

STUDY ON CAPACITY INHIBIT CORROSION STEEL REBAR IN CONCRETE OF PHYLLANTHUS URINARIA EXTRACT IN SIMULATED SEAWATER

Nguyen Thi Hoai Phuong^{1*}, Pham Tien Dung², Vo Hoang Tung², Le The Quang³,
Ninh Duc Ha¹, La Duc Duong¹, Nguyen Tai Truong¹, Nguyen Tien Dung⁴

¹Institute of Chemistry and Materials, ²Institute of Environment - Vietnam Maritime University

³Military Technical Academy, ⁴Hanoi National University of Education

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	16/8/2023	Nowadays, the search for organic corrosion inhibitor compounds to replace inorganic compounds is attracting much attention from scientists worldwide. Organic compounds from nature are often accessible to collect and cheap, mainly because they play a role in sustainable development and are environmentally friendly. This study evaluates the effectiveness of <i>Phyllanthus Urinaria</i> extract as an organic corrosion inhibitor of steel reinforcement in simulated seawater (3.5% NaCl solution). Electrochemical methods, including polarization curves and electrochemical impedance, studied the corrosion inhibition effect of the extract. Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDX) were used to analyze the surface of the rebar samples. Electrochemical measurement results show that <i>Phyllanthus Urinaria</i> extract is an effective corrosion inhibitor for concrete reinforcement caused by seawater. At a concentration of 0.02% of the extract in simulated seawater, <i>Phyllanthus Urinaria</i> can improve the corrosion resistance of steel reinforcement when the corrosion rate is reduced to 0.078 mm/year compared to 0.113 mm/year without extracts. The results are the basis for orienting the application of <i>Phyllanthus Urinaria</i> extract to limit damage to reinforced concrete construction in the marine environment.
Revised:	17/10/2023	
Published:	18/10/2023	
KEYWORDS		
Steel rebar in concrete		
Phyllanthus urinaria extract		
Seawater corrosion		
Potentiodynamic polarization curves		
Electrochemical impedance spectroscopy		

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG ỨC CHẾ ĂN MÒN CỐT THÉP BÊ TÔNG CỦA DỊCH CHIẾT DIỆP HẠ CHÂU TRONG MÔI TRƯỜNG NƯỚC BIỂN MÔ PHỎNG

Nguyễn Thị Hoài Phương^{1*}, Phạm Tiến Dũng², Võ Hoàng Tùng², Lê Thế Quang³,
Ninh Đức Hà¹, Lê Đức Dương¹, Nguyễn Tài Trường¹, Nguyễn Tiến Dũng⁴

¹Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự, ²Viện Môi trường - Đại học Hàng hải Việt Nam

³Học viện Kỹ thuật Quân sự, ⁴Trường Đại học Sư phạm Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	16/8/2023	Ngày nay, việc tìm kiếm các hợp chất ức chế ăn mòn hữu cơ thay thế cho các hợp chất vô cơ đang được thu hút nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trên thế giới. Các hợp chất hữu cơ từ thiên nhiên thường rất dễ thu thập, rẻ tiền, đặc biệt chúng đóng vai trò trong phát triển bền vững và thân thiện với môi trường. Nghiên cứu này đánh giá hiệu quả của dịch chiết Diệp hạ châu như một chất hữu cơ ức chế ăn mòn cốt thép trong nước biển mô phỏng (dung dịch 3,5% NaCl). Hiệu quả ức chế ăn mòn của dịch chiết được nghiên cứu bằng các phương pháp điện hoá bao gồm đường cong phân cực và tổng trở điện hoá. Kính hiển vi điện tử quét (SEM) và quang phổ tán sắc năng lượng (EDX) đã được sử dụng để phân tích bề mặt mẫu cốt thép. Kết quả đo điện hóa chỉ ra rằng, dịch chiết Diệp hạ châu là một chất ức chế ăn mòn hiệu quả cho cốt thép bê tông do nước biển gây ra. Ở nồng độ 0,02% dịch chiết trong nước biển mô phỏng, Diệp hạ châu có thể cải thiện khả năng chống ăn mòn cốt thép, tốc độ ăn mòn giảm xuống 0,078 mm/năm so với 0,113 mm/năm khi không có dịch chiết. Kết quả là cơ sở cho việc định hướng ứng dụng dịch chiết Diệp hạ châu nhằm hạn chế sự hư hỏng bê tông cốt thép xây dựng ở môi trường biển.
Ngày hoàn thiện:	17/10/2023	
Ngày đăng:	18/10/2023	
TỪ KHÓA		
Cốt thép bê tông		
Dịch chiết Diệp hạ châu		
Ăn mòn nước biển		
Đường cong phân cực		
Tổng trở điện hóa		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.8552>

* Corresponding author. Email: hoaihuong1978@gmail.com

1. Giới thiệu

Hiện tượng ăn mòn kim loại và hợp kim là một vấn đề lớn trên toàn thế giới, đặc biệt ảnh hưởng đến nền kinh tế công nghiệp, cơ sở hạ tầng và các tòa nhà. Vật liệu kim loại bị ăn mòn một cách tự nhiên, do tương tác với khí quyển và tiếp xúc với môi trường oxy hóa, chẳng hạn như dung dịch axit và NaCl [1]. Ăn mòn cốt thép trong bê tông cốt thép là một quá trình điện hóa gây ra sự hòa tan của sắt để tạo thành một loạt các sản phẩm rắn. Sản phẩm ăn mòn là một hỗn hợp các oxit sắt, hydroxit và oxit ngậm nước [2]. Hầu hết các công trình xây dựng gần khu vực ven biển dễ bị ăn mòn hơn do ảnh hưởng của nước biển. Clorua đóng vai trò là chất xúc tác cho quá trình ăn mòn xảy ra. Sự xâm nhập của các tác nhân xâm thực như clorua vào bê tông làm giảm độ rỗng, tính thấm và màng thụ động của cốt thép cũng bị phá hủy nên dễ bị ăn mòn [3], [4]. Một màng thụ động mỏng có thể được hình thành trên cốt thép là do độ kiềm cao của các thành phần trong bê tông [5]. Nói chung, bảo vệ kim loại có thể được thực hiện bằng cách sử dụng các phương pháp khác nhau, chẳng hạn như chất ức chế ăn mòn, lớp phủ chống ăn mòn hoặc bảo vệ catốt. Tuy nhiên, các nguy cơ tiềm ẩn đối với sức khỏe và môi trường của các chất ức chế ăn mòn vô cơ đã thúc đẩy việc giảm sử dụng các chất ức chế này và thay thế bằng các chất ít độc hại hơn và thân thiện với môi trường hơn [6], [7]. Gần đây, mối quan tâm ngày càng tăng đối với việc bảo tồn môi trường đã định hướng nhiều nỗ lực nghiên cứu hướng tới các chất ức chế ăn mòn thân thiện với môi trường. Đặc biệt, sự chú ý tập trung vào các hợp chất tự nhiên, chẳng hạn như chiết xuất thực vật có hoạt tính chống oxy hóa đối với các kim loại và hợp kim khác nhau. Một số nghiên cứu đã được thực hiện trên các chất ức chế ăn mòn “xanh” có thể thay thế cho các sản phẩm tổng hợp vì chúng thân thiện với môi trường, không độc hại, rẻ tiền, dễ kiếm và có thể tái tạo [8], [9]. Chúng giúp ức chế ăn mòn hiệu quả cho cốt thép, đặc biệt là trong nước biển.

Trong những năm qua, đã có nhiều nỗ lực to lớn trong việc tìm kiếm chất ức chế ăn mòn của các sản phẩm tự nhiên để giảm tốc độ ăn mòn của kim loại. Cây Diệp hạ châu (*Phyllanthus urinaria*) đã và đang được nghiên cứu và sử dụng cho lĩnh vực y sinh nhưng chưa có công bố đối với cây Diệp hạ châu dưới dạng chất ức chế ăn mòn và bảo vệ cho bất kỳ kim loại nào. Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá tác dụng ức chế ăn mòn cốt thép trong dung dịch 3,5% NaCl của dịch chiết Diệp hạ châu với các nồng độ khác nhau. Tốc độ ăn mòn được phân tích bằng phương pháp đường cong phân cực, phương pháp đo tổng trở và bề mặt của cốt thép được phân tích bằng phương pháp SEM và EDX.

2. Thực nghiệm

2.1. Điều chế dịch chiết và chuẩn bị dung dịch thử nghiệm



Hình 1. *Diệp hạ châu tươi (trái) và đã sơ chế (phải) làm mẫu thử nghiệm.*

Lá Diệp hạ châu (hình 1) được rửa sạch bằng nước máy, phơi khô dưới ánh mặt trời rồi xay nhỏ thành bột và hòa tan trong dung dịch ethanol với tỉ lệ 50 g/l. Sau đó được siêu âm trong 30

phút trên máy siêu âm, khuấy gia nhiệt dung dịch thu được ở 60 °C trong 2 giờ, dung dịch được lọc bã bằng bộ lọc chân không. Cuối cùng, thu được dung dịch có màu xanh đậm và bảo quản trong lọ thủy tinh sẫm màu làm dung dịch gốc [10]. Một phần dung dịch gốc được hòa tan trong dung dịch 3,5% NaCl với nồng độ 0,01% đến 0,2% làm dung dịch đo ăn mòn bằng phương pháp đường cong phân cực. Phần dung dịch gốc còn lại được hòa tan trong dung dịch vecni với nồng độ 0,01% đến 0,2%, sau đó được quét lên bề mặt điện cực trước khi đo tổng trở trong dung dịch 3,5% NaCl.

2.2. Chuẩn bị mẫu

Các mẫu thép CB3 (CB300) được chế tạo thành 2 dạng mẫu (hình 2).

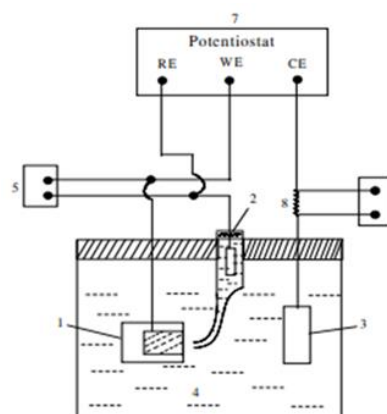


Hình 2. Mẫu thử nghiệm ăn mòn: (a) Dùng cho đo điện hóa; (b) Dùng cho phân tích bề mặt

Một là mẫu tròn được chế tạo thành điện cực làm việc trong các phép thử điện hóa (hình 2a) có diện tích bề mặt điện cực là 1 cm². Các điện cực được mài bằng giấy nhám từ thô đến mịn, rửa sạch, tẩy dầu mỡ, ổn định trong dung dịch nghiên cứu 30 phút trước khi đo điện hóa [11], [12].

Hai là mẫu tròn (hình 2b) dùng trong thử nghiệm theo phương pháp phân tích bề mặt sau khi ngâm trong dung dịch nghiên cứu 30 phút. Các mẫu này được tẩy dầu mỡ, tẩy gỉ hóa học, rửa sạch làm khô, bảo quản trong bình hút ẩm 12 giờ trước khi thử nghiệm [13], [14].

2.3. Phương pháp đo điện hóa



Hình 3. Sơ đồ phương pháp đo điện hóa

1. Điện cực làm việc (WE); 2. Điện cực so sánh (RE) - điện cực Ag/AgCl;
3. Điện cực phụ trợ (CE) bằng Pt; 4. Dung dịch chất điện li (dung dịch 3,5% NaCl);
- 5, 6. Các millivolt; 7. Potentionstat; 8. Điện trở mẫu có giá trị biết trước [15], [16]

Tất cả các phép đo điện hóa được thực hiện trên máy Autolab PGSTAT12/30/302 ở nhiệt độ phòng trong hệ ba điện cực bao gồm một điện cực so sánh (RE) Ag/AgCl, một điện cực phụ trợ (CE) Pt và một mẫu cốt thép làm điện cực làm việc (WE) (hình 3). Các phép đo đường cong phân cực được thực hiện trong dung dịch 3,5% NaCl có thể tích không đổi (200 ml) cùng với việc bổ sung dịch chiết Diệp hạ châu để có nồng độ khác nhau. Điện thế mạch hở (OCP) được ổn định

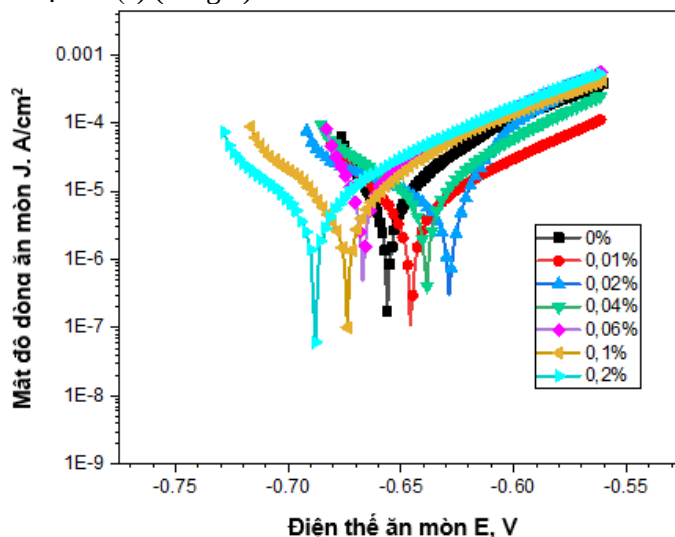
trong 30 phút trước khi thử nghiệm điện hóa. Các đường cong phân cực thu được ở tốc độ quét 0,1 mV/s trong dải điện thế ± 100 mV so với OCP để xác định các thông số động học và hiệu quả ức chế ăn mòn [17]. Phân tích phổ tổng trở điện hóa (EIS) được thực hiện tại OCP trong dải tần: 100 kHz $\div$ 0,1 Hz. Phổ EIS được trang bị bằng phần mềm Nova 2.1.5. Các mẫu cốt thép được sử dụng trong phương pháp EIS được phủ một lớp dung dịch vecni có chứa nồng độ dịch chiết khác nhau trước khi đo. Các thí nghiệm được lặp lại ba lần cho mỗi nồng độ dịch chiết [18], [19].

2.4. Phương pháp đánh giá bề mặt

Kính hiển vi điện tử quét (SEM) được sử dụng để phân tích cấu trúc vi mô của lớp bề mặt mẫu. Phương pháp phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX) được sử dụng để xác định thành phần hóa học của bề mặt mẫu trước và sau ăn mòn. Mẫu cốt thép được ngâm 30 phút trong cốc 100 ml chứa dung dịch 3,5% NaCl có và không có dịch chiết Diệp hạ châu trước khi tiến hành phân tích.

3. Kết quả và bàn luận

Phép đo đường cong phân cực được sử dụng để xác định các thông số của quá trình ức chế ăn mòn. Dữ liệu được ghi lại từ phép đo phân cực đã đánh giá mật độ dòng ăn mòn (J), thế ăn mòn (E), tốc độ ăn mòn. Việc bổ sung dịch chiết Diệp hạ châu vào dung dịch 3,5% NaCl đã làm giảm mật độ dòng ăn mòn hiện có (J) (bảng 1).



Hình 4. *Giản đồ đường cong phân cực của mẫu cốt thép trong dung dịch 3,5% NaCl có chứa nồng độ dịch chiết Diệp hạ châu khác nhau*

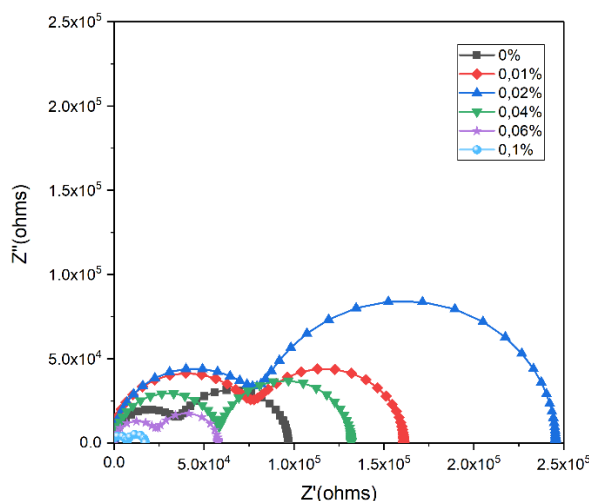
Hình 4 và Bảng 1 cho thấy, sự hấp phụ của dịch chiết làm thay đổi quá trình hòa tan anốt cũng như sự phát triển của hydro ở catốt, rõ ràng việc bổ sung dịch chiết Diệp hạ châu từ 0,01% đến 0,04% đã làm giảm mật độ dòng ăn mòn, tốc độ ăn mòn, tăng điện thế ăn mòn. Ngược lại, với việc bổ sung dịch chiết từ 0,06 đến 0,2%, làm tăng khả năng ăn mòn khi tăng mật độ dòng ăn mòn, tốc độ ăn mòn và giảm điện thế ăn mòn. Điều này có thể giải thích rằng dịch chiết Diệp hạ châu có tính axit ($\text{pH} = 4,5$) do trong thành phần dịch chiết Diệp hạ châu có chứa hàm lượng polyphenol 6,25% (đã được nhóm nghiên cứu khảo sát), khi bổ sung với nồng độ cao sẽ làm tăng khả năng bị ăn mòn của cốt thép. Phát hiện này cho thấy chiết xuất Diệp hạ châu có thể được phân loại là một loại chất ức chế hỗn hợp trong dung dịch nước biển.

Ảnh hưởng của nồng độ dịch chiết Diệp hạ châu đối với tổng trở của thép phủ một lớp vecni trong dung dịch 3,5% NaCl được trình bày dưới dạng đồ thị Nyquist trong hình 5. Đường kính của hình bán nguyệt của đồ thị Nyquist tăng cùng với khả năng chống ăn mòn tăng lên. Sự lõm xuống của các hình bán nguyệt có thể là do tính không đồng nhất và độ nhám bề mặt của các điện

cực cốt thép. Mô hình mạch tiêu chuẩn (hình 6) đã được sử dụng để phù hợp với dữ liệu phổ tổng trở thử nghiệm. Trong mạch này, R_s là điện trở của dung dịch, R_{ct} là điện trở chuyển điện tích, R_{lp} là điện trở của lớp phủ và C_{lp} là điện dung của lớp phủ.

Bảng 1. Thông số ăn mòn của cốt thép trong dung dịch 3,5% NaCl có chứa nồng độ dịch chiết Diệp hạ châu khác nhau

Nồng độ (%)	E (V)	J (A/cm ²)	Tốc độ ăn mòn (mm/năm)
0%	-0,655	$9,72 \cdot 10^{-6}$	0,113
0,01	-0,646	$7,86 \cdot 10^{-6}$	0,110
0,02	-0,629	$6,65 \cdot 10^{-6}$	0,077
0,04	-0,638	$7,60 \cdot 10^{-6}$	0,092
0,06	-0,666	$9,94 \cdot 10^{-6}$	0,118
0,1	-0,672	$1,02 \cdot 10^{-7}$	0,124
0,2	-0,689	$1,09 \cdot 10^{-7}$	0,130

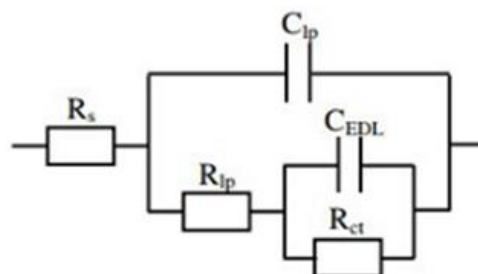


Hình 5. Phổ EIS của mẫu cốt thép được phủ một lớp vecni chứa nồng độ dịch chiết Diệp hạ châu khác nhau trong dung dịch 3,5% NaCl

Từ giản đồ này, có thể thấy rằng phản ứng trở kháng của kim loại tăng lên với nồng độ chất ức chế từ 0,01% đến 0,04% và giảm khi nồng độ chất ức chế từ 0,04% đến 0,08%. Quang phổ có dạng nén chứng tỏ màng đã mất tính ổn định cho phép dung dịch khuếch tán bên dưới màng gây ăn mòn dưới lớp sơn phủ và có thể tạo thành lớp sản phẩm ăn mòn. Các kết quả này phù hợp với kết quả đo độ phân cực.

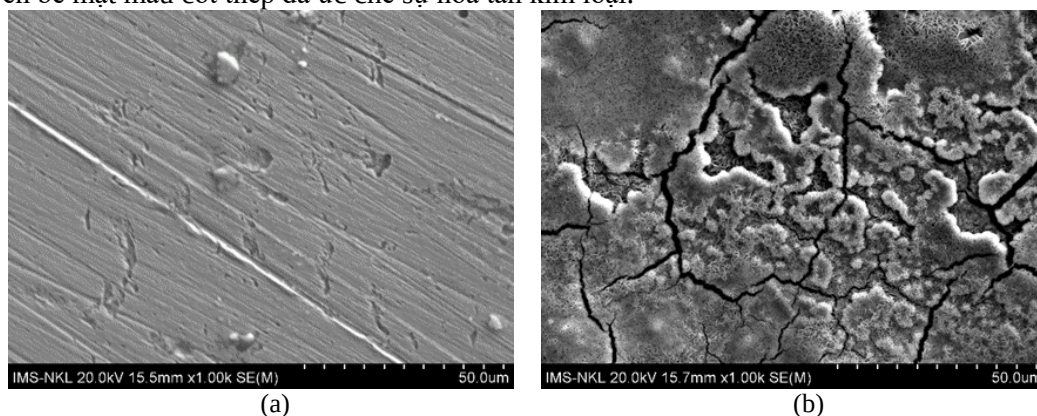
Kết hợp các phương pháp trên với phân tích hình thái và thành phần hóa học bề mặt mẫu. Sự hình thành màng bảo vệ bề mặt của chất ức chế trên bề mặt điện cực được phân tích bằng phương pháp SEM trên bề mặt điện cực. Hình 7 cho thấy các hình ảnh SEM được ghi lại đối với các mẫu cốt thép được ngâm trong 30 phút trong dung dịch 3,5% NaCl có và không có mặt 0,02% nồng độ dịch chiết. Quan sát ảnh SEM với độ phóng đại lớn (1.000x), trong dung dịch không có chất ức chế bề mặt thép tương đối nhẵn, phẳng và có những vết xước nhỏ (hình 7a). Tuy nhiên, với sự có mặt của chất ức chế (hình 7b), bề mặt thép được phủ một lớp màng hấp phụ mỏng tương đối kín. Bản chất bảo vệ của màng này được phản ánh trong các phép đo hiệu quả ức chế thu được từ các phương pháp điện hóa.

Phổ EDX được sử dụng để xác định các nguyên tố có mặt trên bề mặt điện cực sau khi tiếp xúc với dung dịch 3,5% NaCl. Hình 8 và Bảng 2 lần lượt trình bày phổ EDX và thành phần nguyên tố được ghi lại đối với các mẫu cốt thép tiếp xúc trong 30 phút trong dung dịch 3,5%



Hình 6. Mạch tương đương được sử dụng phù hợp với phổ EIS

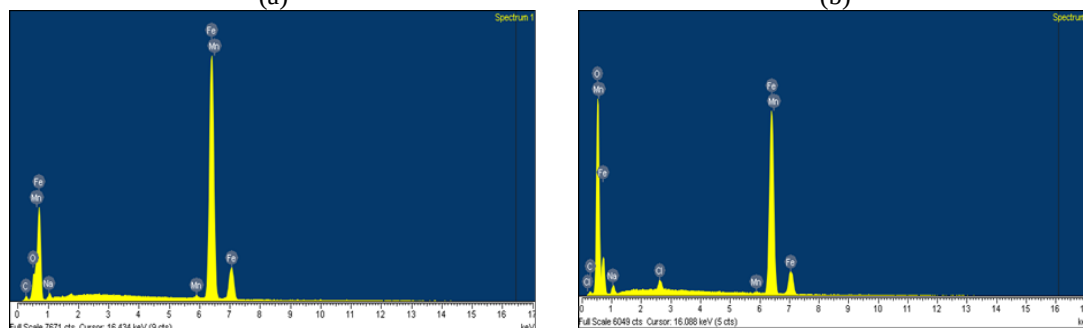
NaCl khi không có (cột A Bảng 2 và hình 8a) và có 0,02% dịch chiết Diệp hạ châu (cột B Bảng 2 và hình 8b). Phổ EDX cho thấy các đỉnh đặc trưng của một số nguyên tố cấu thành bề mặt mẫu cốt thép. Tuy nhiên, tín hiệu oxy được tăng cường đáng kể khi thêm dịch chiết Diệp hạ châu vào dung dịch 3,5% NaCl (từ 16,27% tăng lên 66,17%). Dữ liệu này cho thấy một lớp chứa các nguyên tử oxy đã bao phủ bề mặt điện cực. Lớp này chắc chắn là do chất ức chế vì sự gia tăng của tín hiệu oxy được quan sát thấy khi có mặt dịch chiết. Hình 8b cho thấy đỉnh Fe giảm đi đáng kể khi so với các nguyên tố có trên bề mặt mẫu chuẩn bị trong dung dịch 3,5% NaCl có chứa 0,02% dịch chiết. Sự giảm bớt của Fe xảy ra do màng chất ức chế đã bao phủ bề mặt của mẫu thép. Những kết quả này phù hợp với kết quả từ các phép đo phân cực, cho thấy rằng màng hấp phụ trên bề mặt mẫu cốt thép đã ức chế sự hòa tan kim loại.



Hình 7. Ảnh SEM của mẫu cốt thép trong: (a) 3,5% NaCl; (b) 3,5% NaCl với 0,02% dịch chiết Diệp hạ châu

Bảng 2. Thông số ăn mòn của cốt thép trong dung dịch 3,5% NaCl không có (A) và có chứa 0,02% dịch chiết Diệp hạ châu (B)

Nguyên tố	Khối lượng % (nguyên tử %)	
	A	B
O K	6,32 (16,27)	38,13 (66,17)
C K	4,45 (15,25)	1,36 (3,1)
Na K	2,48 (4,45)	2,58 (3,06)
Cl K		1,05 (0,81)
Mn K	0,73 (0,55)	0,38 (0,19)
Fe K	86,03 (63,48)	56,5 (27,66)
Tổng	100,00	100,00



Hình 8. Phổ EDX của mẫu cốt thép trong dung dịch: (a) 3,5% NaCl; (b) 3,5% NaCl và 0,02% dịch chiết Diệp hạ châu

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, lá cây Diệp hạ châu đã được chiết xuất thành công và được sử dụng như một chất ức chế ăn mòn cốt thép bê tông trong môi trường nước biển mô phỏng bằng cách sử dụng dung dịch 3,5% NaCl ở nhiệt độ phòng. Kết quả cho thấy dịch chiết Diệp hạ châu có thể được coi là một nguồn chất ức chế ăn mòn tương đối rẻ tiền, thân thiện với môi trường, có khả năng phân hủy sinh học và ức chế ăn mòn hiệu quả. Polyphenols có trong dịch chiết Diệp hạ châu được hấp phụ trên bề mặt cốt thép, tạo ra một màng phủ bảo vệ trong dung dịch 3,5% NaCl ngăn chặn hiệu quả sự ăn mòn của cốt thép. Các phép đo đường cong phân cực cho thấy rằng, sự hấp phụ đó ảnh hưởng đến cả phản ứng hòa tan kim loại ở anốt và phản ứng phát triển của hydro ở catốt. Kết quả nghiên cứu phân tích cơ chế ức chế ăn mòn đối với các dung dịch từ 0% đến 0,1% dịch chiết Diệp hạ châu đã cho thấy việc giảm đáng kể tốc độ ăn mòn, đặc biệt với việc bổ sung 0,02% dịch chiết Diệp hạ châu tốc độ ăn mòn giảm tới 32% so với khi không bổ sung dịch chiết. Việc lựa chọn dịch chiết Diệp hạ châu như một chất ức chế ăn mòn “xanh” có thể giảm thiểu sự ăn mòn của các công trình ven biển dưới tác động của môi trường biển. Hơn nữa, nghiên cứu khai thác ứng dụng của dịch chiết Diệp hạ châu là con đường bảo vệ ăn mòn bền vững trong ngành kỹ thuật hàng hải và các ngành có liên quan.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này nhận được kinh phí hỗ trợ của đề tài khoa học công nghệ cấp Thành phố Hải Phòng lĩnh vực Công nghiệp, Giao thông, Đô thị năm 2022.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] Q. Wang, X. Wu, H. Zheng, L. Liu, Q. Zhang, A. Zhang, Z. Yan, Y. Sun, Z. Li, and X. Li, “Evaluation for *Fatsia japonica* leaves extract (FJLE) as green corrosion inhibitor for carbon steel in simulated concrete pore solutions,” *Journal of Building Engineering*, vol. 63, 2023, Art. no.105568.
- [2] A.S. Abbas, É. Fazakas, and T.I. Török, “Corrosion studies of steel rebar samples in neutral sodium chloride solution also in the presence of a bio-based (green) inhibitor,” *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, vol. 7, no.1, pp. 38-47, 2018, doi: 10.17675/2305-6894-2018-7-1-4.
- [3] R. Anitha, S. Chitra, V. Hemapriya, I.-M. Chung, K. S. Hyun, and M. Prabakaran, “Implications of eco-addition inhibitor to mitigate corrosion in reinforced steel embedded in concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 213, pp. 246-256, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.046.
- [4] J. K. Das and B. Pradhan, “Experimental investigation on inhibiting compounds against steel corrosion in concrete admixed with different chloride salts,” *Materials and Structures*, vol. 56, no. 14, 2023, doi: 10.1617/s11527-023-02103-1.
- [5] J. O. Rivera-Corral, G. Fajardo, G. Arliguie, R. Orozco-Cruz, F. Deby, and P. Valdez, “Corrosion behavior of steel reinforcement bars embedded in concrete exposed to chlorides: Effect of surface finish,” *Construction and Building Materials*, vol. 147, pp. 815-826, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.186.
- [6] I. Pradipta, D. Kong, and J. B. L. Tan, “Natural organic antioxidants from green tea inhibit corrosion of steel reinforcing bars embedded in mortar,” *Construction and Building Materials*, vol. 227, 2019, Art. no. 117058, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117058.
- [7] I. Pradipta, D. Kong, and J. B. L. Tan, “Natural organic antioxidants from green tea form a protective layer to inhibit corrosion of steel reinforcing bars embedded in mortar,” *Construction and Building Materials*, vol. 221, pp. 351-362, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.006.
- [8] I. M. C. Ienașcu, A. Căta, A. A. Chis, M. N. Ștefănuț, P. Sfirloagă, G. Rusu, A. Frum, A. M. Arseniu, C. Morgovan, L. L. Rus, and C. M. Dobrea, “Some Brassicaceae Extracts as Potential Antioxidants and Green Corrosion Inhibitors,” *Materials*, vol. 16, no. 8, 2023, doi: 10.3390/ma16082967.
- [9] R. Shanmugapriya, M. Ravi, S. Ravi, M. Ramasamy, A. Maruthapillai, A. J. Selvi, “Electrochemical and Morphological investigations of *Elettaria cardamomum* pod extract as a green corrosion inhibitor for Mild steel corrosion in 1 N HCl,” *Inorganic Chemistry Communications*, vol. 154, 2023, Art. no. 110958, doi: 10.1016/j.inoche.2023.110958.

- [10] M. P. Casaletto, V. Figà, A. Privitera, M. Bruno, A. Napolitano, and S. Piacente, "Inhibitor of cor-ten steel corrosion by "green" extracts of *Brassica campestris*," *Corrosion science*, vol.136, pp. 16-18, 2018, doi: 10.1016/j.corsci.2018.02.059.
- [11] M. Yadav, S. Kumar, R.R. Sinha, I. Bahadur, and E.E. Ebenso, "New pyrimidine derivatives as efficient organic inhibitors on mild steel corrosion in acidic medium: Electrochemical, SEM, EDX, AFM and DFT studies," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 211, pp. 135-145, 2015, doi: 10.1016/j.molliq.2015.06.063.
- [12] Y. Liu, Z. Song, W. Wang, L. Jiang, Y. Zhang, M. Guo, F. Song, and N. Xu, "Effect of ginger extract as green inhibitor on chloride-induced corrosion of carbon steel in simulated concrete pore solutions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 214, pp. 298-307, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.299.
- [13] M. A. Amin, S. S. A. El-Rehim, E.E.F. El-Sherbini, and R. S. Bayoumi, "The inhibition of low carbon steel corrosion in hydrochloric acid solutions by succinic acid, Part I. Weight loss, polarization, EIS, PZC, EDX and SEM studies," *Electrochimica Acta*, vol. 52, pp. 3588-3600, 2007, doi: 10.1016/j.electacta.2006.10.019.
- [14] C. Kamal and M. G. Sethuraman, "Hydroclathrus clathratus marine alga as a green inhibitor of acid corrosion of mild steel," *Research chemical intermed*, vol.39, pp. 8-12, 2012, doi: 10.1007/s11164-012-0883-4.
- [15] C. Kamal and M. G. Sethuraman, "Kappaphycus alvarezii - A marine red alga as a green inhibitor for acid corrosion of mild steel," *Materials and Corrosion*, vol. 64, no. 9999, 2013, doi: 10.1002/maco.201307089.
- [16] X. S. Trinh, *Metals Corrosion and Protection*, Viet Nam National University, Ha Noi Publisher (In Vietnamese), vol. 8, pp. 149-153, 2006.
- [17] R. Rosliza and A. NurAshimah, "The Effectiveness of *Musa Paradisiaca* as Green Inhibitor for Mild steel in Marine Corrosion," *Journal of Physics*, vol. 1784, pp. 1-6, 2021, doi:10.1088/1742-6596/1874/1/012073.
- [18] M. Znini, L. Majidi, A. Bouyanzer, J. Paolini, J.M. Desjobert, J. Costa, and B. Hammouti, "Essential oil of *Salvia aucheri* mesatlantica as a green inhibitor for the corrosion of steel in 0.5 M H₂SO₄," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 5, pp. 467-474, 2012, doi: 10.1016/j.arabjc.2010.09.017.
- [19] H. A. Y. Al-Mashhdani, K. A. S. Al-Saadie, H. A. Abas, and D. Abdulkareem, "Cactus as a green inhibitor for the corrosion of carbon steel in seawater," *Physical Chemical an Indian Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 111-120, 2015.