



Review Article

Technologies for Ultrapure Water Production in Semiconductor Industry

Nguyen Duc Viet, Vu Ngoc Thuy, Hoang Thi Thu Huong*

*Department of Environmental Science and Technology,
School of Chemistry and Life Science, Hanoi University of Science and Technology,
1 Dai Co Viet, Bach Khoa, Hanoi, Vietnam*

Received 08th August 2025

Revised 15th September 2025; Accepted 30th September 2025

Abstract: The semiconductor industry has become one of the most critical pillars of the global economy, with projected revenues expected to exceed USD one trillion by 2030. A key but often underappreciated resource underpinning semiconductor manufacturing is ultrapure water (UPW), which is indispensable for wafer cleaning, photolithography, chemical vapor deposition, and other precision processes. This review provides an overview of emerging technologies in UPW production for semiconductor manufacturing that have long been employed and remain foundational to UPW systems. We also emphasize the importance of integrated solutions with advanced oxidation processes, solar-driven energy system, and artificial intelligence. Together, these synergies create pathways toward greener, more resilient, and economically viable UPW production. These strategies are expected to ensure superior water purity, operational efficiency, and environmental sustainability, thereby supporting the long-term growth and competitiveness of the semiconductor sector.

Keywords: Advanced oxidation processes (AOPs); artificial intelligence (AI); semiconductor industry; ultrapure water (UPW).

* Corresponding author.

E-mail address: huong.hoangthithu@hust.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5427>

Tổng quan về sự phát triển của các công nghệ sản xuất nước siêu tinh khiết trong công nghiệp bán dẫn

Nguyễn Đức Việt, Vũ Ngọc Thủy, Hoàng Thị Thu Hương*

*Khoa Khoa học và Công nghệ Môi trường, Trường Hóa và Khoa học Sự sống,
Đại học Bách Khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Bách Khoa, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 08 tháng 8 năm 2025

Chỉnh sửa ngày 15 tháng 9 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 9 năm 2025

Tóm tắt: Ngành công nghiệp bán dẫn đóng vai trò then chốt trong kinh tế toàn cầu, với giá trị thị trường được dự báo sẽ vượt 1 nghìn tỷ đô la Mỹ vào năm 2030. Sản xuất bán dẫn đòi hỏi nguồn cung cấp nước siêu sạch (ultrapure water, UPW) liên tục và ổn định. Tuy nhiên, quá trình sản xuất UPW đang phải đối mặt với áp lực khan hiếm nguồn nước và tiêu chuẩn nước thành phẩm ngày càng khắt khe. Nghiên cứu này tổng quan về sự phát triển của các công nghệ sản xuất UPW mới nhất cũng như các mặt hạn chế của từng công nghệ, từ đó phân tích lợi ích có được khi kết hợp các công nghệ này với các quá trình khác như oxi hóa nâng cao, năng lượng tái tạo và trí tuệ nhân tạo. Sự phát triển không ngừng của công nghệ sản xuất UPW và các hệ thống tích hợp giúp thúc đẩy hiệu quả sản xuất của công nghiệp bán dẫn nói riêng và các mô hình sản xuất bền vững nói chung.

Từ khóa: công nghệ màng; bán dẫn; nước siêu sạch; hệ thống tích hợp; kinh tế tuần hoàn.

1. Mở đầu

Những năm gần đây, ngành bán dẫn đã trở thành trụ cột của kinh tế toàn cầu, thúc đẩy chuyển đổi số trong nhiều lĩnh vực. Dự báo năm 2025, doanh số bán dẫn toàn cầu đạt khoảng 700 tỷ đô la Mỹ và có thể vượt 1 nghìn tỷ đô la Mỹ vào năm 2030, đưa bán dẫn trở thành mặt hàng có giá trị giao dịch lớn thứ tư sau dầu thô, dầu tinh chế và ô tô [1]. Bán dẫn đồng thời được xem là công nghệ chiến lược, gắn với cạnh tranh kinh tế và an ninh quốc gia của nhiều nước lớn trên thế giới.

Hiện nay, chuỗi sản xuất bán dẫn mang tính toàn cầu, từ thiết kế, chế tạo đến đóng gói và kiểm thử. Xu hướng chuyên môn hóa với sự xuất hiện của dịch vụ lắp ráp và kiểm định thuê ngoài đã dẫn tới mạng lưới sản xuất phân tán, trong đó không quốc gia nào nắm trọn toàn bộ chuỗi giá

trị [2]. Với nguồn nhân lực dồi dào, các quốc gia châu Á hiện chiếm ưu thế tuyệt đối, đặc biệt là Đài Loan, Hàn Quốc, Trung Quốc, Nhật Bản và Singapore. Trong khi đó, Mỹ giữ vai trò chủ đạo trong thiết kế và thiết bị, còn châu Âu có thế mạnh ở chip ô tô, điện tử công suất, với tham vọng tăng gấp đôi thị phần toàn cầu vào năm 2030. Các trung tâm mới nổi như Ấn Độ, Malaysia, Việt Nam cũng đang được đầu tư mạnh mẽ [3].

Trong sản xuất bán dẫn, nước siêu sạch (ultrapure water, UPW) đóng vai trò thiết yếu nhưng vẫn chưa được đầu tư phát triển đúng mức. Mỗi tấm wafer 200 mm có thể tiêu thụ hàng nghìn lít UPW cho các công đoạn rửa, làm sạch và quang khắc [4]. Dự báo mức độ tăng trưởng kép hàng năm (CAGR) của UPW trên toàn cầu đạt 9,2% từ nay đến 2030, đạt hơn 16 tỷ đô la Mỹ

* Tác giả liên hệ.

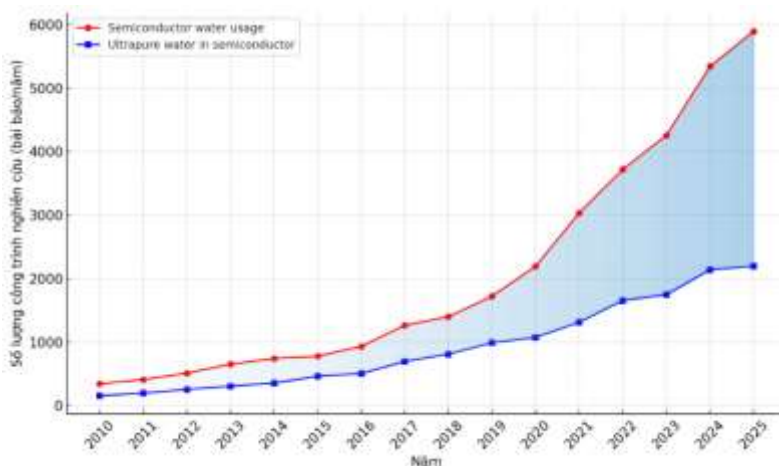
Địa chỉ email: huong.hoangthithu@hust.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5427>

[2]. Tại Việt Nam, nhu cầu UPW cũng tăng trưởng mạnh với CAGR 10,7%, đạt hơn 1 tỷ đô la Mỹ vào năm 2032 [3]. Hình 1 trình bày sự tăng trưởng nhanh, đặc biệt trong khoảng 10 năm trở lại đây của các nghiên cứu liên quan đến sử dụng và sản xuất UPW, với số lượng công bố tăng hơn 10 lần sau 15 năm từ 2010 đến 2025. Trong đó, số lượng nghiên cứu về UPW luôn chiếm hơn 50% tổng số công bố, cho thấy tầm quan trọng của UPW trong công nghiệp bán dẫn.

UPW yêu cầu đạt độ tinh khiết cực cao với điện trở suất 18,3 MΩ.cm, TOC < 1-5 ppb, nồng độ ion kim loại < 0,1 ppb. Chỉ một lượng nhỏ tạp

chất cũng có thể gây lỗi nghiêm trọng [5]. Các quy trình xử lý truyền thống như trao đổi ion, than hoạt tính dạng hạt (granular activated carbon, GAC), màng thẩm thấu ngược (reverse osmosis, RO) và trao đổi ion (ion exchange, IX) đã được áp dụng, nhưng vẫn gặp thách thức về loại bỏ hợp chất hữu cơ có phân tử nhỏ, chi phí năng lượng và hóa chất [6]. Do đó, các công nghệ mới nổi như màng RO cải tiến, màng khử ion điện dung (membrane capacitive deionization, MCDI) và chưng cất màng (membrane distillation, MD) đang thu hút sự quan tâm lớn [1].



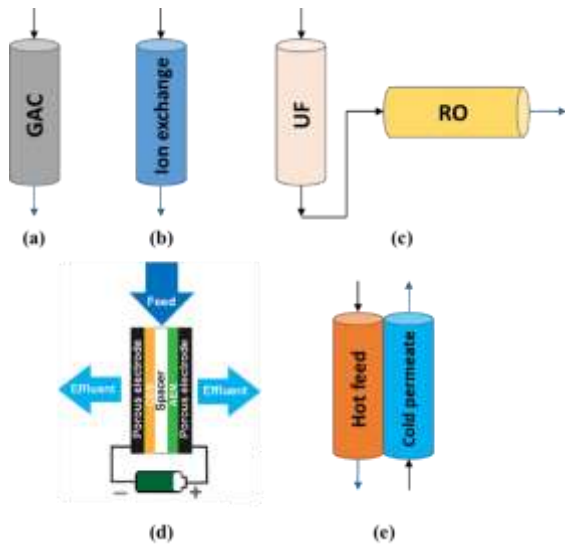
Hình 1. Sự phát triển của nghiên cứu về sản xuất UPW cho công nghiệp bán dẫn trong những năm gần đây.
(Nguồn dữ liệu: Scopus, 09/2025).

Bài tổng quan này sẽ phân tích một cách có hệ thống các công nghệ đang được sử dụng phổ biến trong sản xuất UPW, đồng thời trình bày những hạn chế của từng công nghệ và đề xuất các xu hướng tích hợp của các công nghệ này với các quá trình tiên tiến như AOPs, năng lượng tái tạo và AI nhằm đáp ứng yêu cầu về chất lượng, tính bền vững và khả thi về mặt kinh tế của các công nghệ sản xuất UPW trong công nghiệp bán dẫn.

Để phục vụ phân tích, xử lý dữ liệu, nhóm nghiên cứu thực hiện cách tiếp cận tổng hợp, phân tích hệ thống, nhằm đánh giá toàn diện các công nghệ xử lý UPW phục vụ sản xuất trong công nghiệp bán dẫn. Các tài liệu được thu thập từ các nguồn khoa học quốc tế uy tín (Scopus, Web of Science, ScienceDirect) và các báo cáo kỹ thuật của ngành bán dẫn trong giai đoạn 2015

- 2025. Hơn 120 công trình nghiên cứu đã được rà soát, chọn lọc, trong đó 47 công trình được phân loại theo nhóm công nghệ (GAC, IX, UF/RO, MCDI, MD, AOPs, AI và năng lượng tái tạo). Kỹ thuật phân tích, so sánh được thực hiện dựa trên các tiêu chí chính gồm: hiệu suất loại bỏ tạp chất, nhu cầu năng lượng, chi phí vận hành, khả năng tích hợp và tiềm năng bền vững. Dữ liệu định lượng (nồng độ TOC, độ dẫn điện, điện trở suất, năng lượng tiêu thụ) được tổng hợp để nhận diện xu hướng và khoảng trống nghiên cứu giữa các công nghệ truyền thống và các công nghệ tích hợp mới. Kết quả phân tích giúp xác định các hướng tích hợp tiềm năng, hướng tới mô hình xử lý UPW hiệu quả, tiết kiệm năng lượng và thân thiện môi trường.

2. Các công nghệ xử lý UPW trong công nghiệp bán dẫn



Hình 2. Sơ lược các công nghệ xử lý UPW:
(a) GAC; (b) IX; (c) UF/RO; (d) MCDI; (e) MD.

2.1. Than hoạt tính dạng hạt (GAC)

Than hoạt tính dạng hạt (GAC) từ lâu đã là một thành phần quan trọng trong hệ thống sản xuất nước siêu sạch (UPW), nhờ diện tích bề mặt lớn, cấu trúc xốp và khả năng hấp phụ carbon hữu cơ hòa tan. Ngoài cơ chế hấp phụ vật lý, GAC còn có thể đóng vai trò là giá thể cho vi sinh vật phát triển, góp phần phân hủy sinh học các hợp chất hữu cơ hòa tan [7]. Trong các hệ thống UPW cấp bán dẫn, nơi mà chỉ một lượng hữu cơ vết cũng có thể ảnh hưởng đến hiệu suất sản xuất, GAC không chỉ dừng ở vai trò tiền xử lý mà còn đảm nhiệm chức năng đa dạng hơn, từ loại bỏ tạp chất, kiểm soát màng sinh học đến kết hợp với các quá trình oxy hóa nâng cao (như UV, H₂O₂, Fenton,...) và công nghệ màng [8].

Nhiều nghiên cứu thực nghiệm gần đây đã chứng minh tính hiệu quả của GAC trong loại bỏ tạp chất hữu cơ. Ví dụ, hệ GAC kết hợp màng trọng lực có thể loại bỏ 50 - 70% chất hữu cơ hòa tan (dissolved organic concentration, DOC) từ nước sông Songhua, Trung Quốc đồng thời duy trì hiệu suất ổn định trong suốt 193 ngày vận hành [7]. Tại Hà Lan, bộ lọc các-bon hoạt tính

BODAC (biological oxygen-dosed activated carbon) đã được vận hành liên tục hơn 11 năm mà không cần tái sinh, loại bỏ trên 70% chất hữu cơ và các hợp chất vi lượng, đồng thời đảm bảo nước sau RO đạt tiêu chuẩn UPW (điện trở suất >18 MΩ·cm) [9]. Để xử lý các hợp chất khó loại bỏ như urê, nhiều nghiên cứu đã ứng dụng GAC hoặc biochar - GAC kết hợp chất oxy hóa mạnh (PMS, PDS), đạt hiệu quả phân hủy tới 90-100% [10]. Một hệ thống lai ghép khác giữa GAC và xúc tác TiO₂ hoạt hóa bởi tia UV 254 nm cũng được ghi nhận có khả năng nâng cao hiệu quả loại bỏ các chất hữu cơ hòa tan (total organic carbon, TOC) so với hệ UV185/GAC truyền thống, đồng thời tự tái sinh bề mặt hấp phụ nhờ các gốc oxy hóa hình thành trong quá trình chiếu sáng [11]. Trong một nghiên cứu thực tế khác tại Thành Đô, Trung Quốc, việc tích hợp hệ thống RO hai cấp với GAC, nhựa trao đổi ion và UV đã giúp giảm TOC từ 373 xuống 2,37 µg/L, trong khi điện trở suất đạt tới 18,2 MΩ·cm, đạt tiêu chuẩn bán dẫn nghiêm ngặt [12].

Tuy nhiên, GAC vẫn tồn tại một số hạn chế. Về bản chất, nó khó loại bỏ hiệu quả các hợp chất hữu cơ có khối lượng phân tử thấp và phân cực như urê hay acetone, vốn ngày càng phổ biến trong nguồn nước tái sử dụng. Khả năng hấp phụ của GAC cũng có giới hạn, dẫn tới hiện tượng bão hòa và cần tái sinh hoặc thay thế định kỳ. Ngoài ra, trong các hệ thống BODAC, sự phát triển sinh học quá mức có thể tạo ra các sản phẩm phụ vi sinh hoặc mảnh vụn từ màng sinh học, tiềm ẩn nguy cơ gây ô nhiễm thứ cấp. Do đó, mặc dù GAC vẫn giữ vai trò quan trọng trong xử lý UPW, hiệu quả của nó được phát huy tối ưu nhất khi tích hợp trong các chuỗi xử lý đa giai đoạn, thay vì một giải pháp riêng rẽ.

2.2. Trao đổi ion (IX)

Bên cạnh GAC, công nghệ trao đổi ion (IX) cũng đóng vai trò quan trọng trong sản xuất UPW, đặc biệt ở giai đoạn cuối nhằm đáp ứng các tiêu chuẩn nghiêm ngặt về TOC (<50 ppb) và điện trở suất (>18,2 MΩ·cm). Nguyên lý của IX dựa trên việc trao đổi các ion trong dung dịch với ion có sẵn trên bề mặt hạt nhựa cũng như cho

phép dẫn truyền ion chọn lọc thông qua cấu trúc nano của màng [13].

Các nghiên cứu gần đây đã mở ra nhiều hướng phát triển vật liệu và quy trình sản xuất UPW từ IX. Hệ thống IX điện hóa sử dụng màng lưỡng cực có thể thu hồi amoni từ nguồn nước sản xuất UPW mà không cần tái sinh hóa chất, nhờ cơ chế phân ly nước thành ion H^+ và OH^- [14]. Một nghiên cứu khác về tái sinh nhựa bằng gốc sulfate cho thấy dung lượng hấp phụ được duy trì 70 - 90% sau nhiều chu kỳ, mặc dù có nguy cơ thoái hóa nhựa ở liều oxi hóa cao [15]. Đặc biệt, hệ thống lai siêu lọc (nanofiltration, NF) - GAC - IX được đánh giá có tính tương đồng cao với chuỗi xử lý UPW truyền thống, trong đó IX đóng vai trò cuối cùng, giúp đạt được mức TOC và PFAS cực thấp [16]. Ngoài ra, nhựa sinh học IX sản xuất từ tinh bột đã chứng minh khả năng loại bỏ ion Cu^{2+} và Pb^{2+} , có thể tái sinh bằng acid - kiềm đơn giản [17]. Tuy nhiên, do bản chất hữu cơ, những vật liệu này có nguy cơ phát thải TOC thứ cấp nên cần được kiểm chứng kỹ lưỡng trước khi ứng dụng trong hệ UPW.

Ở cấp độ vật liệu tiên tiến, các nghiên cứu về IX dựa trên poly (fluorene-alkylene) cho thấy hình thái nhóm copolymer giúp tối ưu phân tách pha, tăng cường khả năng dẫn ion và giảm sự rò rỉ hữu cơ [18]. Bên cạnh đó, các màng xúc tác phủ trực tiếp cũng làm giảm điện trở giao diện, mở ra khả năng ứng dụng trong hệ thống IX để duy trì điện trở suất cao và giảm thiểu TOC [13]. Mặc dù những kết quả này có triển vọng nhưng vẫn cần có thêm các nghiên cứu chuyên sâu về kiểm soát cấu trúc và bề mặt để đồng thời nâng cao độ dẫn ion, khả năng chống bám bẩn và độ ổn định lâu dài trong môi trường nước có điện trở cao.

2.3. Màng siêu lọc và thẩm thấu ngược

Màng siêu lọc (UF) và thẩm thấu ngược (RO) từ lâu đã được coi là nền tảng trong sản xuất UPW, nhờ khả năng loại bỏ hiệu quả đa dạng tạp chất, từ ion, hạt, đến hợp chất hữu cơ. Nguyên lý của RO dựa trên việc dùng áp suất cao đẩy nước qua màng bán thấm, giữ lại ion và chất hòa tan, trong khi UF loại bỏ các hạt lớn và vi sinh vật, thường được sử dụng như bước tiền xử lý để giảm bám bẩn cho RO [19].

Các nghiên cứu thực nghiệm đã chỉ ra hiệu quả vượt trội của hệ thống này. Hệ RO hai cấp có thể đạt hiệu suất loại bỏ ~99% TOC và tổng chất rắn hòa tan (total dissolved solids, TDS), đưa nồng độ xuống <0,1 mg/L và <1,0 mg/L [20]. Một hệ thống tích hợp UF/RO/EDI xử lý nước thải từ ngành hóa dầu cũng đã giảm hiệu quả TOC từ 15,8 xuống 0,11 mg/L và độ dẫn từ 1855 xuống 1,3 $\mu S/cm$ [19]. Điều này chứng tỏ RO có khả năng xử lý cả những nguồn nước thải phức tạp, miễn là có sự hỗ trợ từ các công đoạn tiền xử lý phù hợp.

Tuy nhiên, các hạn chế cũng được ghi nhận rõ ràng. Tắc màng luôn là thách thức lớn với tất cả các quá trình màng nói chung và RO nói riêng, do sự hiện diện của chất hữu cơ và các hợp chất sinh học khác. Một số nghiên cứu cho thấy UF có thể giảm bám bẩn, nhưng trong một số trường hợp, lại làm gia tăng khả năng kết tủa muối trên màng RO do loại bỏ các chất phân tán tự nhiên [21]. Để khắc phục, các bước tiền xử lý tiên tiến như GAC đã được áp dụng nhằm giảm nguy cơ tắc màng [8]. Ngoài ra, RO còn gặp hạn chế trong loại bỏ hợp chất hữu cơ phân tử thấp như các chất kháng sinh hay gốc aldehyde, với hiệu suất <50%, buộc phải bổ sung các bước xử lý sau như trao đổi ion hoặc quang oxi hóa để đạt chuẩn UPW [22]. Bên cạnh đó, chi phí vận hành và việc quản lý dòng cô đặc sau lọc vẫn là những vấn đề lớn về kinh tế và môi trường.

2.4. Màng khử ion điện dung

Màng khử ion điện dung (MCDI) là công nghệ điện hóa dựa trên nguyên lý hấp phụ ion lên bề mặt điện cực xốp khi có điện áp ngoài, với sự hỗ trợ của màng trao đổi ion nhằm ngăn chặn dòng ion có cùng điện tích. Quá trình giải hấp được thực hiện khi đảo cực, giải phóng ion và tái sinh điện cực. So với CDI truyền thống, MCDI có hiệu suất loại bỏ ion và hiệu suất năng lượng cao hơn nhờ giảm tổn thất ion ngược [23].

Nhiều nghiên cứu đã chứng minh tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của MCDI. Chen và cộng sự [24] cho thấy hệ thống này có thể xử lý nhiều nguồn nước khác nhau, từ nước máy đến nước thải công nghiệp công nghệ cao, với chi phí

$<0,53 \text{ USD/m}^3$ và năng lượng tiêu thụ $<0,68 \text{ kWh/m}^3$. Tsai và cộng sự [25] báo cáo khả năng loại bỏ chọn lọc ion đa hóa trị như Ca^{2+} và Mg^{2+} , đạt độ dẫn suất nước thẩm $<2 \text{ }\mu\text{S/cm}$, điều mà các công nghệ truyền thống khó thực hiện. Một nghiên cứu khác cũng chỉ ra MCDI có thể loại bỏ hiệu quả silicat, nhờ cấu hình điện cực cải tiến [26].

Tuy nhiên, hạn chế lớn của công nghệ này là hiện tượng giải hấp chưa hoàn toàn, đặc biệt với ion đa hóa trị, làm giảm hiệu suất sau nhiều chu kỳ. Các hướng nghiên cứu hiện nay tập trung vào tái chế dòng cô đặc trong giai đoạn giải hấp, phát triển điện cực hoạt tính cao và màng trao đổi ion mới, cũng như tích hợp MCDI với các quá trình khác như thẩm thấu thuận (FO) để nâng cao hiệu quả thu hồi nước [27, 28].

2.5. Chung cất màng

Chung cất màng (MD) là một quá trình tách nhiệt dựa trên sự chênh lệch áp suất hơi nước giữa hai phía của màng kỵ nước. Nước ở pha nóng bay hơi, đi qua lỗ màng và ngưng tụ ở pha lạnh, để lại muối và các hợp chất không bay hơi. Nguyên lý này cho phép MD đạt hiệu suất loại bỏ gần như tuyệt đối đối với muối và tạp chất, kể cả khi xử lý nước có độ mặn cao hoặc nước thải giàu muối, vốn là thách thức với RO [29].

Ưu điểm nổi bật của MD là khả năng vận hành ở nhiệt độ thấp ($50 - 80^\circ\text{C}$), thích hợp để tận dụng nhiệt thải hoặc năng lượng mặt trời, giúp giảm chi phí năng lượng. Schwantes và cộng sự [30] đã thiết kế một module MD sử dụng nhiệt thải từ quá trình điện phân, cho sản phẩm UPW có độ dẫn $< 3 \text{ }\mu\text{S/cm}$. Arthur và cộng sự [29] ước tính hệ thống MD kết hợp điện phân có thể tiết kiệm đến 2 triệu USD mỗi năm cho một nhà máy quy mô lớn. Fang và cộng sự [31] cũng chứng minh tính khả thi của hệ PV - MD, sản xuất $>3 \text{ gallon/m}^2\cdot\text{ngày}$ nước tinh khiết với độ dẫn $<145 \text{ }\mu\text{S/cm}$. Về mặt vật liệu, Farid và cộng sự [32] nhấn mạnh vai trò của công nghệ nano, với màng chứa ống nano các-bon (carbon nanotubes, CNT) giúp tăng lưu lượng nước tới 78% và giảm bám cặn nhờ lực đẩy tĩnh điện, đồng thời hướng tới các chức năng tự gia nhiệt và tự làm sạch.

Mặc dù có tiềm năng lớn, MD vẫn còn những thách thức cần giải quyết. Các màng nano tiên tiến có chi phí chế tạo cao, khó mở rộng quy mô và cần nghiên cứu thêm về độ bền lâu dài. Ngoài ra, việc tích hợp MD với các quá trình khác, như loại bỏ fluoride từ nước ngầm [33], cho thấy tính khả thi kỹ thuật nhưng vẫn cần đánh giá kỹ lưỡng về chi phí và hiệu quả vận hành trước khi thương mại hóa rộng rãi.

Bảng 1. Các công nghệ GAC, IX và UF/RO sản xuất UPW trong công nghiệp bán dẫn

STT	Phương pháp	Nguồn nước	Nồng độ TOC ban đầu	Độ dẫn điện ban đầu	Hiệu quả xử lý TOC	Độ dẫn điện sau xử lý	Điều kiện tối ưu	Tài liệu tham khảo
1	GAC	Nước sông	3,11-5,67 mg/L DOC	1360 $\mu\text{S/cm}$	50-70%	4,3 $\mu\text{S/cm}$	193 ngày, 20°C	[7]
2	GAC	Nước ngầm	373 $\mu\text{g/L}$	755 $\mu\text{S/cm}$	-	0,055 $\mu\text{S/cm}$	RO + GAC (Calgon) + IX + UV185/254	[12]
3	IX	Dung dịch PFOA	$\sim 100 \text{ mg/L}$ PFOA $\approx 95 \text{ mg/L}$ TOC	-	$\sim 70\text{-}90\%$	-	50°C ; PFOA tối đa 150 mM	[15]
4	IX	Nước ngầm	TOC: 3,0 mg/L; 14 mg/L NF	500 $\mu\text{S/cm}$	PFAS $> 60\%$	-	NF-GAC-AER; NF hệ số thu hồi 70-80%	[16]
5	UF/RO	Nước thải dầu khí	15,8 mg/L	1855 $\mu\text{S/cm}$	$\sim 99,3\%$ (sau RO)	1,3 $\mu\text{S/cm}$	Cần xử lý bậc ba	[19]
6	UF/RO	Nước cấp	160–350 mg/L	-	$\sim 99\%$	$< 0,055 \text{ }\mu\text{S/cm}$	RO hai cấp với hiệu suất thu hồi 88%	[34]

Bảng 2. Công nghệ MCDI sản xuất UPW trong công nghiệp bán dẫn

STT	Nguồn nước	Chất ô nhiễm	Loại màng	Điện áp	Năng lượng yêu cầu	Hiệu quả khử ion	Điều kiện tối ưu	Tài liệu tham khảo
1	Nước cấp, nước thải	Muối hòa tan	IEM	1,6 V	0,014 - 0,68 kWh/m ³	> 90%	12-60 phút, 1,6 V	[24]
2	Nước lợ	Muối hòa tan	FO	1,2 V	3,161 - 4,55 kWh/m ³	> 95%	Tích hợp FO	[35]
3	Nước biển	NaCl	PVDF-IEM	0,6 - 1,2 V	-	98% tách NaCl	pH 2,3-11,6	[27]
4	Nước thải	Muối; hữu cơ	CEM	1,2 V	0,015 kWh/m ³	> 90% ô nhiễm hữu cơ	60 phút, pH 6	[36]

Bảng 3. Công nghệ MD sản xuất UPW trong công nghiệp bán dẫn

STT	Nguồn nước	Chất ô nhiễm	Thông lượng nước	Năng lượng yêu cầu	Hiệu quả khử ion	Giá thành	Điều kiện tối ưu	Tài liệu tham khảo
1	Nước hồ	TOC	2,5 mL/phút	80 W	0,98-3,19 μ S/cm	-	50 °C, pH 7	[37]
2	Nước cấp	Muối canxi	75% recovery	15 kWh	< 1 μ S/cm	2,62 USD/m ³	60 °C, pH 6	[38]
3	Nước biển	NaCl	2,48 LMH	0,6 kWh/t	<3 μ S/cm ở mọi nồng độ muối	1,9 USD/m ³	56 °C, 0,3 mm gap	[30]

3. Hệ thống tích hợp với các công nghệ tiên tiến trong sản xuất UPW

3.1. Tích hợp với các quá trình oxy hóa nâng cao

Các quá trình oxy hóa nâng cao (advanced oxidation processes, AOPs) dựa trên việc tạo ra các gốc hydroxyl ($\bullet$ OH) hoặc các gốc oxy hóa mạnh khác, có khả năng phân hủy hầu hết các hợp chất hữu cơ thành CO₂ và H₂O. Trong xử lý UPW, AOPs thường được tích hợp như bước xử lý sâu nhằm loại bỏ các hợp chất hữu cơ phân tử nhỏ mà RO hoặc IX khó xử lý.

Nhiều hệ thống AOPs đã được áp dụng, trong đó phổ biến là UV kết hợp hydrogen peroxide (UV/H₂O₂) hoặc ozone (O₃/UV). Westerhoff và cộng sự [39] công bố rằng AOPs có thể loại bỏ hoàn toàn methanol - một tạp chất hữu cơ khó xử lý trong hệ UPW. Một nghiên cứu khác cho thấy việc bổ sung AOPs sau hệ RO hai cấp giúp giảm đáng kể TOC xuống mức <2 ppb, đảm bảo đạt chuẩn UPW [40]. Bên cạnh đó,

AOPs còn có ưu điểm không tạo ra sản phẩm phụ nguy hại khi vận hành đúng điều kiện.

Tuy nhiên, chi phí năng lượng và hóa chất vẫn là trở ngại khi triển khai quy mô lớn. Ngoài ra, một số gốc oxy hóa có thể phản ứng với vật liệu màng hoặc nhựa trao đổi ion, làm suy giảm tuổi thọ thiết bị [41]. Do đó, AOPs thường được sử dụng như một công đoạn bổ sung trong chuỗi xử lý, thay vì giải pháp độc lập.

3.2. Tích hợp với hệ thống tảo và năng lượng mặt trời

Việc sản xuất UPW cho ngành bán dẫn tiêu tốn một lượng lớn năng lượng và nước, do đó tích hợp công nghệ màng với năng lượng mặt trời và vi tảo là hướng đi tiềm năng nhằm nâng cao tính bền vững. Một trong các giải pháp đang được quan tâm là kết hợp xử lý sinh học bằng vi tảo với hệ thống màng. Vi tảo có khả năng hấp thụ chất dinh dưỡng và CO₂, đồng thời tạo ra sinh khối có thể khai thác cho các mục đích khác, từ đó giảm chi phí vận hành [42, 43].

Bên cạnh đó, năng lượng mặt trời cũng được nghiên cứu rộng rãi như nguồn cung cấp nhiệt và điện cho các quá trình màng. Trong công nghệ MD, nguồn nhiệt mặt trời có thể thay thế năng lượng hóa thạch, giảm đáng kể chi phí và phát thải CO₂. Hệ thống cho phép sản xuất liên tục nước siêu sạch với độ dẫn thấp, đồng thời tiết kiệm chi phí năng lượng ở quy mô công nghiệp [44]. Ngoài ra, các nghiên cứu tích hợp MD với nhiệt thải từ các quá trình khác trong nhà máy bán dẫn cũng cho thấy khả năng tiết kiệm hàng triệu đô la Mỹ mỗi năm [45].

Mặc dù có triển vọng, các công nghệ tích hợp với vi tảo và năng lượng mặt trời còn đối mặt với những hạn chế. Hệ vi tảo cần diện tích lớn, khó duy trì ổn định ở quy mô công nghiệp, trong khi năng lượng mặt trời chịu ảnh hưởng của điều kiện thời tiết và yêu cầu hệ lưu trữ để đảm bảo vận hành liên tục [35]. Vì vậy, việc tích hợp cần được cân nhắc trong bối cảnh cụ thể của từng nhà máy bán dẫn, nơi nhu cầu về độ tin cậy và tính liên tục luôn ở mức rất cao.

3.3. Tích hợp với hệ thống trí tuệ nhân tạo

Sự phức tạp của hệ thống sản xuất UPW, với nhiều công đoạn nối tiếp nhau và yêu cầu vận hành liên tục, khiến việc kiểm soát tối ưu trở thành thách thức lớn. Trong bối cảnh đó, trí tuệ nhân tạo (AI) nổi lên như một công cụ hỗ trợ hiệu quả. AI có thể thu thập và phân tích dữ liệu lớn từ cảm biến trong thời gian thực, phát hiện sớm xu hướng tắc màng, dự đoán sự cố và tối ưu các thông số vận hành để giảm năng lượng cũng như chi phí hóa chất [46].

Một số nghiên cứu đã chỉ ra tiềm năng này. Kim và cộng sự [20] ứng dụng học máy để dự đoán sự phát triển tắc màng trong hệ RO, cho phép đưa ra biện pháp rửa màng kịp thời và giảm 30% chi phí hóa chất. Các mô hình AI khác cũng được phát triển để tối ưu chu kỳ tái sinh trong hệ IX, kéo dài tuổi thọ vật liệu và đảm bảo ổn định chất lượng nước [15]. Trong công nghệ MD, AI còn có thể được dùng để điều chỉnh chế độ nhiệt và dòng chảy, nhằm duy trì thông lượng nước cao mà vẫn hạn chế ứ đọng màng [47].

Tuy vậy, ứng dụng AI trong xử lý UPW vẫn còn mới mẻ và chủ yếu ở giai đoạn thử nghiệm. Những thách thức hiện nay bao gồm yêu cầu cơ sở dữ liệu đủ lớn, vấn đề tích hợp AI với hệ thống điều khiển hiện có, cũng như tính minh bạch và khả năng giải thích của mô hình dự đoán. Dù vậy, AI vẫn được kỳ vọng sẽ đóng vai trò ngày càng quan trọng trong việc nâng cao độ tin cậy và hiệu quả của các hệ thống sản xuất UPW trong ngành bán dẫn.

4. Kết luận

Ngành công nghiệp bán dẫn đang tăng trưởng nhanh chóng và được dự báo sẽ trở thành một trong những lĩnh vực có giá trị giao dịch lớn nhất toàn cầu trong vài thập kỷ tới. Nhu cầu về nước siêu tinh khiết trong sản xuất bán dẫn cũng theo đó tăng mạnh, trong khi các tiêu chuẩn chất lượng ngày càng khắt khe và tình trạng khan hiếm nước trở nên nghiêm trọng hơn. Hệ thống xử lý UPW truyền thống, bao gồm GAC, trao đổi ion và RO đã được ứng dụng rộng rãi, song vẫn tồn tại những hạn chế trong việc loại bỏ các hợp chất hữu cơ phân tử nhỏ, chi phí năng lượng cao và nguy cơ ô nhiễm thứ cấp.

Sự xuất hiện của các công nghệ mới nổi như MCDI và MD mở ra triển vọng đáng kể nhờ khả năng vận hành ở điều kiện năng lượng thấp, hiệu quả loại bỏ cao và tiềm năng kết hợp với nguồn năng lượng tái tạo. Tuy vậy, những công nghệ này cũng cần vượt qua thách thức về độ bền vật liệu, chi phí chế tạo và khả năng thương mại hóa. Trong khi đó, các giải pháp tích hợp như AOPs, vi tảo - năng lượng mặt trời, hay ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) đang dần khẳng định vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu quả xử lý, giảm chi phí và hướng tới mục tiêu bền vững.

Để đáp ứng yêu cầu sản xuất trong tương lai, cần có cách tiếp cận toàn diện dựa trên sự kết hợp nhiều công nghệ. Việc lựa chọn và tích hợp đúng đắn các quá trình màng, AOPs, năng lượng tái tạo và AI sẽ không chỉ giúp đảm bảo nguồn cung UPW chất lượng mà còn góp phần xây dựng mô hình sản xuất bán dẫn thân thiện môi trường, tiết kiệm năng lượng và bền vững trong dài hạn.

Tài liệu tham khảo

- [1] Y. Shen, L. Hu, W. Chai, J. Miao, H. Ye, J. Xu, R. Su, X. Fu, A Mini Review on Contamination Control in Ultrapure Liquids for Semiconductor Manufacturing - from the Perspective of Liquid-Solid Interfaces, Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 102, 2025, pp. 102791, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102791>.
- [2] W. Xiong, D. D. Wu, J. H. Y. Yeung, Semiconductor Supply Chain Resilience and Disruption: Insights, Mitigation, and Future Directions, Int J Prod Res, Vol. 63, 2025, pp. 3442-3465, <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2387074>.
- [3] Y. Ren, Y. Yang, Y. Wang, Y. Liu, Dynamics of Tthe Global Semiconductor Trade and its Dependencies, Journal of Geographical Sciences, Vol. 33, 2023, pp. 1141-1160, <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2123-9>.
- [4] Q. Wang, N. Huang, H. Cai, X. Chen, Y. Wu, Water Strategies and Practices for Sustainable Development in the Semiconductor Industry, Water Cycle, Vol. 4, 2023, pp. 12-16, <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.12.001>.
- [5] S. J. Choi, L. Crane, S. Kang, T. H. Boyer, F. Perreault, Removal of Urea in Ultrapure Water System by Urease-coated Reverse Osmosis Membrane, Water Res X, Vol. 22, 2024, pp. 100211, <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100211>.
- [6] X. Zhang, Y. Yang, H. H. Ngo, W. Guo, H. Wen, X. Wang, J. Zhang, T. Long, A Critical Review on Challenges and Trend of Ultrapure Water Production Process, Science of the Total Environment, Vol. 785, 2021, pp. 147254, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147254>.
- [7] X. Tang, W. Pronk, A. Ding, X. Cheng, J. Wang, B. Xie, G. Li, H. Liang, Coupling GAC to Ultra-Low-pressure Filtration to Modify The Biofouling Layer and Bio-community: Flux Enhancement And Water Quality Improvement, Chemical Engineering Journal, Vol. 333, 2018, pp. 289-299, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.111>.
- [8] S. Ribeiro Pinela, A. Larasati, R. J. W. Meulepas, M. C. Gagliano, R. Kleerebezem, H. Bruning, H. H. M. Rijnaarts, Ultrafiltration (UF) and Biological Oxygen-dosed Activated Carbon (BODAC) Filtration to Prevent Fouling of Reversed Osmosis (RO) Membranes: A Mass Balance Analysis, Journal of Water Process Engineering, Vol. 57, 2024, pp. 104648, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104648>.
- [9] O. Bernadet, A. Larasati, H. P. J. V. Veelen, G. J. W. Euverink, M. C. Gagliano, Biological Oxygen-dosed Activated Carbon (BODAC) Filters - A Bioprocess for Ultrapure Water Production Removing Organics, Nutrients and Micropollutants, J. Hazard Mater, Vol. 458, 2023, pp. 131882, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131882>.
- [10] C. Kim, H. Yoo, G. Lee, H. J. Hong, Powdered Activated Carbon (PAC)-assisted Peroxymonosulfate Activation for Efficient Urea Elimination in Ultrapure Water Production From Reclaimed Water, Sci Rep, Vol. 14, 2024, pp. 4597, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55414-w>.
- [11] T. Sun, K. Chen, A Novel Low-energy Hybrid Process for the Removal of Organic Contaminants in Ultrapure Water Systems, Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, Vol. 8, 2013, pp. 804-810, <https://doi.org/10.1002/apj.1724>.
- [12] P. Zhao, Y. Bai, B. Liu, H. Chang, Y. Cao, J. Fang, Process Optimization for Producing Ultrapure Water with High Resistivity and Low Total Organic Carbon, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 126, 2019, pp. 232-241, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.04.017>.
- [13] T. H. Kong, P. Thangavel, S. Shin, S. Kwon, H. Choi, H. Lee, N. Park, J. J. Woo, Y. Kwon, In-Situ Ionomer-Free Catalyst-Coated Membranes for Anion Exchange Membrane Water Electrolyzers, ACS Energy Lett, Vol. 8, 2023, pp. 4666-4673, <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.3c01418>.
- [14] H. Dong, C. M. Laguna, M. J. Liu, J. Guo, W. A. Tarpeh, Electrified Ion Exchange Enabled by Water Dissociation in Bipolar Membranes for Nitrogen Recovery from Source-Separated Urine, Environ Sci Technol, Vol. 56, 2022, pp. 16134-16143, <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03771>.
- [15] P. Gao, J. Cui, Y. Deng, Direct Regeneration of Ion Exchange Resins with Sulfate Radical-Based Advanced Oxidation for Enabling A Cyclic Adsorption - Regeneration Treatment Approach to Aqueous Perfluorooctanoic Acid (PFOA), Chemical Engineering Journal, Vol. 405, 2021, pp. 126698, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126698>.
- [16] V. Franke, M. Ullberg, P. McCleaf, M. Wälinder, S. J. Köhler, L. Ahrens, The Price of Really Clean Water: Combining Nanofiltration with Granular Activated Carbon and Anion Exchange Resins for the Removal of Per- and Polyfluoralkyl Substances (PFASs) in Drinking Water Production, ACS ES and T Water, Vol. 1, 2021, pp. 782-795, <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00141>.

- [17] Z. Lin, F. Li, X. Liu, J. Su, Preparation of Corn Starch/Acrylic Acid/Itaconic Acid Ion Exchange Hydrogel and its Adsorption Properties for Copper and Lead Ions in Wastewater, *Colloids Surf a Physicochem Eng Asp*, Vol. 671, 2023, pp. 131668, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131668>.
- [18] X. Li, K. Yang, Z. Wang, Y. Chen, Y. Li, J. Guo, J. Zheng, S. Li, S. Zhang, Chain Architecture Dependence of Morphology and Water Transport in Poly(fluorene alkylene)-Based Anion-Exchange Membranes, *Macromolecules*, Vol. 55, 2022, pp. 10607 - 10617, <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.2c01488>.
- [19] A. B. Santos, A. Giacobbo, M. A. S. Rodrigues, A. M. Bernardes, Integrated Membrane Process (UF/RO/EDI) for Treating A Petrochemical Wastewater to Obtain Ultrapure Water for Industrial Reuse, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 177, 2023, pp. 223-231, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.001>.
- [20] D. Kim, H. Lee, J. Jeon, S. Kim, High Recovery Design of Reverse Osmosis Process With High Permeate Water Quality and Low Wastewater Discharge for Ultra-pure Water Production, *Desalination*, Vol. 592, 2024, pp. 118149, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118149>.
- [21] X. Tong, Z. W. Zhang, Y. H. Wu, Y. Bai, N. Ikuno, K. Ishii, H. Y. Hu, Ultrafiltration Significantly Increased the Scaling Potential of Municipal Secondary Effluent on Reverse Osmosis Membranes, *Water Res*, Vol. 220, 2022, pp. 118672, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118672>.
- [22] Q. Wang, L. Luo, N. Huang, W. Wang, Y. Rong, Z. Wang, Y. Yuan, A. Xu, J. Xiong, Q. Wu, H. Hu, Evolution of Low Molecular Weight Organic Compounds During Ultrapure Water Production Process: A Pilot-scale Study, *Science of the Total Environment*, Vol. 830, 2022, pp. 154713, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154713>.
- [23] Z. He, Y. Li, Y. Wang, C. J. Miller, J. Fletcher, B. Lian, T. D. Waite, Insufficient Desorption of Ions in Constant-Current Membrane Capacitive Deionization (MCDI): Problems and Solutions, *Water Res*, Vol. 242, 2023, pp. 120273, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120273>.
- [24] T. H. Chen, K. H. Yeh, C. F. Lin, M. Lee, C. H. Hou, Technological and Economic Perspectives of Membrane Capacitive Deionization (MCDI) Systems in High-Tech Industries: from Tap Water Purification to Wastewater Reclamation for Water Sustainability, *Resour Conserv Recycl*, Vol. 177, 2022, pp. 106012, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106012>.
- [25] M. H. Tsai, S. J. Chao, D. C. Wang, I. H. Lin, L. C. Chung, P. I. Liu, L. C. Hua, H. Y. Huang, C. C. Hu, Mechanistic Insights Into Capacitive Ion Exchange for Selective Divalent Ion Removal Using Activated Carbon Electrodes, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 521, 2025, pp. 166833, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.166833>.
- [26] K. M. Lee, A. Jang, M. Park, M. Park, J. Jang, Y. Kim, S. J. Choi, Y. H. Kim, C. Lee, Hybrid-Capacitive Deionization with Combined Faradaic and Capacitive Reactions For Silicate Removal, *Environmental Engineering Research*, Vol. 30, 2024, pp. 240542, <https://doi.org/10.4491/eer.2024.542>.
- [27] M. M. Elewa, M. E. Batouti, N. F. A. Harby, A Comparison of Capacitive Deionization and Membrane Capacitive Deionization Using Novel Fabricated Ion Exchange Membranes, *Materials*, Vol. 16, 2023, pp. 4872, <https://doi.org/10.3390/ma16134872>.
- [28] C. Oh, J. An, S. Yeon, H. J. Oh, Evaluation of Total Dissolved Solids Removal Characteristics by Recycling Concentrated Water in Membrane Capacitive Deionization Process, *Desalination Water Treat*, Vol. 264, 2022, pp. 54-61, <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28521>.
- [29] T. Arthur, G. J. Millar, J. Love, Thermal Management of Water Electrolysis Using Membrane Distillation to Produce Pure Water for Hydrogen Production, *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 67, 2024, pp. 106255, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106255>.
- [30] R. Schwantes, Y. Morales, E. Pomp, J. Singer, K. Chavan, F. Saravia, Thermally Driven Ultrapure Water Production for Water Electrolysis - A Techno-Economic Analysis of Membrane Distillation, *Desalination*, Vol. 608, 2025, pp. 118848, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.118848>.
- [31] D. Fang, D. M. Amiruddin, I. Kao, D. Mahajan, X. Chen, B. S. Hsiao, Towards the Optimization of a Photovoltaic/Membrane Distillation System for the Production of Pure Water, *Membranes (Basel)*, Vol. 14, 2024, pp. 110, <https://doi.org/10.3390/membranes14050110>.
- [32] M. U. Farid, J. A. Kharraz, J. Sun, M. W. Boey, M. A. Riaz, P. W. Wong, M. Jia, X. Zhang, B. J. Deka, N. K. Khanzada, J. Guo, A. K. An, Advancements in Nanoenabled Membrane Distillation for a Sustainable Water-energy-environment Nexus, *Advanced Materials*, Vol. 36, 2024, pp. 2307950, <https://doi.org/10.1002/adma.202307950>.

- [33] W. Z. Ousman, E. Alemayehu, P. Luis, Integration of Reverse Osmosis and Membrane Distillation for Fluoride Removal from Groundwater Aiming at a Zero-waste Discharge Process, *J. Environ Chem Eng*, Vol. 13, 2025, pp. 117863, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117863>.
- [34] B. A. Maqbali, Z. R. Ahar, H. Mousa, G. R. V. Nezhaad, Proposing an Ultrapure Water Unit Coupled to an Existing Reverse Osmosis Desalination Plant and its Exergy Analysis, *International Journal of Thermodynamics*, Vol. 25, 2022, pp. 39-52, <https://doi.org/10.5541/ijot.930459>.
- [35] M. W. Saleem, S. Ali, M. Usman, T. N. Chaudhary, A. Ullah, M. Arslan, A. U. Hameed, Integration of Capacitive Deionization and Forward Osmosis for High Water Recovery and Ultrapure Water Production: Concept, Modelling And Performance Analysis, *Environmental Technology (United Kingdom)*, Vol. 45, 2024, pp. 6136-6157, <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2326798>.
- [36] M. S. Gaikwad, S. K. Suman, K. Shukla, A. V. Sonawane, S. N. Jain, A Review on Recent Contributions in the Progress of Membrane Capacitive Deionization for Desalination And Wastewater Treatment, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 20, 2023, pp. 14073-14088, <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04778-z>.
- [37] W. Zhao, C. A. Q. Jensen, Z. Zhong, N. Li, S. S. Araya, A. Ali, V. Liso, Membrane Distillation for Producing Ultra-pure Water for PEM electrolysis, *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 99, 2025, pp. 232-240, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.219>.
- [38] A. H. Miraflores, K. H. Gómez, C. Muro, M. C. D. Hernández, V. D. Blancas, J. Á. Sánchez, G. E. D. Isordia, Ultrapure Water Production by a Saline Industrial Effluent Treatment, *Membranes (Basel)*, Vol. 15, 2025, pp. 116, <https://doi.org/10.3390/membranes15040116>.
- [39] P. Westerhoff, H. Moon, D. Minakata, J. Crittenden, Oxidation of Organics in Retentates From Reverse Osmosis Wastewater Reuse Facilities, *Water Res*, Vol. 43, 2009, pp. 3992-3998, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.04.010>.
- [40] W. Zeng, H. Zhang, J. Zhao, J. Wang, L. Bai, G. Li, H. Liang, Synergistic Roles of Oxidation and Self-Aggregation in Efficient Ultrafiltration Membrane Fouling Alleviation Using A Flow-Through Sb-SnO₂ anode during wastewater reclamation, *Water Res*, Vol. 249, 2024, pp. 121003, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121003>.
- [41] A. B. Rostam, M. Taghizadeh, Advanced Oxidation Processes Integrated by Membrane Reactors and Bioreactors for Various Wastewater Treatments: A Critical Review, *J. Environ Chem Eng*, Vol. 8, 2020, pp. 104566, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104566>.
- [42] A. Zein, S. Karaki, M. A. Hindi, Analysis of Variable Reverse Osmosis Operation Powered by Solar Energy, *Renew Energy*, Vol. 208, 2023, pp. 385-398, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.001>.
- [43] B. Kokabian, U. Ghimire, V. G. Gude, Water Deionization with Renewable Energy Production in Microalgae - Microbial Desalination Process, *Renew Energy*, Vol. 122, 2018, pp. 354-361, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.061>.
- [44] C. S. Ahamefule, C. J. Ugwuodo, P. O. Idike, J. C. Ogbonna, Application of Photosynthetic Microalgae in the Direct Desalination Pretreatment of Seawater, *Water and Environment Journal*, Vol. 35, 2021, pp. 657-669, <https://doi.org/10.1111/wej.12659>.
- [45] H. R. Bahrami, S. Gorjian, H. Mokhtarzadeh, B. Ghobadian, A. Kuriqi, J. Gheisari, Performance Evaluation of a Solar-Powered Membrane Capacitive Deionization System Considering Energy Recovery, *Results in Engineering*, Vol. 26, 2025, pp. 105552, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105552>.
- [46] A. Tayara, C. Shang, J. Zhao, Y. Xiang, Machine Learning Models for Predicting the Rejection of Organic Pollutants by Forward Osmosis and Reverse Osmosis Membranes and Unveiling the Rejection Mechanisms, *Water Res*, Vol. 266, 2024, pp. 122363, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122363>.
- [47] T. O. Obidara, M. A. Abdulhamid, M. A. Azeem, D. U. Lawal, J. Usman, S. I. Abba, T. N. Baroud, Optimization of Polyimide-based Membrane Distillation Performance Through Machine Learning Parametric Study, *J. Environ Chem Eng*, Vol. 13, 2025, pp. 118645, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118645>.