

NGHIÊN CỨU TỔNG HỢP VÀ NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG CHỐNG ĂN MÒN CỦA MÀNG POLYPYRROLE PHA TẠP ANION SALISYLATE TRÊN NỀN THÉP CARBON

SYNTHESIS AND CORROSION RESISTANCE STUDY OF SALISYLATE ANION-DOPED POLYPYRROLE FILMS ON CARBON STEEL SUBSTRATES

Lê Văn Khoa^{1,*}
Nguyễn Thị Hương¹
Nguyễn Thị Ngọc Mai¹
Hoàng Thị Hương Thủy¹

¹ Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Hồng Đức
*Tác giả liên hệ; Email: levankhoe@hdu.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.70117/hdujs.3030-4628.90.09.2026.1416>

Ngày nộp bài: 25/05/2026; Ngày gửi phản biện: 27/05/2026; Ngày duyệt đăng: 25/09/2026

Từ khóa:

*Polypyrrole, bảo vệ
chống ăn mòn, thép
carbon thấp*

TÓM TẮT

Màng polypyrrole pha tạp salicylate (PPy/salicylate) được tổng hợp trên nền thép carbon bằng phương pháp điện hóa dòng không đổi trong dung dịch pyrrole 0,1 M chứa sodium salicylate ở các nồng độ 0,05-0,15 M. Màng thu được được đặc trưng bằng SEM, FTIR và TGA, đồng thời đánh giá khả năng bảo vệ chống ăn mòn trong dung dịch NaCl 3% bằng OCP, phân cực Tafel và EIS. Kết quả SEM cho thấy màng PPy/salicylate hình thành tương đối đồng đều trên bề mặt thép; FTIR xác nhận sự xuất hiện của các tín hiệu đặc trưng của PPy và salicylate. TGA cho thấy mẫu N2 có khối lượng còn lại ở 700 °C cao nhất, đạt 28,00%. Kết quả điện hóa cho thấy N2 duy trì thời gian bảo vệ OCP dài nhất, đạt 25,42 giờ, và có đáp ứng trở kháng tốt hơn, trong khi N1 có dòng ăn mòn thấp nhất theo Tafel, đạt $5,22 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. Các kết quả chứng minh salicylate ảnh hưởng đáng kể đến sự hình thành và hiệu quả bảo vệ của màng PPy trên thép carbon.

Keywords:

*Polypyrrole,
corrosion protection,
low-carbon steel.*

ABSTRACT

Salicylate-doped polypyrrole films (PPy/salicylate) were synthesized on carbon steel substrates by constant-current electrochemical methods in a 0.1 M pyrrole solution containing sodium salicylate at concentrations of 0.05-0.15 M. The resulting films were characterized by SEM, FTIR, and TGA, and their corrosion protection in 3% NaCl solution was evaluated using OCP, Tafel polarization, and EIS. SEM results showed that the PPy/salicylate films formed relatively uniformly on the steel surface; FTIR confirmed the presence of

characteristic signals of PPy and salicylate. TGA showed that the N2 sample had the highest residual mass at 700 °C, reaching 28.00%. Electrochemical results showed that N2 maintained the longest OCP protection time, reaching 25.42 hours, and had a better impedance response, while N1 had the lowest corrosion current according to Tafel, reaching $5.22 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$. The results demonstrate that salicylate significantly affects the formation and protective efficacy of PPy films on carbon steel.

1. MỞ ĐẦU

Tất cả các sản phẩm kim loại đặc biệt là Thép carbon trong quá trình sử dụng đều tiếp xúc với không khí ẩm ướt hoặc các môi trường gây ăn mòn mạnh khác như nước biển, acid,... Vì vậy, quá trình ăn mòn trên bề mặt kim loại luôn xảy ra. Do đó, việc kiểm soát và hạn chế ăn mòn kim loại có ý nghĩa và tầm quan trọng rất lớn trên toàn thế giới, nhất là ở Việt Nam với điều kiện khí hậu nóng ẩm, môi trường biển giàu ion chloride và nhu cầu sử dụng thép carbon rộng rãi trong xây dựng, giao thông, cơ khí và công nghiệp ven biển.

Có nhiều phương pháp bảo vệ kim loại được sử dụng như phương pháp bảo vệ cathode, bảo vệ anode, sử dụng các chất ức chế ăn mòn, tạo thành chất không tan trên bề mặt kim loại và làm thành lớp thụ động, sơn lớp phủ hữu cơ lên bề mặt kim loại. Thực tế lớp phủ chromium đặc biệt là các hợp chất Cr(VI) có tác dụng ức chế ăn mòn rất tốt [1]-[3]. Tuy nhiên đa số hợp chất chứa chromium trong lớp phủ khi bị rửa trôi đều gây ra thiệt hại và ảnh hưởng nghiêm trọng đến môi trường điều đó đã khuyến khích các nhà khoa học không ngừng nghiên cứu để tìm ra các hợp chất chống ăn mòn thân thiện với môi trường hơn. Nhiều công trình nghiên cứu cho thấy polymer dẫn làm giảm tốc độ ăn mòn kim loại [4]-[11]; tuy nhiên, thời gian bảo vệ kim loại của polymer dẫn còn ngắn nên vấn đề đặt ra cần phải tăng thời gian bảo vệ của màng polymer dẫn, đặc biệt khi xuất hiện những khuyết tật trong màng polymer. Việc sử dụng các anion pha tạp để tăng khả năng bảo vệ của màng polymer dẫn đã được biết trong nhiều nghiên cứu về sử dụng polymer dẫn trong việc bảo vệ ăn mòn kim loại. Chất pha tạp được đưa vào màng polymer bằng phương pháp điện hóa hoặc hóa học. Quá trình giải phóng anion pha tạp ra khỏi màng polymer trong quá trình khử của màng làm cho polymer có đặc tính tự sửa chữa [12]-[16].

Trong bài báo này Màng polypyrrole (ppy) với việc pha tạp anion salicylate được nghiên cứu ứng dụng làm màng phủ bảo vệ chống ăn mòn thép carbon. Màng thu được được đặc trưng bằng ảnh SEM (SEM), phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) và phân tích nhiệt trọng lượng (TGA), đồng thời đánh giá khả năng bảo vệ chống ăn mòn trong dung dịch NaCl 3% bằng thế mạch hở theo thời gian (OCP), độ phân cực điện hóa (Tafel) và phổ trở kháng điện hóa (EIS). Khi có mặt anion salicylate, màng polymer có độ bám dính cao và hình thành trực tiếp trên bề mặt thép carbon mà không có sự hòa tan kim loại.

2. PHƯƠNG PHÁP/ VẬT LIỆU NGHIÊN CỨU

2.1. Hoá chất

Monomer pyrrole (Py) (98%), sodium salicylate (99.5%) Trước mỗi thí nghiệm pyrrole được chưng cất lại nhằm loại bỏ oligomer và các sản phẩm oxy hóa, sau đó bảo quản trong chai tối màu ở 4°C trước khi sử dụng. Những hóa chất còn lại được sử dụng mà không cần tinh chế thêm. Dung dịch điện phân được chuẩn bị bằng nước cất hai lần.

2.2. Chuẩn bị màng

Nền thép carbon thấp (LCS) (TISCO Com., Thái Nguyên, Việt Nam, Mn: 0,62%; C: 0,16%; Si: 0,15%; S: 0,042%; và P: 0,010%, theo GOST 001-2001- Tiêu chuẩn TCVN 1656-75) được sử dụng có bề dày 0,8 mm và cắt thành từng miếng với các kích thước 2 cm × 2 cm; 2 cm × 5 cm. Chúng được đánh bóng cơ học với các loại giấy SiC khác nhau (600, 800, 1000, 1200, 1500 grit) và tẩy nhòen trong bể siêu âm trong 5 phút bằng acetone, rửa sạch bằng nước cất và cuối cùng làm khô ở nhiệt độ phòng dưới dòng khí N₂ trong buồng kín. Máy đo điện thế/điện lượng Zennium (Đức) đã được sử dụng. Các thí nghiệm điện hóa được thực hiện trong một tế bào ba điện cực thông thường với lưới Pt làm điện cực đối và điện cực bão hòa bạc (SSE) làm điện cực tham chiếu. Diện tích điện cực làm việc khoảng 1,1 cm². Dung dịch điện phân được chuẩn bị như trình bày trong Bảng 1. Một màng PPy được hình thành trên bề mặt thép mềm với dòng điện không đổi ở mức 1mA cm⁻² trong 60 phút. Sau khi tổng hợp, màng PPy được rửa nhiều lần bằng nước cất và sấy khô ở 50°C trong điều kiện chân không.

Bảng 1. Thành phần dung dịch polymer hóa pha tạp salicylate trên nền thép carbon

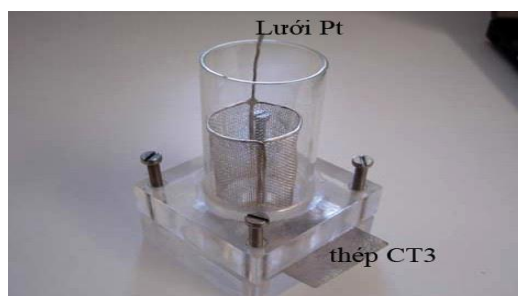
TT	Mẫu điện phân	Sodium salicylate (M)	Pyrrole (M)	Mật độ dòng (mA/cm ²)
1	N1	0,05	0,1	1
2	N2	0,10	0,1	1
3	N3	0,15	0,1	1

2.3. Nghiên cứu đặc tính của màng PPy

Phổ EDX và Ảnh SEM của mẫu được chụp trên thiết bị: SEM- Hitachi-4800 (Nhật Bản), Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) của các mẫu được quét từ 16 đến 32 lần trong vùng 4000 - 500 cm⁻¹ trên máy IR Prestige - 21, hãng Shimadzu (Nhật Bản), phân tích nhiệt trọng lượng (TGA) được thực hiện bằng máy Ghimashu-60H với tốc độ quét 10°C min⁻¹ trong điều kiện khí quyển.

2.4. Thử nghiệm bảo vệ chống ăn mòn

Đường cong OCP, Tafel và phổ trở kháng điện hóa (EIS) được thử nghiệm trong dung dịch NaCl 3% trên Zennium (Zachner, Đức). Các phép đo EIS được thực hiện trên màng PPy ở các điện thế DC khác nhau (sau đây gọi là Edc) bằng cách áp dụng dòng điện xoay chiều 5 mV vào điện thế DC ở các tần số từ 100 kHz đến 10 mHz tốc độ quét 0.5-0.1mV/s, khoảng thế -0.8-0,4 V, thời gian ổn định 30 phút. Dụng cụ đo tính chất điện hóa được trình bày ở Hình 1.



Hình 1. Dụng cụ đo tính chất điện hóa của màng PPy

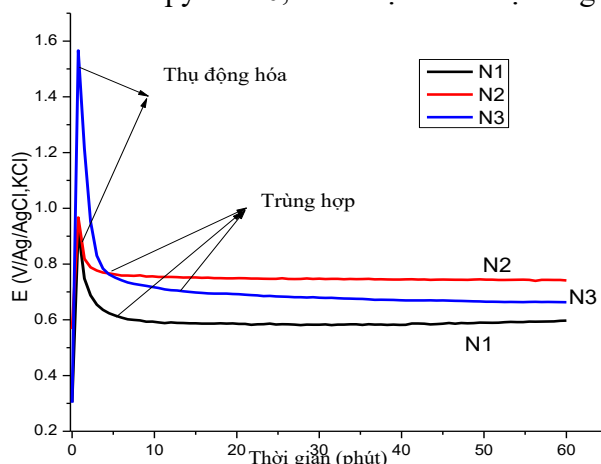
Dụng cụ cũng gồm 2 phần được kẹp chặt với nhau bởi 4 vít kim loại ở 4 góc. Ở giữa là điện cực làm việc. Bề mặt điện cực làm việc khoảng $0,5\text{cm}^2$, được làm kín bằng miếng đệm silicon. Một ống thủy tinh một đầu được gắn vào phía trên để chứa dung dịch điện li. Một cái lưới bằng Pt được sử dụng làm điện cực đối. Điện cực so sánh vẫn là điện cực $\text{Ag}/\text{AgCl}(\text{KCl})$.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tổng hợp điện hóa màng PPy/salicylate

Màng PPy tổng hợp bằng phương pháp điện hóa của các mẫu N1, N2, N3 được trình bày ở Hình 2.

Sự biến đổi thế theo thời gian của màng PPy pha tạp salicylate (trên thép carbon) được tổng hợp ở mật độ dòng điện $1\text{mA}/\text{cm}^2$ trong dung dịch chứa nồng độ sodium salicylate khác nhau và monomer pyrrole $0,1\text{M}$ được biểu thị trong Hình 2.

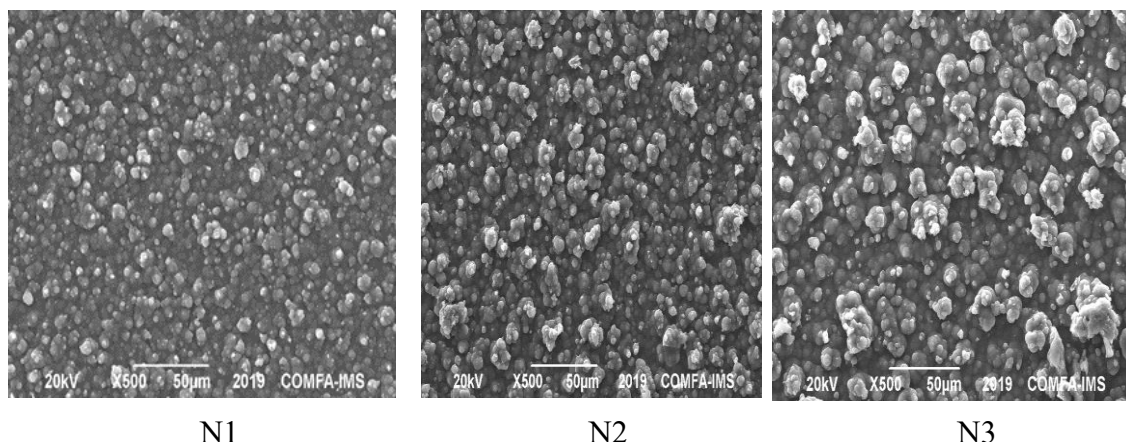


Hình 2. Sự biến đổi thế theo thời gian của quá trình tổng hợp PPy trên nền thép carbon của các mẫu N1, N2, N3

Có thể thấy khả năng trùng hợp màng pyrrole ở các mẫu N1, N2, N3 có sự khác biệt giá trị điện thế. Mẫu N2 thể hiện điện thế cao hơn các mẫu khác, gần $0,75\text{V}$ (so với Ag/AgCl). Điều này có thể được giải thích là do sự có mặt của anion salicylate, lớp thụ động trên thép đủ mỏng để bảo vệ cho nền thép nhưng không ức chế quá trình tổng hợp tạo màng của pyrrole. Salicylate trong chất điện phân có tác dụng tốt đối với thép thụ động.

3.2. Đặc trưng hình thái, cấu trúc và độ bền nhiệt của màng PPy/salicylate

3.2.1. Hình thái bề mặt màng PPy/salicylate

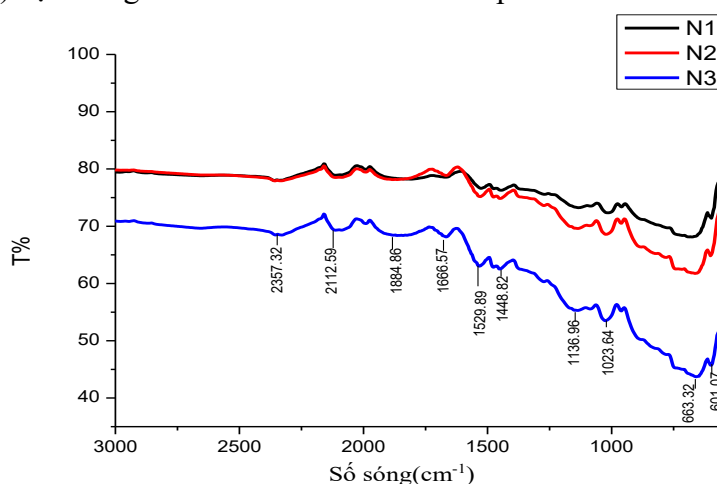


Hình 3. Ảnh SEM của màng PPy/ salicylate trên nền thép carbon

Ảnh SEM của màng PPy thu được dưới tác dụng tĩnh điện (1 mA.cm^{-2}) trong thời gian 60 phút trên mẫu thép carbon. Màng PPy tổng hợp rất mỏng (bề dày khoảng $50 \mu\text{m}$), mịn, đen và đồng nhất. Điều này có thể được nhìn thấy từ các ảnh SEM trong Hình 3. Màng PPy trên thép carbon thu được có cấu trúc súp lơ khá điển hình, tương tự như các công bố khác [17][18].

3.2.2. Phổ FTIR của màng PPy/ salicylate

Màng PPy pha tạp sodium salicylate sau khi tổng hợp đã xác định bằng phổ FTIR để phát hiện các nhóm chức có trong PPy, khẳng định sự tồn tại của PPy. Phổ FTIR quan sát được của các mẫu pha tạp anion salicylate cho thấy: N1, N2, N3 có dạng và vị trí phổ tương tự nhau. Các đỉnh ở khoảng 1646 cm^{-1} (N1), 1667 cm^{-1} (N2), 1667 cm^{-1} (N3) đặc trưng cho liên kết của $\text{C}=\text{O}$ của phân tử sodium salicylate.



Hình 4. Phổ FTIR của mẫu N1, N2, N3

Phổ FTIR của các mẫu: N1, N2, N3 có các đỉnh ở $1524 - 1531 \text{ cm}^{-1}$, đặc trưng cho $\nu_{\text{C}=\text{C}}$ thơm, $\nu_{\text{C}=\text{N}}$. Ngoài ra, các đỉnh ở $1448 - 1451 \text{ cm}^{-1}$ đặc trưng cho dao động của liên kết N – H ($\delta_{\text{N}-\text{H}}$) trong phân tử pyrrole hoặc các dao động của O – H ($\delta_{\text{O}-\text{H}}$) trong phân tử sodium salicylate. Đỉnh ở $1016 - 1023 \text{ cm}^{-1}$ là điển hình cho dao động hóa trị C-O. Kết quả phân tích phổ FTIR của các mẫu được trình bày ở Bảng 2.

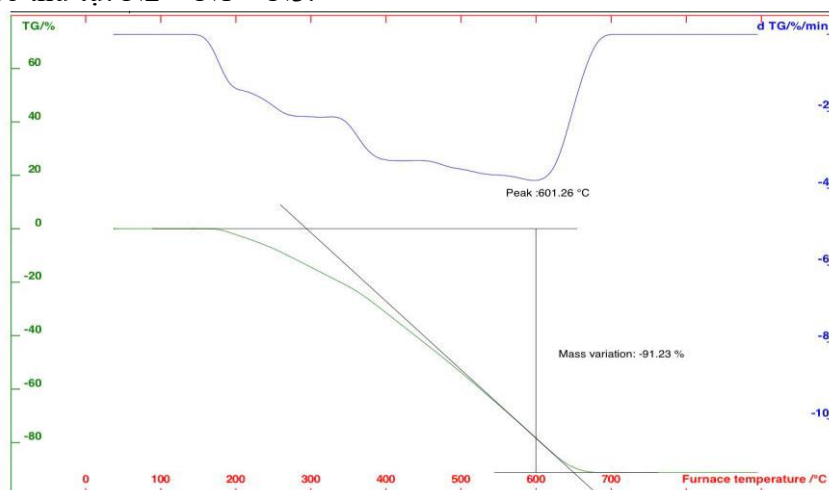
Bảng 2. Phân tích phổ FTIR của các chất

Vân phổ	N1 (cm^{-1})	N2 (cm^{-1})	N3 (cm^{-1})
$\nu_{\text{C}=\text{O}}$	1646	1667	1666
$\nu_{\text{C}=\text{C aromatic, C}=\text{N}}$	1524	1531	1529
$\delta_{\text{N}-\text{H}}$	1451	1449	1448
$\nu_{\text{C}-\text{O}}$	1016	1023	1023

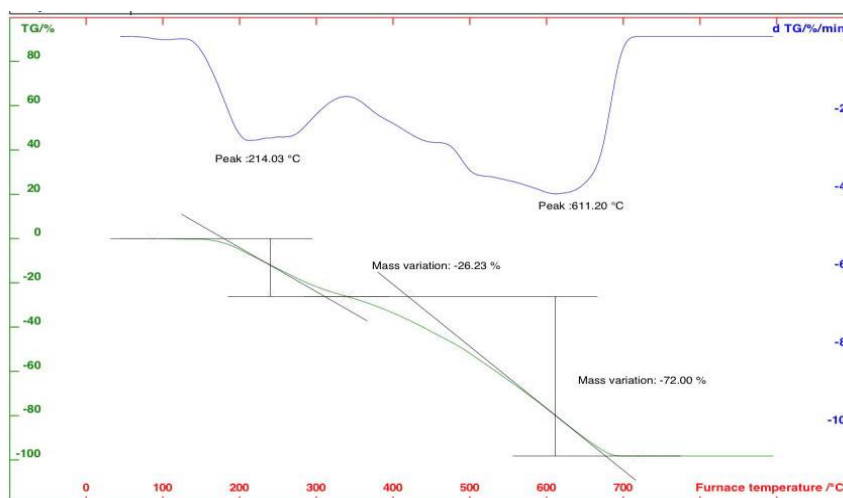
Phân tích phổ FTIR các mẫu N1 - N3 cho thấy ngoài các tín hiệu đặc trưng của PPy còn có các tín hiệu phổ đặc trưng của sodium salicylate. Điều này chứng tỏ đã xảy ra quá trình pha tạp anion salicylate.

3.2.3. Độ bền nhiệt của màng PPy/ salicylate

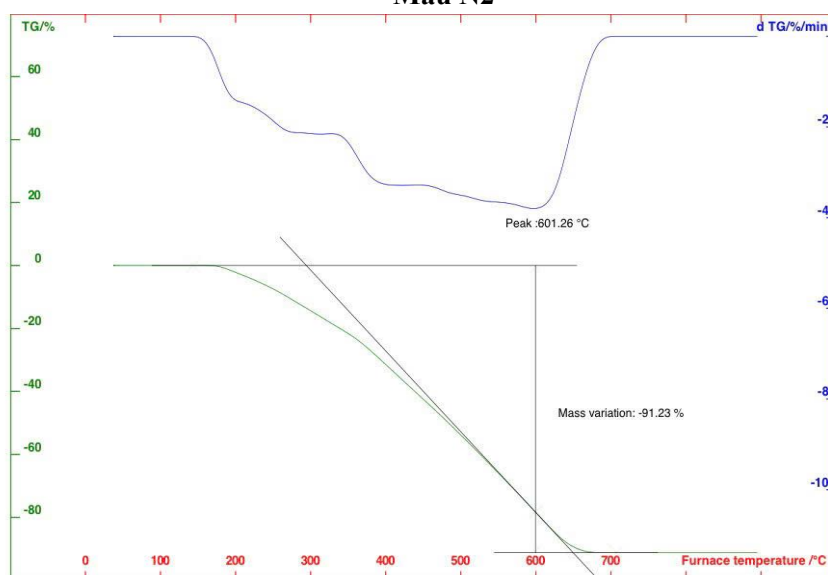
Hình 5 hiển thị kết quả phân tích nhiệt TGA của các mẫu N1, N2, N3. Dưới 120°C , sự giảm khối lượng do nước bên trong mẫu bay hơi. Trong khoảng $200-500^\circ\text{C}$, sự phân hủy PPy của mẫu tạo ra sự giảm khối lượng lớn quan sát được trên đường TGA. Trong khoảng nhiệt độ này, khối lượng của các mẫu N1 - N3 giảm lần lượt là 31,46, 26,23, 30,96 % khối lượng, chứng tỏ màng PPy đã bị phân hủy. Khi nâng nhiệt độ lên gần 700°C , các mẫu N1 - N3 bị phân hủy từ 72 đến 91,23% về khối lượng. Các đỉnh DTG chính, tương ứng với nhiệt độ phân hủy mạnh nhất, xuất hiện tại khoảng 601°C đối với N1, 611°C đối với N2 và 578°C đối với N3. Như vậy độ bền nhiệt được sắp xếp theo thứ tự: $\text{N2} > \text{N1} > \text{N3}$.



Mẫu N1



Mẫu N2



Mẫu N3

Hình 5. Phân tích TGA của mẫu N1, N2, N3

Bảng 3. Kết quả phân tích TGA của các mẫu N1, N2, N3.

Mẫu	Mất khối lượng (%) ≤ 200°C	Mất khối lượng (%) ≤ 200°C - 500°C	Tổng mất khối lượng (%) 700 °C	Khối lượng còn lại ở (%) 700 °C	T đỉnh DTG chính (°C)
N1	2,19	31,46	91,23	8,77	601
N2	4,95	26,23	72	28	611
N3	4,96	30,96	89,71	10,29	578

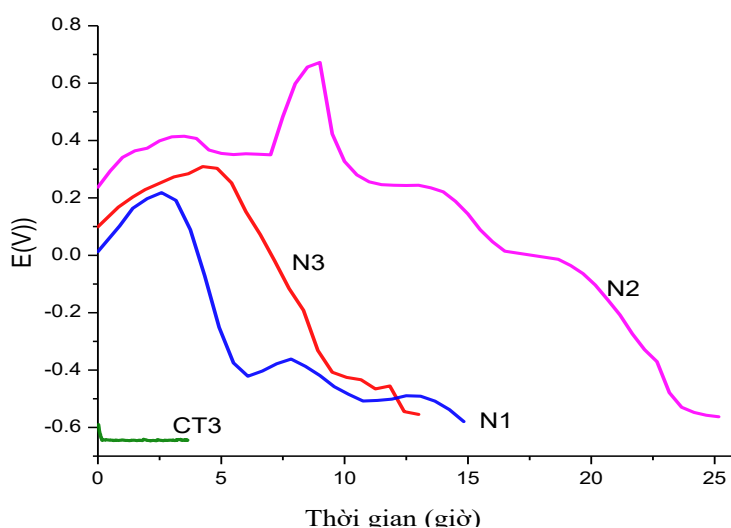
Từ bảng phân tích trên cho thấy ở 700°C N2 ổn định nhất, khối lượng PPy còn lại 28% khối lượng màng, trong khi 2 mẫu còn lại chỉ còn 10,29 và 8,77% khối lượng

màng. Từ kết quả TGA thấy được sự tác động của lớp PPy lên bề mặt thép là khác nhau, hay đã có sự ảnh hưởng của nồng độ salicylate pha tạp lên màng PPy.

3.3. Khảo sát khả năng bảo vệ chống ăn mòn

3.3.1. Sự biến thiên thế mạch hở của màng PPy/salicylate

Để nghiên cứu khả năng chống ăn mòn màng PPy/salicylate trên nền thép carbon, các phép đo thời gian OCP được tiến hành trong dung dịch sodium chloride 3% làm môi trường ăn mòn. Sự thay đổi của OCP được trình bày trong Hình 6 và Bảng 4.



Hình 6. OCP của mẫu N1, N2, N3

Bảng 4. Thế mạch hở OCP và thời gian bảo vệ của mẫu N1, N2, N3

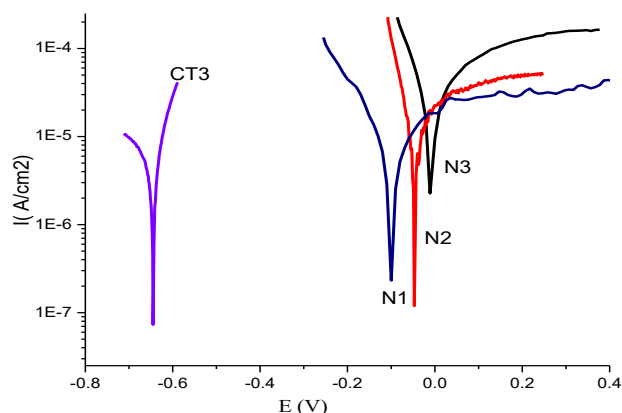
Mẫu	Thế bắt đầu (V)	Thế kết thúc (V)	Thời gian bảo vệ (giờ)
Thép	-0,573	-0,645	0
N1	0,022	-0,576	14,82
N2	0,247	-0,554	25,42
N3	0,1	-0,557	12,98

Các mẫu N1, N2 và N3 có xu hướng biến thiên OCP tương tự ở giai đoạn đầu, nhưng khác biệt rõ về thời gian duy trì thế dương và tốc độ suy giảm OCP. Trong khoảng thời gian 3 giờ đầu, OCP dịch chuyển về phía dương, xa hơn so với thế ăn mòn của thép carbon. Điều này chứng tỏ việc pha tạp sodium salicylate đã làm tăng khả năng bảo vệ thép. Sau đó, OCP của N1 và N3 đồng thời giữ ở điện thế dương và sau đó giảm xuống thế ăn mòn của thép. OCP của N2 được duy trì trong thời gian dài trong giai đoạn thứ hai. Điều đó có nghĩa là nồng độ sodium salicylate đã tác động đến khả năng bảo vệ thép của màng PPy. Thậm chí ở mẫu N2 OCP còn chuyển sang hướng tích cực hơn [19-21]. Sau gần 26 giờ, màng PPy của mẫu N2 không còn khả năng bảo vệ thép nữa.

Có thể kết luận rằng màng PPy chứa 0,1 M sodium salicylat đã làm tăng khả năng bảo vệ của màng PPy trên thép carbon.

3.3.2. Đường Tafel của màng PPy/salicylate

Mẫu thép carbon phủ màng PPy/salicylate được đo độ phân cực điện hóa (đường Tafel) trong dung dịch sodium chloride 3% cho kết quả như Hình 7 và Bảng 5.



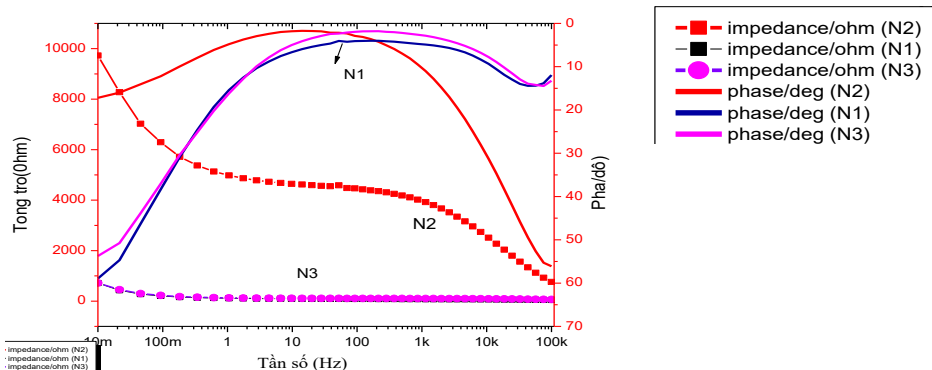
Hình 7. Đường cong phân cực trong dung dịch sodium chloride 3% của thép carbon và các mẫu N1, N2, N3

Tất cả các mẫu N1, N2, N3 đều có thể ăn mòn dương hơn mẫu thép carbon trong dung dịch sodium chloride 3%. Điều này chứng tỏ lớp phủ PPy tổng hợp trong dung dịch sodium salicylate có khả năng chống ăn mòn và bảo vệ nền thép. Như vậy, nghiên cứu điện hóa đã chứng minh cả 3 màng PPy tổng hợp trong sodium salicylate hình thành trên nền thép đều cho thấy khả năng ức chế ăn mòn tốt cho thép. Từ kết quả đo mạch hở OCP, đường cong phân cực I/E ta nhận thấy lớp phủ PPy tổng hợp trong dung dịch sodium salicylate ở nồng độ 0,1 M mẫu N1, N2 có kết quả chống ăn mòn tốt hơn mẫu N3 và thép CT3. Điều này cũng chứng minh vai trò quan trọng của salicylate anion trong việc ức chế ăn mòn và bảo vệ thép.

Bảng 5. Thế và dòng ăn mòn của các mẫu CT3, N1, N2, N3

	CT3	N1	N2	N3
I_{corr} (A/cm ²)	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$5,22 \cdot 10^{-6}$	$9,84 \cdot 10^{-6}$	$3,03 \cdot 10^{-5}$
E_{corr} (V)	-0,57	-0,1	-0,05	-0,01

3.3.3. Phổ trở kháng điện hóa EIS của màng PPy/salicylate



Hình 8. Phổ EIS của mẫu N1, N2, N3 trong dung dịch sodium chloride 3%

Hình 8 thể hiện kết quả EIS của N1, N2, N3 trong dung dịch sodium chloride 3% được đo ở điện thế nghỉ. Phổ trở kháng thu được của màng polymer có thể được chia thành ba vùng: vùng 1 (tần số cao > 1 kHz) giá trị trở kháng chủ yếu liên quan đến điện trở dung dịch điện ly R_s . Góc pha gần như bằng không. Điện trở của chất điện phân khoảng 50 Ω . Vùng 2 (tần số trung bình) hiển thị các đặc tính của màng polymer. Màng PPy hoạt động như lớp phủ dẫn điện/bán dẫn có đáp ứng điện dung và điện trở. Trở kháng của màng ở vùng này càng cao thì tác dụng bảo vệ của màng càng cao. Vùng 3 (tần số thấp) đại diện cho tương tác polymer/chất nền. Có điện dung của lớp kép và điện trở truyền điện tích của tương tác.

Kết quả trở kháng các mẫu ở tần số thấp như sau: N1 khoảng 1.500-2.000 Ω , N2 khoảng 8.000-8.500 Ω , N3 khoảng 500-700 Ω . Rõ ràng là N2 có trở kháng cao hơn N1, N3 ở vùng 2. Nồng độ sodium salicylate đã ảnh hưởng đến khả năng chống ăn mòn của PPy. Kết quả EIS tương tự với kết quả khảo sát phân cực và OCP.

4. KẾT LUẬN

Màng PPy/salicylate đã được tổng hợp thành công trên nền thép carbon bằng phương pháp điện hóa trong dung dịch pyrrole 0,1 M chứa sodium salicylate ở các nồng độ khác nhau. Kết quả SEM cho thấy màng PPy hình thành trên bề mặt thép có cấu trúc đặc trưng của polypyrrole. Phổ FTIR xác nhận sự xuất hiện của các tín hiệu đặc trưng của PPy và salicylate, cho thấy anion salicylate đã tham gia vào quá trình pha tạp màng. Phân tích TGA cho thấy nồng độ salicylate ảnh hưởng đến độ ổn định nhiệt của màng, trong đó mẫu N2 có khối lượng còn lại ở 700°C cao nhất, đạt 28,00%.

Các kết quả điện hóa trong dung dịch NaCl 3% cho thấy màng PPy/salicylate có khả năng cải thiện khả năng bảo vệ thép carbon. Kết quả OCP cho thấy mẫu N2 duy trì trạng thái bảo vệ trong thời gian dài nhất, đạt 25,42 giờ. Phổ EIS cũng cho thấy N2 có trở kháng cao hơn trong vùng tần số trung bình, phản ánh khả năng chắn điện ly tốt hơn. Tuy nhiên, kết quả phân cực Tafel cho thấy mẫu N1 có dòng ăn mòn thấp nhất, đạt $5,22 \times 10^{-6}$ A/cm², tương ứng hiệu suất bảo vệ khoảng 94,78%.

Như vậy, salicylate đóng vai trò quan trọng trong quá trình hình thành và cải thiện hiệu quả bảo vệ của màng PPy trên nền thép carbon. Xét tổng hợp các kết quả OCP, EIS, Tafel và TGA, mẫu N2 với nồng độ sodium salicylate 0,1 M có thể được xem là mẫu có hiệu quả bảo vệ tốt nhất trong điều kiện khảo sát.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] O. Gharbi, S. Thomas, C. Smith and N. Birbilis, "Chromate replacement: what does the future hold?", *npj Mater Degrad*, 2, 1-8, 2018.
- [2] R.L. Twite and G.P. Bierwagen, "Review of alternatives to chromate for corrosion protection of aluminum aerospace alloys", *Prog. Org. Coat.*, 33 (2), 91-100, 1998.

- [3] M.W. Kendig and R.G. Buchheit, “Corrosion inhibition of aluminum and aluminum alloys by soluble chromates, chromate coatings, and chromate-free coatings”, *Corros.*, 59 (5), 379-400, 2003.
- [4] A. El Jaouhari, A.Chennah, S.Ben Jaddi, H.Ait Ahsaine, Z.Anfar, Y.Tahiri Alaoui, Y.Naciri, A.Benlhachemi and M.Bazzaoui, “Electrosynthesis of Zn phosphate-PPy coatings for improved corrosion resistance of steel”, *Surfaces and Interfaces*, 15, 224-231, 2019.
- [5] Hà Mạnh Hùng, Đỗ Thị Minh Phượng, Lê Minh Đức, Trần Vĩnh Diệu và Vũ Quốc Trung, “Tổng hợp và nghiên cứu khả năng bảo vệ chống ăn mòn thép CT3 của polypyrrol trong môi trường nước biển”, *Tạp chí Hóa học*, T.51(2AB), 271-276, 2013.
- [6] D.E. Tallman, G. Spinks, A. Dominis and G.G. Wallace, “Electroactive conducting polymers for corrosion control: Part 1. General introduction and a review of non-ferrous metals”, *J. Solid State Electrochem.*, 6,73-84, 2002.
- [7] N. Wint, A. Bennett, G. Williams and H.N. McMurray, “The effect of phase continuity on the cathodic delamination resistance of polyaniline based coatings” *J. Electrochem. Soc.*, 165 (13), C890-C899, 2018.
- [8] P.P. Deshpande, N.G. Jadhav, V.J. Gelling and D. Sazou, “Conducting polymers for corrosion protection: a review”, *J. Coat. Technol. Res.*, 11 (4), 473-494, 2014.
- [9] F. Gao, J. Mu, Z. Bi, S. Wang and Z. Li, “Recent advances of polyaniline composites in anticorrosive coatings: A review”, *Prog. Org. Coat.*, 151, 106071, 2021.
- [10] S.A. Umoren and M.M. Solomon, “Protective polymeric films for industrial substrates: A critical review on past and recent applications with conducting polymers and polymer composites/nanocomposites”, *Prog. Mater. Sci.*, 104, 380-450, 2019.
- [11] D. Sazou and P.P. Deshpande, “Conducting polyaniline nanocomposite-based paints for corrosion protection of steel”, *Chem. Pap.*, 71 (2):459-487, 2017.
- [12] Yunxiao Liu, Guoshuai Liu, Han Wang, Peng Wu, Qun Yan and Dimitris V.Vayenas, “Elongation the duration of steel anode with polypyrrole modification during the electrocoagulation treatment process of electroplating wastewater”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2):104969, 2021.
- [13] Ha Manh Hung, Duong Khanh Linh, Nguyen Thuy Chinh, Le Minh Duc and Vu Quoc Trung, “Improvement of the corrosion protection of polypyrrole coating for CT3 mild steel with 10-camphorsulfonic acid and molybdate as inhibitor dopants”, *Progress in Organic Coatings*, Vol.131, 407-416, 2019.
- [14] Maryam Kahvazi Zadeh, Mahdi Yeganeh, Mohammadrez, Tavakoli Shoushtari and Amirhossein Esmaeilkhanian, “ Corrosion performance of polypyrrole-coated metals: A review of perspectives and recent advances”, *Synthetic Metals*, 274, 116723, 2021.

- [15] Y Yin, M Prabhakar, P Ebbinghaus, CC da Silva and M Rohwerder, “Neutral inhibitor molecules entrapped into polypyrrole network for corrosion protection”, *Chemical Engineering Journal*, Vol.440, 135739, 2022.
- [16] Lại Thị Hoan và Trần Thúy Nga, “Nghiên cứu sự ảnh hưởng của dung môi đến quá trình tổng hợp nano composite SiO₂/PP”, *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, T72 (3), 251-263, 2021.
- [17] Ryu, H, Sheng, N, Ohtsuka, T, Fujita, S and Kajiyama, H, “PPy film on 55% Al-Zn-coated steel for corrosion prevention”, *Corros Sci*, 56, 67-77, 2012.
- [18] Plieth, W, Bund, A, Rammelt, U, Neudeck, S and Duc, LM, “The role of ion and solvent transport during the redox process of conducting polymers”, *Electrochim Acta*, 51 (11):2366-2372, 2006.
- [19] P.J. Kinlen, D.C. Silverman and C.R. Jeffreys, “Corrosion protection using polyaniline coating formulations”, *Synth. Met.*, 85 (1-3):1327-1332, 1997.
- [20] G. Paliwoda-Porebska, M. Stratmann, M. Rohwerder, K. Potje-Kamloth, Y. Lu, A.Z. Pich and H.-J. Adler, “On the development of polypyrrole coatings with self-healing properties for iron corrosion protection”, *Corros. Sci.*, 47 (12):3216-3233, 2005.
- [21] M. Rohwerder and A. Michalik, “Conducting polymers for corrosion protection: What makes the difference between failure and success?”, *Electrochim. Acta*, 53, 1300-1313, 2007.

Tuyên bố về xung đột lợi ích: Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích.

Lời cảm ơn (nếu có): Tác giả cảm ơn sự tài trợ của Trường Đại học Hồng Đức qua đề tài với mã số: ĐT-2025-04.