

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT



BÁO CÁO HỌC THUẬT

NĂM HỌC 2023-2024

**TRUYỀN NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY
TRONG MÔI TRƯỜNG NƯỚC**

Người báo cáo: Bùi Hữu Nguyên

Đơn vị: Bộ môn Vật lí, Khoa Khoa học cơ bản

Hà Nội, 6/2024

MỤC LỤC

A. MỞ ĐẦU	1
I. Lý do chọn chủ đề báo cáo	1
II. Mục tiêu	2
III. Phạm vi nghiên cứu	2
IV. Phương pháp nghiên cứu	2
V. Bố cục báo cáo	2
B. NỘI DUNG BÁO CÁO	2
I. Mô phỏng cấu trúc hệ thống WPT trong môi trường nước	2
II. Tính chất vật lý của môi trường nước có hệ số dẫn điện khác nhau....	4
III. Kết quả và phân tích.....	5
C. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	9
D. TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	10

A. MỞ ĐẦU

I. Lý do chọn chủ đề báo cáo

Công nghệ truyền năng lượng không dây (Wireless Power Transfer - WPT) là một bước tiến quan trọng trong lĩnh vực điện tử và năng lượng, cho phép chuyển đổi năng lượng điện từ nguồn phát sang thiết bị tiêu thụ mà không cần dây dẫn. Công nghệ này mang lại sự tiện lợi, giảm thiểu sự lộn xộn của dây cáp nối và mở ra nhiều ứng dụng mới trong đời sống hàng ngày [1-3]. Các phương pháp truyền năng lượng không dây phổ biến bao gồm cảm ứng từ, cộng hưởng từ, sóng vi ba và ánh sáng laser [4-6]. Mỗi phương pháp đều có những ưu điểm và ứng dụng riêng, từ việc sạc pin điện thoại thông minh, thiết bị y tế cấy ghép, cho đến việc truyền năng lượng cho các thiết bị không gian. Với tiềm năng to lớn, công nghệ truyền năng lượng không dây đang ngày càng phát triển và hứa hẹn sẽ mang lại những thay đổi đột phá trong cách chúng ta sử dụng và quản lý năng lượng.

Những năm gần đây công nghệ truyền năng lượng không dây dưới môi trường nước và nước biển đang mở ra những triển vọng mới trong việc cung cấp năng lượng cho các thiết bị hoạt động dưới nước, bao gồm cảm biến, thiết bị thăm dò và phương tiện tự hành [7-9]. Sự phát triển của công nghệ truyền năng lượng không dây dưới nước và nước biển hứa hẹn mang lại nhiều ứng dụng quan trọng trong các lĩnh vực như khoa học biển, quốc phòng, và khai thác tài nguyên dưới đáy biển, đồng thời thúc đẩy sự phát triển bền vững và hiệu quả của các hoạt động dưới nước.

Mặc dù công nghệ truyền năng lượng không dây dưới môi trường nước và nước biển mang lại nhiều tiềm năng, nhưng cũng tồn tại một số nhược điểm đáng kể. Trước hết, việc truyền năng lượng dưới nước gặp phải hạn chế về khoảng cách và hiệu suất, do nước và đặc biệt là *nước biển có độ dẫn điện cao, có thể gây ra sự suy giảm năng lượng đáng kể trong quá trình truyền tải*. Sóng siêu âm, mặc dù có thể truyền qua nước, nhưng cũng dễ bị hấp thụ và phân tán bởi các hạt trong nước, làm giảm hiệu quả truyền năng lượng [10]. Thêm vào đó, các thiết bị truyền và nhận năng lượng dưới nước thường phải được thiết kế đặc biệt để chống chịu áp suất cao và ăn mòn từ nước biển, dẫn đến chi phí cao và phức tạp trong quá

trình sản xuất và bảo trì. Để khắc phục những nhược điểm nêu trên, nhóm nghiên cứu đề xuất khảo sát hệ thống truyền năng lượng không dây dưới môi trường nước sử dụng sóng điện từ tại 15 MHz và áp dụng hộp cách li không khí (Air pocket) để nâng cao hiệu suất hệ thống WPT dưới môi trường nước có hệ số dẫn điện cao.

II. Mục tiêu

Tối ưu hiệu suất truyền năng lượng không dây trong môi trường nước có hệ số dẫn điện khác nhau.

III. Phạm vi nghiên cứu

Nội dung báo cáo tập trung nghiên cứu hệ thống truyền năng lượng không dây gồm bốn cuộn dây được đặt trong môi trường nước có hệ số dẫn điện khác nhau.

IV. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp tổng hợp, phân tích tính toán và mô phỏng.

V. Bố cục báo cáo

Bố cục báo cáo ngoài ba phần chính là phần mở đầu, phần nội dung và phần kết luận còn có mục lục và tài liệu tham khảo.

Phần nội dung có ba mục:

1. Mô phỏng cấu trúc hệ thống WPT trong môi trường nước.
2. Tính chất vật lý của môi trường nước có hệ số dẫn điện khác nhau.
3. Kết quả và phân tích.
4. Kết luận.

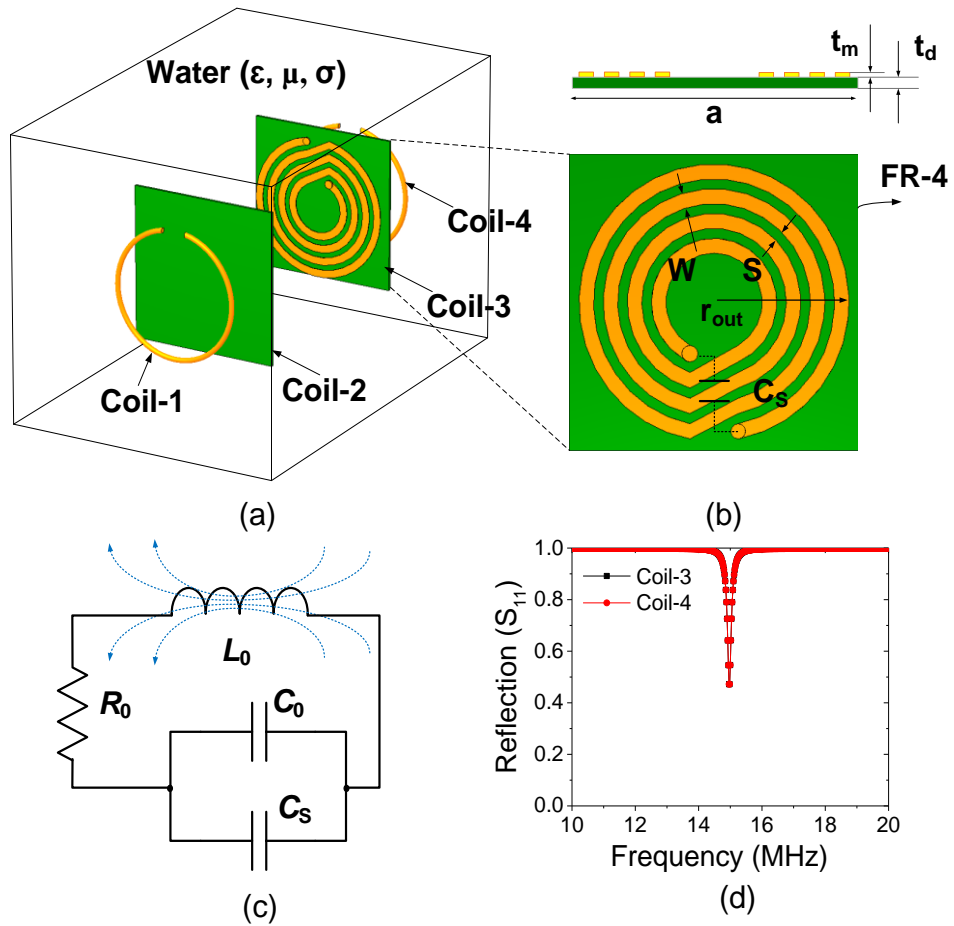
B. NỘI DUNG BÁO CÁO

I. Mô phỏng cấu trúc hệ thống WPT trong môi trường nước

Trong báo cáo này nhóm nghiên cứu sử dụng phần mềm CST STUDIO SUITE 2019 (CST) để thiết kế và mô phỏng khảo sát hệ thống WPT trong môi trường nước với hệ số dẫn điện khác nhau. Hình 1(a) mô tả cấu trúc hệ thống truyền năng lượng không dây đặt trong môi trường nước có hằng số điện môi $\epsilon_n = 78$, hằng số từ môi $\mu = 1$ và hệ số điện dẫn σ . Hệ thống bao gồm có bốn cuộn

dây: cuộn dây 1 có một vòng dây đóng vai trò là cuộn phát, các cuộn cộng hưởng 2 và 3 có cấu trúc hình học giống nhau đóng vai trò khuếch đại từ trường từ cuộn phát, cuộn dây 4 có một vòng dây đóng vai trò là cuộn thu, biến đổi năng lượng từ trường từ cuộn 3 và chuyển đổi thành năng lượng điện trên tải.

Hình 1(b) mô tả chi tiết cấu trúc hình học của cuộn 3 và 4, bao gồm có hai lớp vật liệu: Lớp thứ nhất là lớp dây đồng mảnh có 4 vòng hình xoắn ốc đóng vai trò là lớp cộng hưởng. Kích thước bán kính ngoài của cuộn dây là $r_{out} = 28$ mm, độ rộng dây $W = 1$ mm, khoảng cách giữa hai vòng dây $S = 1$ mm và bề dày là $t_m = 0.01$ mm. Lớp thứ hai là lớp điện môi FR-4 có kích thước $a \times a \times t_d = 4 \times 4 \times 0.1$ cm³ và hằng số điện môi $\epsilon_{FR4} = 4.4$.



Hình 1. (a) Cấu trúc hệ thống WPT trong môi trường nước. (b) Cấu trúc cuộn cộng hưởng 3 và 4. (c) Mô hình mạch điện cộng hưởng tương đương của cấu trúc cuộn dây 3 và 4. (d) Phổ phản xạ của cuộn cộng hưởng 3 và 4 khi đặt trong không khí.

Hình 1(c) mô tả mạch điện RLC tương đương của cuộn 3 và 4, trong đó $L_0 = 0,57 \mu\text{H}$, $R_0 = 0.25 \Omega$ và $C_0 = 1.96 \text{ pF}$ lần lượt là điện cảm, điện trở và tụ điện ký sinh của cuộn dây tại tần số hoạt động tại 15 MHz. Tụ điện ngoài $C_s = 185 \text{ pF}$ được hàn trên hai đầu cuộn dây đồng để điều chỉnh tần số về 15 MHz. Dựa trên cấu trúc mạch điện tương đương tần số cộng hưởng f_{ch} của cuộn 3 và 4 được xác định theo công thức:

$$f_{ch} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0(C_0 + C_s)}} \quad (1.1)$$

Hình 1(d) cho thấy kết quả phổ phản xạ của cuộn 3 và 4 trong vùng tần số từ 10 MHz đến 20 MHz. Đồ thị cho thấy độ phản xạ của hai cuộn thấp nhất tại tần số 15 MHz, tương ứng với tần số cộng hưởng theo công thức (1.1).

II. Tính chất vật lý của môi trường nước có hệ số dẫn điện khác nhau

Để khảo sát hiệu suất truyền năng lượng không dây trong môi trường không khí và môi trường nước có hệ số dẫn điện σ khác nhau, nhóm nghiên cứu đã sử dụng bốn mô hình môi trường có tính chất được mô tả trên **hình 2**.

Air		Water (distilled)	
Type	Normal	Type	Normal
Epsilon	1.00059	Epsilon	78.4
Mu	1	Mu	1
Electric comd.	0 [S/m]	Electric cond.	5.55e-06 [S/m]
Thermal cond.	0.026 [W/K/m]	Rho	998 [kg/m ³]
Dyn. viscosity	1.84e-05 [Pa.s]	Thermal cond.	0.6 [W/K/m]
Heat capacity	1.005 [kJ/K/kg]	Heat capacity	4.2 [kJ/K/kg]
Diffusivity	2.14872e-05 [m ² /s]	Diffusivity	1.43143e-07 [m ² /s]

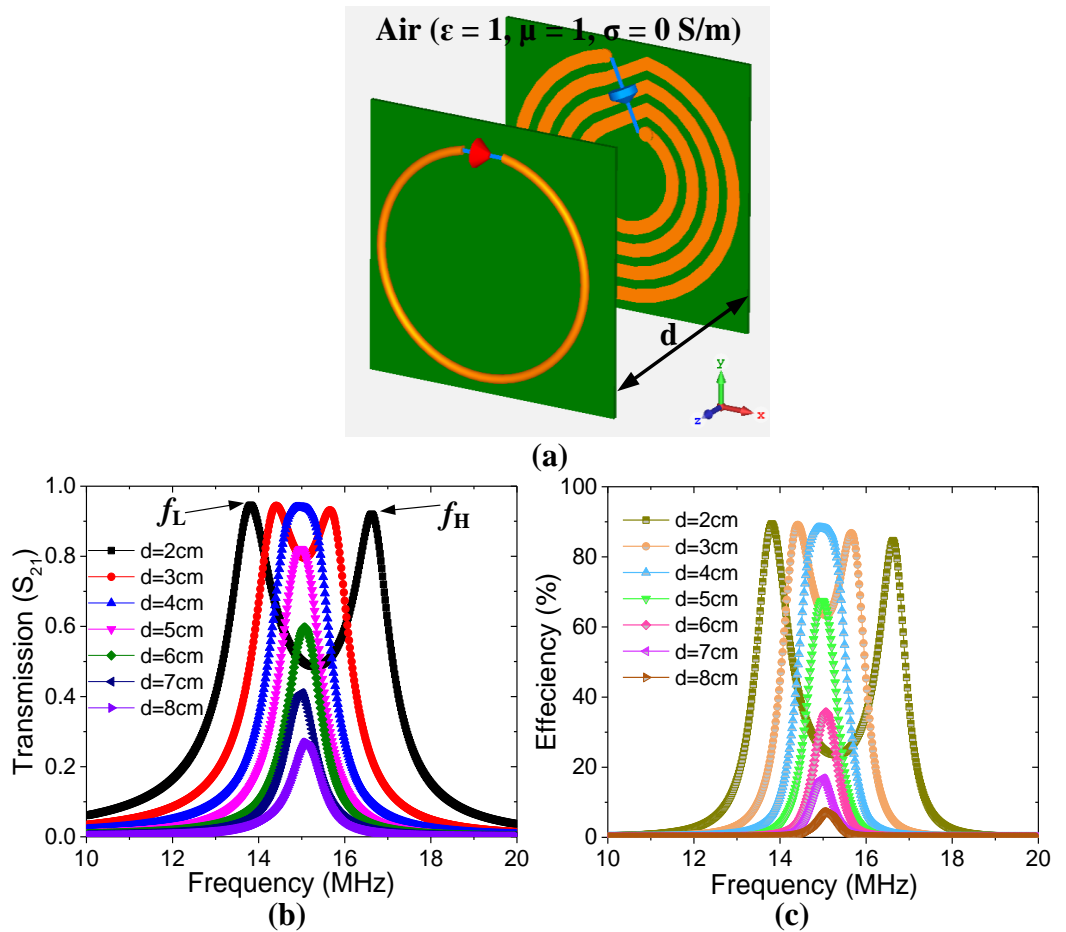
Water		Water (sea)	
Type	Normal	Type	Normal
Epsilon	78	Epsilon	74
Mu	1	Mu	1
Electric cond.	1.59 [S/m]	Electric cond.	3.53 [S/m]
Rho	1000 [kg/m ³]	Rho	1025 [kg/m ³]
Thermal cond.	0.6 [W/K/m]	Thermal cond.	0.6 [W/K/m]
Heat capacity	4.2 [kJ/K/kg]	Heat capacity	4.2 [kJ/K/kg]
Diffusivity	1.42857e-07 [m ² /s]	Diffusivity	1.39373e-07 [m ² /s]

Hình 2. Tham số kỹ thuật các môi trường không khí, nước cất (distilled water) nước thông thường, và nước biển (sea water).

Môi trường thứ nhất là không khí có hằng số điện môi $\epsilon_{kk} = 1$, hằng số từ môi $\mu_{kk} = 1$ và hệ số điện dẫn $\sigma_{kk} = 0$ [S/m]. Môi trường thứ hai là nước cất có hằng số điện môi $\epsilon_{nc} = 78.4$, hằng số từ môi $\mu_{nc} = 1$ và hệ số điện dẫn $\sigma_{nc} = 5.55 \times 10^{-6}$ [S/m]. Môi trường thứ ba là nước thông thường có hằng số điện môi $\epsilon_{ntt} = 78$, hằng số từ môi $\mu_{ntt} = 1$ và hệ số điện dẫn $\sigma_{ntt} = 1.59$ [S/m]. Do trong nước thông thường (nước tự nhiên) có chứa các ion và lượng muối khoáng nhỏ do đó nước tự nhiên có hệ số dẫn điện cao hơn so với nước cất. Đặc biệt đối với môi trường nước biển có hàm lượng muối (NaCl) hòa tan cao tỉ lệ 35kg (NaCl) trên 1000kg (nước biển), do đó nước biển có hệ số dẫn điện lớn nhất $\sigma_{nb} = 3.53$ [S/m]. Hằng số điện môi và hằng số từ môi của nước biển lần lượt là $\epsilon_{nb} = 74$, $\mu_{nb} = 1$.

III. Kết quả và phân tích

Hình 3(a) mô tả hệ thống WPT được đặt trong môi trường không khí. Với khoảng cách giữa hai cuộn 3 và 4 là d thay đổi từ 2 cm tới 8 cm.



Hình 3. (a) Hệ thống WPT trong môi trường không khí. (b) Phổ truyền qua và hiệu suất (c) của hệ WPT trong môi trường không khí tại các khoảng cách d khác nhau.

Hình 3(b) cho thấy phổ truyền qua (S_{21}) của hệ thống WPT đặt trong không khí tại các khoảng cách d khác nhau. Kết quả cho thấy khi khoảng cách $d < 3$ cm, tần số cộng hưởng f_{ch} của hệ thống tách thành tần số thấp f_L và tần số cao f_H . Điều này được giải thích do hệ số kết nối từ k (inductive coupling) giữa hai cuộn dây 3 và 4 lớn (over coupling) dẫn tới hiện tượng tần số cộng hưởng f_{ch} tách ra thành hai tần số. Mỗi quan hệ giữa k , f_H và f_L được xác định theo công thức (1.2):

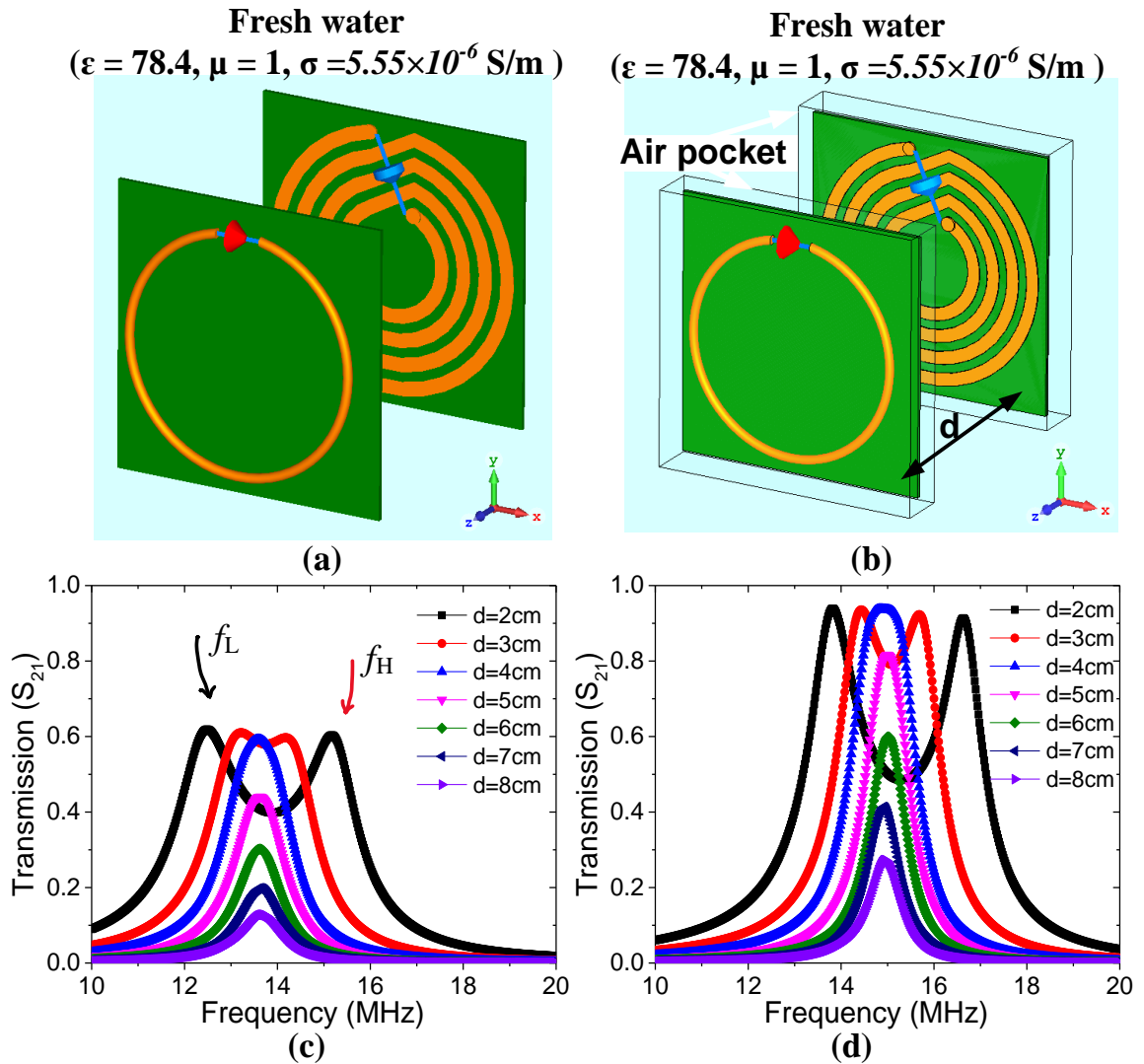
$$k = \frac{(f_H^2 - f_L^2)}{(f_H^2 + f_L^2)} \quad (1.2)$$

Khi tăng khoảng cách $d = 4$ cm hệ số kết k giảm và hai tần số f_H, f_L tiến dần tới f_{ch} . **Hình 3(c)** cho thấy hiệu suất của hệ WPT trong môi trường không khí tại khoảng cách d từ 2 cm tới 8 cm. Kết quả thu được hiệu suất đạt 90% khi hệ thống đặt trong không khí tại $d = 4$ cm và $f_{ch} = 15$ MHz. Hiệu suất hệ thống suy giảm nhanh chóng tới 7% khi tăng khoảng cách $d = 8$ cm. Nguyên nhân do hệ số kết nối giữa hai cuộn 3 và 4 suy giảm nhanh chóng khi khoảng cách d tăng lên (theo công thức 1.2).

Hình 4(a) mô tả hệ thống WPT không có hộp cách li không khí đặt trong môi trường nước cất có hệ số điện dẫn rất nhỏ ($\sigma_{nc} = 5.55 \times 10^{-6}$ [S/m]). **Hình 4(b)** mô tả phổ truyền qua của hệ WPT tại các khoảng cách d từ 2 cm đến 8 cm. Kết quả cho thấy tần số cộng hưởng của hệ thống đã dịch chuyển về phía tần số thấp hơn 1,2 MHz so với hệ khi đặt trong môi trường không khí (15 MHz). Điều này thu được do giá trị tụ điện C_0 của các cuộn 3, 4 tăng lên do nước có hằng số điện môi lớn ($\epsilon_{nc} = 78.4$) điền vào khoảng trống giữa các vòng dây thay vì không khí ($\epsilon_{kk} = 1$). Bên cạnh đó, môi trường nước cất có độ dẫn điện tốt hơn không khí vì vậy tổn hao từ trên môi trường nước cao hơn, điều này dẫn tới phổ truyền qua của hệ thống WPT trong môi trường nước cất nhỏ hơn so với hệ này khi đặt trong không khí.

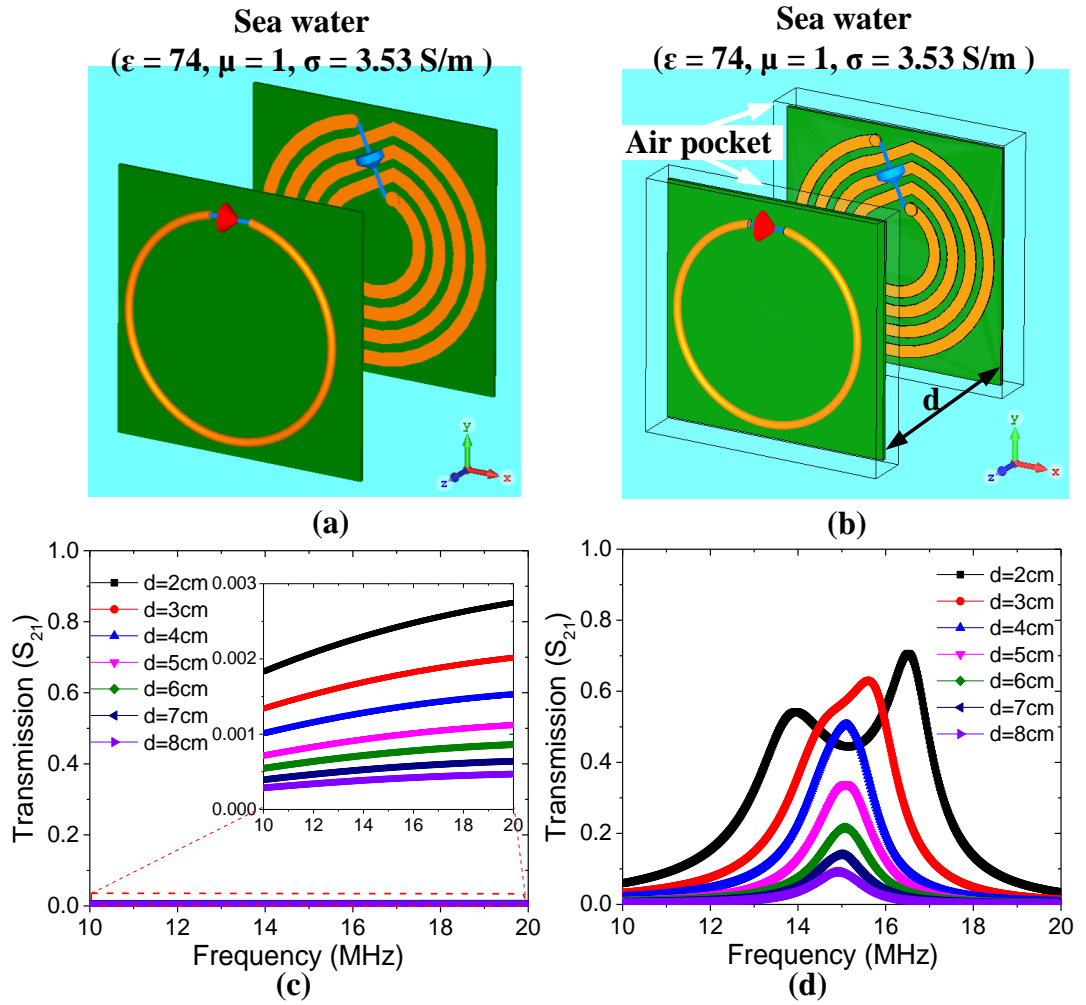
Để khắc phục vấn đề trên, nhóm nghiên cứu đề xuất sử dụng hộp cách li không khí bao quanh các cuộn dây của hệ WPT khi đặt trong môi trường nước cất, được mô tả như **hình 4(c)**. **Hình 4(d)** mô tả phổ truyền qua của hệ WPT sử dụng hộp cách li không khí trong môi trường nước cất tại các khoảng cách từ 2 cm đến 8 cm. Kết quả cho thấy

tần số cộng hưởng của hệ thống không bị dịch chuyển và hệ số truyền qua cao hơn so với hệ không sử dụng hộp cách li không khí.



Hình 4(a) Hệ thống WPT trong môi trường nước cất. (b) Phổ truyền qua và hiệu suất (c) của hệ WPT trong môi trường nước cất tại các khoảng cách d khác nhau.

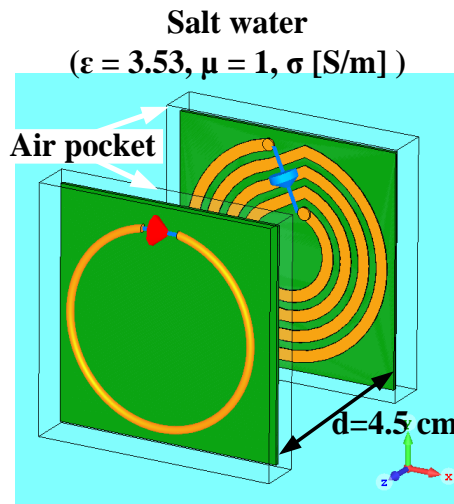
Nhóm nghiên cứu thay môi trường nước cất có độ điện dẫn nhỏ bằng môi trường nước biển có hệ số điện dẫn lớn hơn rất nhiều ($\sim 10^6$ lần) như trên hình 5(a). Tiến hành khảo sát phổ truyền qua của hệ WPT trong môi trường nước muối với khoảng cách d thay đổi. Hình 5(b) cho thấy kết quả phổ truyền qua của hệ thống WPT rất nhỏ (< 0.003) trong dải tần số từ 10 MHz tới 20 MHz. Trên đồ thị không quan sát được tần số cộng hưởng của hệ thống. Nguyên nhân dẫn tới điều này do nước muối có độ điện dẫn cao làm ngắn mạch các vòng dây của các cuộn 3 và 4, do đó làm thay đổi các giá trị L_0 và C_0 của hệ thống. Hình 5(c) mô tả hệ thống WPT đặt trong môi trường nước biển có sử dụng hộp cách li không khí.



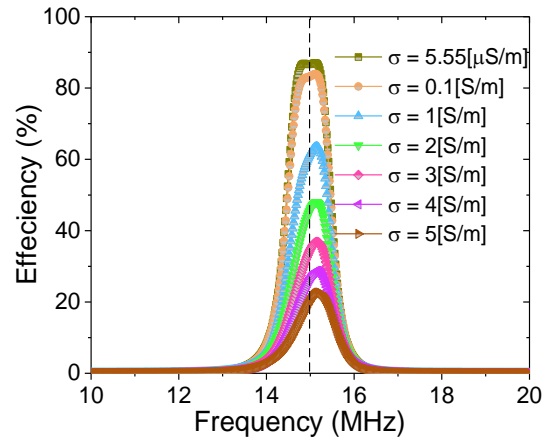
Hình 5. (a) Hệ thống WPT trong môi trường nước biển. (b) Phổ truyền qua và hiệu suất (c) của hệ WPT trong môi trường nước biển tại các khoảng cách d khác nhau.

Để nghiên cứu sự ảnh hưởng bởi độ dẫn của môi trường nước tới hiệu suất truyền năng lượng không dây, nhóm nghiên cứu tiến hành khảo sát phổ truyền qua sử dụng nước muối có độ dẫn khác nhau.

Hình 6(a) mô tả hệ thống WPT truyền trong môi trường nước muối có sử dụng hộp cách li không khí tại khoảng cách truyền $d = 4.5 \text{ cm}$. Thông qua thay đổi nồng độ muối NaCl trong trong dịch, nhóm nghiên cứu có thể thay đổi được hệ số điện dẫn.



(a)



(b)

Hình 6(a) Hệ thống WPT trong môi trường nước muối có hệ số độ dẫn khác nhau.
(b) Phổ truyền qua và hiệu suất (c) của hệ WPT trong môi trường nước muối có hệ số độ dẫn khác nhau tại các khoảng cách $d = 4.5$ cm.

Hình 6(b) mô tả hiệu suất của hệ WPT sử dụng hộp cách li không khí trong môi trường nước muối có hệ số điện dẫn thay đổi từ $\sigma = 5.55$ [$\mu\text{S/m}$] tới $\sigma = 5$ [S/m] tại khoảng cách truyền $d = 4.5$ cm. Kết quả cho thấy hiệu suất truyền năng lượng giảm dần khi hệ số điện dẫn của nước muối tăng. Điều này được giải thích dựa trên tổn hao do xuất hiện dòng điện xoáy gây nên bởi tương tác của từ trường biến thiên trong môi trường có hệ số điện dẫn lớn. Khi hệ số điện dẫn của môi trường càng lớn thì cường độ dòng điện xoáy cũng tăng lên làm tổn hao năng lượng càng nhiều, dẫn tới hiệu suất của hệ WPT suy giảm.

C. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Trong báo cáo này nhóm nghiên cứu khảo sát hiệu suất truyền năng lượng không dây trong môi trường nước có hệ số dẫn điện khác nhau. Bằng phương pháp áp dụng hộp cách li không khí trong hệ thống WPT đặt trong môi trường nước, nhóm nghiên cứu đã cải thiện hệ số truyền năng lượng không dây tại tần số 15 MHz. Đối với môi trường nước muối có hệ số điện dẫn lần lượt là $\sigma = 5.55$ [$\mu\text{S/m}$] và $\sigma = 5$ [S/m] hiệu suất truyền năng lượng đạt 87% và 25% tại khoảng cách truyền 4.5 cm. Với kết quả nghiên cứu thu được góp phần mở rộng ứng dụng công nghệ WPT trong đời sống.

D. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Yang, Lei, et al. "A review of underwater inductive wireless power transfer system." *IET Power Electronics* (2023).
- [2] Haerinia, Mohammad, and Reem Shadid. "Wireless power transfer approaches for medical implants: A review." *Signals* 1.2 (2020): 209-229.
- [3] Sun, Longzhao, Dianguang Ma, and Houjun Tang. "A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91 (2018): 490-503.
- [4] Mohammad, Mostak, et al. "Modeling and design of passive shield to limit EMF emission and to minimize shield loss in unipolar wireless charging system for EV." *IEEE Transactions on Power Electronics* 34.12 (2019): 12235-12245.
- [5] Okasili, Iman, Ahmad Elkhateb, and Timothy Littler. "A review of wireless power transfer systems for electric vehicle battery charging with a focus on inductive coupling." *Electronics* 11.9 (2022): 1355.
- [6] Edalatifar, Mohammad, et al., *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 146 (2021): 1435-1452.
- [7] Teeneti, Chakridhar Reddy, et al. "Review of wireless charging systems for autonomous underwater vehicles." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 46.1 (2019): 68-87.
- [8] A Review on Research Challenges, Limitations and Practical Solutions for Underwater Wireless Power Transfer.
- [9] Guo, Hongzhi, Zhi Sun, and Pu Wang. "Joint design of communication, wireless energy transfer, and control for swarm autonomous underwater vehicles." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 70.2 (2021): 1821-1835.
- [10] Zhao, Yufei, et al. "Design of ultrasonic transducer structure for underwater wireless power transfer system." *2021 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. IEEE, 2021.