

TỔNG HỢP VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ ĐIỆN HÓA CỦA ĐIỆN CỰC MANGANESE–GRAPHENE OXIDE TRÊN NỀN BỌT NICKEL CHO PHẢN ỨNG OXI HÓA GLYCEROL

SYNTHESIS AND ELECTROCHEMICAL PERFORMANCE EVALUATION OF Mn–GRAPHENE OXIDE/NICKEL FOAM ELECTRODES FOR GLYCEROL OXIDATION

Phan Thị Hằng Nga^{1*}, Nguyễn Chinh Chiến^{2,3}, Trương Lê Bích Trâm⁴, Nguyễn Đình Minh Tuấn⁵

¹Trường Y Dược - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

²Trung tâm Hóa học tiên tiến, Viện Nghiên cứu và Phát triển, Đại học Duy Tân, Việt Nam

³Đại học Duy Tân, Việt Nam

⁴Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

⁵Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: pthnga@smp.udn.vn

(Nhận bài / Received: 04/3/2026; Sửa bài / Revised: 14/5/2026; Chấp nhận đăng / Accepted: 21/5/2026)

DOI: 10.31130/ud-jst.2026.24(5A).122

Tóm tắt - Trong nghiên cứu này, điện cực Mn-Graphene oxide trên nền bọt nickel (Mn-GO@NF) đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt và được ứng dụng cho phản ứng oxi hóa điện hóa glycerol. Nhờ sự kết hợp giữa manganese và graphene oxide, điện cực Mn-GO@NF thể hiện hoạt tính xúc tác tốt và độ bền điện hóa cao trong môi trường kiềm chứa glycerol. Điện cực đạt mật độ dòng 50 mA·cm⁻² ở điện thế khoảng 1,61 V so với RHE và duy trì hoạt động ổn định trong 21 giờ. Phân tích phổ trở kháng điện hóa cho thấy điện cực Mn-GO@NF có điện trở truyền điện tích thấp hơn, phản ánh động học phản ứng thuận lợi hơn. Ngoài ra, trong cấu hình hai điện cực Mn-GO@NF|Mn-GO@NF, hệ điện phân yêu cầu điện áp khoảng 1,96 V để đạt mật độ dòng điện 40 mA·cm⁻². Những kết quả này cho thấy điện cực Mn-GO@NF có tiềm năng ứng dụng làm anode thay thế cho phản ứng OER truyền thống trong các hệ điện phân sản xuất hydrogen.

Từ khóa - Manganese; graphene oxide; nền bọt nickel; điện hóa oxi hóa glycerol; sản xuất hydrogen

1. Đặt vấn đề

Sự cạn kiệt ngày càng nghiêm trọng của các nguồn nhiên liệu hóa thạch, cùng với những hệ quả tiêu cực đối với khí hậu và môi trường, đã và đang thúc đẩy mạnh mẽ quá trình nghiên cứu và phát triển các nguồn năng lượng sạch, bền vững và tái tạo [1-3]. Trong bối cảnh đó, hydrogen được xem là nguồn năng lượng đầy tiềm năng nhờ mật độ năng lượng riêng cao, quá trình sử dụng không phát thải CO₂ và khả năng tích hợp linh hoạt trong các hệ thống năng lượng [4-6]. Trong số các công nghệ sản xuất hydrogen, điện phân nước được đánh giá là một trong những con đường hiệu quả và triển vọng nhất, đặc biệt khi được kết hợp với nguồn điện từ năng lượng tái tạo như điện mặt trời hoặc điện gió [7-10]. Tuy nhiên, hiệu suất tổng thể của quá trình điện phân nước vẫn bị hạn chế đáng

Abstract - In this study, a Mn–Graphene oxide electrode supported on nickel foam (Mn-GO@NF) was synthesized via a hydrothermal method and applied to the electrochemical oxidation of glycerol. The Mn-GO@NF electrode exhibits good electrocatalytic activity and stability in alkaline glycerol-containing electrolytes due to the combined presence of manganese species and conductive graphene oxide. A current density of 50 mA·cm⁻² is achieved at approximately 1.61 V versus the reversible hydrogen electrode (RHE), with stable operation maintained for 21 h. Electrochemical impedance spectroscopy reveals a lower charge-transfer resistance for Mn-GO@NF, indicating favorable reaction kinetics. In a two-electrode configuration (Mn-GO@NF|Mn-GO@NF), a cell voltage of about 1.96 V is required to reach 40 mA·cm⁻². These results suggest that Mn-GO@NF is a promising anodic electrode for replacing the conventional oxygen evolution reaction (OER) in hydrogen production electrolysis systems.

Key words - Manganese; graphene oxide; nickel foam; glycerol electro-oxidation; hydrogen production

kể bởi phản ứng tạo oxygen (OER) tại cực dương. Đây là phản ứng có động học chậm, liên quan đến nhiều bước chuyển electron–proton và đòi hỏi điện thế lớn, dẫn đến mức tiêu thụ năng lượng cao và làm giảm hiệu suất tạo hydrogen [11, 12]. Bên cạnh đó, oxygen – sản phẩm phụ của OER – nhìn chung có giá trị kinh tế thấp, không tương xứng với chi phí năng lượng đầu vào của quá trình điện phân [13, 14].

Trong những năm gần đây, việc thay thế phản ứng OER bằng các phản ứng oxi hóa các hợp chất hữu cơ hoặc sinh khối đã nổi lên như một hướng tiếp cận đầy tiềm năng. Các chất nền như glucose, ethylene glycol, ascorbic acid và đặc biệt là glycerol đã được nghiên cứu rộng rãi nhờ điện thế oxy hóa thấp hơn OER và khả năng tạo ra các sản phẩm phụ có giá trị cao [15-18].

¹ The University of Danang - School of Medicine and Pharmacy, Vietnam (Nga Hang Thi Phan)

² Center for Advanced Chemistry, Institute of Research and Development, Duy Tan University, Vietnam (Chinh Chien Nguyen)

³ Duy Tan University, Vietnam (Chinh Chien Nguyen)

⁴ The University of Danang, Vietnam (Bich-Tram Truong-Le)

⁵ The University of Danang - University of Science and Technology, Vietnam (Minh Tuan Nguyen Dinh)

Glycerol là một sản phẩm phụ chính của ngành công nghiệp biodiesel, chiếm khoảng 10% khối lượng sản phẩm, với nguồn cung dồi dào và giá thành thấp [19, 20]. Quá trình oxy hóa điện hóa glycerol (GOR) có thể tạo ra nhiều hợp chất oxy hóa có giá trị cao như glyceraldehyde, dihydroxyacetone, glyceric acid, glycolic acid, lactic acid và formic acid, được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp hóa chất, dược phẩm và mỹ phẩm [21-23]. Do đó, việc kết hợp GOR với HER trong cùng một hệ điện phân được xem là một chiến lược triển vọng nhằm nâng cao hiệu quả năng lượng và tính kinh tế của quá trình sản xuất hydrogen.

Mặc dù, các chất xúc tác dựa trên kim loại quý như Pt, Au, Pd và Ru thể hiện hoạt tính và độ chọn lọc cao đối với cả GOR và HER, nhưng giá thành cao và tính khan hiếm đã hạn chế khả năng ứng dụng thực tiễn của chúng [24, 25]. Gần đây, các chất xúc tác dựa trên kim loại chuyển tiếp không quý đã thu hút sự quan tâm lớn nhờ ưu điểm về chi phí thấp, trữ lượng phong phú và khả năng điều chỉnh cấu trúc điện tử [26-29]. Trong số đó, manganese là một nguyên tố tiềm năng nhờ tồn tại ở nhiều trạng thái hóa trị, có tính oxy hóa-khử linh hoạt và khả năng tương tác mạnh với các trung gian oxy hóa của rượu đa chức [30-32].

Bên cạnh việc lựa chọn vật liệu xúc tác phù hợp, thiết kế điện cực cũng đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu suất điện hóa. Bọt nickel (nickel foam, NF) với cấu trúc xốp ba chiều, độ dẫn điện cao và độ bền cơ học tốt, đã được sử dụng rộng rãi làm giá đỡ cho các điện cực điện hóa [33-35]. Ngoài ra, việc kết hợp các chất xúc tác kim loại với vật liệu carbon dẫn điện như graphene oxide (GO) có thể cải thiện đáng kể diện tích bề mặt hoạt tính, tăng cường khả năng truyền electron và nâng cao độ ổn định trong quá trình vận hành lâu dài [36, 37]. Trên cơ sở đó, trong nghiên cứu này, điện cực trên cơ sở Mn đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt đơn giản, trong đó manganese được neo giữ và phân tán trên nền NF được biến tính bằng GO (Mn-GO@NF). Điện cực Mn-GO@NF thể hiện hoạt tính oxy hóa glycerol cao, đạt mật độ dòng $50 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ tại điện thế 1,61 V (so với RHE), đồng thời cho thấy độ ổn định trong thời gian 21 giờ ở điện thế 1,56 V (so với RHE). Những kết quả này cho thấy Mn-GO@NF là một ứng viên đầy triển vọng cho điện cực anode trong các hệ điện phân glycerol hỗ trợ sản xuất hydrogen, hướng tới công nghệ năng lượng xanh hiệu quả và bền vững.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Hóa chất

Các hóa chất như potassium permanganate (KMnO_4), potassium hydroxide (KOH), hydrochloric acid (HCl), glycerol ($\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$) được cung cấp bởi Sigma-Aldrich. Graphene oxide (GO) được tổng hợp bằng phương pháp Hummer. Tấm bọt nickel (nickel foam – NF) được mua từ Beijing Beike 2D Materials Co., Ltd. Nước cất (với độ dẫn điện $<0,1 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) được sử dụng trong quá trình thí nghiệm.

2.2. Tổng hợp điện cực Mn-GO@NF

Điện cực Mn trên nền NF được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt. Trước tiên, 0,06 g KMnO_4 và 1,0 mL dung dịch GO ($1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) được phân tán trong 40 mL

nước cất và khuấy liên tục trong 2 giờ. Sau đó, hỗn hợp dung dịch trên cùng với tấm NF đã được xử lý sạch (có kích thước $3,5 \text{ cm} \times 3,5 \text{ cm}$) được đặt vào teflon có dung tích 100 mL để tiến hành thủy nhiệt tại 160°C trong 16 giờ. Sau khi phản ứng kết thúc và được làm nguội đến nhiệt độ phòng, tấm NF được lấy ra và rửa sạch lần lượt với ethanol và nước cất để sử dụng cho các thí nghiệm sau. Mẫu điện cực thu được được kí hiệu Mn-GO@NF. Ngoài ra, để so sánh, mẫu Mn@NF được tổng hợp theo quy trình nhưng không thêm GO và NF được sử dụng làm mẫu đối chứng.

2.3. Phương pháp phân tích đặc trưng

Cấu trúc tinh thể của vật liệu tổng hợp được đặc trưng bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (X-ray diffraction - XRD, Smartlab, Rigaku). Hình thái bề mặt và thành phần các nguyên tố của vật liệu được quan sát bằng phương pháp kính hiển vi điện tử quét (scanning electron microscopy-SEM, Tescan) kết hợp với phổ tán xạ năng lượng tia X (energy-dispersive X-ray spectroscopy - EDX, Bruker).

2.4. Phương pháp điện hóa

Các đặc tính điện hóa của vật liệu được khảo sát trong hệ ba điện cực trên thiết bị điện hóa CORRITEST (Trung Quốc). Trong đó, Hg/HgO được dùng làm điện cực so sánh (RE), điện cực platinum làm điện cực đối (CE), và điện cực tổng hợp đóng vai trò là điện cực làm việc (WE). Diện tích bề mặt hoạt động của các điện cực được cố định là $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$. Các thí nghiệm được tiến hành trong dung dịch KOH 1,0 M và dung dịch KOH 1,0 M chứa glycerol 0,1 M. Tất cả các giá trị thế điện thế được hiệu chuẩn theo thế hydrogen thuận nghịch (RHE) bằng phương trình sau:

$$E_{(\text{vs RHE})} = E_{(\text{vs Hg/HgO})} + 0,059 \times \text{pH} + E^0_{(\text{Hg/HgO})} \quad (1)$$

Trước khi đo, phép đo von-ampe vòng (cyclic voltammetry - CV) được thực hiện để kích hoạt vật liệu với tốc độ quét $50 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ trong 20 chu kỳ. Phép đo quét thế tuyến tính (linear sweep voltammetry - LSV) được thực hiện đo với tốc độ quét $5 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ trong khoảng điện thế từ 0 đến 1 V. Quang phổ trở kháng điện hóa (electrochemical impedance spectroscopy - EIS) được đo trong dải tần số từ 0,1 Hz–100 kHz với biên độ 10 mV tại hiệu điện thế 1,51 V (so với RHE).

Diện tích bề mặt hoạt động điện hóa (ECSA) được xác định thông qua các phương pháp quét CV ở các tốc độ quét khác nhau từ 10 đến $100 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ trong vùng không xảy ra phản ứng Faraday, theo phương trình sau:

$$\text{ECSA} = C_{\text{dl}}/C_s \quad (2)$$

Trong đó, C_{dl} là điện dung lớp kép và C_s là điện dung riêng (được lấy bằng $40 \mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$ đối với các điện cực trên nền nickel).

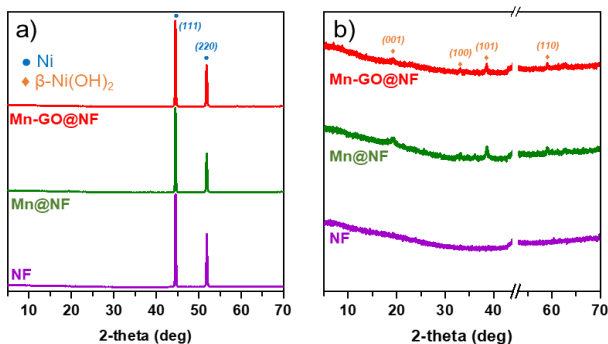
Phép đo cell voltage (CV) được thực hiện trong cấu hình hai điện cực, trong đó Mn-GO@NF được sử dụng đồng thời làm điện cực đối và điện cực làm việc. Khoảng cách giữa hai điện cực là 5 cm. Độ ổn định của điện cực tổng hợp được đánh giá thông qua phép đo dòng theo thời gian (chronoamperometry - CA) tại điện thế 1,56 V so với RHE trong thời gian 21 giờ. Để đảm bảo tính liên tục và hạn chế sự suy giảm nồng độ glycerol trong quá trình phản ứng, dung dịch điện ly được thay mới sau mỗi 3 giờ.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc trưng hóa lý của vật liệu điện cực

3.1.1. Đặc trưng cấu trúc

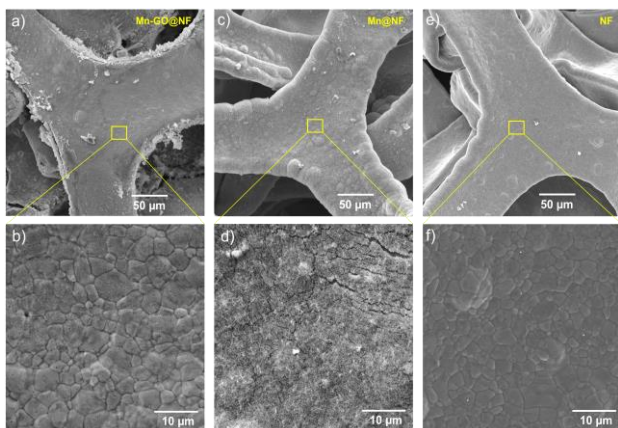
Phổ nhiễu xạ tia X của các mẫu tổng hợp được trình bày như Hình 1. Hai đỉnh nhiễu xạ mạnh tại giá trị $44,5^\circ$ và $51,9^\circ$ được gán cho các mặt tinh thể (111) và (220) của kim loại Ni [38, 39]. Ngoài ra, các đỉnh của β -Ni(OH)₂ cũng được tìm thấy trong giản đồ của các mẫu Mn-GO@NF và Mn@NF [40, 41], cho thấy sự hình thành lớp hydroxide trên bề mặt Ni foam trong quá trình tổng hợp. Đáng chú ý, không quan sát thấy các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng của các pha manganese oxide trong mẫu Mn-GO@NF, cho thấy manganese có thể tồn tại ở trạng thái vô định hình hoặc phân tán tốt trên bề mặt điện cực.



Hình 1. Phổ nhiễu xạ tia X của các mẫu tổng hợp

3.1.2. Hình thái bề mặt

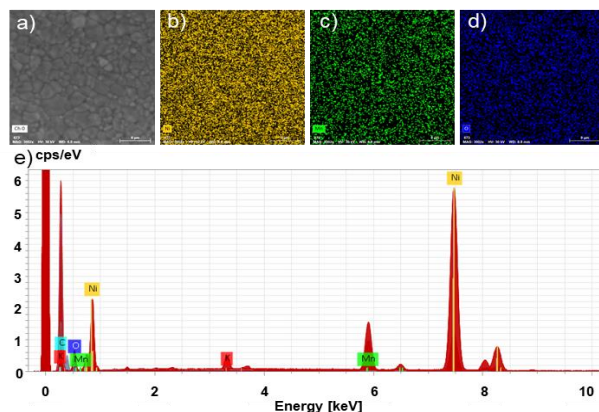
Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) của các điện cực tổng hợp được trình bày trong Hình 2 cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hình thái bề mặt của các mẫu. Đối với mẫu Mn@NF, bề mặt điện cực trở nên gồ ghề hơn, có thể liên quan đến sự hình thành các pha hydroxide kim loại như β -Ni(OH)₂ và các hợp chất chứa manganese trong quá trình tổng hợp. Ngược lại, ở mẫu Mn-GO@NF, sự hiện diện của GO tạo nên lớp vật liệu phân bố tương đối đồng đều trên bề mặt điện cực và góp phần kiểm soát quá trình hình thành các vật liệu hoạt tính như β -Ni(OH)₂ và các hợp chất của Mn. Nhờ cấu trúc mạng hai chiều và tính ưa nước, GO không chỉ ngăn sự kết tụ của các oxit Mn mà còn cải thiện khả năng dẫn điện của vật liệu, từ đó giúp tăng đáng kể diện tích bề mặt điện hóa và mật độ tâm hoạt tính.



Hình 2. Hình ảnh SEM của các vật liệu tổng hợp Mn-GO@NF (a-b), Mn@NF (c-d), và NF (e-f)

3.1.3. Thành phần nguyên tố

Kết quả phân tích phổ tán xạ tia X (EDX) (Hình 3a-d) cho thấy, các nguyên tố Ni, Mn và O được phân bố đồng đều trên toàn bộ bề mặt điện cực Mn-GO@NF, phản ánh sự phủ và gắn kết hiệu quả của β -Ni(OH)₂ và các hợp chất của Mn trên nền NF. Phổ EDX (Hình 3e) xác nhận sự hiện diện của Mn trong vật liệu. Tuy nhiên, như thể hiện trong Bảng 1, hàm lượng Mn trong mẫu Mn-GO@NF chỉ vào khoảng 0,05%, cho thấy Mn có thể tồn tại chủ yếu ở dạng phân tán cao hoặc hàm lượng pha rất ít, nằm dưới giới hạn phát hiện của XRD. Điều này phù hợp với kết quả nhiễu xạ tia X khi chỉ quan sát thấy các đỉnh đặc trưng của β -Ni(OH)₂.



Hình 3. Hình ảnh phân bố các nguyên tố Ni, Mn, O (a-d) và phổ EDX (e) của mẫu Mn-GO@NF

Bảng 1. Thành phần các nguyên tố của Mn-GO@NF

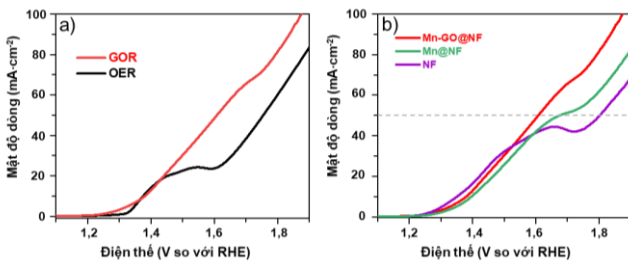
Element	Mass, %	Atom, %
Carbon	7,79	25,87
Nickel	85,83	58,32
Manganese	0,05	0,03
Oxygen	6,33	15,78
Total	100,0	100,0

3.2. Hoạt tính xúc tác điện hóa

3.2.1. Hiệu suất xúc tác điện hóa oxi hóa glycerol

Hiệu suất xúc tác của các vật liệu tổng hợp đối với phản ứng GOR được khảo sát bằng các phép đo điện hóa trong hệ ba điện cực. Các đường LSV đo trong dung dịch KOH 1,0 M chứa và không chứa glycerol 0,1 M được trình bày trong Hình 4a. Trong môi trường chỉ chứa KOH, điện cực Mn-GO@NF cần điện thế 1,75 V so với RHE để đạt được mật độ dòng điện $50 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. Khi có glycerol trong dung dịch, điện thế cần thiết giảm xuống còn 1,61 V so với RHE tại cùng mật độ dòng điện. Điều này cho thấy quá trình GOR yêu cầu điện thế thấp hơn so với OER.

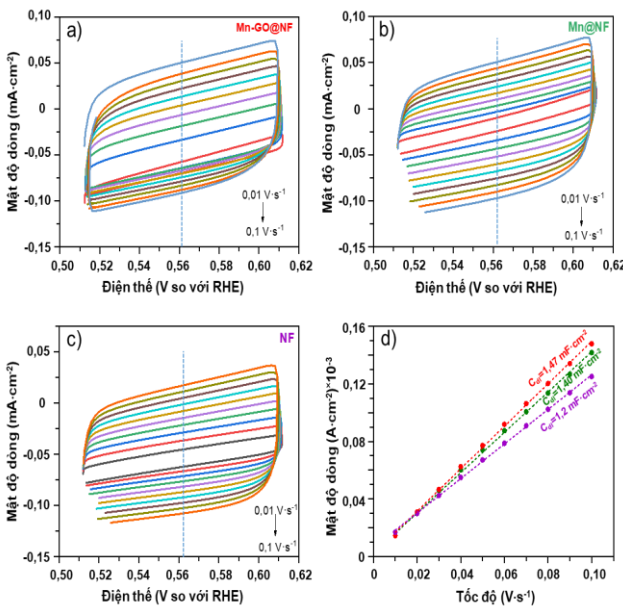
Kết quả so sánh hoạt tính của các điện cực tổng hợp khác nhau ở Hình 4b cho thấy điện cực Mn-GO@NF có hoạt tính cao hơn so với Mn@NF và NF. Cụ thể, tại mật độ dòng $50 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, Mn-GO@NF chỉ yêu cầu 1,61 V so với RHE, thấp hơn so với Mn@NF (1,67 V so với RHE) và NF (1,80 V so với RHE). Kết quả sự kết hợp giữa Mn, β -Ni(OH)₂/NF và graphene oxide trong việc cải thiện hoạt tính điện xúc tác có thể do sự gia tăng mật độ tâm hoạt động và khả năng dẫn truyền điện tử.



Hình 4. Đồ thị LSV của Mn-GO@NF trong dung dịch có và không có glycerol (a) và so với các mẫu tổng hợp khác trong dung dịch có chứa glycerol (b)

3.2.2. Diện tích bề mặt hoạt động điện hóa

Diện tích bề mặt hoạt động điện hóa (ECSA) của các điện cực được tính thông qua phép đo CV ở các tốc độ quét khác nhau (từ 5 đến 100 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$) trong vùng không xảy ra phản ứng Faraday (Hình 5a-c). Từ độ dốc của đường biểu diễn dòng điện theo tốc độ quét, các giá trị điện dung lớp kép (C_{dl}) tương ứng được xác định lần lượt là 1,47; 1,40; 1,20 $\text{mF}\cdot\text{cm}^{-2}$ đối với điện cực Mn-GO@NF, Mn@NF và NF (Hình 5d). Giá trị C_{dl} cao nhất của Mn-GO@NF phản ánh bề mặt điện hóa lớn và sự tăng đáng kể số lượng vị trí tâm hoạt động xúc tác nhờ sự phân tán tốt của Mn và $\beta\text{-Ni}(\text{OH})_2$ trên nền GO và NF.



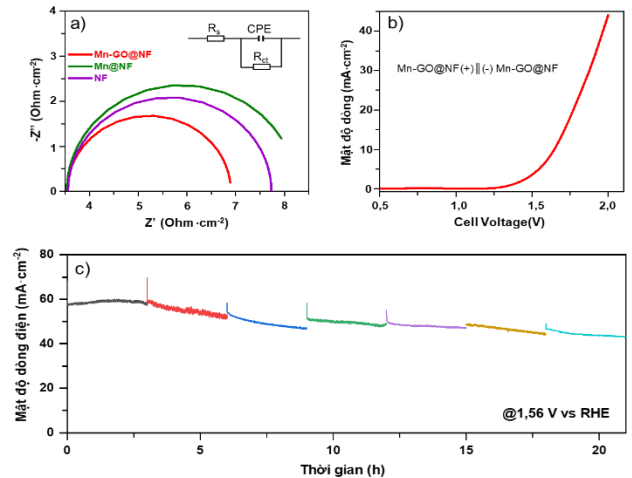
Hình 5. Đồ thị CV của các mẫu tổng hợp ở các tốc độ quét khác nhau từ 10 đến 100 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ trong dung dịch KOH 1,0 M + Glycerol 0,1 M (a-c) và giá trị điện dung lớp kép (C_{dl}) được trích xuất từ các đồ thị CV tương ứng (d)

3.2.3. Khả năng truyền điện tích

Khả năng truyền điện tích của các điện cực được phân tích bằng phổ trở kháng điện hóa (EIS). Như thể hiện trong biểu đồ Nyquist (Hình 6a), Mn-GO@NF có bán nguyệt nhỏ nhất với điện trở truyền điện tích $R_{ct} = 3,3 \Omega$, thấp hơn rõ rệt so với NF (4,2 Ω). Sự suy giảm R_{ct} này cho thấy lớp phủ Mn-GO góp phần cải thiện khả năng dẫn điện và thúc đẩy quá trình truyền electron tại bề mặt điện cực, từ đó làm tăng tốc độ phản ứng GOR.

Hiệu suất xúc tác điện hóa của vật liệu Mn-GO@NF tiếp tục được đánh giá trong hệ hai điện cực nhằm mô

phong điều kiện hoạt động thực tế của thiết bị điện phân sử dụng phản ứng GOR để thay thế phản ứng OER truyền thống. Trong cấu hình này, cả anode và cathode đều được chế tạo từ vật liệu Mn-GO@NF, dung dịch điện ly sử dụng là 1,0 M KOH chứa 0,1 M glycerol. Kết quả thể hiện trong Hình 6b cho thấy hệ điện cực đối xứng Mn-GO@NF || Mn-GO@NF chỉ yêu cầu điện áp khoảng 1,96 V để đạt mật độ dòng 40 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$.



Hình 6. Quang phổ trở kháng điện hóa (EIS) (a); đường LSV điện áp trong hệ hai điện cực (b); và độ bền của vật liệu trong 21 giờ tại điện thế 1,56 V so với RHE (c)

3.2.4. Mối liên hệ giữa hoạt tính và cấu trúc

Sự kết hợp giữa nền NF, GO và các hợp chất chứa Mn hình thành trong quá trình thủy nhiệt liên quan đến sự cải thiện hoạt tính xúc tác điện hóa của điện cực Mn-GO@NF. Kết quả XRD và SEM cho thấy sự xuất hiện của các pha hydroxide nickel cùng với Mn hoặc các hợp chất của Mn trên bề mặt điện cực NF. Mặc dù, hàm lượng Mn tương đối thấp (0,05 wt%), sự hiện diện của Mn ở trạng thái phân tán cao có thể góp phần làm thay đổi đặc tính bề mặt và hỗ trợ quá trình oxy hóa glycerol. Bên cạnh đó, sự có mặt của GO có thể giúp hạn chế sự kết tụ của vật liệu trong quá trình tổng hợp đồng thời cải thiện sự phân bố của các pha hoạt tính trên nền NF. Kết quả ECSA cho thấy, Mn-GO@NF có diện tích bề mặt hoạt động điện hóa lớn hơn, trong khi kết quả EIS cho thấy điện trở truyền điện tích thấp hơn so với Mn@NF và NF. Những yếu tố này có thể góp phần nâng cao hoạt tính điện hóa của điện cực Mn-GO@NF đối với phản ứng GOR.

3.2.5. Độ bền của điện cực

Để đánh giá độ ổn định của điện cực Mn-GO@NF, phép đo dòng theo thời gian (CA) được tiến hành tại điện thế 1,56 V so với RHE trong tổng thời gian 21 giờ. Trong quá trình đo, dung dịch điện ly được thay mới định kỳ sau mỗi 3 giờ nhằm hạn chế sự suy giảm nồng độ glycerol và duy trì điều kiện phản ứng ổn định. Kết quả đo CA ở Hình 6c cho thấy điện cực Mn-GO@NF vẫn duy trì được mật độ dòng điện tương đối ổn định trong suốt 21 giờ phản ứng. Sự suy giảm dòng điện theo thời gian có thể liên quan đến quá trình tiêu thụ glycerol và sự thay đổi bề mặt điện cực trong quá trình vận hành. Tuy nhiên, điện cực vẫn thể hiện khả năng hoạt động bền trong môi trường điện ly kiềm chứa glycerol.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, điện cực Mn trên nền NF (Mn-GO@NF) đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt và thể hiện hoạt tính xúc tác điện hóa tốt đối với GOR trong môi trường kiềm. Điện cực Mn-GO@NF đạt mật độ dòng 50 mA·cm⁻² tại điện thế 1,61 V (so với RHE), thấp hơn đáng kể so với Mn@NF và NF. Ngoài ra, điện cực duy trì độ ổn định tốt trong 21 giờ. Việc sử dụng glycerol làm chất oxy hóa tại anode làm giảm điện áp vận hành so với OER truyền thống. Những kết quả này cho thấy Mn-GO@NF là vật liệu điện cực tiềm năng cho các hệ điện phân tích hợp sản xuất hydrogen xanh và chuyển hóa sinh khối.

Lời cảm ơn: Công trình này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong khuôn khổ đề tài khoa học và công nghệ cấp Bộ, Mã số: B2024.DNA.03.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. Gayen, R. Chatterjee, and S. Roy, "A review on environmental impacts of renewable energy for sustainable development," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 5285-5310, 2024/03/01 2024, doi: 10.1007/s13762-023-05380-z.
- [2] W. S. Ebhota and T.-C. Jen, "Fossil Fuels Environmental Challenges and the Role of Solar Photovoltaic Technology Advances in Fast Tracking Hybrid Renewable Energy System," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 97-117, 2020/01/01 2020, doi: 10.1007/s40684-019-00101-9.
- [3] J. L. Holecek, H. M. E. Geli, M. N. Sawalhah, and R. Valdez, "A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050?," *Sustainability*, vol. 14, no. 8, p. 4792, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4792>.
- [4] N. A. Baharuddin, W. N. A. Wan Yusoff, A. J. Abd Aziz, and N. N. Mohd Tahir, "Hydrogen fuel cells for sustainable energy: Development and progress in selected developed countries," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1078, no. 1, p. 012011, 2021/02/01 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1078/1/012011.
- [5] "An Introduction to Different Types of Hydrogen and Methods of Green Hydrogen Production," in *Legal Framework of Green Hydrogen Production and Hydrogen Economy for Sustainable Development*, (Books of Research Collection, 2025, pp. 1-27.
- [6] G. F. Toki and M. K. Hossain, "Introduction to the Hydrogen Energy Production and Fuel Generation," in *Hydrogen Energy Production and Fuel Generation*, 2025, pp. 1-36.
- [7] H. Li, J. Guo, Z. Li, and J. Wang, "Research Progress of Hydrogen Production Technology and Related Catalysts by Electrolysis of Water," *Molecules*, vol. 28, no. 13, p. 5010, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/13/5010>.
- [8] L. Vidas and R. Castro, "Recent Developments on Hydrogen Production Technologies: State-of-the-Art Review with a Focus on Green-Electrolysis," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 23, p. 11363, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/23/11363>.
- [9] A. Franco and C. Giovannini, "Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives," *Sustainability*, vol. 15, no. 24, p. 16917, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/24/16917>.
- [10] J.-T. Ren, L. Chen, H.-Y. Wang, W.-W. Tian, and Z.-Y. Yuan, "Water electrolysis for hydrogen production: from hybrid systems to self-powered/catalyzed devices," *Energy & Environmental Science*, 10.1039/D3EE02467A vol. 17, no. 1, pp. 49-113, 2024, doi: 10.1039/D3EE02467A.
- [11] X. Wang, H. Zhong, S. Xi, W. S. V. Lee, and J. Xue, "Understanding of Oxygen Redox in the Oxygen Evolution Reaction," *Advanced Materials*, vol. 34, no. 50, p. 2107956, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202107956>.
- [12] C. Rong, K. Dastafkan, Y. Wang, and C. Zhao, "Breaking the Activity and Stability Bottlenecks of Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reactions in Acids," *Advanced Materials*, vol. 35, no. 49, p. 2211884, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202211884>.
- [13] C. Cai *et al.*, "Atomically Local Electric Field Induced Interface Water Reorientation for Alkaline Hydrogen Evolution Reaction," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 62, no. 26, p. e202300873, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/anie.202300873>.
- [14] C. Huang *et al.*, "Recent progress and perspective of cobalt-based catalysts for water splitting: design and nanoarchitectonics," *Materials Today Energy*, vol. 23, p. 100911, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100911>.
- [15] J. Wu, Z. Zhai, S. Yin, and S. Wang, "General Formation of Interfacial Assembled Hierarchical Micro-Nano Arrays for Biomass Upgrading-Coupled Hydrogen Production," *Advanced Functional Materials*, vol. 34, no. 6, p. 2308198, 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202308198>.
- [16] Y. Yan *et al.*, "Electrocatalytic Upcycling of Biomass and Plastic Wastes to Biodegradable Polymer Monomers and Hydrogen Fuel at High Current Densities," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 145, no. 11, pp. 6144-6155, 2023/03/22 2023, doi: 10.1021/jacs.2c11861.
- [17] W.-J. Liu *et al.*, "Efficient electrochemical production of glucaric acid and H₂ via glucose electrolysis," *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, p. 265, 2020/01/14 2020, doi: 10.1038/s41467-019-14157-3.
- [18] D. Si, B. Xiong, L. Chen, and J. Shi, "Highly selective and efficient electrocatalytic synthesis of glycolic acid in coupling with hydrogen evolution," *Chem Catalysis*, vol. 1, no. 4, pp. 941-955, 2021, doi: 10.1016/j.checat.2021.08.001.
- [19] C. R. Chilakamarry, A. M. M. Sakinah, A. W. Zularisam, and A. Pandey, "Glycerol waste to value added products and its potential applications," *Systems Microbiology and Biomaterials*, vol. 1, no. 4, pp. 378-396, 2021/10/01 2021, doi: 10.1007/s43393-021-00036-w.
- [20] M. R. Monteiro, C. L. Kugelmeier, R. S. Pinheiro, M. O. Batalha, and A. da Silva César, "Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88, pp. 109-122, 2018/05/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.019>.
- [21] E. Antolini, "Glycerol Electro-Oxidation in Alkaline Media and Alkaline Direct Glycerol Fuel Cells," *Catalysts*, vol. 9, no. 12, p. 980, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4344/9/12/980>.
- [22] H. Wan *et al.*, "Electro-Oxidation of Glycerol to High-Value-Added C1-C3 Products by Iron-Substituted Spinel Zinc Cobalt Oxides," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 14, no. 12, pp. 14293-14301, 2022/03/30 2022, doi: 10.1021/acsaami.2c02215.
- [23] X. Liu *et al.*, "Electrocatalytic synthesis of heterocycles from biomass-derived furfuryl alcohols," *Nature Communications*, vol. 12, no. 1, p. 1868, 2021/03/25 2021, doi: 10.1038/s41467-021-22157-5.
- [24] Y. Zhou, Y. Shen, and J. Xi, "Seed-mediated synthesis of Pt_xAu_y@Ag electrocatalysts for the selective oxidation of glycerol," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 245, pp. 604-612, 2019/05/15/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.01.009>.
- [25] C. H. Lam, A. J. Bloomfield, and P. T. Anastas, "A switchable route to valuable commodity chemicals from glycerol via electrocatalytic oxidation with an earth abundant metal oxidation catalyst," *Green Chemistry*, 10.1039/C7GC00371D vol. 19, no. 8, pp. 1958-1968, 2017, doi: 10.1039/C7GC00371D.
- [26] T. Guo, L. Li, and Z. Wang, "Recent Development and Future Perspectives of Amorphous Transition Metal-Based Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction," *Advanced Energy Materials*, vol. 12, no. 24, p. 2200827, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202200827>.
- [27] C. Liu, M. Hirohara, T. Maekawa, R. Chang, T. Hayashi, and C.-Y. Chiang, "Selective electro-oxidation of glycerol to

- dihydroxyacetone by a non-precious electrocatalyst – CuO," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 265, p. 118543, 2020/05/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118543>.
- [28] R.-Y. Fan *et al.*, "Optimized Electronic Modification of S-Doped CuO Induced by Oxidative Reconstruction for Coupling Glycerol Electrooxidation with Hydrogen Evolution," *Nano-Micro Letters*, vol. 15, no. 1, p. 190, 2023/07/29 2023, doi: 10.1007/s40820-023-01159-6.
- [29] X. Han *et al.*, "Electrocatalytic Oxidation of Glycerol to Formic Acid by CuCo₂O₄ Spinel Oxide Nanostructure Catalysts," *ACS Catalysis*, vol. 10, no. 12, pp. 6741-6752, 2020/06/19 2020, doi: 10.1021/acscatal.0c01498.
- [30] J. Wang *et al.*, "Manganese oxide-based catalysts for the sustainable synthesis of value-added chemicals through oxidation processes: a critical review and perspectives for the future," *Green Chemistry*, 10.1039/D3GC04117D vol. 26, no. 5, pp. 2365-2383, 2024, doi: 10.1039/D3GC04117D.
- [31] N.-N. Liang *et al.*, "Arrayed faceted manganese oxides for selective ethylene electro-oxidation to ethylene glycol in aqueous electrolytes," *Nature Communications*, vol. 17, no. 1, p. 290, 2025/12/06 2025, doi: 10.1038/s41467-025-66973-5.
- [32] G.-S. Tran, T.-G. Vo, and C.-Y. Chiang, "Earth-abundant manganese oxide nanoneedle as highly efficient electrocatalyst for selective glycerol electro-oxidation to dihydroxyacetone," *Journal of Catalysis*, vol. 404, pp. 139-148, 2021/12/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2021.09.005>.
- [33] C. Chen *et al.*, "Engineering of Self-Supported Electrocatalysts on a Three-Dimensional Nickel Foam Platform for Efficient Water Electrolysis," *Transactions of Tianjin University*, vol. 30, no. 2, pp. 103-116, 2024/04/01 2024, doi: 10.1007/s12209-024-00389-y.
- [34] S. Weng, Q. An, Y. Xu, Y. Jiao, and J. Chen, "In-Situ Formation of NiFe-MOF on Nickel Foam as a Self-Supporting Electrode for Flexible Electrochemical Sensing and Energy Conversion," *Chemosensors*, vol. 11, no. 4, p. 242, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-9040/11/4/242>.
- [35] B. Lu *et al.*, "Ni-P alloy@carbon nanotubes immobilized on the framework of Ni foam as a 3D hierarchical porous self-supporting electrode for hydrogen evolution reaction," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 45, pp. 23245-23253, 2021/07/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.139>.
- [36] V. Pasindu, P. Yapa, S. Dabare, and I. Munaweera, "Multifunctional transition metal oxide/graphene oxide nanocomposites for catalytic dye degradation, renewable energy, and energy storage applications," *RSC Advances*, 10.1039/D5RA04806K vol. 15, no. 40, pp. 33162-33186, 2025, doi: 10.1039/D5RA04806K.
- [37] S. Z. Hussain, M. Ihrar, S. B. Hussain, W. C. Oh, and K. Ullah, "A review on graphene based transition metal oxide composites and its application towards supercapacitor electrodes," *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 4, p. 764, 2020/03/27 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2515-8.
- [38] X. Hu, X. Tian, Y.-W. Lin, and Z. Wang, "Nickel foam and stainless steel mesh as electrocatalysts for hydrogen evolution reaction, oxygen evolution reaction and overall water splitting in alkaline media," *RSC Advances*, 10.1039/C9RA07258F vol. 9, no. 54, pp. 31563-31571, 2019, doi: 10.1039/C9RA07258F.
- [39] S. Sun *et al.*, "Nickel-foam-supported β -Ni(OH)₂ as a green anodic catalyst for energy efficient electrooxidative degradation of azo-dye wastewater," *RSC Advances*, 10.1039/C8RA03039A vol. 8, no. 35, pp. 19776-19785, 2018, doi: 10.1039/C8RA03039A.
- [40] Z. Qin, Y. Wang, X. Huang, W. Shen, J. Yu, and J. Li, "A Facile Synthesis of Three Dimensional β -Ni(OH)₂ Composed of Ultrathin Nanosheets for High Performance Pseudocapacitor," *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, vol. 30, no. 6, pp. 2089-2097, 2020/06/01 2020, doi: 10.1007/s10904-019-01360-4.
- [41] Z. Wu, X.-L. Huang, Z.-L. Wang, J.-J. Xu, H.-G. Wang, and X.-B. Zhang, "Electrostatic Induced Stretch Growth of Homogeneous β -Ni(OH)₂ on Graphene with Enhanced High-Rate Cycling for Supercapacitors," *Scientific Reports*, vol. 4, no. 1, p. 3669, 2014/01/13 2014, doi: 10.1038/srep03669.