

DOI:10.22144/ctujos.2026.111

KHẢO SÁT HOẠT TÍNH TÁCH NƯỚC ĐIỆN HÓA CỦA VẬT LIỆU FeOOH TRÊN NỀN THANH CARBON

Đỗ Nguyễn Anh Khoa^{1,2}, Trần Thị Thúy Kiều¹ và Trần Văn Mẫn^{1,2*}

¹Phòng thí nghiệm Hóa Lý Ứng dụng, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Bộ môn Hóa Lý, Khoa Hóa học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): tvman@hcmus.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 11/08/2025

Sửa bài (Revised): 03/11/2025

Duyệt đăng (Accepted): 09/05/2026

Title: Synthesis and investigation of the electrochemical water splitting activity of FeOOH materials on carbon rods

Author(s): Do Nguyen Anh Khoa^{1,2}, Tran Thi Thuy Kieu¹ and Tran Van Man^{1,2*}

Affiliation(s): ¹Applied Physical Chemistry Laboratory, University of Science, Vietnam National University Ho Chi Minh City (VNUHCM), Viet Nam; ²Department of Physical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Science, VNUHCM, Viet Nam

TÓM TẮT

Hydro xanh (green hydrogen) được xem là một giải pháp tối ưu cho chu trình năng lượng bền vững thông qua quá trình điện phân nước sử dụng năng lượng tái tạo như gió và mặt trời. Trong hệ điện phân, điện cực đóng vai trò quan trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất sinh hydro và oxy. Trong nghiên cứu này, vật liệu điện cực nano FeOOH trên nền thanh carbon (carbon rod - CR) được tổng hợp bằng phương pháp lắng đọng hóa học đơn giản. Ảnh hưởng của nồng độ tiền chất Fe(NO₃)₃ đến hoạt tính điện xúc tác FeOOH@CR đã được khảo sát trong nghiên cứu này. Ở nồng độ 0,20 M (0,20 FeOOH@CR), hoạt tính tốt nhất được ghi nhận, với quá thế cho phản ứng sinh hydro và oxy lần lượt là 340 và 516 mV tại 10 mA/cm² trong KOH 1 M. Ngoài ra, vật liệu còn thể hiện độ bền xúc tác tốt cho cả hai phản ứng trong thời gian 12 giờ. Với ưu điểm nguyên liệu sẵn có và chi phí thấp, FeOOH@CR là vật liệu tiềm năng cho ứng dụng điện phân nước sản xuất hydro xanh.

Từ khóa: Điện phân nước, FeOOH, lắng đọng hóa học, thanh carbon

ABSTRACT

Green hydrogen is considered a promising solution for a sustainable energy cycle through water electrolysis powered by renewable sources such as wind and solar energy. In electrolysis systems, electrode materials play an essential role in hydrogen and oxygen production efficiency. In this study, FeOOH nanostructures were deposited on carbon rods (CR) by a simple chemical deposition method. The effect of Fe(NO₃)₃ precursor concentration on the electrocatalytic activity of FeOOH@CR was investigated. The 0.20 M sample (0.20 FeOOH@CR) exhibited the best performance, with overpotentials of 340 and 516 mV for hydrogen and oxygen evolution reactions, respectively, at 10 mA/cm² in 1 M KOH. In addition, the material showed good catalytic stability for both reactions over a 12-hour evaluation. With abundant and low-cost materials, FeOOH@CR is a promising electrocatalyst for green hydrogen production via water electrolysis.

Keywords: Carbon rod, chemical deposition, FeOOH, water splitting

1. GIỚI THIỆU

Việc khai thác và sử dụng nhiên liệu hóa thạch đã tạo ra lượng lớn khí thải hằng năm như CO₂, CH₄ và NO_x, làm gia tăng hiệu ứng nhà kính, gây ra hiện tượng biến đổi khí hậu. Những tác động tiêu cực này đã dẫn đến các hiện tượng băng tan, mực nước biển dâng, xâm nhập mặn, siêu bão và hạn hán (Wuebbles & Jain, 2001). Do đó, việc tìm kiếm các nguồn năng lượng thay thế không phát thải carbon trở thành một chiến lược thiết yếu trong nỗ lực hướng tới mục tiêu phát thải ròng bằng không (net-zero) và ứng phó với biến đổi khí hậu. Bên cạnh các nguồn năng lượng sẵn có như mặt trời, gió, hay nhiệt lượng, hydro nổi bật là một nhiên liệu xanh và chất mang năng lượng hiệu quả. Hydro không chỉ có mật độ năng lượng cao (~140 MJ/kg) hơn so với các loại nhiên liệu hóa thạch, mà còn chỉ thải ra hơi nước trong quá trình cháy, do đó rất thân thiện với môi trường (Valenti, 2016).

Các phương pháp sản xuất hydro bao gồm reforming khí thiên nhiên và khí hóa than, lần lượt chiếm khoảng 48% và 18% sản lượng hydro toàn cầu (Franchi et al., 2020). Tuy nhiên, nhược điểm của các phương pháp này là phụ thuộc lớn vào nguồn nhiên liệu hóa thạch làm nguyên liệu đầu vào, đồng thời giải phóng các khí nhà kính trong quá trình sản xuất. Do đó, hydro được sản xuất bằng các phương pháp này không thể đáp ứng tiêu chí phát thải ròng bằng không, đòi hỏi phải sử dụng các phương pháp khác để sản xuất hydro thân thiện với môi trường (Ajanovic et al., 2022). Trong khi đó, hydro được sản xuất bằng phương pháp điện phân nước sử dụng nguồn điện tái tạo từ năng lượng gió hay năng lượng mặt trời đang thu hút sự chú ý. Quá trình này hoàn toàn không phát thải khí nhà kính, góp phần quan trọng vào việc xây dựng một tương lai năng lượng bền vững và thân thiện với môi trường (Ajanovic et al., 2022). Điện phân nước là quá trình phân hủy các phân tử nước thành khí hydro và oxy dưới tác dụng của dòng điện. Trong quá trình này, vai trò của điện cực là rất quan trọng, vì chúng không chỉ là bề mặt hấp phụ các chất trung gian mà còn xúc tác cho các phản ứng tạo ra hydro và oxy hiệu quả. Hiện nay, các hợp chất dựa trên bạch kim (Pt) và iridi (Ir) được coi là những xúc tác hiệu quả nhất cho phản ứng này (Rossmeisl et al., 2007). Tuy nhiên, do đây là những kim loại quý hiếm và có giá thành cao, nhu cầu về vật liệu điện cực giá rẻ và hiệu quả cho quá trình điện phân nước trở thành một thách thức lớn.

Trong các vật liệu xúc tác không chứa kim loại quý, sắt (III) oxyhydroxit (FeOOH) là một hợp chất

thân thiện, dễ chế tạo từ nguồn kim loại sắt có trữ lượng phong phú, khiến nó trở thành một lựa chọn hấp dẫn cho các ứng dụng bền vững, đặc biệt trong lĩnh vực xúc tác điện hóa. Với cấu trúc tinh thể độc đáo và khả năng tạo ra các trạng thái oxy hóa khác nhau (Fe²⁺ và Fe³⁺), FeOOH có thể hoạt động như một chất xúc tác hiệu quả trong phản ứng sinh khí oxy (Kuroda et al., 2022). Bên cạnh đó, FeOOH cũng phù hợp cho công nghệ điện phân nước môi trường kiềm do tính tương thích với dung môi. Ngoài ra, công nghệ điện phân nước môi trường kiềm hiện đã đạt đến mức độ có thể vận hành thương mại (Franco & Giovannini, 2023), việc cải tiến với điện cực giá rẻ có thể giúp nhanh chóng nhân rộng mô hình, giúp nhanh chóng giảm phát thải khí nhà kính. Mặc dù có độ dẫn điện thấp, FeOOH có thể được cải tiến thông qua việc kết hợp với các nền dẫn điện như carbon hoặc graphene, giúp tăng cường hoạt tính và độ bền xúc tác (Xu et al., 2021). Các nghiên cứu hiện tại cũng đang tập trung vào việc phát triển các hạt nano và biến đổi hóa học để tối ưu hóa hiệu suất của FeOOH (Kuroda et al., 2022).

Trong nghiên cứu này, FeOOH được hình thành trên nền than carbon bằng phương pháp lắng đọng hóa học đơn giản với các nồng độ tiền chất Fe(NO₃)₃ khác nhau. Vật liệu sau tổng hợp được ứng dụng làm điện cực dương (anode) và điện cực âm (cathode) trong phản ứng điện phân nước với môi trường kiềm KOH 1 M. Các phương pháp khác nhau được sử dụng để xác định cấu trúc, hình thái và tính chất điện hóa của vật liệu bao gồm nhiễu xạ tia X (X-ray Diffraction - XRD), phổ tán xạ năng lượng tia X (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy - EDX), hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscopy - SEM), quét thế vòng tuần hoàn (Cyclic Voltammetry - CV), quét thế tuyến tính (Linear Sweep Voltammetry - LSV), đo thế theo thời gian (Chronopotentiometry - CP).

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

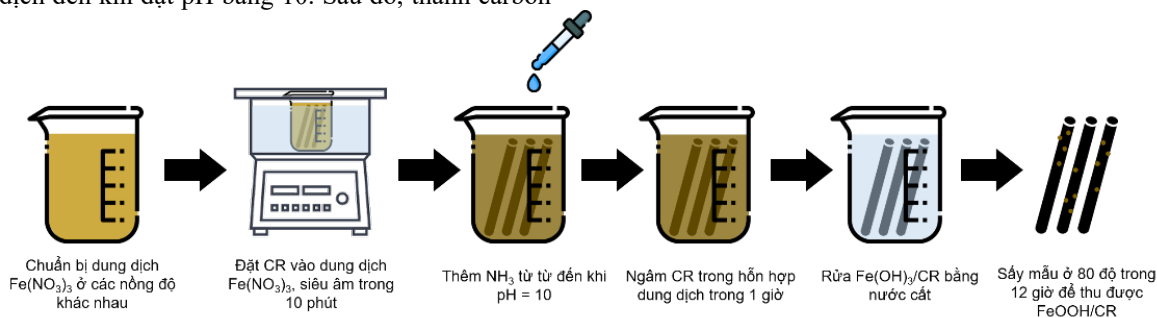
2.1. Tổng hợp FeOOH@CR

Các hóa chất được sử dụng bao gồm Fe(NO₃)₃.9H₂O (> 85%, Shanghai Zhanyun Chemical, Trung Quốc), NH₄OH (25 - 28%, Xilong Scientific, Trung Quốc), H₂SO₄ (98%, Xilong Scientific, Trung Quốc), H₂O₂ (30%, Xilong Scientific, Trung Quốc), KMnO₄ (> 99%, Merck, Đức), nước cất và thanh carbon thương mại (Việt Nam). Các thanh carbon (carbon rod - CR) sau khi mua về được làm sạch và xử lý bằng cách ngâm trong H₂SO₄ đậm đặc và khuấy liên tục trong 1 giờ. Sau đó, 0,500 g KMnO₄ được cho từ từ vào dung dịch. Sau 1 giờ, H₂O₂ 30% tiếp tục được cho vào

đến khi dung dịch trở nên không màu và trong suốt. Cuối cùng, thanh carbon được rửa kỹ nhiều lần bằng nước cất trước khi được sấy khô ở 80°C trong 6 giờ.

Các thanh carbon sau xử lý được ngâm vào dung dịch $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ở các nồng độ lần lượt từ 0,05 M đến 0,25 M và phân tán đều bằng siêu âm trong 10 phút. Sau đó, NH_4OH 25 - 28% được nhỏ thêm vào dung dịch đến khi đạt pH bằng 10. Sau đó, thanh carbon

được ngâm trong dung dịch trong 1 giờ để phát triển và ổn định cấu trúc $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Cuối cùng, thanh carbon được lấy ra, rửa lại với nước cất và sấy ở 80°C trong 12 giờ để thu được vật liệu $\text{FeOOH}@CR$. Các mẫu vật liệu thu được được ký hiệu là 0,05 $\text{FeOOH}@CR$, 0,10 $\text{FeOOH}@CR$, 0,15 $\text{FeOOH}@CR$, 0,20 $\text{FeOOH}@CR$ và 0,25 $\text{FeOOH}@CR$.



Hình 1. Quy trình tổng hợp FeOOH trên thanh carbon

2.2. Phân tích vật liệu

Vật liệu sau khi tổng hợp được phân tích cấu trúc bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (X-ray Diffraction - XRD), sử dụng máy Bruker D8 Advanced Eco với nguồn CuK_α ($\lambda = 0,15418$ nm), với tốc độ quét $0,2^\circ/1$ giây. Hình thái bề mặt của vật liệu cũng được xác định trên máy Jeol JSM-IT500 bằng phương pháp hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscopy - SEM) với thế gia tốc electron là 10 kV. Phương pháp tán xạ năng lượng tia X (Energy Dispersive X-ray - EDX) được sử dụng để xác định thành phần nguyên tố trên bề mặt vật liệu, cũng được thực hiện trên máy Jeol JSM-IT500.

Để đánh giá tính chất điện hóa, các phương pháp quét thế vòng tuần hoàn (Cyclic Voltammetry - CV), quét thế tuyến tính (Linear Sweep Voltammetry - LSV), đo thế theo thời gian (Chronopotentiometry - CP) đều được thực hiện trên máy Biologic MPG2 trong môi trường KOH 1 M. Hệ đo điện hóa 3 điện cực được sử dụng, bao gồm điện cực so sánh (Reference Electrode - RE) Ag/AgCl ngâm trong KCl bão hòa, điện cực đối (Counter Electrode - CE) là lưới Ti phủ Pt và điện cực làm việc (Working Electrode - WE) là vật liệu cần nghiên cứu $\text{FeOOH}@CR$.

Để xác định diện tích bề mặt điện hóa (Electrochemical Surface Area - ECSA), điện dung lớp kép (Double Layer Capacitance - C_{dl}) được xác định thông qua phương pháp CV trong vùng thế non-faradic (từ 0,00 V đến -0,10 V so với Ag/AgCl),

ở các tốc độ quét (ϑ) khác nhau (0,02 - 0,10 V/s). Đồ thị được dựng với trục hoành là tốc độ quét (V/s), trục tung là giá trị mật độ dòng trung bình $\Delta j = (j_a - j_c)/2$ (mA/cm^2), với j_a , j_c lần lượt là mật độ dòng cực dương (anode) và cực âm (cathode) tương ứng tại điện thế -0,05 V so với Ag/AgCl. Hệ số góc thu được từ đường thẳng tiếp tuyến trong đồ thị $\vartheta - \Delta j$ này là giá trị điện dung của lớp điện tích kép (C_{dl}) (mF/cm^2). Từ đó diện tích bề mặt điện hóa (Electrochemical Surface Area - ECSA) của vật liệu có thể được xác định thông qua phương trình:

$$\text{ECSA} = C_{dl}/C_s \quad (1)$$

Trong đó C_s là điện dung riêng phụ thuộc vào bản chất hệ và chất điện giải sử dụng (McCroory et al., 2015). Trong nghiên cứu này, C_s được lấy giá trị tham khảo bằng $0,040 \text{ mF}/\text{cm}^2$ khi sử dụng dung dịch KOH 1 M làm chất điện giải (Yang et al., 2020).

Bằng phương pháp CP, độ dốc Tafel được tính toán thông qua mối quan hệ tuyến tính giữa quá thế và logarit thập phân của mật độ dòng (Tran et al., 2023; Anantharaj et al., 2021).

Phương pháp CP cũng được dùng để xác định độ bền của vật liệu khi được sử dụng lần lượt làm điện cực dương (anode) và điện cực âm (cathode) tại mật độ dòng cố định $10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ trong nhiều giờ liên tục.

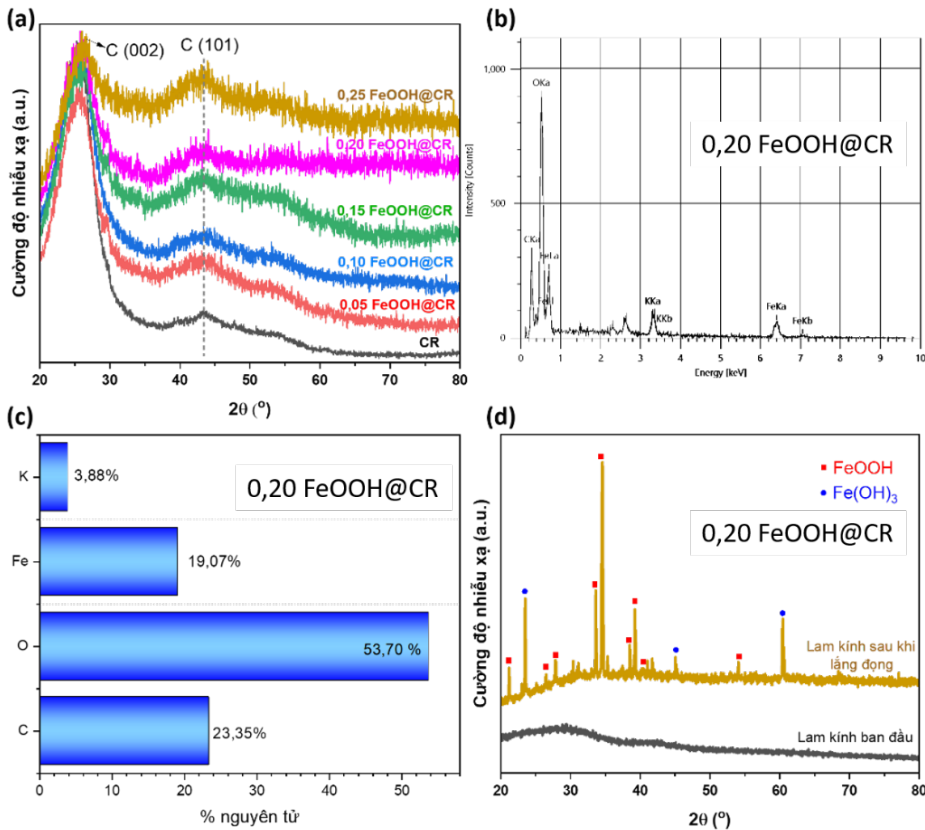
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Cấu trúc và hình thái

Kết quả phân tích XRD của các mẫu FeOOH@CR được trình bày trong Hình 2a. Giản đồ cho thấy các đỉnh nhiễu xạ ở vị trí 26,6° và 44,7°, lần lượt đặc trưng cho các mặt mạng (002) và (100) của carbon (JCPDS 96-120-0019).

Ngoài ra, đường nền XRD của các mẫu đã có lắng đọng vật liệu cho thấy sự gồ ghề, nhiễu nhiễu loạn hơn so với mẫu CR ban đầu, đồng thời không thể xác định được đỉnh nhiễu xạ đặc trưng nào cho

vật liệu FeOOH. Tuy nhiên, vật liệu được tạo thành được chứng minh có chứa thành phần nguyên tố Fe với tỷ lệ nguyên tử khoảng 19,07%, ngoài các nguyên tố C, O và K trên bề mặt thông qua phương pháp EDX (Hình 2b và Hình 2c). Trong đó, thành phần K được phát hiện với hàm lượng thấp, có thể xuất phát từ tiền chất $KMnO_4$ trong quy trình xử lý thanh carbon. Các tín hiệu nhiễu xạ của hợp chất Fe không xuất hiện trên giản đồ XRD ở Hình 2a có thể do các nguyên nhân sau: (i) hàm lượng lắng đọng của vật liệu xúc tác thấp, (ii) nền CR có độ kết tinh kém nên gây nhiễu nền cao, (iii) vật liệu tạo thành ở dạng vô định hình.



Hình 2. Giản đồ XRD trên nền thanh carbon (a), phổ EDX (b), thành phần nguyên tố (c), và giản đồ XRD trên nền lam kính thủy tinh (d)

Để kiểm chứng các giả thiết trên, quy trình tổng hợp mẫu 0,20 FeOOH@CR được thực hiện tương tự nhưng sử dụng nền lam kính thủy tinh thay vì thanh carbon, sau đó thực hiện phép đo XRD, kết quả được trình bày ở Hình 2d. Sau lắng đọng xuất hiện các đỉnh nhiễu xạ tại 21,17°, 26,26°, 27,83°, 33,15°, 34,56°, 38,95°, 39,83°, 41,07° và 54,04° lần lượt ứng với mặt mạng (110), (120), (201), (130), (021), (200), (121), (140), (240) của FeOOH (JCPDS 96-100-8768). Mũi nhiễu xạ thu được

nhọn, cường độ cao cho thấy vật liệu FeOOH có cấu trúc tinh thể. Từ đây có thể kết luận tín hiệu nhiễu xạ của hợp chất Fe không xuất hiện trên giản đồ XRD Hình 2a là do nền CR có độ kết tinh kém nên gây nhiễu nền cao.

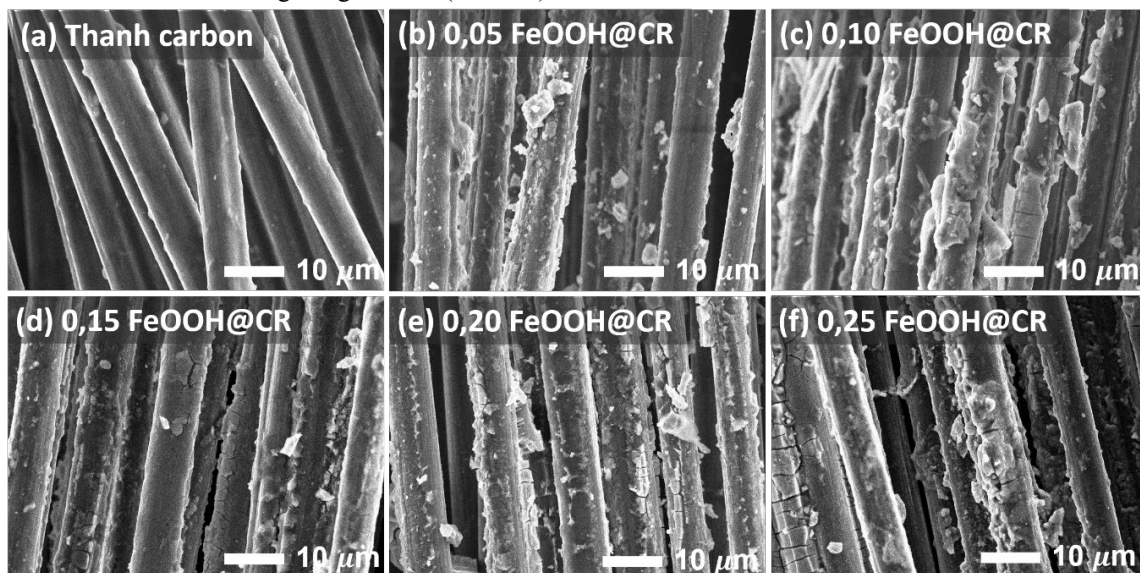
Ngoài ra còn có sự xuất hiện của các đỉnh nhiễu xạ ở 23,59°, 44,89° và 60,42° lần lượt ứng với các mặt mạng (200), (222) và (422) của Fe(OH)3 (JCPDS 96-901-6366) ở Hình 2d. Sự xuất hiện của

$\text{Fe}(\text{OH})_3$ có thể do quy trình tổng hợp chưa chuyển hóa hoàn toàn $\text{Fe}(\text{OH})_3$ thành FeOOH .

Kết hợp kết quả từ phổ EDX, kết quả XRD trên nền lam kính thủy tinh có thể kết luận đã tổng hợp được FeOOH cấu trúc tinh thể có lẫn $\text{Fe}(\text{OH})_3$ trên thanh carbon.

Ảnh SEM ở Hình 3 cho thấy hình thái bề mặt của các mẫu ở độ phóng đại 500 và 2.000 lần. Bề mặt thanh carbon trước khi lắng đọng vật liệu (Hình 3a)

gồm các sợi hình trụ có bề mặt phẳng, trơn láng. Ở các thanh carbon có lắng đọng (Hình 3b - Hình 3f), FeOOH được quan sát thấy là dạng mảng, kích thước vài micromet bám lên các thanh carbon. Khi tăng nồng độ tiền chất $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ từ 0,05 M lên 0,25 M, các mảng FeOOH bám trên thanh carbon phân bố đồng đều và dày đặc hơn với kích thước lớn hơn, chứng tỏ lượng FeOOH sinh ra tăng khi nồng độ tăng.

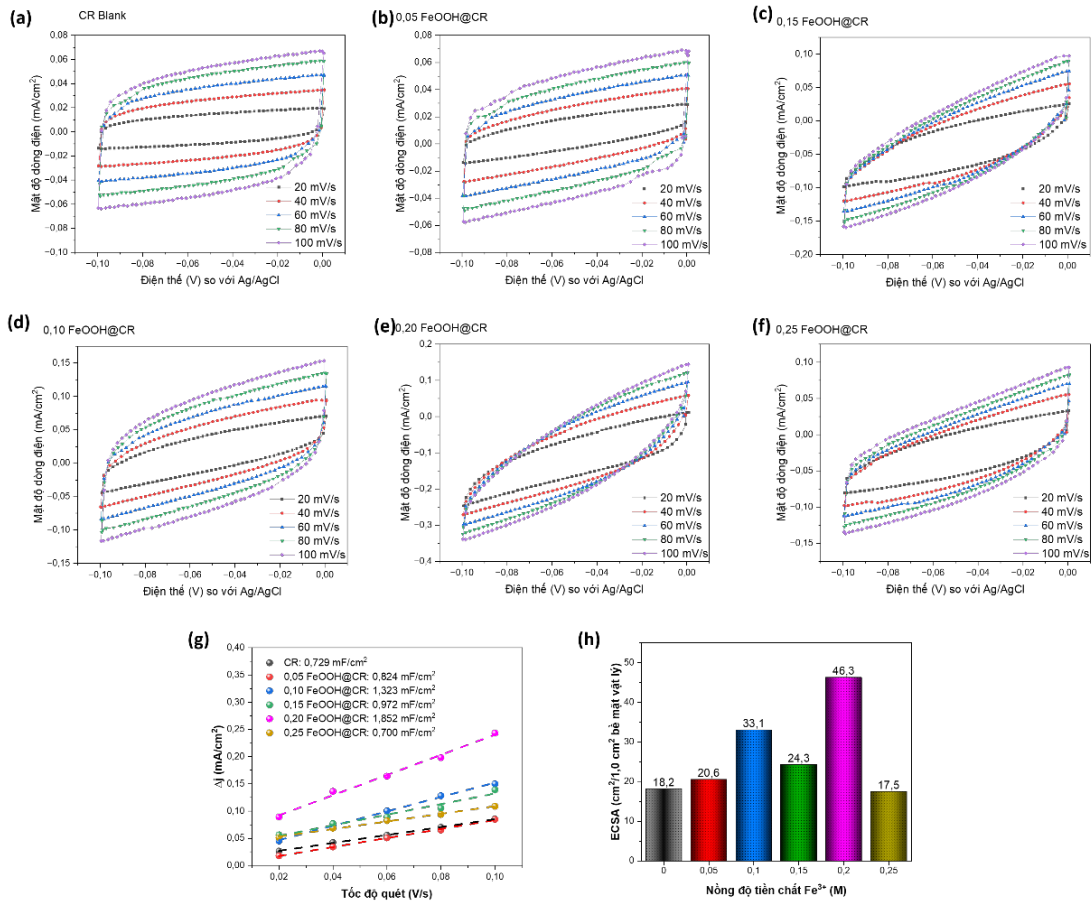


Hình 3. Ảnh SEM của các mẫu vật liệu trên nền thanh carbon

3.2. Tính chất điện hóa

Để đánh giá ảnh hưởng của nồng độ tiền chất tới diện tích bề mặt hữu dụng để phân tách nước, việc xác định diện tích bề mặt hoạt động điện hóa (electrochemical specific area - ECSA) cho các mẫu đã được tiến hành. Các đường cong CV của các mẫu trong vùng thế non-faradic -0,10 V đến 0,00 V so với điện cực Ag/AgCl được thể hiện trong Hình 4a – Hình 4f. Đồ thị $\theta - \Delta j$ và ECSA được tính toán thông qua phương trình (1) cũng được trình bày chi tiết trong Hình 4g và Hình 4h. Trong đó, ECSA của mẫu 0,25 $\text{FeOOH}@CR$ ($17,5 \text{ cm}^2/1 \text{ cm}^2$) thấp hơn

so với giá trị ECSA của thanh carbon chưa lắng đọng ($18,2 \text{ cm}^2$), trong khi các mẫu còn lại đều cho giá trị ECSA lớn hơn của thanh carbon (các mẫu có nồng độ tiền chất 0,05; 0,10; 0,15; 0,20 lần lượt có ECSA là 20,6; 33,1; 24,3; 46,3 cm^2). Điều này cho thấy, ở khoảng nồng độ 0,05 M đến 0,20 M $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, FeOOH giúp cải thiện diện tích hoạt động điện hóa so với thanh carbon ban đầu. Trong khi ở nồng độ quá cao như 0,25 M, FeOOH sinh ra quá nhiều đã gây sự cản trở các hoạt động điện hoá, do FeOOH là chất có tính dẫn điện kém, nên hạn chế sự trao đổi điện tích trong tổng thể vật liệu điện cực.



Hình 4. Đường cong CV (a–f), giá trị C_{dl} (g), và diện tích bề mặt (ECSA) (h) của các mẫu vật liệu

Phản ứng tách nước trong môi trường kiềm như KOH được thể hiện qua hai bán phản ứng:

- Phản ứng sinh hydro (Hydrogen Evolution Reaction - HER) $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ ($E^0 = 0,00V$).

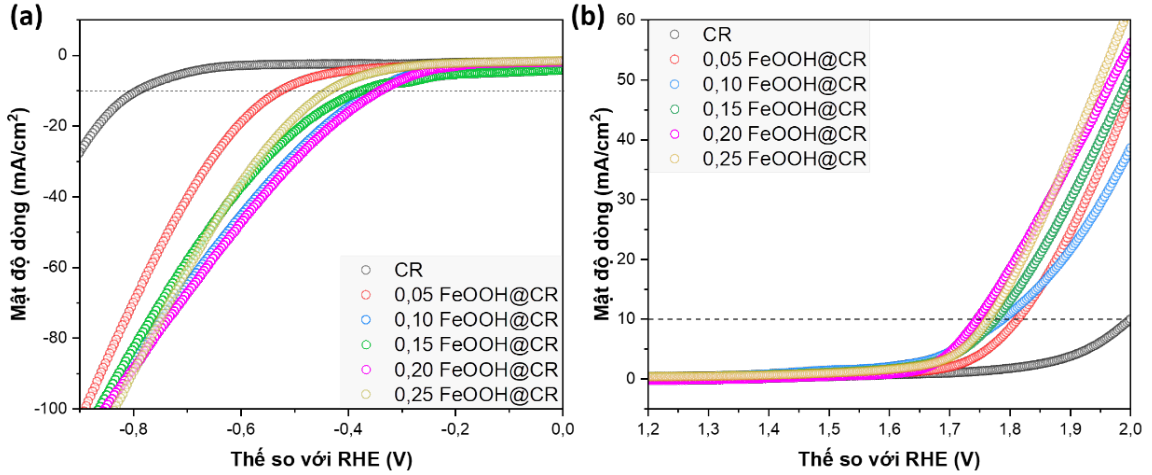
- Phản ứng sinh oxy (Oxygen evolution Reaction – OER) $4OH^- - 4e^- \rightarrow O_2 + 2H_2O$ ($E^0 = 1,23V$).

Hoạt tính tách nước của một điện cực trong môi trường kiềm như KOH của điện cực FeOOH@CR được khảo sát bằng phương pháp LSV và các giá trị quá thế được xác định tại mật độ dòng 10 mA/cm² và trình bày ở Hình 5 và Bảng 1. Quá thế là điện áp bổ sung cần thiết để phản ứng thực tế xảy ra so với tính toán lý thuyết; giá trị này càng thấp thì vật liệu có hoạt tính càng tốt. Đối với HER, nền CR cho quá

thế cao 792 mV, trong khi các mẫu có FeOOH ghi nhận quá thế giảm rõ rệt, chỉ còn 340 - 526 mV. Kết quả tương tự cũng được ghi nhận ở OER: quá thế của CR ở mức 770 mV, trong khi điện cực có FeOOH ghi nhận quá thế ở khoảng 516 - 583 mV. Kết quả này khẳng định FeOOH có hoạt tính xúc tác cho cả hai phản ứng HER và OER.

Bảng 1. Quá thế các điện cực FeOOH@CR

Vật liệu	Quá thế (mV) tại 10 mA/cm ²	
	HER	OER
CR	792	770
0,05 FeOOH@CR	526	583
0,10 FeOOH@CR	352	559
0,15 FeOOH@CR	375	546
0,02 FeOOH@CR	340	516



Hình 5. Đường cong LSV của các mẫu FeOOH@CR đối với HER (a) và OER (b)

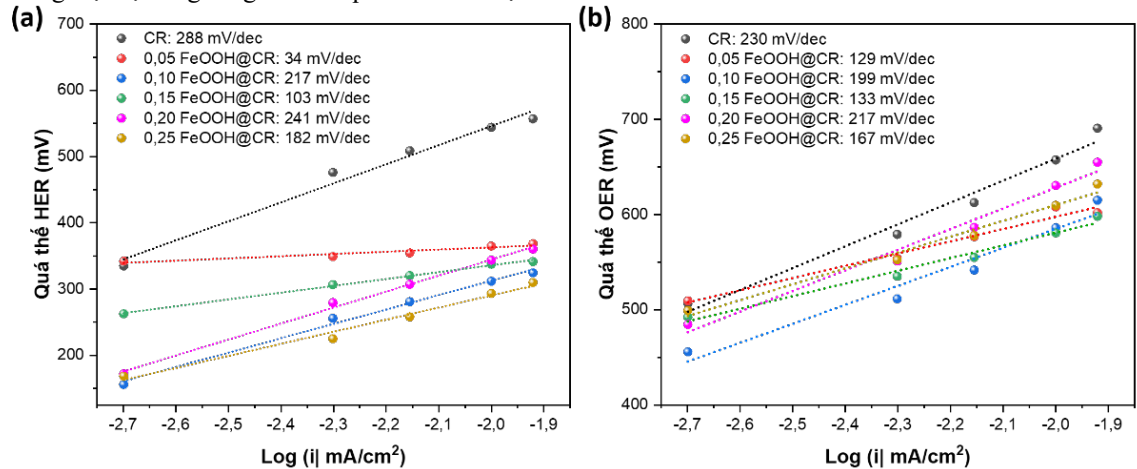
Nhìn chung, có sự cải thiện rõ rệt khi lắng đọng chất xúc tác FeOOH lên nền thanh carbon. Kết quả đo LSV tương quan với giá trị ECSA thu được: mẫu có ECSA càng cao, quá thế thu được càng thấp. Điều này cho thấy sự ảnh hưởng của mật độ và kích thước của các mảng FeOOH trên thanh carbon lên hoạt tính tách nước sinh khí oxy và hydro. Trong đó, mẫu 0,02 FeOOH@CR cho quá thế thấp nhất với cả phản ứng HER (340 mV) và OER (516 mV). Điều này cho thấy tại nồng độ 0,02 M Fe(NO₃)₃, cho FeOOH dạng mảng với kích thước và mật độ tối ưu cho phản ứng điện phân nước sinh hydro và oxy.

Đồ thị độ dốc Tafel thường được dùng để đánh giá tốc độ và cơ chế của các phản ứng điện hóa. Độ dốc Tafel càng thấp thì vật liệu có khả năng đáp ứng dễ tăng mật độ dòng càng tốt. Kết quả đo và xác định

độ dốc Tafel được trình bày trong Hình 6 và Bảng 2. Đối với HER, có thể thấy rõ độ dốc Tafel của mẫu nền CR (288 mV/dec) cao hơn so với các mẫu FeOOH@CR (34 – 241 mV/dec). Điều này cho thấy FeOOH@CR cho tốc độ phản ứng cao hơn ở quá thế nhỏ hơn so với CR.

Bảng 2. Độ dốc Tafel các điện cực FeOOH@CR

Vật liệu	Độ dốc Tafel (mV/decade)	
	HER	OER
CR	288	230
0,05 FeOOH@CR	34	129
0,10 FeOOH@CR	217	199
0,15 FeOOH@CR	103	133
0,02 FeOOH@CR	241	217

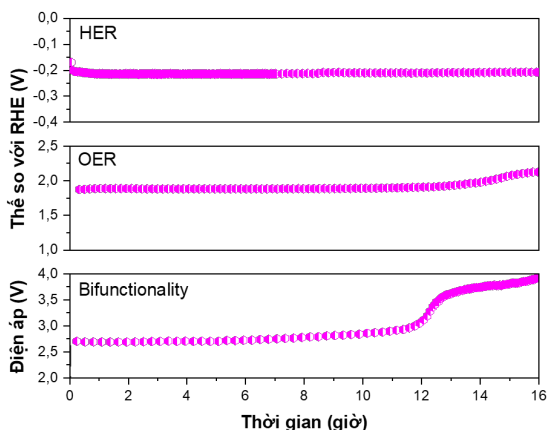


Hình 6. Đường độ dốc Tafel của các mẫu FeOOH@CR đối với HER (a) và OER (b)

Kết quả tương tự cũng quan sát thấy với OER, cụ thể độ dốc Tafel của mẫu nền CR (230 mV/dec) cao hơn so với các mẫu FeOOH@CR (133 – 217

mV/dec). Do đó, FeOOH không chỉ giúp cải thiện diện tích hoạt động điện hóa, giảm quá thế khi điện

phân nước mà còn giúp điện cực tiêu thụ ít điện năng hơn để đạt mật độ dòng cao hơn 10 lần.



Hình 7. Kết quả khảo sát độ bền của điện cực 0,02 FeOOH@CR cho phản ứng HER, OER và hệ điện phân nước hoàn chỉnh

Để đánh giá độ bền của điện cực tổng hợp được, mẫu có hoạt tính tốt nhất là 0,20 FeOOH@CR được khảo sát thông qua phương pháp CP tại mật độ dòng cố định 10 mA/cm² trong mỗi bán phản ứng OER và HER và trong phản ứng điện phân nước hoàn chỉnh (overall water splitting). Kết quả cho thấy điện cực 0,20 FeOOH@CR có độ bền xúc tác tốt cho cả hai bán phản ứng HER và OER, đã duy trì được điện thế ổn định ở khoảng -0,21 V và 1,90 V trong suốt 12

giờ. Đối với hệ điện phân nước hoàn chỉnh, khi vật liệu 0,20 FeOOH@CR được ứng dụng ở cả hai vai trò là điện cực âm (cathode) và điện cực dương (anode), điện áp của bình điện phân duy trì ổn định ở khoảng 2,72 V trong suốt thời gian khảo sát. Điều này cho thấy vật liệu 0,20 FeOOH@CR có độ bền xúc tác tốt, có khả năng ứng dụng làm vật liệu điện cực trong phản ứng điện phân nước trong môi trường kiềm.

4. KẾT LUẬN

Vật liệu FeOOH được tổng hợp trên thanh carbon có cấu trúc dạng tấm với kích thước và mật độ tăng dần theo nồng độ tiền chất Fe(NO₃)₃ sử dụng. Việc lắng đọng FeOOH trên thanh carbon làm tăng diện tích bề mặt hoạt động điện hóa, giúp tăng hoạt tính xúc tác cho các phản ứng sinh oxy và hydro. Trong các mẫu khảo sát, vật liệu 0,20 FeOOH@CR có hoạt tính xúc tác tốt nhất, quá thế đối với HER và OER lần lượt là 516 và 340 mV. Đồng thời, điện cực tổng hợp có độ bền xúc tác tốt cho HER, OER cũng như trong hệ điện phân hoàn chỉnh trong 12 giờ.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh trong khuôn khổ Đề tài mã số 562-2025-18-05.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ajanovic, A., Sayer, M., & Haas, R. (2022). The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(57), 24136–24154. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>
- Anantharaj, S., Noda, S., Driess, M., & Menezes, P. W. (2021). The pitfalls of using potentiodynamic polarization curves for tafel analysis in electrocatalytic water splitting. *ACS Energy Letters*, 6(4), 1607–1611. <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.1c00608>
- Franchi, G., Capocelli, M., De Falco, M., Piemonte, V., & Barba, D. (2020). Hydrogen production via steam reforming: A critical analysis of MR and RMM technologies. *Membranes*, 10(1), 10. <https://doi.org/10.3390/membranes10010010>
- Franco, A., & Giovannini, C. (2023). Recent and future advances in water electrolysis for green hydrogen generation: Critical analysis and perspectives. *Sustainability*, 15(24), 16917. <https://doi.org/10.3390/su152416917>
- Kuroda, Y., Takatsu, S., Taniguchi, T., Sasaki, Y., Nagashima, I., Inomata, A., Nishiki, Y., Zaenal, A., Nakai, T., & Kato, A. (2022). β-FeOOH nanorod as a highly active and durable self-repairing anode catalyst for alkaline water electrolysis powered by renewable energy. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 104(3), 647–658. <https://doi.org/10.1007/s10971-022-05882-1>
- McCrorry, C. C. L., Jung, S., Ferrer, I. M., Chatman, S. M., Peters, J. C., & Jaramillo, T. F. (2015). Benchmarking hydrogen evolving reaction and oxygen evolving reaction electrocatalysts for solar water splitting devices. *Journal of the American Chemical Society*, 137(13), 4347–4357. <https://doi.org/10.1021/ja510442p>
- Rossmesl, J., Qu, Z.-W., Zhu, H., Kroes, G.-J., & Nørskov, J. K. (2007). Electrolysis of water on oxide surfaces. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 607(1–2), 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2006.11.008>
- Tran, P. T., Chatti, M., Leverett, J., Nguyen, T. K. A., Simondson, D., Hoogeveen, D. A., Kiy, A.,

- Duong, T., Johannessen, B., & Meilak, J. (2023). Understanding the role of (W, Mo, Sb) dopants in the catalyst evolution and activity enhancement of Co₃O₄ during water electrolysis via in situ spectroelectrochemical techniques. *Small*, 19(25), 2208074. <https://doi.org/10.1002/sml.202208074>
- Valenti, G. (2016). Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. In M. Ball & A. Basile (Eds.), *Compendium of hydrogen energy* (27–51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00002-X>
- Wuebbles, D. J., & Jain, A. K. (2001). Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel Processing Technology*, 71(1–3), 99–119. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00139-4)
- Xu, Y., Feng, T., Cui, Z., Guo, P., Wang, W., & Li, Z. (2021). Fe₇S₈/FeS₂/C as an efficient catalyst for electrocatalytic water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(79), 39216–39225. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.159>
- Yang, L., Li, H., Yu, Y., Wu, Y., & Zhang, L. (2020). Assembled 3D MOF on 2D nanosheets for self-boosting catalytic synthesis of N-doped carbon nanotube encapsulated metallic Co electrocatalysts for overall water splitting. *Applied Catalysis B: Environmental*, 271, 118939. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118939>