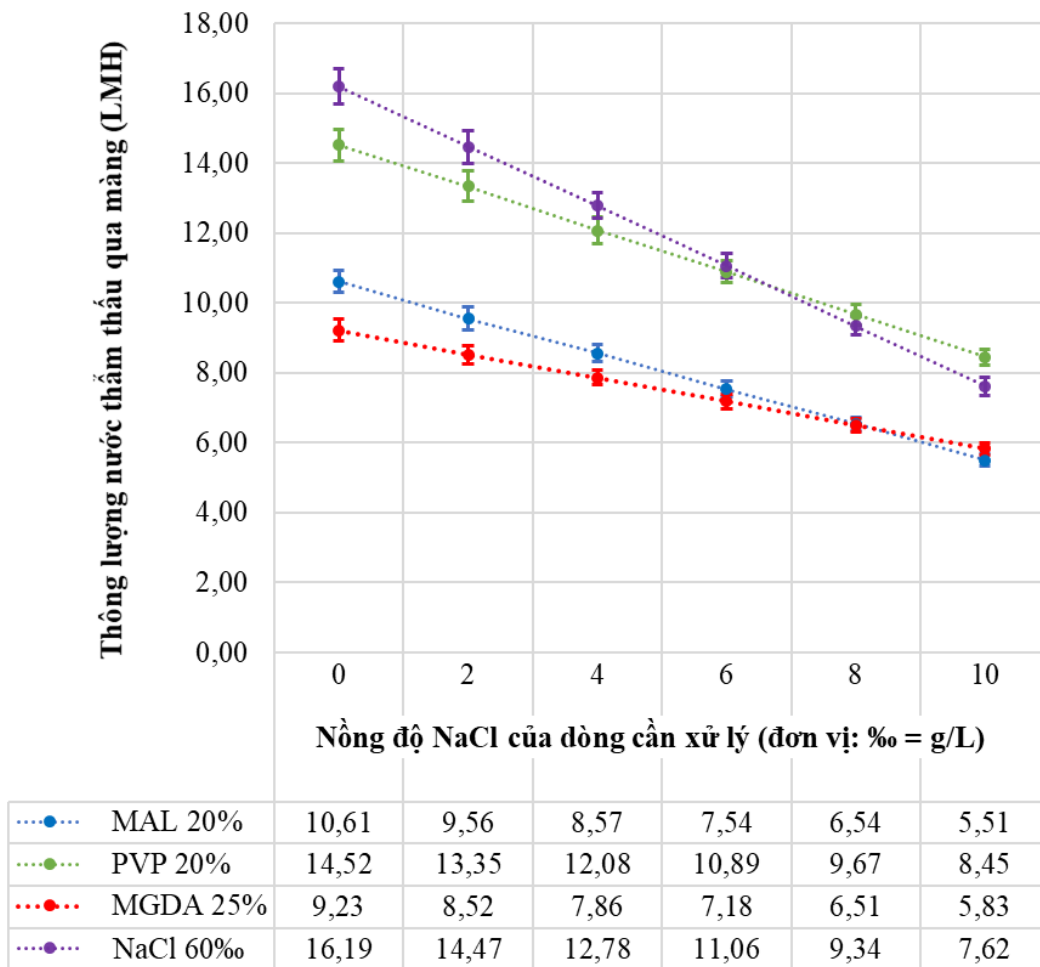
3.2.4. So sánh đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn được lựa chọn

Dựa trên những kết quả nghiên cứu đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn như đã trình bày, có thể thấy rằng các dung dịch lõi cuộn gốc hữu cơ này chủ yếu phù hợp trong ứng dụng khử mặn đối với nguồn nước nhiễm mặn chưa quá nghiêm trọng, với 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, một số thí nghiệm bổ sung liên quan đến hiệu quả lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn trên đã thực hiện trong khoảng độ mặn của dòng cần xử lý dưới 10‰.

Nhìn chung, các thí nghiệm được thực hiện với những điều kiện vận hành cụ thể như đã trình bày trong **Bảng 2.4**, tuy nhiên nồng độ từng dung dịch lõi cuộn được sử dụng là giá trị phù hợp nhất xác định qua kết quả nghiên cứu trước đó (cụ thể: dung dịch MAL 20%, dung dịch PVP 20%, và dung dịch MGDA 25%), đồng thời độ mặn của dòng cần xử lý được điều chỉnh thay đổi trong khoảng 0‰ – 10‰.

Kết quả cụ thể được trình bày trong **Hình 3.19** và **Hình 3.20**.

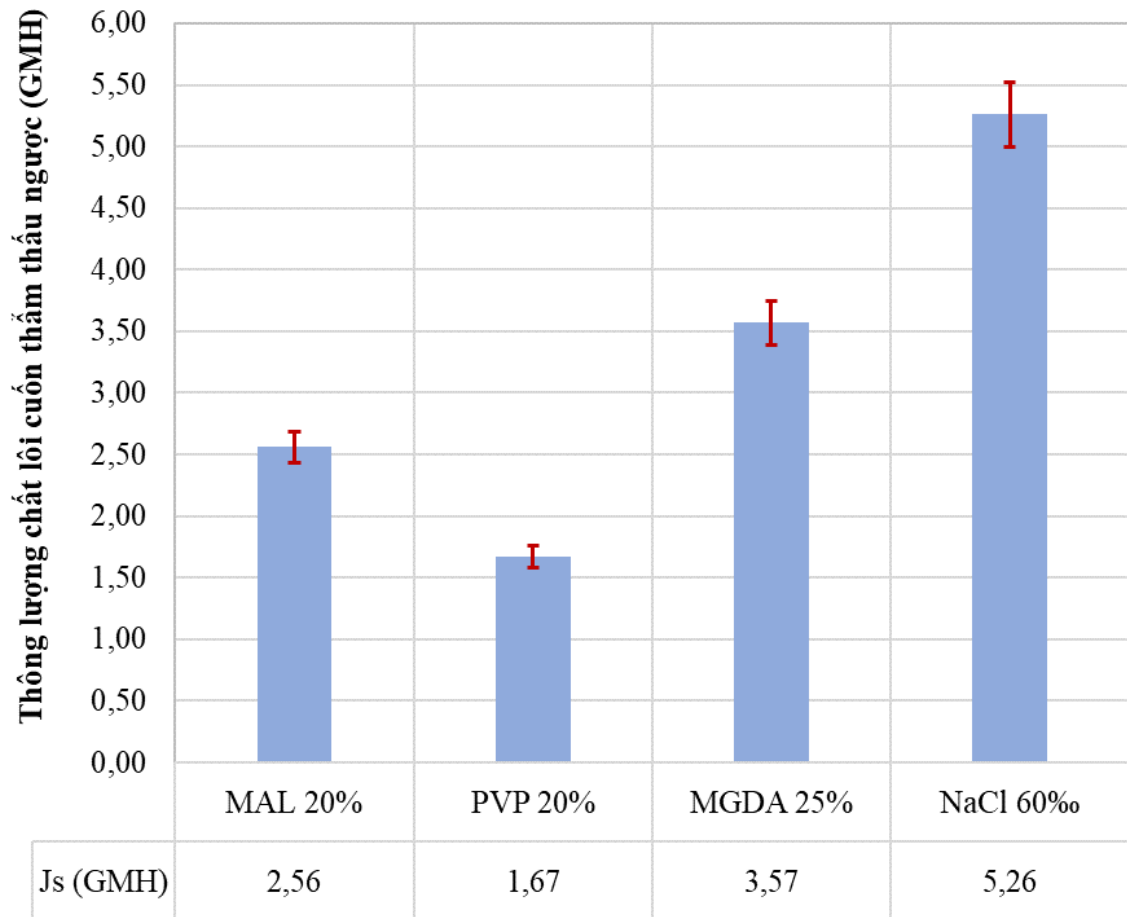
Kết quả trình bày trên **Hình 3.19** cho thấy, trong khoảng độ mặn của dòng cần xử lý 0 – 10‰ thì thông lượng J_w thu được của toàn bộ ba loại dung dịch lõi cuộn được lựa chọn đều thay đổi một cách tương đối tuyến tính, và giảm dần theo chiều tăng lên của độ mặn dòng cần xử lý. Khi độ mặn dòng cần xử lý tăng từ 0‰ lên tới 10‰, nhìn chung thông lượng J_w thu được của toàn bộ ba loại dung dịch lõi cuộn đều giảm khoảng 37 – 48%, trong đó mức độ giảm lớn nhất thuộc về dung dịch lõi cuộn MAL 20%.



Hình 3.19. Đặc trưng thông lượng J_w của các dung dịch lõi cuộn tại những độ mặn dòng cần xử lý khác nhau

Cụ thể, khi độ mặn dòng cần xử lý tăng từ 0‰ lên tới 10‰ thì thông lượng J_w của dung dịch lõi cuộn 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 lõi cuộn MAL 20% và dung dịch dòng cần xử lý, khiến cho khả năng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn giảm nhanh khi tăng độ mặn của dung dịch lõi cuộn. Hiện tượng tương tự cũng xảy ra khi dung dịch lõi

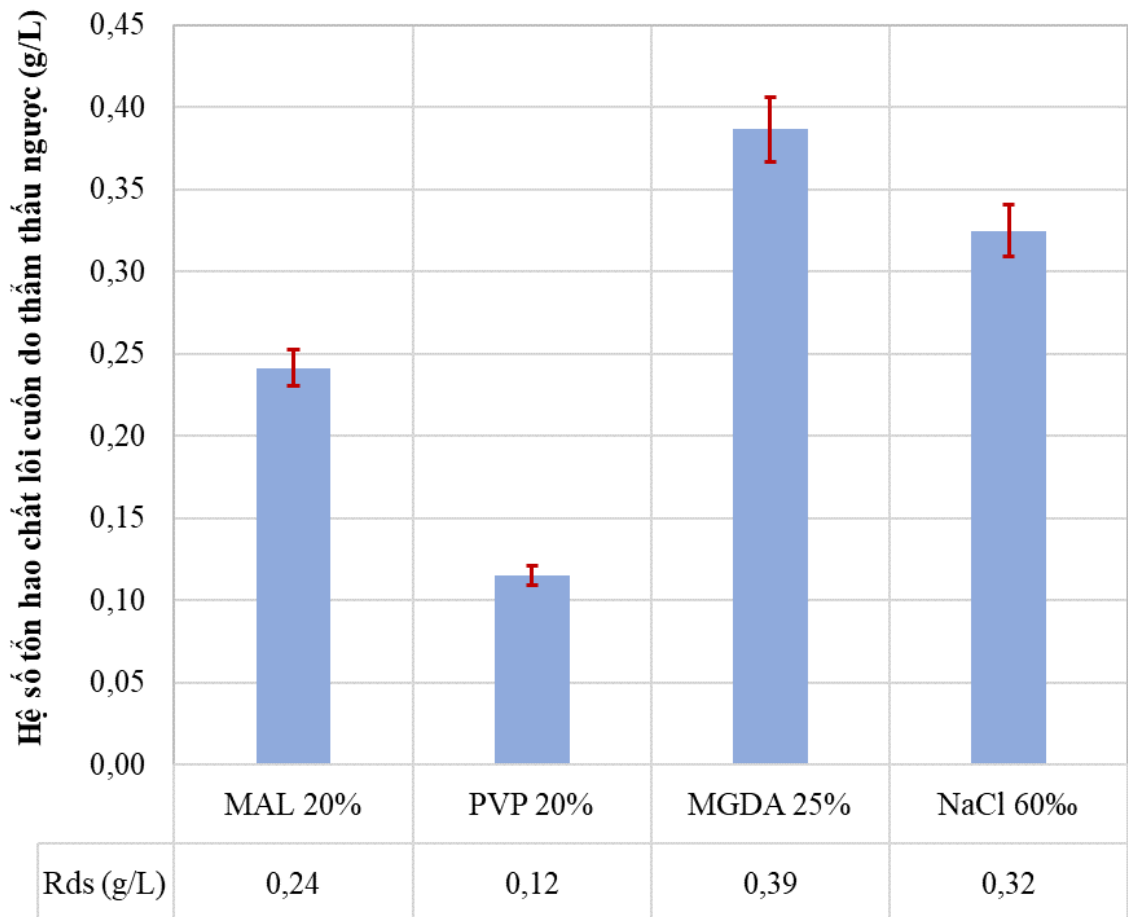
cuốn là dung dịch muối NaCl 60‰ (dung dịch lõi cuốn đối chứng), với giá trị thông lượng J_w giảm từ 16.19 LMH xuống còn 7.62 LMH – tương đương mức giảm khoảng 53%. Ngược lại, cả dung dịch lõi cuốn PVP 20% và dung dịch lõi cuốn MGDA 25% đều cho hiệu quả lõi cuốn tương đối ổn định khi độ mặn của dòng cần xử lý nằm trong khoảng 0 – 10‰, với mức độ suy giảm thông lượng J_w lần lượt là khoảng 42% và 37%.



Hình 3.20. Đặc trưng thông lượng J_s của các dung dịch lõi cuốn được lựa chọn

Kết quả trình bày trên **Hình 3.20** và **Hình 3.21** cho thấy, hiện tượng chất lõi cuốn thẩm thấu ngược qua màng xảy ra đặc biệt nghiêm trọng đối với chất tổ hợp lõi cuốn muối MGDA-3Na và axit citric, với giá trị thông lượng J_s và hệ số tổn hao R_{ds} của dung dịch lõi cuốn MGDA cao hơn đáng kể so với dung dịch lõi 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 lõi 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 cuốn 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%.



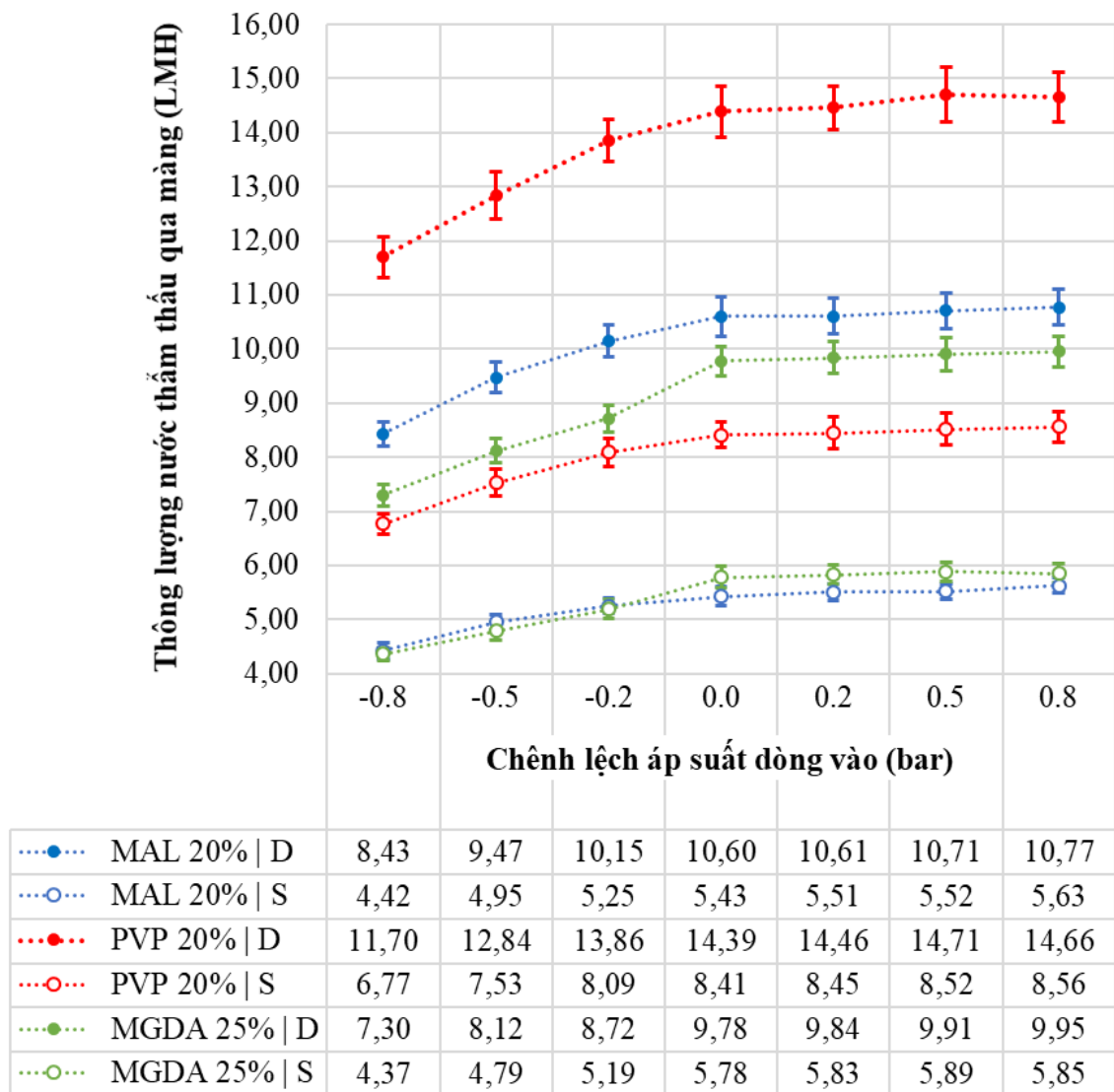
Hình 3.21. Hệ số tổn hao Rds của các dung dịch lõi cuộn được lựa chọn

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 maltodextrin và polyvinylpyrrolidon 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 LÔI CUỐN CỦA CÁC DUNG DỊCH LÔI CUỐN

3.3.1. Ảnh hưởng của chênh lệch áp suất dòng vào

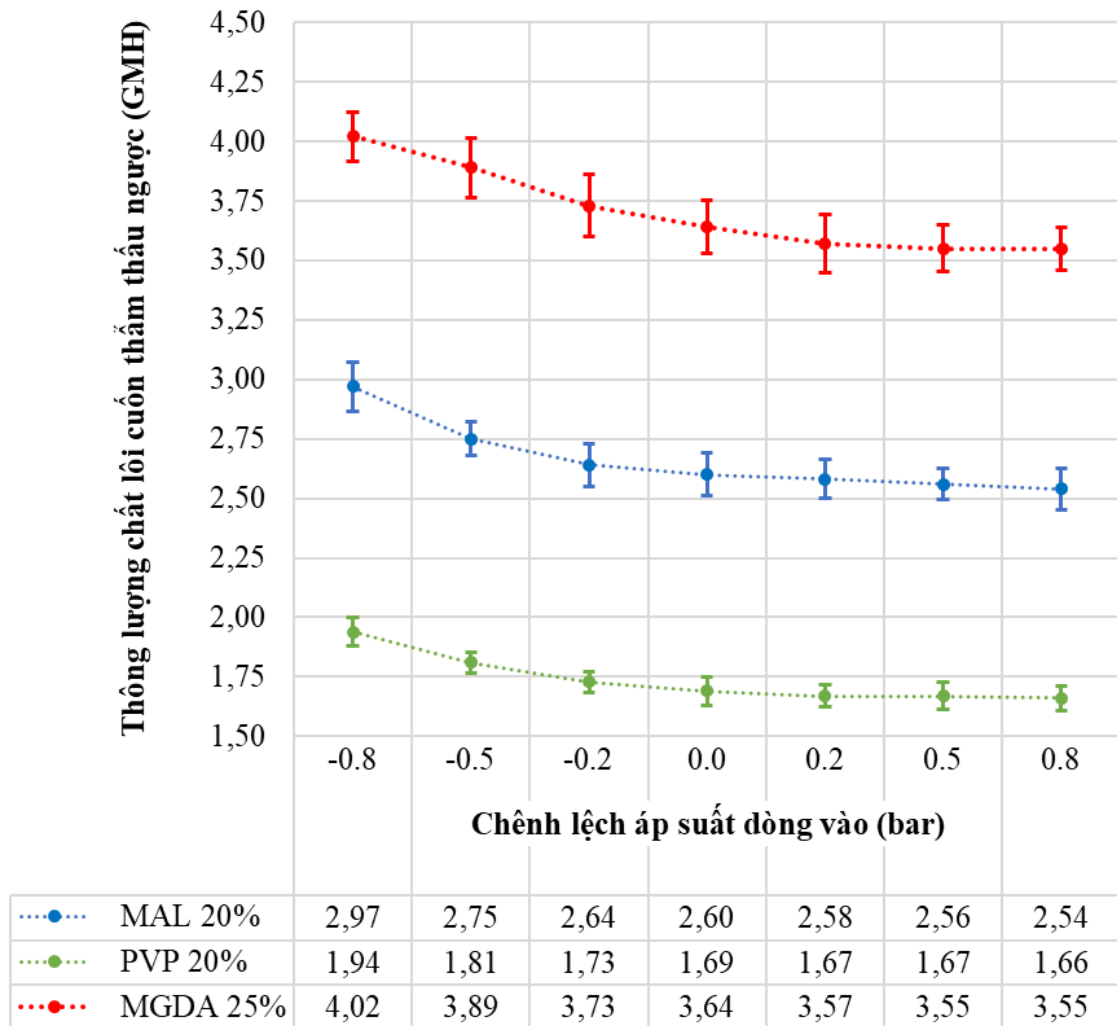
Thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của chênh lệch áp suất dòng vào lên đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn được thực hiện với các thông số kỹ thuật chủ yếu như trình bày trong **Bảng 2.5**. Kết quả nghiên cứu được trình bày trong **Hình 3.22**, **Hình 3.23**, và **Hình 3.24**.



Hình 3.22. Ảnh hưởng của chênh lệch áp suất dòng vào lên đặc trưng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%

* mẫu D tương ứng dòng cần xử lý là nước de-ion,
mẫu S tương ứng dòng cần xử lý là dung dịch NaCl 10%

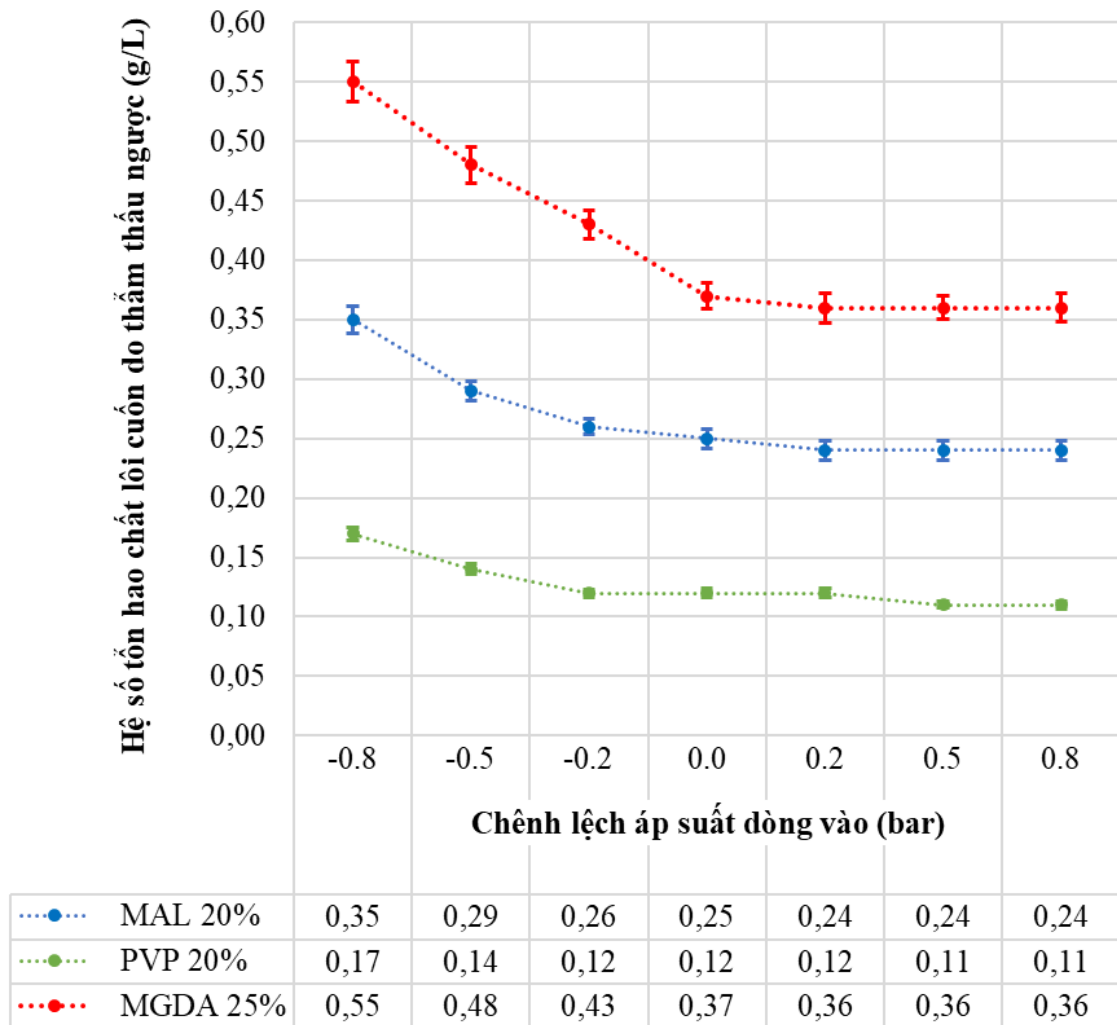
Kết quả thí nghiệm cho thấy, khi chênh lệch áp suất dòng vào giữa phía dòng cần xử lý và phía dung dịch lõi cuộn tăng lên thì thông lượng J_w cũng tăng lên. Đặc biệt, khi áp suất phía dung dịch lõi cuộn cao hơn phía dòng cần xử lý thì thông lượng J_w xuất hiện sự giảm mạnh. Do lưu lượng dòng vào của 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 cuộn.



Hình 3.23. Ảnh hưởng của chênh lệch áp suất dòng vào lên thông lượng J_s của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%

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 cuộn [56]. 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).



Hình 3.24. Ảnh hưởng của chênh lệch áp suất dòng vào lên hệ số tổn hao Rds của dung dịch lồi cuộn MAL 20%, dung dịch lồi cuộn PVP 20%, và dung dịch lồi cuộn MGDA 25%

Ngược lại, khi chênh lệch áp suất giữa phía dòng cần xử lý và phía dung dịch lồi cuộn 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 lồi cuộn qua màng bán thấm, bởi vậy gây cản trở cho hiện tượng chất lồi cuộn 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 thí nghiệm.

Từ những kết quả trên, có thể thấy được hệ thống màng FO hoạt động hiệu quả nhất khi áp suất phía dòng cần xử lý cao hơn áp suất phía dung dịch lõi cuốn – điều kiện này cho phép cải thiện thông lượng J_w cũng như hạn chế thông lượng J_s , nhờ vậy giúp nâng cao hiệu suất sử dụng chất lõi cuốn. Tuy nhiên, khi giá trị chênh lệch áp suất giữa phía dòng cần xử lý và phía dung dịch lõi cuốn tăng cao hơn 0,2 bar thì hiệu quả của việc điều chỉnh mức chênh lệch áp suất trở nên không quá đáng kể. Đáng chú ý là, theo khuyến nghị của các nhà sản xuất, do màng bán thấm thiết kế cho ứng dụng màng FO thường không bao gồm lớp lót chịu lực như màng RO (nhằm giảm trở lực của màng bán thấm đối với quá trình chuyển khối của nước qua màng), nên màng bán thấm sẽ tồn tại nguy cơ bị tổn hại nếu mức chênh lệch về mặt áp suất giữa hai phía của màng tăng lên quá cao.

Dựa vào những kết quả này, giá trị mức chênh lệch áp suất giữa phía dòng cần xử lý và phía dung dịch lõi cuốn khoảng 0,2 bar đã được lựa chọn sử dụng cho những thí nghiệm tiếp theo.

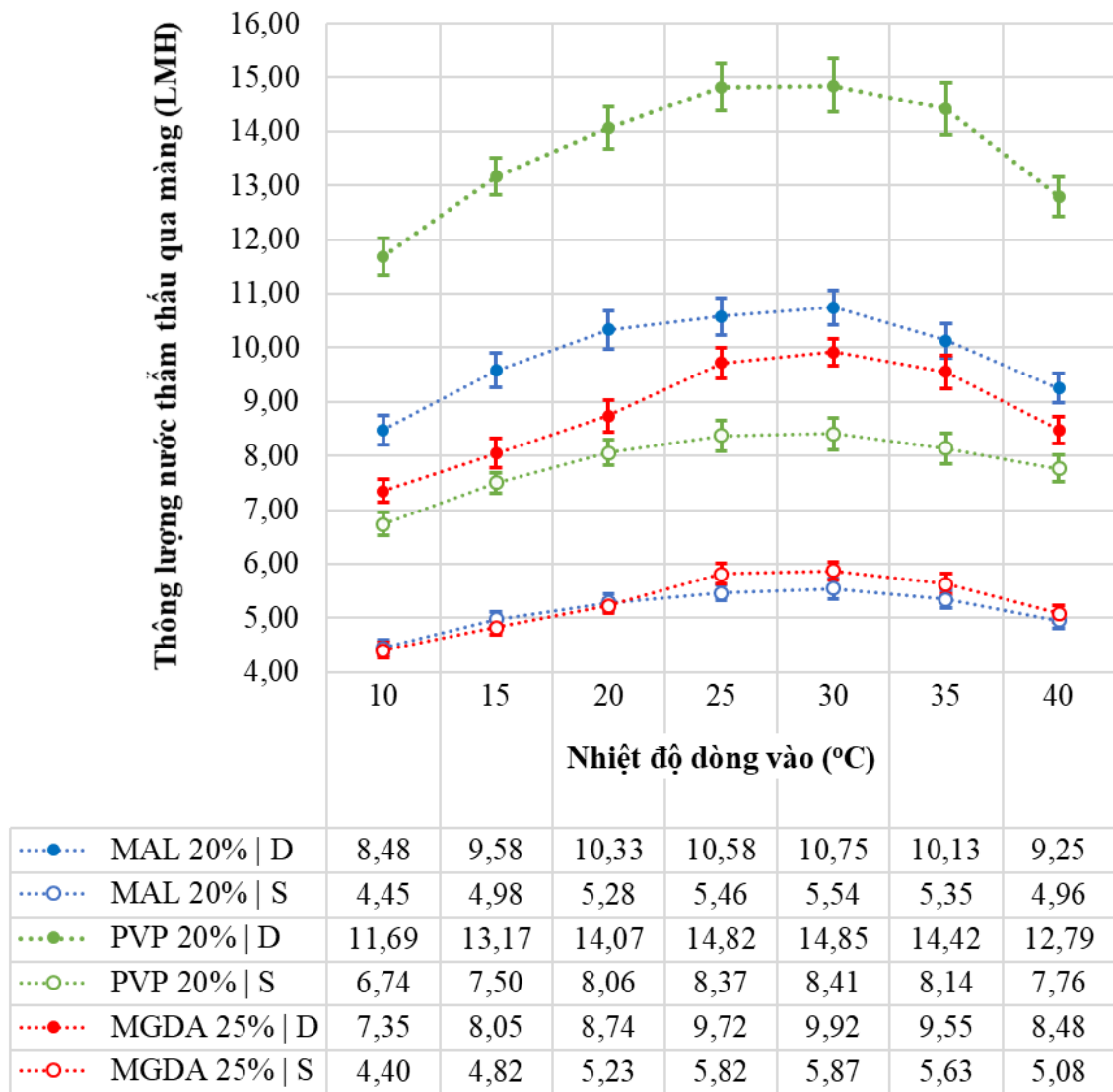
3.3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành

Thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành lên đặc trưng lõi cuốn của các dung dịch lõi cuốn được thực hiện với các thông số kỹ thuật chủ yếu như trình bày trong **Bảng 2.5**. Kết quả nghiên cứu được trình bày trong **Hình 3.25**, **Hình 3.26**, **Hình 3.27**.

Kết quả thí nghiệm cho thấy, 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 lựa chọn, 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 giá trị hệ số tổn hao R_{ds} 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 lõi cuốn đều có xu hướng giảm.

Như đã trình bày trong phần **Tổng quan nghiên cứu**, 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 lõi 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 thí 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.

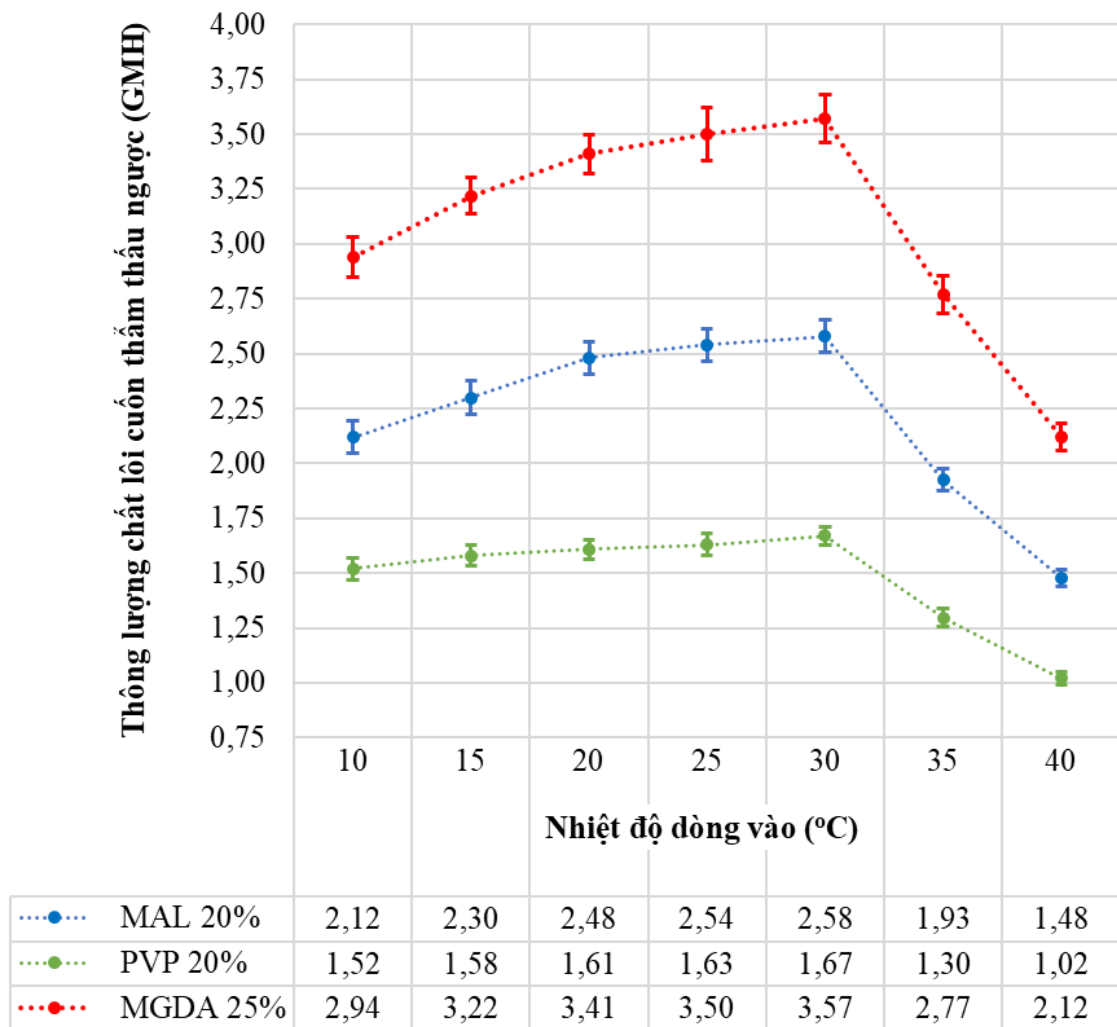


Hình 3.25. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành lên đặc trưng lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%

* mẫu D tương ứng dòng cần xử lý là nước de-ion, mẫu S tương ứng dòng cần xử lý là dung dịch NaCl 10‰

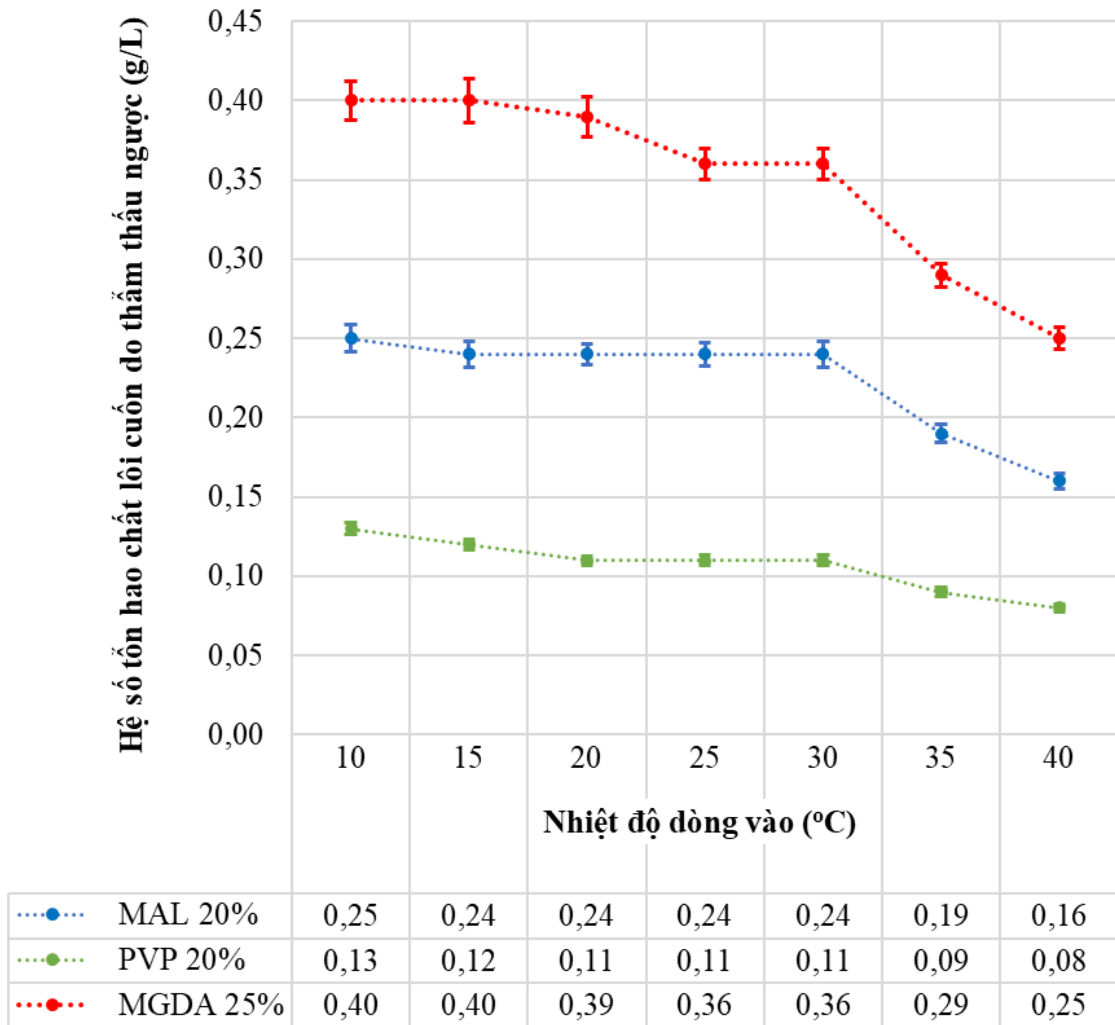
Nguyên nhân dẫn tới hiện tượng trên có thể là do sự biến đổi về mặt tính chất của màng lọc phụ thuộc vào điều kiện nhiệt độ. Cụ thể, khi nhiệt độ tăng cao, rất có thể cấu trúc lỗ xốp của màng đã xuất hiện sự thay đổi nhất định về mặt kích thước cũng như độ tương hợp hoá học, gây cản trở quá trình chuyển khối của nước và các

phân tử chất tan khác qua màng. Kết quả này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc nghiên cứu 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.



Hình 3.26. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành lên thông lượng Js của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%

Nhìn chung, điều kiện vận hành phù hợp nhất được xác định trong khuôn khổ Luận án này là khoảng 25 – 30 °C, áp dụng cho cả ba loại dung dịch lõi cuộn PVP 20%, MAL 20%, và MGDA 25%. Đáng chú ý, đây cũng là khoảng nhiệt độ môi trường thường được ghi nhận tại nhiều vùng tại Việt Nam [225], cho thấy tính phù hợp của tổ hợp các chất lõi cuộn được lựa chọn và màng lọc được lựa chọn cho các ứng dụng khử mặn sản xuất nước ngọt phục vụ nhu cầu sản xuất và sinh hoạt trong nước. Trong trường hợp nhiệt độ môi trường hạ thấp, ngưỡng nhiệt độ trên cũng có thể dễ dàng được duy trì thông qua vận dụng nguồn nhiệt thải từ các hoạt động sản xuất công nghiệp [226].



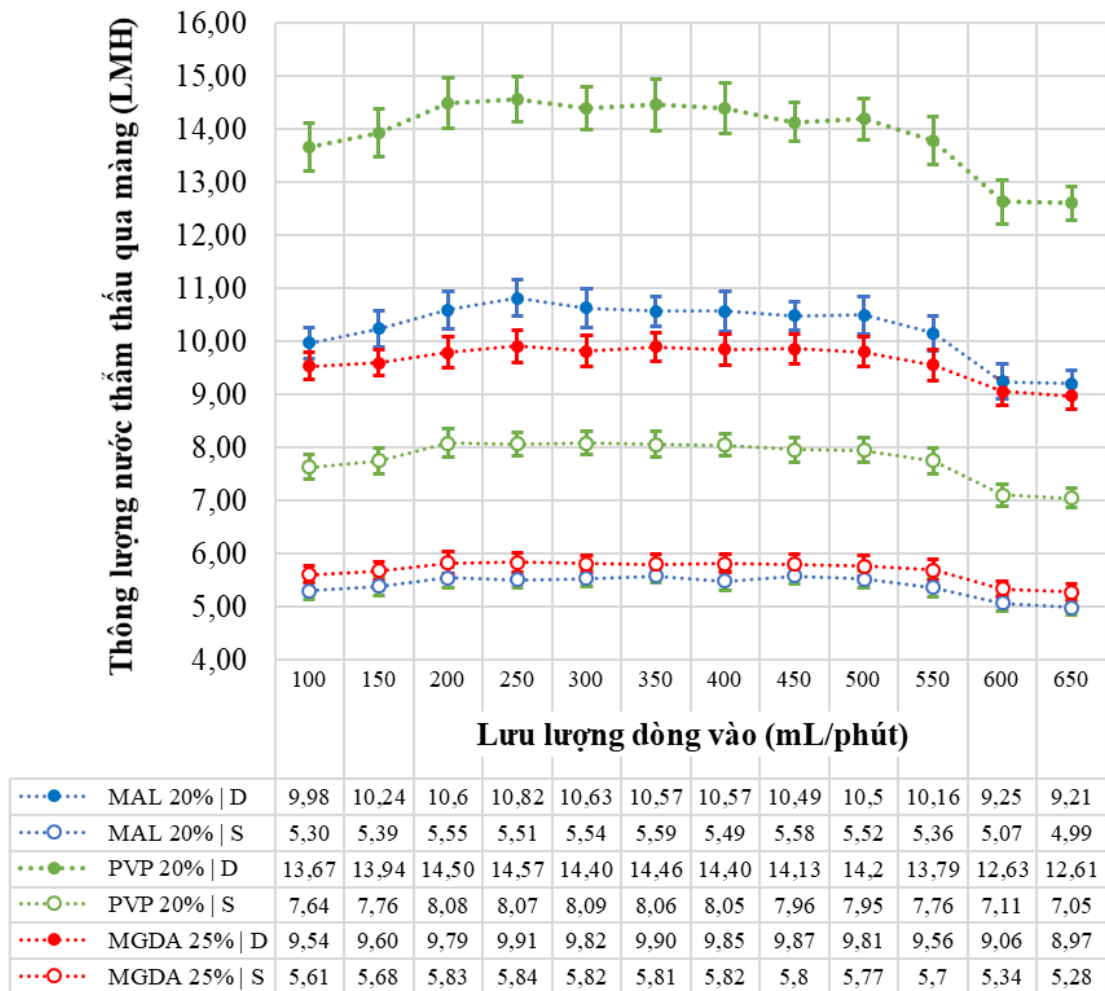
Hình 3.27. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành lên hệ số tổn hao Rds của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%

3.3.3. Ảnh hưởng của lưu lượng dòng

Thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành lên đặc trưng lõi cuộn của các dung dịch lõi cuộn được thực hiện với các thông số kỹ thuật chủ yếu như trình bày trong **Bảng 2.5**. Kết quả nghiên cứu được trình bày trong **Hình 3.28**, **Hình 3.29**, và **Hình 3.30**.

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 Jw. 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.

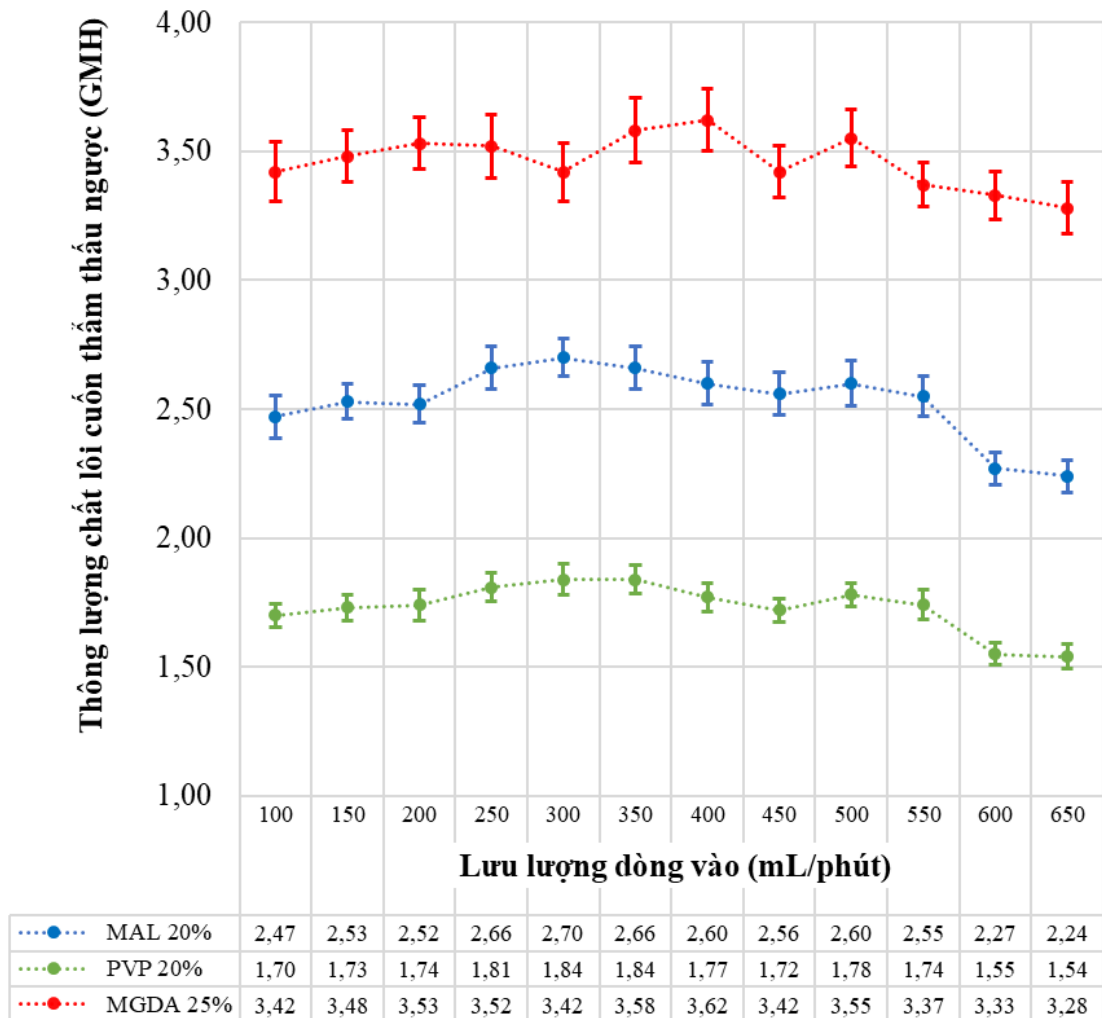


Hình 3.28. Ảnh hưởng của lưu lượng dòng vào lên đặc trưng lõi cuốn của dung dịch lõi cuốn MAL 20%, dung dịch lõi cuốn PVP 20%, và dung dịch lõi cuốn MGDA 25%

* mẫu D tương ứng dòng cần xử lý là nước de-ion,
mẫu S tương ứng dòng cần xử lý là dung dịch NaCl 10‰

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 [166].

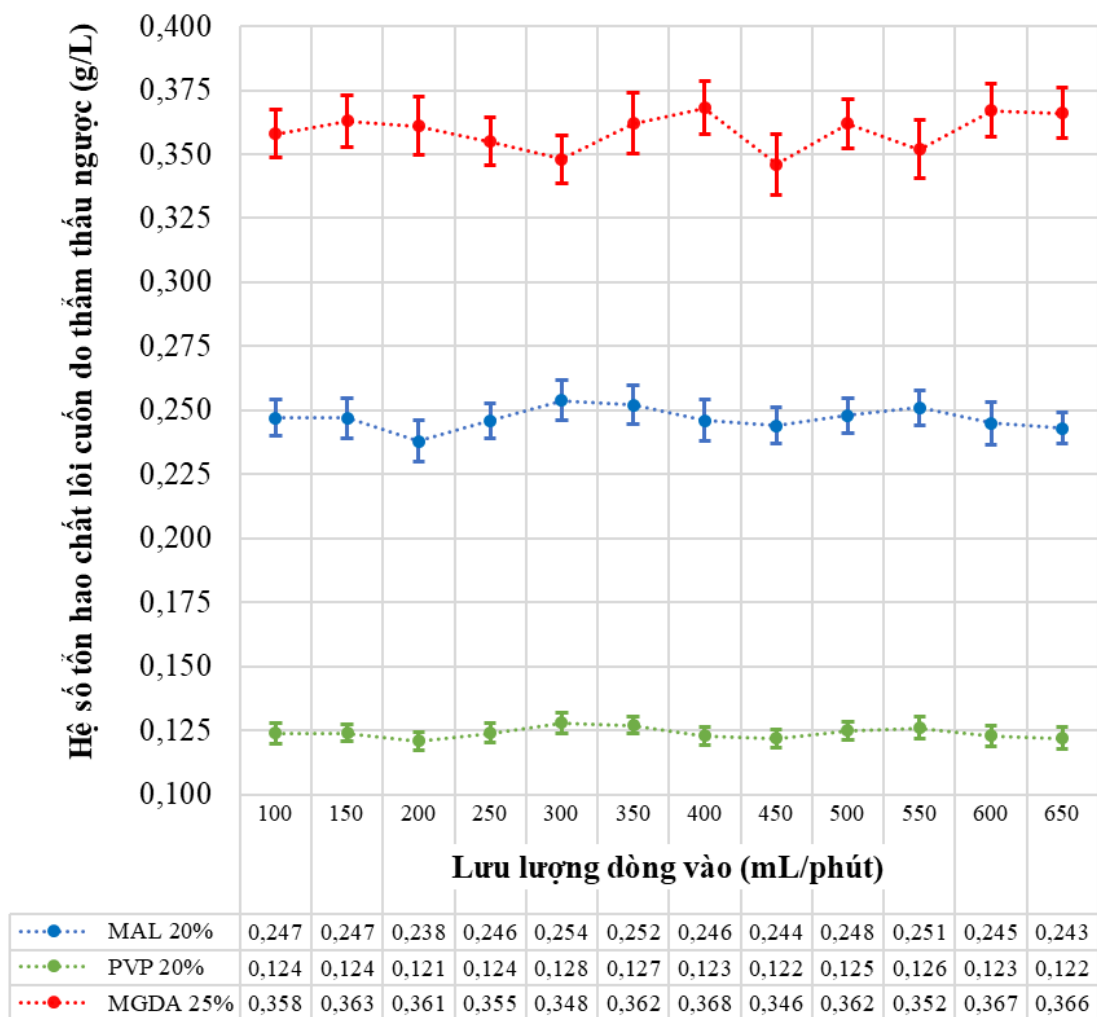


Hình 3.29. Ảnh hưởng của lưu lượng dòng vào lên thông lượng J_s của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%

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 lựa chọn khảo sát.

Đối với tổ hợp chất lõi cuộn MGDA và axit citric, mặc dù giá trị thông lượng Js thay đổi theo quy luật không quá rõ ràng trong khoảng lưu lượng dòng cần xử lý được lựa chọn khảo sát, tuy nhiên giá trị hệ suất tổn hao Rds 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. Nhìn chung, khi cân nhắc đến yếu tố năng lượng cần thiết để vận hành hệ thống bơm tuần hoàn, thì khoảng giá trị lưu lượng dòng cần xử lý 250 – 350 mL/phút được xác định là phù hợp nhất cho cả ba loại dung dịch lõi cuộn.



Hình 3.30. Ảnh hưởng của lưu lượng dòng vào lên hệ số tổn hao Rds của dung dịch lõi cuộn MAL 20%, dung dịch lõi cuộn PVP 20%, và dung dịch lõi cuộn MGDA 25%

3.4. TỐI ƯU HOÁ CÁC ĐIỀU KIỆN VẬN HÀNH CỦA HỆ THỐNG MÀNG FO

3.4.1. Tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO sử dụng dung dịch lõi cuộn MAL 20%

Thí nghiệm tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO sử dụng dung dịch lõi cuộn MAL 20% được thực hiện với các thông số kỹ thuật chủ yếu như trình bày trong **Bảng 2.6** và **Bảng 2.7**. Kết quả nghiên cứu được trình bày trong **Bảng 3.1**.

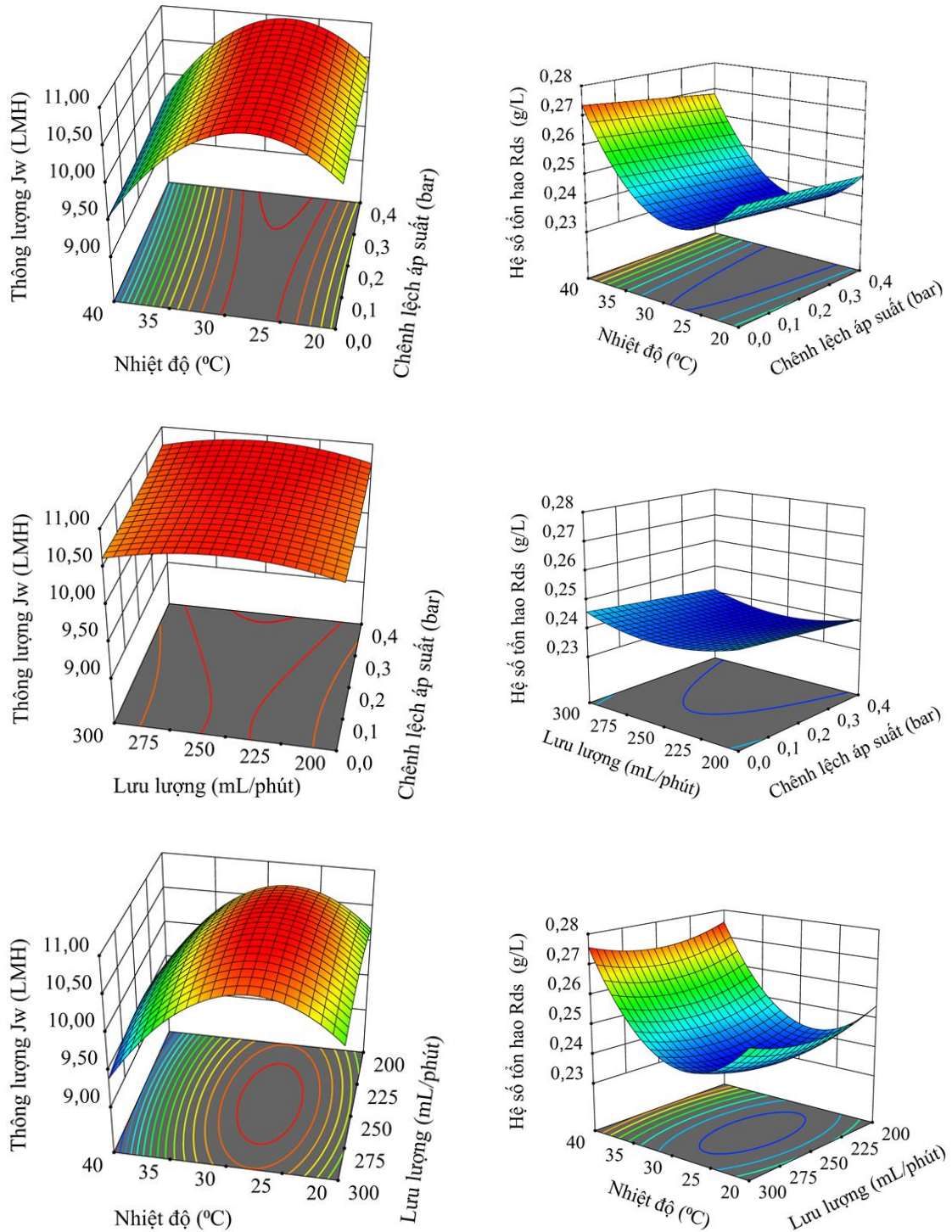
Bảng 3.1. Kết quả đánh giá ảnh hưởng của các điều kiện vận hành lên hiệu quả lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn MAL 20%

STD	Chênh lệch áp suất dòng vào (bar)	Nhiệt độ vận hành (°C)	Lưu lượng dòng vào (mL/phút)	Thông lượng Jw (LMH)	Hệ số tổn hao Rds (g/L)
1	0,0	20	250	10,35	0,252
2	0,4	20	250	10,46	0,248
3	0,0	40	250	9,55	0,273
4	0,4	40	250	9,66	0,268
5	0,0	30	200	10,63	0,246
6	0,4	30	200	10,73	0,241
7	0,0	30	300	10,63	0,246
8	0,4	30	300	10,75	0,241
9	0,2	20	200	10,19	0,254
10	0,2	40	200	9,40	0,276
11	0,2	20	300	10,18	0,254
12	0,2	40	300	9,39	0,276
13	0,2	30	250	10,83	0,239
14	0,2	30	250	10,82	0,239
15	0,2	30	250	10,83	0,239
16	0,2	30	250	10,83	0,239
17	0,2	30	250	10,83	0,238

Dựa trên kết quả kiểm tra tổng bình phương mô hình tuần tự và kiểm tra thống kê mô hình tổng hợp (**Bảng PL1** và **Bảng PL2**), 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 và các kết quả đánh giá. Cụ thể, mô hình bậc hai cung cấp giá trị p thấp nhất (thấp hơn 0,0001) trong kiểm tra tổng bình phương mô hình tuần tự, đồng thời cũng đạt được các giá trị “ R^2 hiệu chỉnh” và “ R^2 dự đoán” gần mức tối đa trong kiểm tra thống kê mô hình tổng hợp. Ngoài ra, giá trị “ R^2 dự đoán” của mô hình bậc hai là gần như bằng với giá trị “ R^2 hiệu chỉnh”, với mức chênh lệch nhỏ hơn 0,0002. Dựa trên những kết quả này, mô hình bậc hai đã được chọn để phân tích thêm các dữ liệu thực nghiệm.

Tiếp theo, kỹ thuật phân tích phương sai (ANOVA) đã được sử dụng để kiểm tra ý nghĩa thống kê của phương trình bậc hai dùng cho mô tả mối quan hệ giữa các biến đầu vào được khảo sát và các kết quả đánh giá, với kết quả cụ thể được trình bày trong **Bảng PL3** và **Bảng PL4**. Kết quả phân tích cho thấy, phương trình bậc hai thể hiện đầy đủ mối quan hệ thực tế giữa các biến đầu vào được nghiên cứu và các kết quả đánh giá. Đặc biệt, theo kết quả phân tích ANOVA, mô hình được chọn cung cấp giá trị F đủ cao, tương ứng với việc các biến trong phương trình bậc hai sở hữu ảnh hưởng đáng kể đến giá trị của các kết quả đánh giá. Đồng thời, mô hình phương trình bậc hai cũng cho giá trị hệ số xác định R^2 và giá trị R^2 sau điều chỉnh rất cao, cho thấy mối tương quan cao giữa kết quả thu được từ thực nghiệm và kết quả dự đoán theo mô hình phương trình bậc hai. Ngoài ra, giá trị F khá thấp cho thấy độ lệch của mô hình phương trình bậc hai là không đáng kể khi so sánh với sai số thuần túy, trong khi giá trị độ chính xác phù hợp của mô hình phương trình bậc hai cũng cao hơn đáng kể so với ngưỡng mong muốn, cho thấy lượng dữ liệu thực nghiệm đầu vào là đầy đủ để xây dựng mô hình phương trình bậc hai như đã chọn.

Kết quả phân tích ANOVA cho thấy mô hình phương trình bậc hai có thể được sử dụng để 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. Bên cạnh đó, dữ liệu thực nghiệm cũng được phân tích để kiểm tra mối quan hệ giữa giá trị thực tế và giá trị dự đoán của các kết quả đánh giá, cũng như mức chênh lệch giữa những giá trị này. Như thể hiện trong **Hình PL1**, đối với hầu hết các kết quả đánh giá, mức chênh lệch giữa giá trị thực tế và giá trị dự đoán đều nhỏ hơn 10%, đồng thời đều nằm gần trên đường tuyến tính. Ngoài ra, các điểm dữ liệu trên biểu đồ xác suất chuẩn của phần dư chuẩn hoá Student cũng khá gần với một đường thẳng. Những kết quả này chỉ ra rằng mô hình được xây dựng là phù hợp, và các giả định cơ bản của phân tích liên quan đến các yếu tố có ý nghĩa đã được thỏa mãn.



Hình 3.31. Kết quả phân tích bề mặt đáp ứng nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số điều kiện vận hành lên thông lượng J_w (trái) và hệ số tổn hao R_{ds} (phải) khi sử dụng dung dịch lõi cuộn MAL 20%

Kết quả phân tích bề mặt đáp ứng (**Hình 3.31**) 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 dung dịch lõi cuộn MAL 20%. 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 nhiệt độ 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: 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. 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 như trình bày trong **Bảng 2.7**, và cần thiết phải xác minh lại nếu áp dụng ngoài phạm vi này. Ngoài ra, dựa trên những kết quả thí nghiệm 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‰.

3.4.2. Tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO sử dụng dung dịch lồi cuốn PVP 20%

Thí nghiệm tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO sử dụng dung dịch lồi cuốn PVP 20% được thực hiện với các thông số kỹ thuật chủ yếu như trình bày trong **Bảng 2.6** và **Bảng 2.7**. Kết quả nghiên cứu được trình bày trong **Bảng 3.2**.

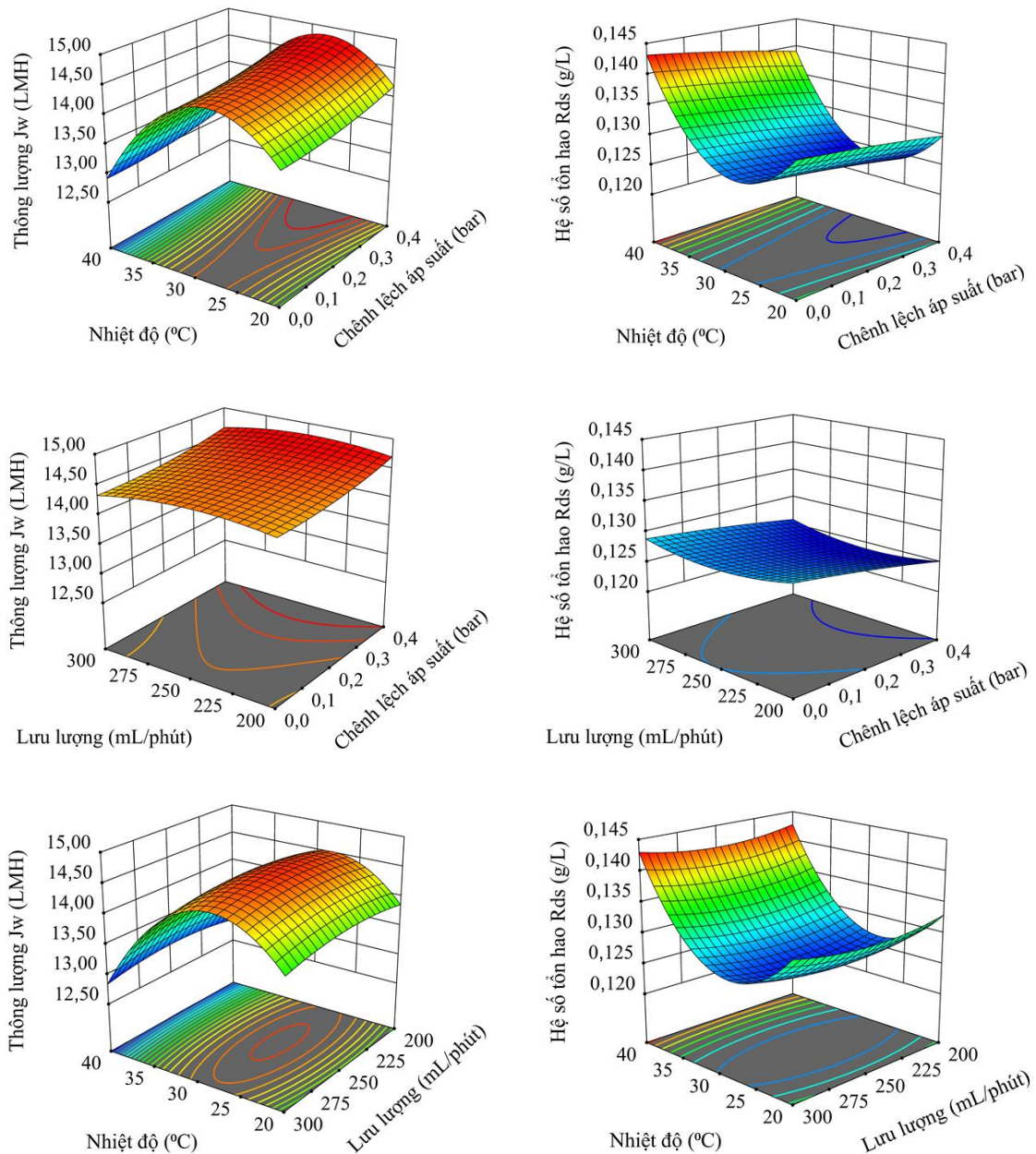
Dựa trên kết quả kiểm tra tổng bình phương mô hình tuần tự và kiểm tra thống kê mô hình tổng hợp (**Bảng PL5** và **Bảng PL6**), có thể xác định được rằng mô hình bậc hai là phù hợp nhất để mô tả mối quan hệ giữa các biến đầu vào được khảo sát và các kết quả đánh giá. Cụ thể, mô hình bậc hai cung cấp giá trị p thấp nhất (thấp hơn 0,0001) trong kiểm tra Tổng bình phương mô hình tuần tự, đồng thời cũng đạt được các giá trị “ R^2 hiệu chỉnh” và “ R^2 dự đoán” gần mức tối đa trong kiểm tra Thống kê mô hình tổng hợp. Ngoài ra, giá trị “ R^2 dự đoán” của mô hình bậc hai là gần như bằng với giá trị “ R^2 hiệu chỉnh”, với mức chênh lệch nhỏ hơn 0,0002. Dựa trên những kết quả này, mô hình bậc hai đã được chọn để phân tích thêm dữ liệu thực nghiệm.

Bảng 3.2. Kết quả đánh giá ảnh hưởng của các điều kiện vận hành lên hiệu quả lôi cuốn của dung dịch lôi cuốn PVP 20%

STD	Chênh lệch áp suất dòng vào (bar)	Nhiệt độ vận hành (°C)	Lưu lượng dòng vào (mL/phút)	Thông lượng Jw (LMH)	Hệ số tổn hao Rds (g/L)
1	0,0	20	250	13,89	0,133
2	0,4	20	250	14,19	0,130
3	0,0	40	250	12,93	0,143
4	0,4	40	250	13,22	0,139
5	0,0	30	200	14,38	0,129
6	0,4	30	200	14,71	0,125
7	0,0	30	300	14,32	0,129
8	0,4	30	300	14,65	0,126
9	0,2	20	200	13,87	0,133
10	0,2	40	200	12,89	0,143
11	0,2	20	300	13,82	0,133
12	0,2	40	300	12,84	0,143
13	0,2	30	250	14,57	0,126
14	0,2	30	250	14,59	0,126
15	0,2	30	250	14,56	0,126
16	0,2	30	250	14,58	0,126
17	0,2	30	250	14,56	0,126

Tiếp theo, kỹ thuật phân tích phương sai đã được sử dụng để kiểm tra ý nghĩa thống kê của phương trình bậc hai dùng cho mô tả mối quan hệ giữa các biến đầu vào được khảo sát và các kết quả đánh giá, với kết quả cụ thể được trình bày trong **Bảng PL7** và **Bảng PL8**. Kết quả phân tích cho thấy, phương trình bậc hai thể hiện đầy đủ mối quan hệ thực tế giữa các biến đầu vào được nghiên cứu và các kết quả đánh giá. Đặc biệt, theo kết quả phân tích ANOVA, mô hình được chọn cung cấp giá trị F đủ cao, tương ứng với việc các biến trong phương trình bậc hai sở hữu ảnh hưởng đáng kể đến giá trị của các kết quả đánh giá. Đồng thời, mô hình phương trình bậc hai cũng cho giá trị hệ số xác định R^2 và giá trị R^2 sau điều chỉnh rất cao,

cho thấy mối tương quan cao giữa kết quả thu được từ thực nghiệm và kết quả dự đoán theo mô hình phương trình bậc hai. Ngoài ra, giá trị F khá thấp cho thấy độ lệch của mô hình phương trình bậc hai là không đáng kể khi so sánh với sai số thuần túy, trong khi giá trị độ chính xác phù hợp của mô hình phương trình bậc hai cũng cao hơn đáng kể so với ngưỡng mong muốn, cho thấy lượng dữ liệu thực nghiệm đầu vào là đầy đủ để xây dựng mô hình phương trình bậc hai như đã chọn.



Hình 3.32. Kết quả phân tích bề mặt đáp ứng nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số điều kiện vận hành lên thông lượng J_w (trái) và hệ số tổn hao R_{ds} (phải) khi sử dụng dung dịch lô cuộn PVP 20%

Kết quả phân tích ANOVA cho thấy mô hình phương trình bậc hai có thể được sử dụng để 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. Bên cạnh đó, dữ liệu thực nghiệm cũng được phân tích để kiểm tra mối quan hệ giữa giá trị thực tế và giá trị dự đoán của các kết quả đánh giá, cũng như mức chênh lệch giữa những giá trị này. Như thể hiện trong **Hình PL2**, đối với hầu hết các kết quả đánh giá, mức chênh lệch giữa giá trị thực tế và giá trị dự đoán đều nhỏ hơn 10%, đồng thời đều nằm gần trên đường tuyến tính. Ngoài ra, các điểm dữ liệu trên biểu đồ xác suất chuẩn của phân dư chuẩn hoá Student cũng khá gần với một đường thẳng. Những kết quả này chỉ ra rằng mô hình được xây dựng là phù hợp, và các giả định cơ bản của phân tích liên quan đến các yếu tố có ý nghĩa đã được thỏa mãn.

Kết quả phân tích bề mặt đáp ứng (**Hình 3.32**) cho thấy nhiệt độ vận hành là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến cả thông lượng J_w và hệ số tổn hao Rds khi sử dụng dung dịch lõi cuộn PVP 20%. Ngược lại, lưu lượng dòng vào có ảnh hưởng tương đối nhỏ đến cả thông lượng J_w và hệ số tổn hao Rds, đặc biệt là khi chênh lệch áp suất dòng vào được giữ cố định và chỉ thay đổi nhiệt độ vận hành. Tương tự, chênh lệch áp suất dòng vào cũng chỉ tạo thành ảnh hưởng đáng kể lên thông lượng J_w và hệ số tổn hao Rds khi lưu lượng dòng vào được giữ cố định và chỉ thay đổi nhiệt độ vận hành.

Nhìn chung, kết quả này là khá tương đồng khi so sánh với dung dịch lõi cuộn MAL 20%. Việc lưu lượng dòng vào có ảnh hưởng tương đối nhỏ đến hiệu quả lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn PVP 20% có thể được giải thích là do trong khoảng giá trị khảo sát, chế độ chảy của dung dịch lõi cuộn PVP 20% là tương đối ổn định, trong khi đối với dung dịch lõi cuộn MAL 20% thì đã xuất hiện sự chuyển tiếp nhất định giữa các chế độ chảy khác nhau. Với mục tiêu đạt được giá trị thông lượng J_w cao nhất và giá trị hệ số tổn hao Rds 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: 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 Rds 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 Rds thu được lần lượt là $14,816 \pm 0,121$ LMH và $0,1244 \pm 0,0012$ g/L. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng các thông số điều kiện vận hành tối ưu trên chỉ có giá trị trong phạm vi giá trị đã chỉ định được nghiên cứu. Cần phải thực hiện thêm các thí nghiệm để xác nhận bất kỳ

phép ngoại suy/nội suy nào khác dựa trên dữ liệu thực nghiệm này. Ngoài ra, dựa trên những kết quả thí nghiệm 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‰.

3.4.3. Tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO sử dụng dung dịch lồi cuộn MGDA 25%

Thí nghiệm tối ưu hoá các điều kiện vận hành của hệ thống màng FO sử dụng dung dịch lồi cuộn MGDA 25% được thực hiện với các thông số kỹ thuật chủ yếu như trình bày trong **Bảng 2.6** và **Bảng 2.7**. Kết quả nghiên cứu được trình bày trong **Bảng 3.3**.

Dựa trên kết quả kiểm tra tổng bình phương mô hình tuần tự và kiểm tra thống kê mô hình tổng hợp (**Bảng PL9** và **Bảng PL10**), 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 và các kết quả đánh giá. Cụ thể, mô hình bậc hai cung cấp giá trị p thấp nhất (thấp hơn 0,0001) trong kiểm tra Tổng bình phương mô hình tuần tự, đồng thời cũng đạt được các giá trị “ R^2 hiệu chỉnh” và “ R^2 dự đoán” gần mức tối đa trong kiểm tra Thống kê mô hình tổng hợp. Ngoài ra, giá trị “ R^2 dự đoán” của mô hình bậc hai là gần như bằng với giá trị “ R^2 hiệu chỉnh”, với mức chênh lệch nhỏ hơn 0,0002. Dựa trên những kết quả này, mô hình bậc hai đã được chọn để phân tích thêm dữ liệu thực nghiệm.

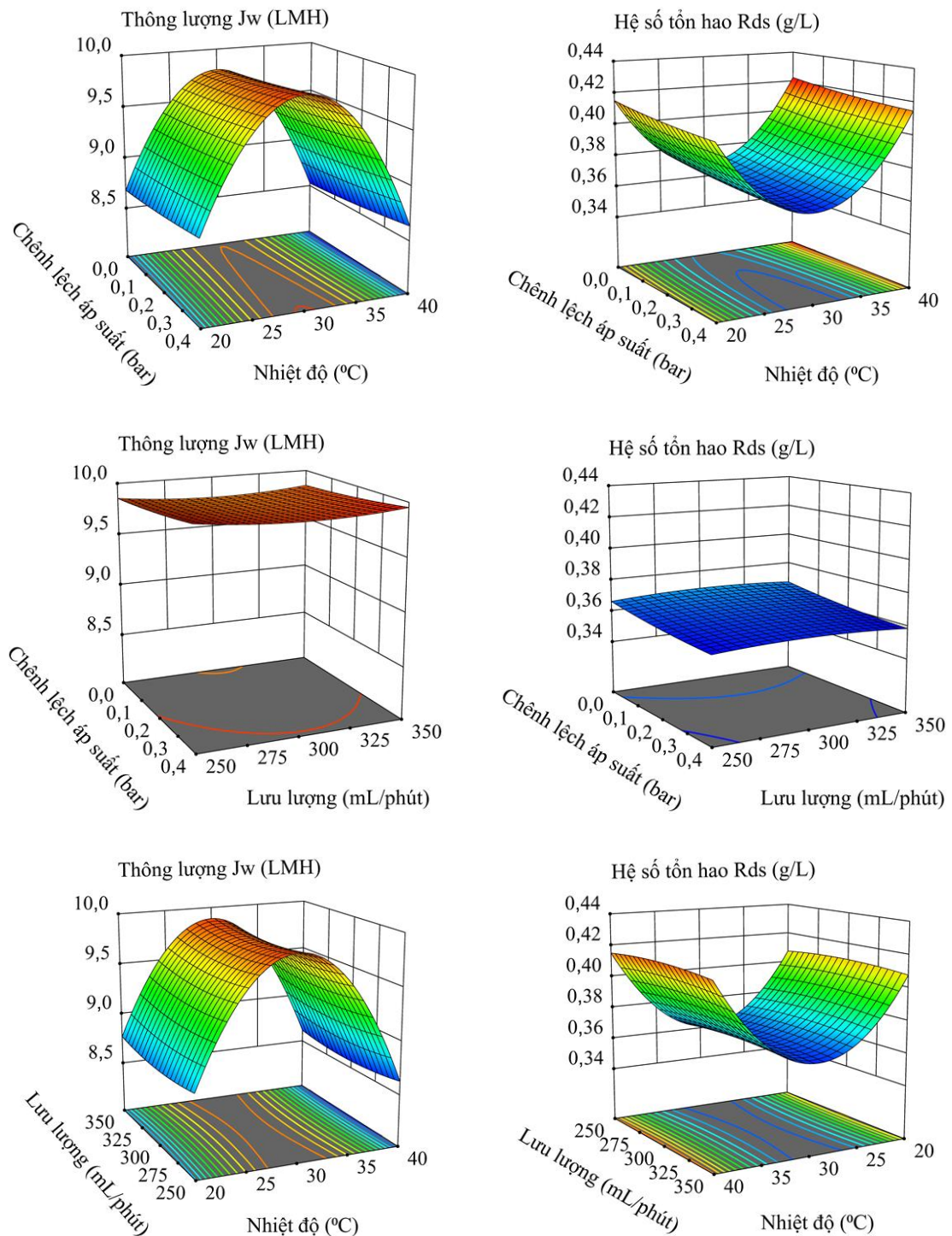
Tiếp theo, kỹ thuật phân tích phương sai đã được sử dụng để kiểm tra ý nghĩa thống kê của phương trình bậc hai dùng cho mô tả mối quan hệ giữa các biến đầu vào được khảo sát và các kết quả đánh giá, với kết quả cụ thể được trình bày trong **Bảng PL11** và **Bảng PL12**. Kết quả phân tích cho thấy, phương trình bậc hai thể hiện đầy đủ mối quan hệ thực tế giữa các biến đầu vào được nghiên cứu và các kết quả đánh giá. Đặc biệt, theo kết quả phân tích ANOVA, mô hình được chọn cung cấp giá trị F đủ cao, tương ứng với việc các biến trong phương trình bậc hai sở hữu ảnh hưởng đáng kể đến giá trị của các kết quả đánh giá. Đồng thời, mô hình phương trình bậc hai cũng cho giá trị hệ số xác định R^2 và giá trị R^2 sau điều chỉnh rất cao, cho thấy mối tương quan cao giữa kết quả thu được từ thực nghiệm và kết quả dự đoán theo mô hình phương trình bậc hai. Ngoài ra, giá trị F khá thấp cho thấy độ lệch của mô hình phương trình bậc hai là không đáng kể khi so sánh với sai số thuần tuý, trong khi giá trị độ chính xác phù hợp của mô hình phương trình bậc hai cũng cao hơn đáng kể so với ngưỡng mong muốn, cho thấy lượng dữ liệu thực nghiệm đầu vào là đầy đủ để xây dựng mô hình phương trình bậc hai như đã chọn.

Bảng 3.3. Kết quả đánh giá ảnh hưởng của các điều kiện vận hành lên hiệu quả lôi cuốn của dung dịch lôi cuốn MGDA 25%

STD	Chênh lệch áp suất dòng vào (bar)	Nhiệt độ vận hành (°C)	Lưu lượng dòng vào (mL/phút)	Thông lượng Jw (LMH)	Hệ số tổn hao Rds (g/L)
1	0,0	20	300	8,69	0,415
2	0,4	20	300	8,79	0,407
3	0,0	40	300	8,53	0,423
4	0,4	40	300	8,63	0,415
5	0,0	30	250	9,85	0,366
6	0,4	30	250	9,98	0,359
7	0,0	30	350	9,84	0,367
8	0,4	30	350	9,96	0,359
9	0,2	20	250	8,78	0,408
10	0,2	40	250	8,63	0,415
11	0,2	20	350	8,77	0,408
12	0,2	40	350	8,62	0,415
13	0,2	30	300	9,83	0,364
14	0,2	30	300	9,83	0,364
15	0,2	30	300	9,84	0,364
16	0,2	30	300	9,83	0,364
17	0,2	30	300	9,86	0,363

Kết quả phân tích ANOVA cho thấy mô hình phương trình bậc hai có thể được sử dụng để 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. Bên cạnh đó, dữ liệu thực nghiệm cũng được phân tích để kiểm tra mối quan hệ giữa giá trị thực tế và giá trị dự đoán của các kết quả đánh giá, cũng như mức chênh lệch giữa những giá trị này. Như thể hiện trong **Hình PL3**, đối với hầu hết các kết quả đánh giá, mức chênh lệch giữa giá trị thực tế và giá trị dự đoán đều nhỏ hơn 10%, đồng thời đều nằm gần trên đường tuyến tính. Ngoài ra, các điểm dữ liệu trên biểu đồ xác suất chuẩn của phân dư chuẩn hoá Student cũng khá gần với một đường

thẳng. Những kết quả này chỉ ra rằng mô hình được xây dựng là phù hợp, và các giả định cơ bản của phân tích liên quan đến các yếu tố có ý nghĩa đã được thỏa mãn.



Hình 3.33. Kết quả phân tích bề mặt đáp ứng nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số điều kiện vận hành lên thông lượng J_w (trái) và hệ số tổn hao R_{ds} (phải) khi sử dụng dung dịch lô cuộn MGDA 25%

Kết quả phân tích bề mặt đáp ứng (**Hình 3.33**) 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 dung dịch lõi cuộn MGDA 25%. Ngược lại, chênh lệch áp suất dòng vào và lưu lượng dòng vào là những yếu tố điều kiện vận hành tương đối ít ảnh hưởng đến hiệu quả lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn MGDA 25%, xét trong khoảng điều kiện vận hành được khảo sát tại mục này.

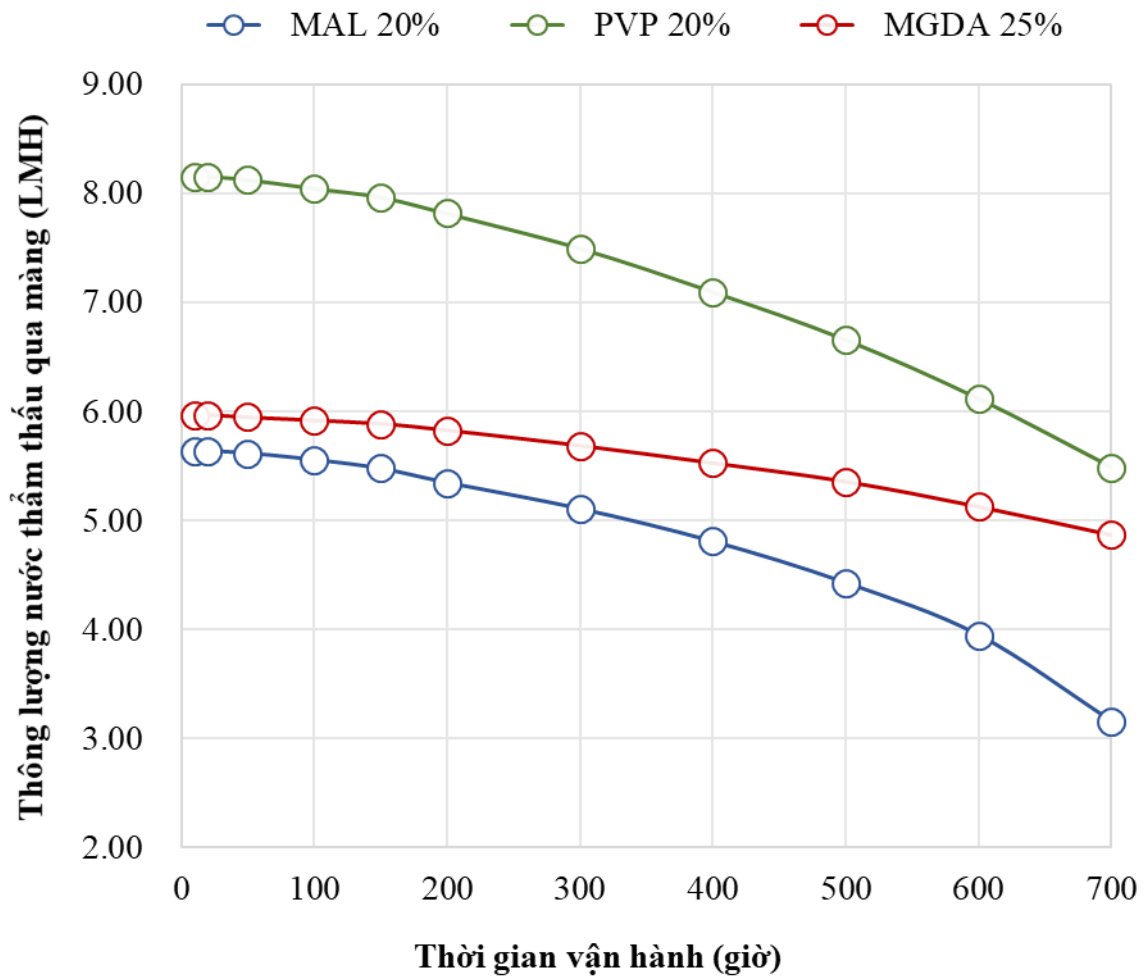
Nhìn chung, kết quả này là khá tương đồng khi so sánh với dung dịch lõi cuộn MAL 20% và dung dịch lõi cuộn PVP 20%. Việc nhiệt độ vận hành có ảnh hưởng đặc biệt lớn đến hiệu quả lõi cuộn của dung dịch lõi cuộn MGDA 25% có thể được giải thích là do cả muối MGDA-3Na và axit citric đều sở hữu khả năng phân ly thành các ion tương ứng trong dung dịch, và quá trình phân ly này phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ của dung dịch. 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: 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 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 giá trị trong phạm vi giá trị đã chỉ định được nghiên cứu. Cần phải thực hiện thêm các thí nghiệm để xác nhận bất kỳ phép ngoại suy/nội suy nào khác dựa trên dữ liệu thực nghiệm này. Ngoài ra, dựa trên những kết quả thí nghiệm 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 LÔI CUỐN CỦA CÁC DUNG DỊCH LÔI CUỐN VÀ HIỆU QUẢ CỦA PHƯƠNG PHÁP LÀM SẠCH MÀNG

Kết quả nghiên cứu (**Hình 3.34**) 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

cuốn PVP 20% giảm từ 8,16 LMH xuống còn 5,49 LMH (tương đương khoảng 33%), và dung dịch lõi cuốn 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 [172].

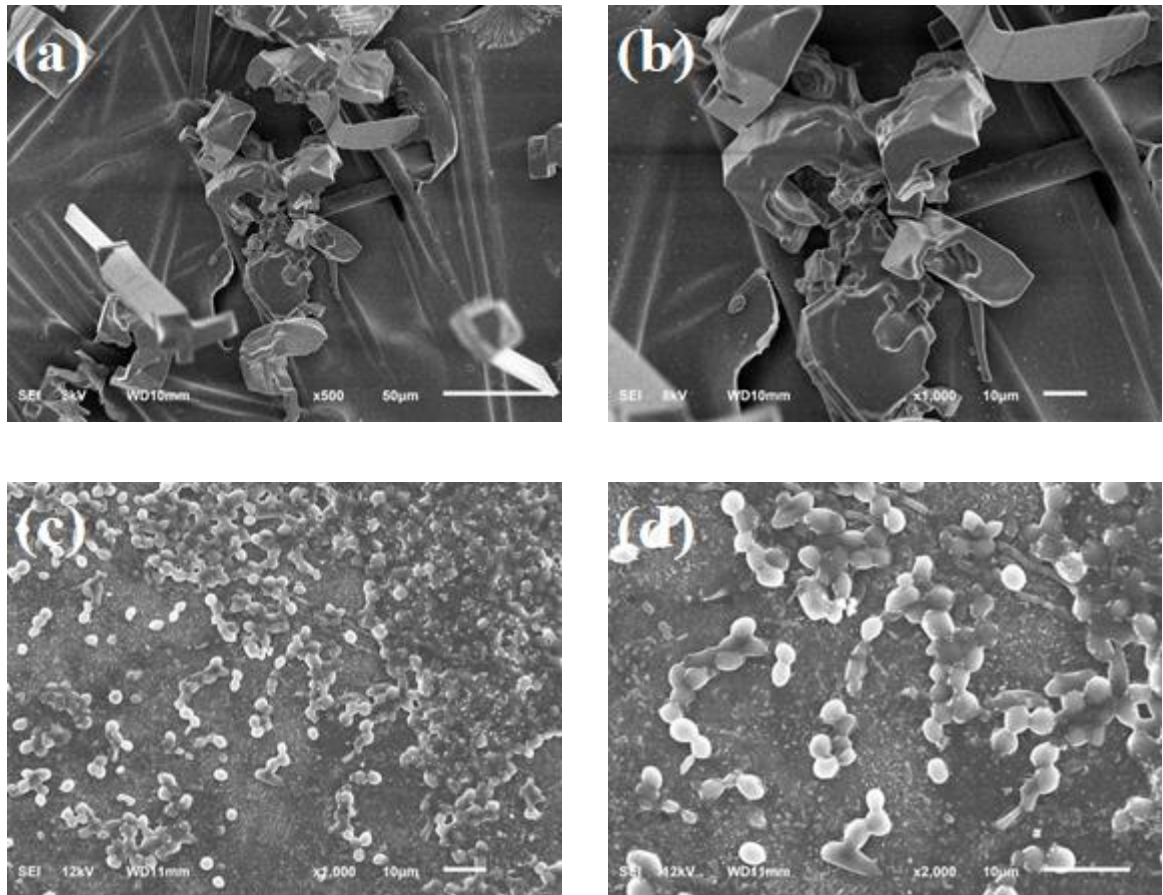


Hình 3.34. Ảnh hưởng của thời gian vận hành kéo dài lên thông lượng J_w của các dung dịch lõi cuốn

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) đã được sử dụng nhằm đánh giá chính xác hơn đặc trưng gây nhiễm bẩn màng của các loại dung dịch lõi cuốn được lựa chọn, như trình bày trên **Hình 3.35**, **Hình 3.36**, và **Hình 3.37**.

Cụ thể, qua **Hình 3.35a** và **Hình 3.35b** có thể thấy rằng trong trường hợp dung dịch lõi cuốn PVP 20% thì cơ chế nhiễm bẩn màng chủ yếu xảy ra tại phía tiếp xúc với dung dịch lõi cuốn là do sự lắng cặn của chất lõi cuốn 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 [227,228].

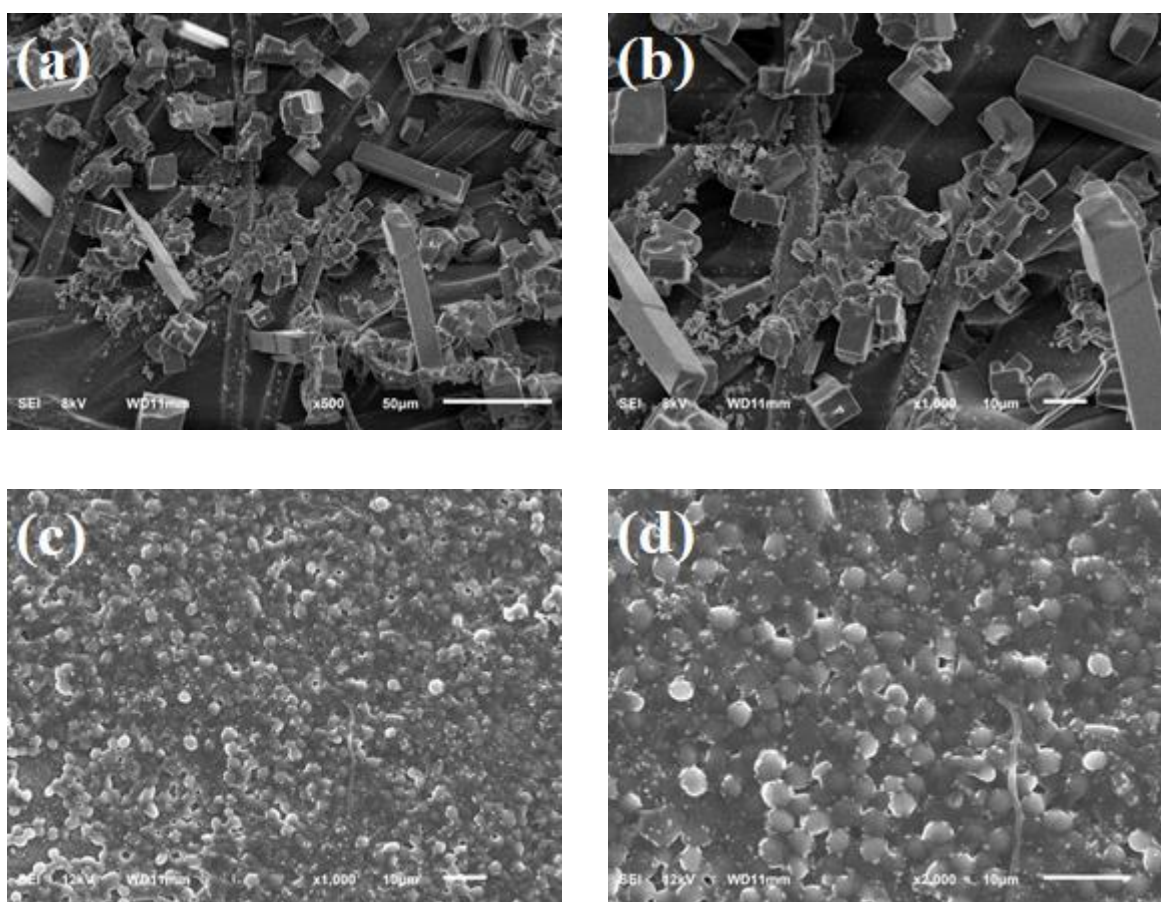


Hình 3.35. Ảnh SEM bề mặt màng lọc phía tiếp xúc với dung dịch lõi cuộn PVP 20% (trên) và phía tiếp xúc với dòng cần xử lý (dưới)

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. Cụ thể, qua **Hình 3.35c** và **Hình 3.35d** có thể thấy rằng 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 . Theo Kwan 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

[182,229,230].

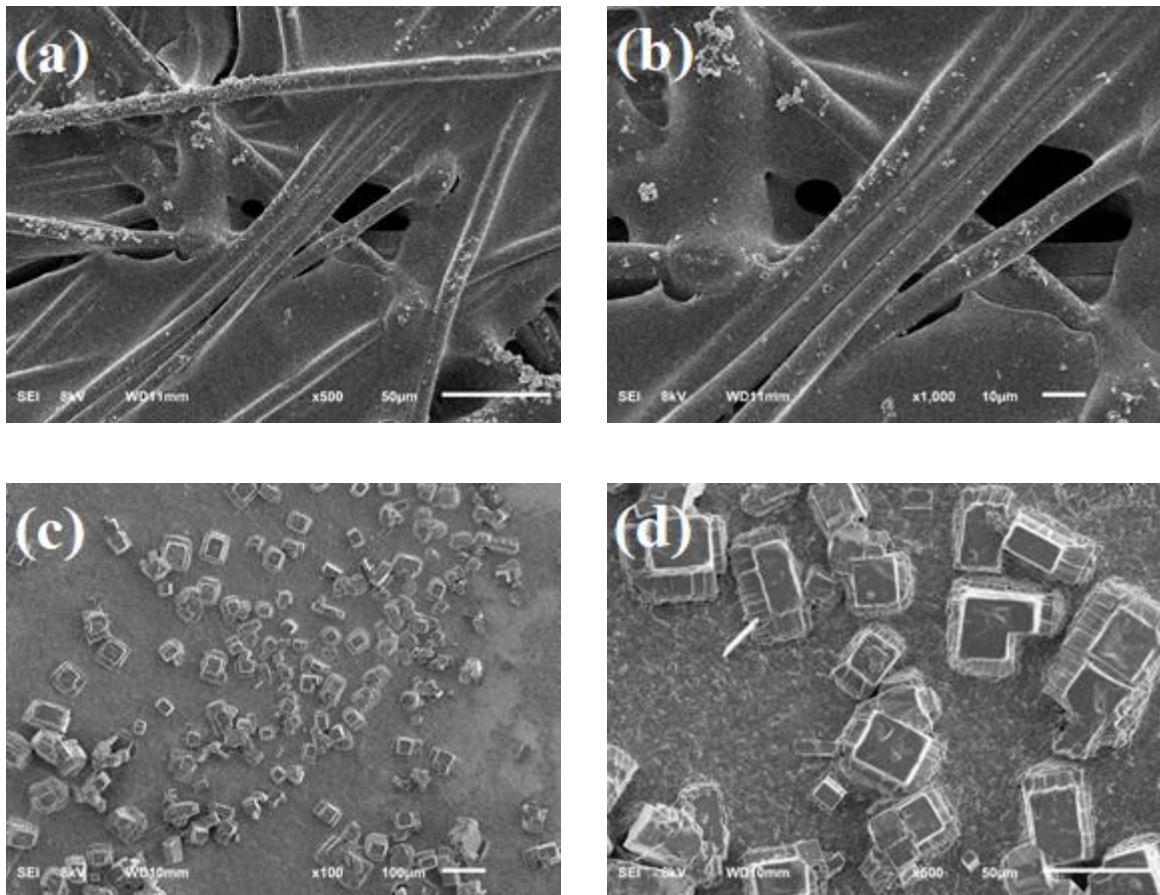
Nhận xét tương tự cũng có thể được đưa ra đối với dung dịch lõi cuộn MAL 20%, như thể hiện trên **Hình 3.36**. Cụ thể, trong trường hợp dung dịch lõi cuộn MAL 20% thì cơ chế nhiễm bẩn màng xảy ra tại phía tiếp xúc với dung dịch lõi cuộn vẫn chủ yếu là do sự lắng cặn của chất lõi cuộn cả trên bề mặt lẫn 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) (**Hình 3.36a** và **Hình 3.36b**) [231,232].



Hình 3.36. Ảnh SEM bề mặt màng lọc phía tiếp xúc với dung dịch lõi cuộn MAL 20% (trên) và phía tiếp xúc với dòng cần xử lý (dưới)

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 tương tự như đối với dung dịch lõi cuộn PVP (**Hình 3.35c** và **Hình 3.35d**). 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.

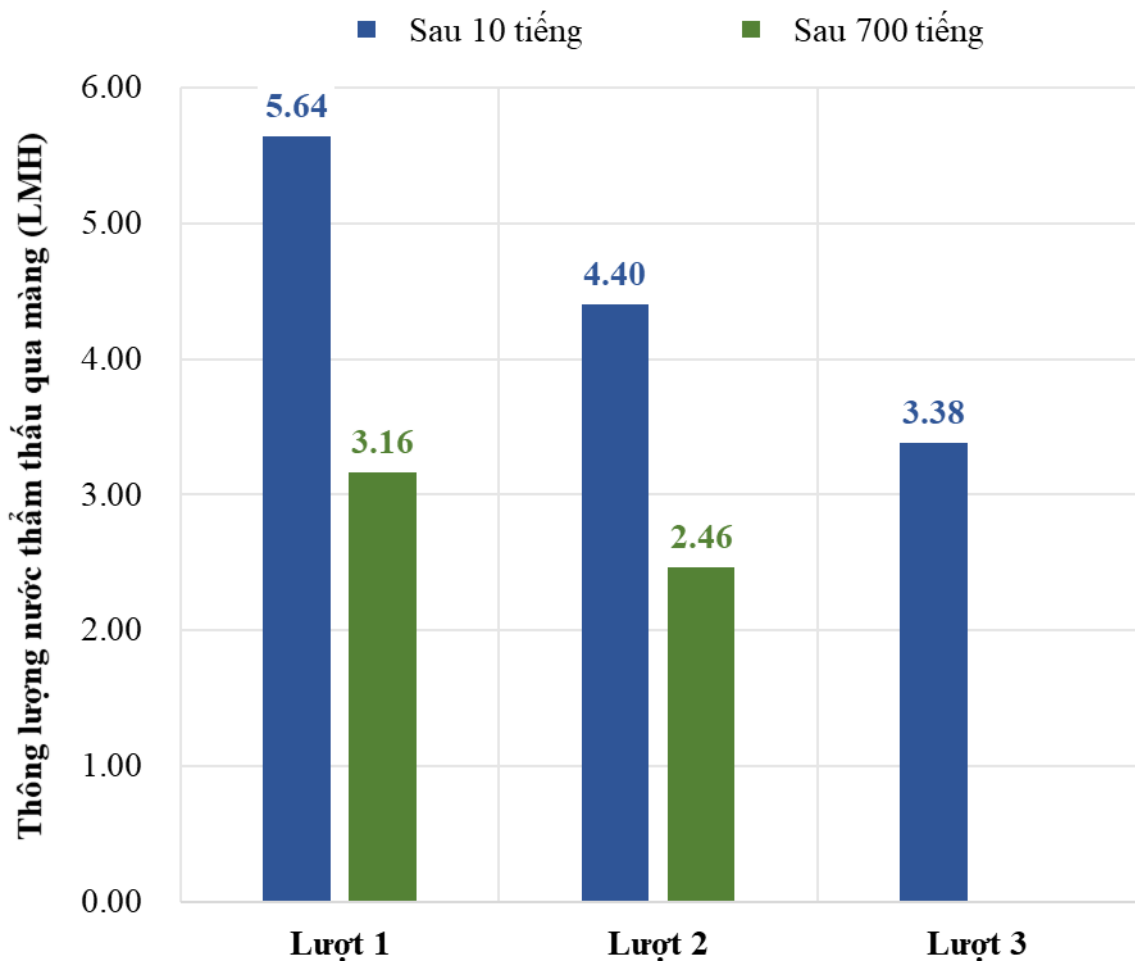


Hình 3.37. Ảnh SEM bề mặt màng lọc phía tiếp xúc với dung dịch lõi cuộn MGDA 25% (trên) và phía tiếp xúc với dòng cần xử lý (dưới)

Đáng chú ý, qua **Hình 3.37a** và **Hình 3.37b** có thể thấy rằng trong trường hợp dung dịch lõi cuộn MGDA 25%, bề mặt màng lọc tại phía dung dịch lõi cuộn 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 $10\text{ }\mu\text{m}$ (**Hình 3.37c** và **Hình 3.37d**). 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 lõi cuộn, 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 .

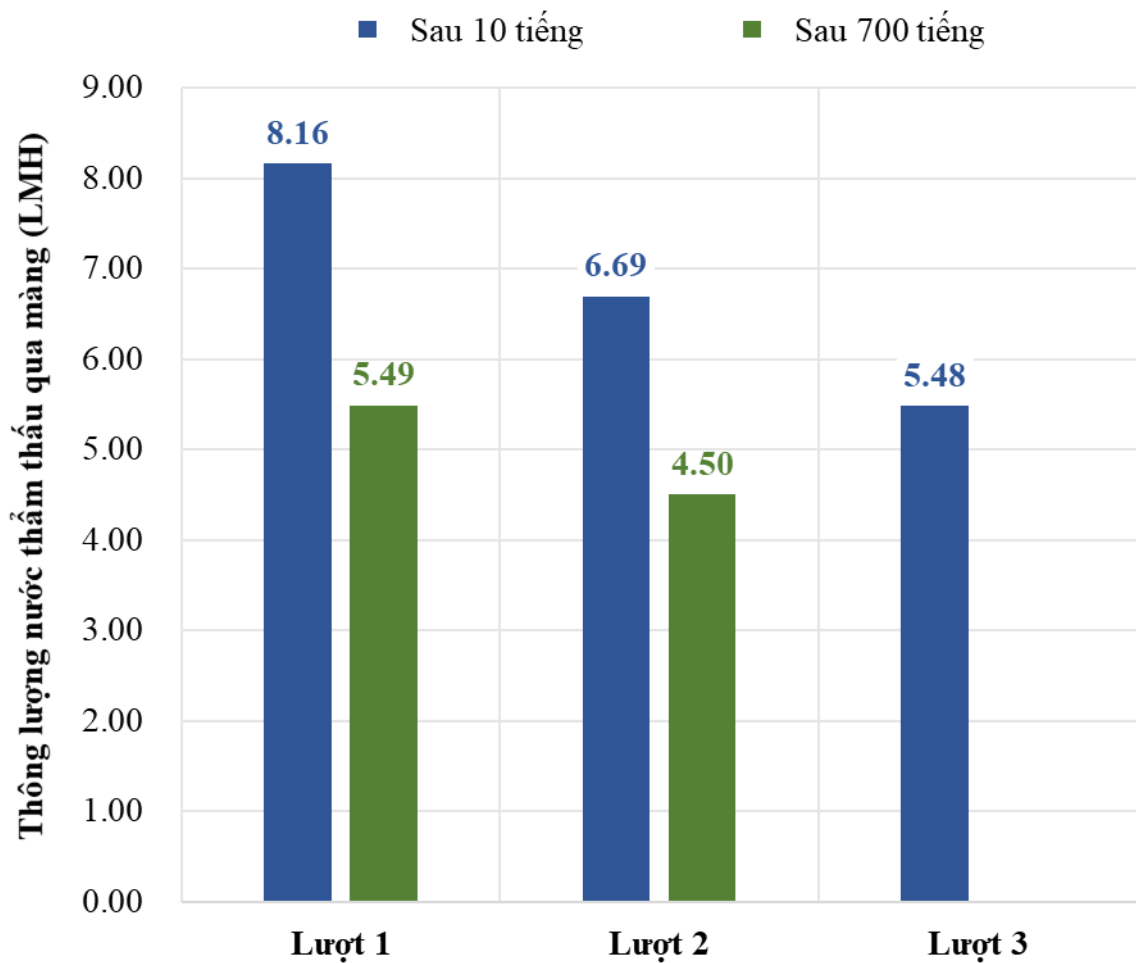
Thí nghiệm liên quan đến hiệu quả làm sạch bằng phương pháp rửa xuôi (Hình 3.38, Hình 3.39, và Hình 3.40) cho thấy, phương pháp này đã cho phép hồi phục đến 98% giá trị thông lượng J_w trong trường hợp dung dịch lồi cuộn MGDA 25%, 82% giá trị thông lượng J_w trong trường hợp dung dịch lồi cuộn PVP 20%, và 78% giá trị thông lượng J_w trong trường hợp dung dịch lồi cuộn MAL 20%. Điều này có thể được giải thích là do, trong trường hợp dung dịch lồi 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.



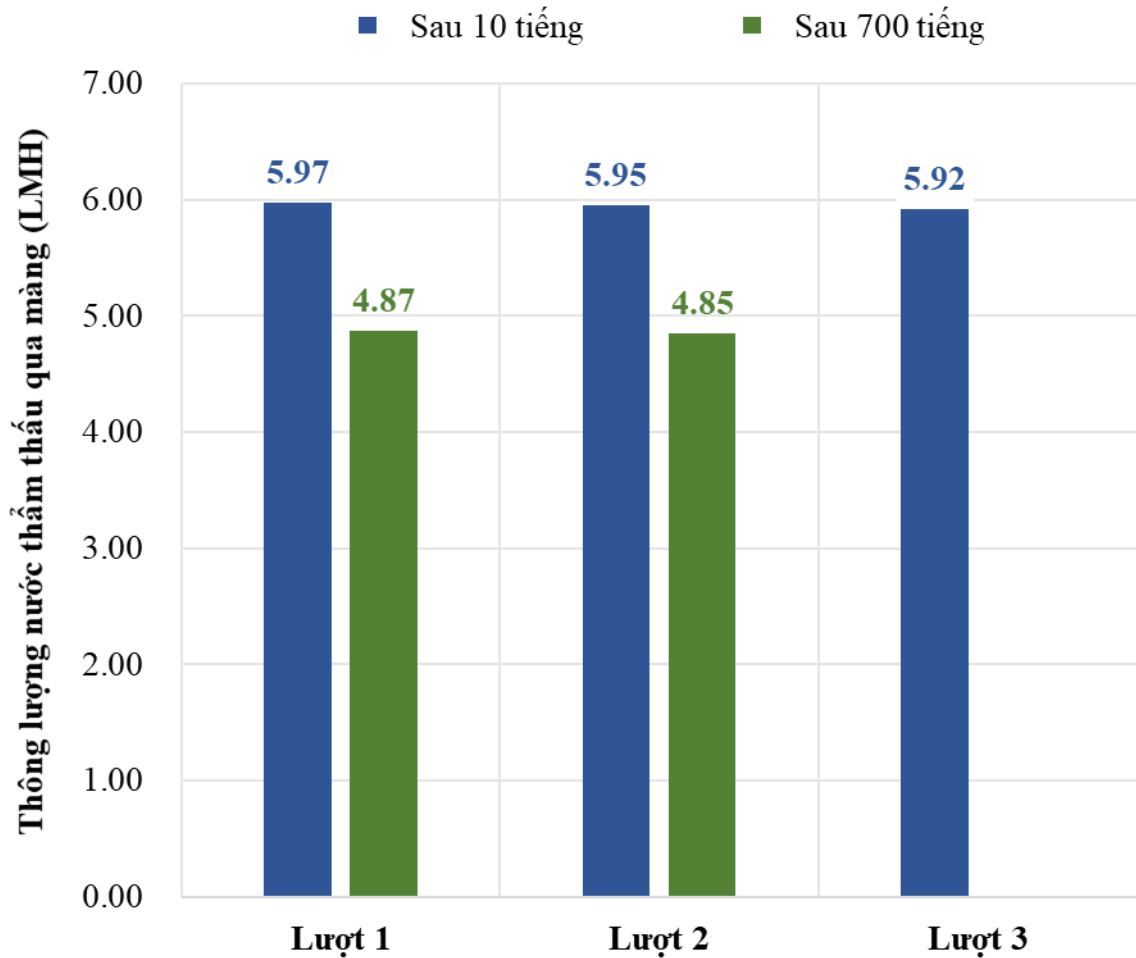
Hình 3.38. Ảnh hưởng của thời gian vận hành và phương pháp làm sạch rửa xuôi lên thông lượng J_w (dung dịch lồi cuộn MAL 20%)

Ngược lại, trong trường hợp dung dịch lồi cuộn MAL 20% và dung dịch lồi

cuốn 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 thẩm 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.



Hình 3.39. Ảnh hưởng của thời gian vận hành và phương pháp làm sạch rửa xuôi lên thông lượng J_w (dung dịch lõi cuộn PVP 20%)



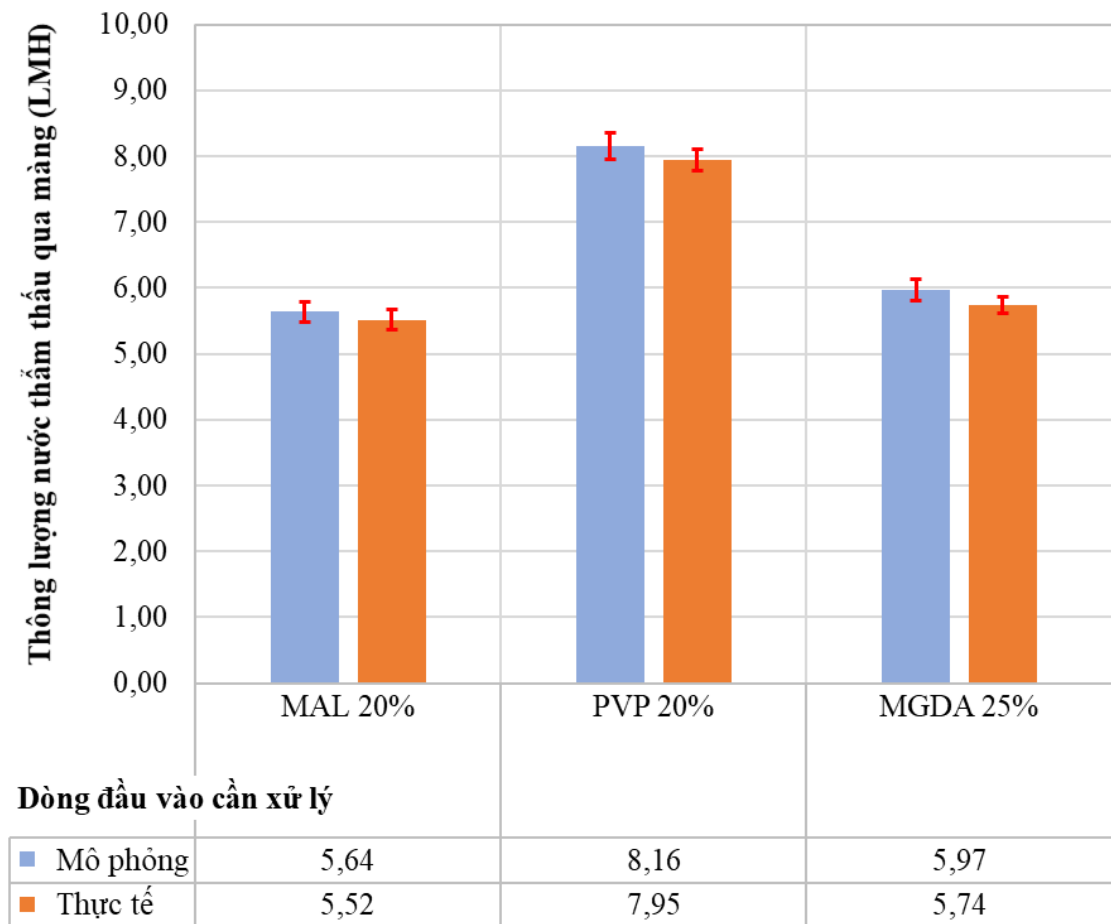
Hình 3.40. Ảnh hưởng của thời gian vận hành và phương pháp làm sạch rửa xuôi lên thông lượng J_w (dung dịch lồi cuộn MGDA 25%)

3.6. HIỆU QUẢ VẬN HÀNH TRÊN MẪU NƯỚC NHIỄM MẶN THỰC TẾ CỦA CÁC DUNG DỊCH LỒI CUỐN

Kết quả khảo sát thông lượng J_w (**Hình 3.41**) cho thấy, không tồn tại khác biệt đáng kể về mặt đặc trưng lồi cuộn của các dung dịch lồi 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 $\text{NaCl} = 10\text{‰}$).

Kết quả phân tích tính chất của các mẫu nước sạch thu được sau hoàn nguyên dung dịch lồi cuộn (**Bảng 3.4** và **Hình PL4**) cho thấy, sau khi được xử lý qua hai bước là màng FO và màng NF, sản phẩm nước sạch đầu ra đã đáp ứng tốt 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. Cụ thể, giá trị TDS của các sản phẩm nước sạch đầu ra dao động trong khoảng 296 – 427 mg/L, thấp hơn đáng kể so với ngưỡng giới hạn tối đa 1.000 mg/L theo hướng dẫn

của WHO [200] và quy chuẩn quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT [201] đối với nước sinh hoạt. Một số chỉ tiêu quan trọng khác của các sản phẩm nước sạch đầu ra (bao gồm: độ đục, màu sắc, độ cứng, asen, clorua, natri, sunphat, nitrat, nitrit, và Coliform) cũng tương đối thấp, cho thấy việc kết hợp công nghệ màng FO và màng NF đã giúp loại bỏ hầu như hoàn toàn các thành phần gây hại tồn tại trong nguồn nước cần xử lý ban đầu. Tuy nhiên, đáng chú ý là nồng độ ion Na^+ trong sản phẩm nước sạch đầu ra thu được sau hoàn nguyên dung dịch lồi cuốn MGDA 25% vẫn còn tương đối cao (120 mg/L, so với ngưỡng giới hạn 200 mg/L), mà nguyên nhân có thể là do sự tồn tại của nồng độ ion Na^+ tương đối cao thành phần dung dịch lồi cuốn MGDA 25%. Điều này đặt ra vấn đề cần nghiên cứu sử dụng một số công nghệ lọc qua màng khác để hoàn nguyên dung dịch lồi cuốn MGDA, ví dụ như công nghệ màng FO, nhằm đảm bảo tốt nhất chất lượng sản phẩm nước sạch đầu ra.



Hình 3.41. So sánh hiệu quả vận hành của các dung dịch lồi cuốn trên mẫu nước nhiễm mặn thực tế và mẫu nước mặn mô phỏng

Bảng 3.4. Chất lượng nước sạch thu được sau khi hoàn nguyên các dung dịch lồi cuộn, so sánh theo Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT

Chỉ tiêu phân tích		Dòng cần xử lý thực tế	Dung dịch lồi cuộn sử dụng			Giới hạn theo QCVN 01-1:2018/BYT [224]
			MAL 20%	PVP 20%	MGDA 25%	
Độ pH	-	7,2	6,7	6,7	6,9	6,0 – 8,5
TDS	mg/L	10.800	368	296	427	1.000
Độ đục	NTU	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	2
Màu sắc	TCU	< 5	< 5	< 5	< 5	15
Độ cứng	mg/L	150	40	40	25	300
Asen	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Natri (Na ⁺)	mg/L	4.200	10	10	120	200
Clorua (Cl ⁻)	mg/L	4.700	0,4	0,4	0,4	250
SO ₄ ²⁻	mg/L	290	< 2	< 2	< 2	250
NO ₃ ⁻	mg/L	1,63	0,91	0,97	0,94	2
NO ₂ ⁻	mg/L	0,04	< 0,015	< 0,015	< 0,015	0,05
Coliform	CFU/100mL	230	0	0	0	3

KẾT LUẬN

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

- **Nghiên cứu đặc trưng lõi cuốn cơ bản của một số dung dịch lõi cuốn tiềm năng được lựa chọn**, bao gồm dung dịch lõi cuốn chứa tổ hợp muối trinati α -DL-alanin diaxetat và axit citric (dung dịch MGDA) với tỷ lệ tính theo khối lượng = 85/15. Tại ngưỡng nồng độ 25%, dung dịch MGDA cho phép lõi cuốn nước thẩm thấu qua màng từ nguồn nước cần xử lý với độ mặn lên đến 15‰, cho giá trị thông lượng J_w trung bình sau 150 phút vận hành đạt đến 5,05 LMH. Tại bước hoàn nguyên bằng phương pháp lọc qua màng NF áp lực thấp, sản phẩm nước sạch đầu ra thu được có chỉ số TDS là khoảng 415 mg/L, thấp hơn đáng kể so với ngưỡng tối đa theo QCVN 01-1:2018/BYT. Mức độ tổn hao trung bình của chất lõi cuốn tại bước lọc qua màng NF được xác định là khoảng 2,78%. Những nghiên cứu tương tự cũng đã được tiến hành với hai loại dung dịch lõi cuốn 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 cuốn của những dung dịch lõi cuốn 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 cuốn của ba loại dung dịch lõi cuốn MAL 20%, dung dịch lõi cuốn PVP 20%, và dung dịch lõi cuốn MGDA 25%; xác định xu hướng thay đổi của thông lượng J_w và thông lượng chất lõi cuốn 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 cuốn tốt nhất cho ba loại dung dịch lõi cuốn 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 cuốn của ba loại dung dịch lõi cuốn MAL 20%, dung dịch lõi cuốn PVP 20%, và dung dịch lõi cuốn 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 cuốn (thông lượng nước thẩm thấu qua màng J_w và hệ số tổn hao chất lõi cuốn do thẩm thấu ngược R_{ds}) của ba loại dung dịch lõi cuốn. Ngoài ra, nghiên cứu cũng đã xác định được điều kiện vận hành tối ưu cho ba loại dung dịch lõi 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 lõi cuộn 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 lõi cuộn MGDA 25% có thể vận hành tương đối ổn định trong khoảng thời gian 700 giờ, với mức độ suy giảm thông lượng J_w khoảng 18%. Ngược lại, trong cùng điều kiện thì mức độ suy giảm thông lượng J_w của dung dịch lõi cuộn MAL 20% và dung dịch lõi cuộn 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 J_w đặc biệt tốt khi dung dịch lõi cuộn 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 lõi cuộn MAL 20% và dung dịch lõi cuộn PVP 20% chỉ đạt lần lượt 78% và 82%.

- **Nghiên cứu khả năng lõi cuộn của những dung dịch lõi cuộn 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 lõi cuộn đều thể hiện khả năng lõi cuộn 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 lõi cuộn này. Bên cạnh đó, nước sạch thu được từ quá trình hoàn nguyên ba loại dung dịch lõi cuộn 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.

ĐỀ XUẤT ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU TRONG TƯƠNG LAI

Luận án đã thành công thu được nhiều kết quả nghiên cứu mới, bao gồm:

- (1) xác định được đặc trưng tính chất và tiềm năng ứng dụng của dung dịch lồi cuộn mới MGDA;
- (2) nghiên cứu sâu ảnh hưởng của các yếu tố điều kiện vận hành lên đặc trưng lồi cuộn của ba loại dung dịch MAL, dung dịch PVP, và dung dịch MGDA;
- (3) ứng dụng thiết kế thí nghiệm Box–Behnken và phương pháp bề mặt đáp ứng để tối ưu hoá điều kiện vận hành cho ba loại dung dịch lồi cuộn trên nhằm thu được hiệu quả khử mặn – sản xuất nước ngọt cao nhất;
- (4) đánh giá được ảnh hưởng của điều kiện vận hành kéo dài và liên tục lên đặc trưng gây nhiễm bẩn màng của ba loại dung dịch lồi cuộn trên, cũng như hiệu quả làm sạch màng của phương pháp rửa xuôi đối với từng loại dung dịch lồi cuộn;
- (5) đánh giá được hiệu quả khử mặn – sản xuất nước ngọt của hệ thống màng FO/NF sử dụng ba loại dung dịch lồi cuộn trên, so sánh với Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 01-1:2018/BYT về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt.

Những kết quả này đã cho thấy tiềm năng ứng dụng rất lớn trong khử mặn – sản xuất nước ngọt của hệ thống màng FO/NF nói chung, và hệ thống màng FO/NF sử dụng các dung dịch lồi cuộn tiềm năng được khảo sát nói riêng. Trên cơ sở này, nghiên cứu sinh xin đưa ra những đề xuất và kiến nghị sau:

1. Kiến nghị tiếp tục tạo điều kiện mở rộng tìm kiếm các chất lồi cuộn (dung dịch lồi cuộn) mới hiệu quả và an toàn, bởi đây là một định hướng nghiên cứu mang tính thường xuyên và liên tục trên toàn thế giới nhằm không ngừng tạo ra những dung dịch lồi cuộn tốt hơn;
2. Kiến nghị tạo điều kiện tiếp tục mở rộng nghiên cứu trong luận án này cả về mặt công suất (quy mô pilot, quy mô sản xuất nhỏ), thời gian, và đối tượng (nguồn nước nhiễm mặn thực tế với các đặc trưng hoá – lý khác nhau) nhằm xây dựng nền móng vững chắc cho việc ứng dụng các kết quả nghiên cứu vào thực tiễn sản xuất.

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”. Tạp chí: International Journal of Environmental Science and Technology (chất lượng tính đến năm 2024: Q1, IF = 3,0). Năm xuất bản: 2024 (tập 22, trang 5327–5340). Số định danh doi: 10.1007/s13762-024-05984-z. Tác giả: **Hoàng Minh Tạo**, Nguyễn Quang Trung, Trịnh Tuấn Hưng, Nguyễn Ngọc Tùng, Bùi Quang Minh. Địa chỉ của NCS: Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi 10072, Vietnam; Center for High Technology Research and Development, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi 10072, Vietnam.

2. **Chương sách của nhà xuất bản quốc tế:** “Recent Trends in the Development of Draw Solutions for Forward Osmosis Based Desalination”. Tên sách: Advances in Water Quality Research, Volume 2. Nhà xuất bản: AkiNik Publications. Năm xuất bản: 2024. Số định danh ISBN: 978-93-6135-266-9. Số định danh doi: 10.22271/ed.book.2808. Tác giả: **Hoàng Minh Tạo**, Nguyễn Ngọc Tùng, Nguyễn Quang Trung, Bùi Quang Minh. Địa chỉ của NCS: Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology; Center for High Technology Research and Development, Vietnam Academy of Science and Technology.

3. **Công bố trên tạp chí trong nước:** “Investigating membrane fouling characteristics and cleansing strategies in forward osmosis desalination using polyvinylpyrrolidone K17”. Tạp chí: Tạp chí Phân tích Hóa, Lý và Sinh học. Số định danh ISSN: 0868-3224. Năm xuất bản: 2024 (tập 30, số 3, trang 65–73). Tác giả: **Hoàng Minh Tạo**, Nguyễn Quang Trung, Nguyễn Ngọc Tùng, Bùi Quang Minh, Trịnh Tuấn Hưng, Nguyễn Thị Hoài Thu, Hoàng Thị Thoa. Địa chỉ của NCS: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam; Trung tâm Nghiên cứu và Phát triển công nghệ cao, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

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: Tạp chí Phân tích Hóa, Lý và Sinh học. Số định danh ISSN: 0868-3224. Năm xuất bản: 2024 (tập 30, số 4, trang 77–84). Tác giả: **Hoàng Minh Tạo**, Nguyễn Quang Trung, Nguyễn Ngọc Tùng, Bùi Quang Minh, Trịnh Tuấn Hưng,

Nguyễn Thị Hoài Thu, Hoàng Thị Thoa. Địa chỉ của NCS: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam; Trung tâm Nghiên cứu và Phát triển công nghệ cao, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

5. Công bố trên hội nghị trong nước: “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. Số định danh ISBN: 978-604-357-367-1. Năm xuất bản: 2025 (trang 336–342). Tác giả: **Hoàng Minh Tạo**, Trịnh Tuấn Hưng, Nguyễn Ngọc Tùng, Bùi Quang Minh, Nguyễn Tiến Đạt. Địa chỉ của NCS: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam; Trung tâm Nghiên cứu và Phát triển công nghệ cao, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

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”. Tạp chí: Membrane and Water Treatment (chất lượng tính đến năm 2024: Q3, IF = 0,8). Tác giả: **Hoàng Minh Tạo**, Trịnh Tuấn Hưng, Nguyễn Ngọc Tùng, Bùi Quang Minh, Nguyễn Tiến Đạt, Hoàng Lê Tuấn Anh, Trương Ngọc Minh, Đỗ Hoàng Giang. Địa chỉ của NCS: Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi 10072, Vietnam; Center for High Technology Research and Development, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi 10072, Vietnam.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. F. A. Essa, 2022, Thermal Desalination Systems: from Traditionality to Modernity and Development, *Distillation Processes - From Solar and Membrane Distillation to Reactive Distillation Modelling, Simulation and Optimization*, IntechOpen.
2. Y.J. Lim, K. Goh, M. Kurihara, R. Wang, 2021, Seawater desalination by reverse osmosis: current development and future challenges in membrane fabrication – A review, *Journal of Membrane Science*, 629, pp. 119292.
3. F.E. Ahmed, A. Khalil, N. Hilal, 2021, Emerging desalination technologies: current status, challenges and future trends, *Desalination*, 517, pp. 115183.
4. A. Aende, J. Gardy, A. Hassanpour, 2020, Seawater desalination: a review of forward osmosis technique, its challenges, and future prospects, *Processes*, 8, 8, pp. 901.
5. N. Abounahia, I. Ibrar, T. Kazwini, A. Altaee, A.K. Samal, S.J. Zaidi, A.H. Hawari, 2023, Desalination by the forward osmosis: advancement and challenges, *Science of The Total Environment*, 886, pp. 163901.
6. Y. Xu, Y. Zhu, Z. Chen, J. Zhu, G. Chen, 2022, A comprehensive review on forward osmosis water treatment: recent advances and prospects of membranes and draw solutes, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 13, pp. 8215.
7. J. Wang, X. Liu, 2021, Forward osmosis technology for water treatment: recent advances and future perspectives, *Journal of Cleaner Production*, 280, pp. 124354.
8. Q. Ge, M. Ling, T.-S. Chung, 2013, Draw solutions for forward osmosis processes: developments, challenges, and prospects for the future, *Journal of Membrane Science*, 442, pp. 225–237.
9. D. Beysens, 2018, *Dew Water*, River Publishers.
10. P.H. Gleick, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security, Stockholm Environment Instituteeds., 1993, *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, Oxford University Press.
11. S. Almasoudi, B. Jamoussi, 2024, Desalination technologies and their environmental impacts: a review, *Sustainable Chemistry One World*, 1, pp. 100002.
12. C. Scarre, B.M. Fagan, C.W. Golden, 2021, *Ancient Civilizations*, Routledge.
13. P.H. Gleick, 1996, Basic water requirements for human activities: meeting

basic needs, *Water International*, 21, 2, pp. 83–92.

14. M.N. Brew, R.O. Myer, M.J. Hersom, J.N. Carter, M.A. Elzo, G.R. Hansen, D.G. Riley, 2011, Water intake and factors affecting water intake of growing beef cattle, *Livestock Science*, 140, 1–3, pp. 297–300.
15. R.M. Kirby, J. Bartram, R. Carr, 2003, Water in food production and processing: quantity and quality concerns, *Food Control*, 14, 5, pp. 283–299.
16. L. Hooper, et al., 2015, Clinical symptoms, signs and tests for identification of impending and current water-loss dehydration in older people, *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2015, 7.
17. S.K. Riebl, B.M. Davy, 2013, The hydration equation: update on water balance and cognitive performance, *ACSM'S Health & Fitness Journal*, 17, 6, pp. 21–28.
18. UN General Assembly, 2010, Resolution A/RES/64/292: The human right to water and sanitation, *Sixty-fourth Session of the UN General Assembly*, pp. 1–3.
19. UN General Assembly, 2015, Resolution A/RES/70/1: Transforming our world – The 2030 agenda for sustainable development, *Seventieth Session of the UN General Assembly*, pp. 1–35.
20. T.B. Nguyen, A.V. Cao, T.D. Nguyen, S.T. Hoang, D.V. Nguyen, 2018, Saltwater intrusion in aquifers of Danang area and solution for sustainable groundwater development, *Journal of Mining and Earth Sciences*, 59, 3, pp. 10–20.
21. P. Van Tuan, Y. Jiang, T. Stigter, Y. Zhou, 2024, Understanding groundwater use and vulnerability of rural communities in the Mekong Delta: the case of Tra Vinh province, Vietnam, *Groundwater for Sustainable Development*, 25, pp. 101095.
22. P.N. Thanh, T. Le Van, X.A.T. Thi, A.N. Hai, C. Le Cong, A.S. Gagnon, N.T. Pham, D.T. Anh, V.N. Dinh, 2024, Predicting drought stress under climate change in the Southern Central Highlands of Vietnam, *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 7, pp. 636.
23. Đ.H. Nguyễn, 2022, *Luận án Tiến sĩ “Nghiên cứu ảnh hưởng của quản lý nước mặt ruộng đến phát thải khí N₂O trên đất phù sa sông Hồng không được bồi hàng năm trồng lúa ở tỉnh Hưng Yên”*, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam.
24. J. Cheesman, J. Bennett, T.V.H. Son, 2008, Estimating household water demand using revealed and contingent behaviors: evidence from Vietnam, *Water Resources Research*, 44, 11, pp. 2007WR006265.
25. N.M. Dang, D.T. Anh, T.D. Dang, 2022, Water–food–energy nexus in the

- context of climate change: developing a water security index for water resource management in Vietnam, *Global Changes and Sustainable Development in Asian Emerging Market Economies Vol. 2*, Springer International Publishing.
26. L.Q. Tran, 2024, Impact of climate change on irrigation water requirements for coffee plants in the fruit development stage: a case study of Dak Lak and Gia Lai provinces in the Central Highlands of Vietnam, *Water Supply*, 24, 1, pp. 290–311.
 27. N.H.D. My, N.D. Kien, P.X. Hung, L.T. Quynh Anh, 2024, Does the value of water-related ecosystem services capture water scarcity: application to rice farming in the Mekong Delta of Vietnam, *Water Economics and Policy*, 10, 01, pp. 2350006.
 28. D.S. Khang, N.H.K. Linh, B.T.M. Hoai, 2024, Life cycle assessment of cocoa products in Vietnam, *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 8, 4, pp. 1003–1016.
 29. T.L. Pham, T.H.Y. Tran, T.T. Tran, X.Q. Ngo, X.D. Nguyen, 2022, Assessment of surface water quality in a drinking water supply reservoir in Vietnam: a combination of different indicators, *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 33, 3, pp. 653–662.
 30. T.-C. Kieu-Le, Q.-T. Thuong, T.-N.-S. Truong, T.-M.-T. Le, Q.-V. Tran, E. Strady, 2023, Baseline concentration of microplastics in surface water and sediment of the northern branches of the Mekong River Delta, Vietnam, *Marine Pollution Bulletin*, 187, pp. 114605.
 31. G.T. Nguyen, D.H. Truong, 2023, Risks of surface water pollution in southern Vietnam, *Civil Engineering Journal*, 9, 11, pp. 2725–2735.
 32. H.X. Nguyen, et al., 2024, A comprehensive evaluation of dioxins and furans occurrence in river sediments from a secondary steel recycling craft village in Northern Vietnam, *Molecules*, 29, 8, pp. 1788.
 33. N.X. Tong, N.K. Hoa, N.T.T. Tram, L.T.P. Khang, 2025, Water quality index, heavy metals, and endocrine disruptors in the Saigon river basin: pollution assessment and correlation analysis, *Environmental Quality Management*, 34, 3, pp. e70063.
 34. P. Nhu Nguyet, T.L. Luu, N. Ai Le, N. Thi Kim Ngan, N. Thi Huyen Trang, 2025, Groundwater arsenic pollution in Vietnam: current opinion on the mobilization and remediation, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 44, pp. 100596.
 35. T. Le, C. Sun, S. Choy, Y. Kuleshov, 2021, Regional drought risk assessment in the Central Highlands and the South of Vietnam, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12, 1, pp. 3140–3159.

36. P.N. Thanh, T. Le Van, T.T. Minh, T.H. Ngoc, W. Lohpaisankrit, Q.B. Pham, A.S. Gagnon, P. Deb, N.T. Pham, D.T. Anh, V.N. Dinh, 2023, Adapting to climate-change-induced drought stress to improve water management in southeast Vietnam, *Sustainability*, 15, 11, pp. 9021.
37. H.V.T. Minh, K. Lavane, T.V. Ty, N.K. Downes, T.T.K. Hong, P. Kumar, 2022, Evaluation of the impact of drought and saline water intrusion on rice yields in the Mekong Delta, Vietnam, *Water*, 14, 21, pp. 3499.
38. P.C. Nguyen, P.T. Vu, N.Q. Khuong, H.V.T. Minh, H.A. Vo, 2024, Saltwater intrusion and agricultural land use change in Nga Nam, Soc Trang, Vietnam, *Resources*, 13, 2, pp. 18.
39. D. Duc Tran, P. Thi Bich Thuc, E. Park, P. Thi Thanh Hang, D. Ba Man, J. Wang, 2024, Extent of saltwater intrusion and freshwater exploitability in the coastal Vietnamese Mekong Delta assessed by gauging records and numerical simulations, *Journal of Hydrology*, 630, pp. 130655.
40. N.K. Hoang, D.T. Hai, 2024, Assessing surface water salinity intrusion in the Mekong River Delta: a case study in Rach Gia, Vietnam, *GeoJournal*, 89, 4, pp. 171.
41. T.V. Pham, T.A. Thi Do, H.D. Tran, A.N. Thi Do, 2024, Assessing groundwater potential for mitigating salinity issues in agricultural areas of southern Dong Nai province, Vietnam, *Groundwater for Sustainable Development*, 25, pp. 101177.
42. N.A. Metheny, M.M. Krieger, 2020, Salt toxicity: a systematic review and case reports, *Journal of Emergency Nursing*, 46, 4, pp. 428–439.
43. L. Finberg, 1963, Mass accidental salt poisoning in infancy: a study of a hospital disaster, *JAMA*, 184, 3, pp. 187.
44. Y. Ofra, D. Lavi, D. Opher, T.A. Weiss, E. Elinav, 2004, Fatal voluntary salt intake resulting in the highest ever documented sodium plasma level in adults (255 mmol/L): a disorder linked to female gender and psychiatric disorders, *Journal of Internal Medicine*, 256, 6, pp. 525–528.
45. Z. Etzion, R. Yagil, 1987, Metabolic effects in rats drinking increasing concentrations of sea-water, *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 86, 1, pp. 49–55.
46. F.E. Ahmed, R. Hashaikeh, N. Hilal, 2020, Hybrid technologies: the future of energy efficient desalination – a review, *Desalination*, 495, pp. 114659.
47. M. Al-Addous, M. Bdour, S. Rabaiah, A. Boubakri, N. Schweimanns, N. Barbana, J. Wellmann, 2024, Innovations in solar-powered desalination: a comprehensive review of sustainable solutions for water scarcity in the Middle

East and North Africa (MENA) region, *Water*, 16, 13, pp. 1877.

48. D. Janowitz, A. Margane, S. Yüce, T. Wintgens, 2025, Photovoltaics powered seawater desalination by reverse osmosis and water conveyance benefits the green energy transition in the Middle East, *Desalination*, 602, pp. 118646.
49. X. Jia, J.J. Klemeš, P.S. Varbanov, S.R. Wan Alwi, 2019, Analyzing the energy consumption, GHG emission, and cost of seawater desalination in China, *Energies*, 12, 3, pp. 463.
50. A. Shabib, B. Tatan, Y. Elbaz, A. Aly Hassan, M.A. Hamouda, M.A. Maraqa, 2025, Advancements in reverse osmosis desalination: technology, environment, economy, and bibliometric insights, *Desalination*, 598, pp. 118413.
51. M. Salem Ahmed, M.M. Aboelmaaref, J. Zhao, Y. Li, S.W. Sharshir, M.A.I. Wahba, A. Mimi Elsaid, 2024, Performance, economic, and statistical analysis assessment for the hybrid solar dish concentrator with turbine, generator, and reverse osmosis desalination unit, *Applied Thermal Engineering*, 254, pp. 123802.
52. K. Harby, M. Emad, M. Benghanem, T.Z. Abolibda, K. Almohammadi, A. Aljabri, A. Alsaiani, M. Elgendi, 2024, Reverse osmosis hybridization with other desalination techniques: an overview and opportunities, *Desalination*, 581, pp. 117600.
53. H. Nassrullah, S.F. Anis, R. Hashaikeh, N. Hilal, 2020, Energy for desalination: a state-of-the-art review, *Desalination*, 491, pp. 114569.
54. I. Alsvik, M.-B. Hägg, 2013, Pressure retarded osmosis and forward osmosis membranes: materials and methods, *Polymers*, 5, 1, pp. 303–327.
55. D. Voet, J.G. Voet, C.W. Pratt, 2016, *Fundamentals of Biochemistry: Life at the Molecular Level*, Wiley.
56. K.L. Lee, R.W. Baker, H.K. Lonsdale, 1981, Membranes for power generation by pressure-retarded osmosis, *Journal of Membrane Science*, 8, 2, pp. 141–171.
57. R.L. McGinnis, 2002, Osmotic desalinization process. US6391205B1.
58. K. Lampi, E. Beaudry, J. Herron, 2005, Forward osmosis pressurized device and process for generating potable water. US6849184B1.
59. C. Benton, O. Bakajin, C. Lundin, 2019, Advancements in osmotically driven membrane systems including multi-stage purification. US10500544B2.
60. Shinichi, Y., Ikuta S., 2019, Desalination system and desalination method. JP6463620B2.

61. S. Reddy, K. Dey, D. Dsilva Winfred Rufuss, S. Arulvel, T. Akinaga, 2024, Forward osmosis desalination: a critical review focussing on recent advancements in draw solution recovery techniques for enhanced efficiency and regeneration, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 5, pp. 113968.
62. S.T. Abdul-Hussein, M.H. Al-Furaiji, H. Meskher, D. Ghernaout, M. Fal, A.M. ALotaibi, Q.F. Alsalhy, 2024, Prospects of forward osmosis-based membranes for seawater mining: economic analysis, limitations and opportunities, *Desalination*, 579, pp. 117477.
63. W. Suwaileh, N. Pathak, H. Shon, N. Hilal, 2020, Forward osmosis membranes and processes: a comprehensive review of research trends and future outlook, *Desalination*, 485, pp. 114455.
64. N.Q. Trung, L. Van Nhan, P.T.P. Thao, L.T. Giang, 2018, Novel draw solutes of iron complexes easier recovery in forward osmosis process, *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8, 2, pp. 244–250.
65. T.G. Lê, 2016, *Báo cáo tổng hợp kết quả thực hiện đề tài cấp Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam “Nghiên cứu, ứng dụng màng thẩm thấu chuyển tiếp trong sản xuất nước sinh hoạt” (mã số: VAST.CTG.08/14-16)*, Trung tâm Nghiên cứu và Chuyển giao công nghệ.
66. Q.T. Nguyen, M.T. Hoang, V.N. Le, N.T. Nguyen, T.G. Le, 2021, An initial study and potential application of maltodextrin as draw solution in forward osmosis process for desalination, *Desalination and Water Treatment*, 232, pp. 26–32.
67. Q.T. Nguyen, M.T. Hoang, T.H. Trinh, N.T. Nguyen, T.G. Le, 2022, Evaluation of polyvinylpyrrolidone as draw solute for desalination forward osmosis systems, *Water Supply*, 22, 2, pp. 1652–1662.
68. M.T. Hoàng, 2022, *Báo cáo tổng hợp kết quả thực hiện nhiệm vụ phát triển công nghệ cấp Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam “Nghiên cứu hoàn thiện hệ thống lọc nước nhiễm mặn bằng thiết bị lọc nước thẩm thấu chuyển tiếp” (mã số: UDPTCN 01/2020-2022)*, Trung tâm Nghiên cứu và Chuyển giao công nghệ.
69. T.-S. Chung, S. Zhang, K.Y. Wang, J. Su, M.M. Ling, 2012, Forward osmosis processes: yesterday, today and tomorrow, *Desalination*, 287, pp. 78–81.
70. D. Li, Y. Yan, H. Wang, 2016, Recent advances in polymer and polymer composite membranes for reverse and forward osmosis processes, *Progress in Polymer Science*, 61, pp. 104–155.
71. Y.-N. Wang, K. Goh, X. Li, L. Setiawan, R. Wang, 2018, Membranes and processes for forward osmosis-based desalination: recent advances and future

- prospects, *Desalination*, 434, pp. 81–99.
72. N.Y. Yip, A. Tiraferri, W.A. Phillip, J.D. Schiffman, M. Elimelech, 2010, High performance thin-film composite forward osmosis membrane, *Environmental Science & Technology*, 44, 10, pp. 3812–3818.
 73. R.C. Ong, T.-S. Chung, B.J. Helmer, Jos.S. De Wit, 2012, Novel cellulose esters for forward osmosis membranes, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 49, pp. 16135–16145.
 74. T. Cath, A. Childress, M. Elimelech, 2006, Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments, *Journal of Membrane Science*, 281, 1–2, pp. 70–87.
 75. Y.-N. Wang, J. Wei, Q. She, F. Pacheco, C.Y. Tang, 2012, Microscopic characterization of FO/PRO membranes – A comparative study of CLSM, TEM and SEM, *Environmental Science & Technology*, 46, 18, pp. 9995–10003.
 76. M.T. Hoang, Q.T. Nguyen, N.T. Nguyen, Q.M. Bui, 2024, Recent trends in the development of draw solutions for forward osmosis based desalination, *Advances in Water Quality Research*, AkiNik Publications.
 77. L. Zhang, X. Sun, S. Wu, 2024, A comprehensive review of responsive draw solutes in forward osmosis: categories, characteristics, mechanisms and modifications, *Desalination*, 583, pp. 117676.
 78. G.W. Batchelder, 1965, Process for the demineralization of water. US3171799A. Mar. 2, 1965, .
 79. A.P. Andrianov, O.V. Yantsen, R.V. Efremov, 2023, State-of-the-art of forward osmosis technology: prospects and limitations, *Membranes and Membrane Technologies*, 5, 4, pp. 276–289.
 80. J.R. McCutcheon, R.L. McGinnis, M. Elimelech, 2006, Desalination by ammonia–carbon dioxide forward osmosis: influence of draw and feed solution concentrations on process performance, *Journal of Membrane Science*, 278, 1–2, pp. 114–123.
 81. C. Boo, Y.F. Khalil, M. Elimelech, 2015, Performance evaluation of trimethylamine–carbon dioxide thermolytic draw solution for engineered osmosis, *Journal of Membrane Science*, 473, pp. 302–309.
 82. Y. Kim, J.H. Lee, Y.C. Kim, K.H. Lee, I.S. Park, S.-J. Park, 2015, Operation and simulation of pilot-scale forward osmosis desalination with ammonium bicarbonate, *Chemical Engineering Research and Design*, 94, pp. 390–395.
 83. Y. Jiang, C. Liu, A. Huang, 2019, EDTA-functionalized covalent organic framework for the removal of heavy-metal ions, *ACS Applied Materials &*

Interfaces, 11, 35, pp. 32186–32191.

84. M.L. Stone, C. Rae, F.F. Stewart, A.D. Wilson, 2013, Switchable polarity solvents as draw solutes for forward osmosis, *Desalination*, 312, pp. 124–129.
85. C.J. Orme, A.D. Wilson, 2015, 1-cyclohexylpiperidine as a thermolytic draw solute for osmotically driven membrane processes, *Desalination*, 371, pp. 126–133.
86. K.K. Reimund, B.J. Coscia, J.T. Arena, A.D. Wilson, J.R. McCutcheon, 2016, Characterization and membrane stability study for the switchable polarity solvent N,N-dimethylcyclohexylamine as a draw solute in forward osmosis, *Journal of Membrane Science*, 501, pp. 93–99.
87. B.S. Frank, 1972, Desalination of sea water. US3670897A.
88. R. Alnaizy, A. Aidan, M. Qasim, 2013, Draw solute recovery by metathesis precipitation in forward osmosis desalination, *Desalination and Water Treatment*, 51, 28–30, pp. 5516–5525.
89. R. Alnaizy, A. Aidan, M. Qasim, 2013, Copper sulfate as draw solute in forward osmosis desalination, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1, 3, pp. 424–430.
90. M. Qasim, F. Mohammed, A. Aidan, N.A. Darwish, 2017, Forward osmosis desalination using ferric sulfate draw solute, *Desalination*, 423, pp. 12–20.
91. B.E. Khan, A. Mahmood, M. Zaman, K.-H. Lee, 2024, Zinc sulfate as a draw solute in forward osmosis and its regeneration by reagent precipitation, *Desalination*, 571, pp. 117087.
92. D. Li, X. Zhang, J. Yao, Y. Zeng, G.P. Simon, H. Wang, 2011, Composite polymer hydrogels as draw agents in forward osmosis and solar dewatering, *Soft Matter*, 7, 21, pp. 10048.
93. D. Li, X. Zhang, J. Yao, G.P. Simon, H. Wang, 2011, Stimuli-responsive polymer hydrogels as a new class of draw agent for forward osmosis desalination, *Chemical Communications*, 47, 6, pp. 1710.
94. A.P. Bendoy, H.G. Zeweldi, M.J. Park, H.K. Shon, H. Kim, W.-J. Chung, G.M. Nisola, 2022, Thermo-responsive hydrogel with deep eutectic mixture co-monomer as drawing agent for forward osmosis, *Desalination*, 542, pp. 116067.
95. K. Zhang, F. Li, Y. Wu, L. Feng, L. Zhang, 2020, Construction of ionic thermo-responsive PNIPAM/ γ -PGA/PEG hydrogel as a draw agent for enhanced forward-osmosis desalination, *Desalination*, 495, pp. 114667.
96. M.A. Vafaei, A. Shakeri, H. Salehi, S.R. Razavi, N. Salari, M.T. Nakhjiri, 2023, Cellulose nanofiber modified poly (acrylic acid-co-N-vinyl pyrrolidone)

- hydrogel as forward osmosis draw agent, *Journal of Polymers and the Environment*, 31, 10, pp. 4369–4381.
97. A. Razmjou, G.P. Simon, H. Wang, 2013, Effect of particle size on the performance of forward osmosis desalination by stimuli-responsive polymer hydrogels as a draw agent, *Chemical Engineering Journal*, 215–216, pp. 913–920.
 98. Y. Zhong, X. Feng, W. Chen, X. Wang, K.-W. Huang, Y. Gnanou, Z. Lai, 2016, Using UCST ionic liquid as a draw solute in forward osmosis to treat high-salinity water, *Environmental Science & Technology*, 50, 2, pp. 1039–1045.
 99. Y. Cai, W. Shen, J. Wei, T.H. Chong, R. Wang, W.B. Krantz, A.G. Fane, X. Hu, 2015, Energy-efficient desalination by forward osmosis using responsive ionic liquid draw solutes, *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1, 3, pp. 341–347.
 100. J. Kim, H. Kang, Y.-S. Choi, Y.Ah. Yu, J.-C. Lee, 2016, Thermo-responsive oligomeric poly(tetrabutylphosphonium styrenesulfonate)s as draw solutes for forward osmosis (FO) applications, *Desalination*, 381, pp. 84–94.
 101. T. Takahashi, K. Akiya, T. Niizeki, M. Matsumoto, T. Hoshina, 2022, Tunable thermoresponsive UCST-type alkylimidazolium ionic liquids as a draw solution in the forward osmosis process, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 639, pp. 128372.
 102. Y. Cho, H. Kang, 2022, Influence of the anionic structure and central atom of a cation on the properties of LCST-type draw solutes for forward osmosis, *RSC Advances*, 12, 45, pp. 29405–29413.
 103. D. Yang, Y. Cho, H. Kang, 2022, Effects of the structure of benzenesulfonate-based draw solutes on the forward osmosis process, *Membranes*, 12, 11, pp. 1067.
 104. J. Moon, H. Kang, 2023, Anion effect on forward osmosis performance of tetrabutylphosphonium-based draw solute having a lower critical solution temperature, *Membranes*, 13, 2, pp. 211.
 105. Y. Cho, H. Kang, 2022, Effect of the alkyl chain length on assessment as thermo-responsive draw solutes for forward osmosis, *ACS Omega*, 7, 45, pp. 41508–41518.
 106. J. Moon, H. Kang, 2024, Thermo-responsive tributyl-4-vinylbenzylphosphonium alkanesulfonate ionic liquid-based draw solute for forward osmosis, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 129, pp. 413–423.

107. H. Zhang, J. Li, H. Cui, H. Li, F. Yang, 2015, Forward osmosis using electric-responsive polymer hydrogels as draw agents: influence of freezing–thawing cycles, voltage, feed solutions on process performance, *Chemical Engineering Journal*, 259, pp. 814–819.
108. Z. Xu, K. Wu, H. Luo, Q. Wang, T.C. Zhang, X. Chen, H. Rong, Q. Fang, 2022, Electro-responsive semi-IPN hydrogel with enhanced responsive property for forward osmosis desalination, *Journal of Applied Polymer Science*, 139, 7, pp. 51650.
109. H. Luo, K. Wu, Q. Wang, T.C. Zhang, H. Lu, H. Rong, Q. Fang, 2020, Forward osmosis with electro-responsive P(AMPS-co-AM) hydrogels as draw agents for desalination, *Journal of Membrane Science*, 593, pp. 117406.
110. S. Zhao, L. Zou, D. Mulcahy, 2012, Brackish water desalination by a hybrid forward osmosis–nanofiltration system using divalent draw solute, *Desalination*, 284, pp. 175–181.
111. N.C. Nguyen, H.C. Duong, H.T. Nguyen, S.-S. Chen, H.Q. Le, H.H. Ngo, W. Guo, C.C. Duong, N.C. Le, X.T. Bui, 2020, Forward osmosis–membrane distillation hybrid system for desalination using mixed trivalent draw solution, *Journal of Membrane Science*, 603, pp. 118029.
112. S. Yang, S. Lee, S. Hong, 2021, Enhancing the applicability of forward osmosis membrane process utilizing food additives as draw solutes, *Journal of Membrane Science*, 638, pp. 119705.
113. M. Mounir, H. Gadallah, H.M. Ali, E.R. Souaya, A.A. Azab, 2021, Ferric hydroacid & diamine complex as draw solute for forward osmosis (FO) desalination processes, *Cleaner Engineering and Technology*, 5, pp. 100316.
114. G. Raluy, L. Serra, J. Uche, 2006, Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies, *Energy*, 31, 13, pp. 2361–2372.
115. K.S. Bowden, A. Achilli, A.E. Childress, 2012, Organic ionic salt draw solutions for osmotic membrane bioreactors, *Bioresource Technology*, 122, pp. 207–216.
116. D.L. Shaffer, J.R. Werber, H. Jaramillo, S. Lin, M. Elimelech, 2015, Forward osmosis: where are we now?, *Desalination*, 356, pp. 271–284.
117. C.H. Tan, H.Y. Ng, 2010, A novel hybrid forward osmosis - nanofiltration (FO-NF) process for seawater desalination: draw solution selection and system configuration, *Desalination and Water Treatment*, 13, 1–3, pp. 356–361.
118. V. Yangali-Quintanilla, Z. Li, R. Valladares, Q. Li, G. Amy, 2011, Indirect desalination of Red Sea water with forward osmosis and low pressure reverse osmosis for water reuse, *Desalination*, 280, 1–3, pp. 160–166.

119. M. Giagnorio, F. Ricceri, M. Tagliabue, L. Zaninetta, A. Tiraferri, 2019, Hybrid forward osmosis–nanofiltration for wastewater reuse: system design, *Membranes*, 9, 5, pp. 61.
120. J. Su, T.-S. Chung, B.J. Helmer, J.S. De Wit, 2012, Enhanced double-skinned FO membranes with inner dense layer for wastewater treatment and macromolecule recycle using Sucrose as draw solute, *Journal of Membrane Science*, 396, pp. 92–100.
121. Q. Ge, F. Fu, T.-S. Chung, 2014, Ferric and cobaltous hydroacid complexes for forward osmosis (FO) processes, *Water Research*, 58, pp. 230–238.
122. Q. Ge, T.-S. Chung, 2013, Hydroacid complexes: a new class of draw solutes to promote forward osmosis (FO) processes, *Chemical Communications*, 49, 76, pp. 8471.
123. W. Gao, H. Liang, J. Ma, M. Han, Z. Chen, Z. Han, G. Li, 2011, Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: a review, *Desalination*, 272, 1–3, pp. 1–8.
124. Z. Liu, H. Bai, J. Lee, D.D. Sun, 2011, A low-energy forward osmosis process to produce drinking water, *Energy & Environmental Science*, 4, 7, pp. 2582.
125. T. Mishra, S. Ramola, A.K. Shankhwar, R.K. Srivastava, 2016, Use of synthesized hydrophilic magnetic nanoparticles (HMNPs) in forward osmosis for water reuse, *Water Supply*, 16, 1, pp. 229–236.
126. R. Ou, Y. Wang, H. Wang, T. Xu, 2013, Thermo-sensitive polyelectrolytes as draw solutions in forward osmosis process, *Desalination*, 318, pp. 48–55.
127. M. Noh, Y. Mok, S. Lee, H. Kim, S.H. Lee, G. Jin, J.-H. Seo, H. Koo, T.H. Park, Y. Lee, 2012, Novel lower critical solution temperature phase transition materials effectively control osmosis by mild temperature changes, *Chemical Communications*, 48, 32, pp. 3845.
128. M.M. Ling, T.-S. Chung, 2011, Desalination process using super hydrophilic nanoparticles via forward osmosis integrated with ultrafiltration regeneration, *Desalination*, 278, 1–3, pp. 194–202.
129. N. Asghar, D.A. Nguyen, A. Jang, 2023, Application of MnFe₂O₄ magnetic silica-covered ethylenediaminetetraacetic acid-functionalized nanomaterials to the draw solution in forward osmosis, *Chemosphere*, 330, pp. 138735.
130. H. Bai, Z. Liu, D.D. Sun, 2011, Highly water soluble and recovered dextran coated Fe₃O₄ magnetic nanoparticles for brackish water desalination, *Separation and Purification Technology*, 81, 3, pp. 392–399.
131. M.M. Ling, T.-S. Chung, X. Lu, 2011, Facile synthesis of thermosensitive magnetic nanoparticles as “smart” draw solutes in forward osmosis, *Chemical*

Communications, 47, 38, pp. 10788.

132. F. Khazaie, S. Sheshmani, S. Shokrollahzadeh, A.S. Shahvelayati, 2022, Desalination of saline water via forward osmosis using magnetic nanoparticles covalently functionalized with citrate ions as osmotic agent, *Environmental Technology*, 43, 14, pp. 2113–2123.
133. A. Hassanein, M. Hafiz, M.K. Hassan, M.M. Ba-Abbad, M. AL-Ejji, R. Alfahel, K.A. Mahmoud, M. Talhami, A.H. Hawari, 2023, Developing sustainable draw solute for forward osmosis process using poly(amidoamine) dendrimer coated magnetic nanoparticles, *Desalination*, 564, pp. 116800.
134. F. Azadi, A. Karimi-Jashni, M.M. Zerafat, 2021, Desalination of brackish water by gelatin-coated magnetite nanoparticles as a novel draw solute in forward osmosis process, *Environmental Technology*, 42, 18, pp. 2885–2895.
135. T. Sun, F. Li, Q. Zhang, X. Geng, H. Chen, Q. Zhao, 2022, A novel magnetic nano-sorbent functionalized from N-methyl-d-glucamine for boron removal from desalinated seawater, *Water*, 14, 8, pp. 1212.
136. A. Aende, J. Gardy, Z. Aslam, M. Rogers, M. Edokali, O. Cespedes, D. Harbottle, A. Hassanpour, 2022, A novel highly osmotic K/Fe₃O₄/CNF magnetic draw solution for salty water desalination, *Desalination*, 538, pp. 115903.
137. F. Khazaie, S. Shokrollahzadeh, Y. Bide, S. Sheshmani, A.S. Shahvelayati, 2021, Forward osmosis using highly water dispersible sodium alginate sulfate coated-Fe₃O₄ nanoparticles as innovative draw solution for water desalination, *Process Safety and Environmental Protection*, 146, pp. 789–799.
138. V. Veisi, M. Bagherzadeh, 2024, Agarose-coated Fe₃O₄ magnetic nanoparticles (ACMNPs) as draw solute for enhance forward osmosis (FO) desalination, *Desalination*, 591, pp. 118001.
139. I. Petrinic, J. Stergar, H. Bukšek, M. Drofenik, S. Gyergyek, C. Hélix-Nielsen, I. Ban, 2021, Superparamagnetic Fe₃O₄@CA nanoparticles and their potential as draw solution agents in forward osmosis, *Nanomaterials*, 11, 11, pp. 2965.
140. S. Phuntsho, H.K. Shon, T. Majeed, I. El Saliby, S. Vigneswaran, J. Kandasamy, S. Hong, S. Lee, 2012, Blended fertilizers as draw solutions for fertilizer-drawn forward osmosis desalination, *Environmental Science & Technology*, 46, 8, pp. 4567–4575.
141. S. Phuntsho, H.K. Shon, S. Hong, S. Lee, S. Vigneswaran, 2011, A novel low energy fertilizer driven forward osmosis desalination for direct fertigation: Evaluating the performance of fertilizer draw solutions, *Journal of Membrane Science*, 375, 1–2, pp. 172–181.

142. R.E. Kravath, J.A. Davis, 1975, Desalination of sea water by direct osmosis, *Desalination*, 16, 2, pp. 151–155.
143. A.J. Ansari, F.I. Hai, W.E. Price, L.D. Nghiem, 2016, Phosphorus recovery from digested sludge centrate using seawater-driven forward osmosis, *Separation and Purification Technology*, 163, pp. 1–7.
144. M. Bassiouny, P. Nasr, H. Sewilam, 2022, Investigating the pilot-scale performance of a hydroponic nutrient solution as potential draw solution for fertilizer drawn forward osmosis and hydroponic agriculture of lettuce, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24, 9, pp. 2749–2760.
145. B. Bagheri, A. Karimi-Jashni, M.M. Zerafat, 2021, Application of molasses as draw solution in forward osmosis desalination for fertigation purposes, *Environmental Technology*, 42, 5, pp. 764–774.
146. M. Wallace, Z. Cui, N.P. Hankins, 2008, A thermodynamic benchmark for assessing an emergency drinking water device based on forward osmosis, *Desalination*, 227, 1–3, pp. 34–45.
147. A. Zelman, 1990, Membrane pouch. US4920105A.
148. G.D. Mehta, S. Loeb, 1978, Internal polarization in the porous substructure of a semipermeable membrane under pressure-retarded osmosis, *Journal of Membrane Science*, 4, pp. 261–265.
149. L. Song, M. Elimelech, 1995, Theory of concentration polarization in crossflow filtration, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 91, 19, pp. 3389.
150. S. Sablani, M. Goosen, R. Al-Belushi, M. Wilf, 2001, Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review, *Desalination*, 141, 3, pp. 269–289.
151. M. Mulder, 1996, *Basic Principles of Membrane Technology*, Springer Netherlands.
152. M. Elimelech, S. Bhattacharjee, 1998, A novel approach for modeling concentration polarization in crossflow membrane filtration based on the equivalence of osmotic pressure model and filtration theory, *Journal of Membrane Science*, 145, 2, pp. 223–241.
153. S. Loeb, M.R. Bloch, 1973, Countercurrent flow osmotic processes for the production of solutions having a high osmotic pressure, *Desalination*, 13, 2, pp. 207–215.
154. S. Phuntsho, S. Vigneswaran, J. Kandasamy, S. Hong, S. Lee, H.K. Shon, 2012, Influence of temperature and temperature difference in the performance of forward osmosis desalination process, *Journal of Membrane Science*, 415–

- 416, pp. 734–744.
155. A.H. Hawari, N. Kamal, A. Altaee, 2016, Combined influence of temperature and flow rate of feeds on the performance of forward osmosis, *Desalination*, 398, pp. 98–105.
 156. M. Nematzadeh, A. Samimi, S. Shokrollahzadeh, 2016, Application of sodium bicarbonate as draw solution in forward osmosis desalination: influence of temperature and linear flow velocity, *Desalination and Water Treatment*, 57, 44, pp. 20784–20791.
 157. J. Heo, K.H. Chu, N. Her, J. Im, Y.-G. Park, J. Cho, S. Sarp, A. Jang, M. Jang, Y. Yoon, 2016, Organic fouling and reverse solute selectivity in forward osmosis: role of working temperature and inorganic draw solutions, *Desalination*, 389, pp. 162–170.
 158. H. Wang, B. Gao, L. Hou, H.K. Shon, Q. Yue, Z. Wang, 2021, Fertilizer drawn forward osmosis as an alternative to 2nd pass seawater reverse osmosis: estimation of boron removal and energy consumption, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 15, 6, pp. 135.
 159. R.E. Treybal, 2004, *Mass-transfer Operations*, McGraw-Hill.
 160. B.S. Chanukya, S. Patil, N.K. Rastogi, 2013, Influence of concentration polarization on flux behavior in forward osmosis during desalination using ammonium bicarbonate, *Desalination*, 312, pp. 39–44.
 161. P. Zhao, B. Gao, Q. Yue, S. Liu, H.K. Shon, 2016, Effect of high salinity on the performance of forward osmosis: water flux, membrane scaling and removal efficiency, *Desalination*, 378, pp. 67–73.
 162. Y. Kim, S. Lee, H.K. Shon, S. Hong, 2015, Organic fouling mechanisms in forward osmosis membrane process under elevated feed and draw solution temperatures, *Desalination*, 355, pp. 169–177.
 163. Y.P. Devia, T. Imai, T. Higuchi, Ariyo Kanno, K. Yamamoto, M. Sekine, 2015, Effect of operating conditions on forward osmosis for nutrient rejection using magnesium chloride as a draw solution, *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 9, 6, pp. 691–696.
 164. W.Kh. Al-Musawy, M.H. Al-Furaiji, Q.F. Alsahy, 2021, Synthesis and characterization of PVC-TFC hollow fibers for forward osmosis application, *Journal of Applied Polymer Science*, 138, 35, pp. 50871.
 165. C. Wang, M. Wang, Y. Li, 2020, Effects of sodium dodecyl sulfate on forward osmosis membrane fouling and its cleaning, *Chemosphere*, 257, pp. 127180.
 166. N.T. Hau, S.-S. Chen, N.C. Nguyen, K.Z. Huang, H.H. Ngo, W. Guo, 2014, Exploration of EDTA sodium salt as novel draw solution in forward osmosis

- process for dewatering of high nutrient sludge, *Journal of Membrane Science*, 455, pp. 305–311.
167. D.H. Jung, J. Lee, D.Y. Kim, Y.G. Lee, M. Park, S. Lee, D.R. Yang, J.H. Kim, 2011, Simulation of forward osmosis membrane process: effect of membrane orientation and flow direction of feed and draw solutions, *Desalination*, 277, 1–3, pp. 83–91.
 168. N. Akther, S. Daer, S.W. Hasan, 2018, Effect of flow rate, draw solution concentration and temperature on the performance of TFC FO membrane, and the potential use of RO reject brine as a draw solution in FO–RO hybrid systems, *Desalination and Water Treatment*, 136, pp. 65–71.
 169. R. Lambrechts, M.S. Sheldon, 2019, Performance and energy consumption evaluation of a fertiliser drawn forward osmosis (FDFO) system for water recovery from brackish water, *Desalination*, 456, pp. 64–73.
 170. T. Majeed, S. Phuntsho, S. Sahebi, J.E. Kim, J.K. Yoon, K. Kim, H.K. Shon, 2015, Influence of the process parameters on hollow fiber-forward osmosis membrane performances, *Desalination and Water Treatment*, 54, 4–5, pp. 817–828.
 171. W.-J. Kim, O. Campanella, D.R. Heldman, 2022, A stepwise approach to predict the performance of forward osmosis operation: effect of temperature and flow direction, *Desalination*, 538, pp. 115889.
 172. S. Zhao, L. Zou, C.Y. Tang, D. Mulcahy, 2012, Recent developments in forward osmosis: opportunities and challenges, *Journal of Membrane Science*, 396, pp. 1–21.
 173. B. Mi, M. Elimelech, 2008, Chemical and physical aspects of organic fouling of forward osmosis membranes, *Journal of Membrane Science*, 320, 1–2, pp. 292–302.
 174. Q. She, Y.K.W. Wong, S. Zhao, C.Y. Tang, 2013, Organic fouling in pressure retarded osmosis: experiments, mechanisms and implications, *Journal of Membrane Science*, 428, pp. 181–189.
 175. M. Zhang, D. Hou, Q. She, C.Y. Tang, 2014, Gypsum scaling in pressure retarded osmosis: experiments, mechanisms and implications, *Water Research*, 48, pp. 387–395.
 176. E. Arkhangelsky, F. Wicaksana, S. Chou, A.A. Al-Rabiah, S.M. Al-Zahrani, R. Wang, 2012, Effects of scaling and cleaning on the performance of forward osmosis hollow fiber membranes, *Journal of Membrane Science*, 415–416, pp. 101–108.
 177. C. Boo, M. Elimelech, S. Hong, 2013, Fouling control in a forward osmosis

- process integrating seawater desalination and wastewater reclamation, *Journal of Membrane Science*, 444, pp. 148–156.
178. S. Lee, C. Boo, M. Elimelech, S. Hong, 2010, Comparison of fouling behavior in forward osmosis (FO) and reverse osmosis (RO), *Journal of Membrane Science*, 365, 1–2, pp. 34–39.
 179. C.Y. Tang, Q. She, W.C.L. Lay, R. Wang, A.G. Fane, 2010, Coupled effects of internal concentration polarization and fouling on flux behavior of forward osmosis membranes during humic acid filtration, *Journal of Membrane Science*, 354, 1–2, pp. 123–133.
 180. N.Y. Yip, M. Elimelech, 2013, Influence of natural organic matter fouling and osmotic backwash on pressure retarded osmosis energy production from natural salinity gradients, *Environmental Science & Technology*, 47, 21, pp. 12607–12616.
 181. C. Aydiner, 2015, A model-based analysis of water transport dynamics and fouling behaviors of osmotic membrane, *Chemical Engineering Journal*, 266, pp. 289–298.
 182. C.Y. Tang, T.H. Chong, A.G. Fane, 2011, Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: a review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 164, 1–2, pp. 126–143.
 183. F. Meng, S.-R. Chae, A. Drews, M. Kraume, H.-S. Shin, F. Yang, 2009, Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material, *Water Research*, 43, 6, pp. 1489–1512.
 184. P. Le-Clech, V. Chen, T.A.G. Fane, 2006, Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment, *Journal of Membrane Science*, 284, 1–2, pp. 17–53.
 185. Y. Wang, F. Wicaksana, C.Y. Tang, A.G. Fane, 2010, Direct microscopic observation of forward osmosis membrane fouling, *Environmental Science & Technology*, 44, 18, pp. 7102–7109.
 186. Q. She, X. Jin, Q. Li, C.Y. Tang, 2012, Relating reverse and forward solute diffusion to membrane fouling in osmotically driven membrane processes, *Water Research*, 46, 7, pp. 2478–2486.
 187. J. Wei, C. Qiu, C.Y. Tang, R. Wang, A.G. Fane, 2011, Synthesis and characterization of flat-sheet thin film composite forward osmosis membranes, *Journal of Membrane Science*, 372, 1–2, pp. 292–302.
 188. Q. She, X. Jin, C.Y. Tang, 2012, Osmotic power production from salinity gradient resource by pressure retarded osmosis: effects of operating conditions and reverse solute diffusion, *Journal of Membrane Science*, 401–402, pp. 262–

273.

189. T. Majeed, S. Phuntsho, S. Jeong, Y. Zhao, B. Gao, H.K. Shon, 2016, Understanding the risk of scaling and fouling in hollow fiber forward osmosis membrane application, *Process Safety and Environmental Protection*, 104, pp. 452–464.
190. N. Prihasto, Q.-F. Liu, S.-H. Kim, 2009, Pre-treatment strategies for seawater desalination by reverse osmosis system, *Desalination*, 249, 1, pp. 308–316.
191. S.T. Mitrouli, S.G. Yiantisios, A.J. Karabelas, M. Mitrakas, M. Fóllesdal, P.A. Kjølseth, 2008, Pretreatment for desalination of seawater from an open intake by dual-media filtration: pilot testing and comparison of two different media, *Desalination*, 222, 1–3, pp. 24–37.
192. W. Ma, Y. Zhao, L. Wang, 2007, The pretreatment with enhanced coagulation and a UF membrane for seawater desalination with reverse osmosis, *Desalination*, 203, 1–3, pp. 256–259.
193. M. Kumar, S.S. Adham, W.R. Pearce, 2006, Investigation of seawater reverse osmosis fouling and its relationship to pretreatment type, *Environmental Science & Technology*, 40, 6, pp. 2037–2044.
194. H. Huang, H.-H. Cho, J.G. Jacangelo, K.J. Schwab, 2012, Mechanisms of membrane fouling control by integrated magnetic ion exchange and coagulation, *Environmental Science & Technology*, 46, 19, pp. 10711–10717.
195. A. Antony, J.H. Low, S. Gray, A.E. Childress, P. Le-Clech, G. Leslie, 2011, Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: a review, *Journal of Membrane Science*, 383, 1–2, pp. 1–16.
196. N.A. Milne, T. O'Reilly, P. Sanciolo, E. Ostarcevic, M. Beighton, K. Taylor, M. Mullett, A.J. Tarquin, S.R. Gray, 2014, Chemistry of silica scale mitigation for RO desalination with particular reference to remote operations, *Water Research*, 65, pp. 107–133.
197. J.N. Apell, T.H. Boyer, 2010, Combined ion exchange treatment for removal of dissolved organic matter and hardness, *Water Research*, 44, 8, pp. 2419–2430.
198. S. Zhao, G. Huang, G. Cheng, Y. Wang, H. Fu, 2014, Hardness, COD and turbidity removals from produced water by electrocoagulation pretreatment prior to Reverse Osmosis membranes, *Desalination*, 344, pp. 454–462.
199. J.S. Vrouwenvelder, S.A. Manolarakis, H.R. Veenendaal, D. Van Der Kooij, 2000, Biofouling potential of chemicals used for scale control in RO and NF membranes, *Desalination*, 132, 1–3, pp. 1–10.
200. A. Sweity, Z. Ronen, M. Herzberg, 2014, Induced organic fouling with

- antiscalants in seawater desalination, *Desalination*, 352, pp. 158–165.
201. X. Li, T. Cai, T.-S. Chung, 2014, Anti-fouling behavior of hyperbranched polyglycerol-grafted poly(ether sulfone) hollow fiber membranes for osmotic power generation, *Environmental Science & Technology*, 48, 16, pp. 9898–9907.
 202. X. Lu, S. Romero-Vargas Castrillón, D.L. Shaffer, J. Ma, M. Elimelech, 2013, In-situ surface chemical modification of thin-film composite forward osmosis membranes for enhanced organic fouling resistance, *Environmental Science & Technology*, 47, 21, pp. 12219–12228.
 203. A. Tiraferri, Y. Kang, E.P. Giannelis, M. Elimelech, 2012, Superhydrophilic thin-Film composite forward osmosis membranes for organic fouling control: fouling behavior and antifouling mechanisms, *Environmental Science & Technology*, 46, 20, pp. 11135–11144.
 204. D. Emadzadeh, W.J. Lau, T. Matsuura, N. Hilal, A.F. Ismail, 2014, The potential of thin film nanocomposite membrane in reducing organic fouling in forward osmosis process, *Desalination*, 348, pp. 82–88.
 205. X. Song, L. Wang, C.Y. Tang, Z. Wang, C. Gao, 2015, Fabrication of carbon nanotubes incorporated double-skinned thin film nanocomposite membranes for enhanced separation performance and antifouling capability in forward osmosis process, *Desalination*, 369, pp. 1–9.
 206. Y. Gao, S. Haavisto, W. Li, C.Y. Tang, J. Salmela, A.G. Fane, 2014, Novel approach to characterizing the growth of a fouling layer during membrane filtration via optical coherence tomography, *Environmental Science & Technology*, 48, 24, pp. 14273–14281.
 207. R. Valladares Linares, Sz.S. Bucs, Z. Li, M. AbuGhdeeb, G. Amy, J.S. Vrouwenvelder, 2014, Impact of spacer thickness on biofouling in forward osmosis, *Water Research*, 57, pp. 223–233.
 208. Z. Wang, J. Ma, C.Y. Tang, K. Kimura, Q. Wang, X. Han, 2014, Membrane cleaning in membrane bioreactors: a review, *Journal of Membrane Science*, 468, pp. 276–307.
 209. Y. Chun, F. Zaviska, E. Cornelissen, L. Zou, 2015, A case study of fouling development and flux reversibility of treating actual lake water by forward osmosis process, *Desalination*, 357, pp. 55–64.
 210. B. Mi, M. Elimelech, 2010, Organic fouling of forward osmosis membranes: fouling reversibility and cleaning without chemical reagents, *Journal of Membrane Science*, 348, 1–2, pp. 337–345.
 211. R. Valladares Linares, Z. Li, V. Yangali-Quintanilla, Q. Li, G. Amy, 2013,

- Cleaning protocol for a FO membrane fouled in wastewater reuse, *Desalination and Water Treatment*, 51, 25–27, pp. 4821–4824.
212. H. Yoon, Y. Baek, J. Yu, J. Yoon, 2013, Biofouling occurrence process and its control in the forward osmosis, *Desalination*, 325, pp. 30–36.
 213. J.-J. Qin, B. Liberman, K. A. Kekre, A. Gossan, 2009, Direct osmosis for reverse osmosis fouling control: principles, applications and recent developments, *The Open Chemical Engineering Journal*, 3, 1, pp. 8–16.
 214. A. Maartens, P. Swart, E.P. Jacobs, 1996, An enzymatic approach to the cleaning of ultrafiltration membranes fouled in abattoir effluent, *Journal of Membrane Science*, 119, 1, pp. 9–16.
 215. M.J. Muñoz-Aguado, D.E. Wiley, A.G. Fane, 1996, Enzymatic and detergent cleaning of a polysulfone ultrafiltration membrane fouled with BSA and whey, *Journal of Membrane Science*, 117, 1–2, pp. 175–187.
 216. H. Xu, Y. Liu, 2011, Control and cleaning of membrane biofouling by energy uncoupling and cellular communication, *Environmental Science & Technology*, 45, 2, pp. 595–601.
 217. BASF, 2018, *Safety Data Sheet (Trilon M)*, BASF.
 218. S. Yang, B. Gao, P. Zhao, C. Wang, X. Shen, Q. Yue, H.K. Shon, 2019, The application of forward osmosis for simulated surface water treatment by using trisodium citrate as draw solute, *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 9, pp. 8585–8593.
 219. Specialty Chemicals, 2015, *Safety Data Sheet (Maltodextrin)*, Specialty Chemicals.
 220. L. Chekli, S. Phuntsho, H.K. Shon, S. Vigneswaran, J. Kandasamy, A. Chanan, 2012, A review of draw solutes in forward osmosis process and their use in modern applications, *Desalination and Water Treatment*, 43, 1–3, pp. 167–184.
 221. European Parliament, European Council, 2008, Regulation (EC) No 1333/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on food additives, *Official Journal of the European Union*, 354, pp. 16–33.
 222. T.M. Hoang, T.Q. Nguyen, H.T. Trinh, T.N. Nguyen, M.Q. Bui, 2024, Novel draw solution system based on trisodium dicarboxymethyl alaninate for water desalination applications, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, pp. 5327–5340.
 223. World Health Organization, 2017, *Guidelines for Drinking-water Quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum*, World Health Organization.
 224. Cục Quản lý môi trường y tế, 2018, *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt QCVN 01-1:2018/BYT*, Bộ Y tế.

225. M. Hulme, T. Mitchell, T. Carter, P. Jones, M. New, 2018, *A Comprehensive Set of High-resolution Grids of Monthly Climate for Europe and the Globe: the Observed Record (1901–2000) and 16 Scenarios (2001–2100)*, Climatic Research Unit, University of East Anglia.
226. H. Fang, J. Xia, K. Zhu, Y. Su, Y. Jiang, 2013, Industrial waste heat utilization for low temperature district heating, *Energy Policy*, 62, pp. 236–246.
227. V. Raja, C.V.S. Rao, 2015, Preparation and characterization of (PVP +NaCl) based polymer electrolytes for electrochemical cell applications, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 6, 12, pp. 351–360.
228. H. Wang, J. Li, W. Hao, Q. Zhang, M. Tian, 2024, Modulating interfacial polymerization dynamics in nanostructured thin-film composite membranes: the role of polyvinylpyrrolidone and NaCl, *Journal of Membrane Science*, 709, pp. 123139.
229. S.E. Kwan, E. Bar-Zeev, M. Elimelech, 2015, Biofouling in forward osmosis and reverse osmosis: Measurements and mechanisms, *Journal of Membrane Science*, 493, pp. 703–708.
230. Z.-Y. Li, V. Yangali-Quintanilla, R. Valladares-Linares, Q. Li, T. Zhan, G. Amy, 2012, Flux patterns and membrane fouling propensity during desalination of seawater by forward osmosis, *Water Research*, 46, 1, pp. 195–204.
231. A. Wangsakan, P. Chinachoti, D.J. McClements, 2006, Isothermal titration calorimetry study of the influence of temperature, pH and salt on maltodextrin–anionic surfactant interactions, *Food Hydrocolloids*, 20, 4, pp. 461–467.
232. M.K. Ghorab, K. Marrs, L.S. Taylor, L.J. Mauer, 2014, Water–solid interactions between amorphous maltodextrins and crystalline sodium chloride, *Food Chemistry*, 144, pp. 26–35.

PHỤ LỤC

Bảng PL1. Kết quả kiểm tra tính phù hợp của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lõi cuộn MAL 20% theo Jw

	Tổng bình phương mô hình tuần tự					
	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Trung bình	1823,36	1	1823,36			
Tuyến tính	1,29	3	0,4294	1,68	0,22	
2FI	0,0001	3	0	0,0001	1	
Bậc hai	3,32	3	1,11	23482,58	< 0,0001	Đề xuất
Bậc ba	0,0003	3	0,0001	4,17	0,1008	Lỗi
Phần dư	0,0001	4	0			
Tổng	1827,97	17	107,53			
	Thống kê mô hình tổng hợp					
	Độ lệch chuẩn	R ²	R ² hiệu chỉnh	R ² dự đoán	Giá trị PRESS	Nhận xét
Tuyến tính	0,5055	0,2795	0,1132	-0,2757	5,88	
2FI	0,5763	0,2795	-0,1528	-1,735	12,61	
Bậc hai	0,0069	0,9999	0,9998	0,9991	0,0041	Đề xuất
Bậc ba	0,0045	1	0,9999		*	Lỗi

Bảng PL2. Kết quả kiểm tra tính phù hợp của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lõi cuốn MAL 20% theo Rds

	Tổng bình phương mô hình tuần tự					
	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Trung bình	1,07	1	1,07			
Tuyến tính	0,0009	3	0,0003	1,96	0,1701	
2FI	2,50E-07	3	8,33E-08	0,0004	1	
Bậc hai	0,0021	3	0,0007	2384,8	< 0,0001	Đề xuất
Bậc ba	1,25E-06	3	4,17E-07	2,08	0,2451	Lỗi
Phần dư	8,00E-07	4	2,00E-07			
Tổng	1,08	17	0,0632			
	Thống kê mô hình tổng hợp					
	Độ lệch chuẩn	R²	R² hiệu chỉnh	R² dự đoán	Giá trị PRESS	Nhận xét
Tuyến tính	0,0127	0,3113	0,1524	-0,2011	0,0037	
2FI	0,0145	0,3114	-0,1017	-1,5382	0,0077	
Bậc hai	0,0005	0,9993	0,9985	0,993	0	Đề xuất
Bậc ba	0,0004	0,9997	0,9989		*	Lỗi

Bảng PL3. Phân tích ANOVA của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lõi cuộn MAL 20% theo J_w

Biến	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Mô hình	4,61	9	0,5122	10864,04	< 0,0001	có ý nghĩa
X1	0,0242	1	0,0242	513,33	< 0,0001	
X2	1,26	1	1,26	26813,18	< 0,0001	
X3	0	1	0	0	1	
X1·X2	0	1	0	0	1	
X1·X3	0,0001	1	0,0001	2,12	0,1886	
X2·X3	0	1	0	0	1	
X1²	0,0055	1	0,0055	115,75	< 0,0001	
X2²	3,11	1	3,11	65903,25	< 0,0001	
X3²	0,1349	1	0,1349	2861,72	< 0,0001	
Phần dư	0,0003	7	0			
Độ lệch	0,0002	3	0,0001	4,17	0,1008	không ý nghĩa
Sai số thuần	0,0001	4	0			
Tổng hiệu chỉnh	4,61	16				

Bảng PL4. Phân tích ANOVA của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lô cuộn MAL 20% theo Rds

Biến	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Mô hình	0,003	9	0,0003	1154,8	< 0,0001	có ý nghĩa
X1	0	1	0	154,09	< 0,0001	
X2	0,0009	1	0,0009	3083,84	< 0,0001	
X3	0	1	0	0	1	
X1·X2	2,50E-07	1	2,50E-07	0,8537	0,3863	
X1·X3	0	1	0	0	1	
X2·X3	0	1	0	0	1	
X1²	2,63E-09	1	2,63E-09	0,009	0,9271	
X2²	0,0019	1	0,0019	6630,51	< 0,0001	
X3²	0,0001	1	0,0001	320,98	< 0,0001	
Phần dư	2,05E-06	7	2,93E-07			
Độ lệch	1,25E-06	3	4,17E-07	2,08	0,2451	không ý nghĩa
Sai số thuần	8,00E-07	4	2,00E-07			
Tổng hiệu chỉnh	0,003	16				

Bảng PL5. Kết quả kiểm tra tính phù hợp của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lô cuộn PVP 20% theo Jw

	Tổng bình phương mô hình tuần tự					
	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Trung bình	3347,98	1	3347,98			
Tuyến tính	2,09	3	0,6976	1,77	0,2026	
2FI	0	3	8,33E-06	0	1	
Bậc hai	5,13	3	1,71	8218,84	< 0,0001	Đề xuất
Bậc ba	0,0008	3	0,0003	1,52	0,3387	Lỗi
Phần dư	0,0007	4	0,0002			
Tổng	3355,2	17	197,36			
	Thống kê mô hình tổng hợp					
	Độ lệch chuẩn	R²	R² hiệu chỉnh	R² dự đoán	Giá trị PRESS	Nhận xét
Tuyến tính	0,628	0,2899	0,126	-0,2927	9,33	
2FI	0,716	0,2899	-0,1362	-1,8429	20,52	
Bậc hai	0,0144	0,9998	0,9995	0,9981	0,0135	Đề xuất
Bậc ba	0,013	0,9999	0,9996		*	Lỗi

Bảng PL6. Kết quả kiểm tra tính phù hợp của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lô cuộn PVP 20% theo Rds

	Tổng bình phương mô hình tuần tự					
	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Trung bình	0,2941	1	0,2941			
Tuyến tính	0,0002	3	0,0001	1,92	0,1755	
2FI	5,00E-07	3	1,67E-07	0,0035	0,9997	
Bậc hai	0,0005	3	0,0002	4505,53	< 0,0001	Đề xuất
Bậc ba	2,50E-07	3	8,33E-08			Lỗi
Phần dư	0	4	0			
Tổng	0,2948	17	0,0173			
	Thống kê mô hình tổng hợp					
	Độ lệch chuẩn	R²	R² hiệu chỉnh	R² dự đoán	Giá trị PRESS	Nhận xét
Tuyến tính	0,0061	0,3076	0,1478	-0,2383	0,0009	
2FI	0,0069	0,3083	-0,1068	-1,6762	0,0019	
Bậc hai	0,0002	0,9996	0,9992	0,9943	4,00E-06	Đề xuất
Bậc ba	0	1	1		*	Lỗi

Bảng PL7. Phân tích ANOVA của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lô cuộn PVP 20% theo J_w

Biến	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Mô hình	7,22	9	0,802	3858,38	< 0,0001	có ý nghĩa
X1	0,1953	1	0,1953	939,65	< 0,0001	
X2	1,89	1	1,89	9100,06	< 0,0001	
X3	0,0061	1	0,0061	29,11	0,001	
X1·X2	0	1	0	0,1203	0,7389	
X1·X3	0	1	0	0	1	
X2·X3	0	1	0	0	1	
X1²	0,0223	1	0,0223	107,21	< 0,0001	
X2²	4,98	1	4,98	23945,85	< 0,0001	
X3²	0,0709	1	0,0709	341,02	< 0,0001	
Phần dư	0,0015	7	0,0002			
Độ lệch	0,0008	3	0,0003	1,52	0,3387	không ý nghĩa
Sai số thuần	0,0007	4	0,0002			
Tổng hiệu chỉnh	7,22	16				

Bảng PL8. Phân tích ANOVA của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lõi cuộn PVP 20% theo Rds

Biến	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Mô hình	0,0007	9	0,0001	2171,51	< 0,0001	có ý nghĩa
X1	0	1	0	686	< 0,0001	
X2	0,0002	1	0,0002	5323,5	< 0,0001	
X3	1,25E-07	1	1,25E-07	3,5	0,1036	
X1·X2	2,50E-07	1	2,50E-07	7	0,0331	
X1·X3	2,50E-07	1	2,50E-07	7	0,0331	
X2·X3	0	1	0	0	1	
X1²	2,63E-07	1	2,63E-07	7,37	0,03	
X2²	0,0005	1	0,0005	12997,89	< 0,0001	
X3²	9,47E-06	1	9,47E-06	265,26	< 0,0001	
Phần dư	2,50E-07	7	3,57E-08			
Độ lệch	2,50E-07	3	8,33E-08	0,0069	0,9991	không ý nghĩa
Sai số thuần	0	4	0			
Tổng hiệu chỉnh	0,0007	16				

Bảng PL9. Kết quả kiểm tra tính phù hợp của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lõi cuộn MGDA 25% theo Jw

	Tổng bình phương mô hình tuần tự					
	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Trung bình	1473,31	1	1473,31			
Tuyến tính	0,0737	3	0,0246	0,0532	0,9831	
2FI	0	3	8,33E-06	0	1	
Bậc hai	6	3	2	13270,89	< 0,0001	Đề xuất
Bậc ba	0,0004	3	0,0001	0,7353	0,5832	Lỗi
Phần dư	0,0007	4	0,0002			
Tổng	1479,38	17	87,02			
	Thống kê mô hình tổng hợp					
	Độ lệch chuẩn	R²	R² hiệu chỉnh	R² dự đoán	Giá trị PRESS	Nhận xét
Tuyến tính	0,6794	0,0121	-0,2158	-0,846	11,21	
2FI	0,7747	0,0121	-0,5806	-3,1531	25,23	
Bậc hai	0,0123	0,9998	0,9996	0,9988	0,0071	Đề xuất
Bậc ba	0,013	0,9999	0,9996		*	Lỗi

Bảng PL10. Kết quả kiểm tra tính phù hợp của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lõi cuộn MGDA 25% theo Rds

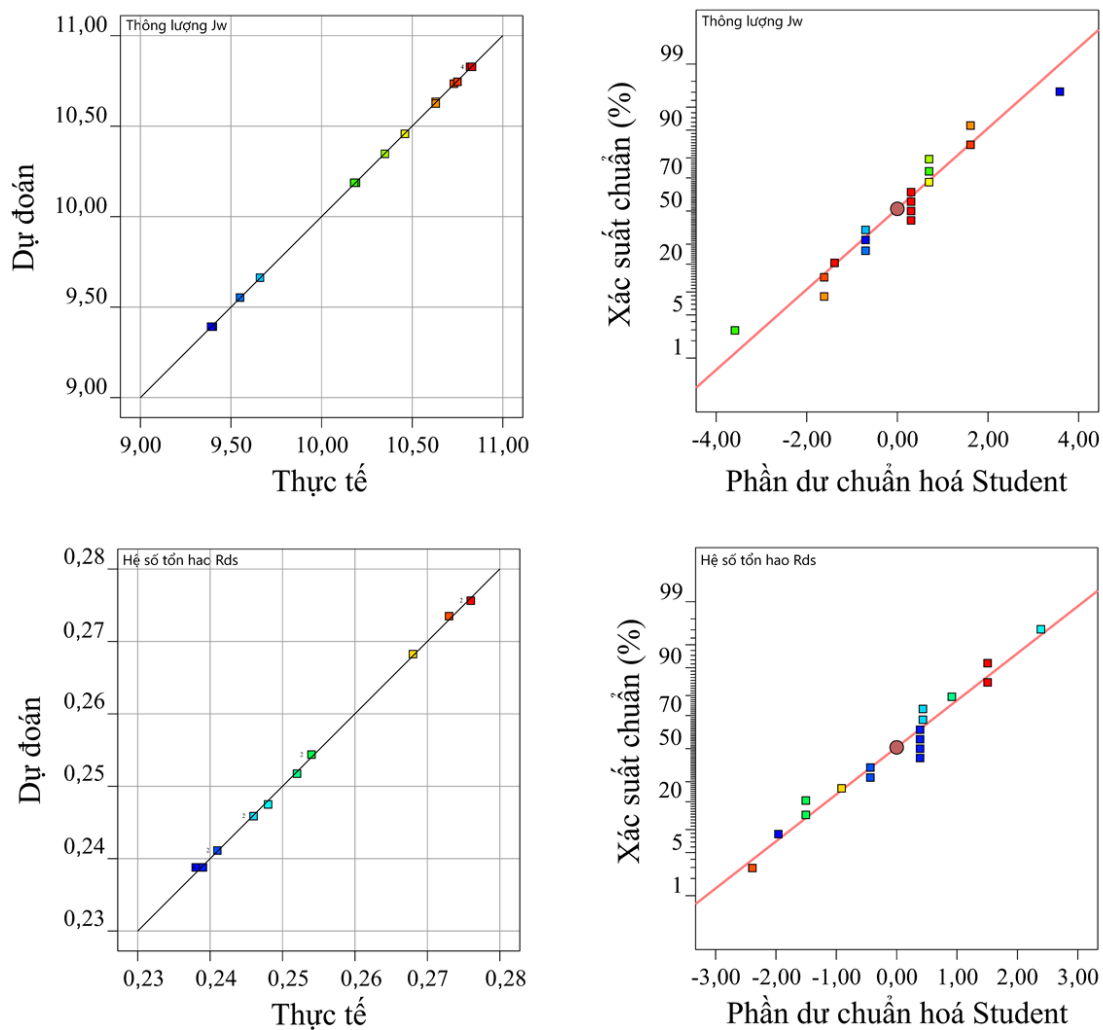
	Tổng bình phương mô hình tuần tự					
	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Trung bình	2,54	1	2,54			
Tuyến tính	0,0002	3	0,0001	0,0953	0,9613	
2FI	2,50E-07	3	8,33E-08	0,0001	1	
Bậc hai	0,0106	3	0,0035	15926,76	< 0,0001	Đề xuất
Bậc ba	7,50E-07	3	2,50E-07	1,25	0,4028	Lỗi
Phần dư	8,00E-07	4	2,00E-07			
Tổng	2,55	17	0,1503			
	Thông kê mô hình tổng hợp					
	Độ lệch chuẩn	R²	R² hiệu chỉnh	R² dự đoán	Giá trị PRESS	Nhận xét
Tuyến tính	0,0285	0,0215	-0,2043	-0,8118	0,0196	
2FI	0,0325	0,0215	-0,5655	-3,0443	0,0437	
Bậc hai	0,0005	0,9999	0,9997	0,9988	0	Đề xuất
Bậc ba	0,0004	0,9999	0,9997		*	Lỗi

Bảng PL11. Phân tích ANOVA của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lõi cuộn MGDA 25% theo Jw

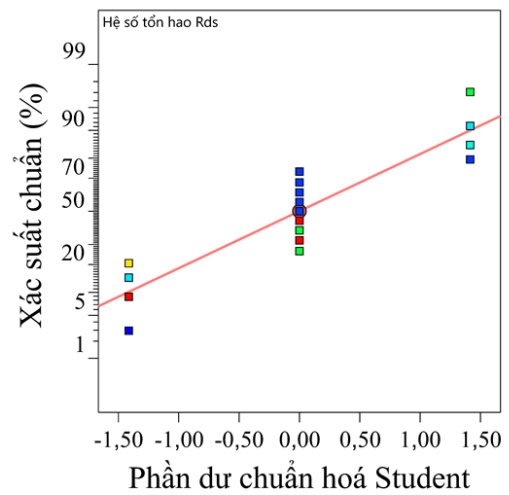
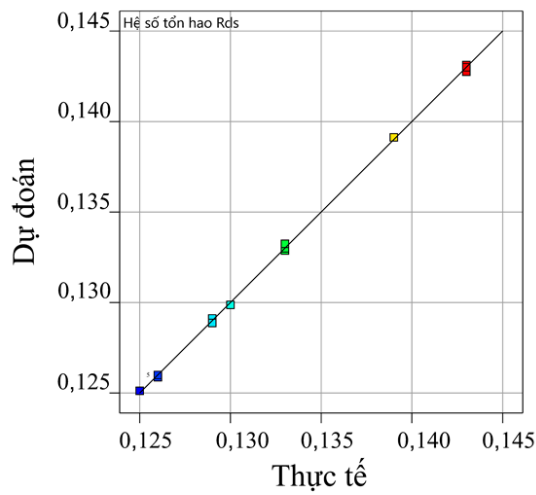
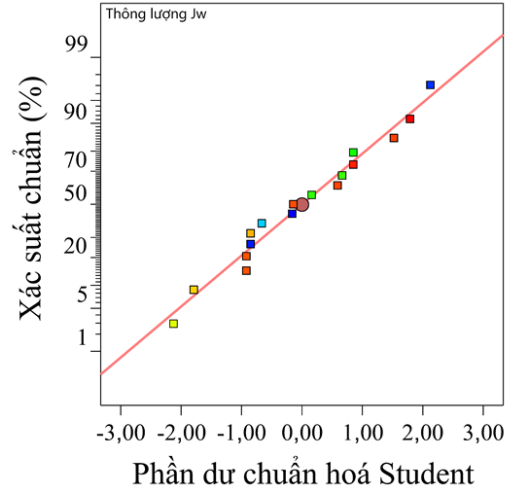
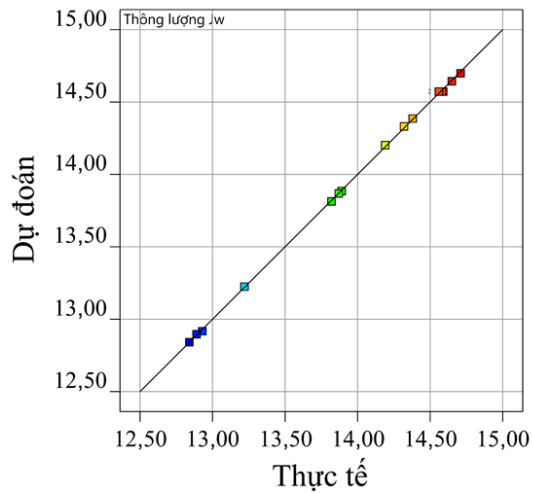
Biến	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Mô hình	6,07	9	0,6749	4477,96	< 0,0001	có ý nghĩa
X1	0,0253	1	0,0253	167,95	< 0,0001	
X2	0,048	1	0,048	318,82	< 0,0001	
X3	0,0003	1	0,0003	2,07	0,1931	
X1·X2	0	1	0	0	1	
X1·X3	0	1	0	0,1659	0,696	
X2·X3	0	1	0	0	1	
X1²	0,0009	1	0,0009	6,08	0,0431	
X2²	5,99	1	5,99	39744,85	< 0,0001	
X3²	0,0126	1	0,0126	83,74	< 0,0001	
Phần dư	0,0011	7	0,0002			
Độ lệch	0,0004	3	0,0001	0,7353	0,5832	không ý nghĩa
Sai số thuần	0,0007	4	0,0002			
Tổng hiệu chỉnh	6,08	16				

Bảng PL12. Phân tích ANOVA của mô hình phương trình đa thức bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lô cuốn MGDA 25% theo Rds

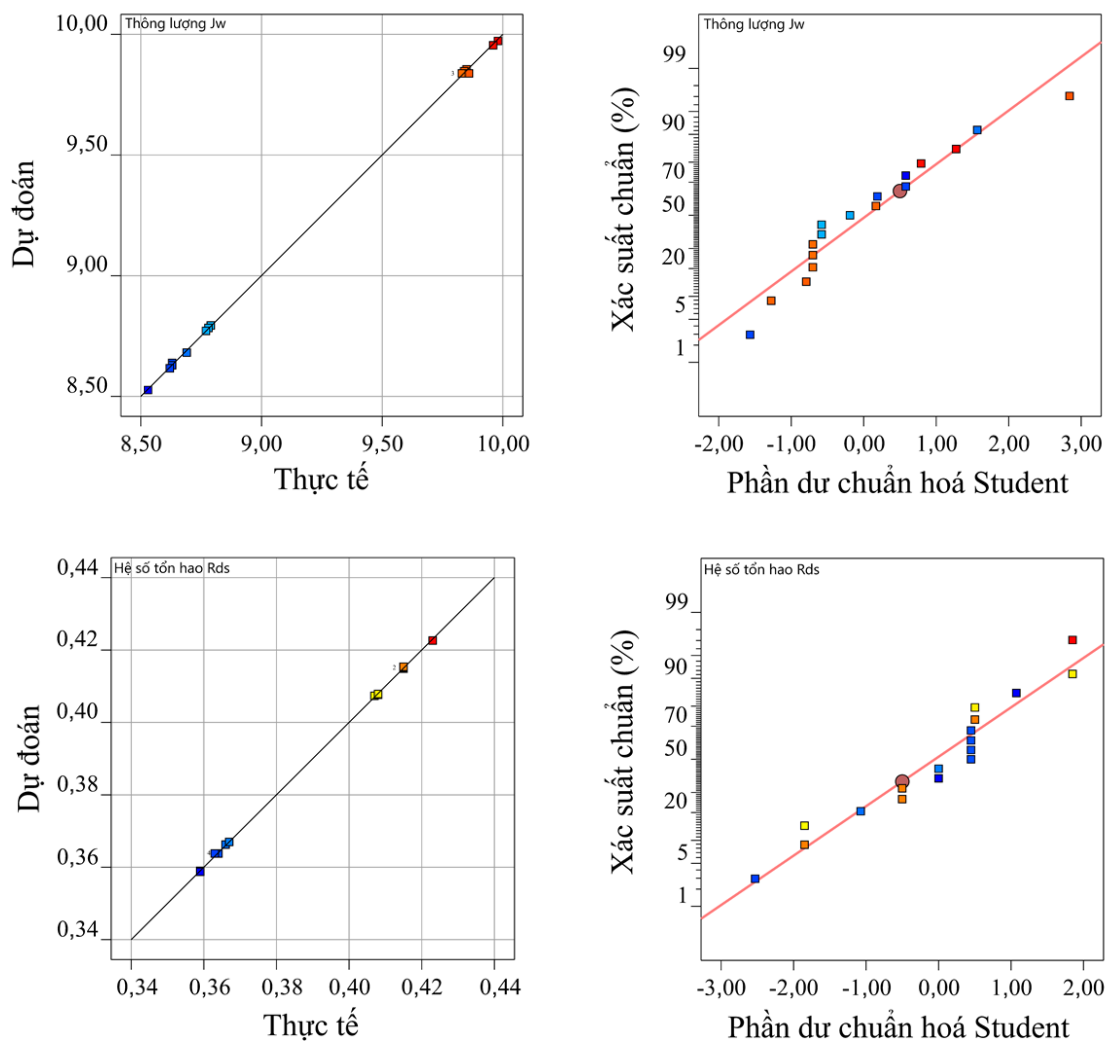
Biến	Tổng bình phương	Số đf	Bình phương trung bình	Giá trị F	Giá trị p	Nhận xét
Mô hình	0,0108	9	0,0012	5425,84	< 0,0001	có ý nghĩa
X1	0,0001	1	0,0001	542,5	< 0,0001	
X2	0,0001	1	0,0001	508,06	< 0,0001	
X3	1,25E-07	1	1,25E-07	0,5645	0,4769	
X1·X2	0	1	0	0	1	
X1·X3	2,50E-07	1	2,50E-07	1,13	0,3233	
X2·X3	0	1	0	0	1	
X1²	6,32E-06	1	6,32E-06	28,53	0,0011	
X2²	0,0105	1	0,0105	47490,67	< 0,0001	
X3²	0	1	0	98,42	< 0,0001	
Phần dư	1,55E-06	7	2,21E-07			
Độ lệch	7,50E-07	3	2,50E-07	1,25	0,4028	không ý nghĩa
Sai số thuần	8,00E-07	4	2,00E-07			
Tổng hiệu chỉnh	0,0108	16				



Hình PL1. Kết quả kiểm tra mối quan hệ giữa giá trị thực tế và giá trị dự đoán của các kết quả đánh giá trong mô hình bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lồi cuộn MAL 20% theo J_w (trên) và theo R_{ds} (dưới)



Hình PL2. Kết quả kiểm tra mối quan hệ giữa giá trị thực tế và giá trị dự đoán của các kết quả đánh giá trong mô hình bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lồi cuốn PVP 20% theo J_w (trên) và theo R_{ds} (dưới)



Hình PL3. Kết quả kiểm tra mối quan hệ giữa giá trị thực tế và giá trị dự đoán của các kết quả đánh giá trong mô hình bậc hai sử dụng cho tối ưu hoá đối với dung dịch lõi cuộn MGDA 25% theo J_w (trên) và theo R_{ds} (dưới)



VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM
VIỆN HÓA HỌC
PHÒNG HÓA SINH MÔI TRƯỜNG
 Nhà A18, 18 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội



PHIẾU KẾT QUẢ PHÂN TÍCH

Người gửi mẫu: **Hoàng Minh Tạo**
 Địa chỉ: **Nhà A28, số 18 đường Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội**
 Loại mẫu: **Mẫu nước**
 Số lượng mẫu: **04**
 Ngày gửi mẫu: **14/03/2025**
 Ngày phân tích: **14/03/2025 đến 21/03/2025**

TT	Chỉ tiêu phân tích	Đơn vị	Ký hiệu mẫu				QCVN 01-1:2018/BYT
			M1	M2	M3	M4	
1	Độ pH	-	7,2	6,7	6,7	6,9	6,0 – 8,5
2	TDS	mg/L	10.800	368	296	427	1.000
3	Độ đục	NTU	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	2
4	Màu sắc	TCU	< 5	< 5	< 5	< 5	15
5	Độ cứng	mg/L	150	40	40	25	300
6	Asen	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
7	Natri	mg/L	4.200	10	10	120	200
8	Clorua	mg/L	4.700	0,4	0,4	0,4	250
9	SO ₄ ²⁻	mg/L	290	< 2	< 2	< 2	250
10	NO ₃ ⁻	mg/L	1,63	0,91	0,97	0,94	2
11	NO ₂ ⁻	mg/L	0,04	< 0,015	< 0,015	< 0,015	0,05
12	Coliform	CFU/100mL	2,3×10 ²	0	0	0	< 3

Ghi chú:

QCVN 01-1:2018/BYT: Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt.

M1. Mẫu nước mặt đã được tiền xử lý trước khi vào hệ thống lọc FO (đầu vào FO)

M2. Mẫu nước sau khi qua hệ thống lọc NF (sử dụng dung dịch lõi cuộn MAL 20%)

M3. Mẫu nước sau khi qua hệ thống lọc NF (sử dụng dung dịch lõi cuộn PVP 20%)

M4. Mẫu nước sau khi qua hệ thống lọc NF (sử dụng dung dịch lõi cuộn MGDA 25%)

Viện Hóa học xác nhận
 TS. Đào Hải Yến là Trưởng phòng
TL. VIỆN HÓA HỌC
Hóa Sinh Môi Trường

KT. TRƯỞNG PHÒNG QLTH

VIỆN HÓA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

VIỆN HÓA HỌC

Hà Nội, ngày 21 tháng 3 năm 2025

Trưởng Phòng

(Signature)

TS. Đào Hải Yến

Yến Thị Thu Quyên

- Tên mẫu, ký hiệu mẫu ghi theo thông tin của khách hàng

- Kết quả chỉ có giá trị đối với mẫu khách hàng gửi phân tích

- Lưu mẫu và giải quyết thắc mắc trong vòng 05 ngày từ khi trả kết quả

Hình PL4. Phiếu kết quả phân tích chất lượng nước sạch thu được sau khi hoàn nguyên các dung dịch lõi cuộn