

# Ứng dụng công nghệ màng tiên tiến cho các hệ thống lọc nước phục vụ quân sự

Nguyễn Tiến Dũng<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Khoa KTHT&MT Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

**TỪ KHOẢ**

Công nghệ màng  
Quy trình màng tiên tiến  
Nước thải ô nhiễm hóa học  
Sinh học và phóng xạ  
Hệ thống xử lý nước dạng mô-đun và di động

**TÓM TẮT**

Công nghệ màng được sử dụng để cung cấp nước sạch và xử lý nước thải trong các hoạt động quân sự, cho phép loại bỏ chất gây ô nhiễm với hiệu quả cao nhất, tiết kiệm chi phí năng lượng. Bài đánh giá này xem xét việc tích hợp và ứng dụng các công nghệ màng, bao gồm thẩm thấu ngược, lọc nano, siêu lọc, điện phân và các hệ thống lai tiên tiến, trong việc xử lý nước thải phát sinh tại các căn cứ quân sự, tàu hải quân và tàu ngầm. Đặc biệt chú trọng công nghệ lọc nước thải bị ô nhiễm hóa học, sinh học và phóng xạ, cũng như việc tái chế và xử lý các dòng nước thải bằng các hệ thống di động được sử dụng trong các ứng dụng quân sự. Nghiên cứu cũng phân tích những tiến bộ mới nhất trong công nghệ màng như: màng nanographene, màng sinh học, hệ thống màng chống bám bẩn và các cấu hình lai thẩm thấu ngược/thẩm thấu ngược và điện phân/điện phân ngược ứng dụng cho các hoạt động quân sự và sự giảm thiểu tác động đến môi trường.

**KEYWORDS**

Membrane technologies  
Advanced membrane processes  
Biologically and radiologically contaminated wastewater  
Biology and radioactivity  
Modular and mobile treatment systems

**ABSTRACT**

Membrane technologies are used in the production of potable water and the treatment of wastewater in the military forces, providing the highest level of contaminant removal at an energy-efficient cost. This review examines the integration and application of membrane technologies, including reverse osmosis, nanofiltration, ultrafiltration, electrodialysis and advanced hybrid systems, in the treatment of wastewater generated at military bases, naval vessels and submarines. Special emphasis is placed on purification technologies for chemically, biologically and radiologically contaminated wastewater, as well as on the recycling and treatment of wastewater streams by mobile systems used in military applications. This study also analyzes the latest advances in membrane technology such as nanographene membranes, biomembranes, anti-fouling membrane systems, and hybrid reverse osmosis/reverse osmosis and electrodialysis/reverse electrodialysis configurations for military applications and environmental impact mitigation.

**1. Giới thiệu**

Nhu cầu nước uống ngày càng tăng, do quá trình công nghiệp hóa nhanh chóng và dân số toàn cầu ngày càng tăng, đòi hỏi các phương pháp xử lý tiên tiến, đặc biệt là trong lĩnh vực quân sự. Cùng với nhu cầu nước uống ngày càng tăng, hoạt động của con người cũng tạo ra một lượng lớn nước thải độc hại và ô nhiễm (WW) [1,2]. Tuy nhiên, các phương pháp xử lý nước thông thường không còn đủ để đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng về tài nguyên nước trên toàn cầu [3].

Trong những thập kỷ gần đây, công nghệ màng (MT) đã trở thành một phần thiết yếu của các hệ thống xử lý nước thải để giảm thiểu tác động có hại của chúng đối với môi trường. Ở lĩnh vực thương mại, các hệ thống màng áp lực như thẩm thấu ngược (RO), lọc nano (NF), siêu lọc (UF), vi lọc (MF), cũng như điện thẩm tách (ED), được sử dụng cho các hệ thống cấp nước, quy trình công nghiệp, sản xuất và bảo vệ môi trường để xử lý nước thải bị ô nhiễm các chất vô cơ và hữu cơ [4,5]. Ngoài các ứng dụng kể trên, MT đã trở nên phù hợp cho các ứng dụng quân sự, bao gồm xử lý nước uống trong điều kiện thực địa bằng hệ

thống container di động, xử lý nước bị ô nhiễm bởi các tác nhân hóa học, sinh học và phóng xạ (CBR), hệ thống khử muối và xử lý trên tàu và tàu ngầm và các ứng dụng tương tự [6,7].

Yêu cầu các hoạt động của quân đội thường liên quan đến việc triển khai trong điều kiện thực địa khắc nghiệt, đòi hỏi phải thiết lập các tiêu chuẩn xử lý và làm sạch nước chuyên biệt cho cả nhiệm vụ gìn giữ hòa bình và các kịch bản thời chiến. Những yêu cầu này nhấn mạnh đến nhu cầu tự cung tự cấp, tăng khả năng cơ động của quân đội và cải thiện hiệu quả kinh tế và năng lượng của quy trình xử lý nước [8]. Để đáp ứng các yêu cầu này, các ứng dụng tiềm năng của các cải tiến trong quy trình màng đang được nghiên cứu, chẳng hạn như sử dụng màng nanographene hoặc màng sinh học mô-đun hóa, hệ thống chưng cất màng và các cấu hình lai như thẩm thấu thuận/thẩm thấu ngược (FO/RO) và điện thẩm tách/điện thẩm tách ngược (ED/RED). Các hệ thống như vậy, dù độc lập hay kết hợp trong các mô-đun vận hành, đều mang lại tiềm năng ứng dụng độc đáo trong các hệ thống xử lý nước cố định và di động [9,10,11]. Việc tích hợp và ứng dụng vận hành các công nghệ tiên tiến này đặc biệt quan trọng đối với việc phát triển các

\*Liên hệ tác giả: dungnt@hau.edu.vn

Nhận ngày 15/12/2025, sửa xong ngày 04/02/2026 chấp nhận đăng ngày 10/02/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1202>

chiến lược cung cấp nước tự động trong các hoạt động quân sự, được điều chỉnh phù hợp với các điều kiện hoạt động khắc nghiệt [12]. Khi không có nước từ các nguồn cung cấp nước công cộng, các thiết bị lọc nước RO (ROWPU), với công suất vượt quá 10.0 m<sup>3</sup>/h, được triển khai trong các khu vực quân sự cố định [13]. Tổ chức Hiệp ước Bắc Đại Tây Dương (NATO) cũng đã phát triển các giải pháp thay thế có thể triển khai nhanh ngoài các hệ thống quy mô lớn, như Máy lọc nước nhẹ (LWP), một thiết bị di động có công suất 0.47 m<sup>3</sup>/h được thiết kế để sử dụng trong các môi trường khó khăn hoặc biệt lập [14]. Các lực lượng hải quân sử dụng các hệ thống RO, UF và khử trùng tích hợp để tái chế hơn 80 % nước và sản xuất tới 1250 m<sup>3</sup>/h cho đơn vị và các hoạt động [15]. Sự tiến bộ liên tục và tối ưu hóa MT trong hoạt động quân sự có thể góp phần giảm thiểu tác động môi trường, do đó đạt được sự cân bằng giữa nhu cầu hoạt động và trách nhiệm sinh thái [16,17].

Mục đích của bài đánh giá này là trình bày những tiến bộ gần đây trong việc sử dụng và tích hợp MT trong lĩnh vực quân sự. Thông qua việc phân tích những tiến bộ công nghệ gần đây trong lĩnh vực xử lý nước bằng màng, nghiên cứu cũng nhấn mạnh tiềm năng ứng dụng trong việc cải thiện tính bền vững của các hoạt động quân sự, đồng thời giảm thiểu tác động và bảo vệ môi trường.

## 2. Công nghệ mới nổi dựa trên quy trình màng lọc để lọc nước

MT là một trong những công nghệ hiệu quả nhất và thân thiện với môi trường nhất để xử lý nước cung cấp nước uống an toàn chất lượng cao (nước bị ô nhiễm, khử muối nước lợ và nước biển), xử lý nước thải công nghiệp và đô thị. Những tiến bộ công nghệ về vật liệu màng trong nửa sau thế kỷ 20 đã cho phép chúng được sử dụng rộng rãi trong hầu hết mọi lĩnh vực hoạt động của con người [18,19]. Các quy trình màng thô như MF, rất quan trọng để loại bỏ các hạt lơ lửng và giảm mức tổng chất rắn lơ lửng (TSS) trong quá trình xử lý WW. Trong khi MF chủ yếu giữ lại các hạt lơ lửng lớn, UF giữ lại các hạt nhỏ hơn, bao gồm cả vi khuẩn và vi-rút, do đó nâng cao hiệu quả tổng thể của quy trình. RO và NF có hiệu quả cao trong việc loại bỏ các chất ô nhiễm hữu cơ và vô cơ, chẳng hạn như thuốc trừ sâu, kim loại nặng và các chất gây ô nhiễm dai dẳng như dược phẩm. MT đóng vai trò quan trọng trong việc thu hồi nước và tái sử dụng nước đã xử lý, đặc biệt là trong các lĩnh vực công nghiệp và nông nghiệp [20]. RO và NF được sử dụng rộng rãi trong xử lý nước uống thương mại, đặc biệt là để khử muối nước lợ và nước biển, cũng như để làm giảm độ cứng của nước [21]. Hơn nữa, MT thể hiện hiệu quả cao trong việc loại bỏ hiệu quả các vi sinh vật gây bệnh và loại bỏ nitrat, photphat, thuốc trừ sâu và các chất ô nhiễm hữu cơ khác còn sót lại [22]. Động lực của quá trình tách màng có thể bao gồm gradient điện, nhiệt độ, áp suất và nồng độ (Bảng 1) [23].

Trong các quy trình này, các chất hóa học cụ thể được màng giữ lại, trong khi các chất khác (cùng với nước) được truyền qua màng một cách chọn lọc (thấm qua). Hiệu quả của từng quy trình màng được xác định bởi các đặc điểm của màng, như kích thước lỗ rỗng, hình dạng và đặc tính bề mặt (độ xốp, độ kỵ nước), cũng như cấu hình, kích thước

và đặc tính hình học của màng [22]. Do các yếu tố này, hai loại quy trình tách màng chính được sử dụng trong xử lý nước thải và tái chế nước để sử dụng cho mục đích uống: quy trình đẳng nhiệt và không đẳng nhiệt. Các quy trình màng đẳng nhiệt, chẳng hạn như thẩm thấu hơi và tách khí màng, được điều khiển bởi các gradien nồng độ. MF, UF, NF và RO là các quy trình màng điều khiển bằng áp suất. ED và điện di (EF) là các quy trình điều khiển bằng điện. Ngược lại, các quy trình không đẳng nhiệt được điều khiển bằng nhiệt và bao gồm các công nghệ như chưng cất màng (MD). Các quy trình tách dựa trên màng này đóng một vai trò quan trọng trong các công nghệ xử lý nước bằng cách cho phép tách pha hiệu quả và loại bỏ các chất gây ô nhiễm một cách chọn lọc [24].

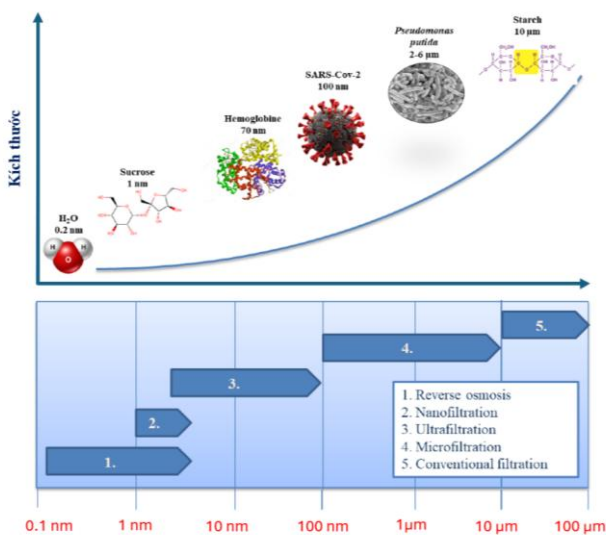
### 2.1. Nguyên lý cơ bản của các quá trình màng quan trọng nhất và cơ chế phân tách

Quy trình màng RO được biết đến là màng hoạt động hiệu quả cao và nổi tiếng nhất trong nhiều thập kỷ. Ở quy mô công nghiệp, nó chủ yếu được sử dụng để khử muối nước biển và nước lợ thành nước uống. RO cũng đặc biệt quan trọng để sản xuất nước có độ tinh khiết cao, điều này rất quan trọng đối với các quy trình dược phẩm trong sản xuất vắc-xin và dược phẩm và trong ngành công nghiệp hóa chất để tổng hợp các hợp chất mới theo quy trình hóa học. Nó cũng được sử dụng trong các hộ gia đình và các cơ sở nhỏ để làm sạch nước uống khỏi muối dư, clorua, kim loại nặng, thuốc trừ sâu, nitrat và các chất khác, cũng như để tái chế và xử lý nước thải [25]. Các ứng dụng của quy trình này rất nhiều bao gồm cô đặc, làm sạch và tách chọn lọc các thành phần có giá trị của hỗn hợp từ nước thải [22]. Quá trình tách màng RO dựa trên ba cơ chế: loại trừ kích thước, loại trừ điện tích (với một đóng góp nhỏ) và tương tác màng-dung dịch, phụ thuộc vào khả năng tương thích của các đặc tính lý hóa của chất tan và tính chất hóa học của màng RO. Áp suất cần thiết cho quá trình RO dao động từ 20 đến 80 bar để vượt qua áp suất thẩm thấu của dung dịch (nguồn cấp) [26]. Mặc dù RO có nhiều ưu điểm, bao gồm hiệu quả cao trong việc loại bỏ các chất gây ô nhiễm và không có thêm hóa chất ảnh hưởng đến môi trường, nhưng nó cũng có những nhược điểm, chẳng hạn như việc sử dụng hạn chế với WW tải trọng cao do màng bị bám bẩn nhiều. Để khắc phục những hạn chế này, quá trình RO thường được tích hợp với các quá trình khác trong hệ thống màng lai và các phiên bản màng cải tiến, có khả năng chống bám bẩn tốt hơn được sử dụng [27]. Trong các ứng dụng quân sự, các tình huống khủng hoảng hoặc đe dọa quân sự, RO là một quy trình quan trọng để tái chế và làm sạch nước cũng như khử nhiễm CBR, với tỷ lệ loại bỏ cao các tác nhân chiến tranh hóa học tổng hợp, phân tử hữu cơ, chất phóng xạ và các hợp chất công nghiệp độc hại cũng như kim loại nặng. Trong cả lĩnh vực quân sự và dân sự, quy trình này thường được kết hợp với các quy trình màng khác như UF và NF, ED và hấp phụ trên than hoạt tính/zeolit [28].

Ngoài quy trình RO thì UF và NF cũng đã được sử dụng thành công trong nhiều thập kỷ để làm sạch và xử lý nước thải. Chúng tương tự như RO về đặc điểm quy trình, nhưng khác biệt đáng kể về kích

thước lỗ màng và áp suất vận hành [29]. Quy trình UF thường được sử dụng làm tiền xử lý cho RO hoặc NF do kích thước lỗ lớn hơn (0,01–0,1 μm), giữ lại hơn 98 % chất rắn lơ lửng lớn hơn, các hạt keo, vi-rút và vi khuẩn. Hoạt động này dựa trên quá trình lọc cơ học cổ điển: các hạt lớn hơn được giữ lại trong khi nước chứa các phân tử hòa tan nhỏ hơn, chẳng hạn như các ion muối, đi qua màng xốp dưới áp suất tương đối thấp từ 1-5 bar. Ứng dụng quân sự của UF tập trung vào việc xử lý và vệ sinh nước thải bị ô nhiễm sinh học có chứa vi khuẩn coliform hoặc vi sinh vật gây bệnh, cũng như các sinh vật lớn hơn [20]. Đối với NF, do cấu trúc xốp của màng NF tổng hợp bao gồm các lỗ nhỏ hơn 2 nm và trong quá trình tách màng, ngoài việc loại trừ kích thước, lực đẩy tĩnh điện và tương tác giữa các ion xảy ra do điện tích bề mặt của màng [22]. Do đó, NF loại bỏ thành công hầu hết các hợp chất hữu cơ và các ion đa hóa trị như  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  và kim loại nặng có số hóa trị cao hơn, trong khi các ion đơn trị hòa tan trong môi trường nước thường đi qua màng NF ở mức độ lớn hơn ở áp suất lên tới 20 bar. Ngoài việc sử dụng rộng rãi trong công nghiệp để cô đặc, khử khoáng, làm mềm nước và tái chế các dòng WW, NF được sử dụng trong lĩnh vực quân sự để loại bỏ các hợp chất hữu cơ lớn hơn như tác nhân chiến tranh organophosphorus, chất gây ô nhiễm phóng xạ và kim loại nặng, và để đạt được việc loại bỏ hơn 99,9% tác nhân chiến tranh sinh học [30].

2.2. Công nghệ màng tích hợp



Hình 1. Các loại quá trình màng khác nhau dựa trên kích thước lỗ chân lông và ví dụ về kích thước hạt được giữ lại.

Để tối ưu hóa hiệu quả các quy trình phân tách với ứng dụng đa chức năng và giảm mức tiêu thụ năng lượng, các công nghệ màng tích hợp các quy trình màng khác nhau với nhau hoặc kết hợp với các quy trình phân tách lý hóa hoặc sinh học khác để tạo thành công nghệ màng lai (HBT). Trong xử lý nước thải thông thường, xử lý WW sơ cấp, thứ cấp và bậc ba thường được thực hiện riêng biệt, đòi hỏi chi phí vốn và đầu tư cao hơn, cơ sở lớn hơn để thực hiện một quy trình

rộng lớn như vậy và mức tiêu thụ năng lượng tăng lên. Việc sử dụng các hệ thống tích hợp lại làm giảm nhu cầu về nhiều giai đoạn xử lý, tăng tính linh hoạt và khả năng thích ứng với nhiều chất ô nhiễm và điều kiện quy trình khác nhau, đồng thời có thể đáp ứng nhiều yêu cầu trong một mô-đun quy trình duy nhất (làm sạch, cô đặc, tách, tạo phức, v.v.) [31]. Trong bối cảnh quản lý bền vững tài nguyên nước, theo các tiêu chuẩn pháp lý nghiêm ngặt về luật bảo vệ môi trường, quy trình màng FO/RO lai là một giải pháp sáng tạo, bền vững và thiết thực. Tổng quan về các loại quy trình màng áp suất chính và các chất gây ô nhiễm cụ thể mà chúng loại bỏ, được phân loại theo kích thước lỗ màng được thể hiện trong (Hình 1).

Bằng cách tích hợp MD/MBR vào một hệ thống lai, tiềm năng đáng kể được tạo ra để xử lý và làm sạch nước. Hệ thống MBR loại bỏ phần lớn các chất hữu cơ và các hạt rắn có thể gây tắc nghẽn màng trong quá trình lọc tiếp theo, trong khi hệ thống MD có tác dụng cô đặc và giảm thể tích chất thải sau khi xử lý [32]. Đối với mục đích quân sự, MD được sử dụng trong các đơn vị di động để khử muối và làm sạch nước, nhưng cũng để xử lý nước bị ô nhiễm hóa chất tổng hợp ở các khu vực bị ảnh hưởng bởi vũ khí hóa học hoặc chất thải công nghiệp độc hại [30]. Mặt khác, MBR được sử dụng để xử lý nước thải sinh học tại các căn cứ quân sự và bệnh viện dã chiến, nơi thu được nước thải chất lượng cao có thể được sử dụng cho các mục đích vệ sinh như tắm rửa cho người hoặc cho các mục đích kỹ thuật khác [20]. Hai đặc điểm quan trọng nhất ảnh hưởng đến hiệu quả chi phí của một quy trình tách là tính thấm và tính chọn lọc, được gọi là tính chọn lọc thấm. Việc sử dụng các hệ thống đa giai đoạn phức tạp hơn thường là cần thiết để đạt được mức độ tách cần thiết khi tính chọn lọc của màng thấp. Nói cách khác, nếu tính chọn lọc của màng thấp, cần có cấu hình màng phức tạp hơn và các quy trình đa giai đoạn phức tạp hơn. Số lượng mô-đun màng (đơn vị thực tế nhỏ nhất) và diện tích bề mặt của màng trong đó được xác định bởi hệ số thấm, hệ số này cũng tương quan với năng suất của màng. Các yêu cầu cụ thể của quy trình, chẳng hạn như khả năng chịu đựng các điều kiện quy trình khắc nghiệt (ví dụ: nồng độ chất ô nhiễm hoặc muối cao), các yêu cầu về tính chọn lọc và độ tinh khiết của sản phẩm, tính khả dụng của các nguồn năng lượng và khả năng kinh tế, ảnh hưởng đến việc lựa chọn quy trình tách màng và vật liệu màng [31,32]. Các loại màng vô cơ, màng polyme và màng lai với nhiều ứng dụng thực tế với đặc điểm cơ bản được trình bày trong (Bảng 2).

3. Ứng dụng công nghệ màng trong xử lý nước thải quân sự

Việc tiếp cận nước sạch, cả để uống và các mục đích khác theo yêu cầu của quân đội, là một yêu cầu thiết yếu về mặt chiến thuật, tác chiến và chiến lược để thực hiện nhiệm vụ và hoàn thành nhiệm vụ được giao. Bất kể quân đội đóng quân tại các căn cứ quân sự thường trực hoặc trại lính, hay được triển khai tại khu vực tác chiến trong các trại di động, trại viễn chinh, tàu chiến hay tàu ngầm, việc triển khai các hệ thống lọc nước và cải thiện chất lượng nước trong lực lượng vũ trang là cần thiết để duy trì khả năng sẵn sàng chiến đấu [27,28]. Ngày nay, tất cả các hệ thống tái chế và tái sử dụng nước tích hợp phải tuân

thủ các tiêu chuẩn và tài liệu quân sự quy định chất lượng nước thải đã qua xử lý (Tiêu chuẩn NATO “AMedP-4.9. Yêu cầu về chất lượng nước trong quá trình tác chiến”, “Hướng dẫn về Chất lượng Nước Uống” của WHO và các tài liệu quy định quốc gia về tiêu chuẩn độ tinh khiết của nước và bảo vệ môi trường). Có những yêu cầu chính được xác định mà các hệ thống lọc nước trong quân đội phải đáp ứng. Yêu cầu đầu tiên là khả năng thích ứng với hệ thống quân sự. Điều này đề cập đến khả năng làm sạch và tái tạo nước từ nhiều nguồn môi trường khác nhau, bao gồm nước thải bị ô nhiễm và nước từ hồ, sông và đại dương. Thuật ngữ ô nhiễm bao gồm ô nhiễm CBR với các tác nhân chiến tranh, hóa chất tổng hợp, mầm bệnh sinh học và các sản phẩm phụ độc hại của chúng, và các chất phóng xạ. Yêu cầu thứ hai là tốc độ vận hành của quá trình phân tách với cả các đặc điểm định lượng và định tính. Trong lĩnh vực quân sự, thường cần phải làm sạch khối lượng nước lớn một cách nhanh chóng và hiệu quả, với công suất hơn 5.0 m<sup>3</sup>/h cho nhu cầu của quân đội, hoặc nhiều hơn tùy theo nhu cầu. Yêu cầu quan trọng thứ ba đối với các hệ thống xử lý là tính mô-đun, độ bền và độ chắc chắn, đặc biệt đối với các hệ thống di động và xách tay. Các thiết bị như vậy phải tương đối dễ vận chuyển và nhẹ để có thể được các đơn vị cơ động triển khai dọc theo tuyến đường di chuyển trong khu vực tác chiến. Ngoài ra, các thiết bị phải chịu được các điều kiện khắc nghiệt trên chiến trường và môi trường - tức là chịu được rung động và va đập cơ học, nhiệt độ cao và thấp, độ ẩm cao, cát, bụi và các yếu tố tương tự [13]. Hình 2 cho thấy rõ hơn các khu vực trong hệ thống quân sự nơi các thiết bị xử lý, lọc và khử muối nước được sử dụng, cũng như các công nghệ màng được ứng dụng phổ biến nhất ở thực tế.

### 3.1. Tái chế và tái sử dụng nước trong các căn cứ quân sự cố định, các đơn vị cơ động

Bằng cách kết hợp các quy trình màng khác nhau (FO/RO, UF/RO, MD/RO, ED/RO, v.v.), nhiều lực lượng vũ trang trên khắp thế giới đã hiện đại hóa và tiêu chuẩn hóa các hệ thống xử lý nước của họ trong thập kỷ qua để tăng công suất và giảm chi phí năng lượng và tài chính. Tùy thuộc vào mức độ ô nhiễm và độ tinh khiết cần thiết của nước, ba giai đoạn lọc được sử dụng. Bộ lọc phương tiện, bộ lọc túi, bộ lọc than hoạt tính và bể lắng nằm trong số các quy trình lọc và lắng được sử dụng xử lý sơ bộ. Quá trình xử lý ở giai đoạn thứ hai, có thể bao gồm sự kết hợp của các công nghệ màng hoặc lai hoặc một quy trình duy nhất như RO, MD hoặc UF. Để bù các khoáng chất quan trọng bị mất trong quá trình RO, giai đoạn xử lý thứ ba cuối cùng bao gồm khử trùng bằng tia cực tím, khử trùng bằng clo, hiệu chỉnh pH và tái khoáng hóa cần thiết [31].

Thiết bị lọc nước RO (ROWPU), General Dynamics, Taunton, MA, Hoa Kỳ, có công suất hơn 10 m<sup>3</sup>/h được lắp đặt trong các cơ sở quân sự cố định khi không có nguồn nước công cộng. Hệ thống ROWPU được tăng cường bằng các kỹ thuật lọc khác như UF (siêu lọc siêu mịn) và hấp phụ trên than hoạt tính, tất cả đều được thực hiện trong các quy trình nhiều giai đoạn dựa trên mức độ tinh khiết mong muốn của sản

phẩm cuối cùng. Các quy trình như UF và NF, hệ thống điện khử ion (EDI), quy trình oxy hóa nâng cao (AOP), khử trùng bằng tia UV và ozon có thể tăng cường hơn nữa quá trình lọc trong các cơ sở chăm sóc sức khỏe, nơi mà yêu cầu được cung cấp nước siêu tinh khiết. Điều quan trọng là hiệu suất năng lượng của quy trình lọc phải phù hợp với nhu cầu về nước sạch, có thể uống được. Quy trình tiền xử lý toàn diện này đảm bảo sản xuất nước đã được lọc, xử lý hóa học và kiểm soát vi sinh (Hình 3) [34].

### 3.2. Tái chế và tái sử dụng nước trên tàu hải quân và tàu ngầm

Vào đầu thế kỷ 21, các quy trình khử muối nhiệt tại các cảng hải quân, tàu và tàu ngầm đã được thay thế bằng các quy trình màng hiện đại và tiết kiệm năng lượng hơn, trong đó RO được sử dụng rộng rãi nhất. Với sự ra đời của các hệ thống RO, quy trình khử muối trở nên hiệu quả hơn, khả thi về mặt kinh tế và linh hoạt hơn trong các tình huống phản ứng nhanh. Ngoài chi phí bảo trì thấp hơn cho hệ thống và màng, hiệu suất quy trình cao và tiết kiệm nhiên liệu, các thiết bị RO nhỏ hơn và gọn nhẹ hơn đáng kể, mang đến giải pháp tiết kiệm không gian tốt hơn cho môi trường tàu và tàu ngầm hạn chế [21,32]. Các thiết bị RO hiện đại được lắp đặt trên tàu ngầm NATO (SUBRO) được nâng cấp với bơm cao áp tạo ra tiếng ồn tối thiểu và phải có khả năng hoạt động dưới áp suất bên ngoài cao. Chúng cũng được nâng cấp với cơ chế thu hồi năng lượng giúp giảm tải cho máy phát điện. Đáng chú ý, các thiết kế hệ thống thu hồi năng lượng cũ trước năm 2000 có khả năng giảm tải máy phát điện khoảng 40 %; tuy nhiên, các phiên bản hiện đại đạt được hiệu suất tương đương với độ ổn định vận hành được nâng cao, yêu cầu bảo trì giảm và tích hợp với các giao thức lưới điện thông minh [23]. Trong tàu ngầm, RO thường được kết hợp với các phương pháp UF và ozon hóa/clo hóa để tái chế và tuần hoàn nước đã qua sử dụng qua hệ thống với tốc độ vượt quá 80%. Dự án FlexOsmosis đã chứng minh tác động tích cực và cải thiện an toàn cho các hoạt động hải quân khi FO được tích hợp vào tàu ngầm cùng với RO. Trong trường hợp bị tấn công và thân tàu bị thủng, hoặc trong các tình huống khẩn cấp khi hệ thống RO bị hỏng, FO sẽ đảm nhận vai trò khử muối và xử lý nước thải mà không cần thêm năng lượng tạo ra (nó chỉ hoạt động dựa trên áp suất thẩm thấu tự nhiên) [16]. Trên tàu, hệ thống RO và UF được tích hợp để lấy nước uống từ nước biển và để quản lý nước dần. Các hệ thống tiên tiến này có thể sản xuất tới 1250 m<sup>3</sup>/h cho mục đích của thủy thủ đoàn và cho các quy trình đầy hoạt động. Ngoài các công nghệ màng RO và UF đã đề cập ở trên, các phương pháp khác để xử lý dòng nước thải, chẳng hạn như hệ thống MBR, cũng được tích hợp vào các căn cứ quân sự của hải quân. Tất cả các hệ thống này hiện đã được số hóa và điều khiển bởi các máy chủ thông minh, tự động tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI). Trong những năm gần đây, các thiết bị khử muối RO trên tàu tiên tiến, được tối ưu hóa cao, MECO MN-100, MECO Incorporated, Mandeville, LA, Hoa Kỳ, đã được phát triển để đáp ứng nhu cầu của lực lượng hải quân và là một phần của chương trình Năng lực Hải quân Tương lai (FNC). Các thiết bị này có khả năng khử muối nước biển thành nước uống và nước siêu tinh khiết cho các mục đích

đặc biệt với lưu lượng vượt quá 15.4 m<sup>3</sup>/h. Các hệ thống màng cải tiến có khả năng chống lại clo, biến động nhiệt độ và độ đục của nước biển, đồng thời có chức năng tự động làm sạch và rửa ngược để loại bỏ cặn. Khả năng chống lại clo đạt được bằng cách thay thế màng composite màng mỏng (TFC) truyền thống bằng lớp polyamide, vốn rất dễ bị clo hóa, bằng màng polyme biến tính có các nhóm chức thơm thể hiện khả năng chống clo, hoặc bằng cách sử dụng các lớp phủ chuyên dụng như TiO<sub>2</sub> hoặc các hạt nano được tích hợp trong lớp hoạt tính của màng [35]. Các thiết bị này được chế tạo từ titan và thép hợp kim cao, nhẹ, chống ăn mòn và chống cháy. Chúng hoàn toàn tự động và tiết kiệm năng lượng hơn 75 % so với các hệ thống hiện có [36].

### 3.3. Xử lý nước bị ô nhiễm hóa học, sinh học và phóng xạ (CBR)

Nước bị ô nhiễm bởi các tác nhân chiến tranh hóa học, chất phóng xạ hoặc tác nhân gây bệnh sinh học đặt ra một thách thức lớn cho việc xử lý và làm sạch. Các loại nước như vậy có thể được tạo ra thông qua việc phát thải cố ý hoặc vô tình (ROTA - Phát thải khác ngoài tấn công) vào các thành phần môi trường hoặc sau khi thực hiện các quy trình khử nhiễm cho nhân viên, thiết bị hoặc phương tiện. Các MT trong hệ thống quân sự, ngoài việc được sử dụng để cung cấp nước uống và làm sạch nước thải đô thị, đã được nghiên cứu như các phương pháp thực tế để xử lý trong trường hợp ô nhiễm CBRN [37]. Các tác nhân chiến tranh hóa học, chẳng hạn như chất độc thần kinh sarin, soman hoặc VX, được phân loại về mặt cấu trúc là các hợp chất organophosphorus và có thể được loại bỏ một phần khỏi dung dịch nước thông qua quá trình lọc nano (NF) đối với các phân tử lớn hơn (ví dụ: VX) hoặc thẩm thấu ngược (RO).

Các công nghệ như UF, NF, RO và ED được ứng dụng trong quân sự để loại bỏ vi khuẩn có hại về mặt sinh học và các sản phẩm phụ độc hại từ quá trình trao đổi chất của chúng. Các loại vi khuẩn bao gồm *Salmonella typhi*, *Legionella sp.*, *Escherichia coli*, vi khuẩn coliform

cũng như vi-rút được loại bỏ hiệu quả bằng UF. Các ngoại độc tố lớn hơn, chẳng hạn như độc tố botulinum, cũng có thể được loại bỏ hiệu quả bằng phương pháp này, trong khi các nội độc tố nhỏ hơn khó giữ lại hiệu quả hơn bằng UF. Các màng hiệu quả hơn để loại bỏ các nội độc tố này là các màng có lỗ nhỏ hơn 1 nm, tức là màng TFC-PA NF và màng RO. Các màng này có thể giảm nồng độ độc tố tới 99 % thông qua việc điều chỉnh theo giá trị pH cao do tương tác kỵ nước và lực đẩy tĩnh điện. Phương pháp kết hợp NF và RO có thể được thay thế bằng EDF để loại bỏ thêm. MBR được sử dụng tại các địa điểm quân sự cố định lớn để xử lý sinh học, phân hủy sinh học vật liệu hữu cơ và ức chế vi sinh vật có hại [38].

Các MT được áp dụng phổ biến nhất trong thực tế là RO, NF và ED để xử lý nước giàu chất phóng xạ. Các chất phóng xạ như Cs137 và I131 thường bị màng loại bỏ do dạng ion và kích thước của chúng, với hệ số loại bỏ lên đến 99 % [39]. Nước thải bị nhiễm CBR không thường gặp trong thực tế, nhưng để đảm bảo xử lý hiệu quả loại ô nhiễm này, cần phải xử lý nhiều giai đoạn bằng quy trình tách màng kết hợp với một số quy trình hóa học nhất định. Quy trình xử lý kỹ lưỡng, nhiều giai đoạn đối với nước bị nhiễm CBR được thể hiện trong Hình 4. Trong giai đoạn tiền xử lý, các bộ lọc thô và thiết bị lắng được sử dụng để loại bỏ các hạt lớn hơn khỏi dòng nước thải. Siêu lọc (UF) được sử dụng để loại bỏ các vi sinh vật gây bệnh và các độc tố lớn hơn, trong khi lọc nano (NF) loại bỏ các hợp chất hữu cơ nhỏ hơn và các hợp chất chứa kim loại nặng. Đối với các chất phóng xạ, nội độc tố trọng lượng phân tử thấp và tác nhân chiến tranh hóa học, RO cung cấp một kỹ thuật phân tách hiệu quả cao. Ở bước xử lý cuối cùng, hấp phụ trên than hoạt tính hoặc zeolit có thể được sử dụng để loại bỏ các phân tử ưa nước nhỏ hơn và mùi khó chịu, cùng với khử trùng bằng clo hoặc tia UV để đảm bảo khử trùng bổ sung [38,39]. Nước thải đã qua xử lý thu được từ các quy trình đa giai đoạn như vậy sẽ đáp ứng các tiêu chuẩn nghiêm ngặt về chất lượng nước với các giới hạn vật lý, hóa học, vi sinh và phóng xạ.

**Bảng 1.** Các quá trình màng theo lực đẩy.

Chênh lệch áp suất	Sự khác biệt về nồng độ (hoạt động)	Chênh lệch nhiệt độ	Sự khác biệt về điện thế
Vi lọc (MF)	Sự thẩm hút		
Siêu lọc (UF)	Tách khí	Chưng cất	Điện thẩm thấu
Lọc nano (NF)	Sự thẩm thấu hơi nước	màng nhiệt	Điện thẩm
Thẩm thấu ngược (RO)	Thẩm tách	thẩm thấu	Điện phân màng
Thẩm thấu thuận (FO)	Thẩm tách khuếch tán		
Thẩm thấu chậm áp suất	Vận chuyển qua trung gian chất mang		

**Bảng 2.** Các loại màng vô cơ, polyme và lai với nhiều ứng dụng thực tế và tính chất cơ bản [33].

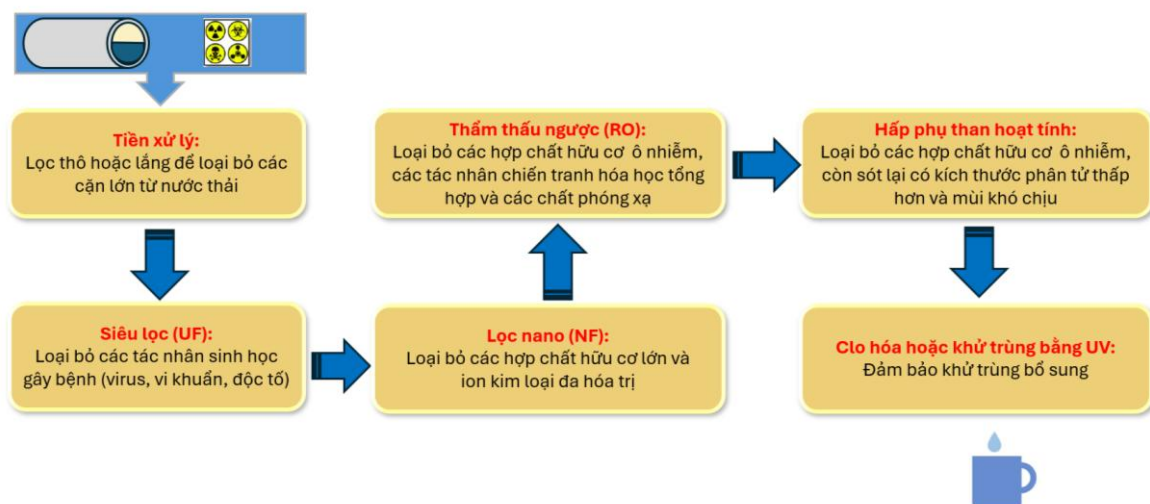
Loại màng		Ứng dụng	Ưu điểm	Nhược điểm
Màng vô cơ	Màng gồm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , màng oxit Al-Si, màng kim loại xốp titan/thép không gỉ, sàng phân tử gốc cacbon, màng silicat, borosilicat và thủy tinh xốp	Được sử dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau của ngành công nghiệp hóa chất để lọc nước và tách khí, trong cảm biến phân tích, điện cực pH, v.v.	Độ ổn định cơ học, nhiệt và hóa học tuyệt vời, kích thước lỗ rỗng thay đổi, hoạt động trong điều kiện quy trình đầy thách thức, cơ chế tách: sàng phân tử, khuếch tán bề mặt ngưng tụ mao quản, khuếch tán Knudsen	Màng có lỗ chân lông cực kỳ mỏng manh, quá trình chuẩn bị tốn kém, khó khăn trong việc triển khai mở rộng quy mô
Màng hữu cơ (polymer)	Màng polyamide (PA)	Được sử dụng trong các quy trình NF và RO, để khử muối nước biển-màng tổng hợp màng mỏng (TFC), để xử lý nước thải công nghiệp-màng xoắn ốc (SWM)	Chi phí sản xuất thấp, độ ổn định cơ học tốt, dễ dàng nâng cấp, chuẩn bị tương đối dễ dàng, cơ chế tách: loại trừ kích thước, loại trừ điện tích và tương tác màng-dung dịch	Đẻo hóa, tùy thuộc vào bản chất của polyme, độ ổn định nhiệt và hóa học tương đối thấp, kích thước lỗ rỗng không thể kiểm soát, sự cân bằng giữa tính thấm và tính chọn lọc, cần phải có quy trình làm sạch thường xuyên (bản lỗ rỗng nghiêm trọng)
	Màng polyvinylidene fluoride (PVDF)	Được sử dụng trong các quy trình UF và MBR, được sử dụng trong các nhà máy đô thị và công nghiệp để xử lý nước thải, v.v.		
	Màng polyurethane (PU)	Được sử dụng làm cảm biến sinh học để phát hiện các ion và để kiểm soát việc giải phóng thuốc trong y học, v.v.		
	Màng dựa trên dẫn xuất cellulose	Được sử dụng trong ED và RO, được sử dụng làm màng khử muối nước biển (thế hệ 1)		
Màng nền lai và hỗn hợp	Màng polyme biến tính graphene (graphene-polymethyl methacrylate PMMA nanolaminat)	Được sử dụng trong các cảm biến sinh học, thiết bị điện tử và quang học, để loại bỏ các chất ô nhiễm hữu cơ và vô cơ, cũng như để lọc nước và khử muối, v.v.	Giảm độ dẻo hóa, tăng cường độ ổn định nhiệt và cơ học, tiêu thụ năng lượng thấp, cơ chế tách: nguyên lý màng vô cơ và polyme kết hợp	Ở tỷ lệ chất độn cao trong ma trận polyme, độ giòn của hệ thống, độ ổn định nhiệt và hóa học phụ thuộc vào ma trận polyme
	Hạt nano zeolit MFI/ màng đa tinh thể MOF ZIF-8	Được sử dụng trong y sinh học để vận chuyển thuốc, phản ứng xúc tác và trong việc tách các phân đoạn dầu mỏ, v.v.		
	Màng sinh học và màng lấy cảm hứng từ sinh học	Ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, để lọc nước, phát triển cảm biến sinh học và các quy trình công nghiệp, v.v.		



Hình 2. Các công nghệ màng được ứng dụng phổ biến nhất trong các lĩnh vực thuộc hệ thống quân sự.



Hình 3. Sơ đồ quy trình tách ROWPU TWPS 1500 GPH.



Hình 4. Phương pháp tiếp cận toàn diện để xử lý dòng nước thải bị ô nhiễm CBR bằng nhiều phương pháp khác nhau.

#### 4. Những tiến bộ và xu hướng tương lai trong công nghệ màng

MT trong các ứng dụng công nghiệp để cung cấp nước uống bằng cách khử muối nước biển và xử lý nước thải, cũng như trong xử lý nước bị ô nhiễm CBR đang được cải tiến và nâng cấp về mặt công nghệ hàng ngày. Việc giải quyết tốt các vấn đề như tắc nghẽn màng, giảm chi phí vận hành và đầu tư, nâng cao tuổi thọ, vận hành linh hoạt và các mô-đun đơn giản sẽ cho phép ứng dụng MT rộng rãi hơn nữa [33,34]. Trong hệ thống lọc nước phục vụ quân sự, khả năng cung cấp nước tại chỗ và khả năng tự cung tự cấp, cũng như độc lập với nguồn cung cấp hậu cần, là những yếu tố then chốt để hoàn thành thành công các nhiệm vụ được giao của đơn vị. Để tăng cường tính tự chủ của hệ thống và giám sát chất lượng quy trình phân tách, các cảm biến cải tiến để giám sát nước liên tục đang được phát triển và tích hợp vào các bộ lọc màng. Các cảm biến IoT (Internet vạn vật) này sau đó được tích hợp với các hệ thống phát hiện của các đơn vị cố định hoặc di động trên thực địa hoặc trong tàu ngầm và tàu thủy [38].

Một thách thức nữa đối với các thiết bị lọc dạng mô-đun màng là phải tối ưu hóa các màng để xử lý hiệu quả các loại nước khác nhau: nước biển và nước lợ, nước thải đô thị, nước bị ô nhiễm hydrocarbon, nước bị ô nhiễm CBR, v.v. Việc cải thiện tính chọn lọc và hiệu quả năng lượng của màng có liên quan chặt chẽ đến sự phát triển của màng nanohybrid, graphene và màng graphene oxide. Vì carbon có mặt trong hầu hết mọi thành phần của môi trường, nên nguồn cung cấp nguyên liệu thô là vô hạn [39]. Với diện tích bề mặt là 2700 m<sup>2</sup>/g, graphene cũng cực kỳ nhẹ, trơ về mặt hóa học, giòn và linh hoạt, và mạnh hơn thép khoảng 200 lần và dẫn điện gấp 1000 lần so với đồng. Bằng cách xếp lớp nhiều tấm nano hai chiều lên trên nhau, màng graphene oxide có độ bền cơ học rất lớn. Trong các nghiên cứu gần đây, các vật liệu màng xếp tiên tiến như polyme hữu cơ xếp (POP), khung thơm xếp (PAF), khung hữu cơ cộng hóa trị (COF) và khung kim loại-hữu cơ (MOF) đã cho thấy hiệu suất đầy hứa hẹn trong việc xử lý nước bị ô nhiễm phóng xạ. Tổ chức Khoa học và Công nghệ (STO) trong khuôn khổ NATO đang tích cực dẫn đầu các dự án nghiên cứu chống tắc nghẽn màng sử dụng lớp phủ nano (graphene, graphene oxide, bạc) và nghiên cứu ứng dụng của chúng trong việc bảo vệ và nâng cao các hệ thống màng hiện có, thiết bị khử muối, thiết bị điện tử dưới nước, bề mặt trên tàu và tàu ngầm.

Trong lĩnh vực tự động hóa, tối ưu hóa và kiểm soát quy trình trong hệ thống lọc nước cho quân sự, các cảm biến thông minh được tích hợp để theo dõi liên tục hiệu quả tách và chất lượng của các nguồn cấp liệu, thấm qua và giữ lại. Kiểm soát giám sát và thu thập dữ liệu (SCADA) đã được sử dụng trong nhiều năm để quản lý thời gian thực các quy trình xử lý nước, thu thập dữ liệu và giám sát từ xa thông qua các thông số như độ mặn, độ đục, pH, clo tự do và các thông số tương tự. Hệ thống này đã được chứng minh là lý tưởng cho các hoạt động tại hiện trường và các căn cứ di động vì nó hoàn toàn tự động và không yêu cầu bất kỳ chuyên môn cụ thể nào từ người vận hành và đơn vị sử dụng. Dựa trên dữ liệu cảm biến IoT, hệ thống bộ điều khiển logic lập

trình (PLC) tự động điều chỉnh (liều lượng hóa chất, áp suất hệ thống do máy bơm tạo ra, v.v.) tùy thuộc vào các điều kiện của quy trình. Hệ thống được người vận hành giám sát từ trung tâm điều khiển SCADA và được kết nối với giao diện web, cho phép truy cập từ xa từ bất kỳ thiết bị thông minh nào.

#### 5. Kết luận

Trước tình trạng khan hiếm nguồn nước uống hiện nay trên toàn cầu đòi hỏi phải áp dụng các giải pháp công nghệ hiện đại để xử lý các nguồn nước hiện có như nước thải và nước biển. MT đã chứng minh được vai trò thiết yếu trong việc đảm bảo an ninh nguồn cung cấp nước đáng tin cậy và vượt trội. Trong đó, RO là quy trình được sử dụng rộng rãi nhất để khử muối và xử lý các thành phần ô nhiễm phức tạp. Với các ứng dụng quân sự MT đã được sử dụng rộng rãi, bao gồm khử muối và lọc nước trên tàu và tàu ngầm, sản xuất nước uống tại hiện trường bằng các thiết bị di động và xử lý nước bị ô nhiễm hóa học, sinh học và phóng xạ. Trong khi các căn cứ cố định cũng sử dụng MBR, UF và MF, các hệ thống di động thường dựa trên RO, NF và ED. Đối với các tình huống cấp bách như xử lý nước bị nhiễm mầm bệnh sinh học hoặc tác nhân chiến tranh hóa học, cần có một quy trình đa giai đoạn trong đó MT đóng vai trò là thành phần chính của các hệ thống tích hợp khi kết hợp với các kỹ thuật xử lý lý hóa. Những tiến bộ trong tương lai của MT ứng dụng cho quân sự sẽ tập trung vào việc cải thiện độ bền và tính bền vững, giảm sự phụ thuộc vào mạng lưới cung ứng hậu cần, đồng thời tăng cường tính tự chủ trong hoạt động và hiệu quả năng lượng. Màng làm từ graphene, màng được chức năng hóa bằng enzyme, bề mặt ứng màng sinh học, vật liệu chống bám bẩn tự phục hồi, công nghệ nano, cảm biến hỗ trợ IoT và tự động hóa và giám sát thời gian thực các quy trình màng là những ví dụ về các phương pháp tiếp cận sáng tạo.

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. Schwarzenbach, R.P., Egli, T., Hofstetter, T.B., Von Gunten, U., & Wehrli, B., "Global Water Pollution and Human Health," *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 109–136, 2010.
- [2]. Singh, A., "A Review of Wastewater Irrigation: Environmental Implications," *Resources, Conservation & Recycling*, 168, 105454, 2021.
- [3]. Crini, G., & Lichtfouse, E., "Advantages and Disadvantages of Techniques Used for Wastewater Treatment," *Environmental Chemistry Letters*, 17, 145–155, 2019.
- [4]. Bera, S.P., Godhaniya, M., & Kothari, C., "Emerging and Advanced Membrane Technology for Wastewater Treatment: A Review," *Journal of Basic Microbiology*, 62, 245–259, 2022.
- [5]. Peters, T., "Membrane Technology for Water Treatment," *Chemical Engineering & Technology*, 33, 1233–1240, 2010.
- [6]. Bagwell, T.H., Shalewitz, B., & Coleman, A., "The Army Water Supply Program: An Overview," *Desalination*, 99, 423–445, 1994.

- [7]. Saritas, O., & Burmaoglu, S., "Future of Sustainable Military Operations under Emerging Energy and Security Considerations," *Technological Forecasting & Social Change*, 102, 331–343, 2016.
- [8]. Othman, N.H., Alias, N.H., Fuzil, N.S., Marpani, F., Shahrudin, M.Z., Chew, C.M., David Ng, K.M., Lau, W.J., & Ismail, A.F., "A Review on the Use of Membrane Technology Systems in Developing Countries," *Membranes*, 12, 30, 2021.
- [9]. Drioli, E., Ali, A., & Macedonio, F., "Membrane Distillation: Recent Developments and Perspectives," *Desalination*, 356, 56–84, 2015.
- [10]. Turchanin, A., & Götzhäuser, A., "Carbon Nanomembranes," *Advanced Materials*, 28, 6075–6103, 2016.
- [11]. Suwaileh, W., Pathak, N., Shon, H., & Hilal, N., "Forward Osmosis Membranes and Processes: A Comprehensive Review of Research Trends and Future Outlook," *Desalination*, 485, 114455, 2020.
- [12]. Touš, M., Máša, V., & Vondra, M., "Energy and Water Savings in Military Base Camps," *Energy Systems*, 12, 545–562, 2021.
- [13]. Desario, A.P., "Technology Assessment of Water Treatment Devices for Small-Scale Production," *U.S. Naval Research Laboratory*, 67, 8–9, 2023.
- [14]. Lim, Y.J., Goh, K., Kurihara, M., & Wang, R., "Seawater Desalination by Reverse Osmosis: Current Development and Future Challenges in Membrane Fabrication – A Review," *Journal of Membrane Science*, 629, 119292, 2021.
- [15]. Pasika, S., Chomko, D., Opanasenko, O., Khomiakov, D., & Skyba, O., "Legal Regulations of Groundwater Extraction Processes to Support the Needs of Military Units," *Proceedings of Monitoring 2019*, Kyiv, Ukraine, 12–15 November 2019, pp.1–5.
- [16]. Li, L., Shi, W., & Yu, S., "Research on Forward Osmosis Membrane Technology Still Needs Improvement in Water Recovery and Wastewater Treatment," *Water*, 12, 107, 2019.
- [17]. Loeb, S., & Sourirajan, S., "Sea Water Demineralization by Means of an Osmotic Membrane," *Advances in Chemistry*, ACS Publications, Volume 38, 1963. ISBN 978-0-8412-0039-5.
- [18]. Cadotte, J.E., Petersen, R.J., Larson, R.E., & Erickson, E.E., "A New Thin-Film Composite Seawater Reverse Osmosis Membrane," *Desalination*, 32, 25–31, 1980.
- [19]. Obotey Ezugbe, E., & Rathilal, S., "Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review," *Membranes*, 10, 89, 2020.
- [20]. Fane, A.G., Wang, R., & Jia, Y., "Membrane Technology: Past, Present and Future," in *Membrane and Desalination Technologies*, Humana Press, Totowa, NJ, USA, pp. 1–45, 2011. ISBN 978-1-58829-940-6.
- [21]. Shenvi, S.S., Isloor, A.M., & Ismail, A.F., "A Review on RO Membrane Technology: Developments and Challenges," *Desalination*, 368, 10–26, 2015. DOI: —.
- [22]. Muhamad, M.S., Salim, M.R., Lau, W.J., & Yusop, Z., "A Review on Bisphenol A Occurrences, Health Effects and Treatment Process via Membrane Technology for Drinking Water," *Environmental Science & Pollution Research*, 23, 11549–11567, 2016.
- [23]. Nasir, A.M., Adam, M.R., Mohamad Kamal, S.N.E.A., Jaafar, J., Othman, M.H.D., Ismail, A.F., Aziz, F., Yusof, N., Bilad, M.R., Mohamud, R., et al., "A Review of the Potential of Conventional and Advanced Membrane Technology in the Removal of Pathogens from Wastewater," *Separation and Purification Technology*, 286, 120454, 2022.
- [24]. Mulder, M., *Basic Principles of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 280–415, 1996.
- [25]. Gavrilova, N., Gubin, S., Myachina, M., & Skudin, V., "Transport Reagents through the Pore Structure of a Membrane Catalyst under Isothermal and Non-Isothermal Conditions," *Membranes*, 11, 497, 2021.
- [26]. Pochivalov, K.V., Basko, A.V., Lebedeva, T.N., Yurov, M.Y., Yushkin, A.A., Bronnikov, S.V., & Volkov, A.V., "PVDF Membrane Formation via NIPS in Isothermal and Non-Isothermal Conditions: Thermodynamics, Structure, and Properties," *Membrane and Membrane Technologies*, 6, 473–490, 2024.
- [27]. Malaeb, L., & Ayoub, G.M., "Reverse Osmosis Technology for Water Treatment: State of the Art Review," *Desalination*, 267, 1–8, 2011.
- [28]. Wang, L., He, J., Heiraniyan, M., Fan, H., Song, L., Li, Y., & Elimelech, M., "Water Transport in Reverse Osmosis Membranes Is Governed by Pore Flow, Not a Solution-Diffusion Mechanism," *Science Advances*, 9, eadf8488, 2023.
- [29]. Wang, R., & Elimelech, M., "Revisiting Solute Transport in Polyamide Membranes: Insights from Neutral Solute Partitioning," *Journal of Membrane Science*, 728, 124117, 2025.
- [30]. Fan, H., Heiraniyan, M., & Elimelech, M., "The Solution-Diffusion Model for Water Transport in Reverse Osmosis: What Went Wrong" *Desalination*, 580, 117575, 2024.
- [31]. Zubair, M.M., Saleem, H., & Zaidi, S.J., "Recent Progress in Reverse Osmosis Modeling: An Overview," *Desalination*, 564, 116705, 2023.
- [32]. Wenten, I.G., & Khoiruddin, "Reverse Osmosis Applications: Prospect and Challenges," *Desalination*, 391, 112–125, 2016.
- [33]. Al Aani, S., Mustafa, T.N., & Hilal, N., "Ultrafiltration Membranes for Wastewater and Water Process Engineering: A Comprehensive Statistical Review over the Past Decade," *Journal of Water Process Engineering*, 35, 101241, 2020.
- [34]. Awad, E.S., Sabirova, T.M., Tretyakova, N.A., Alsahy, Q.F., Figoli, A., & Salih, I.K., "A Mini-Review of Enhancing Ultrafiltration Membranes (UF) for Wastewater Treatment: Performance and Stability," *ChemEngineering*, 5, 34, 2021.
- [35]. Freger, V., "Ion Uptake and Pairing in Membranes: The Pore Model," *Journal of Membrane Science*, 722, 123795, 2025.
- [36]. Maroufi, N., & Hajilary, N., "Nanofiltration Membranes Types and Application in Water Treatment: A Review," *Sustainable Water Resources Management*, 9, 142, 2023.
- [37]. Khan, N.A., Singh, S., López-Maldonado, E.A., Narasimhappa, P., Méndez-Herrera, P.F., López-López, J.R., Baig, U., Ramamurthy, P.C., Mubarak, N.M., et al., "Emerging Membrane Technology and Hybrid Treatment Systems for the Removal of Micropollutants from Wastewater," *Desalination*, 565, 116873, 2023.
- [38]. Ahmed, S.F., Mehejabin, F., Momtahn, A., Tasannum, N., Faria, N.T., Mofijur, M., Hoang, A.T., Vo, D.-V.N., & Mahlia, T.M.I., "Strategies to Improve Membrane Performance in Wastewater Treatment," *Chemosphere*, 306, 135527, 2022.
- [39]. Almeida, J., Monahan, A., Dionísio, J., Delgado, F., & Magro, C., "Sustainability Assessment of Wastewater Reuse in a Portuguese Military Airbase," *Science of the Total Environment*, 851, 158329, 2022.