



Nghiên cứu chế tạo và đặc trưng tính chất của xúc tác điện hoá chứa platin trên điện cực graphit cho quá trình thoát khí hydro

Study on synthesis and characterization of electrocatalyst containing platinum on graphite electrode for hydrogen evolution reaction

Nguyễn Thị Cẩm Hà, Nguyễn Hữu Thọ, Nguyễn Văn Thúc*

Khoa Hoá học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

Địa chỉ: 19 Lê Thánh Tông, Hoàn Kiếm, Hà Nội

**Email: nguyenvanthuc@hus.edu.vn*

ARTICLE INFO

Received: 05/12/2022

Accepted: 20/5/2023

Published: 30/6/2023

Keywords:

Hydrogen, electrode, composite

ABSTRACT

In this study, we have successfully synthesized electrode materials containing Pt on modified graphite by electrodeposition method, such as: Pt/C, Pt-Au/C Pt-Pd/C, Pt-Ni/C, Pt-Ni-Au/C, Pt-Ni-Pd/C. The formation of materials coating on the modified graphite surface is demonstrated through SEM, EDS results. Synthetic materials are used as catalysts for hydrogen evolution reaction (HER). The results show that Bimetallic composites containing Pt exhibit higher catalytic activity than the monometallic material Pt/C. Trimetallic materials Pt-Ni-Au/C and Pt-Ni-Pd/C have catalytic activity for HER insignificant lower than that of Pt-Au/C and Pt-Pd/C electrodes. However, the precious metal composition in the trimetallic composite material system is reduced, which is also an important goal of research and opens up prospects for the fabrication of next-generation composite materials systems.

Giới thiệu chung

Cùng với sự phát triển của nền công nghiệp trên thế giới thì nhu cầu sử dụng năng lượng ngày càng tăng, đặc biệt là các nước phát triển. Trong khi nguồn nhiên liệu hoá thạch đang dần cạn kiệt và còn tác động lớn đến biến đổi khí hậu do ô nhiễm môi trường, tiếng ồn gây ra. Chính vì vậy, các nước phát triển trên thế giới đang tập trung nghiên cứu và phát triển nguồn năng lượng tái tạo nhằm giảm lượng khí thải. Năng lượng hydro (H_2) được coi là một dạng năng lượng có nhiều ưu điểm, đáp ứng hầu hết các yêu cầu trên. Sản phẩm của quá trình này chỉ là nước tinh khiết và năng lượng mà không có chất thải nào gây hại đến môi trường,

không phát thải khí CO_2 gây biến đổi khí hậu toàn cầu, là nguồn năng lượng gần như vô tận hay có thể tái sinh được [1-2]. Trong tự nhiên, hydro có trữ lượng rất lớn nhưng chủ yếu ở dạng liên kết với oxy và carbon trong phân tử nước và các hợp chất hydrocarbon. Trong công nghiệp, hiện nay hydro được sản xuất chủ yếu từ khí tự nhiên. Tuy nhiên, sự cạn kiệt nguồn năng lượng hoá thạch đòi hỏi phải nghiên cứu sản xuất hydro từ các nguồn nguyên liệu sạch và tái tạo. Trong đó, sản xuất hydro từ nước là lựa chọn được quan tâm nhất hiện nay. Hydro có thể được sản xuất từ nước thông qua phản ứng phân tách nước tạo hydro và oxy. Phản ứng phân tách nước có thể thực hiện bằng phương pháp điện phân nước, quang phân ly nước

hoặc kết hợp quang – điện phân nước trên cơ sở sử dụng các chất xúc tác phù hợp. Quá trình điện phân nước gồm phản ứng khử nước tạo hydro ở catot (hydrogen evolution reaction – HER) và phản ứng oxy hoá nước tạo oxy ở anod (oxygen evolution reaction – OER) [1].

Trong thực tế, cần sử dụng xúc tác để tăng hiệu quả và tốc độ quá trình điện phân nước, kim loại Pt là chất xúc tác có hoạt tính tốt nhất cho phản ứng HER [1-3]. Tuy nhiên, Pt là kim loại quý, giá thành cao nên không khả thi làm xúc tác cho phản ứng tách nước trong sản xuất công nghiệp. Hàm lượng của Pt và các kim loại quý trong vật liệu xúc tác có thể giảm nhờ việc chế tạo vật liệu biến tính của chúng trên nền chất dẫn điện, hoặc chế tạo vật liệu tổ hợp có chứa chúng cùng với các kim loại khác. Vật liệu điện cực trên cơ sở sự tổ hợp, biến tính kim loại được coi là xúc tác đầy tiềm năng cho các quá trình tổng hợp điện hóa [1,2, 4-9]. Vật liệu tổ hợp có chứa Pt có các tính năng vượt trội hơn so với Pt tinh khiết như: hoạt tính xúc tác, có độ bền, độ ổn định cao hơn hoặc tương đương với Pt tinh khiết và giá thành của vật liệu được giảm đi tương đối nhiều. Vì vậy, vật liệu tổ hợp Pt ứng dụng cho phản ứng điện phân nước điều chế H₂ đã được nghiên cứu rộng rãi [3,8,10,11]. Các nghiên cứu trước đây đã cho thấy sự có mặt của các kim loại cho thêm trong mạng tinh thể có thể mang đến cho vật liệu tổ hợp các đặc trưng của từng kim loại cũng như sự cộng hưởng tính chất của các kim loại tạo ra được các vật liệu điện cực xúc tác có tính chất ưu việt hơn [1,2,9]. Nghiên cứu [4, 7] đã chế tạo ra vật liệu tổ hợp chứa platin-niken-coban và kết quả cho thấy vật liệu PtNiCo có hoạt tính xúc tác cho phản ứng HER vượt trội so với Pt/C. Nghiên cứu [3] đã chế tạo ra chất xúc tác gồm Pt và Pd trên nền tinh thể nano cacbua vonfram (ký hiệu là PtPd-WC/C) và vật liệu chế tạo có hiệu suất cao hơn cho phản ứng HER so với vật liệu Pt-WC/C (chỉ chứa Pt). Vì vậy, nghiên cứu thực hiện với mục tiêu chế tạo vật liệu biến tính, tổ hợp các kim loại có chứa Pt bằng phương pháp kết tủa điện hóa có hoạt tính xúc tác cao cho quá trình điều chế khí hydro từ nước.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hoá chất

Trong nghiên cứu các hoá chất được sử dụng gồm: K₂PtCl₄, 98% (Sigma-Aldrich), Na₂PdCl₄, 98% (Sigma-Aldrich), HAuCl₄, 99% (Sigma-Aldrich), KOH, ≥85% (Merck), H₂SO₄, ≥85% (Merck), Na₂SO₄, 99% (Merck),

NiSO₄.6H₂O, 99% (Merck), H₃BO₃ (AR - Xilong), NaCl, 99% (Merck).

Phương pháp chế tạo vật liệu điện cực

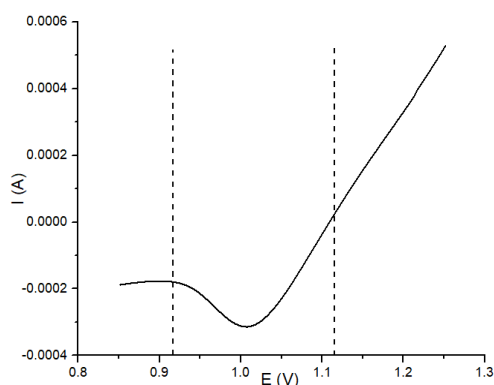
Trong nghiên cứu vật liệu điện cực được chế tạo bằng phương pháp kết tủa, đồng kết tủa điện hoá trên vật liệu nền graphit dạng hình trụ có chiều dài ~2 cm và đường kính 5,6 mm (diện tích điện cực 0,25 cm²).

Bảng 1: Thành phần, điều kiện chế tạo vật liệu

Vật liệu	Thành phần dung dịch chất điện phân	Khoảng thế phân cực, V
Pt/C	K ₂ PtCl ₄ 0,01M trong dung dịch chứa H ₃ BO ₃ 30g/L + NaCl 15g/L	1,12 ÷ 0,92
Pt-Pd/C	K ₂ [PtCl ₄]/Na ₂ [PdCl ₄] = 1:1 trong dung dịch chứa H ₃ BO ₃ 30g/L + NaCl 15g/L	1,12 ÷ 0,86
Pt-Au/C	K ₂ [PtCl ₄]/HAuCl ₄ = 1:1 trong dung dịch chứa H ₃ BO ₃ 30g/L + NaCl 15g/L	1,12 ÷ 0,29
Pt-Ni/C	K ₂ [PtCl ₄]/NiSO ₄ = 1:6 trong dung dịch chứa H ₃ BO ₃ 30g/L + NaCl 15g/L	1,05 ÷ -1
Pt-Ni-Au/C	K ₂ [PtCl ₄]/Na ₂ [PdCl ₄]/NiSO ₄ = 1:1:12 trong dung dịch chứa H ₃ BO ₃ 30g/L + NaCl 15g/L	1,12 ÷ -1
Pt-Ni-Pd/C	K ₂ [PtCl ₄]/HAuCl ₄ /NiSO ₄ = 1:1:12 trong dung dịch chứa H ₃ BO ₃ 30g/L + NaCl 15g/L	1,12 ÷ -1

Trước khi tạo lớp phủ kim loại, bề mặt graphit được mài nhẹ bằng giấy nhám C- 1000, được biến tính trong dung dịch KOH 1M bằng phương pháp quét thế tuần hoàn 20 vòng quét với khoảng quét từ 0,5 tới 2,0V, tốc độ quét thế 50 mV/s, tốc độ quay của điện cực đĩa quay là 100 vòng/phút (rpm) trên thiết bị Autolab 30 với hệ ba điện cực (điện cực làm việc là điện cực graphit, điện cực đối là Pt, điện cực so sánh là Ag/AgCl, KCl 3M, giá trị thế điện cực 0,203V so với thang tiêu chuẩn hydro (SHE)). Lớp mạ kim loại được tạo thành trên vật liệu C biến tính bằng phương pháp kết tủa điện hóa trên thiết bị Autolab 30 với 5ml dung dịch điện phân, thành phần dung dịch mạ tương ứng với từng loại điện cực được thể hiện trên bảng 1. Trong quá trình chế tạo điện cực tổ hợp các kim loại, tỉ lệ thành phần dung dịch mạ được xác định là tỉ lệ nồng độ mol/l và được chuẩn bị từ dung dịch gốc có nồng độ 0,01M trong dung dịch đệm H₃BO₃ 30g/L + NaCl 15g/L.

Việc lựa chọn khoảng thế quét trong quá trình kết tủa điện hóa dựa trên việc phân tích đánh giá những nghiên cứu về hệ vật liệu biến tính, tổ hợp các kim loại [9] và đường quét thế tuyến tính (LSV) của graphit trong dung dịch điện phân (hình 1). Trên cơ sở đường quét thế LSV nghiên cứu lựa chọn khoảng thế quét trong quá trình kết tủa điện hoá quanh vị trí peak khử $\pm 0,10V$ đối với vật liệu đơn kim loại và $-0,10V$ đối với peak khử âm nhất và $+0,10V$ đối với peak khử dương nhất trên đường quét LSV của graphit trong dung dịch điện phân.



Hình 1: Đường quét thế tuyến tính của C trong dung dịch điện phân có chứa K_2PtCl_4 0,01M và H_3BO_3 30g/L + NaCl 15g/L

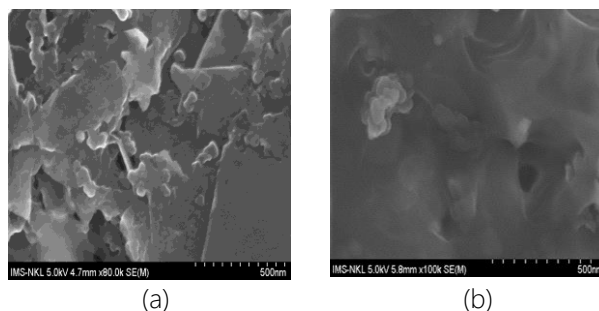
Phương pháp nghiên cứu

Cấu trúc, hình thái học bề mặt và thành phần vật liệu được xác định bằng phương pháp chụp ảnh SEM và phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) trên thiết bị đo SEM-JEOL-JSM 5410LV. Tính chất điện hóa của vật liệu được xác định bằng phương pháp quét thế tuyến tính trong 2 môi trường pH khác nhau Na_2SO_4 (pH 7,7) và dung dịch $Na_2SO_4 + KOH$ (pH 13) trên thiết bị Autolab 30 với hệ đo 3 điện cực: điện cực đối là điện cực Pt, điện cực so sánh là điện cực Ag/AgCl, KCl 3M, điện cực làm việc là điện cực cần khảo sát tính chất.

Kết quả và thảo luận

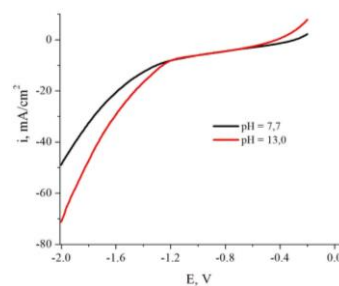
Vật liệu đơn kim loại Pt trên nền C biến tính (Pt/C)

So sánh hình ảnh SEM của vật liệu điện cực vật liệu Pt/C (hình 2a) và nền C được biến tính (hình 2b) nhận thấy bề mặt vật liệu sau khi phủ Pt tạo thành lớp phủ có độ xốp cao và dạng vảy rõ ràng. Kết quả trên có thể khẳng định bước đầu sự tạo thành lớp phủ Pt trên nền C biến tính. Sự tạo thành lớp phủ có độ xốp cao có thể làm tăng diện tích tiếp xúc bề mặt, từ đó tăng hoạt tính xúc tác của vật liệu.



Hình 2: Ảnh SEM của vật liệu điện cực Pt/C (a) và nền C biến tính (b)

Hoạt tính xúc tác cho phản ứng tạo H_2 của vật liệu Pt/C được khảo sát bằng phương pháp quét thế tuyến tính (quét phân cực âm) với khoảng thế quét được xác định từ $-0,2 V$ tới $-2,0 V$ trong các môi trường với giá trị pH khác nhau (pH 7,7 và pH 13). Kết quả đường quét thế trong các môi trường khác nhau được thể hiện trên hình 3.



Hình 3: Đường quét phân cực tuyến tính của vật liệu Pt/C cho phản ứng khử tạo thành H_2

Kết quả trên hình 3 cho thấy, khi thay đổi pH của môi trường đường quét phân cực tuyến tính của điện cực Pt/C có sự khác nhau không nhiều. Từ khoảng thế phân cực $-1,2V \div -2V$ mật độ dòng trong môi trường kiềm có sự chênh lệch nhiều hơn so với môi trường trung tính. Điều này có thể được giải thích là do phản ứng khử nước trong môi trường pH 7,7 xảy ra sớm hơn so với môi trường pH 13,0 cho nên lượng H_2 sinh ra trên bề mặt điện cực sẽ ảnh hưởng khả năng tiếp xúc của vật liệu với môi trường điện li. Trong nghiên cứu, để xác định các thông số cơ bản của phản ứng HER trên các hệ điện cực chế tạo được chúng tôi xây dựng đường cong Tafel cho phản ứng xảy ra trên catot và sử dụng phần mềm EC-lab 10.4. Kết quả các thông số cơ bản của quá trình thoát khí H_2 trên hệ vật liệu Pt/C được trình bày trong bảng 2.

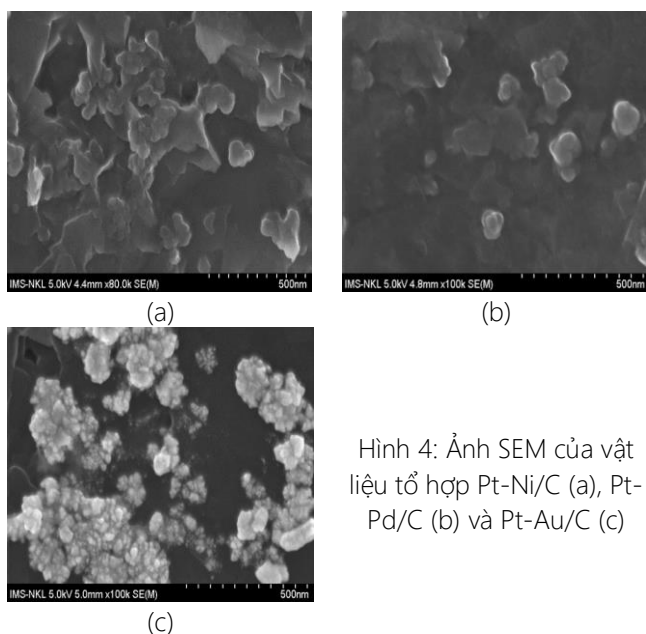
Bảng 2: Giá trị cơ bản của quá trình thoát khí H_2 trên hệ vật liệu Pt/C

	$i_0, mA/cm^2$	E_{cb}, V	β
pH 7,7	0,63	-0,27	0,074
pH 13,0	0,90	-0,43	0,080

Kết quả trên bảng số 2 cho thấy, giá trị thế cân bằng (E_{cb}) cho phản ứng khử tạo H_2 trong môi trường kiềm có giá trị âm hơn so với trong môi trường trung tính. Kết quả trên phù hợp với phương trình Nernst, khi tăng pH của môi trường thì giá trị thế cân bằng dịch chuyển về phía âm hơn. So sánh giá trị mật độ dòng trao đổi (i_0) trong 2 môi trường có thể thấy, phản ứng khử nước trong môi trường kiềm có mật độ dòng trao đổi và hệ số chuyển điện tích (β) lớn hơn so với môi trường trung tính. Kết quả trên có thể được giải thích là do độ dẫn điện của dung dịch kiềm cao hơn so với môi trường trung tính. Trên cơ sở giá trị β và i_0 có thể bước đầu kết luận khả năng hoạt động điện hóa của vật liệu Pt/C trong môi trường kiềm cao hơn so với môi trường pH trung tính. Với mục tiêu nâng cao khả năng hoạt động xúc tác và giảm hàm lượng Pt trong thành phần vật liệu, nghiên cứu đã thực hiện nghiên cứu chế tạo vật liệu tổ hợp Pt với một số kim loại khác trên nền C biến tính và khảo sát hoạt tính xúc tác của chúng cho phản ứng khử tạo H_2 trong 2 môi trường pH khác nhau.

Vật liệu tổ hợp 2 kim loại chứa Pt trên nền C biến tính

Vật liệu tổ hợp 2 kim loại Pt-Au/C, Pt-Pd/C và Pt-Ni/C được chế tạo với điều kiện được trình bày trong bảng 1. Vật liệu sau khi chế tạo được phân tích hình thái học bề mặt thông qua hình ảnh SEM (hình 4).

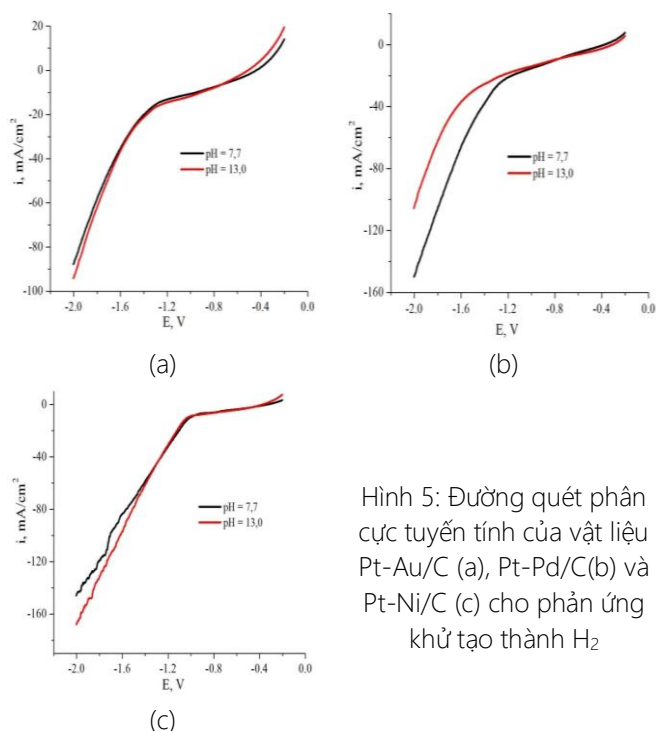


Hình 4: Ảnh SEM của vật liệu tổ hợp Pt-Ni/C (a), Pt-Pd/C (b) và Pt-Au/C (c)

So sánh với hình ảnh SEM của vật liệu nền C và Pt/C (hình 2) cho thấy, vật liệu tổ hợp Pt-Pd/C, Pt-Ni/C cũng có dạng vảy. Tuy nhiên trên bề mặt vật liệu tổ hợp có sự xuất hiện các hạt tròn, kích thước nhỏ (~10-100nm) và phân bố rời rạc không đồng đều trên bề mặt vật liệu. Vật liệu Pt-Au/C cho các hạt có kích thước

lớn hơn và biên hạt rõ ràng hơn. Kết quả thu được cho thấy, quá trình đồng kết tủa kim loại đã làm thay đổi hình thái học bề mặt của vật liệu, từ đó có thể nhận định vật liệu tổ hợp sẽ có hoạt tính xúc tác cao hơn so với vật liệu đơn kim loại. Sự khác nhau của bề mặt vật liệu Pt-Pd/C, Pt-Au/C và Pt-Ni/C với vật liệu Pt/C bước đầu có thể chứng minh sự đồng kết tủa đã xảy ra.

Kết quả đường cong phân cực (hình 5) cho thấy, với hệ vật liệu Pt-Au/C và Pt-Ni/C thì đường cong phân cực không có sự khác nhau nhiều trong 2 môi trường pH. Nhưng, với hệ vật liệu Pt-Pd/C sự khác nhau về đường cong phân cực tương tự như hệ vật liệu Pt/C. Tuy nhiên, khác với hệ Pt-Pd/C thì trong khoảng thế từ -1,2 ÷ 2,0V, mật độ dòng catot trong môi trường trung tính cao hơn so với môi trường kiềm. Điều này có thể được giải thích là do sự hấp phụ đặc biệt của ion OH^- trên bề mặt của Pd [9,12].



Hình 5: Đường quét phân cực tuyến tính của vật liệu Pt-Au/C (a), Pt-Pd/C(b) và Pt-Ni/C (c) cho phản ứng khử tạo thành H_2

Trên cơ sở phân tích đường cong Tafel cho phản ứng HER của các hệ vật liệu tổ hợp, nghiên cứu đã xác định được các thông số cơ bản của phản ứng khử nước tạo H_2 trên các hệ điện cực tổ hợp và trong các môi trường khác nhau (bảng 3).

Kết quả bảng 3 cho thấy, hệ vật liệu tổ hợp 2 kim loại có mật độ dòng trao đổi và hệ số trao đổi điện tích cao hơn so với hệ vật liệu đơn kim loại Pt/C (bảng 2). Điều này có thể được giải thích là do khi tổ hợp 2 kim loại, bề mặt vật liệu tạo thành các hạt có kích thước nhỏ hơn, làm tăng diện tích bề mặt của vật liệu, tăng khả năng xúc tác cho phản ứng khử tạo H_2 của vật liệu. Sự thay đổi giá trị thế cân bằng, mật độ dòng trao

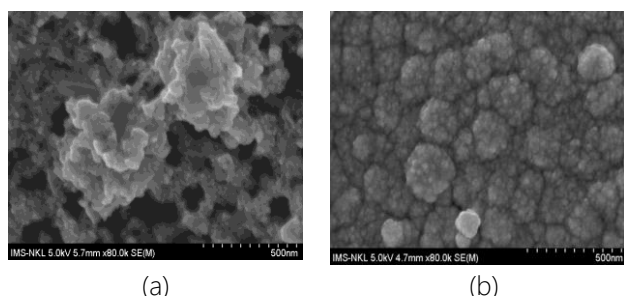
đổi, giá trị β khi thay đổi pH của môi trường có sự khác nhau. Điều này sơ bộ có thể được giải thích là do ảnh hưởng của sự hấp phụ đặc biệt OH^- trên bề mặt Pd (sự có mặt của Pd trong thành phần vật liệu làm tăng khả năng hấp phụ ion OH^- [9, 12]), tính chất đặc biệt của Ni trong môi trường kiềm do tồn tại cặp oxi hoá khử $\text{NiOOH}/\text{Ni}(\text{OH})_2$ [13]).

Bảng 3: Giá trị cơ bản của quá trình thoát khí H_2 trên hệ vật liệu tổ hợp 2 kim loại chứa Pt

pH	Vật liệu	i_0 , mA/cm^2	E_{cb} , V	β
7,7	Pt-Au/C	1,45	-0,44	0,080
	Pt-Pd/C	1,16	-0,37	0,087
	Pt-Ni/C	0,71	-0,32	0,093
13,0	Pt-Au/C	1,59	-0,51	0,085
	Pt-Pd/C	1,37	-0,30	0,078
	Pt-Ni/C	1,20	-0,36	0,074

Vật liệu tổ hợp 3 kim loại chứa Pt trên nền C biến tính

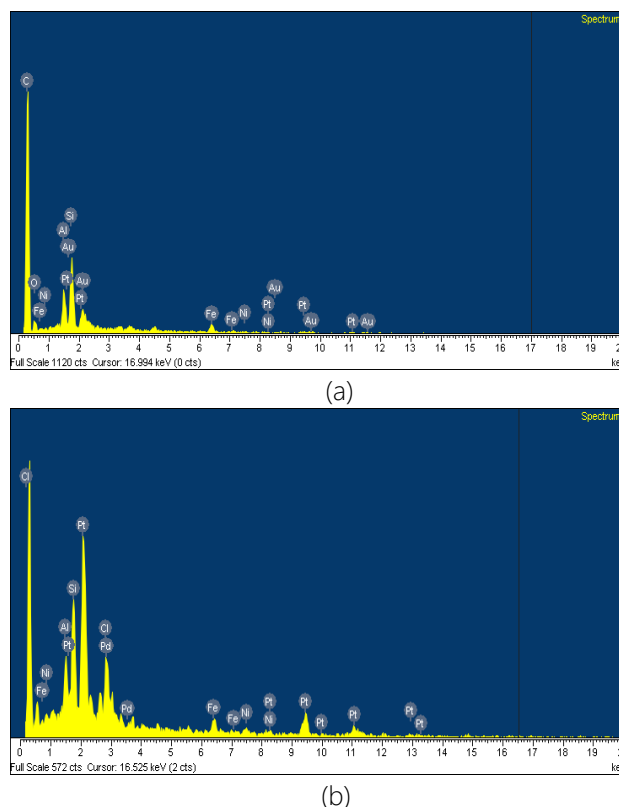
Vật liệu tổ hợp 3 kim loại Pt-Ni-Au/C và Pt-Ni-Pd/C được chế tạo với điều kiện được trình bày trong bảng 1. Vật liệu sau khi chế tạo được phân tích hình thái học bề mặt thông qua hình ảnh SEM (hình 6)



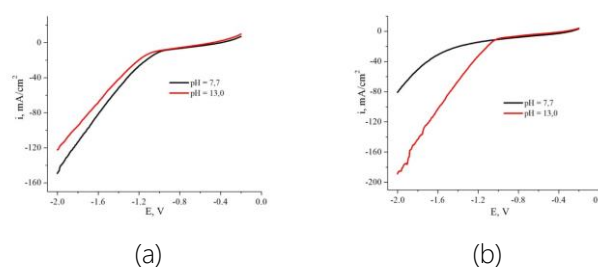
Hình 6: Ảnh SEM của các vật liệu điện cực tổ hợp ba kim loại trên nền graphit Pt-Ni-Au (a) và Pt-Ni-Pd (b)

Kết quả ảnh SEM cho thấy các hạt kim loại đã được kết tủa và phân tán đồng đều trên nền graphit, bề mặt vật liệu không còn tồn tại dạng vẩy như vật liệu đơn và hai kim loại. Hình SEM cho thấy tồn tại các cụm hạt kim loại trên bề mặt vật liệu kích thước hạt nhỏ, vật liệu tổ hợp Pt-Ni-Pd/C cho kết quả các hạt tròn phân bố đều trên bề mặt graphit, vật liệu Pt-Ni-Au/C cho kết quả các hạt liên kết với nhau dưới dạng sợi phân tán đều trên bề mặt tuy nhiên không đồng nhất như vật liệu Pt-Ni-Pd/C. Ta có thể thấy lớp phủ hầu như phủ kín bề mặt của vật liệu, sự đồng kết tủa ba kim loại lên bề mặt C làm thay đổi hình thái học bề mặt của vật liệu nền và vật liệu tổ hợp đơn, đôi kim loại. Bên cạnh đó

từ kết quả thu được, lớp phủ tổ hợp kim loại có kích thước các hạt bé nên có thể dự đoán chúng sẽ thể hiện hoạt tính xúc tác điện hóa tốt. Để khẳng định sự tồn tại của 3 kim loại trên nền graphit, vật liệu điện cực tổ hợp ba kim loại theo tỉ lệ nồng độ đều của muối là 1:1:12 được chế tạo và tiến hành đo phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) (hình 7).



Hình 7: Phổ EDX của vật liệu điện cực tổ hợp ba kim loại Pt-Ni-Au (a) và Pt-Ni-Pd (b)



Hình 8: Đường quét phân cực tuyến tính của vật liệu Pt-Ni-Au/C (a), Pt-Ni-Pd/C (b) cho HRE

Đường quét phân cực catot của hệ vật liệu tổ hợp 3 kim loại được trình bày trên hình 8. Kết quả thu được cho thấy, đường quét phân cực của hệ vật liệu Pt-Ni-Au/C trong 2 môi trường khác nhau không đáng kể. Sự khác nhau về đường cong phân cực catot của vật liệu Pt-Ni-Pd/C trong 2 môi trường có thể được giải thích tương tự như cho hệ vật liệu tổ hợp Pt-Pd/C.

Bảng 5: Giá trị cơ bản của quá trình thoát khí H₂ trên hệ vật liệu tổ hợp 3 kim loại chứa Pt

pH	Vật liệu	i_0 , mA/cm ²	E_{cb} , V	β
7,7	Pt-Ni-Au/C	1,06	-0,40	0,082
	Pt-Ni-Pd/C	1,19	-0,25	0,072
13,0	Pt-Ni-Au/C	1,02	-0,48	0,090
	Pt-Ni-Pd/C	0,84	-0,32	0,078

So sánh các giá trị cơ bản của phản ứng khử tạo H₂ của hệ vật liệu tổ hợp 3 kim loại (bảng 4) với hệ vật liệu tổ hợp 2 kim loại (bảng 3) cho thấy, khi thêm Ni vào thành phần vật liệu, giá trị thế cần bằng dịch chuyển về phía dương hơn (hoặc có sự sai khác không nhiều với hệ vật liệu Pt-Ni-Pd/C), điều này tạo thuận lợi về mặt năng lượng cho phản ứng khử tạo H₂. Khi thêm thành phần Ni để tạo hệ vật liệu tổ hợp 3 kim loại, giá trị mật độ dòng trao đổi và hệ số chuyển điện tích có sự giảm không nhiều so với hệ vật liệu 2 kim loại Pt-Au/C và Pt-Pd/C. Tuy nhiên, sự có mặt của Ni làm giảm hàm lượng các kim loại quý trong thành phần vật liệu, dẫn tới việc giảm giá thành và tăng khả năng ứng dụng rộng rãi của các hệ vật liệu cho phản ứng HER. Kết quả trên mở ra định hướng nghiên cứu tiếp theo cho nhóm nghiên cứu với mục tiêu tối ưu hóa các điều kiện chế tạo với giá thành vật liệu.

Kết luận

Bằng phương pháp kết tủa điện hóa đã chế tạo được vật liệu điện cực chứa Pt trên nền graphit biến tính: Pt/C; Pt-Au/C; Pt-Pd/C; Pt-Ni/C; Pt-Ni-Au/C và Pt-Ni-Pd/C. Các hệ vật liệu có hoạt tính xúc tác cho phản ứng khử nước trong 2 môi trường với giá trị pH khác nhau. Vật liệu tổ hợp 2 kim loại chứa Pt thể hiện hoạt tính xúc tác cho phản ứng HER cao hơn so với vật liệu đơn kim loại Pt/C. Vật liệu tổ hợp 3 kim loại Pt-Ni-Au/C và Pt-Ni-Pd/C có hoạt tính xúc tác cho phản ứng HER thấp hơn không nhiều so với vật liệu Pt-Au/C và Pt-Pd/C. Tuy nhiên, thành phần kim loại quý trong hệ vật liệu tổ hợp 3 kim loại được giảm xuống, đó cũng là mục tiêu quan trọng của nghiên cứu và mở ra triển vọng cho việc chế tạo các hệ vật liệu tổ hợp thế hệ sau.

Tài liệu tham khảo

1. A. Canan, D. Ibrahim, *Journal of Cleaner Production*, 218 (2019) 835-849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.046>

2. F. Dawood, M. Anda M, G. Shafiullah, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020) 3847-3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
3. C. Niancai, S. Samantha, W. Da, N.B.Mohammad, L.Jian, R. Adam, X.Biwei, L.Ruying, S. Tsun-Kong, L. Li-Min, A.B. Gianluigi, S.Xueliang, *Nature Communications*, 7 (2016) 1-9. <https://doi.org/10.1038/ncomms13638>
4. H. Aram, J.S. Young, H. Hyeyoun, B. Hionsuck, K. Jun, K. Byeongyoon, H.J. Sang, K. Kwangyeol, *Nanoscale*, 36 (2016) 16379-16386. <https://doi.org/10.1039/C6NR04572C>
5. C. González-Buch, I. Herraiz-Cardona, E. Ortega, J.Garcia-Anton, V. Perez-Heranz, *Journal of Applied Electrochemistry*, 46 (2016), 791-803. <https://doi.org/10.1007/s10800-016-0970-0>
6. C.Lupia, A.Dell'Era, M.Pasquali, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(5) (2014) 1932-1940. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.11.093>
7. H-Y.Chen, H-J. Niu, Z. Han, J.J.Feng, H.Huang, *Journal of Colloid and Interface Science*, 570 (2020) 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.02.090>
8. J. Chen, Y. Yang, J. Su, P. Jiang, G. Xia, Q. Chen, *Applied Materials & Interfaces*, 9(4) (2017) 3596-3601. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12065>
9. N.T. C. Ha, H. T. L. Phuong, N. H. Tho, N. V. Thuc, *Russ. J. Chem. & Chem. Tech.* 63 (2)(2020) 52-58. <https://10.6060/ivkkt.20206302.6069>
10. H-Y.Chen, H-J. Niu, Z. Han, X.Ma, J-J.Feng, X. Weng, H.Huang, A-J. Wang, *Colloid and Interface Science*, 561 (2019) 372-378. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.10.122>
11. Z. Cao, Q. Chen, J. Zhang, H.Li, Y.Jiang, S.Shen, G. Fu, B.Lu, Z. Xie, L.Zheng, *Nature Communications*, 8 (2017) 1-7. <https://10.1038/ncomms15131>
12. S. Sarkar, S. Peter, *Inorganic Chemistry Frontiers*, 9 (2018) 2060-2080. <https://doi.org/10.1039/C8QI00042E>
13. Z.X. Liang, T.S. Zhao, J.B. Xu, L.D. Zhu, *Electrochimica Acta* 54(8) (2009) 2203-2208. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.10.034>
14. M. SE Houache, E. Cossar, S. Ntais, E. Baranova (2018), *Journal of Power Sources* 375 (2018) 310-319. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.08.089>