

Exploring microalgae (*Chlorophyta*)-based desalination and open-system cultivation strategies

Viet B. Nguyen, Quyen T. N. Nguyen, Kha D. Nguyen, Thao T.T. Bui, & Vi N. H. Vu*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical Engineering and Food Technology,
Nong Lam University, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

Research Paper

Received: February 14, 2025

Revised: June 05, 2025

Accepted: July 04, 2025

Keywords

Desalination

Microalgae

Open system

Water treatment

*Corresponding author

Vu Ngoc Ha Vi

Email:

vivnh@hcmuaf.edu.vn

ABSTRACT

Saltwater intrusion presents a global challenge that adversely affects ecosystems, depletes freshwater resources, compromises human health, and hinders agricultural development. Therefore, the development of efficient desalination methods has become critically important. Among emerging solutions, microalgae-based desalination has gained significant attention due to its high efficiency, cost-effectiveness, and environmental sustainability. This study summarizes current knowledge on the mechanisms, influencing factors, and practical applications of microalgae (*Chlorophyta*) in desalination. Microalgae desalinate water mainly through two mechanisms: biosorption and bioaccumulation. Cultivation of microalgae can be employed in different photosynthetic bioreactors, in which open pond systems are particularly promising due to their scalability, low operational costs, and ability to harness solar energy. The application of microalgae for desalination addresses salinization and contributes to sustainable development goals by promoting ecological balance.

Cited as: Nguyen, V. B., Nguyen, Q. T. N., Nguyen, K. D., Bui, T. T. T., & Vu, V. N. H. (2026). Exploring microalgae (*Chlorophyta*)-based desalination and open-system cultivation strategies. *The Journal of Agriculture and Development* 25(2), 24-37.

Tổng quan ứng dụng vi tảo (*Chlorophyta*) trong quá trình khử mặn nước ở hệ thống nuôi cấy mở

Nguyễn Bảo Việt, Nguyễn Thị Ngọc Quyên, Nguyễn Duy Kha, Bùi Trần Thanh Thảo & Vũ Ngọc Hà Vi*
Bộ Môn Công Nghệ Hoá Học, Khoa Công Nghệ Hoá Học và Thực Phẩm, Trường Đại Học Nông Lâm TP.HCM, TP. Hồ Chí Minh

THÔNG TIN BÀI BÁO

Bài báo khoa học

Ngày nhận: 14/02/2025

Ngày chỉnh sửa: 05/06/2025

Ngày chấp nhận: 04/07/2025

Từ khóa

Hệ thống nuôi cấy mở

Khử mặn

Vi tảo

Xử lý nước

*Tác giả liên hệ

Vũ Ngọc Hà Vi

Email: vivnh@hcmuaf.edu.vn

TÓM TẮT

Quá trình xâm nhập mặn đã trở thành một thách thức toàn cầu khi gây nhiều tác động tiêu cực lên hệ sinh thái, suy giảm nguồn nước ngọt, ảnh hưởng đến sức khỏe và kìm hãm sự phát triển của nông nghiệp. Trước thực trạng này, việc nghiên cứu các giải pháp khử mặn hiệu quả là yêu cầu cấp bách hiện nay. Trong số các phương pháp đang được phát triển, khử mặn bằng vi tảo đang nhận được nhiều sự quan tâm nhờ hiệu quả cao, chi phí thấp và có tính bền vững với môi trường. Nghiên cứu này tổng hợp các cơ chế, yếu tố ảnh hưởng và ứng dụng thực tiễn của vi tảo (*Chlorophyta*) trong quá trình khử mặn. Vi tảo khử mặn bằng hai cơ chế chính là hấp thụ sinh học và tích lũy sinh học, trong đó hiệu suất xử lý phụ thuộc các yếu tố môi trường như pH, nhiệt độ, ánh sáng. Vi tảo có thể được nuôi cấy ở các hệ thống quang học khác nhau, trong đó hệ thống nuôi cấy mở được đánh giá cao nhờ khả năng mở rộng quy mô, giảm thiểu chi phí vận hành và tận dụng năng lượng mặt trời. Công nghệ sử dụng vi tảo khử mặn giúp góp phần giải quyết vấn đề về môi trường, bảo vệ cân bằng sinh thái và hướng đến mục tiêu phát triển bền vững.

1. Đặt Vấn Đề

Xâm nhập mặn là hiện tượng nước biển dâng cao xâm nhập sâu vào trong đất liền và làm cho hàm lượng muối tăng vượt mức cho phép (Prusty & Farooq, 2022). Hiện nay, tình hình xâm nhập mặn ở Việt Nam diễn ra ngày càng phức tạp, đặc biệt là các tỉnh ở vùng Đồng bằng Sông Cửu Long. Theo nghiên cứu của Vo & ctv. (2021), năm 2019 - 2020 độ mặn bao phủ tỉnh Bến Tre đã tăng từ 3 đến 7‰ với độ sâu xâm nhập khoảng 85km. Tình hình xâm nhập mặn vào năm 2024 được dự báo cao hơn mức trung

bình trong nhiều năm, và tiếp tục tăng đến tháng 3 năm 2025 khi độ sâu xâm nhập từ 45 - 60 km tại các cửa sông Cửu Long (Vo & ctv., 2021). Hiện tượng xâm nhập mặn không chỉ diễn ra ở Đồng bằng sông Cửu Long (Việt Nam) mà còn đe dọa đến nhiều khu vực trên thế giới như Địa Trung Hải, Bắc Mỹ (Cao & ctv., 2021). Xâm nhập mặn có thể xuất phát từ tự nhiên hoặc do hoạt động sản xuất của con người. Vào mùa khô, mực nước ở sông thấp trong khi thủy triều dâng cao khiến nước biển chạy ngược dòng, gây ngập lụt, nhiễm mặn và sạt lở. Ngoài ra, các hoạt động sản xuất của con người như việc khai thác nguồn

nước ngầm, nuôi trồng thủy sản, khai thác nông nghiệp một cách quá mức cũng gây nên hiện tượng xâm nhập mặn. Sự nóng lên toàn cầu làm mực nước biển dâng cao cũng khiến quá trình xâm nhập mặn diễn biến phức tạp hơn (Moore & Joye, 2021).

Quá trình xâm nhập mặn ảnh hưởng tiêu cực lên sức khỏe và cuộc sống của con người. Việc tiếp xúc thường xuyên với nước mặn có thể gây ra các bệnh lý như viêm da, các bệnh về gan, huyết áp cao hay bệnh thận (Mueller & ctv., 2024). Đất bị nhiễm mặn gây ảnh hưởng tiêu cực đến sinh trưởng và phát triển của các loài cây trồng. Khi thiếu nước ngọt, nông dân không thể tưới tiêu các loại cây ăn quả, hoa màu và lương thực khiến nền nông nghiệp phát triển trì trệ (Tran & ctv., 2012). Do đó, cần tiến hành các phương án chống xâm nhập mặn để bảo vệ hệ sinh thái, sức khỏe và kinh tế của người dân.

Nhiều biện pháp chống xâm nhập mặn và công nghệ khử mặn nước ở quy mô lớn và hộ gia đình đã được tiến hành. Xây dựng công trình thủy lợi chống mặn, các hồ dự trữ nước ngọt giúp điều tiết, kiểm soát nước mặn xâm nhập và lưu trữ nước ngọt thường được thực hiện ở phạm vi lớn và tốn nhiều kinh phí để xây dựng lắp đặt, sửa chữa, bảo trì. Đối với quy mô hộ gia đình, phương án gia cố đê bao, nạo vét mương được triển khai nhưng phương án này có thể tăng nguy cơ tích lũy muối trong đất, gây suy giảm chất lượng đất (Nguyen & Nguyen, 2024). Một công nghệ khử mặn phổ biến được sử dụng hiện nay là lọc thẩm thấu ngược (RO), công nghệ này có thể đồng thời loại bỏ tạp chất và chất gây ô nhiễm trong nước (Jiang & ctv., 2018). Công nghệ lọc có nhiều ưu điểm như dễ vận hành, hiệu quả lọc tạp chất có trong nước mặn cao và

nước sau lọc đảm bảo an toàn (Kore, 2011). Tuy nhiên, công nghệ lọc khá tốn kém vì màng lọc chi phí cao và cần được thay đổi định kỳ.

Các kết quả nghiên cứu gần đây cho thấy khử mặn bằng vi tảo vi tảo một phương án tiềm năng. Vi tảo là loài sinh vật nhân thực có kích thước nhỏ dao động từ 0,2 tới 200 μm , đa dạng về hình dạng, thành phần và số lượng loài, sinh trưởng và phát triển trong môi trường có bổ sung muối, nguồn nito, phospho, chất dinh dưỡng vô cơ (Jones & ctv., 2019). Vi tảo có thể sống được trong môi trường nước ngọt cũng như nước mặn và thích nghi ở các điều kiện sống khác nhau (Sathasivam & ctv., 2019). Nghiên cứu của Nguyen & ctv. (2023) cho thấy vi tảo sinh trưởng, phát triển tốt ở các nồng độ muối từ 1 - 30 g/L ở các điều kiện nuôi cấy khác nhau và độ mặn của nước giảm theo thời gian nuôi cấy. Với khả năng quang tự dưỡng, vi tảo hấp thụ CO_2 trong quá trình quang hợp giúp giảm hiệu ứng nhà kính, tận dụng ánh sáng mặt trời, nguồn năng lượng dồi dào từ tự nhiên mà không cần phải tiêu tốn quá nhiều năng lượng. Hơn nữa, hệ thống nuôi tảo có chi phí vận hành thấp và có thể tăng quy mô nuôi cấy (Esmaceli & ctv., 2023). Do đó, phương án khử mặn sử dụng vi tảo được xem là một biện pháp “xanh” đầy tiềm năng thay thế các phương pháp truyền thống khi tiêu thụ ít năng lượng, giảm chi phí và không gây ảnh hưởng tới môi trường.

Bài nghiên cứu tổng quan này đánh giá tiềm năng khử mặn của vi tảo, so sánh các chủng tảo có khả năng khử mặn và phân tích cơ chế khử mặn cũng như ảnh hưởng của các yếu tố ngoại cảnh tới quá trình sinh trưởng và hiệu quả khử mặn của một số chủng vi tảo nước ngọt và nước mặn. Ngoài ra, bài nghiên cứu cũng đưa ra những

ưu và nhược điểm của phương pháp khử mặn sử dụng vi tảo và những thách thức, triển vọng của phương pháp xử lý sinh học này.

2. Các Giống Tảo Có Hiệu Quả Khử Mặn Cao

Nghiên cứu gần đây cho thấy tiềm năng ứng dụng của vi tảo không chỉ để sản xuất sinh khối, năng lượng sinh học mà vi tảo còn có thể khử mặn (Gao & ctv., 2016). Bốn loài vi tảo là *Spirulina*, *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Dunaliella* và *Nannochloropsis* đã được chứng minh cho hiệu quả khử mặn cao (Zarzo & ctv., 2014; Matos & ctv., 2015; Moayedid & ctv., 2021).

Spirulina, *Chlorella* và loài *Scenedesmus* là các loại tảo nước ngọt có thể thích nghi với môi trường có độ mặn cao. Khả năng khử mặn của các giống tảo này đã được đánh giá trong nghiên cứu của Sahle-Demessie & ctv. (2019). Quá trình hấp thụ muối của các giống tảo này ban đầu tuân theo mô hình động học biểu kiến bậc nhất, trong đó hằng số tốc độ phản ứng thay đổi từ -3,58 đến -7,68 theo ngày, và hiệu quả hấp thụ đạt tới 30% trong một chu kỳ. Nghiên cứu của Gilani & ctv. (2024) cho thấy *Spirulina* sp. LEB 18 được nuôi cấy trong môi trường gồm nước muối thô (nước lợ khử mặn) pha trộn 25% dung dịch dinh dưỡng Zarrouk phát triển tốt mà còn có hiệu suất xử lý dinh dưỡng dư thừa rất cao, đạt 96,99% với NO_3^- và 83,11% với PO_4^{3-} . Nghiên cứu của Barahoei & ctv. (2021) chỉ ra rằng, *Chlorella* được nuôi ở môi trường BG11 cải tiến trong hệ thống quang học dạng cột đứng cho tốc độ sinh trưởng và hiệu quả khử mặn cao. Khả năng khử mặn của *Chlorella* có thể có thể lên tới 50 g/L (Matos & ctv., 2017). Ngoài ra, *Chlorella* còn có khả năng loại bỏ các nhóm chất hữu cơ có trong nước thải sơ cấp và thứ cấp (Znad & ctv., 2018). El Nadi &

ctv. (2014) báo cáo tảo *Scenedesmus* có thể sinh trưởng tại môi trường có độ mặn dao động từ 2.000 đến 40.000 ppm cùng với khả năng loại bỏ tổng chất rắn hòa tan (TDS) hiệu suất dao động từ 13 đến 63%. Các yếu tố có thể ảnh hưởng tới hiệu quả xử lý là nồng độ TDS ban đầu, nhiệt độ, thời gian chiếu sáng và thời gian lưu. Nghiên cứu chỉ ra rằng quá trình vận hành ở chế độ dòng chảy liên tục trong điều kiện tự nhiên cho hiệu suất loại bỏ TDS tối ưu nhất. Dựa trên kết quả này, nhóm tác giả đề xuất việc ứng dụng hệ thống phản ứng liên tục để nâng cao hiệu quả khử mặn. Hệ thống này cũng cho thấy nhiều ưu điểm như khả năng thiết lập dễ dàng, chi phí vận hành và bảo trì thấp, tiêu thụ ít năng lượng, đồng thời hạn chế phát sinh ô nhiễm thứ cấp và không tạo ra phụ phẩm độc hại.

Dunaliella và *Nannochloropsis* là những giống tảo được tìm thấy ở môi trường mặn như hồ và đầm nước mặn. *Dunaliella* có khả năng tăng trưởng tối đa trong môi trường có nồng độ 1,5 - 3,0 M NaCl và có thể sống sót ở ngay cả ở điều kiện 4,5 M NaCl (Farhat & ctv., 2011). Moayedid & ctv. (2021) kết luận rằng tới hiệu quả khử mặn của các giống tảo *Dunaliella* và *Nannochloropsis* là không đáng kể ở phạm vi độ mặn từ 50 - 70 mS/cm, tuy nhiên ở môi trường độ mặn cao hiệu quả khử mặn của giống *Dunaliella salina* tăng lên đáng kể khi hàm lượng ion Na^+ , Cl^- và HCO_3^- giảm ở cùng điều kiện xử lý. Tảo *Dunaliella* khi được nuôi cấy trong môi trường có nồng độ NaCl đầu vào là 1,0 M cho hàm lượng lipid lên 70% (Takagi & ctv., 2006). Kết quả này cho thấy ảnh hưởng của nồng độ muối đối với sự tích tụ lipid trong vi tảo *Dunaliella*, mở ra ứng dụng tiềm năng của loài vi tảo này trong tương lai. *Nannochloropsis oculata* là vi tảo đơn bào hình

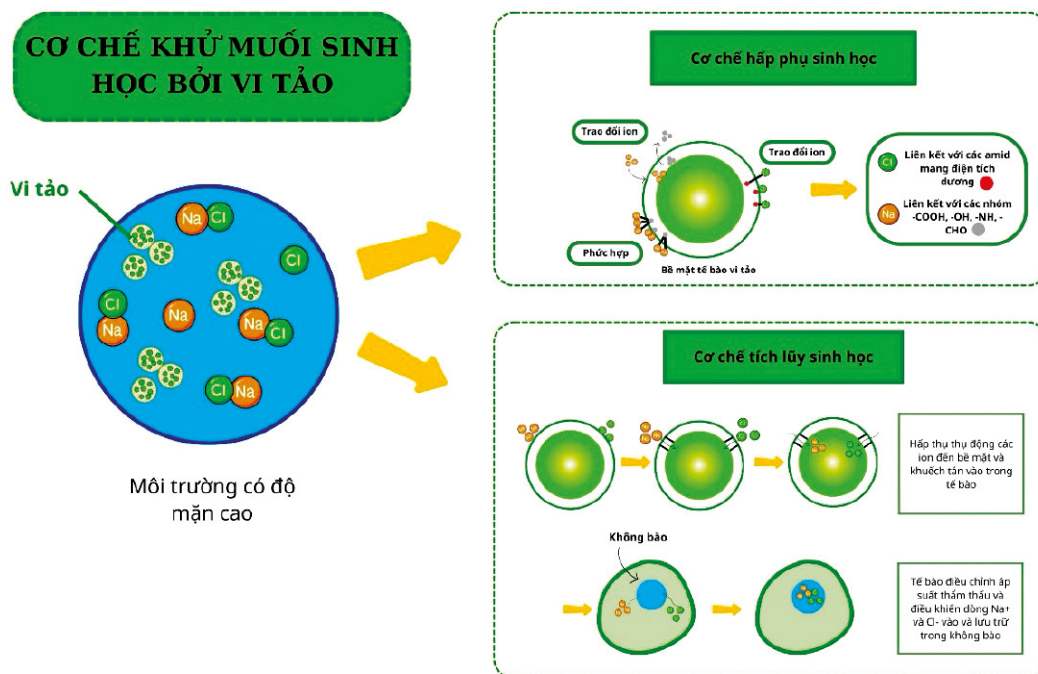
cầu có có đường kính chỉ từ 2 - 3 μm , giống tảo này có khả năng chịu mặn lên đến 80 g/L và khử mặn tốt nhất ở nồng độ 70 g/L (Elbarmelgy & ctv., 2021; Kannah & ctv., 2021).

Quá trình khử mặn hiệu quả cần lựa chọn giống tảo phù hợp, quá trình hấp thu muối được tối ưu hoá và cần có phương pháp tách tảo ra khỏi nước được xử lý. Tùy thuộc vào độ mặn ban đầu của nguồn nước và khả năng chịu mặn của tảo mà mục tiêu của quá trình sẽ là khử mặn hoặc xử lý nước trước khi qua quá trình lọc thẩm thấu để sử dụng cho quá trình tưới tiêu,

sản xuất thức ăn gia súc, thực phẩm hay nước uống (Sahle-Demessie & ctv., 2019).

3. Cơ Chế Khử Mặn Sinh Học

Cơ chế khử mặn sinh học được mô tả trong Hình 1. Quá trình khử mặn sinh học theo hai cơ chế chính như sau: (1) Cơ chế hấp phụ sinh học (bám dính vật lý) và (2) cơ chế tích lũy sinh học hoặc hấp thụ sinh học. Nghiên cứu của Gilani & ctv. (2024) đã chỉ ra rằng quá trình khử mặn của vi tảo khá tương đồng với quá trình khử kim loại nặng theo các cơ chế kể trên.



Hình 1. Cơ chế của quá trình khử mặn sinh học.

Hấp phụ sinh học

Quá trình hấp phụ sinh học của vi tảo đối với các ion muối (Na^+ , Cl^-) được thực hiện thông qua hai cơ chế chính: (1) trao đổi ion và (2) tạo phức hợp. Trong cơ chế trao đổi ion, các ion Na^+

sẽ thay thế cation khác và liên kết với các nhóm chức mang điện tích âm (như $-\text{COO}^-$) trên bề mặt tế bào, đồng thời ion Cl^- liên kết với các vị trí mang điện tích dương (như $-\text{NH}_3^+$). Trong khi đó, cơ chế phức hợp xảy ra khi các ion muối tạo

thành liên kết phối trí với các nhóm chức đặc biệt trên bề mặt tế bào. Theo Patel & ctv. (2021), các nhóm amin (bậc I, II, III) và carboxyl đóng vai trò then chốt trong việc hấp phụ chọn lọc các ion thông qua tương tác tĩnh điện. Trong khi đó, Chojnacka (2010) nhấn mạnh khả năng tạo phức đa phối tử của các nhóm chức này với ion muối. Do đó, có thể thấy rằng quá trình hấp phụ chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như đặc điểm cấu trúc tế bào của từng loài tảo, các nhóm chức bề mặt ($-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$, $-\text{CHO}$) trong thành phần pectin và protein của thành tế bào và loại liên kết hình thành (tĩnh điện hoặc cộng hóa trị).

Tích lũy sinh học (hấp thụ sinh học)

Quá trình tích lũy sinh học ở vi tảo là cơ chế chủ động sử dụng hệ thống vận chuyển màng để duy trì nồng độ Na^+ nội bào thấp, diễn ra liên tục trong vòng đời tảo (Gilani & ctv., 2024). Cơ chế này gồm hai giai đoạn: (1) hấp thụ thụ động ion muối trên bề mặt tế bào nhờ chênh lệch nồng độ, và (2) khuếch tán ion vào nội bào được cung cấp năng lượng từ quang hợp (Minas & ctv., 2015). Protein halorhodopsin đóng vai trò then chốt khi sử dụng năng lượng ánh sáng để bơm Cl^- , tạo điều kiện cho Na^+ xâm nhập qua kênh protein mà không tiêu tốn ATP. Quá trình này đạt trạng thái ổn định khi nồng độ ion được cân bằng. Ngoài ra, vi tảo chủ động điều chỉnh bằng cách giảm dự trữ ATP để hạn chế dòng Na^+ thoát ra, đồng thời sử dụng bơm Na^+/K^- để kiểm soát áp suất thẩm thấu và thể tích tế bào (Pade & Hagemann, 2014; Chen & ctv., 2019).

Trong môi trường độ mặn cao, vi tảo tăng cường tích lũy Na^+ và Cl^- chủ yếu trong không bào thông qua cơ chế điều hòa thẩm thấu (Figler & ctv., 2019). Sự chênh lệch nồng độ ion ban

đầu thúc đẩy hấp thụ thụ động, sau đó hệ thống bơm Na^+/K^- hoạt động để cân bằng nội môi. Khi áp suất thẩm thấu tăng, tế bào hình thành thêm không bào mới, nơi tập trung đến 80% ion muối, giảm tác động lên tế bào chất (Patel & ctv., 2021). Quá trình này đi kèm với sự điều chỉnh nhanh thể tích tế bào thông qua hấp thụ/giải phóng nước, đồng thời tăng tổng hợp chất tan tương thích để thiết lập cân bằng thẩm thấu mới. Nhờ đó, vi tảo duy trì được hoạt động sinh lý tối ưu ngay cả khi độ mặn môi trường biến động mạnh (Gilani & ctv., 2024).

Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình khử mặn sinh học

Các yếu tố môi trường như độ pH, nhiệt độ, thời gian tiếp xúc và các loại ion có thể ảnh hưởng đến quá trình hấp phụ sinh học. Quá trình hấp phụ sinh học tăng lên ở pH kiềm nhưng nếu pH tăng quá cao có thể gây ra hiện tượng kết tủa. Nhiệt độ cũng là một yếu tố quan trọng khi những thay đổi nhỏ về nhiệt độ có thể thay đổi nhiệt động lực học và ảnh hưởng đến quá trình hấp phụ sinh học. Trong quá trình thu nhiệt, sự hấp phụ tăng khi nhiệt độ tăng, nhưng trong quá trình tỏa nhiệt thì ngược lại. Thời gian tiếp xúc giữa các ion kim loại và tế bào tảo cũng ảnh hưởng đến quá trình hấp phụ sinh học. Ví dụ khi thời gian tiếp xúc tăng, quá trình hấp phụ sinh học tăng lên, nhưng sau một thời gian, nó trở nên không đổi vì không còn vị trí hoạt động nào để hấp phụ (Gilani & ctv., 2024). Nghiên cứu của Chojnacka (2010) đã chỉ ra rằng, hiệu quả hấp phụ sinh học không khác biệt đáng kể giữa tế bào tảo sống và chết. Việc sử dụng vi tảo có chi phí thấp là một lợi thế lớn trong ứng dụng khử mặn sinh học.

Đối với quá trình tích lũy sinh học, các yếu tố như ánh sáng, chất dinh dưỡng và mật độ tế bào có thể ảnh hưởng đến hiệu quả của quá trình. Tảo cần đạt mật độ cao trước khi sử dụng năng lượng để đẩy Na^+ ra ngoài. Cả tế bào tảo sống và khô đều tham gia vào quá trình loại bỏ muối (Patel & ctv., 2019).

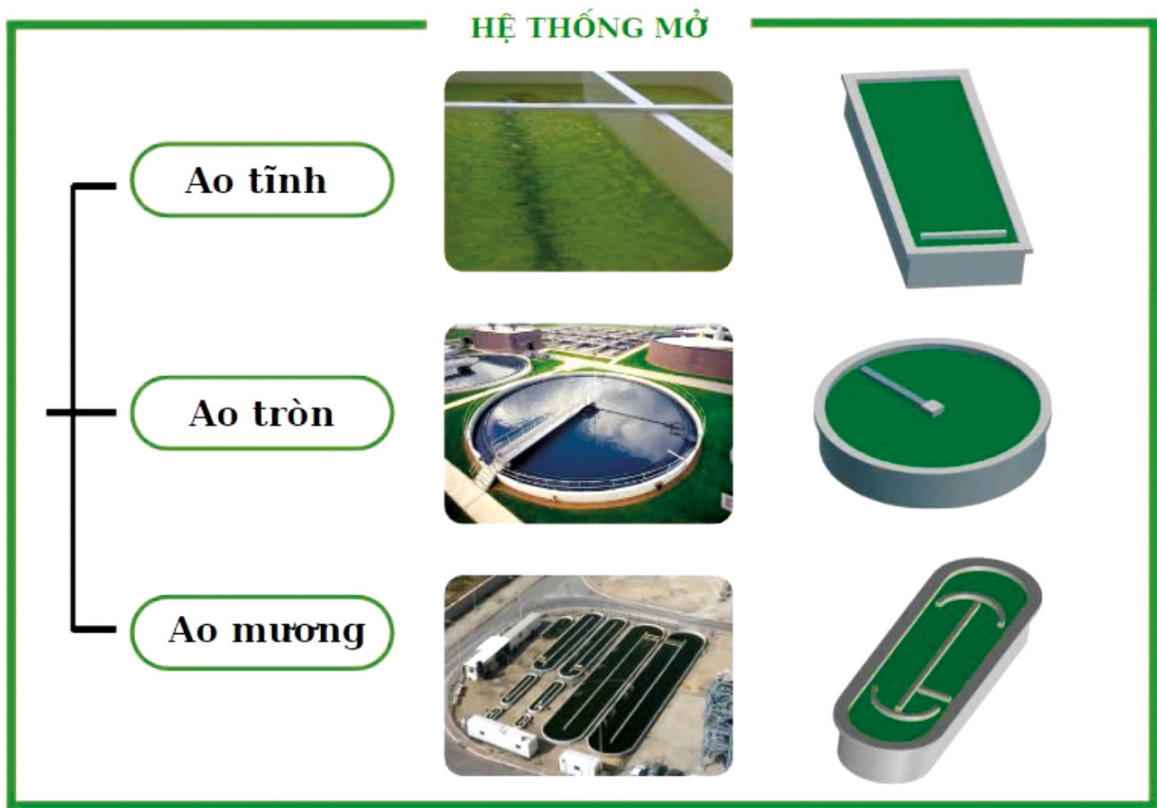
4. Ứng Dụng Vi Tảo Khử Mặn Trong Hệ Thống Nuôi Cây Mở

Để đảm bảo quá trình khử mặn đạt hiệu quả thì phải chọn lựa được giống tảo phù hợp. Theo Pan & ctv. (2024), độ mặn cao làm hạn chế khả năng quang hợp cũng như làm giảm đáng kể hàm lượng chất diệp lục tổng có trong vi tảo. Do đó, việc cần tìm hiểu khả năng thích nghi với độ mặn mỗi chủng vi tảo khác nhau là quan trọng và cần thiết (Skifa & ctv., 2025). Một số giống tảo địa phương có thể được sàng lọc và đánh giá sơ bộ khả năng khử mặn trước khi được nghiên cứu sâu và chi tiết hơn về hình thái, quy trình thu hoạch và tái sử dụng sinh khối tảo.

Môi trường nuôi tảo có độ mặn cao như nước biển có thể bổ sung các nguồn dinh dưỡng bổ sung là chất hữu cơ, nguồn carbon, vitamin và các nguyên tố vi lượng có vai trò như nhân tố sinh trưởng. Korbee & ctv. (2005) nghiên cứu tác động của ánh sáng và nhiệt độ lên quá trình phát triển của tảo nước mặn, cho thấy rằng môi trường nuôi cấy với chi phí thấp cũng có thể đạt hiệu quả cao khi sản xuất vi tảo ở quy mô thương

mại (Korbee & ctv., 2005). Nghiên cứu của Figler & ctv. (2019) cũng cho thấy ảnh hưởng của các thông số quá trình có ảnh hưởng đến khả năng quang hợp, tốc độ phát triển của tảo, khả năng chịu mặn, hiệu quả khử mặn và khả năng hấp thụ CO_2 của các giống vi tảo.

Nhiều công nghệ và thiết bị được thiết kế để nuôi cấy vi tảo, tùy vào điều kiện môi trường và vận hành mà có thể lựa chọn các công nghệ và quy trình phù hợp. Cách đơn giản nhất để nuôi cấy vi tảo là sử dụng hệ thống nuôi mở (open system), hệ thống dạng này phù hợp ở nơi có khí hậu nóng và nắng. Hệ thống nuôi cấy mở có thể là hồ tự nhiên, ao tĩnh, ao tròn hoặc ao mương (Arutselvan & ctv., 2022). Hồ tự nhiên có điều kiện nuôi cấy phụ thuộc ánh sáng và khí hậu tự nhiên. Ao tĩnh, ao tròn hay ao mương có những ưu điểm như chi phí thấp, dễ mở rộng, dễ bảo trì cũng như có thể thiết lập các cấu hình khác nhau theo kích thước, vật liệu xây dựng và hệ thống khuấy. Mata & ctv. (2020) đã sử dụng một ao mương với kích thước 2,2 (dài) $\times$ 0,9 (rộng) $\times$ 0,35 m (cao) để nuôi cấy vi tảo *Spirulina* sp. LEB 18 trong môi trường nước muối thô thu được từ quá trình khử mặn nước ngầm giếng khoan. Matos & ctv. (2021) sử dụng hệ thống bể raceway có quy mô lớn hơn (diện tích 8 m^2 , kích thước 5,0 $\times$ 1,6 $\times$ 0,5 m) với tổng thể tích 4 m^3 (4.000 lít) để nuôi *Spirulina* trong cùng loại nước muối thô. Một số hệ thống mở phổ biến được trình bày ở Hình 2.



Hình 2. Hệ thống mở nuôi vi tảo (open system).

Hệ thống nuôi cấy mở bao gồm bể nuôi hở với thiết kế đơn giản nhưng hiệu quả trao đổi khí cao và tiếp xúc trực tiếp với ánh sáng từ môi trường tự nhiên. Bên cạnh đó, hệ thống còn tích hợp các ống dẫn nước mặn vào bể nuôi hoặc thiết bị cung cấp khí để vi tảo sinh trưởng và phát triển nhanh hơn. Ngoài ra, hệ thống mở khử mặn bằng vi tảo có thể được trang bị thiết bị khuấy có vai trò phân bố vi tảo đều trong bể nuôi, đồng thời tránh hiện tượng lắng tảo làm giảm quá trình trao đổi khí. Khi kết thúc một chu kỳ nuôi vi tảo, các kỹ thuật lắng, lọc, ly tâm được sử dụng để thu hồi sinh khối vi tảo và ứng dụng trong một số lĩnh vực như dược phẩm, mỹ phẩm, nhiên liệu sinh học. Phần nước còn lại có thể được xử lý bổ sung để tái sử dụng trong nuôi

cấy vi tảo hoặc ứng dụng vào các lĩnh vực khác (Skifa & ctv., 2025).

Hệ thống nuôi cấy mở thường được ứng dụng để xử lý nước thải hoặc khử mặn (Matos & ctv., 2017) và được sử dụng phổ biến do ưu điểm chi phí thấp, việc thiết kế và xây dựng tương đối đơn giản. Nghiên cứu của Schippe & ctv. (2021) cho thấy nuôi cấy vi tảo bằng hệ thống mở như ao mương cho hiệu quả kinh tế cao hơn so với hệ thống phản ứng quang học dạng phẳng hoặc dạng ống, chi phí sản xuất sinh khối chỉ khoảng 2,9 Euro/kg. Tuy hệ thống kín cho hiệu suất quang hợp và năng suất trên một đơn vị diện tích cao hơn hệ thống mở nhưng chi phí lắp đặt và vận hành cao hơn nhiều. Tuy nhiên, vì đặc tính

hở nên hệ thống dễ bị côn trùng xâm nhập, khả năng truyền ánh sáng bị hạn chế, khó kiểm soát điều kiện vận hành và sinh khối tảo thường thấp (Rayen & ctv., 2019). Thêm vào đó, nước có thể bị bốc hơi trong quá trình vận hành và cần phải kiểm soát và duy trì mực nước ổn định trong suốt quá trình (Arutselvan & ctv., 2022). Một số nghiên cứu đã đánh giá cao hiệu quả khử mặn của vi tảo phát triển trong nước mặn ở hệ thống mở và cho thấy ảnh hưởng của các yếu tố như cường độ ánh sáng, nhiệt độ, pH, môi trường và giống tảo tới hiệu quả khử mặn (Muñoz & Guieysse, 2006; Maru & ctv., 2021).

5. Thuận Lợi và Khó Khăn

Khử mặn bằng vi tảo đang được đánh giá là một giải pháp “xanh” đầy tiềm năng nhờ khả năng khử mặn hiệu quả, góp phần thay thế cho các phương pháp khử mặn truyền thống (Gilani & ctv., 2024). Vì vi tảo có nhiều ưu điểm nổi bật như thích nghi và phát triển nhanh, chịu mặn tốt, dễ biến đổi thành phần gen (Patel & ctv., 2021; Ahmed & ctv., 2023), nên chúng có thể sinh trưởng và phát triển trong các hệ thống phản ứng quang học khác nhau ở chế độ nuôi cấy liên tục (Sahle-Demessie & ctv., 2019). Quá trình này giúp duy trì sự tăng trưởng ổn định của vi tảo và tăng hiệu quả hấp thụ muối. Bên cạnh đó, sinh khối tảo thu được sau quá trình nuôi cấy chứa các thành phần có giá trị cao như chất béo, carbohydrate, protein, chất màu tự nhiên và chất chống oxy hóa (Mata & ctv., 2020). Những thành phần này có tiềm năng ứng dụng cao để sản xuất các sản phẩm có giá trị cao như dược phẩm, mỹ phẩm, thực phẩm và thức ăn chăn nuôi. Ngoài ra, sinh khối vi tảo được xem là nguồn nguyên liệu mới và bền vững để sản xuất nguyên liệu sinh

học như biodiesel, biohydrogen và bioethanol (Matos & ctv., 2024). Hệ thống xử lý bằng vi tảo có tác động môi trường thấp vì không phụ thuộc nguyên liệu hóa thạch, hấp thụ CO₂ qua quang hợp, và có thể triển khai tại các khu vực xa xôi, khô cằn, thiếu cơ sở hạ tầng hoặc đất đai canh tác.

Tuy nhiên, công nghệ khử mặn bằng vi tảo vẫn chưa được ứng dụng rộng rãi ở quy mô lớn do thiếu các phương tiện kỹ thuật cần thiết cùng với nhiều rào cản trong việc kiểm soát độ mặn (Patel & ctv., 2021; Aly & ctv., 2024). Quá trình khử mặn bằng vi tảo không phải là lựa chọn tối ưu trên quy mô lớn vì hiệu quả khử mặn giảm dần theo thời gian (Ahmed & ctv., 2023), không đáp ứng đủ lượng nước sinh hoạt và cần phải kết hợp với các công nghệ khác để tối ưu hóa chi phí và năng lượng (Patel & ctv., 2021). Thêm vào đó, hệ thống nuôi trồng vi tảo dễ bị ô nhiễm bởi các vi sinh vật, côn trùng và tốn nhiều chi phí cho việc lựa chọn giống phù hợp và duy trì điều kiện nuôi cấy ổn định. Quá trình khử mặn bằng vi tảo mất nhiều thời gian, đặc biệt kéo dài khi cơ chế khử mặn là tích lũy sinh học, khiến hiệu quả xử lý chưa cao. Bên cạnh đó, khâu thu hoạch sinh khối tảo vẫn còn là thách thức lớn vì tế bào tảo có kích thước nhỏ, mật độ thấp và diện tích bề mặt lớn, gây khó khăn trong quá trình tách khỏi môi trường nuôi cấy (Patel & ctv., 2021; Gilani & ctv., 2024). Nhiều kỹ thuật được áp dụng như lắng, lọc, ly tâm, keo tụ, tuyển nổi hay sử dụng hóa chất, nhưng các phương pháp có ưu và nhược điểm riêng và phụ thuộc vào đặc tính của từng chủng tảo, cần phải nghiên cứu lựa chọn để sử dụng cho phù hợp (Wen & ctv., 2011; Patel & ctv., 2021). Phương pháp bổ sung chất kết bông hóa học tuy tiết kiệm chi phí nhưng làm ô nhiễm

sinh khối (Huang & ctv., 2023), trong khi đó các phương pháp sinh học an toàn và cho hiệu suất cao hơn nhưng mất nhiều thời gian hơn để tạo bông (Walczak & ctv., 2023; Huang & ctv., 2024).

6. Cơ Hội và Thách Thức

Công nghệ khử mặn bằng vi tảo không chỉ góp phần giải quyết vấn đề khan hiếm nước ngọt mà còn mở ra nhiều cơ hội phát triển trong lĩnh vực môi trường và kinh tế. Nhu cầu ngày càng cao về những giải pháp nước bền vững và các sản phẩm có giá trị từ vi tảo đang góp phần gia tăng sự quan tâm của giới nghiên cứu đối với công nghệ này (Patel & ctv., 2021; Ahmed & ctv., 2023). Việc áp dụng các hệ thống phản ứng quang sinh học tích hợp giúp duy trì sự tăng trưởng ổn định của vi tảo, từ đó tăng cường khả năng hấp thụ muối (Sahle-Demessie & ctv., 2019). Sau khi xử lý, sinh khối tảo có thể được tận dụng để sản xuất các sản phẩm giá trị cao, đồng thời thúc đẩy việc mở rộng thị trường và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như nhiên liệu sinh học, mỹ phẩm, dược phẩm và thực phẩm (Matos & ctv., 2024). Hệ thống này có thể được triển khai tại các khu vực thiếu nước hoặc không phù hợp để canh tác, đồng thời giảm phát thải CO₂ và góp phần giảm thiểu biến đổi khí hậu nhờ khả năng quang hợp. Bên cạnh đó, sự tiến bộ trong ngành công nghệ khử mặn dựa trên vi tảo còn có thể mở ra nhiều cơ hội việc làm trong các lĩnh vực như kỹ thuật, nông nghiệp, sinh học và quản lý tài nguyên nước. Theo thời gian, những tiến bộ kỹ thuật và việc mở rộng quy mô sản xuất có thể giúp giảm chi phí vận hành, từ đó nâng cao tính cạnh tranh của công nghệ này so với các phương pháp truyền thống.

Tuy nhiên, công nghệ khử mặn bằng vi tảo vẫn đối mặt với nhiều thách thức đáng kể. Đầu tiên là khả năng mở rộng quy mô bị hạn chế do yêu cầu nghiêm ngặt về điều kiện nuôi cấy tối ưu (như ánh sáng, nhiệt độ, dinh dưỡng) và quy trình thu hoạch tốn kém. Bên cạnh đó, hệ thống dễ bị nhiễm bởi vi sinh vật ngoại lai và làm giảm hiệu suất xử lý nước. Cơ chế hấp thụ muối của vi tảo diễn ra chậm, đòi hỏi thời gian dài, dẫn đến chi phí vận hành cao. Do đó, để ứng dụng hệ thống khử mặn bằng vi tảo ở quy mô nghiệp, cần đánh giá toàn diện hai yếu tố: (1) tính khả thi kỹ thuật - kinh tế của hệ thống, bao gồm tối ưu hóa năng suất và giảm thiểu năng lượng tiêu thụ; và (2) tiềm năng tận dụng sinh khối tảo sau xử lý (như sản xuất nhiên liệu sinh học, phân bón hoặc dược phẩm). Những phân tích này không chỉ góp phần phát triển kinh tế tuần hoàn mà còn nâng cao hiệu quả giải pháp bền vững cho vấn đề khan hiếm nước ngọt và ô nhiễm môi trường.

7. Kết Luận

Khử mặn vi tảo là một phương pháp sinh học đầy tiềm năng. Các giống tảo *Spirulina*, *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Dunaliella*, *Nannochloropsis* đã được chứng minh cho hiệu quả khử mặn cao thông qua các cơ chế như hấp phụ sinh học và tích lũy sinh học. Bên cạnh đó, hệ thống nuôi cấy mở có thể được áp dụng cho quá trình khử mặn bằng vi tảo có nhiều ưu điểm như chi phí thấp, dễ mở rộng, dễ bảo trì, đồng thời lượng sinh khối tảo thu được có thể được sử dụng làm nguyên liệu cho nhiều ngành công nghiệp, góp phần vào nền kinh tế tuần hoàn. Mặc dù vẫn còn những thách thức về hiệu suất và quy trình nuôi trồng, những tiến bộ trong công nghệ di truyền

và tối ưu hệ thống nuôi cấy sẽ mở ra cơ hội nâng cao năng suất khử mặn và chất lượng sinh khối. Phương pháp sử dụng vi tảo khử mặn không chỉ góp phần giải quyết vấn đề cấp bách của môi trường nước mà còn phù hợp với các mục tiêu phát triển bền vững toàn cầu.

Lời Cam Đoan

Chúng tôi cam đoan bài báo do nhóm tác giả thực hiện và không có bất kì mâu thuẫn giữa các tác giả.

Lời Cảm Ơn

Nhóm nghiên cứu trân trọng cảm ơn trường Đại Học Nông Lâm Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ kinh phí và tạo điều kiện cơ sở vật chất để chúng tôi hoàn thành nghiên cứu này với mã số đề tài CS-SV24-HHTP-01.

Tài Liệu Tham Khảo (References)

- Ahmed, M. E., Zafar, A. M., Hamouda, M. A., Aly Hassan, A., & Arimbrathodi, S. (2023). Biodesalination research trends: A bibliometric analysis and recent developments. *Sustainability* 15(1), 16. <https://doi.org/10.3390/su15010016>.
- Aly, S. M., ElBanna, N. I., & Fathi, M. (2024). *Chlorella* in aquaculture: Challenges, opportunities, and disease prevention for sustainable development. *Aquaculture International* 32, 1559-1586. <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01229-x>.
- Arutselvan, C., Seenivasan, H. Kumar, Lewis Oscar, F., Ramya, G., Thuy Lan Chi, N., Pugazhendhi, A., & Thajuddin, N. (2022). Review on wastewater treatment by microalgae in different cultivation systems and its importance in biodiesel production. *Fuel* 324, 124623. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124623>.
- Barahoei, M., Hatamipour, M. S., & Afsharzadeh, S. (2021). Direct brackish water desalination using *Chlorella vulgaris* microalgae. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.006>.
- Cao, T., Han, D., & Song, X. (2021). Past, present, and future of global seawater intrusion research: A bibliometric analysis. *Journal of Hydrology* 603, 126844. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126844>.
- Chen, T., Wang, W., Xu, K., Xu, Y., Ji, D., Chen, C., & Xie, C. (2019). K⁺ and Na⁺ transport contribute to K⁺/Na⁺ homeostasis in *Pyropia haitanensis* under hypersaline stress. *Algal Research* 40, 101526. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2019.101526>.
- Chojnacka, K. (2010). Biosorption and bioaccumulation - the prospects for practical applications. *Environment International* 36(3), 299-307. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.12.001>.
- Elbarmelgy, A., Ismail, M. M., & Sewilam, H. (2021). Biomass productivity of *Nannochloropsis* sp. grown in desalination brine culture medium. *Desalination and Water Treatment* 216, 306-314. <https://doi.org/10.5004/DWT.2021.26848>.
- El Nadi, M. H. A., El Sergany, F. A. G. H., & El Hosseiny, O. M. (2014). Desalination using algae ponds under nature Egyptian conditions. *Journal of Water Resources and Ocean Science* 3(6), 69-73. <https://doi.org/10.11648/j.wros.20140306.11>.
- Esmaceli, A., Moghadam, H. A., & Golzary, A. (2023). Application of marine microalgae in biodesalination and CO₂ biofixation: A review. *Desalination* 567, 116958. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2023.116958>.
- Farhat, N., Rabhi, M., Falleh, H., Jouini, J., Abdelly, C., & Smaoui, A. (2011). Optimization of salt concentrations for a higher carotenoid production in *Dunaliella salina* (Chlorophyceae).

- Journal of Phycology* 47(5), 1072-1077. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2011.01036.x>.
- Figler, A., B-Béres, V., Dobronoki, D., Márton, K., Nagy, S. A., & Bácsi, I. (2019). Salt tolerance and desalination abilities of nine common green microalgae isolates. *Water* 11(12), 2527. <https://doi.org/10.3390/w11122527>.
- Gao, F., Li, C., Yang, Z. H., Zeng, G. M., Feng, L. J., Liu, J. zhi, Liu, M., & Cai, H. wen. (2016). Continuous microalgae cultivation in aquaculture wastewater by a membrane photobioreactor for biomass production and nutrients removal. *Ecological Engineering* 92, 55-61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.046>.
- Gilani, I. E., Hosseini, H., Al-Ghouthi, M. A., Saadaoui, I., & Sayadi, S. (2024). Microalgal-based desalination brine remediation: Achievements, challenges, and future research trends. *Environmental Technology and Innovation* 34(2), 103592. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103592>.
- Huang, K. X., Mao, B. Di, Lu, M. M., Chen, D. Z., Qiu, J., & Gao, F. (2024). Effect of external acetate added in aquaculture wastewater on mixotrophic cultivation of microalgae, nutrient removal, and membrane contamination in a membrane photobioreactor. *Journal of Environmental Management* 349, 119391. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119391>.
- Huang, K. X., Vadiveloo, A., Zhou, J. L., Yang, L., Chen, D. Z., & Gao, F. (2023). Integrated culture and harvest systems for improved microalgal biomass production and wastewater treatment. *Bioresource Technology* 376, 128941. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128941>.
- Jiang, L., Tu, Y., Li, X., & Li, H. (2018). Application of reverse osmosis in purifying drinking water. E3S Web of Conferences (01037). *Les Ulis, France: EDP Sciences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183801037>.
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment* 657, 1343-1356. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.12.076>.
- Kannah, R. Y., Kavitha, S., Parthiba, O., Rene, E. R., Kumar, G., & Banu, J. R. (2021). A review on anaerobic digestion of energy and cost effective microalgae pretreatment for biogas production. *Bioresource Technology*, 332(February), 125055. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125055>.
- Korbee, N., Figueroa, F. L., & Aguilera, J. (2005). Effect of light quality on the accumulation of photosynthetic pigments, proteins and mycosporine-like amino acids in the red alga *Porphyra leucosticta* (Bangiales, Rhodophyta). *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 80(2), 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2005.03.002>.
- Kore, S. (2011). *A short review on process and applications of reverse osmosis*. Retrieved February 13, 2026, from <http://www.environmentaljournal.org>.
- Mata, S. N., Santos, T. de S., Cardoso, L. G., Andrade, B. B., Duarte, J. H., Costa, J. A. V., Souza, C. O. de, & Druzian, J. I. (2020). *Spirulina* sp. LEB 18 cultivation in a raceway-type bioreactor using wastewater from desalination process: Production of carbohydrate-rich biomass. *Bioresource Technology* 311(March), 123495. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123495>.
- Maru, M., Sahle-Demissie, E., & Zewge, F. (2021). Retracted: A review on biodesalination using halophytic microalgae: opportunities and challenges. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 70(8), 1210-1234. <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.068>.
- Matos, A. P., Ferreira, W. B., de Oliveira Torres, R. C., Morioka, L. R. I., Canella, M. H. M., Rotta, J., da Silva, T., Moecke, E. H. S., & Sant'Anna, E.

- S. (2015). Optimization of biomass production of *Chlorella vulgaris* grown in desalination concentrate. *Journal of Applied Phycology* 27(4), 1473-1483. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0451-y>.
- Matos, A. P., Moecke, E. H. S., & Sant'Anna, E. S. (2017). The use of desalination concentrate as a potential substrate for microalgae cultivation in Brazil. *Algal Research* 24, 505-508. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.08.003>.
- Matos, A. P., Prado Saldanha-Corrêa, F.M., Hurtado, G.R., Vadiveloo, A., Moheimani, N.R. (2024). Influence of desalination concentrate medium on microalgal metabolism, biomass production and biochemical composition. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 99(2), 321-329. <https://doi.org/10.1002/jctb.7565>.
- Minas, K., Karunakaran, E., Bond, T., Gandy, C., Honsbein, A., Madsen, M., Amezaga, J., Amtmann, A., Templeton, M. R., Biggs, C. A., & Lawton, L. (2015). Biodesalination: an emerging technology for targeted removal of Na⁺ and Cl⁻ from seawater by cyanobacteria. *Desalination and Water Treatment* 55(10), 2647-2668. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.940647>.
- Moayedi, A., Yargholi, B., Pazira, E., & Babazadeh, H. (2021). Investigation of bio-desalination potential algae and their effect on water quality. *Desalination and Water Treatment* 212, 78-86. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26638>.
- Moore, W. S., & Joye, S. B. (2021). Saltwater Intrusion and Submarine Groundwater Discharge: Acceleration of Biogeochemical Reactions in Changing Coastal Aquifers. *Frontiers in Earth Science* 9, 600710. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.600710>.
- Mueller, W., Zamrsky, D., Essink, G. O., Fleming, L. E., Deshpande, A., Makris, K. C., Wheeler, B. W., Newton, J. N., Narayan, K. M. V., Naser, A. M., & Gribble, M. O. (2024). Saltwater intrusion and human health risks for coastal populations under 2050 climate scenarios. *Scientific Reports* 14(1), 16450. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66956-4>.
- Muñoz, R., & Guieysse, B. (2006). Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Research* 40(15), 2799-2815. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.06.011>.
- Nguyen, D. H., & Nguyen, C. T. (2024). Farmers' solutions to cope with saline intrusion: A study in Kien Giang province. *Journal of Economics and Development* 26(2), 22-30. <https://doi.org/10.33301/jed.vi.1859>.
- Nguyen, H. T., Ho, G. T. K., Nguyen, H. T., Nguyen, S. M., Nguyen, S. T., Duy, D. N., Nguyen, V. B., & Bao, V. N. (2023). Water desalination of *Chlorella vulgaris*. *The Journal of Agriculture and Development* 22(4), 39-46. <https://doi.org/10.52997/jad.2023.22.4.5>.
- Pade, N., & Hagemann, M. (2014). Salt acclimation of cyanobacteria and their application in biotechnology. *Life* 5(1), 25-49. <https://doi.org/10.3390/life5010025>.
- Pan, Y., Amenorfenyo, D. K., Dong, M., Zhang, N., Huang, X., Li, C., & Li, F. (2024). Effects of salinity on the growth, physiological and biochemical components of microalga *Euchlorocystis marina*. *Frontiers in Marine Science* 11, 1402071. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1402071>.
- Patel, A. K., Joun, J. M., Hong, M. E., & Sim, S. J. (2019). Effect of light conditions on mixotrophic cultivation of green microalgae. *Bioresource Technology* 282, 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.024>.
- Patel, A. K., Tseng, Y. S., Singhanian, R. R., Chen, C. W., Chang, J. S., & Dong, C. D. (2021). Novel application of microalgae platform for biodesalination process: A review. *Bioresource Technology* 337, 125343. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125343>.

- Prusty, P., & Farooq, S. H. (2022). Potential tools for identification of saltwater intrusion into the coastal aquifers: A case study from East Coastal Regions of India. *Current Direction in Water Scarcity Research* 5, 247-269. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85378-1.00013-1>.
- Rayen, F., Taidi, B., & Pareau, D. (2019). Optimization of a raceway pond system for wastewater treatment: A review. *Critical Reviews in Biotechnology* 39(3), 422-435. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1571007>.
- Sahle-Demessie, E., Aly Hassan, A., & El Badawy, A. (2019). Bio-desalination of brackish and seawater using halophytic algae. *Desalination* 465, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.05.002>.
- Sathasivam, R., Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd-Allah, E. F. (2019). Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine. *Saudi Journal of Biological Sciences* 26(4), 709-722. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.11.003>.
- Schipper, K., Al-Jabri, H. M. S. J., Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2021). Techno-economics of algae production in the Arabian Peninsula. *Bioresource Technology* 331, 125043. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125043>.
- Skifa, I., Chauchat, N., Cocquet, P. H., & Guer, Y. Le. (2025). Microalgae cultivation in raceway ponds: Advances, challenges, and hydrodynamic considerations. *EFB Bioeconomy* 5, 100073. <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2024.100073>.
- Takagi, M., Karseno, & Yoshida, T. (2006). Effect of salt concentration on intracellular accumulation of lipids and triacylglyceride in marine microalgae *dunaliella* cells. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101(3), 223-226. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.223>.
- Tran, Q. D., Nguyen, H. T., & Likitdecharote, K. (2012). Modeling the influence of river discharge and sea level rise on salinity intrusion in the Mekong Delta. *Can Tho University Journal of Science* 2012(23b), 141-150.
- Vo, V. B., Mai, L. C., & Nguyen, T. H. N. (2021). Assessing the impact of saline intrusion on agricultural production in Binh Dai district, Ben Tre province. *Journal of Scientific Research and Economic Development* 14, 287-299.
- Walczak, J., Karolinczak, B., & Zubrowska-Sudol, M. (2023). Effect of co-digestion and hydrodynamic disintegration on the methane potential of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste with consideration of the carbon footprint. *Energy* 282, 128949. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128949>.
- Wen, Z., Liu, J., & Chen, F. (2011). Biofuel from microalgae. In Moo-Young, M. (Ed.), *Comprehensive biotechnology* (2nd ed., 121-133). Retrieved February 13, 2026, from <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00172-0>.
- Zarzo, D., Campos, E., Prats, D., Hernandez, P., & Garcia, J. A. (2014). Microalgae production for nutrient removal in desalination brines. *IDA Journal of Desalination and Water Reuse* 6(2), 61-68. <https://doi.org/10.1179/2051645214y.0000000021>.
- Znad, H., Ketife, A. M. D. Al, Judd, S., Almomani, F., & Vuthaluru, H. B. (2018). Bioremediation and nutrient removal from wastewater by *Chlorella vulgaris*. *Ecological Engineering* 110(October 2017), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.10.008>.