



TÁI SỬ DỤNG NƯỚC THẢI TRONG BỐI CẢNH KINH TẾ TUẦN HOÀN: TÍNH CẤP THIẾT CỦA VIỆC LOẠI BỎ MUỐI VÀ CÁC CÔNG NGHỆ TIỀM NĂNG TẠI VIỆT NAM

BÙI HOA DƯƠNG¹, NGUYỄN ĐỨC VIỆT¹, HOÀNG THỊ THU HƯƠNG^{1*}

¹Trường Hóa và Khoa học Sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội

Tóm tắt

Tái sử dụng (TSD) nước thải được xem là giải pháp trọng tâm hướng tới phát triển bền vững và kinh tế tuần hoàn tại Việt Nam. Tuy nhiên, hàm lượng muối cao trong nước thải sau xử lý đang là rào cản lớn đối với việc TSD an toàn và hiệu quả, gây nguy cơ nhiễm mặn đất và ô nhiễm nước ngầm. Bài viết trình bày tổng quan các công nghệ chính gồm quy trình lọc màng, điện hóa, nhiệt. Các công nghệ này có tiềm năng lớn nhờ khả năng vận hành linh hoạt và tích hợp năng lượng tái tạo. Tuy nhiên, chi phí đầu tư cao và thiếu khung pháp lý hỗ trợ vẫn là thách thức chính. Việt Nam cần sớm hoàn thiện tiêu chuẩn kỹ thuật, có chính sách hỗ trợ doanh nghiệp nhằm thúc đẩy TSD nước thải bền vững.

Từ khóa: Nước thải, công nghệ xử lý, chất lượng nước, tuần hoàn.

Ngày nhận bài: 20/1/2026; **Ngày sửa chữa:** 10/2/2026; **Ngày duyệt đăng:** 23/2/2026.

Wastewater reuse in the context of circular economy: Necessity of salt removal and potential technologies in Vietnam

Abstract

Wastewater reuse is considered a key solution for achieving sustainable development and the circular economy in Vietnam. However, the high solute content in treated wastewater remains a major barrier to safe and effective reuse, posing risks of soil salinization and groundwater contamination. This paper provides an overview of the main technology groups, including membrane processes, electrochemical methods, and thermal processes. These technologies show strong potential due to their operational flexibility and compatibility with renewable energy integration. Nevertheless, high investment costs and the lack of a supportive regulatory framework remain major challenges. Technical standards and policy support for businesses should be developed promptly to promote sustainable wastewater reuse.

Keywords: Wastewater, treatment technology, water quality, circulation.

Classification: O13, P18, P48, Q53.

1. MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh Việt Nam đối mặt với những thách thức nghiêm trọng về an ninh nguồn nước, TSD nước thải đang trở thành giải pháp quan trọng hướng tới phát triển bền vững. Mặc dù có tổng lượng dòng chảy lớn (844 tỷ m³/năm), nước phân bố không đều với 70 - 80% tập trung vào mùa mưa ngắn. Dự báo nhu cầu nước vào mùa khô năm 2030 sẽ tăng 32% trong khi khả năng cung cấp vẫn hạn chế [1]. Ô nhiễm nguồn nước ngày càng nghiêm trọng khi 75% trong hơn 1 triệu m³ nước thải công nghiệp hàng ngày chưa được xử lý hoàn toàn. Cùng với biến đổi khí hậu và khai thác nước ngầm quá mức, tình trạng này gây xâm nhập mặn và sụt lún đất, dẫn đến nguy cơ thiếu nước nghiêm trọng vào năm 2030. Do vậy, Chính phủ đã thúc đẩy mô hình kinh tế tuần hoàn qua Luật BVMT năm 2020 và Luật Tài nguyên nước năm 2023, coi nước thải là tài nguyên thay vì chất thải [2]. Kinh

nghiệm quốc tế từ các nước tiên tiến như Singapo với hệ thống NEWater cung cấp 30% nhu cầu sử dụng nước và Brazil với Dự án Aquapolo Ambiental cho thấy tiềm năng lớn của TSD nước. Việc TSD không chỉ bảo đảm an ninh nguồn nước và giảm áp lực khai thác tài nguyên tự nhiên mà còn mang lại lợi ích kinh tế thông qua tiết kiệm chi phí sản xuất và nâng cao khả năng cạnh tranh [2].

Tuy nhiên, việc TSD nước thải tại Việt Nam đang đối mặt nhiều thách thức lớn. Hầu hết hệ thống xử lý hiện tại chỉ đạt tiêu chuẩn xả thải, chưa tích hợp công nghệ bổ sung cho TSD. Chi phí cao cho công nghệ hiện đại cùng với khung pháp lý chưa đồng bộ và nhận thức hạn chế đang tạo rào cản lớn cho doanh nghiệp. Đặc biệt, hàm lượng muối hòa tan cao trong nước sau xử lý là thách thức lớn cho mục tiêu TSD, có thể gây nhiễm mặn đất, ảnh hưởng sinh trưởng cây trồng và ô nhiễm nước ngầm khi dùng cho tưới tiêu.

2. TÍNH CẤP THIẾT CỦA VIỆC LOẠI BỎ MUỐI TRONG NƯỚC THẢI CHO MỤC TIÊU TSD

TSD nước thải công nghiệp cho tưới tiêu và các mục đích khác đòi hỏi kiểm soát nghiêm ngặt độ mặn, đặc biệt là hàm lượng tổng chất rắn hòa tan (TDS), nhằm bảo vệ cây trồng, đất và nguồn nước. Theo QCVN 40:2025/BTNMT, giới hạn tổng Cl⁻ trong nước thải sau xử lý là 1.000 mg/L, cao hơn đáng kể so với giới hạn cho nước tưới của QCVN 08:2023/BTNMT (≤250 mg/L) và QCVN 01-195:2022/BNNPTNT (≤600 mg/L). Sự chênh lệch này khiến phần lớn nước thải sau xử lý không đáp ứng yêu cầu tưới tiêu. Mặc dù nước thải xử lý có thể cung cấp các chất dinh dưỡng như nitơ và photpho, hàm lượng muối cao, đặc biệt là hàm lượng Na⁺ và Cl⁻ trong nước có thể gây nhiều tác động tiêu cực. Chúng có thể ức chế sinh trưởng cây, làm tăng độ mặn đất, thay đổi đặc tính vật lý và hóa học của đất, dẫn đến giảm năng suất nông nghiệp và suy thoái môi trường.

Theo Tổ chức Y tế thế giới (WHO), độ mặn được đánh giá qua độ dẫn điện (EC), tỷ lệ hấp thụ Natri (SAR), nồng độ Na⁺, Cl⁻ và TDS, có thể làm giảm năng suất đất thông qua: Thay đổi áp suất thẩm thấu, gây độc ion, cản trở hấp thụ dinh dưỡng và phá hủy cấu trúc đất. Mức độ nhiễm mặn phụ thuộc vào chất lượng nước, kết cấu, khả năng thoát nước của đất, hàm lượng

hữu cơ và mực nước ngầm; do đó, giám sát định kỳ tại hiện trường là cần thiết [3]. Ngoài ra, nước thải TSD có độ mặn cao có thể gây ô nhiễm nước ngầm và nước mặt, làm tăng TDS, giảm khả năng sử dụng cho sinh hoạt, nông nghiệp và công nghiệp, đồng thời gây ăn mòn đường ống, thiết bị [3]. Tại Việt Nam, đặc biệt ở đồng bằng sông Cửu Long, nơi xâm nhập mặn đã nghiêm trọng, việc TSD nước thải không qua khử muối có thể làm trầm trọng hơn tình trạng này.

Vì vậy, loại bỏ muối là yêu cầu then chốt để bảo đảm hiệu quả và an toàn của TSD nước thải. Để đáp ứng QCVN 08:2023/BTNMT, các khu công nghiệp cần tích hợp công đoạn khử muối vào hệ thống xử lý, đồng thời giám sát thường xuyên các chỉ tiêu TDS, EC, SAR; kết hợp giải pháp nông nghiệp như trồng cây chịu mặn, cải thiện thoát nước và áp dụng tưới tiết kiệm. Những biện pháp này không chỉ nâng cao hiệu quả TSD nước thải mà còn góp phần phát triển nông nghiệp bền vững và bảo vệ tài nguyên nước.

3. CÁC YÊU CẦU VỀ ĐỘ MẶN TRONG NƯỚC TSD

TSD nước thải yêu cầu kiểm soát nghiêm ngặt các thông số độ mặn như EC_w, TDS và Cl⁻ để đảm bảo an toàn sức khỏe và phù hợp với đa mục đích sử dụng. Tiêu chuẩn California áp dụng cách tiếp cận thận trọng với các công nghệ tiên tiến như màng RO, tia UV, xử lý đa giai đoạn nhằm loại bỏ hoàn toàn rủi ro

Bảng 1. Giới hạn một số thông số đối với chất lượng nước tưới theo nhu cầu của cây trồng theo hướng dẫn của WHO [3]

Thông số		Đơn vị	Mức độ hạn chế sử dụng		
			Không có	Nhẹ đến trung bình	Nghiêm trọng
Độ mặn (EC _w)		dS/m	<0,7	0,7 – 0,3	>3,0
TDS		mg/L	<450	450 – 2000	>2000
TSS		mg/L	<50	50 – 100	>100
Natri (Na ⁺)	Tưới phun mưa	meq/L	<3	>3	-
Natri (Na ⁺)	Tưới bề mặt	meq/L	<3	3 – 9	>9
Clo (Cl ⁻)	Tưới phun mưa	meq/L	<3	>3	-
Clo (Cl ⁻)	Tưới bề mặt	meq/L	<4	4 – 10	>10
Clorine (Cl ₂)	Tổng lượng dư	mg/L	<1	1 – 5	>5
Bicacbonat (HCO ₃ ⁻)		mg/L	<90	90 – 500	>500
Bo (B)		mg/L	<0,7	0,7 – 3,0	>3,0
Hydro sunfit (H ₂ S)		mg/L	<0,5	0,5 – 2	>2,0
Sắt (Fe)	Tưới nhỏ giọt	mg/L	<0,1	0,1 – 1,5	>1,5
Mangan (Mn)	Tưới nhỏ giọt	mg/L	<0,1	0,1 – 1,5	>1,5
Tổng nitơ		mg/L	<5	5 - 30	>30
pH	Phạm vi trung bình 6,5 - 8				

Ghi chú:

EC_w: Độ mặn của nước tưới

TDS: Tổng chất rắn hòa tan

TSS: Tổng chất rắn lơ lửng



sức khỏe, tuy nhiên bị cho là quá khát khe và khó áp dụng cho các nước đang phát triển có nguồn lực hạn chế. Ngược lại, WHO từ năm 1973 (sửa đổi gần nhất năm 2006) đưa ra hướng dẫn dựa trên nghiên cứu dịch tễ học, cho phép các thông số BOD, COD và E. coli ở ngưỡng cao hơn, phù hợp với điều kiện thực tế của nhiều quốc gia [3] (Bảng 1).

Trên phạm vi toàn cầu, tiêu chuẩn quốc tế ISO 16075 đã kết hợp hướng dẫn từ WHO và Cơ quan BVMT Hoa Kỳ (US EPA), cung cấp khung chất lượng cho việc sử dụng nước thải trong tưới tiêu nông nghiệp với các giới hạn về độ mặn, kim loại nặng và vi sinh vật, đồng thời hướng dẫn lựa chọn cây trồng phù hợp. Châu Âu đã thiết lập quy định có hiệu lực từ năm 2020 với hệ thống phân loại chất lượng nước TSD thành bốn loại A, B, C, D theo mục đích cụ thể, yêu cầu giám sát định kỳ E. coli và TDS, đồng thời quy định các phương pháp tưới để giảm thiểu rủi ro. Jordan thiết lập ba tiêu chuẩn chính: Số 202/2007 cho nước thải công nghiệp (TDS tối đa 2000 mg/l), số 893/2006 cho nước thải sinh hoạt và hướng dẫn số 1766/2014 hỗ trợ lựa chọn cây trồng theo độ mặn.

Ôxtrâyliya phân loại nước tái chế thành ba cấp độ chất lượng với giới hạn cụ thể về hóa chất, vi sinh vật và kim loại nặng cho các mục đích khác nhau. Hoa Kỳ quản lý theo tiểu bang với hướng dẫn EPA 2012 làm tài liệu tham khảo, trong đó California quy định các mức chất lượng tối thiểu cho tưới cảnh quan, công nghiệp và kiểm soát bụi với kiểm soát chặt chẽ coliform, độ đục và kim loại nặng [4] (Bảng 2).

Tại Việt Nam, các quy định về chất lượng nước TSD (trong đó có quy định về độ mặn) còn khá sơ khai so với các quốc gia phát triển. Bộ NN&PTNT (nay là Bộ Nông nghiệp và Môi trường) đã ban hành QCVN 01-195:2022/BNNPTNT, quy định về nước thải chăn nuôi dùng cho tưới cây, với các giới hạn về kim loại nặng, Clorua, E. coli để bảo vệ cây trồng và đất nông nghiệp. Ngoài ra, QCVN 08-MT:2015/BTNMT quy định chất lượng nước dùng cho tưới tiêu, cũng bao gồm các thông số như pH, độ mặn và kim loại nặng, tuy không đề cập trực tiếp đến nước thải TSD nhưng áp dụng cho mọi nguồn nước tưới. Hiện nay, ở Việt Nam vẫn thiếu các tiêu chuẩn cụ thể cho các mục đích TSD khác như công nghiệp hoặc sinh hoạt, dẫn đến khó khăn

Bảng 2. Hướng dẫn giải thích chất lượng nước để tưới tiêu của Hoa Kỳ [4]

Thông số	Đơn vị	Mức độ hạn chế về tưới tiêu			
		Không có	Nhẹ đến trung bình	Nghiêm trọng	
Độ mặn (ảnh hưởng đến khả năng cung cấp nước cây trồng)					
EC_w	dS/m	<0,7	0,7 - 3,0	>3,0	
TDS	mg/L	<450	450 - 2000	>2000	
Sự thấm thấu (ảnh hưởng đến tốc độ thấm thấu của nước vào đất được đánh giá bằng cách sử dụng EC và SAR kết hợp)					
SAR	0 - 3	và $EC_w =$	>0,7	0,7 - 0,2	<0,2
	3 - 6		>1,2	1,2 - 0,3	<0,3
	6 - 12		>1,9	1,9 - 0,5	<0,5
	12 - 20		>2,0	2,9 - 1,3	<1,3
	20 - 40		>5,0	5,0 - 2,9	<2,9
Độc tính cụ thể ảnh hưởng đến cây trồng nhạy cảm					
Natri (Na)	Tưới bề mặt	SAR	<3	3 - 9	>9
	Tưới phun mưa	meq/L	<3	>3	-
Cloride (Cl)	Tưới bề mặt	meq/L	<4	4 - 10	>10
	Tưới phun mưa	meq/L	<3	>3	-
Bo (B)	mg/L	<0,7	0,7 - 3,0	>3,0	
Các tác động khác nhau (ảnh hưởng đến cây trồng dễ bị tổn thương)					
Nitrat (NO_3^- -N)	mg/L	<5	5 - 30	>30	
Bicacbonat (HCO_3^-)	meq/L	<1,5	1,5 - 8,5	>8,5	
pH		Thông thường 6,5 - 8,4			

Ghi chú:

EC_w : Độ mặn của nước tưới

TDS: Tổng chất rắn hòa tan



trong việc triển khai các dự án TSD nước thải trên diện rộng. Sự thiếu đồng bộ này, kết hợp với chi phí cao của các công nghệ xử lý tiên tiến như màng lọc hoặc khử trùng, khiến việc áp dụng các yêu cầu chất lượng nước TSD ở Việt Nam còn hạn chế so với các quốc gia như Hoa Kỳ, Ôxtrâyliya, hay Jordan [3], [4].

4. CÁC PHƯƠNG PHÁP LOẠI BỎ MUỐI TRONG NƯỚC THẢI SAU XỬ LÝ

Loại bỏ muối là bước thiết yếu trong TSD nước thải cho tưới tiêu, công nghiệp và sinh hoạt nhằm giảm TDS và các ion như natri, clorua. Các phương pháp được phân thành ba nhóm chính dựa trên các quy trình lọc, điện hóa và nhiệt.

4.1. Nhóm phương pháp dựa trên quy trình lọc

a. Công nghệ thẩm thấu ngược (RO)

Công nghệ thẩm thấu ngược (RO) là phương pháp loại bỏ muối tiên tiến, chiếm 70 - 85% tổng công suất khử muối toàn cầu và được sử dụng trong 85% các nhà máy loại bỏ muối. RO hoạt động bằng cách sử dụng áp lực cơ học đẩy nước qua màng bán thấm, đảo ngược quá trình thẩm thấu tự nhiên với áp suất vận hành từ 55 - 82 bar cho nước biển và 17 - 27 bar cho nước lợ.

Hệ thống RO gồm bốn thành phần chính: Tiền xử lý, bơm cao áp, đơn vị màng và xử lý thứ cấp, tạo ra nước thẩm thấu tinh khiết và nước đậm đặc chứa muối. Tỷ lệ thu hồi nước dao động 50 - 85%, thường đạt 75%. Màng RO có kích thước lỗ lọc 0,1 - 1 nm, khả năng loại bỏ TDS lên đến 45.000 mg/L với hiệu quả 98% cho các chất như canxi, magie, đồng thời loại bỏ vi khuẩn, vi rút, kim loại nặng và các chất ô nhiễm hữu cơ [5]. RO có nhiều ưu điểm nổi bật như hiệu suất năng lượng cao (1,8 kWh/m³), tạo ra nước chất lượng cao phù hợp cho nhiều mục đích, độ bền ổn định, tiêu thụ ít hóa chất, cấu trúc mô-đun linh hoạt, và khả năng tích hợp năng lượng tái tạo giúp giảm tới 90% phát thải khí nhà kính [5].

Tuy nhiên, công nghệ này vẫn đối mặt với nhiều thách thức như tiêu thụ năng lượng lớn (chiếm 30 - 50% chi phí vận hành) do yêu cầu bơm cao áp; tắc nghẽn và đóng cặn màng làm giảm hiệu suất, tăng chi phí bảo trì; chi phí đầu tư cao, trong đó màng chiếm 40 - 50% vốn; phát sinh dòng nước thải đậm đặc gây khó khăn xử lý [5]. Công nghệ RO đã được ứng dụng thành công tại nhiều quốc gia. Điển hình, hệ thống NEWater của Singapore áp dụng quy trình màng vi lọc/siêu lọc (MF/UF-RO-UV), đáp ứng 40% nhu cầu nước hiện tại và dự kiến đạt 55% vào năm 2060. Tại Ôxtrâyliya, nhà máy Gippsland Water Factory xử lý 35.000 m³/ngày nước thải bằng hệ thống lọc màng sinh học - thẩm thấu ngược (MBR-RO), cung cấp 8.000 - 10.000 m³/ngày nước tinh khiết chất lượng cao cho TSD công nghiệp [6].

b. Công nghệ thẩm thấu thuận (FO)

Thẩm thấu thuận (FO) là công nghệ tách/loại bỏ muối sử dụng áp suất thẩm thấu tự nhiên mà không cần áp suất thủy lực cao như RO. Màng bán thấm được đặt giữa dung dịch thẩm (DS) có nồng độ muối cao và dung dịch cấp (FS) có nồng độ thấp hơn, nước được thúc đẩy từ FS sang DS nhờ gradient áp suất thẩm thấu. FO có nhiều ưu điểm nổi bật như: Ít bị tắc nghẽn hơn RO và có thể phục hồi 80 - 100% dòng nước chỉ bằng rửa màng đơn giản; giữ lại hiệu quả chất hữu cơ, dinh dưỡng và chất ô nhiễm vi lượng; xử lý tốt nước cấp có độ mặn, độ nhớt hoặc tiềm năng tắc nghẽn cao [7].

Tuy nhiên, FO cũng tồn tại nhiều hạn chế về lưu lượng nước qua màng thấp và hiện tượng khuếch tán ngược chất hòa tan từ dung dịch thẩm (DS) sang dung dịch cấp (FS); quá trình tái tạo dung dịch thẩm phức tạp, tốn kém, làm giảm tính khả thi thương mại; chi phí đầu tư cao đối với hệ thống FO lai so với công nghệ thông thường [6], [7]. Ứng dụng FO trong TSD nước thải gồm hai nhóm: Có tái tạo dung dịch thẩm - như xử lý nước thải sinh hoạt (FO-MD đạt tỷ lệ thu hồi 80%, FO - MBR duy trì dòng chảy ổn định) và cô đặc bùn thải để giảm thể tích, chi phí vận chuyển; không tái tạo dung dịch thẩm - như sản xuất nước tưới sử dụng phân bón làm dung dịch kéo, cấp nước khẩn cấp không cần điện với dung dịch đường-muối tạo đồ uống năng lượng và sản xuất năng lượng sinh học kết hợp tế bào nhiên liệu vi sinh vật [7].

4.2. Các phương pháp loại bỏ muối dựa trên nguyên lý điện hóa

a. Điện thẩm tách (ED)

Điện thẩm tách (ED) hoạt động dựa trên nguyên lý áp dụng trường điện để di chuyển các ion hòa tan qua các màng trao đổi ion (IEMs). Một hệ thống ED bao gồm nhiều tế bào đơn vị, trong đó màng trao đổi anion (AEM) và màng trao đổi cation (CEM) được sắp xếp xen kẽ giữa hai điện cực: Cực dương (anode) và cực âm (cathode). Khi điện trường được áp dụng, anion trong dòng nước cấp di chuyển về phía anode thông qua AEM, trong khi cation di chuyển về phía cathode thông qua CEM. Để duy trì dòng điện, các phản ứng điện hóa thuận nghịch xảy ra tại điện cực, chuyển đổi dòng ion trong dung dịch thành dòng điện qua hệ thống.

Những ưu điểm chính của công nghệ ED gồm có [8], [9]: Có khả năng cô đặc nước muối cao; Tiêu thụ năng lượng thấp hơn so với các phương pháp cô đặc nhiệt; Không cần áp suất, giảm chi phí vận hành và bảo trì; ED tiêu thụ ít năng lượng hơn RO trong khử muối nước lợ; Chi phí tổng thể của ED thấp nhất trong số các phương án điện hóa; Có thể dùng để loại bỏ ion chọn lọc.



Việc loại bỏ muối trong nước thải tái sử dụng là yêu cầu cấp thiết để thúc đẩy mô hình KTTH tại Việt Nam

Tuy nhiên, bên cạnh đó công nghệ này còn nhiều hạn chế như [8]: Các vấn đề chính của công nghệ là bám bẩn màng và đóng cặn; Khử muối dung dịch độ mặn cao trở nên không kinh tế do yêu cầu năng lượng tỷ lệ thuận với độ mặn.

ED là một trong những công nghệ điện hóa đã được nghiên cứu và ứng dụng hơn 50 năm, phục vụ các mục đích như khử muối nước lợ, xử lý nước thải và khử khoáng nước. Các hệ thống ED điển hình đạt hiệu suất thu hồi nước khoảng 50%. Việc điều chỉnh hiệu suất thu hồi đòi hỏi thay đổi lưu lượng dòng chảy qua các kênh lỗng và cô đặc, có thể gây chênh lệch áp suất hai phía màng IEM và ảnh hưởng đến độ bền cơ học của màng. Năng suất xử lý nước của ED có thể điều chỉnh linh hoạt thông qua việc kiểm soát lưu lượng cấp vào các tế bào, với dải giá trị từ vài đến vài trăm lít trên mét vuông màng mỗi giờ ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) [9].

b. Khử ion điện dung (CDI) và các biến thể

Khử ion điện dung (CDI) hoạt động dựa trên việc áp dụng trường điện giữa một cặp điện cực (anode và cathode) để loại bỏ các ion tích điện khỏi dòng nước cấp. Trong cấu hình CDI cơ bản, các điện cực carbon đóng vai trò hấp phụ ion nhờ cơ chế tích điện bề mặt. Màng khử ion điện dung (MCDI) là phiên bản cải tiến của CDI, bổ sung màng trao đổi ion (IEMs) nhằm nâng cao hiệu quả nạp điện và khả năng loại bỏ muối.

Khử ion điện dung dòng điện cực (FCDI) là công nghệ mới sử dụng điện cực dòng chảy, cho phép khử

muối liên tục. Trong hệ này, các điện cực bão hòa được xả và tái tạo tách biệt khỏi kênh xử lý nước. Quá trình loại bỏ muối của FCDI vừa dựa trên cơ chế điện dung, vừa có sự đóng góp đáng kể từ điện thẩm tách. Màng vi lọc được sử dụng để ngăn chất rắn điện cực đi vào dòng nước, trong khi IEMs hoặc màng siêu lọc (NF) đóng vai trò then chốt trong nâng cao hiệu quả tách muối [9]. Ưu điểm nổi bật của CDI như: Có khả năng mở rộng quy mô tốt; Ít bị bám bẩn hơn so với RO vì chúng không dựa vào việc thấm nước qua màng bán thấm; FCDI có khả năng hấp phụ muối không giới hạn vì điện cực được tái tạo đồng thời với việc hấp thụ ion muối...

Tuy nhiên, các công nghệ này có một số hạn chế như: Các tế bào CDI thường được sử dụng để xử lý nguồn cấp có độ mặn thấp do khả năng hấp phụ muối hạn chế của điện cực các-bon; Mặc dù MCDI và FCDI ít bị bám bẩn hơn RO, nhưng các chất ô nhiễm hữu cơ tích điện và ion gây cứng vẫn có thể gây bám cặn; Chi phí liên quan đến máy bơm điện cực dòng chảy của FCDI làm tăng chi phí tổng thể so với ED.

Nhìn chung, các công nghệ CDI có tiềm năng ứng dụng ở quy mô lớn cho khử muối tại các khu vực xa xôi, đặc biệt đối với nguồn nước lợ và nước thải có độ mặn thấp đến trung bình. MCDI còn thích hợp cho xử lý nước máy và nước thải trong các ngành công nghệ cao, nơi yêu cầu chất lượng nước nghiêm ngặt [9].



4.3. Nhóm phương pháp dựa trên nguyên lý nhiệt

a. Công nghệ chưng cất nhanh nhiều giai đoạn (MSF)

Chưng cất nhanh nhiều giai đoạn (MSF) là công nghệ nhiệt khử muối được sử dụng rộng rãi, từng chiếm gần 60% tổng công suất sản xuất toàn thế giới [8]. Trong MSF, nước muối được làm nóng và đưa vào buồng áp suất thấp để bốc hơi nhanh, sau đó chuyển sang các giai đoạn tiếp theo với áp suất ngày càng thấp hơn. Hơi nước ngưng tụ tạo nước ngọt nhờ làm lạnh bằng nước muối đầu vào. Hệ thống MSF điển hình có 20 - 30 giai đoạn, công suất tối đa 75.000 m³/ngày, bao gồm các tầng chưng cất, thiết bị gia nhiệt, bơm, hệ thống thông khí và vòng điều khiển nước làm mát [8]. Ưu điểm nổi bật gồm: Đơn giản, đáng tin cậy, đã giải quyết hiệu quả vấn đề bám cặn, tạo bọt và ăn mòn; tạo nước ngọt chất lượng cao, dễ quản lý với xử lý sơ bộ tối thiểu; tiềm năng đóng cặn thấp hơn công nghệ màng và xử lý được nước muối TDS cao (70.000 mg/L) [8]; sử dụng vật liệu xây dựng giá rẻ, không có bộ phận chuyển động (ngoài bơm), yêu cầu lưu lượng nước biển cấp thấp (2,5 kg/s cho 1 kg/s nước sản phẩm) và vận hành ổn định quanh năm.

Thách thức chính bao gồm: Đầu tư vốn cao và chi phí loại bỏ muối cao (0,8 USD/m³); tiêu thụ năng lượng lớn với mức điện năng 3,5 - 5 kWhel/m³ và năng lượng nhiệt 69,4 - 83,3 kWhth/m³ (hệ thống độc lập); hiệu suất nhiệt thấp hơn 30 - 70% so với MEE hoặc MEE kết hợp bơm nhiệt; yêu cầu diện tích đất trung bình 4,5 - 5 m²/m³/h [8].

Ứng dụng TSD nước thải: MSF đóng vai trò quan trọng trong hệ thống xử lý nước thải công nghiệp, thường là bước cuối cùng thu hồi nước tối đa từ nước muối cô đặc sau xử lý màng. Công nghệ MSF cải tiến với trộn nước muối (MSF-M) giúp cải thiện hiệu suất tổng thể, giảm yêu cầu xử lý sơ bộ và đạt tỷ lệ hiệu suất nhiệt cao gấp đôi MSF thông thường. MSF có thể tích hợp với FO trong hệ thống lai FO-MSF sử dụng nguồn năng lượng nhiệt chi phí thấp, hoặc FO làm công nghệ tiền xử lý loại bỏ chất đóng cặn, cho phép MSF hoạt động ở nhiệt độ và tỷ lệ thu hồi cao hơn.

b. Công nghệ chưng cất hiệu ứng đa cấp

Công nghệ chưng cất hiệu ứng đa cấp (MED) là một trong hai công nghệ khử muối chính dựa trên nguyên lý nhiệt, đã được ứng dụng rộng rãi trong xử lý nước và TSD nước thải có độ mặn cao. MED hoạt động theo nguyên lý bay hơi và ngưng tụ liên tiếp qua nhiều giai đoạn, trong đó hơi nước từ giai đoạn trước được sử dụng làm nguồn nhiệt cho giai đoạn tiếp theo có áp suất thấp hơn, tạo ra hiệu ứng "đa cấp" giúp TSD nhiệt hiệu quả. Cấu hình MED điển hình bao gồm 8-16 giai đoạn. Về ưu điểm, MED mang lại nhiều lợi ích quan trọng trong TSD nước thải. Công nghệ này

tạo ra nước ngọt đạt tiêu chuẩn khát khe cho TSD và xử lý hiệu quả nước có độ mặn cao từ 70.000 - 180.000 mg TDS/L. MED có tiêu thụ năng lượng nhiệt thấp hơn MSF, nhiệt độ vận hành thấp (khoảng 70°C), ít bị đóng cặn hơn và đạt tỷ lệ thu hồi nước lên tới 93%, phù hợp với nguyên tắc ZLD [24]. Về kinh tế, chi phí vận hành và bảo trì trung bình của MED là 0,12 €/m³, thấp hơn so với MSF là 0,22 €/m³.

MED có mức tiêu thụ năng lượng điện từ 0,5-1,5 kWhel/m³ đối với hệ thống độc lập và 1,5-2,5 kWhel/m³ khi tích hợp. Tiêu thụ năng lượng nhiệt dao động từ 41,7 - 61,1 kWhth/m³ cho hệ thống độc lập, khoảng 27,8 kWhth/m³ khi đóng phát, và có thể lên tới 200 - 250 kWhth/m³ ở nhiệt độ 150°C [8]. Tuy nhiên, MED cũng tồn tại một số hạn chế cần lưu ý: Chi phí đầu tư ban đầu cao do yêu cầu vật liệu chống ăn mòn để xử lý nước muối nóng, tiêu thụ năng lượng điện đáng kể, cần diện tích lắp đặt lớn và hệ thống quản lý phức tạp hơn so với MSF. Những yếu tố này có thể ảnh hưởng đến tính khả thi kinh tế trong các dự án quy mô nhỏ.

Trong ứng dụng TSD nước thải, MED thể hiện hiệu quả cao trong xử lý các dòng thải có độ mặn cao hoặc chất lượng phức tạp từ công nghiệp. Đặc biệt, MED được áp dụng rộng rãi trong các hệ thống không chất thải lỏng (ZLD), đóng vai trò bước tiền cô đặc nước muối trước khi đưa vào các quá trình kết tinh năng lượng cao hơn. Nhiều nghiên cứu đã đề xuất tăng số lượng giai đoạn MED để giảm tiêu thụ nhiệt trong hệ thống ZLD, khẳng định tiềm năng ứng dụng của công nghệ này.

4.4. Quy trình lai giữa màng và nhiệt: Công nghệ chưng cất màng (MD)

Công nghệ chưng cất màng (MD) là một quy trình lai tiên tiến kết hợp giữa quy trình màng và quy trình nhiệt, thể hiện tiềm năng lớn trong lĩnh vực xử lý nước mặn và nước thải. Đây là một quá trình tách nhiệt động sử dụng sự chênh lệch áp suất hơi xuyên màng để tách các chất dễ bay hơi ra khỏi dung dịch được làm nóng. Nguyên tắc hoạt động cốt lõi của MD dựa trên sự chênh lệch áp suất riêng phần xuyên màng kỵ nước và xốp, có các lỗ chứa đầy khí để ngăn cản dung dịch lỏng trong khi chỉ cho phép hơi nước đi qua. MD hoạt động trong điều kiện vận hành nhẹ nhàng với nhiệt độ dung dịch cấp liệu trong khoảng 50 - 90°C và áp suất gần như khí quyển, giúp giảm yêu cầu thiết bị, tăng tuổi thọ màng.

Công nghệ MD thể hiện nhiều ưu điểm vượt trội trong xử lý nước thải. MD hoạt động ở nhiệt độ tương đối thấp (40 - 90°C) và áp suất thủy lực thấp, cho phép sử dụng nhiệt thải hoặc nhiệt cấp thấp, trở thành lựa chọn hiệu quả về năng lượng. Khả năng loại bỏ các chất tan không bay hơi của MD rất cao, đạt tỷ lệ loại bỏ muối trên 99% và có thể tạo ra nước cất chất lượng cao



(<10 $\mu\text{S/cm}$) từ nước muối có TDS 70.000 mg/L [7], [8], [10]. Đối với nước sản xuất từ khai thác dầu khí, MD đạt được tỷ lệ loại bỏ muối >99% và loại bỏ tổng carbon >90% ngay cả khi cô đặc để thu hồi 80% nước...

Tuy nhiên, MD vẫn đối mặt với một số thách thức cần giải quyết. Mặc dù có thể sử dụng nhiệt cấp thấp, tổng năng lượng cần thiết vẫn có thể cao, đặc biệt đối với MD tiếp xúc trực tiếp, và chi phí năng lượng là yếu tố hạn chế việc áp dụng quy mô lớn. Nhiễm bẩn màng và đóng cặn vẫn là mối lo ngại khi xử lý nước thải phức tạp, cần phát triển các chiến lược làm sạch và tiền xử lý hiệu quả hơn. Ướt màng là vấn đề tiềm ẩn có thể làm giảm hiệu quả màng, đòi hỏi phát triển màng có độ kỵ nước cao hơn và kiểm soát điều kiện vận hành chính xác [8], [10].

Trong ứng dụng TSD nước thải, MD thể hiện tiềm năng rộng rãi. MD được ứng dụng trong thu hồi nước từ nước thải nhiễm dầu, xử lý các dòng thải từ ngành công nghiệp sữa, thực phẩm, đồ uống và chăn nuôi, cũng như loại bỏ kim loại nặng từ nước thải đô thị và công nghiệp. Đặc biệt, MD có thể xử lý chất thải lỏng phóng xạ mức độ thấp và trung bình, thu hồi nước với hoạt độ phóng xạ ở mức nền tự nhiên [8], [10]. Công nghệ này còn có khả năng giảm thiểu thể tích và tăng nồng độ nước muối bằng cách trực tiếp chiết tách nước, giúp đạt được hệ thống ZLD hoặc gần ZLD. MD đại diện cho một công nghệ tích hợp tiên tiến với khả năng ứng dụng đa dạng trong TSD nước thải, mặc dù vẫn cần nghiên cứu thêm ở quy mô lớn để thương mại hóa rộng rãi trong các ứng dụng công nghiệp.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Có thể thấy, việc loại bỏ muối trong nước thải TSD là yêu cầu cấp thiết để ứng phó với tình trạng khan hiếm nước và thúc đẩy mô hình kinh tế tuần hoàn tại Việt Nam. Hàm lượng Cl trong nước thải công nghiệp sau xử lý theo QCVN 40:2025/BTNMT (1000 mg/L) vượt xa các tiêu chuẩn tưới tiêu (250 - 600 mg/L), gây tác động tiêu cực nghiêm trọng đến cây trồng, đất nông nghiệp và nguồn nước ngầm. Các công nghệ loại bỏ muối hiện có bao gồm ba nhóm chính: Phương pháp lọc màng (RO, FO), điện hóa (ED, CDI) và nhiệt (MSF, MED, MD). Công nghệ RO đang chiếm ưu thế với 70 - 85% thị phần toàn cầu và hiệu quả loại bỏ TDS đạt 98%. Công nghệ chưng cất màng (MD) thể hiện tiềm năng ứng dụng cao nhờ khả năng vận hành ở áp suất thấp, phù hợp với nguồn năng lượng tái tạo và xử lý hiệu quả nước muối có độ mặn rất cao (>70.000 mg TDS/L). Tuy nhiên, chi phí đầu tư cao, tiêu thụ năng lượng lớn và thiếu khung pháp lý đồng bộ vẫn là những rào cản chính cần giải quyết.

Để thực hiện việc TSD nước hiệu quả trong tương lai, cần sớm hoàn thiện khung pháp lý và tiêu

chuẩn kỹ thuật về chất lượng nước TSD theo từng mục đích, đặc biệt là giới hạn TDS, Cl⁻ và EC, đồng thời lồng ghép tiêu chí TSD nước và xử lý muối vào các chính sách hỗ trợ doanh nghiệp áp dụng công nghệ xử lý tiên tiến. Tăng cường tuyên truyền để nâng cao nhận thức cộng đồng và doanh nghiệp về lợi ích của nước TSD.

Lời cảm ơn: Các kết quả nghiên cứu được thực hiện nhờ sự hỗ trợ của Dự án "Decentralized water resource circulation as a sustainable solution for plantation" (HUST - LASER PULSE)■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Nhật Minh, "Tác động của biến đổi khí hậu đến tài nguyên nước và đề xuất giải pháp ứng phó," *Tạp chí Môi trường*, no. 2/2023, 2023.
2. Hoàng Thị Thu Hương, Đỗ Khắc Uẩn, Nguyễn Thị Lan Phương, Đào Hoàng Hải, "Tuần hoàn TSD nước thải sau xử lý trong công nghiệp - Tiềm năng và thách thức," *Tạp chí Môi trường*, no. 3, 2023.
3. WHO, UNEP, FAO, WHO guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater, 2006.
4. Markus LECHNER, "Eco-industrial park intervention in Viet Nam - Consulting Services on water management for industrial parks," 2023.
5. Ahmad Shabib, Bushra Tatan Mohamed A. Hamouda, Yousef Elbaz, Munjed A. Maraqa, Ashraf Aly Hassan, "Advancements in reverse osmosis desalination: Technology, environment, economy, and bibliometric insights," *Desalination*, p. 598, 2025.
6. UNESCO; Intergovernmental Hydrological Programme; WSSM, Water reuse within a circular economy context - 2 global water security issues series, Seoul, Hàn Quốc: Pieona Books, 2020.
7. R. Valladares Linares, Z.Lia, S. Sarp, Sz.S. Bucs, G. Amy, J.S. Vrouwenvelder, "Forward osmosis niches in seawater desalination and wastewater reuse," *Science Direct*, vol. 66, p. 122, 2014.
8. Giulia Cipolletta, Nicola Lancioni, Çayır Akyol, Anna Laura Eusebi, Francesco Fatone, "Brine treatment technologies towards minimum/zero liquid discharge and resource recovery: State of the art and techno-economic assessment," *Journal of Environmental Management*, 2021.
9. Meng Sheng, Yun Guo, Boreum Lee, Razi Epsztein, Zhiwei Wang, Li Wang, "Electrified desalination processes: Where we are and where to go from performance and economic perspectives," *Desalination*, p. 600, 2025.
10. Kamalesh K. Sirkar, Dhananjay Singh and Lin Li, "Chapter 7 Membrane Distillation in Desalination and Water Treatment".