

## VẬT LIỆU XÚC TÁC MANGAN TRÊN NỀN BỌT NIKEN CHO PHẢN ỨNG ĐIỆN HÓA OXY HÓA GLYCEROL

Nguyễn Công Hồng Nhật<sup>1</sup>, Bùi Đức Duy<sup>2</sup>, Nguyễn Thị Thanh Huyền<sup>3,4</sup>, Nguyễn Đình Minh Tuấn<sup>5</sup>,  
Phan Thị Hằng Nga<sup>2</sup>, Lê Lâm Sơn<sup>1</sup>, Nguyễn Chinh Chiến<sup>3,4</sup>, Lê Trung Hiếu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Khoa Hoá, Trường Đại học Khoa học, Đại học Huế, Huế, Việt Nam

<sup>2</sup> Trường Y Dược, Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>3</sup> Trung tâm Hóa học tiên tiến, Viện Nghiên cứu và Phát triển, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>4</sup> Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>5</sup> Khoa Hóa, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

\* Tác giả liên hệ Lê Trung Hiếu <lthieu@hueuni.edu.vn>

(Ngày nhận bài: 09-03-2025; Hoàn thành phản biện: 29-08-2025; Ngày chấp nhận đăng: 30-09-2025)

**Tóm tắt.** Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành tổng hợp điện cực mangan (Mn) trên nền bọt niken (NF) bằng phương pháp thủy nhiệt và đánh giá hiệu quả ứng dụng cho phản ứng oxy hóa glycerol (GOR). Kết quả cho thấy ở mật độ dòng 10 mA.cm<sup>-2</sup>, điện cực Mn@NF có khả năng thúc đẩy GOR hiệu quả với điện thế chỉ 1,35 V so với điện cực hydro thuận nghịch (RHE), thấp hơn đáng kể so với phản ứng oxy hóa nước. Ngoài ra, tốc độ sinh hydro trên điện cực Mn@NF là 0,625 mmol.H<sub>2</sub>.cm<sup>-2</sup>.giờ<sup>-1</sup> ở điện thế 1,42 V so với RHE và duy trì ổn định dòng điện trong 10 giờ. Những kết quả này cho thấy tiềm năng ứng dụng hiệu quả của Mn@NF cho phản ứng GOR, mở ra hướng đi mới cho quá trình sản xuất hydro tiết kiệm năng lượng.

**Từ khóa:** mangan, bọt niken, glycerol, điện hóa, hydro

### Manganese-based catalytic material on nickel foam substrate for electrochemical glycerol oxidation

Cong Hong Nhat Nguyen<sup>1</sup>, Duc Duy Bui<sup>2</sup>, Thi Thanh Huyen Nguyen<sup>3,4</sup>, Minh Tuan Nguyen Dinh<sup>5</sup>,  
Nga Hang Thi Phan<sup>2</sup>, Lam Son Le<sup>1</sup>, Chinh Chien Nguyen<sup>3,4</sup>, Trung Hieu Le<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Chemistry, Hue University of Sciences, Hue University, Hue, Vietnam

<sup>2</sup> School of Medicine and Pharmacy, The University of Danang, Danang, Vietnam

<sup>3</sup> Center for Advanced Chemistry, Institute of Research and Development, Duy Tan University, Danang, Vietnam

<sup>4</sup> Faculty of Natural Sciences, Duy Tan University, Danang, Vietnam

<sup>5</sup> Faculty of Chemical Engineering, University of Science and Technology, The University of Danang, Danang, Vietnam

\* Correspondence to Trung Hieu Le <lthieu@hueuni.edu.vn>

(Received: 09 March 2025; Revised: 29 August 2025; Accepted: 30 September 2025)

**Abstract.** In this study, a manganese (Mn)-based electrode was synthesised on nickel foam via a hydrothermal method, and its electrocatalytic performance was evaluated for the glycerol oxidation reaction (GOR). The results revealed that Mn@NF exhibited excellent electrocatalytic performance toward GOR, requiring a potential of only 1.35 V vs. RHE to reach a current density of 10 mA.cm<sup>-2</sup> —

substantially lower than that required for the oxygen evolution reaction. Furthermore, the catalyst achieved a hydrogen production rate of 0,625 mL.cm<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> at a potential of 1.42 V vs. RHE and maintained a stable current output over 10 hours of continuous operation. These findings demonstrate the promising potential of Mn@NF as an efficient electrocatalyst for GOR, offering a new pathway for energy-saving hydrogen production.

**Keywords:** manganese, nickel foam, glycerol, electrocatalysis, hydrogen

## 1 Mở đầu

Sự suy giảm nhanh chóng của nguồn nhiên liệu hóa thạch, cùng với những mối lo ngại về biến đổi khí hậu và hiệu ứng nhà kính đã góp phần thúc đẩy mạnh mẽ sự phát triển của các nguồn năng lượng tái tạo và thân thiện với môi trường như năng lượng mặt trời, gió, thủy triều và hydro [1]. Trong đó, hydro nổi bật là một nguồn năng lượng tiềm năng đầy hứa hẹn, có khả năng thay thế nhiên liệu hóa thạch nhờ vào ưu điểm vượt trội về mật độ năng lượng và khả năng giảm phát thải carbon [2]. Chính những đặc điểm độc đáo này, hydro đã và đang nhận được sự quan tâm đáng kể từ cả cộng đồng khoa học lẫn công nghiệp. Trong các phương pháp sản xuất hydro, điện phân nước với thiết kế đơn giản, hiệu quả và khả năng tạo hydro tinh khiết cao đã mở ra hướng đi bền vững hơn so với phương pháp sản xuất truyền thống [3].

Theo lý thuyết nhiệt động học, quá trình điện phân nước trong điều kiện tiêu chuẩn đòi hỏi năng lượng tối thiểu 237 kJ.mol<sup>-1</sup> để tạo ra khí H<sub>2</sub>, tương ứng với điện thế 1,23 V so với RHE [4]. Tuy nhiên, do tốc độ nhỏ của phản ứng oxy hóa nước (OER), các hệ thống điện phân thương mại thường cần áp một thế khoảng 1,8–2,0 V nhằm đảm bảo hiệu suất phản ứng ở mức cao [5, 6]. Để giảm điện năng tiêu thụ, một hướng tiếp cận đầy triển vọng là thay thế OER bằng quá trình oxy hóa glycerol (GOR) [7]. Không chỉ giúp cải thiện hiệu suất sản xuất hydro, GOR còn mở ra cơ hội chuyển hóa glycerol – một sản phẩm phụ từ công nghiệp biodiesel thành các hợp chất hóa học có giá trị cao như acid glycolic (hợp chất trung gian trong tổng hợp amino acid, hỗ trợ điều trị bệnh da

liều), acid tartronic (ứng dụng trong thuốc chống co giật, điều trị loãng xương và béo phì), 1,3-dihydroxyacetone (tiền chất của D-L-serin, dùng trong mỹ phẩm và vật liệu polymer y sinh), và acid mesoxalic (tác nhân tạo phức, tiền chất trong tổng hợp hữu cơ và có tiềm năng chống HIV) [8]. Phương pháp này không chỉ nâng cao giá trị kinh tế của glycerol thông qua quá trình chuyển hóa thành các sản phẩm hữu ích [9], mà còn góp phần thúc đẩy sản xuất hydro – một nguồn năng lượng sạch và bền vững cho tương lai [10]. Vì vậy, quá trình điện hóa oxy hóa glycerol đã thu hút sự quan tâm ngày càng lớn trong những năm gần đây, nổi bật là việc phát triển các chất xúc tác điện hóa mới với tính chất và hiệu quả vượt trội.

Hiện nay, các điện cực xúc tác GOR chủ yếu dựa trên kim loại quý như Pt, Au và Pd hoặc hợp kim của chúng. Tuy nhiên, giá thành cao và tính chọn lọc sản phẩm chưa tối ưu là những rào cản lớn đối với ứng dụng thực tiễn [11]. Do đó, việc phát triển các điện cực xúc tác từ kim loại chuyển tiếp như Mn, Ni, Fe với chi phí thấp, độ bền cao và hiệu suất hoạt động ổn định đang nhận được nhiều sự quan tâm.

Mangan (Mn) là một kim loại chuyển tiếp phổ biến với trữ lượng dồi dào, giá thành thấp và thân thiện với môi trường đang trở thành một lựa chọn hấp dẫn trong lĩnh vực xúc tác điện hóa. Vật liệu trên cơ sở Mn còn cho thấy hiệu suất xúc tác vượt trội và độ bền cao trong môi trường kiềm, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình oxy hóa trên bề mặt xúc tác [12, 13].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã tổng hợp thành công vật liệu xúc tác trên cơ sở kim loại Mn, phát triển trên nền Ni Foam (NF). Kết quả

cho thấy điện cực Mn@NF đạt hiệu suất xúc tác tốt đối với phản ứng GOR, với thế chỉ 1,35 V so với RHE tại mật độ dòng 10 mA.cm<sup>-2</sup>. Bên cạnh đó, điện cực tổng hợp có khả năng sản xuất hydro với tốc độ 0,625 mL.cm<sup>-2</sup>.giờ<sup>-1</sup> tại thế 1,42 V so với RHE và duy trì cường độ dòng điện ổn định trong 10 giờ.

## 2 Thực nghiệm

### 2.1 Hóa chất

Potassium permanganate (KMnO<sub>4</sub>), potassium hydroxide (KOH), glycerol và HCl (acid hydrochloric, 38%) được mua từ hãng Sigma Aldrich, ethanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) 99% được mua từ công ty hóa chất Trường Thịnh, Việt Nam. Bột niken (NF) được mua từ công ty TNHH Vật liệu Beike 2D, Bắc Kinh, với độ tinh khiết trên 99% và độ dày 0,5 mm. Bột niken (3.5 × 3.5 cm) được ngâm trong HCl 1 M 45 phút, sau đó siêu âm trong ethanol 96% trong 20 phút. Cuối cùng, NF được rửa sạch lại bằng nước cất và ethanol 99%, rồi sấy khô.

### 2.2 Tổng hợp điện cực Mn@NF

Chất xúc tác mangan trên nền NF (ký hiệu Mn@NF) được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt. Cụ thể, 0,06 g KMnO<sub>4</sub> được hòa tan trong 40 mL nước cất. Sau đó, dung dịch và NF được đưa vào autoclave để thủy nhiệt ở 160 °C trong 16 giờ. Sau khi phản ứng kết thúc, vật liệu được rửa sạch nhiều lần bằng nước cất và ethanol 99%, sấy qua đêm ở 60 °C để thu được chất xúc tác Mn@NF.

### 2.3 Phân tích đặc trưng

Giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) của các vật liệu xúc tác được ghi trên máy đo nhiễu xạ SmartLab X-ray Diffractometer của hãng Rigaku (Nhật Bản). Hình thái vật liệu được phân tích trên kính hiển vi điện tử quét (SEM) trên thiết bị Vega 3 (Tescan, Cộng hòa Séc). Phổ tán sắc năng lượng

tia X (EDS) được ghi trên thiết bị Bruker 630M (Bruker, Đức) tích hợp trên máy SEM, nhằm xác định thành phần và sự phân bố các nguyên tố trên bề mặt vật liệu.

### 2.4 Phân tích điện hóa

Quá trình oxy hóa glycerol được tiến hành thông qua phần mềm CS Studio 6 của máy CORRITEST (Trung Quốc). Trong hệ thống điện hóa ba điện cực, các mẫu tổng hợp được sử dụng làm điện cực làm việc (working electrode, WE), điện cực so sánh (reference electrode, RE) là Hg/HgO, và điện cực đối (counter electrode, CE) là Pt. Dung dịch điện phân gồm có dung dịch KOH 1 M và glycerol 0,1 M. Thế thu được quy đổi sang thế so với điện cực hydro chuẩn (RHE) theo công thức:

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

trong đó  $E_{(Hg/HgO)}$  là điện thế;  $E_{0(Hg/HgO)}$  là điện thế của điện cực Hg/HgO so với RHE.

Để ổn định vật liệu, đầu tiên tiến hành đo quét thế tuần hoàn (cyclic voltammetry – CV) (với tốc độ quét 50 mV.giây<sup>-1</sup> trong 20 chu kỳ). Phương pháp quét thế tuyến tính (linear sweep voltammetry – LSV) được tiến hành với tốc độ quét 5 mV.giây<sup>-1</sup> ở thế từ 0 đến 1 V. Phổ trở kháng điện hóa (EIS – electrochemical impedance spectroscopy) được ghi tại thế 1,27 V so với RHE trong dải tần số 0,1–100 kHz với biên độ 10 mV. Diện tích bề mặt hoạt động điện hóa (ECSA) được xác định thông qua quét CV ở các tốc độ quét khác nhau trong khoảng từ 5 đến 100 mV.giây<sup>-1</sup>. Thử nghiệm độ ổn định của chất xúc tác được thực hiện bằng phương pháp đo dòng theo thời gian tại thế 1,42 V so với RHE trong 10 giờ.

## 3 Kết quả và thảo luận

Phương pháp nhiễu xạ tia X được sử dụng để xác định thành phần pha của vật liệu đã tổng hợp và cung cấp thông tin quan trọng về sự phân

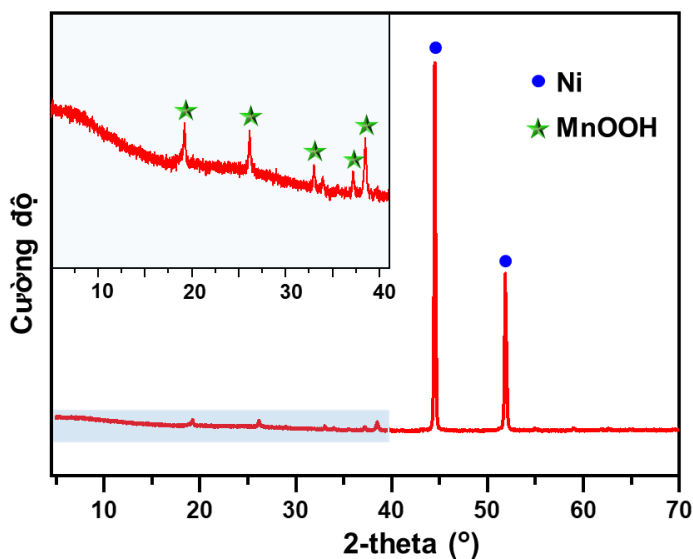
bố của các pha trong mẫu. Giản đồ trên Hình 1 cho thấy sự xuất hiện của các đỉnh nhiễu xạ đặc trưng tại  $44,6^\circ$  và  $52,0^\circ$  tương ứng với các mặt tinh thể (111) và (200) của Ni (JCPDS No. 04-0850) [14]. Điều này chứng tỏ sự có mặt đáng kể của pha Ni trong vật liệu tổng hợp. Các góc nhiễu xạ tại  $19,2^\circ$ ,  $26^\circ$ ,  $29,0^\circ$ ,  $37,2^\circ$  và  $39,0^\circ$  đặc trưng cho pha MnOOH (JCPDS No. 41-1379), phản ánh sự hình thành của hợp chất manganese oxyhydroxide trong cấu trúc vật liệu.

Để nghiên cứu hình thái của các mẫu sau tổng hợp, chúng tôi đã phương pháp hiển vi điện tử quét. Hình 2A và 2B cho thấy NF ban đầu có bề mặt nhẵn; Hình 2C và 2D cho thấy hình thái tổng thể của vật liệu Mn@NF. Việc phân bố dày đặc của các sợi nano MnOOH tạo ra một lớp phủ trên nền NF, giúp tăng diện tích bề mặt hoạt động cho điện cực. Hình ảnh có sự khác biệt rõ rệt so với hình thái của NF. Hình 3 (phổ phân tán năng lượng tia X cung cấp dữ liệu về sự có mặt các nguyên tố trên bề mặt Mn@NF. Điều này khẳng định rằng một lớp vật liệu MnOOH dạng sợi xuất hiện khắp trên nền NF đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt.

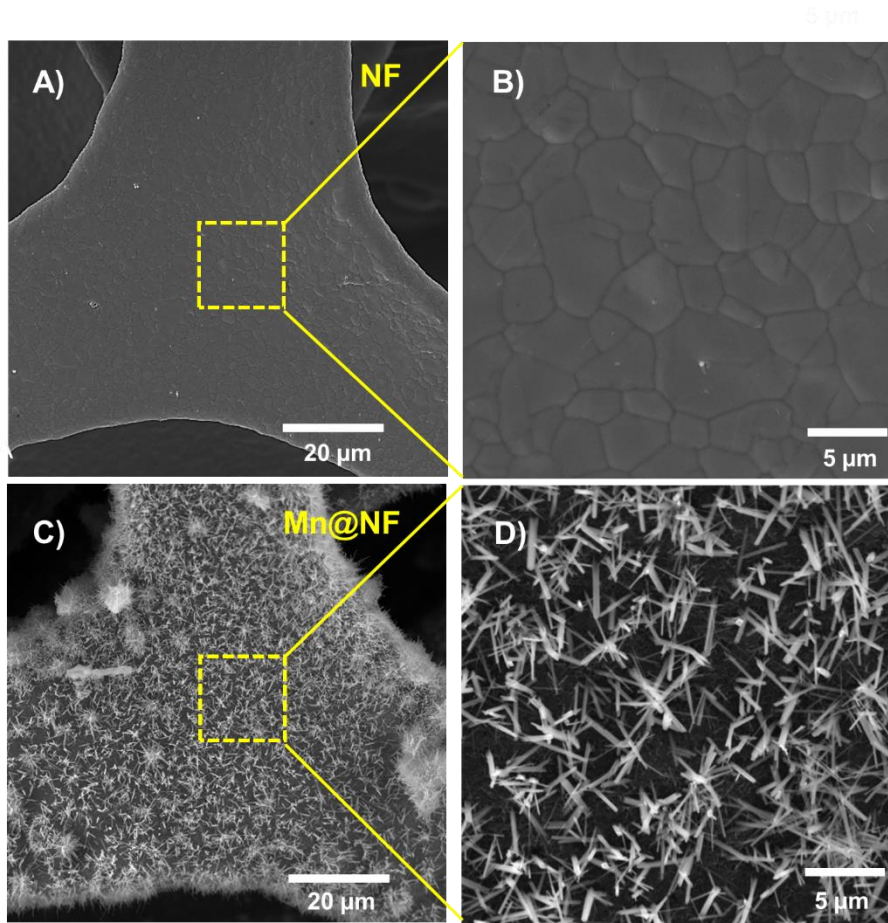
Các thí nghiệm điện hóa được thực hiện trên hệ thống gồm ba điện cực sử dụng các mẫu

tổng hợp làm điện cực làm việc, Hg/HgO làm điện cực so sánh, và platin làm điện cực đối. Trước khi đo, các điện cực được kích hoạt bằng quét thế tuần hoàn với tốc độ quét  $50 \text{ mV.s}^{-1}$  trong 20 chu kỳ. Hình 4A trình bày đường quét thế tuyến tính của điện cực Mn@NF trong điều kiện có và không có glycerol 0,1 M. Kết quả cho thấy vật liệu Mn@NF chỉ đạt thế  $1,35 \text{ V}$  so với RHE tại mật độ dòng  $10 \text{ mA.cm}^{-2}$ , thấp hơn nhiều so với phản ứng oxy hóa nước (OER) là  $1,59 \text{ V}$  so với RHE. Để đánh giá rõ hơn hiệu suất của phản ứng GOR trên Mn@NF, hai đường cong LSV của Mn@NF và NF được so sánh với nhau trên Hình 4B. Kết quả cho thấy Mn@NF có hiệu suất vượt hơn so với NF với thế  $1,43 \text{ V}$  so với RHE tại mật độ dòng  $10 \text{ mA.cm}^{-2}$ . Điện cực này có hiệu suất cao hơn so với nhiều điện cực đã công bố trước đây (Bảng 1).

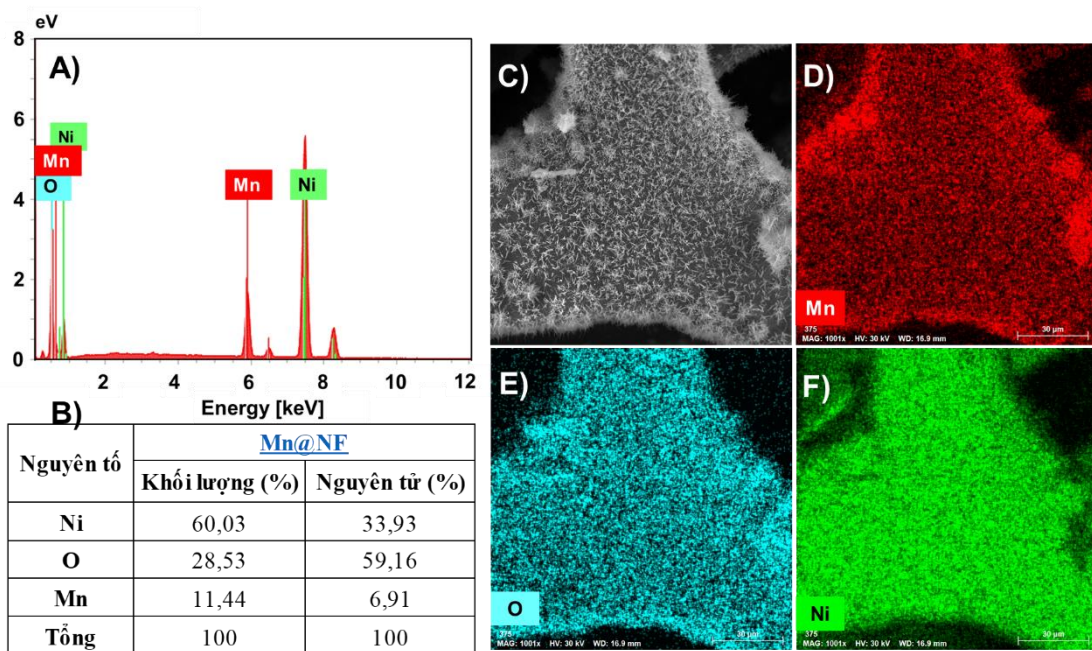
Hiệu suất xúc tác của các vật liệu đã tổng hợp cho phản ứng oxy hóa glycerol GOR được đánh giá dựa vào kỹ thuật quét thế tuần hoàn, quét thế tuyến tính, phổ trở kháng điện hóa và diện tích bề mặt hoạt động điện hóa; việc thử nghiệm độ ổn định của chất xúc tác được tiến hành theo phương pháp áp thế đo dòng theo thời gian.



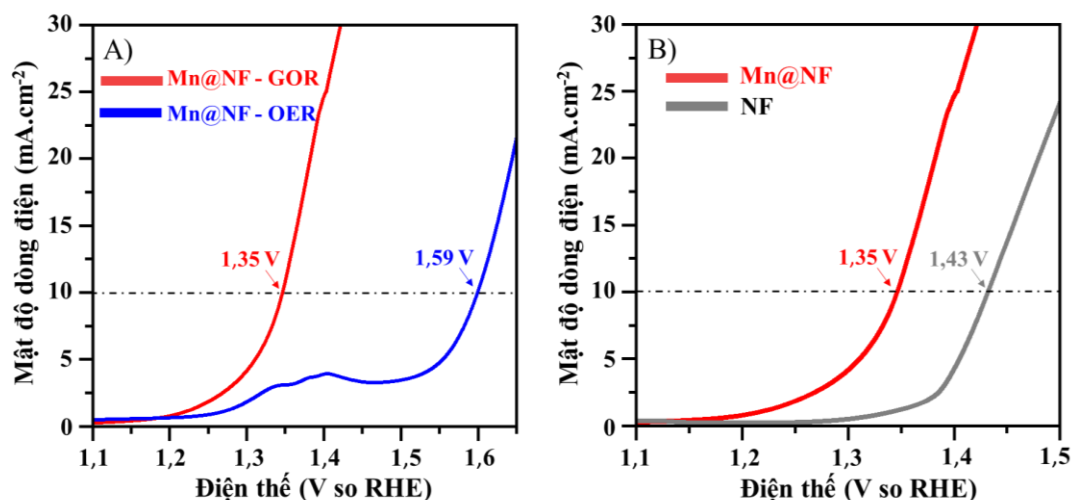
Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu Mn@NF



Hình 2. Hình thái của vật liệu ở các độ phóng đại khác nhau: A–B) NF và C–D) Mn@NF



Hình 3. (A) Giản đồ phổ EDX; (B) thành phần các nguyên tố ; (C–F) sự phân bố của các nguyên tố của Mn@NF



**Hình 4.** Đường cong LSV của vật liệu Mn@NF: A) trong dung dịch KOH 1 M; glycerol 0,1 M (GOR) và không có glycerol (OER); B) Mn@NF và NF trong GOR

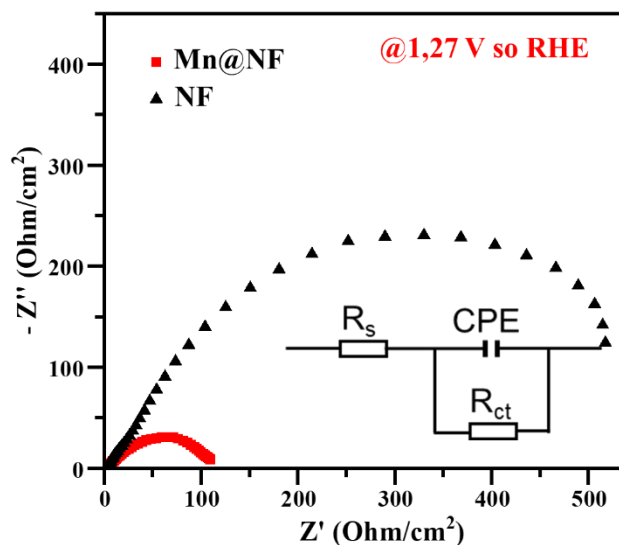
**Bảng 1.** So sánh hiệu suất của vật liệu Mn@NF với các vật liệu khác trong phản ứng oxy hóa glycerol

Vật liệu	Điện thế tại 10 mA.cm <sup>-2</sup> (so với RHE), V	Dung dịch điện phân	Tài liệu tham khảo
Mn@NF	1,35	1 M KOH + 0,1 M glycerol	Nghiên cứu này
NC/Ni-Mo-N/NF	1,40	1 M KOH + 0,1 M glycerol	[15]
Co/Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -rGO	1,42	1 M KOH + 0,1 M glycerol	[16]
CoNiB	1,42	1 M KOH + 0,1 M glycerol	[17]
HEA-CoNiCuMnMo NPs	1,45	1 M KOH + 0,1 M glycerol	[18]
N-CoO <sub>x</sub>	1,59	1 M KOH + 1,0 M glycerol	[19]

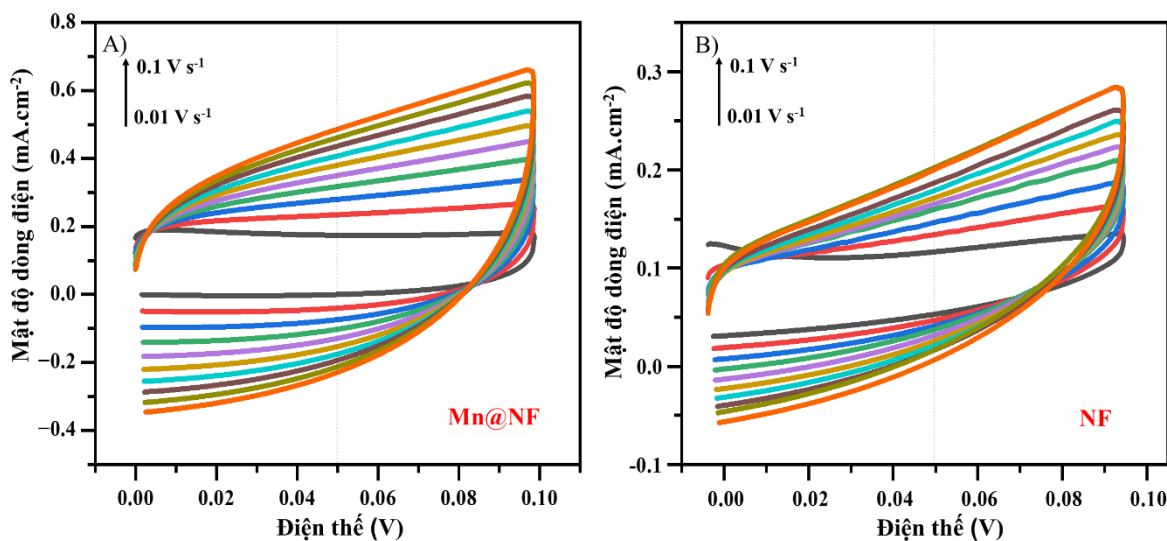
Phổ trở kháng điện hóa là một công cụ quan trọng để nghiên cứu sự tiếp xúc bề mặt và độ dẫn điện của các vật liệu xúc tác đã tổng hợp. Trong biểu đồ Nyquist, trở kháng được biểu diễn trên một mặt phẳng phức, với trục thực (Z') và trục ảo (Z''), tạo ra một mối quan hệ hình bán nguyệt điển hình. Biểu đồ được sử dụng để giải thích dữ liệu EIS trong quá trình OER do có mối tương quan trực tiếp với điện trở dung dịch (R<sub>s</sub>) và điện trở truyền điện tích (R<sub>ct</sub>). Phần chặn ở tần số cao trên trục thực liên quan đến điện trở của dung dịch, trong khi đường kính của hình bán nguyệt có thể được chuyển trực tiếp thành điện trở truyền điện tích [20]. Hình 5 trình bày sơ đồ Nyquist của chất xúc tác Mn@NF và NF trong

dung dịch KOH 1,0 M và glycerol 0,1 M, được đo tại thế 1,27 V so với RHE. Kết quả cho thấy giá trị R<sub>ct</sub> của vật liệu Mn@NF là 30,7 Ω.cm<sup>2</sup>, thấp hơn đáng kể so với R<sub>ct</sub> của vật liệu NF là 230 Ω.cm<sup>2</sup>. Điều này chứng minh rằng điện cực Mn@NF thúc đẩy quá trình truyền điện tích, làm giảm trở kháng điện hóa và nâng cao hiệu suất xúc tác.

Diện tích bề mặt điện hóa của vật liệu xúc tác tổng hợp được sử dụng để đánh giá diện tích xúc tác hiệu quả thông qua phương pháp quét thế tuần hoàn với tốc độ quét từ 0,01 đến 0,1 V.s<sup>-1</sup>. Kết quả trên Hình 6A và 6B cho thấy điện cực Mn@NF có giá trị ECSA đạt tới 72,7 cm<sup>2</sup>, vượt trội đáng kể hơn so với NF (17,7 cm<sup>2</sup>).



Hình 5. Phổ trở kháng điện hóa của Mn@NF và NF

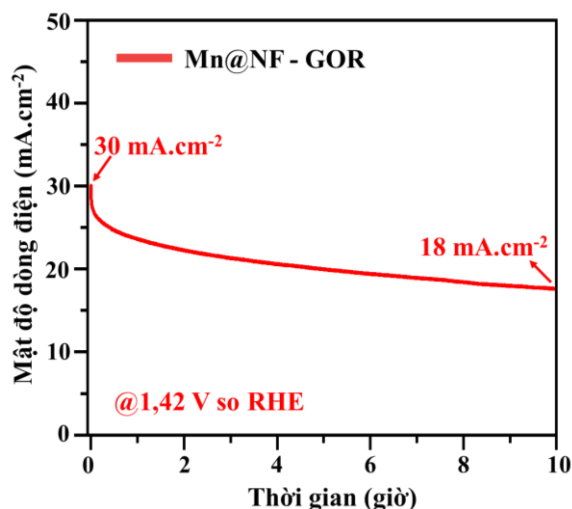


Hình 6. Diện tích bề mặt hoạt động điện hóa A) Mn@NF; B) NF

Độ bền của điện cực là một trong những yếu tố quan trọng để đánh giá khả năng ứng dụng của điện cực ở quy mô lớn và được đánh giá thông qua phương pháp đo dòng theo thời gian. Hình 7 cho thấy độ bền của điện cực Mn@NF tại thế 1,42 V so với RHE trong dung dịch điện ly chứa 1 M KOH và 0,1 M glycerol. Có thể thấy điện cực duy trì cường độ dòng ổn định trong suốt 10 giờ thí nghiệm, với mật độ dòng ban đầu là 30 mA.cm<sup>-2</sup> và sau 10 giờ, mật độ dòng vẫn duy

trì ổn định ở giá trị 18 mA.cm<sup>-2</sup>. Điều này có thể là do sự giảm dần của nồng độ glycerol trong quá trình điện hóa. Xu hướng này cũng được công bố trong các nghiên cứu trước đây [21, 22].

Bên cạnh đó, tốc độ sinh khí hydro đạt 0,625 mL.cm<sup>-2</sup>.giờ<sup>-1</sup>. Các kết quả khảo sát trên đã cho thấy vật liệu Mn có tiềm năng ứng dụng trong quá trình chuyển hóa glycerol.



Hình 7. Độ bền của vật liệu xúc tác Mn@NF

#### 4 Kết luận

Chúng tôi đã tổng hợp thành công điện cực chứa vật liệu MnOOH trên nền bột niken bằng phương pháp thủy nhiệt và khảo sát ứng dụng cho phản ứng oxy hóa glycerol. Kết quả cho thấy điện cực này có hoạt tính điện hóa tốt hơn với thế chỉ 1,35 V so với RHE tại mật độ dòng 10 mA.cm<sup>-2</sup>, thấp hơn đáng kể so với phản ứng oxy hóa nước. Điều này là do vật liệu điện cực đã thúc đẩy mạnh quá trình truyền điện tích, tạo ra nhiều vị trí hoạt động cho quá trình phản ứng oxy hóa glycerol. Điện cực này cũng ổn định trong suốt 10 giờ và tốc độ sinh hydro trung bình là 0,625 mmol.H<sub>2</sub>.cm<sup>-2</sup>.giờ<sup>-1</sup>. Điều này cho thấy vật liệu từ Mn trên nền NF có tiềm năng ứng dụng trong phản ứng oxy hóa glycerol, góp phần tiết kiệm năng lượng và nâng cao hiệu quả sản xuất hydro.

#### Lời cảm ơn

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

#### Tài liệu tham khảo

- Gallezot P. Conversion of biomass to selected chemical products. *Chemical Society Reviews*. 2012;41(4):1538-58.
- Staffell I, Scamman D, Abad AV, Balcombe P, Dodds PE, Ekins P, et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*. 2019;12(2):463-91.
- Holladay JD, Hu J, King DL, Wang Y. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis today*. 2009;139(4):244-60.
- Simões M, Baranton S, Coutanceau C. Electrochemical valorisation of glycerol. *ChemSusChem*. 2012;5(11):2106-24.
- Hao W, Wu R, Zhang R, Ha Y, Chen Z, Wang L, et al. Electroless plating of highly efficient bifunctional boride-based electrodes toward practical overall water splitting. *Advanced Energy Materials*. 2018;8(26):1801372.
- Zeng K, Zhang D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in energy and combustion science*. 2010;36(3):307-26.
- Chen YX, Lavacchi A, Miller HA, Bevilacqua M, Filippi J, Innocenti M, et al. Nanotechnology makes biomass electrolysis more energy efficient than water electrolysis. *Nature Communications*. 2014;5(1):4036.
- Bozell JJ, Petersen GR. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy’s “Top 10” revisited. *Green chemistry*. 2010;12(4):539-54.
- Pagliaro M, Rossi M. The future of glycerol: Royal Society of Chemistry; 2010.
- Liu C, Hirohara M, Maekawa T, Chang R, Hayashi T, Chiang C-Y. Selective electro-oxidation of glycerol to dihydroxyacetone by a non-precious electrocatalyst-CuO. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2020;265:118543.
- Pagliaro M, Ciriminna R, Kimura H, Rossi M, Della Pina C. From glycerol to value-added products. *Angewandte Chemie International Edition*. 2007;46(24):4434-40.
- Hu J, Zhou Y, Liu Y, Xu Z, Li H. Recent Advances in Manganese-Based Materials for Electrolytic



- Water Splitting. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(7):6861.
13. Wang P, Zhang S, Wang Z, Mo Y, Luo X, Yang F, et al. Manganese-based oxide electrocatalysts for the oxygen evolution reaction: a review. *Journal of Materials Chemistry A*. 2023;11(11):5476-94.
  14. Zhang S, Gai S, He F, Dai Y, Gao P, Li L, et al. Uniform Ni/SiO<sub>2</sub>@Au magnetic hollow microspheres: rational design and excellent catalytic performance in 4-nitrophenol reduction. *Nanoscale*. 2014;6(12):7025-32.
  15. Xu Y, Liu M, Wang S, Ren K, Wang M, Wang Z, et al. Integrating electrocatalytic hydrogen generation with selective oxidation of glycerol to formate over bifunctional nitrogen-doped carbon coated nickel-molybdenum-nitrogen nanowire arrays. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2021;298:120493.
  16. Sapner VS, Tanwade PD, Munde AV, Sathe BR. Cobalt/Cobalt Oxide Nanorods-Decorated Reduced Graphene Oxide (Co/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-rGO) for Enhanced Electrooxidation of Glycerol. *ACS Applied Nano Materials*. 2023;6(18):16414-23.
  17. Braun M, Chatwani M, Kumar P, Hao Y, Sanjuán I, Apostoleri A-A, et al. Cobalt nickel boride as electrocatalyst for the oxidation of alcohols in alkaline media. *Journal of Physics: Energy*. 2023;5(2):024005.
  18. Fan L, Ji Y, Wang G, Chen J, Chen K, Liu X, et al. High Entropy Alloy Electrocatalytic Electrode toward Alkaline Glycerol Valorization Coupling with Acidic Hydrogen Production. *Journal of the American Chemical Society*. 2022;144(16):7224-35.
  19. Ke Z, Williams N, Yan X, Younan S, He D, Song X, et al. Solar-assisted co-electrolysis of glycerol and water for concurrent production of formic acid and hydrogen. *Journal of Materials Chemistry A*. 2021;9(35):19975-83.
  20. Murray RW. Chronoamperometry, chronocoulometry and chronopotentiometry. In: Rossiter BW, Hamilton JF, editors. *Physical Methods of Chemistry*. Vol. II: Electrochemical Methods. New York: Wiley; 1986. p. 525..
  21. Bhavani KS, Anusha T, Brahman PK. Electrochemical synthesis of PdNPs@ MnO<sub>2</sub>-PPy nanocomposite and its electrocatalytic application towards glycerol oxidation. *Electrochimica Acta*. 2021;399:139394.
  22. Zalineeva A, Serov A, Padilla M, Martinez U, Artyushkova K, Baranton S, et al. Glycerol electrooxidation on self-supported Pd<sub>1</sub>Sn<sub>x</sub> nanoparticles. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2015;176:429-35.