

Tổng quan các phương pháp và công nghệ đo độ mặn trong nước hiện nay

Lê Nguyên Ngân^{1,2}, Nguyễn Văn Hà^{1,2}, Bùi Minh Thắng^{1,2}, Trần Văn Danh^{1,2}, Ngô Hoàng Nhật Vi^{1,2},
Nguyễn Minh Nhật^{1,2}, Đặng Thị Mỹ Dung^{1,2}, Đoàn Đức Chánh Tín^{1,2}, Đặng Mậu Chiến^{1,2*}

¹Viện Công nghệ Vật liệu Tiên tiến, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, khu phố 33, phường Linh Xuân, TP Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, khu phố 33, phường Linh Xuân, TP Hồ Chí Minh, Việt Nam

Ngày nhận bài 6/10/2023; ngày chuyển phản biện 8/10/2023; ngày nhận phản biện 27/10/2023; ngày chấp nhận đăng 15/11/2023

Tóm tắt:

Xâm nhập mặn là hiện tượng nước biển xâm nhập trực tiếp vào đất liền khi xảy ra triều cường làm cho đất bị nhiễm mặn với nồng độ muối vượt mức cho phép và cạn kiệt nguồn nước ngọt. Trước tình hình xâm nhập mặn ngày càng trầm trọng hiện nay, các địa phương ven biển của nước ta đang ứng phó bằng cách kết hợp giữa hệ thống công ngăn mặn và các giải pháp cảnh báo xâm nhập mặn sớm. Để các giải pháp này đạt hiệu quả cao, phương pháp xác định độ mặn cần được lựa chọn sao cho phù hợp với từng yêu cầu cụ thể. Trong bài báo này, các phương pháp và công nghệ đo độ mặn trong nước tiêu biểu hiện nay bao gồm phương pháp tỷ trọng kế, chuẩn độ clo, nhóm các phương pháp quang học và phương pháp đo độ dẫn dung dịch được trình bày một cách hệ thống, rõ ràng từ nguyên lý, kỹ thuật đo cho đến ưu nhược điểm của từng phương pháp. Kết quả cho thấy, phương pháp xác định độ mặn dựa trên độ dẫn điện là thích hợp nhất, vì có nhiều ưu điểm như chi phí thấp, độ chính xác và tin cậy cao, tiêu hao năng lượng thấp... Phần thảo luận cuối bài báo trình bày các quan điểm, góc nhìn của nhóm tác giả về các phương pháp hiện nay cũng như hướng nghiên cứu và ứng dụng trong tương lai.

Từ khóa: chuẩn độ clo, độ dẫn điện, độ mặn, sợi quang học, xâm nhập mặn.

Chỉ số phân loại: 1.3, 1.4, 2.7

Review of current methods and technologies for measuring water salinity

Nguyen Ngan Le^{1,2}, Van Ha Nguyen^{1,2}, Minh Thang Bui^{1,2}, Van Danh Tran^{1,2}, Hoang Nhat Vi Ngo^{1,2},
Minh Nhat Nguyen^{1,2}, Thi My Dung Dang^{1,2}, Duc Chanh Tin Doan^{1,2}, Mau Chien Dang^{1,2*}

¹Advanced Materials Technology Institute, Vietnam National University Ho Chi Minh City, Quarter 33, Linh Xuan Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Vietnam National University Ho Chi Minh City, Quarter 33, Linh Xuan Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

Received 6 October 2023; revised 27 October 2023, accepted 15 November 2023

Abstract:

Saltwater intrusion is the phenomenon where seawater infiltrates inland areas during high tide, leading to soil salinisation with salt concentrations exceeding permissible levels and the depletion of freshwater resources. Given the increasing severity of saltwater intrusion today, coastal regions in our country are currently addressing this issue through a combination of saltwater prevention systems and early intrusion warning solutions. To ensure the effectiveness of these solutions, the method for determining salinity must be chosen to meet specific requirements. In this article, current exemplary methods and technologies for measuring water salinity, including hydrometer, chlorinity titration, a group of optical methods, and conductivity measurement, were systematically presented from principles and measurement techniques to the advantages and disadvantages of each method. The results show that the method of determining salinity based on electrical conductivity is the most suitable, as it offers several advantages such as low cost, high accuracy and reliability, and low energy consumption. The discussion section at the end of the article presents the authors' viewpoints and perspectives on current methods, as well as directions for future research and applications.

Keywords: chlorinity titration, conductivity, optical fibre, salinity, saltwater intrusion.

Classification numbers: 1.3, 1.4, 2.7

*Tác giả liên hệ: Email: dmchien@vnuhcm.edu.vn.

1. Đặt vấn đề

Độ mặn trong nước được ký hiệu S‰ (S viết tắt từ chữ salinity - độ mặn) là tổng khối lượng các ion hòa tan chứa trong nước và thường được biểu diễn bằng đơn vị ppt hoặc g/l [1]. Thông thường nước ngọt có độ mặn dưới 1 g/l và độ mặn nước biển có thể đạt đến 35 g/l hoặc hơn [1, 2]. Trong ngành hải dương học, người ta sử dụng độ mặn để đặc trưng cho độ khoáng của nước biển; lúc này độ mặn được hiểu là tổng khối lượng (tính bằng gram) của tất cả các chất khoáng hòa tan có trong 1 kg nước biển. Vì tổng khối lượng các ion chính (bảng 1) chiếm tới hơn 99,99% tổng khối lượng các chất khoáng hòa tan nên có thể coi độ mặn nước biển bằng với giá trị này [2]. Điều đó cũng có nghĩa là đối với nước biển, độ mặn có thể được tính toán thông qua nồng độ của một trong những ion chính.

Bảng 1. Thành phần ion chính trong nước biển.

Ion	Phần trăm trên độ mặn (%)	Nồng độ (mg/l)	Khối lượng phân tử	Nồng độ (mmol/l)
	55,04	18.980	35,453	535,36
	30,61	10.556	22,990	459,16
	7,68	2.649	96,062	27,58
	3,68	1.272	24,305	52,33
	1,16	400	40,078	9,98
	1,10	380	39,098	9,72
	0,41	140	61,016	2,29
	0,19	65	79,904	0,81
	0,08	26	58,808	0,44
	0,04	13	87,620	0,15
	< 0,003	1,0	18,998	0,05
Tổng	99,99	34.482		

Theo các nghiên cứu trên thế giới, độ mặn có thể được xác định dựa trên sự khác biệt về khối lượng riêng, nồng độ, độ dẫn điện của dung dịch, chỉ số khúc xạ hoặc tốc độ âm thanh trong chất lỏng. Có thể chia các phương pháp xác định độ mặn chủ yếu thành phương pháp đo trực tiếp (dựa trên khối lượng riêng) và nhóm các phương pháp đo gián tiếp (nồng độ, độ dẫn điện, chỉ số khúc xạ...) [3]. Từ mối quan hệ thực nghiệm giữa độ mặn và các tính chất vật lý kể trên, các nhà khoa học đã thiết lập các phương pháp và công nghệ xác định độ mặn khác nhau.

Hiện nay, tác động của biến đổi khí hậu đã gây ra tình trạng nước biển xâm nhập sâu vào các vùng đất liền, làm cho diện tích vùng canh tác bị thu hẹp [4-6]. Kết quả đánh giá cho thấy, tình hình xâm nhập mặn đang diễn ra vô cùng nghiêm trọng, có thể xâm nhập sâu vào nội đồng từ 20 đến 25 km [5]; có những địa phương như vùng sản xuất lúa ven phá Tam Giang, Huế có diện tích đất bị nhiễm mặn lên đến 11,2 ha, làm ảnh hưởng 4/8 thôn [6]; hay như huyện Trần Đề, Sóc Trăng (nay thuộc Cần Thơ) có diện tích trồng lúa bị thiệt hại hoàn toàn lên đến 44%, diện tích trồng lúa bị thiệt

hại trên 70 đến dưới 100% là 41%, như vậy 85% diện tích trồng lúa đã bị thiệt hại nặng nề [7]. Quá trình mô phỏng cũng dự báo đến năm 2050, mực nước biển dâng lên khoảng 28 cm, làm cho tình hình xâm nhập mặn ở các huyện ven biển sẽ ngày càng trở nên trầm trọng [5]. Trong thực tế, xâm nhập mặn gây ảnh hưởng rất lớn đến năng suất lúa, cây hoa màu và cây ăn quả. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi độ mặn đạt đến mức 3,2 psu (đơn vị độ mặn thực tế - practical salinity unit) thì năng suất lúa giảm 9,73%; và khi độ mặn đạt đến mức 6,4 psu thì năng suất lúa giảm hơn 1/3 sản lượng, cụ thể là giảm 36,20% năng suất [4]. Kể cả khi xét trong điều kiện nhà lưới, độ mặn nước tưới cũng làm giảm năng suất lúa; cụ thể, năng suất lúa giảm 20,0, 57,3 và 56,6% tương ứng với độ mặn nước tưới là 3, 4 và 5‰ [8]. Đối với cây hoa màu, mức chịu mặn dao động trong khoảng 1-3‰; ở trên mức 3‰, năng suất cây trồng giảm khoảng 40-50%; ở mức trên 6‰, năng suất cây trồng giảm đến 90% [4, 9-11]. Đối với nhóm cây ăn quả, mức chịu mặn cũng ở mức dưới 1‰ [4].

Như vậy có thể thấy, xâm nhập mặn đã và đang gây ra hậu quả nghiêm trọng cho nền kinh tế nông nghiệp của nước ta. Phương án khả thi nhất để đối phó với tình trạng này là xây dựng các công ngăn mặn kết hợp cùng các trạm quan trắc độ mặn. Trong bài tổng quan này, các phương pháp xác định độ mặn tiêu biểu như phương pháp tỷ trọng kế, chuẩn độ clo, đo độ dẫn dung dịch và nhóm các phương pháp quang học được trình bày một cách hệ thống, rõ ràng từ nguyên lý, kỹ thuật đo cho đến ưu nhược điểm của từng phương pháp. Ngoài các phương pháp kể trên, vẫn có một vài phương pháp xác định độ mặn khác, như là phương pháp sử dụng sóng siêu âm. Trong chất lỏng có độ mặn khác nhau, vận tốc âm thanh cũng sẽ tương ứng khác nhau. Dựa trên nguyên tắc này, độ mặn của chất lỏng có thể được xác định bằng cách đo thời gian quay lại của sóng siêu âm. Tuy nhiên, do chi phí cao và khả năng chống nhiễu kém nên phương pháp này không phù hợp với môi trường công nghiệp phức tạp [3, 12].

2. Các phương pháp đo độ mặn phổ biến

Các phương pháp được trình bày theo thứ tự từ đơn giản đến lâu đời là tỷ trọng kế, chuẩn độ clo, xác định độ dẫn điện và quang học.

2.1. Phương pháp tỷ trọng kế (Hydrometer)

Phương pháp này xác định tỷ lệ giữa khối lượng riêng của chất lỏng cần đo so với khối lượng riêng của nước. Tỷ lệ này càng lớn chứng tỏ rằng lượng khoáng chất hòa tan trong nước càng nhiều, hay nói cách khác độ mặn càng cao. Đây là phương pháp lâu đời và vẫn còn được sử dụng nhằm xác định tương đối độ mặn của nước. Ưu điểm chính là thiết bị đơn giản, dễ sử dụng. Nhược điểm chính của phương pháp này là độ chính xác không cao, vì nước ở các biển khác nhau có tỷ lệ các thành phần khoáng chất khác nhau.

2.2. Phương pháp chuẩn độ clo (Chlorinity titration)

Phương pháp này dựa trên giả định rằng, chỉ cần xác định nồng độ của một ion chính duy nhất là đủ để xác định độ mặn của nước. Sau nhiều thí nghiệm, các nhà hóa học đã chọn Cl⁻ là ion đặc trưng của độ mặn. Cụ thể hơn, xác định chỉ số độ mặn không phải chỉ cần xác định nồng độ của Cl⁻, mà chính xác là cần xác định tổng lượng halogen hòa tan trong nước (g/kg). Các nguyên tố thuộc nhóm halogen bao gồm Cl, Br, I và F khó phân biệt bằng phương pháp phân tích vì tính chất hóa học tương tự của chúng. Để có thể tiến hành phương pháp chuẩn độ này, cần sử dụng một vài dụng cụ thủy tinh đặc biệt như buret Knudsen và pipet Knudsen.

Ban đầu, buret Knudsen chứa đầy dung dịch bạc nitrat (AgNO₃); mẫu nước biển được đặt bằng pipet Knudsen vào cốc thủy tinh và một ít dung dịch kali cromat (K₂CrO₄) được thêm vào. Trong khi khuấy, dung dịch bạc nitrat chảy vào mẫu nước biển, sau đó bạc clorua (AgCl) kết tủa trong mẫu nước biển tạo thành cặn màu trắng. Khi tất cả các ion clo được chứa trong mẫu nước biển tạo kết tủa bạc clorua, bạc cromat được hình thành (màu đỏ xuất hiện trên thành). Từ lượng bạc nitrat sử dụng cho đến khi sự thay đổi màu sắc diễn ra, và từ lượng nước biển được sử dụng, hàm lượng clorua trong nước biển mẫu có thể được tính toán. Chuẩn độ clo theo Mohr dựa trên các công thức hóa học sau:



Độ mặn được tính toán từ công thức sau [13]:

$$S = 0,030 + 1,8050 \text{ Cl} \quad (3)$$

Trong công thức trên, S là độ mặn tính bằng đơn vị ‰ (tổng lượng muối tính bằng gam (g) trong 1000 g nước biển). Cl là khối lượng clo trong trên 1000 g nước biển. Độ chính xác của phương pháp này khá tốt, sai số chỉ khoảng ±0,02‰. Nhìn chung, đây là một phương pháp đơn giản, chi phí thấp, đòi hỏi ít thiết bị. Tuy nhiên, phương pháp này khá thủ công, cần có người thao tác, vì vậy không thể áp dụng vào các công việc có tính tự động hóa cao.

2.3. Phương pháp xác định độ mặn sử dụng sợi cảm biến quang học

Tỷ lệ và nồng độ của các muối vô cơ trong nước biển làm thay đổi đường đi của ánh sáng khi chiếu qua nước biển, hay nói cách khác, làm thay đổi chiết suất của nước biển. Dựa trên sự thay đổi của chiết suất, các nhà khoa học có thể xác định được độ mặn của nước biển [14-16]. Các nhà khoa học cũng chỉ ra rằng, tại một khoảng nhiệt độ nhất định, mối quan hệ giữa chiết suất và độ mặn là tuyến tính với nhau, hay nói cách khác độ mặn tăng thì chiết suất cũng tăng theo.

Công thức thực nghiệm thể hiện mối tương quan giữa chiết suất n của chất lỏng ở áp suất khí quyển với độ mặn, nhiệt độ và bước sóng như sau [15, 17]:

$$n(S, T, \lambda) = n_0 + (n_1 + n_2T + n_3T^2)S + n_4T^2 + \frac{n_5 + n_6S + n_7T}{\lambda} + \frac{n_8}{\lambda^2} + \frac{n_9}{\lambda^3} \quad (4)$$

trong đó:

S: độ mặn (ppt), với 0 < S < 35

T: nhiệt độ (°C), với 0°C < T < 30°C

λ: bước sóng (nm), với 400 nm < λ < 700 nm

Các hệ số còn lại như sau:

$$n_1 = 1,779 \times 10^{-4} \quad n_6 = 0,01155$$

$$n_2 = -1,065 \times 10^{-6} \quad n_7 = 0,00423$$

$$n_3 = 1,6 \times 10^{-8} \quad n_8 = -4382$$

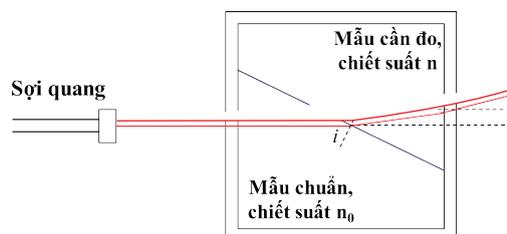
$$n_4 = -2,02 \times 10^{-6} \quad n_9 = 1.1455 \times 10^{-6}$$

Có thể thấy, độ mặn của dung dịch ảnh hưởng đến chiết suất của dung dịch. Như vậy, độ mặn của dung dịch có thể thu được gián tiếp bằng cách phát hiện chỉ số khúc xạ của dung dịch. Độ mặn của dung dịch có thể được theo dõi trực tuyến và từ xa bằng cách đo tín hiệu quang truyền đi hoặc phản xạ. Để khắc phục các vấn đề tiềm tàng tồn tại trong phép đo độ mặn, nhiều phương thức đo quang học đã được đề xuất trong những năm gần đây như:

- Phương pháp dựa trên khúc xạ quang học,
- Phương pháp dựa trên sợi quang hiệu ứng plasmon bề mặt,
- Phương pháp dựa trên cách tử sợi quang,
- Phương pháp dựa trên sợi quang giao thoa kế.

2.3.1. Phương pháp xác định độ mặn dựa trên khúc xạ quang học

Nguyên tắc của phương pháp khúc xạ quang học xác định độ mặn của nước biển là dựa trên sự dịch chuyển của vị trí chùm tia gây ra bởi sự thay đổi góc khúc xạ. H. Minato và cs (1989) [14] đã trình bày cảm biến đo độ mặn đầu tiên dựa trên phương pháp lăng kính quang học. Phương pháp này đo sự thay đổi góc khúc xạ bằng máy dò nhạy vị trí (position sensitive detector - PSD), từ đó xác định độ mặn của mẫu nước.



Hình 1. Nguyên lý của phép đo xác định độ mặn dựa trên khúc xạ quang học.

Hình 1 trình bày nguyên lý cơ bản của phương pháp này. Chùm tia từ diode laser được dẫn qua sợi quang đến ô chứa mẫu; sợi quang được sử dụng để truyền dẫn ánh sáng vì có

độ suy hao thấp, độ nhiễu thấp và có độ bền chống ăn mòn cao. Ô mẫu được chia thành hai phần vùng; một bên chứa mẫu chuẩn có chiết suất n_0 đã biết trước, bên còn lại chứa mẫu nước biển cần đo. Chùm tia laser chiếu tới gần như không đổi trên cửa sổ phía trước của ô mẫu, đi qua nước tham chiếu (chiết suất n_0), có góc tới là i trên tấm kính xiên và bị lệch khi đi vào bên chứa mẫu nước biển (chiết suất n), cửa sổ phía sau và vào không khí ở góc cuối cùng r . Độ lệch của chùm tia được chuyển đổi bởi thấu kính L_1 thành độ dịch chuyển của chùm tia ở vị trí gần p và độ dịch chuyển được phóng đại bởi thấu kính L_2 tại PSD, tạo ra tín hiệu điện tương ứng với độ dịch chuyển. Sử dụng phép tính gần đúng với góc khúc xạ nhỏ, chiết suất Δn được cho như sau:

$$\Delta n = n - n_0 = r \cdot \cot(i) + \frac{r^2}{2n} \approx k \cdot p \quad (5)$$

trong đó: k là hệ số tỷ lệ. Mọi quan hệ giữa độ dịch chuyển của chùm tia, kích thước, hình dạng và vật liệu của ô chứa mẫu như sau [14-16]:

$$P(n, a) = S \cdot \tan\left(\alpha - \sin^{-1}\left[\frac{n_0}{n} \sin \alpha\right]\right) + t \cdot \tan\left(\sin^{-1}\left[\frac{n}{n_{\text{glass}}}\right] \sin\left(\alpha - \sin^{-1}\left[\frac{n_0}{n} \sin \alpha\right]\right)\right) \quad (6)$$

trong đó: S và t là kích thước hình học đặc trưng của ô chứa mẫu. Bằng mối quan hệ trên, có thể điều chỉnh S và t để thay đổi hệ số tỷ lệ k . Bằng cách hiệu chỉnh đường cong, độ mặn được xác định dựa theo độ lệch chùm tia. Sai số của phép đo độ mặn bằng phương pháp này nằm trong khoảng 0,5% [16].

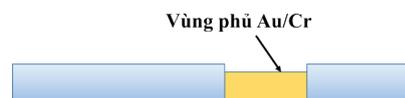
Ưu điểm của phương pháp này là phạm vi đo rộng, không sử dụng nguồn năng lượng như pin hay điện, độ chính xác cao, độ bền và thời gian sử dụng dài, cách sử dụng đơn giản. Nhược điểm của phương pháp này là sử dụng nhiều thành phần quang học có chi phí cao.

2.3.2. Phương pháp xác định độ mặn dựa trên sợi quang hiệu ứng plasmon bề mặt

Mặc dù phương pháp khúc xạ quang học kể trên có thể được ứng dụng để đo độ mặn dung dịch, nhưng hệ thống lăng kính quá phức tạp. Kích thước tổng thể của đầu dò tương đối lớn, nặng và sợi quang chỉ đóng vai trò truyền dẫn quang chứ không đóng vai trò là đầu dò cảm biến [14, 16]. Nhằm thu nhỏ kích thước linh kiện, sợi quang có thể được sử dụng, vừa làm đường truyền quang vừa đóng vai trò vùng cảm biến. Sợi quang hiệu ứng plasmon bề mặt (surface plasmon effect - SPE) đề cập đến sợi quang có bề mặt được phủ một lớp màng mỏng vàng, bạc, nhôm, titan dioxide hoặc màng kim loại khác. Độ dày màng thường nhỏ hơn 100 nm, nhằm đảm bảo hiệu ứng plasmon bề mặt xảy ra.

Plasmon có thể được hiểu như là một lượng tử của dao động plasma; chính xác hơn thì plasmon chỉ là một chuẩn hạt (hoặc giả hạt) của dao động plasma. Khi xét đến chủ thể là một lớp màng mỏng kim loại quý, plasmon chính là dao động tập thể của các điện tử tự do của lớp kim loại. Khi ánh sáng chiếu tới lớp màng mỏng kim loại quý, sẽ làm kích thích các dao động tập thể của điện tử tại bề mặt

phân cách kim loại - điện môi, hay nói cách khác, tạo thành các plasmon bề mặt tại biên phân cách kim loại - điện môi. Khi tần số sóng ánh sáng trùng với tần số dao động riêng plasmon, hiện tượng cộng hưởng plasmon bề mặt (surface plasmon resonance - SPR) xảy ra, sóng dao động cộng hưởng sẽ lan truyền trên biên phân cách kim loại - điện môi. Các công thức đặc trưng của hiện tượng này đều phụ thuộc vào chiết suất của lớp điện môi và chiết suất của lớp kim loại. Ngay từ năm 1992, dựa trên sự phụ thuộc này, S.M. Tseng và cs (1992) [18] đã sử dụng phương pháp này để đo chiết suất của dung dịch. O. Esteban (1999) [19] tiếp tục ứng dụng hiệu ứng kể trên của sợi quang học để đo độ mặn của nước. Họ đã chứng minh rằng, phương pháp đo độ mặn dựa trên sợi quang hiệu ứng plasmon bề mặt là khả thi. Các thí nghiệm của họ có tính lặp lại và độ nhạy của các phép đo đủ cao. Theo D.J. Gentleman và cs (2006) [20], phương pháp này đã đạt tới mức sai số nhỏ hơn 200 ppm (parts-per-million: phần triệu), tức là nhỏ hơn 0,2‰ [20]. Hình 2 minh họa cho cấu trúc sợi quang học, đầu dò bằng sợi silica FT400EMT, lớp phủ dài 10 mm, bao gồm một lớp màng Cr dày 2 nm được phủ bằng phương pháp lắng đọng hơi và một lớp màng vàng dày 50 nm được phủ trên màng Cr. Mục đích chính của lớp màng Cr là để tăng độ bám dính, giúp đảm bảo rằng lớp màng vàng bám được trên sợi quang học.



Hình 2. Minh họa sợi quang hiệu ứng plasmon bề mặt có lớp màng mỏng Au/Cr.

Ưu điểm của phương pháp này là việc đã tích hợp tính năng truyền dẫn ánh sáng và tính năng nhạy với chiết suất của mẫu dung dịch vào cùng một sợi quang học, từ đó xác định được độ mặn của dung dịch, đồng thời thu nhỏ kích thước thiết bị. Nhược điểm chính của phương pháp này là lớp màng phủ dễ bị hư hỏng và ăn mòn khi ngâm trong mẫu nước thời gian dài.

2.3.3. Phương pháp xác định độ mặn dựa trên cách tử sợi quang

Mặc dù cảm biến sợi quang hiệu ứng plasmon bề mặt có ưu điểm độ nhạy cao, nhưng phương pháp kể trên chỉ thích hợp để đo độ mặn của nước biển trong thời gian ngắn vì lớp kim loại rất mỏng, dễ bị ăn mòn theo thời gian. Phương pháp xác định độ mặn bằng cách tử sợi quang là một giải pháp tốt cho các vấn đề đo lường lâu dài. Cách tử sợi quang là sợi quang có phần lõi được khắc nhiều vạch nhỏ cách đều nhau (hình 3) bằng laser [21-23]. Theo sự khác biệt về chu kỳ, cách tử sợi quang có thể được phân thành hai loại: cách tử sợi quang Bragg (fiber Bragg grating - FBG) với chu kỳ cách tử nằm ở thang đo micromet và cách tử chu kỳ dài (long period grating - LPG) với chu kỳ cách tử từ khoảng vài chục micromet cho đến 1 milimet. Cảm biến dựa trên

FBG được phát triển dựa trên nguyên tắc cơ bản là độ lệch bước sóng của tín hiệu tương ứng với những thay đổi của môi trường. Độ lệch bước sóng được tính dựa theo công thức sau đây:

$$\lambda = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (7)$$

trong đó: Λ là chu kỳ cách tử và n_{eff} là chiết suất hiệu dụng của sợi quang. Ưu điểm của phương pháp này là cấu tạo đơn giản, kích thước đầu dò nhỏ, kết hợp được cả tính năng dẫn truyền ánh sáng và cảm biến vào linh kiện sợi quang.



Hình 3. Minh họa cách tử sợi quang.

2.3.4. Phương pháp xác định độ mặn dựa trên sợi quang giao thoa kế

Cảm biến sợi quang giao thoa kế có độ nhạy cao đối với chiết suất của môi trường bên ngoài. Trong trường hợp đo độ mặn của dung dịch, cảm biến sợi quang giao thoa kế có nhiều ưu điểm như chế tạo tương đối đơn giản, độ nhạy tốt hơn nhiều so với cảm biến cách tử sợi quang và cho phép đo trong thời gian dài [16]. Nguyên lý hoạt động của cảm biến sợi quang giao thoa kế là hai nguồn sáng có cùng tần số, hiệu số pha không đổi, cùng phương truyền sóng sẽ giao thoa với nhau tại khu vực không có lõi của sợi quang (hình 4). Sự thay đổi pha xảy ra trong sợi quang được phát hiện bằng giao thoa kế. Cảm biến độ mặn sợi quang giao thoa kế dựa trên giả định rằng, sự thay đổi chiết suất của dung dịch sẽ làm thay đổi độ lệch pha hiệu dụng của hai nguồn sáng, sau đó dẫn đến sự dịch chuyển của phổ giao thoa. Theo kiểu cấu trúc, sợi quang giao thoa kế dùng để đo độ mặn có thể được phân loại thành sợi quang giao thoa kế Mach-Zehnder (MZI) [24-26], sợi quang giao thoa kế Fabry-Perot (FPI) [27-29] và sợi quang giao thoa kế Sagnac [30, 31].



Hình 4. Minh họa sợi quang giao thoa kế.

Ưu điểm của phương pháp xác định này là độ nhạy cao, độ bền khá tốt. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp nằm ở kỹ thuật chế tạo khá phức tạp và tốn kém.

2.4. Phương pháp xác định độ mặn dựa trên độ dẫn điện

Phương pháp xác định độ mặn đã được nghiên cứu và phát triển vượt bậc trong thế kỷ qua. Mặc dù các phép đo ban đầu đều dựa trên lượng muối trong mẫu nước biển (như phương pháp chuẩn độ clo hay tỷ trọng kế), nhưng

với các phương pháp hiện đại ngày nay, độ mặn của nước biển thường được xác định từ độ dẫn điện của nó. Độ mặn thường được hiểu là một hàm của độ dẫn điện và nhiệt độ, nên việc tính toán ra giá trị độ mặn cũng bao gồm cả việc xác định nhiệt độ của nước. Kết quả của phương pháp này là thang đo độ mặn thực tế (practical salinity scale - PSS) đã được phát triển [32-34]. Xác định độ mặn từ phép đo độ dẫn và nhiệt độ cho độ phân giải 0,001 psu.

2.4.1. Thang đo độ mặn thực tế (PSS)

Phép chuẩn độ clo vốn tốn nhiều thời gian và đòi hỏi một mức độ kỹ năng phân tích nhất định, đã được thay thế phần lớn bằng phép đo độ dẫn điện (electrical conductivity - EC) như một phương tiện ước tính độ mặn. Việc sử dụng các phép đo độ dẫn điện để xác định độ mặn đã được đề xuất hơn 100 năm trước bởi M. Knudsen (1903) [35]. Độ mặn thực tế của một mẫu nước biển ký hiệu S, được xác định theo tỷ lệ K_{15} của độ dẫn điện của mẫu nước biển ở nhiệt độ 15°C và áp suất khí quyển tiêu chuẩn, với độ dẫn điện của KCl, trong đó tỷ lệ khối lượng của KCl là $32,4356 \cdot 10^{-3}$, ở cùng nhiệt độ và áp suất. Theo định nghĩa, giá trị K_{15} chính xác bằng 1 tương ứng với độ mặn thực tế chính xác bằng 35 ppt. Độ mặn thực tế được xác định theo tỷ lệ K_{15} theo phương trình dưới đây:

$$S = a_0 + a_1 K_{15}^{1/2} + a_2 K_{15} + a_3 K_{15}^{3/2} + a_4 K_{15}^2 + a_5 K_{15}^{5/2} \quad (8)$$

Được xây dựng và thông qua bởi Hội đồng chung của nhiều tổ chức UNESCO/ICES/SCOR/IAPSO về các tiêu chuẩn Hải dương học, Sidney, BC, Canada, từ ngày 1 đến ngày 5/9/1980. PSS-78 dựa trên một phương trình liên quan đến độ mặn với tỷ lệ độ dẫn điện của nước biển ở 15°C so với dung dịch KCl tiêu chuẩn. Các kết quả thử nghiệm đã chỉ ra rằng, thang đo độ mặn được xác định bằng độ dẫn điện có độ chính xác cao hơn so với thang đo “độ clo”. Thang đo độ mặn thực tế 1978 (PSS-78) đã phá vỡ mối quan hệ độ mặn - độ clo hiện có, để xác định mối quan hệ tỷ lệ độ mặn - độ dẫn điện. Nhìn chung, gần như tất cả các vùng nước có cùng tỷ lệ dẫn điện thì có cùng độ mặn. Theo định nghĩa, nước biển tiêu chuẩn 35 ppt có tỷ lệ dẫn điện bằng 1 ở 15°C với dung dịch KCl chứa khối lượng 32,4356 g KCl trong 1 kg dung dịch. Từ các phép đo, mối quan hệ sau đây đã được thiết lập cho các hệ số đúng với giá trị $2 \text{ ppt} < S < 40 \text{ ppt}$:

$$S = a_0 + a_1 R_T^{1/2} + a_2 R_T + a_3 R_T^{3/2} + 4R_T^2 + a_5 R_T^{5/2} + \Delta S \quad (9)$$

Với ΔS được tính bởi:

$$\Delta S = \frac{T-15}{1+k(T-15)} (b_0 + b_2 R_T^{1/2} + b_2 R_T + b_3 R_T^{3/2} + b_4 R_T^2 + b_5 R_T^{5/2}) \quad (10)$$

trong đó: S: độ mặn thực tế, ppt; T: nhiệt độ, °C

$a_0 = 0,008$	$b_0 = 0,0005$
$a_1 = -0,1692$	$b_1 = -0,0056$
$a_2 = 25,3851$	$b_2 = -0,006$
$a_3 = 14,0941$	$b_3 = -0,0375$

$$\begin{aligned} a_4 &= -7,0261 & b_4 &= 0,0636 \\ a_5 &= 2,7081 & b_5 &= -0,0144 \\ k &= 0,0162 \end{aligned}$$

R_T là một hàm của nhiệt độ ($-2^\circ\text{C} < T < 35^\circ\text{C}$) và độ mặn, được tính bởi:

$$R_T = \frac{R}{R_p \cdot r_T} \quad (11)$$

Với $R=C(S,T,p)/C(35,15,0)$ là đại lượng thể hiện độ dẫn điện của mẫu nước có độ mặn S tại nhiệt độ T và áp suất p , và $C(35,15,0)=4,2914 \text{ S.m}^{-1}$ thể hiện độ dẫn điện của nước biển tiêu chuẩn có độ mặn thực tế là 35 ppt, ở 15°C và áp suất khí quyển. $R_p=C(S,T,p)/C(S,T,0)$ hiệu chỉnh áp suất bằng độ dẫn điện và phương trình thực nghiệm của nó có thể viết lại như sau:

$$R_p = 1 + \frac{2.070 \times 10^{-5} p - 6.370 \times 10^{-10} p^2 + 3.989 \times 10^{-15} p^3}{1 + 3.426 \times 10^{-2} T + 4.464 \times 10^{-4} T^2 + 4.215 \times 10^{-1} R - 3.107 \times 10^{-3} T R} \quad (12)$$

$r_T=C(35,T,0)/C(35,15,0)$ là hiệu chỉnh nhiệt độ theo độ dẫn điện và phương trình thực nghiệm có thể viết lại như sau:

$$r_T = 6.766097 \times 10^{-1} + 2.00564 \times 10^{-2} T + 1.104259 \times 10^{-4} T^2 + 9689 \times 10^{-7} T^3 - 1.0031 \times 10^{-9} T^4 \quad (13)$$

Thang đo độ mặn thực tế có thể được mở rộng đến các dung dịch có độ mặn thấp hơn 2, bằng cách sử dụng phương trình được tính toán cho dãy độ mặn từ 0 đến 40 (ppt) sau đây:

$$S = S_{PSS} - \frac{a_0}{1+1,5X+X^2} - \frac{b_0 f(t)}{1+Y^{1/2}+Y^{3/2}} \quad (14)$$

Với $f(t)$ được tính:

$$f(t) = \frac{t-15}{[1+0.0162(1-15)]} \quad (15)$$

Trong đó: S_{PSS} là giá trị được xác định từ thang đo độ mặn thực tế được đưa ra trước đó;

$$a_0 = 0,008 \quad b_0 = 0,0005$$

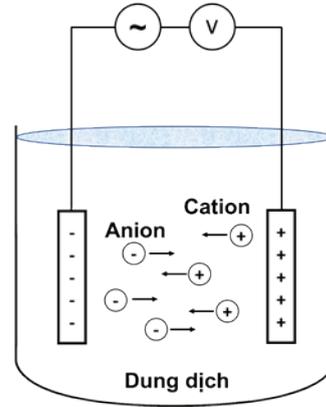
$$X = 400R_t \quad Y = 100R_t$$

Đây là phương pháp đơn giản, thời gian đáp ứng nhanh, chi phí thấp. Chính vì vậy phương pháp này vẫn còn được áp dụng cho đến ngày nay [34].

2.4.2. Phép đo độ dẫn điện

Độ dẫn điện là thước đo khả năng mang dòng điện của dung dịch nước. Trong các dung dịch, dòng điện được tạo bởi sự di chuyển của các cation và anion, dung dịch dẫn điện phụ thuộc vào một số yếu tố: nồng độ, độ linh động của các ion, trạng thái hóa trị của các chất bị ion hóa trong dung dịch và nhiệt độ thực hiện phép đo. Độ dẫn điện có thể được đo bằng cách đặt một dòng điện xoay chiều vào hai điện cực trợ về mặt hóa học (Pt, Au, ...) được ngâm trong dung dịch (hầu hết các dung dịch dẫn điện được đo là nước, vì nước có

khả năng ổn định các ion được hình thành bởi một quá trình gọi là solvat hóa) và đo điện áp thu được (hình 5). Trong quá trình này, các cation di chuyển đến điện cực âm, các anion di chuyển đến điện cực dương và dung dịch hoạt động như một chất dẫn điện.



Hình 5. Sự di chuyển của các ion trong dung dịch.

Độ dẫn điện thường được biểu thị bằng micromho trên centimet ($\mu\text{mho/cm}$) hay microSiemens trên centimet ($\mu\text{S/cm}$) trong hệ đơn vị quốc tế (SI). Một số giá trị độ dẫn điện của các dung dịch thường gặp được trình bày trong bảng 2. Cảm biến đo độ dẫn điện thường được phân thành hai loại: không tiếp xúc và tiếp xúc.

Bảng 2. Giá trị độ dẫn điện (ở 25°C) của một số dung dịch.

Nước tinh khiết	0,055 $\mu\text{S.cm}^{-1}$
Nước khử ion	1 $\mu\text{S.cm}^{-1}$
Nước mưa	50 $\mu\text{S.cm}^{-1}$
Nước thải công nghiệp	5 mS.cm^{-1}
Nước biển	50 mS.cm^{-1}

2.4.3. Cảm biến độ dẫn điện không tiếp xúc

Cảm biến độ dẫn điện không tiếp xúc (hay còn gọi là cảm biến điện cảm) là thiết bị được thiết kế để tránh tiếp xúc giữa các điện cực và dung dịch điện phân. Nguyên tắc hoạt động cho hầu hết các cảm biến độ dẫn điện không tiếp xúc là dựa vào dòng điện cảm ứng. Hai loại cảm biến độ dẫn điện không tiếp xúc thường được sử dụng là cảm biến độ dẫn điện biến áp đơn và biến áp kép. Cấu tạo chung của các biến áp kể trên bao gồm cuộn sơ cấp và cuộn thứ cấp. Ban đầu, dòng điện xoay chiều có tần số và biên độ đã biết được dùng cấp vào cuộn sơ cấp, tạo ra từ trường biến thiên sơ cấp. Khi cuộn dây được đưa lại gần vật thể dẫn điện, trong trường hợp này là nước biển, điện trường tạo ra dòng điện xoáy (dòng Foucault). Mật độ của các dòng điện xoáy này tỷ lệ thuận với khả năng dẫn điện của môi trường. Biểu thức chi phối mối quan hệ này được cho bởi phương trình sau:

$$E = - \frac{\Delta \phi_B}{\Delta t} \quad (16)$$

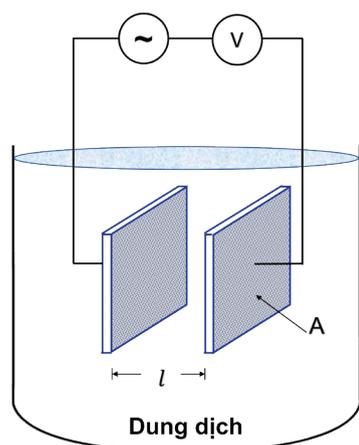
trong đó: E là suất điện động cảm ứng, $\text{Wb}\cdot\text{s}^{-1}$; $\Delta\phi_B$: độ biến thiên từ thông, Wb ; Δt : biến thiên thời gian, s .

Ưu điểm đầu tiên của loại cảm biến đo độ dẫn điện không tiếp xúc là các cuộn dây không cần tiếp xúc với mẫu. Do đó, các cuộn dây có thể được bọc trong nhựa, cho phép sử dụng cảm biến trong các dung dịch có tính ăn mòn. Thứ hai, vì các cảm biến không tiếp xúc với dung dịch, nên hoàn toàn có thể được sử dụng cho các dung dịch chứa hàm lượng chất rắn lơ lửng cao mà không cần bận tâm về vấn đề tắc nghẽn dung dịch. Miễn là sự tắc nghẽn không làm thay đổi đáng kể diện tích của lỗ hình xuyên, kết quả thu được vẫn sẽ chính xác. Ngược lại, ngay cả một lớp cặn nhẹ trên loại cảm biến độ dẫn điện tiếp xúc cũng sẽ gây ra kết quả sai khác. Cuối cùng, cảm biến điện cảm rất lý tưởng để đo các dung dịch có độ dẫn điện cao, vì các dung dịch có độ dẫn điện cao tạo ra dòng điện cảm ứng lớn, dễ đo trong cuộn dây nhận. Nhược điểm chủ yếu là cảm biến điện cảm chỉ thích hợp với các mẫu có độ dẫn điện lớn hơn $15 \mu\text{S}/\text{cm}$, và không thể được sử dụng để đo các dung dịch có độ dẫn điện quá thấp.

2.4.4. Cảm biến độ dẫn điện tiếp xúc

Như tên gọi, trong các loại cảm biến này có sự tiếp xúc trực tiếp giữa các đầu dò đo lường (thường là các điện cực trơ về mặt hóa học) và môi trường xung quanh. Hiện nay, loại cảm biến này được sử dụng rộng rãi để đo độ dẫn điện và thường sử dụng hai, ba, bốn, hoặc nhiều điện cực [36, 37]. Trong đó, 2 loại cảm biến độ dẫn điện tiếp xúc phổ biến là cảm biến độ dẫn điện 2 điện cực và 4 điện cực.

- Cảm biến độ dẫn điện hệ 2 điện cực:

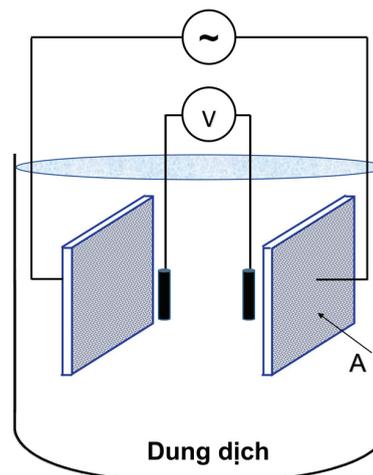


Hình 6. Sơ đồ đơn giản của hệ 2 điện cực (đối xứng) đo độ dẫn điện.

Sơ đồ của một cảm biến dẫn điện 2 điện cực được thể hiện trong hình 6, bao gồm hai điện cực dẫn điện (trong một số trường hợp là bạch kim hoặc than chì), đặt cách nhau một khoảng l cố định. Hai điện cực được sử dụng vừa để áp điện thế xoay chiều, vừa để đo dòng điện chạy qua các điện cực.

Ưu điểm của các hệ 2 điện cực là sự đơn giản của thiết kế. Tuy nhiên, chúng có một vài nhược điểm có thể gây ra sai số đáng kể trong phép đo. Thứ nhất, do đầu dò tiếp xúc với dung dịch nên các tác động ăn mòn và bám bẩn là một vấn đề. Thứ hai, hiệu ứng phân cực xảy ra ở bề mặt ranh giới điện cực - dung dịch khi dòng điện đặt vào do sự hình thành lớp điện tích kép ảnh hưởng đến tính linh động của các ion. Lớp này tương tự như lớp nhiễm bẩn bề mặt điện cực, làm cản trở dòng điện tương tự như một lớp điện trở. Vấn đề phân cực có thể được giảm thiểu bằng cách sử dụng hệ 4 điện cực.

- Cảm biến độ dẫn điện hệ 4 điện cực:



Hình 7. Sơ đồ đơn giản của hệ 4 điện cực đo độ dẫn điện.

Đối với hệ 4 điện cực, như trong hình 7, một dòng điện xoay chiều được đưa vào từ 2 điện cực ngoài cùng, đồng thời điện áp được đo giữa 2 điện cực bên trong, đóng vai trò như một hệ đo thể mạch hở. Do mạch đo điện áp có trở kháng đầu vào rất cao, nên thực tế không có dòng điện nào chạy qua 2 điện cực bên trong, giúp hạn chế ảnh hưởng của sự phân cực tại tiếp xúc điện cực - dung dịch trong quá trình đo trở kháng [37]. Trong thực tế, hiệu điện thế U ở hai điện cực bên trong được đo với cường độ dòng điện không đáng kể. Do đó, tỷ lệ U/I chính xác bằng điện trở thực của dung dịch. Điều này làm cho hệ đo 4 điện cực có độ tuyến tính tốt trong dải đo rộng, độ chính xác và độ nhạy cao hơn...

- Những nghiên cứu gần đây về cảm biến đo độ mặn thông qua đo độ dẫn điện:

Nhìn chung, cảm biến độ dẫn điện 2 điện cực và 4 điện cực là những loại cảm biến hiện đại và được nghiên cứu ứng dụng nhiều nhất hiện nay. Một vài nghiên cứu điển hình có thể kể đến như nghiên cứu của A. Hyldgård và cs (2005) [38] đã thành công thiết kế chế tạo hệ đa cảm biến bằng điện cực silic, với hệ đo độ dẫn bao gồm 4 điện cực. Hệ đa cảm biến này được ứng dụng trong các nghiên cứu thủy sản. Hệ cảm biến bao gồm: một cảm biến áp suất cầu Wheatstone, một trở nhiệt pha tạp silic, một diode quang tiếp giáp p-n

và một dãy hệ 4 điện cực. Các điện cực được phủ bằng lớp mỏng kim loại vàng và platin trên nền silic. Theo như công bố kê trên, hệ cảm biến được gắn trên lưng của một con cá để quan sát các thông số: độ dẫn, nhiệt độ, áp suất và cường độ sáng; từ đó suy ra giá trị độ mặn. Tác giả xác định được mối quan hệ tuyến tính trong dãy độ mặn từ 2-32 psu. C. Huck và cs (2014) [39] phát triển một loại cảm biến độ dẫn với lớp bảo vệ điện cực làm bằng hợp chất $Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO_3$ (BST) dày 120 nm trên nền SiO_2 . Điện cực có thể đo độ dẫn 0,3-50 mS/cm. Nhờ lớp BST, đầu dò độ dẫn có khả năng giảm thiểu các ảnh hưởng từ các quá trình như: sự oxy hóa, nhiễm bẩn của điện cực; từ đó giúp cải thiện đáng kể tuổi thọ của cảm biến.

A. Kaidarova và cs (2018) [40] trình bày một cảm biến độ mặn được chế tạo dựa trên quy trình chiếu xạ laser một bước, trên chất nền polyimide linh hoạt [40]. Các cảm biến thu được có những ưu điểm như trọng lượng nhẹ, linh hoạt, tiêu thụ điện năng ít và chi phí chế tạo thấp. Một hệ hai điện cực được sử dụng để đo trở kháng và đo độ dẫn điện của nước trong dải tần số MHz. Cảm biến có sai số chỉ khoảng $\pm 0,5$ psu và không bị ảnh hưởng bởi sự biến dạng. Việc triển khai các cảm biến ở Biển Đỏ cho thấy, các vật liệu này có khả năng chống ăn mòn và có thể chịu được môi trường khắc nghiệt. Năm 2019, nhóm nghiên cứu kể trên tiếp tục chế tạo thành công cảm biến độ dẫn điện 4 điện cực dựa trên graphene trên đế polyimide [41]. Cảm biến độ dẫn điện bốn điện cực có ưu điểm độ nhạy cao và cho phép hoạt động ở các cấu hình khác nhau.

Năm 2020, kim cương pha tạp boron (BDD) lần đầu tiên được coi là một giải pháp thay thế tốt cho bạch kim đen thương mại trong đầu dò độ mặn nước biển, do độ ổn định vượt trội của loại vật liệu này [42]. Trái ngược hoàn toàn với điện cực đen bạch kim thương mại, các điện cực thu được thể hiện độ ổn định vượt trội nhờ lượng nhóm chức oxy carbon trên bề mặt. Trong vòng 4 tuần đo đạc, nhóm tác giả nhận thấy rằng, độ ổn định của điện cực vượt trội so với điện cực bạch kim đen thương mại. Điện cực được nghiên cứu với khoảng đo 2,5-40‰, sai số là 0,1‰. Z. Liao và cs (2022) [43] đề xuất thiết kế cảm biến độ dẫn đọc trực tiếp với cấu trúc bốn điện cực đối xứng song song, tích hợp một điện cực dải màng mỏng bạch kim trên nền silicon và điện cực bù nhiệt độ serpentine. Chip cảm biến độ dẫn điện được chế tạo bằng công nghệ MEMS. Cảm biến được thiết kế có độ chính xác cao, phạm vi hoạt động cao, kích thước nhỏ, đồng thời cho phép đọc giá trị độ dẫn điện và bù nhiệt độ theo thời gian thực, điều này có ý nghĩa rất lớn đối với việc quan sát tại chỗ các thông số vật lý của môi trường biển.

3. Ứng dụng của cảm biến đo độ mặn

Cảm biến đo độ mặn được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Bảng 3 liệt kê một vài lĩnh vực/ứng dụng đặc trưng của cảm biến đo độ mặn.

Bảng 3. Ứng dụng thực tiễn của cảm biến đo độ mặn.

Lĩnh vực ứng dụng	Đối tượng ứng dụng	Ứng dụng	Phương pháp đo độ mặn phổ biến	Trích dẫn
Chất lượng nước và môi trường	Nước biển (có độ mặn ≥ 20 ppt)	Đo độ mặn nước biển	Phương pháp tỷ trọng kế, chuẩn độ clo, đo độ dẫn dung dịch và phương pháp quang học	[44]
	Nước trong nông nghiệp	Kiểm soát độ mặn đất nông nghiệp, thủy canh (hàm lượng muối, mật độ ion, độ ẩm...)	Phương pháp tỷ trọng kế, phương pháp quang học, đo độ dẫn dung dịch	[45, 46]
	Nước trong công nghiệp	Phát hiện thành phần nước và độ mặn của nước trong dòng nước/dầu/đường ống dẫn khí	Phương pháp tỷ trọng kế, chuẩn độ clo, đo độ dẫn dung dịch	[47]
	Chăm sóc sức khỏe	Phân tích máu và nước tiểu, đo lượng tưới máu mô cũng như trong lĩnh vực cảm biến hóa học và sinh học để phát hiện nhiều loại sinh hóa (axit amin, protein, peptide, DNA)	Phương pháp đo độ dẫn dung dịch	[48, 49]
Tích hợp trong các hệ đa cảm biến	Chất lượng nước	Tích hợp cảm biến đo độ mặn trên điện thoại di động	Phương pháp tỷ trọng kế, chuẩn độ clo, đo độ dẫn dung dịch và phương pháp quang học	[50, 51]
	Gắn lên sinh vật	Thiết bị theo dõi động vật biển		[38]
		Cảm biến tích hợp đo độ pH, ORP, độ dẫn điện dung dịch	Phương pháp đo độ dẫn dung dịch	[52]
		Cảm biến tích hợp đo độ dẫn nhiệt độ và áp suất		[53-56]
	Tổng chất rắn hòa tan (TDS)	Phép đo TDS trong ngành công nghiệp giấy dùng đo tổng chất rắn hòa tan hữu cơ và vô cơ trong nước	Phương pháp đo độ dẫn dung dịch	[57-59]
Hải dương học	Nghiên cứu các đặc tính của đại dương cũng như tác động của biến đổi khí hậu	Phương pháp tỷ trọng kế, chuẩn độ clo, đo độ dẫn dung dịch và phương pháp quang học	[60]	

4. Kết luận

Trong bài tổng quan này, nhóm nghiên cứu đã hệ thống lại các phương pháp đo độ mặn hiện nay, từ các phương pháp truyền thống như tỷ trọng kế hay chuẩn độ clo, cho đến các phương pháp quang học hay phương pháp đo độ dẫn điện. Nhìn chung, các phương pháp truyền thống vẫn rất đáng tin cậy, tuy nhiên không còn thích hợp cho các ứng dụng yêu cầu tính tự động hóa như kiểm soát theo thời gian thực hoặc cảnh báo. Theo bước tiến của khoa học công nghệ, các phương pháp hiện đại như quang học và độ dẫn điện đã ra đời. Phương pháp xác định độ mặn dựa trên độ dẫn điện hiện vẫn là nhóm phương pháp được nghiên cứu và ứng dụng nhiều nhất.

Cảm biến đo độ mặn được ứng dụng trong rất nhiều lĩnh vực, từ kiểm soát chất lượng nước cho đến đánh giá môi trường, sức khỏe, ảnh hưởng của biến đổi khí hậu... Đặc biệt, trong tình trạng xâm nhập mặn diễn ra nghiêm trọng ở nước ta như hiện nay, phương án cảnh báo sớm bằng cách sử dụng các hệ cảm biến độ mặn vẫn là phương án tiết kiệm và khả thi nhất hiện nay. Dưới góc nhìn của nhóm tác giả, phương pháp xác định độ mặn dựa trên độ dẫn điện là thích hợp nhất, vì có nhiều ưu điểm như giá thành thấp, độ chính xác và tin cậy cao. Ngoài ra, phương pháp này còn tiêu hao năng lượng thấp, đặc biệt thích hợp với mục tiêu xác định và cảnh báo độ mặn trong thời gian thực.

LỜI CẢM ƠN

Sở Khoa học và Công nghệ Bến Tre (nay thuộc Cần Thơ) đã tài trợ cho nghiên cứu này, theo Hợp đồng số 1642/HĐ-SKHCN. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S.A. Smith (2014), "Welfare of laboratory fishes", *American College of Laboratory Animal Medicine*, pp.301-311, DOI: 10.1016/B978-0-12-385103-1.00017-8.
- [2] S. Jeong, G. Naidu, T. Leiknes, et al. (2017), "Membrane biofouling: Seawater reverse osmosis biofouling assessment and reduction strategies in seawater reverse osmosis 2017", pp.48-71, DOI: 10.1016/B978-0-12-409547-2.12261-9.
- [3] B. You, Y. Yue, M. Sun, et al. (2021), "Design of a real-time salinity detection system for water injection wells based on fuzzy control", *Sensors*, **21**(9), DOI: 10.3390/s21093086.
- [4] N.V. Dao, V.T. Tu, T.H. Thai, et al. (2021), "Risk assessment due to salinity intrusion in coastal plains of Nam Dinh and Thai Binh", *Journal of Hydrometeorology*, **732**, pp.65-78, DOI: 10.36335/VNJHM.2021(732).65-78 (in Vietnamese).
- [5] D.D. Thang, T.H. Thai, V.V. Hoa (2019), "Assessing and projecting the situation of saline intrusion for coastal areas in Thai Binh province", *Journal of Hydrometeorology*, **3**, pp.9-16 (in Vietnamese).
- [6] N.P. Khoa, N.T. Dien, N.H. Ngu (2021), "Current situation of saline intrusion in paddy soil along Tam Giang lagoon, Thua Thien Hue province: Case study at Phu Xuan commune, Phu Vang district", *Journal of Soil Science*, **65**, pp.45-50 (in Vietnamese).
- [7] N.V. Be, T.T.L. Hang, T.V. Trien, et al. (2017), "Impacts of saline intrusion on agriculture and aquaculture in the Tran De district, Soc Trang province", *CTU Journal of Science*, **50a**, pp.94-100, DOI: 10.22144/ctu.jvn.2017.071 (in Vietnamese).
- [8] N.Q. Khuong, C.N.N. Khanh, N.N. Hung (2018), "Effects of different salinity levels of irrigated water on growth, yield and proline production of rice varieties (*Oryza sativa* L.) grown on salt-affected soil in greenhouse", *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*, **16**(7), pp.671-681 (in Vietnamese).
- [9] L.N. Phuong, D.H. Son, N.M. Dong (2018), "Evaluation of salinity tolerance potential of soybean (*Glycine max* L.) and sesbania (*Sesbania rostrata*)", *Journal of Vietnam Agricultural Science and Technology*, **03**(88), pp.68-72 (in Vietnamese).
- [10] V.N. Thang, L.T.T. Cham, N.N. Quat, et al. (2017), "Effect of salinity on germination, growth and yield of two groundnut varieties (L14 and L27)", *CTU Journal of Science*, **53**, pp.123-133, DOI: 10.22144/ctu.jvn.2017.165 (in Vietnamese).
- [11] H.D. An, C.T. Quyen, N.N. Khanh, et al. (2022), "Evaluation on salinity tolerance ability of peanut cultivars LDH09 and VD2 in Vietnam", *Science and Technology Journal of Agriculture & Rural Development*, **3-4**, pp.29-34 (in Vietnamese).
- [12] H.T. Nguyen, K. Kawanisi, M.B.A. Sawaf (2021), "Acoustic monitoring of tidal flow and salinity in a tidal channel", *Journal of Marine Science and Engineering*, **9**(11), DOI: 10.3390/jmse9111180.
- [13] F.J. Millero, R. Feistel, D.G. Wright, et al. (2008), "The composition of standard seawater and the definition of the reference-composition salinity scale", *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **55**(1), pp.50-72, DOI: 10.1016/j.dsr.2007.10.001.
- [14] H. Minato, Y. Kakui, A. Nishimoto, et al. (1989), "Remote refractive index difference meter for salinity sensor", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **38**(2), pp.608-612, DOI: 10.1109/19.192359.
- [15] X. Quan, E.S. Fry (1995), "Empirical equation for the index of refraction of seawater", *Applied Optics*, **34**(18), pp.3477-3480, DOI: 10.1364/AO.34.003477.
- [16] Y. Qian, Y. Zhao, Q. Wu, et al. (2018), "Review of salinity measurement technology based on optical fiber sensor", *Sensors and Actuators B: Chemical*, **260**, pp.86-105, DOI: 10.1016/j.snb.2017.12.077.
- [17] L. Gu, X. He, M. Zhang, et al. (2022), "Advances in the technologies for marine salinity measurement", *Journal of Marine Science and Engineering*, **10**, DOI: 10.3390/jmse10122024.
- [18] S.M. Tseng, C.L. Chen (1992), "Side-polished fibers", *Applied Optics*, **31**(18), pp.3438-3447, DOI: 10.1364/AO.31.003438.
- [19] O. Esteban, M.C. Navarrete, A.G. Cano, et al. (1999), "Measurement of the degree of salinity of water with a fiber-optic sensor", *Applied Optics*, **38**, pp.5267-5271, DOI: 10.1364/AO.38.005267.
- [20] D.J. Gentleman, K.S. Booksh (2006), "Determining salinity using a multimode fiber optic surface plasmon resonance dip-probe", *Talanta*, **68**(3), pp.504-515, DOI: 10.1016/j.talanta.2004.09.029.
- [21] J. Cong, X. Zhang, K. Chen, et al. (2002), "Fiber optic Bragg grating sensor based on hydrogels for measuring salinity", *Sensors and Actuators B: Chemical*, **87**(3), pp.487-490, DOI: 10.1016/S0925-4005(02)00289-7.
- [22] L. Bachar, R. Klein, M. Tur, et al. (2022), "Fault diagnosis of gear transmissions via optic fiber Bragg grating strain sensors", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **169**, DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.108629.
- [23] A.L. Voloshina, A.A. Dmitriev, S.V. Varzhel, et al. (2023), "Development and investigation of the sensitive element of the amplitude fiber-optic temperature sensor based on superimposed chirped Bragg gratings", *Optical Fiber Technology*, **75**, DOI: 10.1016/j.yofte.2022.103175.
- [24] U. Kumari, D. Samiappan, T.R. Rao, et al. (2016), "Mach-Zehnder Interferometer based high sensitive water salinity sensor for oceanographic applications", *IEEE Annual India Conference (INDICON)*, pp.1-4, DOI: 10.1109/INDICON.2016.7838872.
- [25] S. Zhang, Z. Liu, C. Yang, et al. (2021), "An in-fiber Mach-Zehnder interferometer for salinity sensor based on interface-fiber inscribed by femtosecond laser", *26th Optoelectronics and Communications Conference (Optica Publishing Group): WID.2*, DOI: 10.1364/OECC.2021.WID.2.
- [26] Y. Zhang, L. Li, J. Zhao, et al. (2022), "Highly sensitive salinity sensor based on Mach-Zehnder interferometer with double-C fiber", *Fundamental Research*, **2**(2), pp.296-302, DOI: 10.1016/j.fmre.2021.11.023.
- [27] R. Flores, R. Janeiro, J. Viegas (2019), "Optical fibre Fabry-Pérot interferometer based on inline microcavities for salinity and temperature sensing", *Scientific Reports*, **9**, DOI: 10.1038/s41598-019-45909-2.

- [28] X. Zhang, W. Peng (2015), "Temperature-independent fiber salinity sensor based on Fabry-Perot interference", *Optics Express*, **23**(8), pp.10353-10358, DOI: 10.1364/OE.23.010353.
- [29] G. Li, G. Li, S. Yang, et al. (2022), "A novel salinity sensor with high-resolution and large dynamic range based on optical Fabry-Pérot cavity", *Sensors and Actuators A: Physical*, **347**, DOI: 10.1016/j.sna.2022.113970.
- [30] M.A. Mollah, M. Yousufali, M.R.B.A. Faysal, et al. (2020), "Highly sensitive photonic crystal fiber salinity sensor based on Sagnac interferometer", *Results in Physics*, **16**, DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103022.
- [31] F. Zhao, W. Lin, J. Hu, et al. (2022), "Salinity and temperature dual-parameter sensor based on fiber ring laser with tapered side-hole fiber embedded in Sagnac interferometer", *Sensors*, **22**(21), DOI: 10.3390/s22218533.
- [32] A. Poisson, M.H. Gadhomi (1993), "An extension of the practical salinity scale 1978 and the equation of state 1980 to high salinities", *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **40**(8), pp.1689-1698, DOI: 10.1016/0967-0637(93)90022-U.
- [33] E.L. Lewis, R.G. Perkin (1981), "The practical salinity scale 1978: Conversion of existing data", *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, **28**(4), pp.307-328, DOI: 10.1016/0198-0149(81)90002-9.
- [34] P.H. Hutton, S.B. Roy (2023), "Application of the practical salinity scale to the waters of San Francisco estuary", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **290**, DOI: 10.1016/j.ecss.2023.108380.
- [35] E. Lewis (1980), "The practical salinity scale 1978 and its antecedents", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **5**(1), pp.3-8, DOI: 10.1109/JOE.1980.1145448.
- [36] W. Gong, M. Mowlem, M. Kraft, et al. (2008), "Oceanographic sensor for in-situ temperature and conductivity monitoring", *OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, pp.1-6, DOI: 10.1109/OCEANSKOB.2008.4530906.
- [37] X. Huang, R.W. Pascal, K. Chamberlain, et al. (2011), "A miniature, high precision conductivity and temperature sensor system for ocean monitoring", *IEEE Sensors Journal*, **11**, pp.3246-3252, DOI: 10.1109/JSEN.2011.2149516.
- [38] A. Hyldgard, I. Olafsdottir, M. Olesen, et al. (2005), "FISH & CHIPS: Four electrode conductivity/salinity sensor on a silicon multi-sensor chip for fisheries research", *IEEE Sensors*, pp.1124-1127, DOI: 10.1109/ICSENS.2005.1597902.
- [39] C. Huck, A. Poghosian, M. Bäcker, et al. (2014), "Capacitively coupled electrolyte-conductivity sensor based on high-k material of barium strontium titanate", *Sensors and Actuators B: Chemical*, **198**, pp.102-109, DOI: 10.1016/j.snb.2014.02.103.
- [40] A. Kaidarova, M. Marengo, G. Marinaro, et al. (2018), "Flexible and biofouling independent salinity sensor", *Advanced Materials Interfaces*, **5**, DOI: 10.1002/admi.201801110.
- [41] A. Kaidarova, M. Marengo, G. Marinaro, et al. (2019a), "Flexible, four-electrode conductivity cell for biologging applications", *Results in Materials*, **1**, DOI: 10.1016/j.rinma.2019.100009.
- [42] D. Shi, N. Huang, L. Liu, et al. (2020), "Nanostructured boron-doped diamond electrode for seawater salinity detection", *Applied Surface Science*, **512**, DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145652.
- [43] Z. Liao, J. Jing, R. Gao, et al. (2022), "A direct-reading MEMS conductivity sensor with a parallel-symmetric four-electrode configuration", *Micromachines*, **13**(7), DOI: 10.3390/mi13071153.
- [44] A. Hyldgård, D. Mortensen, K. Birkelund, et al. (2008), "Autonomous multi-sensor micro-system for measurement of ocean water salinity", *Sensors and Actuators A: Physical*, **147**(2), pp.474-484, DOI: 10.1016/j.sna.2008.06.004.
- [45] A.J. Skinner, M.F. Lambert (2011), "An automatic soil pore-water salinity sensor based on a wetting-front detector", *IEEE Sensors Journal*, **11**(1), pp.245-254, DOI: 10.1109/JSEN.2010.2051325.
- [46] M. Sophocleous, J.K. Atkinson (2015), "A novel thick-film electrical conductivity sensor suitable for liquid and soil conductivity measurements", *Sensors and Actuators B: Chemical*, **213**, pp.417-422, DOI: 10.1016/j.snb.2015.02.110.
- [47] O.L. Bo, E. Nyfors (2002), "Application of microwave spectroscopy for the detection of water fraction and water salinity in water/oil/gas pipe flow", *Journal of Non-Crystalline Solids*, **305**, pp.345-353, DOI: 10.1016/S0022-3093(02)01130-4.
- [48] J.S. Daniels, N. Pourmand (2007), "Label-free impedance biosensors: Opportunities and challenges", *Electroanalysis*, **19**, pp.1239-1257, DOI: 10.1002/ELAN.200603855.
- [49] P. Kubáň, P.C. Hauser (2009), "Ten years of axial capacitively coupled contactless conductivity detection for CZE - a review", *Electrophoresis*, **30**, pp.176-188, DOI: 10.1002/ELPS.200800478.
- [50] I. Hussain, M. Das, K.U. Ahamad, et al. (2017), "Water salinity detection using a smartphone", *Sensors and Actuators B: Chemical*, **239**, pp.1042-1050, DOI: 10.1016/J.SNB.2016.08.102.
- [51] V. Urdanoz, E. Amezketa, I. Clavería, et al. (2008), "Mobile and georeferenced electromagnetic sensors and applications for salinity assessment", *Spanish Journal of Agricultural Research*, **6**(3), pp.469-478, DOI: 10.5424/SJAR/2008063-339.
- [52] W.C. Lin, K. Brondum, C.W. Monroe, et al. (2017), "Multifunctional water sensors for pH, ORP, and conductivity using only microfabricated platinum electrodes", *Sensors*, **17**, DOI: 10.3390/S17071655.
- [53] C. Wu, W. Gao, J. Zou, et al. (2020), "Design and batch microfabrication of a high precision conductivity and temperature sensor for marine measurement", *IEEE Sensors Journal*, **20**, pp.10179-10186, DOI: 10.1109/JSEN.2020.2992730.
- [54] A. Kaidarova, M. Marengo, N.R. Galdi, et al. (2019b), "Flexible conductivity, temperature, and depth sensor for marine environment monitoring", *Proceedings of IEEE Sensors*, pp.1-4, DOI: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956824.
- [55] R. Feistel, D.G. Wright, K. Miyagawa, et al. (2008), "Mutually consistent thermodynamic potentials for fluid water, ice and seawater: A new standard for oceanography", *Ocean Science*, **4**, pp.275-291, DOI: 10.5194/OS-4-275-2008.
- [56] S. Seitz, R. Feistel, D.G. Wright, et al. (2011), "Metrological traceability of oceanographic salinity measurement results", *Ocean Science*, **7**, pp.45-62, DOI: 10.5194/OS-7-45-2011.
- [57] J.D. Rhoades (1996), "Chapter 14: Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids", *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*, pp.417-435, DOI: 10.2136/SSSABOOKSER5.3.C14.
- [58] N. Singh, Y. Gautam, M. Balakrishnan, et al. (2021), "Separation of lignin from pulp and paper mill wastewater using forward osmosis process", *Materials Today: Proceedings*, **47**, pp.1423-1429, DOI: 10.1016/J.MATPR.2021.03.215.
- [59] P. Tripathi, V. Kumar, G. Joshi, et al. (2013), "A comparative study on physico-chemical properties of pulp and paper mill effluent", *Journal of Engineering Research and Applications*, **3**(6), pp.811-818.
- [60] M.L. Menn, P.A.G. Albo, S. Lago, et al. (2019), "The absolute salinity of seawater and its measurands", *Metrologia*, **56**(1), DOI: 10.1088/1681-7575/AAEA92.