

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO SƠN LÓT EPOXY CHỐNG RỈ SỬ DỤNG HẠT NANO SILICA MANG CHẤT ỨC CHẾ XANH AXIT 3,5 DINITROBENZOIC

STUDY ON THE FABRICATION OF ANTI-RUST EPOXY PRIMER USING SILICA NANOPARTICLES LOADED WITH THE GREEN INHIBITOR 3,5-DINITROBENZOIC ACID

Phạm Tiến Dũng¹, Lê Văn Huân², Nguyễn Thế Hữu²,
Nguyễn Tuấn Anh³, Nguyễn Thị Kim Thoa¹, Hà Mạnh Hùng^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huinh5804.2026.175>

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm mục đích chế tạo thành công sơn lót epoxy chống rỉ thân thiện môi trường bằng cách điều chế các hạt nano SiO₂ mang axit 3,5 dinitrobenzoic và sử dụng chúng như phụ gia nanocarrier ức chế xanh. Phân tích UV-vis và TGA đã khẳng định rằng các hạt nano SiO₂ hấp phụ chất ức chế ăn mòn xanh axit 3,5-dinitrobenzoic (nanocarrier SiO₂-DNBA) ở tỷ lệ SiO₂:DNBA = 4:1 đã được chế tạo thành công. Kết quả thử nghiệm độ bền cơ học cho thấy nhờ vai trò nano gia cường của nano-SiO₂, các tính chất cơ (độ cứng tương đối, độ bền mài mòn và độ bền va đập) của màng sơn lót epoxy chứa 2,5% phụ gia ức chế ăn mòn nanocarrier SiO₂-DNBA đã được tăng cường đáng kể. Phân tích tổng trở điện hóa (EIS) của lớp phủ sau 2 giờ và 30 ngày và thử nghiệm phun muối chỉ ra rằng việc thêm nanocarrier SiO₂-DNBA vào màng sơn lót epoxy làm tăng điện trở phân cực bằng cách giải phóng chất ức chế axit 3,5-dinitrobenzoic từ chất mang nano SiO₂, các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA không chỉ tăng cường hiệu quả chắn của lớp phủ epoxy mà còn ức chế, ngăn chặn các vết rỉ sét lan rộng ra xung quanh và ức chế ăn mòn thép trong thời gian tiếp xúc lên đến 30 ngày.

Từ khóa: Sơn lót epoxy, nano SiO₂, axit 3,5 dinitrobenzoic, chất ức chế ăn mòn xanh.

ABSTRACT

This study aims to successfully fabricate an environmentally friendly anti-rust epoxy primer by preparing the 3,5-dinitrobenzoic acid loaded SiO₂ nanoparticles and using them as a green inhibitor additive. UV-vis and TGA analysis confirmed that SiO₂ nanoparticles adsorbing the green corrosion inhibitor 3,5-dinitrobenzoic acid (SiO₂-DNBA nanocarrier) were successfully synthesized (SiO₂:DNBA ratio of 4:1). Thanks to the role of SiO₂ nanoparticles as a reinforcing nanofiller, mechanical test results showed both the relative hardness, abrasion resistance, and impact strength of the epoxy primer film containing 2.5% SiO₂-DNBA nanocarrier were significantly enhanced. Electrochemical impedance (EIS) and salt spray analysis indicated that adding SiO₂-DNBA nanocarriers into the epoxy primer film increased its polarization resistance by releasing the 3,5-dinitrobenzoic acid inhibitor from the SiO₂ nanocarrier. The SiO₂-DNBA nanocarriers not only enhanced the barrier effect of the epoxy coating but also inhibited and prevented rust spread and inhibited steel corrosion during 30 days of exposure.

Keywords: Epoxy primer, nano SiO₂, 3,5-dinitrobenzoic acid, green corrosion inhibitors.

¹Trường Đại học Mở - Địa chất

²Khoa Công nghệ Hóa, Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

*Email: hamanhhungmdc@gmail.com

Ngày nhận bài: 20/3/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Ăn mòn kim loại gây ra nhiều hệ lụy về kinh tế, môi trường và tiêu tốn tài nguyên [1]. Trong thực tế, các chất phụ gia ức chế ăn mòn thường được bổ sung trực tiếp vào môi trường ăn mòn hoặc được thêm vào công thức sơn để tăng cường khả năng bảo vệ chống ăn mòn. Khi có mặt chất ức chế ăn mòn, quá trình ăn mòn bị trì hoãn hoặc tốc độ oxy hóa kim loại bị chậm lại [2]. Khi chất ức chế bao phủ bề mặt nền kim loại sẽ ngăn chặn sự tấn công của các tác nhân ăn mòn [3] bằng cách giảm khả năng di chuyển của các ion kim loại thông qua hiệu ứng phân cực; làm cho bề mặt kim loại có điện trở cao hơn; và làm giảm sự khuếch tán của chất phản ứng đến bề mặt kim loại. Hoạt động của chất ức chế ăn mòn vô cơ có thể là catốt hoặc anốt trong khi chất ức chế ăn mòn hữu cơ có thể hoạt động như một chất hấp phụ hoặc như một sự kết hợp catốt-anốt. Chất ức chế hữu cơ chứa các dị nguyên tử như Oxy, Nitơ, Lưu huỳnh và Phốt pho có khả năng hấp phụ rất tốt trên bề mặt kim loại [4, 5].

Các chất ức chế độc hại như Cr(VI), muối nitrit ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ and NaNO_2) đã bị loại bỏ do ô nhiễm môi trường, thay vào đó, người ta đang nỗ lực phát triển các chất ức chế mới, hiệu quả và thân thiện với môi trường [6, 7]. Các chất ức chế này thường được gọi là "Chất ức chế thân thiện với môi trường" hoặc "Chất ức chế xanh".

Các chất ức chế chế ăn mòn xanh nanocarrier dựa trên các hạt nano oxit (SiO_2 , Fe_2O_3 , ZnO) và chất ức chế cerium nitrat đã được công bố [8-11]. Kết quả thực nghiệm từ thử nghiệm cơ học, thử nghiệm phun muối và phân tích Phổ trở kháng điện hóa (EIS) cho thấy các nanocarrier SiO_2 chứa Ce^{3+} ; Fe_2O_3 chứa Ce^{3+} , ZnO chứa Ce^{3+} hoạt động như các hạt nano gia cường cho các tính chất cơ và chất tăng cường hiệu suất chống ăn mòn của màng epoxy.

Các hợp chất hữu cơ chứa các nguyên tử dị loại như nitơ, lưu huỳnh, phốt pho và oxy nhờ có các liên kết đôi hoặc vòng thơm trong cấu trúc hóa học của chúng nên chúng hấp phụ rất tốt trên bề mặt kim loại [12]. Chúng phản ứng với các ion Fe^{2+} mới sinh trên bề mặt thép, tạo thành phức chất ức chế kim loại [13]. Axit 3,5-dinitrobenzoic (3,5-DNBA) có thể được sử dụng làm chất ức chế ăn mòn hữu cơ cho thép (trong môi trường axit: HCl hoặc H_2SO_4) bằng cách hấp phụ lên bề mặt, tạo ra một lớp bảo vệ trong môi trường axit. Là một chất ức chế ăn mòn, axit 3,5-dinitrobenzoic hoạt động như một chất ức chế hỗn hợp, thường làm giảm cả sự hòa tan anốt và sự khử catốt bằng cách tạo ra một lớp bảo vệ trên bề mặt kim loại. Người ta báo cáo rằng mặc dù bản thân 3,5-DNBA có khả năng chống ăn mòn, nhưng các dẫn xuất của nó (chẳng hạn như những chất được tổng hợp bằng

cách sử dụng các nguyên tử lưu huỳnh, nitơ và oxy) thường cho thấy hiệu quả ức chế cao hơn.

Kết quả thử nghiệm độ bền muối cho thấy các hạt nano silica mang chất ức chế axit 3,5-dinitrobenzoic có khả năng nâng cao hiệu quả chống ăn mòn của màng nhựa epoxy E44 [14]. Trong nghiên cứu này, sơn lót epoxy chống rỉ chứa các hạt nanocarrier silica mang chất ức chế xanh axit 3,5-dinitrobenzoic đã được chế tạo thành công. Khả năng chống ăn mòn của lớp phủ được đánh giá thông qua phương pháp phân tích phổ tổng trở điện hóa (EIS) và thử nghiệm phun muối nhằm xác định hiệu quả bảo vệ và độ bền của lớp phủ trong môi trường ăn mòn.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Nguyên liệu và hóa chất

Bột nano SiO_2 (độ tinh khiết 99,8%, kích thước hạt ~12nm, diện tích bề mặt 175 - 225m²/g) được mua từ Sigma-Aldrich. Axit 3,5-dinitrobenzoic (DNBA) (độ tinh khiết 99,8%) được mua từ Acros. Dung dịch nhựa epoxy D.E.R.TM 671-X75 (Dow), với hàm lượng chất không bay hơi là 74 - 76% trọng lượng, chứa 9 - 10% trọng lượng nhóm epoxide. Chất đóng rắn polyamid EPIKURE 3125 (Hexion) có giá trị amin là 330 - 360mgKOH/g. Dung môi toluen và xylen được mua từ Sigma-Aldrich.

2.2. Chuẩn bị phụ gia nanocarrier SiO_2 -DNBA

Cho 8g bột nano SiO_2 , 2g DNBA và 100ml toluen vào bình ba cổ dung tích 150ml. Hỗn hợp được dung siêu âm ở nhiệt độ phòng ($\leq 20^\circ\text{C}$) để đảm bảo các hạt nano SiO_2 và DNBA được phân tán đồng đều trong dung môi. Sau đó, hỗn hợp được đun nóng đến 90°C bằng bể cát trong 1 giờ đồng thời khuấy đều với tốc độ 120 vòng/phút để DNBA hòa tan và hấp phụ lên các hạt nano SiO_2 . Sau khi làm nguội hỗn hợp đến nhiệt độ phòng ($\leq 20^\circ\text{C}$), sản phẩm rắn được lọc và sấy khô ở 120°C trong 12 giờ để thu được các hạt nanocarrier SiO_2 -DNBA. Các mẫu khô được bảo quản trong bình hút ẩm.

2.3. Chuẩn bị các mẫu sơn epoxy chống rỉ chứa các phụ gia nanocarrier SiO_2 -DNBA

Tỷ lệ thành phần các mẫu sơn lót epoxy chống rỉ chứa phụ gia nanocarrier SiO_2 -DNBA trình bày trên bảng 1. Hàm lượng phụ gia nanocarrier SiO_2 -DNBA sử dụng là: 2,5%; Hàm lượng bột màu oxit sắt đỏ sử dụng là 50% (tính theo khối lượng nhựa rắn của nhựa epoxy và chất đóng rắn. Toluene và xylen được sử dụng để giảm độ nhớt của sơn và để thu được các mẫu sơn có hàm lượng phần rắn là khoảng 65%. Chất đóng rắn polyamid Epicure 3125 được trộn với nhựa epoxy der 671-X75 theo tỷ lệ 35/100 [14].

Bảng 1. Tỷ lệ các thành phần trong các công thức sơn lót epoxy chống rỉ (hàm lượng phần rắn 65%)

TT	Hóa chất	EP/Fe ₂ O ₃ -SiO ₂ -DNBA		EP/Fe ₂ O ₃	
		PKL	%	PKL	%
1	Nhựa Epoxy DER 671X75 (75%)	100	41,09	100	41,82
2	Chất đóng rắn polyamid Epicure 3125	35	14,38	35	14,63
3	Xylen	25,31	10,40	24,57	10,27
4	Toluen	25,31	10,40	24,57	10,27
5	Nanocarrier SiO ₂ -DNBA	2,75	1,13	0	0
6	Bột màu oxit sắt đỏ Fe ₂ O ₃	55	22,6	55	23

Ghi chú: PKL: Phần khối lượng

Các mẫu sơn lót có bột màu oxit sắt đỏ và hạt nanocarrier SiO₂-DNBA được chuẩn bị như sau:

a) Nghiền hỗn hợp base bột màu: cho bột oxit sắt màu nâu đỏ, 1/2 lượng nhựa epoxy và dung môi xylen và toluen cần dùng vào thùng máy nghiền và tiến hành nghiền trong 24 giờ để thu hỗn hợp base bột màu oxit sắt đỏ (Các mẫu sơn lót không có bột oxit sắt màu nâu đỏ không phải tiến hành công đoạn này);

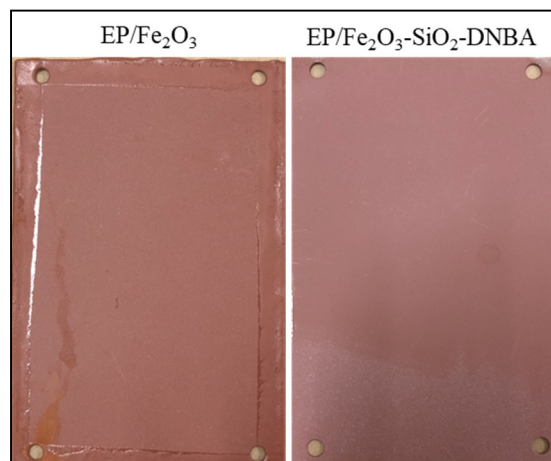
b) Phân tán các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA trong dung dịch nhựa epoxy: đầu tiên đổ 1/2 lượng dung môi xylen và toluen còn lại vào thùng máy khuấy, tiếp theo cho thêm các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA và khuấy ở vận tốc từ 100 - 200 vòng/phút trong 10 - 20 phút. Sau đó cho 1/2 lượng nhựa epoxy còn lại vào, nâng tốc độ khuấy lên 1200 - 1500 vòng/phút và duy trì ở vận tốc này trong 30 - 90 phút để thu được hỗn hợp các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA phân tán đồng đều trong dung dịch nhựa epoxy (Các mẫu sơn lót không chứa các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA không phải tiến hành công đoạn này).

c) Khuấy trộn hỗn hợp base bột màu với dung dịch nhựa epoxy chứa các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA: cho hỗn hợp base bột oxit sắt màu nâu đỏ thu được ở bước b vào và duy trì khuấy ở tốc độ này trong 60 phút thu được hỗn hợp thành phần A.

d) Khuấy trộn chất đóng rắn polyamid Epicure 3125 với thành phần A: cho chất đóng rắn polyamid Epicure 3125 vào thành phần A và khuấy ở vận tốc từ 100 - 200 vòng/phút trong 5 - 10 phút ngay trước khi chế tạo lớp phủ.

Các màng sơn nghiên cứu được tạo màng bằng cách phun (áp lực không khí 3 - 5atm) trên bề mặt các vật liệu nền (tấm kính thủy tinh, Teflon, tấm thép CT₃,...) tùy theo các tiêu chuẩn của phương pháp phân tích, thử nghiệm hay nghiên cứu. Mẫu được để khô tự nhiên trong 7 ngày trước khi thử nghiệm. Lớp sơn khô có độ dày trung bình

khoảng 25 ± 2μm. Hình 1 là ảnh chụp các tấm mẫu sơn nghiên cứu.



Hình 1. Hình ảnh các tấm mẫu sơn không chứa (EP/Fe₂O₃) và chứa 2,5% nanocarrier SiO₂-DNBA (EP/Fe₂O₃-SiO₂-DNBA)

2.4. Phương pháp phân tích và đánh giá

2.4.1. Nghiên cứu hình thái và quang phổ

Hình thái của các hạt nano SiO₂ và nanocarrier SiO₂-DNBA được phân tích trên thiết bị kính hiển vi điện tử truyền qua (HR-TEM) - JEM 2100 (JEOL, Nhật Bản). Kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FE-SEM, S 4800, Hitachi, Nhật Bản) được sử dụng để nghiên cứu hình thái của mẫu màng sơn lót epoxy chống rỉ.

Phân tích UV-Vis được thực hiện trên máy quang phổ GBC CINTRA 40 (Úc-Hoa Kỳ), để xác định độ hấp thụ của axit 3,5-dinitrobenzoic trên chất mang nano SiO₂.

2.4.2. Nghiên cứu phân hủy nhiệt

Hàm lượng của axit 3,5-dinitrobenzoic trong mẫu nanocarrier SiO₂-DNBA được xác định bằng phương pháp phân hủy nhiệt (TGA) trên thiết bị phân tích nhiệt (TGA, model TG209F1, NETZSCH, Đức), ở tốc độ gia nhiệt 10°C/phút trong môi trường không khí, từ nhiệt độ phòng đến 900°C.

2.4.3. Thử nghiệm độ bền cơ học

Các thử nghiệm độ bền cơ học của màng sơn: Khả năng chống va đập được đánh giá bằng thiết bị Erichsen 304 (Đức) (tiêu chuẩn ISO 6272). Độ cứng tương đối được đánh giá bằng dụng cụ đo độ cứng con lắc (Erichsen, model 299/300, Đức) (tiêu chuẩn ISO 1522:2006). Khả năng chống mài mòn được thử nghiệm theo phương pháp thử nghiệm độ bền mài mòn cát rơi (tiêu chuẩn ASTM D968). Độ bám dính cross-cut của màng sơn được xác định bằng dụng cụ Elcometer Cross Hatch Cutter (Anh) (tiêu chuẩn ISO 2409:2013). Tất cả các thí nghiệm được đo lặp lại 3 lần.

2.4.4. Thử nghiệm độ bền mù muối

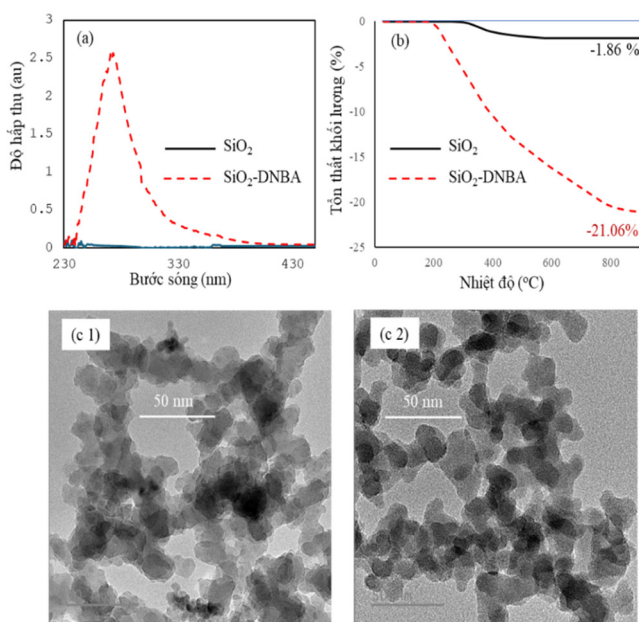
Thử nghiệm độ bền mù muối màng sơn trong thiết bị Q-FOG CCT 600 (tiêu chuẩn JIS H 8502:1999). Độ pH của dung dịch: $6,5 \div 7,2$; Nồng độ dung dịch NaCl phun 5%; Áp suất phun 1,0atm; ở nhiệt độ $35 \div 37^\circ\text{C}$; Tốc độ phun: 2mL/giờ/80cm².

2.4.5. Phân tích phổ tổng trở điện hóa

Các mẫu màng sơn phân tích được ngâm trong dung dịch NaCl 3,5%. Phân tích phổ tổng trở điện hóa (EIS) được thực hiện tại thời điểm sau 2 giờ và sau 30 ngày ngâm bằng thiết bị Biologic (Model VSP-300, Pháp). Cấu hình ba điện cực đã được sử dụng với điện cực làm việc (thép phủ sơn), điện cực tham chiếu (điện cực calomel bão hòa, SCE) và điện cực đối (điện cực bạch kim). Các phép đo EIS được thực hiện bằng cách phân cực thép phủ ở $\pm 10\text{mV}$ xung quanh điện thế mạch hở (OCP) với tần số dao động từ 100kHz đến 10mHz (5 điểm trên mỗi thập phân).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích các đặc trưng của hạt nanocarrier SiO₂-DNBA



Hình 2. Phổ UV-Vis của các hạt nano SiO₂ và các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA (a), giản độ TGA của nano-SiO₂ và các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA (b) và hình ảnh phân tích TEM của hạt nano SiO₂ (c1) và các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA (c2)

Kết quả phân tích UV-Vis, TGA và TEM của các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA được trình bày trên hình 1. Các hạt nano SiO₂ (không có DNBA) cũng được phân tích để tham chiếu.

Như có thể thấy trên hình này, SiO₂ nguyên chất không có sự hấp thụ đặc trưng trong khoảng 200 -

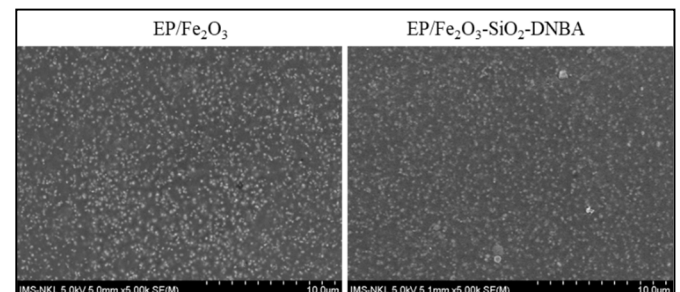
400nm. Tuy nhiên, phổ của các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA cho thấy một đỉnh hấp thụ giữa 280 - 320nm, đặc trưng cho các nhóm NO₂ của axit 3,5-dinitrobenzoic. Đây là minh chứng sự hiện diện của axit 3,5-dinitrobenzoic trong mẫu. Do đó có thể khẳng định rằng các hạt nano SiO₂ hấp thụ DNBA đã được điều chế thành công.

Kết quả phân tích TGA cho thấy, có sự giảm khối lượng đáng kể trong khoảng 200 - 900°C đối với các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA, tổng lượng giảm khối lượng là 20,39% trong khi chỉ giảm khối lượng nhẹ (1,68%) ở các hạt nano SiO₂. Sự giảm khối lượng này có thể là do sự bay hơi của hơi ẩm trong mẫu, sự khử hydroxyl của các nhóm OH trên bề mặt các hạt nano SiO₂ và sự thăng hoa và phân hủy nhiệt của DNBA.

Ảnh phân tích TEM cho thấy hầu như không quan sát thấy sự khác biệt lớn giữa các nano SiO₂ ban đầu nanocarrier SiO₂-DNBA. Điều này có thể do axit 3,5-dinitrobenzoic hấp phụ rất tốt trên các hạt nano SiO₂.

3.2. Phân tích hình thái cấu trúc màng sơn

Ảnh phân tích FE-SEEM của màng sơn lót epoxy chống rỉ không chứa (EP/Fe₂O₃) và chứa 2,5% nanocarrier SiO₂-DNBA (EP/Fe₂O₃-SiO₂-DNBA) trình bày trên hình 3. Từ hình này cho thấy các màng sơn EP/Fe₂O₃ và EP/Fe₂O₃-SiO₂-DNBA đều có cấu trúc khá đồng nhất. Điều này cho thấy các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA phân tán tốt trong màng sơn.



Hình 3. Ảnh phân tích FESEM của sơn lót epoxy chống rỉ không chứa (EP/Fe₂O₃) và chứa 2,5% nanocarrier SiO₂-DNBA (EP/Fe₂O₃-SiO₂-DNBA) (Độ phóng đại = 5 000 lần)

3.3. Thử nghiệm độ bền cơ học

Kết quả thử nghiệm một số tính chất cơ học của sơn lót epoxy chống rỉ có và không có 2,5% phụ gia ức chế ăn mòn nanocarrier SiO₂-DNBA được trình bày trên bảng 2.

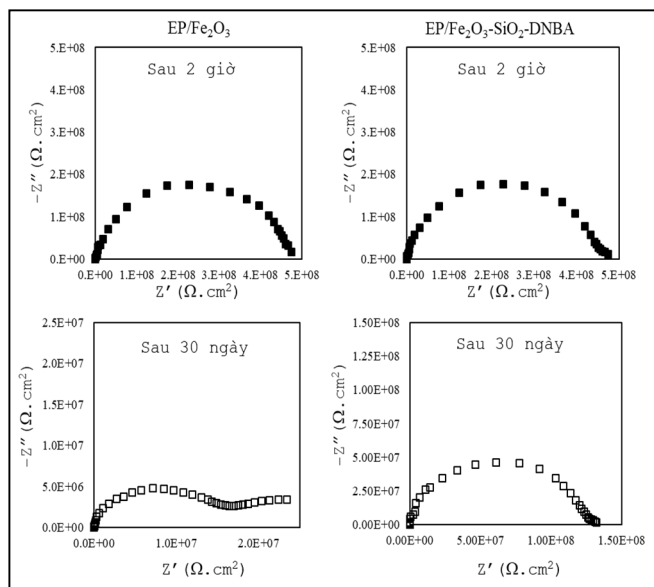
Từ bảng 2 cho thấy, với sự có mặt của các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA, các tính chất cơ của màng sơn được cải thiện rõ rệt, cụ thể độ cứng tương đối, độ bền mài mòn và độ bền va đập của màng sơn tăng từ 0,71, 125,8L/mil và 170Kg.cm lên 0,75, 131,3L/mil và 175Kg.cm. Điều này được giải thích nhờ vai trò chất độn nano gia cường của nano-SiO₂ [8].

Bảng 2. Một số tính chất cơ học của màng sơn lót epoxy chống rỉ không có (EP/Fe₂O₃) và có 2,5% phụ gia ức chế ăn mòn nanocarrier SiO₂-DNBA (EP/Fe₂O₃-SiO₂-DNBA)

TT	Tính chất	EP/Fe ₂ O ₃	EP/Fe ₂ O ₃ -SiO ₂ -DNBA
1	Độ bám dính (điểm)	0	0
2	Độ cứng tương đối	0,71 ± 0,04	0,75 ± 0,04
3	Độ bền mài mòn cát rơi, L/mil	125,8 ± 4	131,3 ± 4
4	Độ bền va đập, Kg.cm	170 ± 4	175 ± 4

3.4. Thử nghiệm khả năng bảo vệ chống ăn mòn

3.4.1. Phân tích phổ tổng trở điện hóa



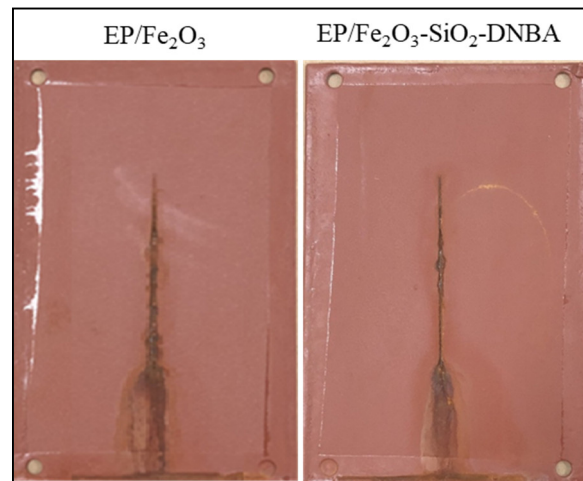
Hình 4. Phổ EIS của màng sơn lót epoxy chống rỉ không chứa (EP/Fe₂O₃) và chứa 2,5% nanocarrier SiO₂-DNBA (EP/Fe₂O₃-SiO₂-DNBA) sau 2 giờ và 30 ngày ngâm trong dung dịch muối

Hình 4 trình bày kết quả phân tích EIS của các màng sơn lót epoxy không chứa (EP/Fe₂O₃) và chứa 2,5% chất ức chế ăn mòn nanocarrier SiO₂-DNBA (EP/Fe₂O₃-SiO₂-DNBA) sau 2 giờ và 30 ngày ngâm trong dung dịch muối. Từ hình này cho thấy sau 2 giờ ngâm, phổ trở kháng của màng sơn lót epoxy không có chất ức chế ăn mòn nanocarrier SiO₂-DNBA (EP/Fe₂O₃) vẫn chưa hình thành hoàn toàn vòng cung điện dung đầu tiên. Điều này cho thấy đối với màng epoxy không có chất ức chế, dung dịch điện phân vẫn chưa thấm qua lớp phủ đến bề mặt thép. Tuy nhiên, phổ trở kháng của màng sơn lót epoxy chứa 2,5% chất ức chế ăn mòn nanocarrier SiO₂-DNBA đã hình thành vòng cung đầu tiên. Sau 30 ngày ngâm, trở kháng của màng sơn EP/Fe₂O₃ có xu hướng giảm mạnh và dần dần hình thành bán nguyệt thứ hai. Vòng bán nguyệt thứ hai ở tần số thấp này là đặc trưng của các quá trình ăn mòn xảy ra tại giao diện kim loại trong khi trở kháng của màng sơn EP/Fe₂O₃-SiO₂-DNBA chỉ giảm nhẹ và chưa hình

thành bán nguyệt thứ hai. Điều này cho thấy màng sơn chứa chất ức chế nanocarrier SiO₂-DNBA có khả năng tự phục hồi, do đó tăng cường đáng kể khả năng bảo vệ chống ăn mòn cho thép carbon.

3.4.2. Thử nghiệm độ bền muối

Hình 5 là hình ảnh các mẫu màng sơn không chứa (EP/Fe₂O₃) và chứa 2,5% chất ức chế ăn mòn nanocarrier SiO₂-DNBA (EP/Fe₂O₃-SiO₂-DNBA) sau 30 ngày thử nghiệm.



Hình 5. Ảnh chụp các mẫu sơn lót epoxy chống rỉ không chứa (EP/Fe₂O₃) và chứa 2,5% nanocarrier SiO₂-DNBA (EP/Fe₂O₃-SiO₂-DNBA) sau 30 ngày thử nghiệm muối

Từ hình 5 cho thấy sự khác biệt rõ rệt mức độ ăn mòn của các mẫu màng sơn. Như có thể thấy các vết rỉ sét lan rộng và lớn hơn nhiều ở bề mặt mẫu màng sơn không có hạt nanocarrier SiO₂-DNBA, trái ngược hoàn toàn với bề mặt của các mẫu màng sơn có chứa 2,5% chất ức chế ăn mòn nanocarrier SiO₂-DNBA, vết rỉ sét tại vết khắc hầu như không phát triển lan rộng và có xu hướng được làm đầy. Như vậy việc bổ sung 2,5% chất ức chế ăn mòn nanocarrier SiO₂-DNBA làm tăng mật độ của lớp phủ và cải thiện khả năng ngăn chặn sự khuếch tán của các ion Cl⁻. Hơn nữa, lớp phủ thể hiện khả năng tự chữa lành, vì các chất ức chế nanocarrier SiO₂-DNBA tạo điều kiện thuận lợi để hình thành một lớp thụ động ổn định tại các vị trí khuyết tật. Do đó, màng sơn lót epoxy chứa 2,5% chất ức chế nanocarrier SiO₂-DNBA vẫn có khả năng bảo vệ chống ăn mòn tốt sau 30 ngày (720 giờ) thử nghiệm phun muối.

4. KẾT LUẬN

Trong công trình này, Sơn lót epoxy chống rỉ thân thiện môi trường dựa trên các hạt nanocarrier SiO₂-DNBA đã được được chế tạo thành công và đánh giá các tính chất cơ lý và khả năng bảo vệ chống ăn mòn thép các bon. Kết quả phân tích UV-vis và TGA đã khẳng định các

hạt nano SiO_2 hấp phụ axit 3,5-dinitrobenzoic (nanocarrier SiO_2 -DNBA) ở tỷ lệ SiO_2 :DNBA = 4:1 đã được chế tạo thành công. Các thử nghiệm độ bền cơ cho thấy sự hiện diện của các hạt nanocarrier SiO_2 -DNBA, nhờ vai trò chất độn nano gia cường của nano- SiO_2 , làm tăng độ cứng tương đối, độ bền mài mòn và độ bền va đập của màng sơn lót epoxy từ 0,71, 125,8L/mil và 170Kg.cm lên 0,75, 131,3L/mil và 175Kg.cm. Phổ tổng trở điện hóa (EIS) của màng sơn sau 2 giờ và 30 ngày ngâm trong dung dịch 5% NaCl chỉ ra rằng việc thêm các hạt nanocarrier SiO_2 -DNBA vào màng sơn lót epoxy làm tăng điện trở phân cực bằng cách giải phóng chất ức chế axit 3,5-dinitrobenzoic từ chất mang nano SiO_2 . Thử nghiệm trong môi trường phun muối cho thấy nanocarrier SiO_2 -DNBA không chỉ tăng cường hiệu quả chắn của lớp phủ epoxy mà còn ức chế, ngăn chặn các vết rỉ sét lan rộng ra xung quanh và ức chế ăn mòn thép trong thời gian tiếp xúc lên đến 30 ngày.

LỜI CẢM ƠN

Công trình này được hoàn thành từ kết quả nghiên cứu thuộc đề tài NCKH&CN cấp Bộ GD&ĐT - Mã số: B2024-MDA-02.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Darya Puzikova, Gulnir Khussurova, Xeniya Leontyeva, Oleg Kholkin, Nail Kenzin, Murat Zhurinov, Svetlana Peshaya, "Review of organic corrosion inhibitors: application with respect to the main functional group," *Journal of Saudi Chemical Society*, 29, 20, 2025. <https://doi.org/10.1007/s44442-025-00021-1>
- [2]. Chitra S., Parameswari K., Sivakami C., Selvaraj A., "Sulpha Schiff Bases as corrosion inhibitors for mild steel in 1M sulphuric acid," *Chem. Eng. Res. Bull.*, 14, 1, 1-6, 2010. <https://doi.org/10.3329/ceerb.v14i1.3766>
- [3]. Bentiss F., Lagrenee M., Traisnel M., Hornez J.C., "The corrosion inhibition of mild steel in acidic media by a new triazole derivative," *Corrosion Sci.*, 41, 4, 789-803, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00153-X](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00153-X)
- [4]. Verma C., Ebenso E.E., Quraishi M.A., Rhee K.Y., "Phthalocyanine, naphthalocyanine and their derivatives as corrosion inhibitors: a review," *J. Mol. Liq.*, 334, 116441, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116441>
- [5]. Shwetha KM, B.M. Praveen, Bharath K. Devendra, "A review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment," *Results in Surfaces and Interfaces*, 16, 100258, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100258>
- [6]. Marcelin S., and Pebere N., "Synergistic effect between 8-hydroxyquinoline and benzotriazole for the corrosion protection of 2024 aluminium alloy: A local electrochemical impedance approach," *Corros. Sci.*, 101, 66-74, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.09.002>
- [7]. Ramenzanzadeh B., Vakili H., Amini R., "The effects of addition of poly(vinyl)alcohol (PVA) as a green corrosion inhibitor to the phosphate

conversion coating on the anticorrosion and adhesion properties of the epoxy coating on the steel substrate," *Appl. Surf. Sci.*, 327, 174-181, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.11.167>

- [8]. Nguyen T.V., Tran D.L., Nguyen T.A., Nguyen T.T.H., Dao P.H., Mac V.P., Do M.T., Nguyen T.M., Dang T.M.L., "Ce-loaded silica nanoparticles in the epoxy nanocomposite coating for anticorrosion protection of carbon steel," *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 69, 5, 514-523, 2022. <https://doi.org/10.1108/ACMM-03-2022-2629>

- [9]. Nguyen The Huu, Dam Thi Tam, Do Truc Vy, Nguyen Tuan Anh, Le Trong Lu, Tran Dai Lam, Nguyen Thien Vuong, "Effect of silane-modified SiO_2 @ Ce^{3+} nanoparticles on the mechanical property and anti-corrosion for steel of the epoxy coating," *Vietnam J. Chem.*, 61, 53, 109-115, 2023. <https://doi.org/10.1002/vjch.202300060>

- [10]. Thien Vuong Nguyen, Vy Do Truc, Tuan Anh Nguyen, Dai Lam Tran, "Cationic UV-cured epoxy coating with inhibitor-loaded nanoparticles: photoinitiated cationic polymerization, mechanical properties and corrosion protection of steel," *J Coat Technol Res*, 21, 1113-1124, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.002>

- [11]. Nguyen T.V., Do Truc V., Nguyen T.A., Tran D.L., "Synergistic effect of oxide nanoparticles and inorganic inhibitor on anti-corrosion performance of epoxy coating," *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 71, 3, 225-240, 2024. <https://doi.org/10.1108/ACMM-06-2023-2835>

- [12]. A. S. Yaro, A. A. Khadom, R. K. Wael, "Apricot juice as green corrosion inhibitor of mild steel in phosphoric acid," *Alexandria Engineering Journal*, 52, 129-135, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.11.001>

- [13]. A. Kadhim, A. Al-Okbi, D. Jamil, A. Qussay, A. Al-Amieri, T. Gaaz, A. A. H. Kadhum, A. Mohamad, "Experimental and theoretical studies of benzoxazines corrosion inhibitors," *Results in Physics*, 7, 4013-4019, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.10.027>

- [14]. Hoàng Thị Hương Thủy, Ngô Xuân Lương, Nguyễn Văn Nghĩa, Đỗ Trúc Vy, Hà Mạnh Hùng, "Tính chất cơ và khả năng bảo vệ chống ăn mòn thép carbon của màng sơn epoxy chứa nanosilica hấp thụ 3,5-dinitrobenzoic acid," *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Hồng Đức*, 72c, 101-107, 2025. <https://doi.org/10.70117/hdujs.72.03.2025.704>

- [15]. Huỳnh Lê Huy Cường, Trần Vĩnh Diệu, Nguyễn Đắc Thành, "Nghiên cứu ảnh hưởng của cao su lỏng CTBN đến tính chất cơ học của màng phủ polyme trên cơ sở nhựa epoxy DER 671X75 đóng rắn bằng epicure 3125," *Tạp chí Hóa học*, 53, 4, 535-540, 2015. <https://doi.org/10.15625/0866-7144.2015-00176>

AUTHORS INFORMATION

**Pham Tien Dung¹, Le Van Huan², Nguyen The Huu²,
Nguyen Tuan Anh³, Nguyen Thi Kim Thoa¹, Ha Manh Hung¹**

¹Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

²Faculty of Chemical Technology, Hanoi University of Industry, Vietnam

³Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam