

# CHẾ TẠO VÀ ĐẶC TRƯNG ĐIỆN HÓA VẬT LIỆU 2D MXENE $Ti_3C_2$

## FABRICATION AND ELECTROCHEMICAL PROPERTIES MEASUREMENT OF MXENE $Ti_3C_2$ MATERIAL

Ngô Văn Hoàn<sup>1</sup>, Phùng Xuân Thịnh<sup>2</sup>, Lê Trung Hiếu<sup>1</sup>,  
Nguyễn Văn Cành<sup>1</sup>, Hồ Ngọc Minh<sup>1</sup>, Nguyễn Minh Việt<sup>3</sup>, Nguyễn Trần Hùng<sup>1,\*</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.093>

### TÓM TẮT

Vật liệu MXene  $Ti_3C_2$  có khung cấu trúc 2D độc đáo cùng với độ dẫn điện cao có nhiều tiềm năng ứng dụng để chế tạo điện cực cho siêu tụ điện. Sử dụng các phương pháp chế tạo đơn giản, hiệu suất cao giúp giảm giá thành và nâng cao tính ứng dụng của vật liệu. Trong nghiên cứu này, MXene  $Ti_3C_2$  được chế tạo trực tiếp từ  $Ti_3AlC_2$  thông qua ăn mòn lớp nhôm bằng dung dịch axit HF. Sau 60 giờ phản ứng tách lớp, vật liệu thu được có độ tinh khiết cao với cấu trúc 2D rõ ràng với độ dày lớp khoảng 50nm. Vật liệu điện cực MXene có đặc tính điện hóa ưu việt, với điện trở nội và điện trở chuyển điện tích thấp (đạt 0,541 $\Omega$  và 0,554 $\Omega$ ), điện dung riêng cao (98F/g ở mật độ dòng 0,1A/g), tuổi thọ phóng nạp cao đạt 83,5% sau 1000 chu kì. Kết quả nghiên cứu cho thấy MXene có nhiều tiềm năng cho chế tạo vật liệu điện cực hiệu năng cao và có thể ứng dụng trong các hệ siêu tụ điện trong tương lai.

**Từ khóa:** MXene  $Ti_3C_2$ , siêu tụ điện, cấu trúc 2D, đặc tính điện hóa.

### ABSTRACT

MXene  $Ti_3C_2$  materials have a unique 2D structural framework and high electrical conductivity, which makes them potentially beneficial for supercapacitor electrodes. Using uncomplicated, high-performance fabrication techniques can decrease manufacturing costs and enhances the applicability of materials. In this study, MXene  $Ti_3C_2$  was directly fabricated from  $Ti_3AlC_2$  by etching the aluminum layer with HF acid solution. After 60 hours of delamination reaction, the resulting material possesses high purity and a 2D structure with a layer thickness of approximately 50nm. When used as a supercapacitor electrode, the material exhibit quit high electrochemical properties, including low internal resistance and charge transfer resistance (reaching 0.541 $\Omega$  and 0.554 $\Omega$ , respectively), high specific capacitance (98F/g at a current density of 0.1A/g), and high capacitance retention, reaching 83.5 percent after 1000 cycles. The results of this study indicate that MXene has great potential for the production of high-performance electrode materials and can be utilized in future supercapacitor

**Keywords:** MXene  $Ti_3C_2$ , supercapacitor, 2D structural, electrochemical properties.

<sup>1</sup>Viện Hóa học - Vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự

<sup>2</sup>Phòng Đào tạo, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự

<sup>3</sup>Khoa Công nghệ Hóa học, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: [nguyentranhung28@gmail.com](mailto:nguyentranhung28@gmail.com)

Ngày nhận bài: 20/10/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/12/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/3/2024

### 1. GIỚI THIỆU

Vật liệu MXene được phát hiện lần đầu bởi giáo sư Yury Gogotsi năm 2011 và thu hút được sự quan tâm của nhiều

nhà khoa học trên thế giới [1]. Nhiều công trình đã tập trung nghiên cứu các phương pháp chế tạo, thiết kế và ứng dụng vật liệu MXene. Là một loại vật liệu 2D ưa nước, có độ dẫn điện cao, có thể biến tính bề mặt hay kết hợp với nhiều loại vật liệu khác nên MXene có khả năng ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như hấp phụ sóng điện từ, xúc tác xử lý nước, sensor, tích trữ năng lượng. Trong đó, MXene được cho là có nhiều tiềm năng để chế tạo điện cực cho pin và siêu tụ điện [2].

Siêu tụ điện (supercapacitors) là một thiết bị tích trữ năng lượng thế hệ mới với các đặc điểm vượt trội như mật độ công suất lớn, tốc độ sạc xả nhanh, tuổi thọ cao, có khả năng tích trữ và giải phóng một lượng điện năng lớn trong thời gian ngắn. Siêu tụ điện được phân thành hai loại chính, dựa theo nguyên lý hoạt động của chúng là tụ điện lớp kép và giả điện dung [3]. Đặc tính giả tụ điện của MXene được nghiên cứu lần đầu vào năm 2013 [4]. MXene có nhiều ưu điểm của cả vật liệu lớp kép và giả điện dung, như độ dẫn điện cao và các lớp 2D cho phép ion điện tích khuếch tán với tốc độ cao giữa các lớp vật liệu. Các nghiên cứu đã tập trung chế tạo các loại MXene mới và khảo sát đặc trưng điện hóa của chúng [5, 6].

Vật liệu MXene được nghiên cứu và ứng dụng nhiều nhất là titan carbid ( $Ti_3C_2$ ). MXene  $Ti_3C_2$  có thể được chế tạo bằng phương pháp ăn mòn lớp Al từ vật liệu pha MAX ( $Ti_3AlC_2$ ) bằng các tác nhân axit như HF [7], LiF-HCl [8],  $NH_4NF_2$  [9]. Thay đổi các tác nhân và điều kiện ăn mòn cho phép chế tạo được các mẫu  $Ti_3C_2$  có thành phần, đặc trưng bề mặt và đặc tính điện hóa khác nhau. Ăn mòn bằng HF được cho là phương pháp có tính ứng dụng cao do có quá trình phản ứng đơn giản, hiệu quả trong việc tách lớp MXene. Trong nghiên cứu này, dung dịch HF 40% được sử dụng là tác nhân ăn mòn lớp Al để chế tạo vật liệu MXene  $Ti_3C_2$  [10]. Thành phần hóa học, tinh thể và cấu trúc bề mặt của các mẫu MXene được khảo sát bằng các kỹ thuật SEM-EDX và XRD, đồng thời bản chất quá trình tích trữ - giải phóng điện năng và đặc trưng điện hóa trong hệ siêu tụ điện của vật liệu được nghiên cứu bằng phương pháp quét thế vòng (CV), phóng nạp dòng không đổi (GCD) và phổ tổng trở (EIS) [11-13].

### 2. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

#### 2.1. Hóa chất nguyên liệu

$Ti_3AlC_2$  (AR, kích thước hạt 200 mesh, Sigma-aldrich), Axit HF 40% (AR, Macklin-Trung Quốc), Dimethyl formamide (AR,

Sigma-aldrich), Super P (Nhật Bản), polyvinyl flofide (PVDF) (AR, Nhật Bản), Nikel foam (Nhật Bản), KOH (metal basic, Sigma-Aldrich).

**2.2. Phương pháp chế tạo vật liệu MXene Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>**

Vật liệu MXene Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> được chế tạo bằng phương pháp ăn mòn lớp Al trong axit HF 40%. Cân chính xác 1g Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> và đổ từ từ vào cốc Teflon chứa sẵn 40mL dung dịch HF 40%. Khuấy đều hỗn hợp trên bằng máy khuấy từ tốc độ 300 vòng/phút trong thời gian xác định. Ly tâm, rửa sạch chất rắn thu được bằng nước deion cho đến khi pH của hỗn hợp đạt trung tính. Sấy khô chất rắn trong tủ sấy chân không ở nhiệt độ 80°C trong 12 giờ thu vật liệu MXene kí hiệu là Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-y, với y là thời gian phản ứng.

**2.3. Phương pháp khảo sát vật liệu**

**2.3.1. Phương pháp khảo sát cấu trúc, thành phần vật liệu**

Vật liệu chế tạo được chụp kính hiển vi điện tử quét (SEM) trên thiết bị S4800 - Hitachi và chụp ảnh kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM) trên thiết bị JEM 2100, Joel; chụp phổ nhiễu xạ tia X trên thiết bị Bruker D8-Advance với góc 2θ từ 10° đến 70°.

**2.3.2. Phương pháp khảo sát đặc trưng điện hóa siêu tụ điện của MXene Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>**

Vật liệu chế tạo được sử dụng để chế tạo điện cực siêu tụ điện. Hỗn hợp vật liệu: PVDF: Super P: NMP = 80:10:10:500 được nghiền bằng máy nghiền bi hành tinh trong 1 giờ. Phủ hỗn hợp trên lên màng nikel (đường kính 0,8mm) và sấy trong môi trường chân không ở 80°C trong 12 giờ thu được điện cực siêu tụ điện. Hai điện cực siêu tụ điện có khối lượng vật liệu bằng nhau (khoảng 2mg) được sử dụng để lắp thành siêu tụ điện và tiến hành đo đặc các đặc trưng điện hóa.

Đặc trưng điện hóa của vật liệu chế tạo khi sử dụng trong chế tạo điện cực siêu tụ điện được khảo sát bằng phương pháp quét thế vòng (CV) ở tốc độ 5mV/s, 10mV/s, 20mV/s, 50mV/s và 100mV/s; nạp - phóng dòng không đổi (GCD) ở các mật độ dòng 0,1A/g, 0,2A/g, 0,3A/g, 0,5A/g và 1,0A/g và đo tổng trở trên thiết bị Autolab PGSTAT309n (Metrohm, Switzerland).

Điện dung riêng C<sub>s</sub> của vật liệu điện cực được tính theo công thức (1) như sau [6]:

$$C_s = 2I\Delta t/m\Delta V \tag{1}$$

Trong đó, I là mật độ dòng xả (A), Δt là thời gian phóng (giây), m là khối lượng vật liệu điện cực (g), ΔV là cửa số điện thế (V).

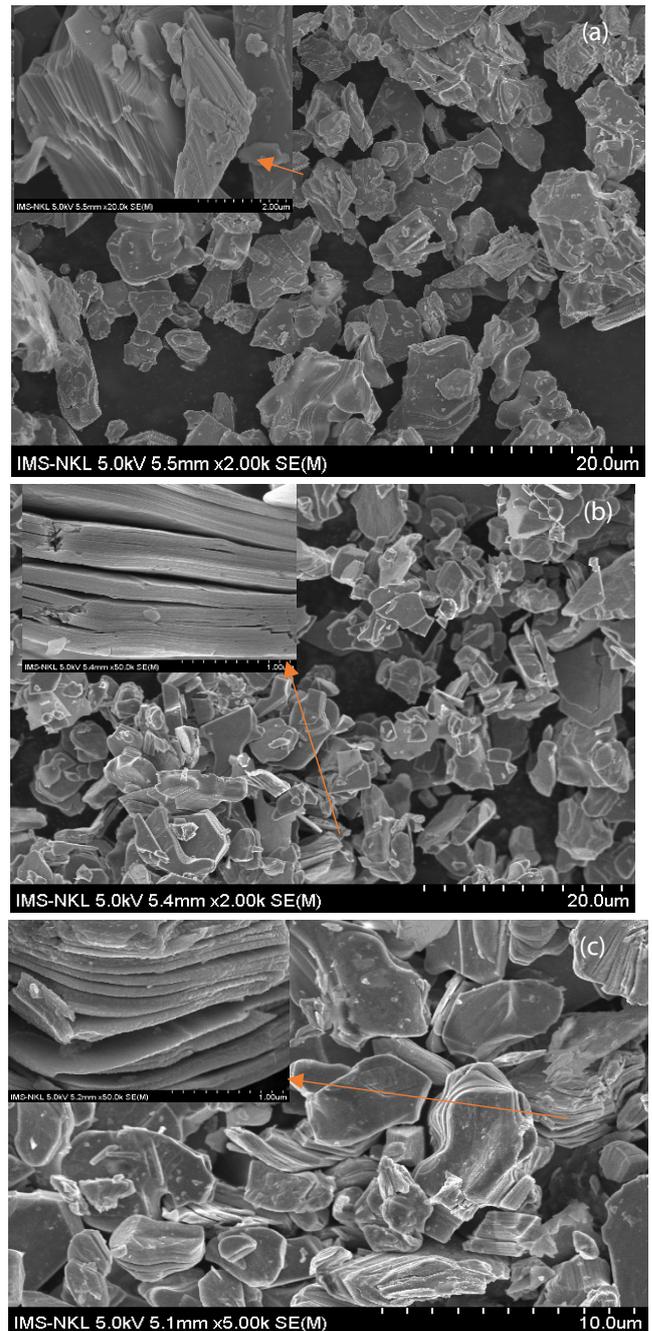
**3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

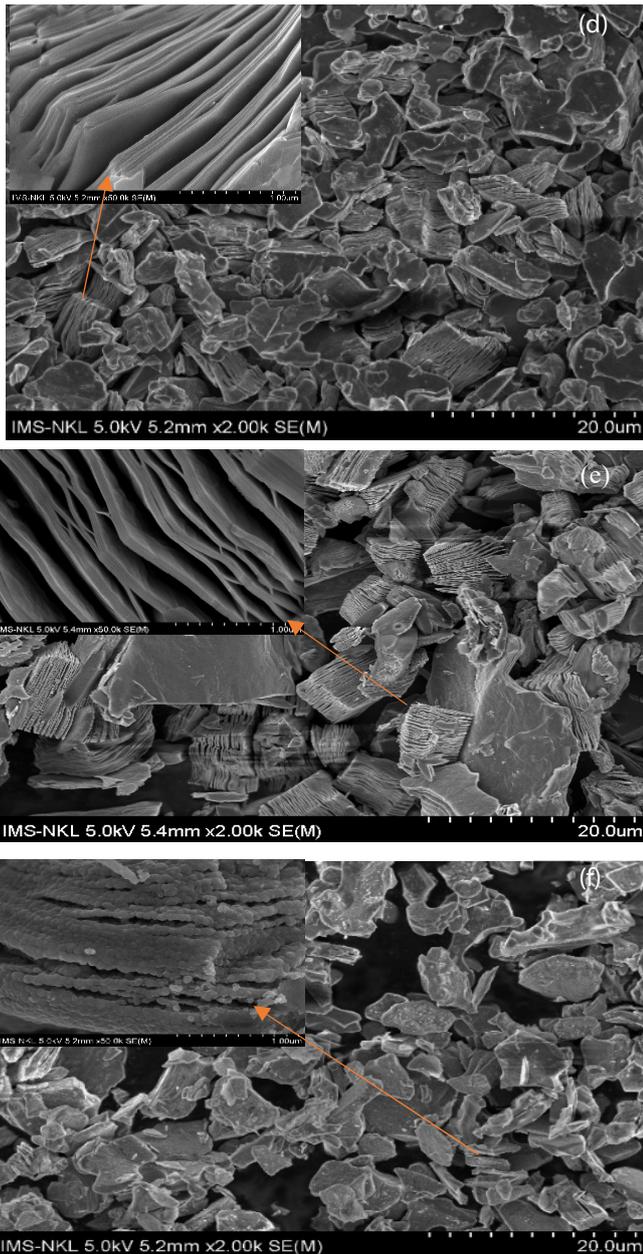
**3.1. Đặc trưng vật liệu của MXene Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>**

Ảnh hưởng của thời gian phản ứng đến cấu trúc lớp của vật liệu được khảo sát qua ảnh kính hiển vi điện tử quét SEM (hình 1).

Hình 1a cho thấy nguyên liệu Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> dạng bột mịn có bề mặt nhẵn, kích thước trong khoảng 2 - 10μm. Tốc độ quá trình tách lớp của vật liệu có thể quan sát thấy rõ qua các

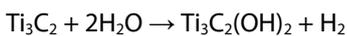
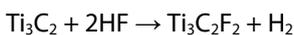
hình SEM. Sau 24 giờ và 36 giờ phản ứng, các hạt Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> đã bắt đầu tách lớp, tuy nhiên, lớp vật liệu còn dày, rãnh giữa các lớp chưa rõ ràng. Điều này chứng tỏ quá trình ăn mòn lớp nhôm diễn ra ở tốc độ chậm, lần lượt từ ngoài vào trong. Quá trình ăn mòn và tách lớp tiếp tục diễn ra triệt để hơn sau khi tăng thời gian phản ứng. Khi thời gian phản ứng là 60 giờ, mẫu Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-60 cho khả năng tách lớp tốt với độ dày lớp MXene khoảng 50nm, rãnh trống giữa các lớp vật liệu có độ rộng lớn lên tới 300nm. Với thời gian phản ứng là 72 giờ, trên bề mặt MXene có sự xuất hiện của các hạt cầu kích thước khoảng 10nm. Dự trên kích thước và hình dạng của các hạt trên, có thể nhận định rằng đó không thể là các hạt vỡ tạo thành từ quá trình tách lớp Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> mà là sản phẩm phụ của quá trình phản ứng.



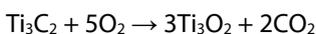


Hình 1. Ảnh chụp kính hiển vi điện tử quét mẫu vật liệu: (a)  $Ti_3AlC_2$ , (b)  $Ti_3C_2-24$ , (c)  $Ti_3C_2-36$ , (d)  $Ti_3C_2-48$ , (e)  $Ti_3C_2-60$  và (f)  $Ti_3C_2-72$

Quá trình tách lớp MXene bằng phản ứng ăn mòn bằng HF, theo phương trình phản ứng sau [14]:



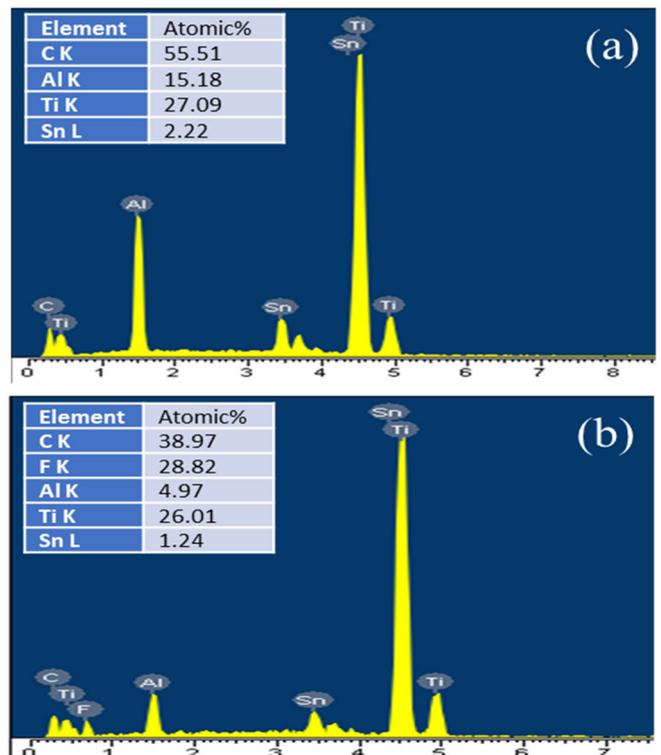
MXene  $Ti_3C_2$  có thể bị oxi hóa bởi oxi trong quá trình chế tạo, theo phương trình [15]:

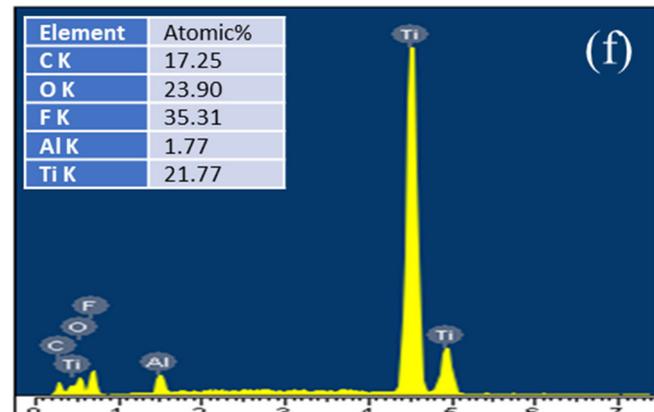
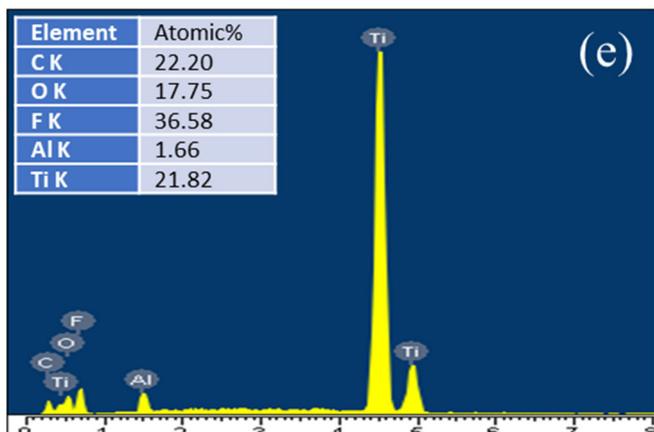
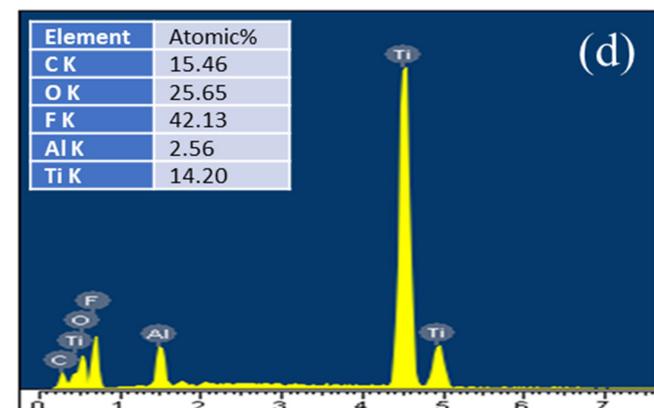
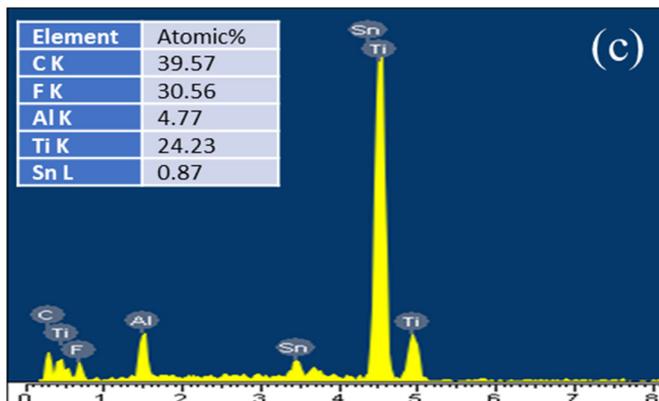


Theo các phương trình nêu trên, sản phẩm phụ dạng rắn của quá trình ăn mòn tách lớp gồm  $AlF_3$  và  $TiO_2$ . Kết quả ảnh SEM là chưa đủ để khẳng định bản chất của các hạt hình cầu trên bề mặt mẫu  $Ti_3C_2-72$ , các kết quả EDX và XRD có thể làm rõ hơn về bản chất vật liệu.

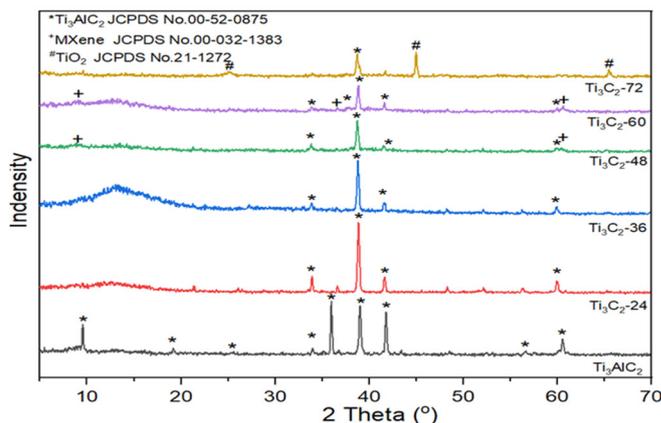
Kết quả phân tích thành phần bằng phương pháp phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) của các mẫu vật liệu được trình bày trên hình 2. Có thể thấy xu hướng giảm dần của nồng độ Al trong thành phần vật liệu khi tăng dần thời gian phản ứng ăn mòn. Cụ thể, từ 15,18% Al trong mẫu  $Ti_3AlC_2$  giảm xuống còn 4,97%, 4,77%, 2,56%, 1,66% với thời gian phản ứng lần lượt là 24 giờ, 36 giờ, 48 giờ và 60 giờ. Đồng thời, từ mẫu 48 giờ có sự xuất hiện của oxi trong thành phần vật liệu, cho thấy  $Ti_3C_2$  sinh ra đã phản ứng với nước tạo thành hệ  $Ti_3C_2(OH)_2$ . Nhưng khi thời gian phản ứng tiếp tục tăng lên 72 giờ, hàm lượng các thành phần trong mẫu  $Ti_3C_2-72$  không thay đổi nhiều so với mẫu  $Ti_3C_2-60$ . Có thể nhận định rằng, sau 60 giờ phản ứng, vật liệu MXene hầu như được ăn mòn và tách lớp hoàn toàn. Tăng thêm thời gian phản ứng không mang lại nhiều hiệu quả chế tạo vật liệu.

Kết quả phổ nhiễu xạ tia X (hình 3) cho phép phân tích rõ hơn thành phần pha vật liệu MXene sau các thời gian phản ứng khác nhau. Phổ XRD mẫu  $Ti_3AlC_2$  có sự xuất hiện rõ nét các pic ở vị trí  $2\theta = 9,5^\circ; 19,1^\circ; 33,9^\circ; 36,0^\circ; 39,0^\circ; 41,8^\circ; 48,6^\circ; 52,4^\circ; 56,6^\circ; 60,1^\circ$  đặc trưng cho các mặt tinh thể (002); (004); (101); (103); (104); (105); (107); (108); (109); (110) [16]. Các pic đặc trưng cho  $Ti_3AlC_2$  nêu trên có cường độ giảm dần khi thời gian phản ứng tăng lên. Tuy vậy, các pic đặc trưng cho MXene  $Ti_3C_2$  chưa xuất hiện ở các mẫu 24 giờ, 36 giờ. Phổ XRD của mẫu  $Ti_3C_2-48, Ti_3C_2-60$  có sự xuất hiện các pic vị trí  $2\theta = 9,8^\circ; 36,5^\circ; 60,8^\circ$  đại diện cho các mặt tinh thể (002); (111); (220) của MXene  $Ti_3C_2$  [17]. Tuy nhiên, các pic đặc trưng của  $Ti_3C_2$  không xuất hiện trên phổ XRD của mẫu  $Ti_3C_2-72$ . Thay vào đó là sự xuất hiện của pic đặc trưng cho tinh thể anatase  $TiO_2$  ở các vị trí  $2\theta = 25,2^\circ; 45,0^\circ$  và  $65,4^\circ$  [18]. Như vậy, có thể khẳng định, các hạt hình cầu trên bề mặt MXene  $Ti_3C_2$  là  $TiO_2$ .





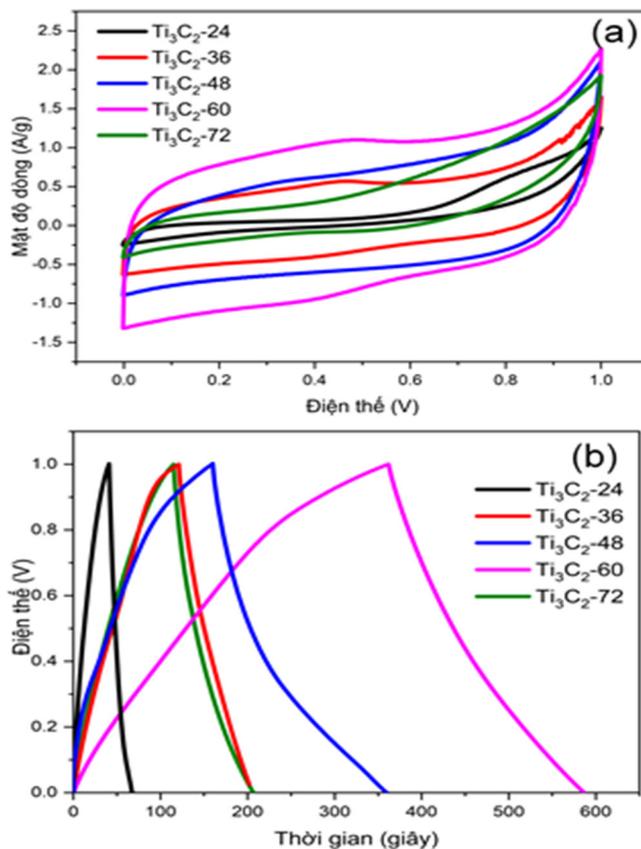
Hình 2. Kết quả phân tích EDX: (a)  $Ti_3AlC_2$ , (b)  $Ti_3C_2-24$ , (c)  $Ti_3C_2-36$ , (d)  $Ti_3C_2-48$ , (e)  $Ti_3C_2-60$  và (f)  $Ti_3C_2-72$

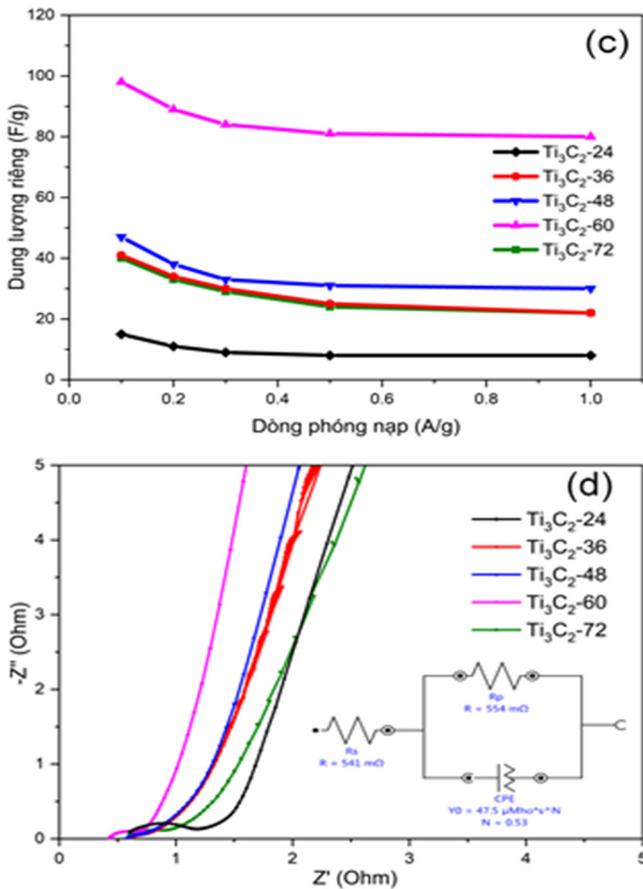


Hình 3. Giải đồ nhiễu xạ tia X (XRD)

### 3.2. Đặc trưng điện hóa của MXene $Ti_3C_2$

Các đặc trưng điện hóa của vật liệu MXene  $Ti_3C_2$  với thời gian phản ứng khác nhau được làm rõ bằng phương pháp quét thế vòng (CV), phóng nạp dòng không đổi (GCD) và phổ tổng trở (EIS) trên hệ siêu tụ điện hai điện cực. Kết quả khảo sát được trình bày trên hình 4. Đường cong quét thế vòng (CV) của các mẫu MXene (hình 4a) có hình dạng điển hình cho vật liệu điện cực giả điện dung với pic oxy hóa - khử xuất hiện ở vị trí 0,47V và 0,37V. Điều này cho thấy cơ chế tích trữ và giải phóng điện năng của MXene chủ yếu dựa trên phản ứng oxy hóa khử trên bề mặt vật liệu. Đường cong CV của các mẫu  $Ti_3C_2-48$  và  $Ti_3C_2-60$  có diện tích lớn và tính đối xứng tốt, cho thấy điện dung riêng lớn và tính thuận nghịch cao trong quá trình phóng nạp.





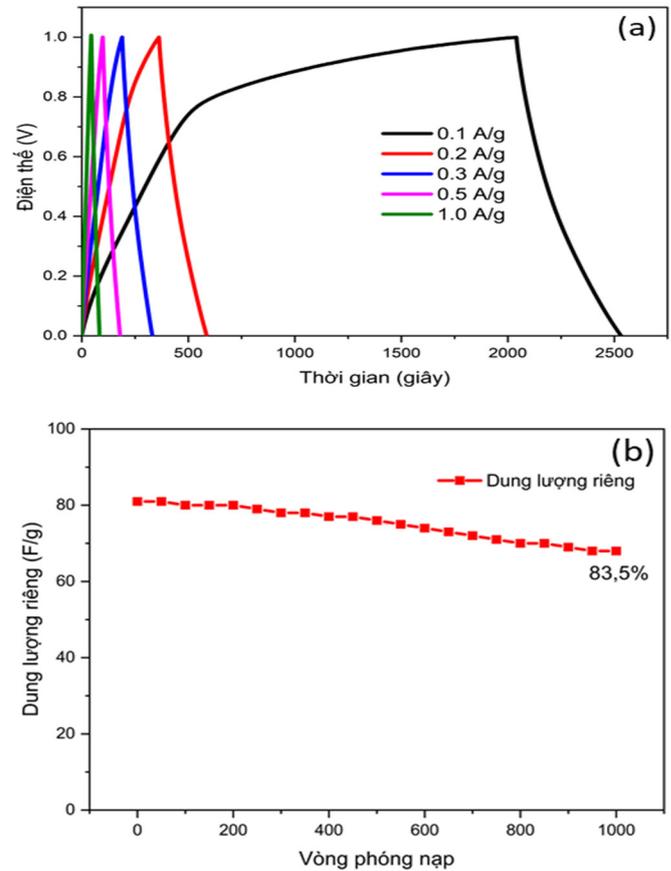
Hình 4. Đặc trưng điện hóa của các mẫu MXene  $Ti_3C_2$ : (a) đường cong quét thế vòng (b) Giảm đồ phóng nạp dòng không đổi, (c) Dung lượng riêng, (d) Phổ tổng trở

Đồ thị phóng nạp dòng không đổi (GCD) của các mẫu MXene được hiện trên hình 4b. Đồ thị GCD của các mẫu có đường phóng có độ võng nhất định, cho thấy hiệu ứng culong trong quá trình phóng điện của vật liệu giả điện dung. Vật liệu  $Ti_3C_2$  có thời gian phóng điện dài cho thấy chúng có điện dung riêng lớn hơn so với các mẫu còn lại. Kết quả tính toán điện dung riêng của các mẫu (hình 4c) cho thấy, ở mật độ dòng phóng nạp là 0,2A/g, các mẫu có điện dung riêng lần lượt là 16F/g, 39F/g, 42F/g, 85F/g và 37F/g.

Phổ tổng trở của các mẫu MXene  $Ti_3C_2$  cho thấy vật liệu có điện trở nội và điện trở chuyển điện tích khá thấp. Đây là đặc điểm quan trọng để đánh giá tiềm năng của vật liệu điện cực siêu tụ điện. Mẫu  $Ti_3C_2-60$  có điện trở nội và điện trở chuyển điện tích thấp nhất, lần lượt đạt 0,541Ω và 0,554Ω.

Kết quả nghiên cứu điện hóa chỉ ra rằng, mẫu  $Ti_3C_2$  với thời gian phản ứng là 60 phút cho đặc tính điện hóa tốt nhất với điện dung riêng lớn, điện trở thấp. Các kết quả nghiên cứu khả năng phóng nạp ở các mật độ dòng khác nhau và tuổi thọ phóng nạp của điện cực  $Ti_3C_2-60$  được thể hiện trên hình 5. Kết quả cho thấy, điện cực cho khả năng phóng nạp tuần hoàn tốt ở nhiều mật độ dòng khác nhau. Điện cực cũng duy trì điện dung riêng tốt với mật độ dòng cao, điện dung riêng đạt 98F/g, 85F/g, 80F/g, 76F/g và 70F/g ở mật độ dòng lần lượt là 0,1A/g, 0,2A/g, 0,3A/g, 0,5A/g và 1,0A/g.

Giản đồ thể hiện dung lượng riêng trong 1000 vòng phóng nạp cho thấy, điện cực MXene  $Ti_3C_2$  cho khả năng duy trì dung lượng đạt tới 83,5% so với mức ban đầu. Kết quả nghiên cứu cho thấy, vật liệu MXene chế tạo có đặc trưng điện hóa khá tốt so với các nghiên cứu tương tự.



Hình 5. Đặc tính điện hóa của vật liệu  $Ti_3C_2-60$ : (a) giản đồ phóng nạp dòng không đổi, (b) tuổi thọ phóng nạp

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã sử dụng phương pháp ăn mòn  $Ti_3AlC_2$  trong môi trường HF để chế tạo thành công vật liệu MXene  $Ti_3C_2$ . Tính chất vật liệu MXene  $Ti_3C_2$  đã được nghiên cứu bằng các phương pháp XRD, SEM-EDX; bản chất và đặc trưng điện hóa của vật liệu đã được nghiên cứu bằng phương pháp quét thế vòng (CV), phóng nạp dòng không đổi (GCD) và phổ tổng trở. Kết quả cho thấy, thời gian phản ứng 60 giờ là phù hợp cho chế tạo vật liệu MXene. Vật liệu thu được có cấu trúc 2D rõ ràng, đồng đều, độ dày lớp khoảng 30 - 50nm. Vật liệu có khả năng tích trữ và giải phóng điện năng theo cơ chế oxi hóa khử với điện trở thấp, dung lượng riêng cao đạt 98F/g ở 0,1A/g, tuổi thọ phóng nạp đạt 83,5% sau 1000 vòng. Kết quả nghiên cứu cho thấy MXene có nhiều tiềm năng cho chế tạo vật liệu điện cực hiệu năng cao và có thể ứng dụng trong các hệ siêu tụ điện tương lai.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đề tài Nghiên cứu Khoa học và Phát triển công nghệ, số 06/2023/HĐKHCN-HHVL.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1]. Gogotsi Y., and Q. Huang, "MXenes: Two-Dimensional Building Blocks for Future Materials and Devices," *ACS Nano*, 15(4), 5775-5780, 2021.
- [2]. Deshmukh K., A. Muzaffar, T. Kovářik, M. B. Ahamed, and S. K. K. Pasha, *Chapter 1 - Introduction to 2D MXenes: fundamental aspects, MAX phases and MXene derivatives, current challenges, and future prospects*. in MXenes and their Composites, K.K. Sadasivuni, et al., Editors. 2022, Elsevier. 1-47.
- [3]. Jinitha C. G., S. V. Jeba, S. Sonia, and R. Ramachandran, *Chapter 5 - Fundamentals of supercapacitors*. in Smart Supercapacitors, C.M. Hussain and M.B. Ahamed, Editors. 2023, Elsevier. 83-100.
- [4]. Forouzandeh P., and S. C. Pillai, "MXenes-based nanocomposites for supercapacitor applications," *Current Opinion in Chemical Engineering*, 33, 100710, 2021.
- [5]. Hussain I., C. Lamiel, M. S. Javed, M. Ahmad, S. Sahoo, X. Chen, N. Qin, S. Iqbal, S. Gu, Y. Li, C. Chatzichristodoulou, and K. Zhang, "MXene-based heterostructures: Current trend and development in electrochemical energy storage devices," *Progress in Energy and Combustion Science*, 97, 101097, 2023.
- [6]. Simon P., and Y. Gogotsi, "Materials for electrochemical capacitors," *Nature Materials*, 7(11), 845-854, 2008.
- [7]. Adibah N., N. Azella, and M. Shukur, "Synthesis of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene through In-situ HF and Direct HF Etching Procedures as Electrolyte Fillers in Dye-Sensitized Solar Cell," *Materials Science Forum*, 1023, 2021.
- [8]. Zhang T., L. Pan, H. Tang, F. Du, Y. Guo, T. Qiu, and J. Yang, "Synthesis of two-dimensional Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene using HCl+LiF etchant: Enhanced exfoliation and delamination," *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 818-826, 2017.
- [9]. Feng A., Y. Yu, F. Jiang, Y. Wang, L. Mi, Y. Yu, and L. Song, "Fabrication and thermal stability of NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub>-etched Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXene," *Ceramics International*, 43, 6322-6328, 2017.
- [10]. Lei J. C., X. Zhang, and Z. Zhou, "Recent advances in MXene: Preparation, properties, and applications," *Frontiers of Physics*, 10(3), 276-286, 2015.
- [11]. Laschuk N. O., E. B. Easton, and O. V. Zenkina, "Reducing the resistance for the use of electrochemical impedance spectroscopy analysis in materials chemistry," *RSC Advances*, 11(45), 27925-27936, 2021.
- [12]. Sharma S., and P. Chand, "Supercapacitor and electrochemical techniques: A brief review," *Results in Chemistry*, 5, 100885, 2023.
- [13]. Verma K., P. Sinha, S. Banerjee, and K. Kar, *Characteristics of Electrode Materials for Supercapacitors*. Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials, Springer Series in Materials Science, 269-285, 2020.
- [14]. Wang Y., and Y. Wang, "Recent progress in MXene layers materials for supercapacitors: High-performance electrodes," *SmartMat*, 4(1), 1-35, 2023.
- [15]. Persson I., J. Halim, T. W. Hansen, J. B. Wagner, V. Darakchieva, J. Palisaitis, J. Rosen, and P. O. Å. Persson, "How Much Oxygen Can a MXene Surface Take Before It Breaks?," *Advanced Functional Materials*, 30(47), 1909005, 2020.
- [16]. Li Z., L. Wang, D. Sun, Y. Zhang, B. Liu, Q. Hu, and A. Zhou, "Synthesis and thermal stability of two-dimensional carbide MXene Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>," *Materials Science and Engineering: B*, 191, 33-40, 2015.
- [17]. Khot A. C., D. T. Dongale, J. H. Park, A. Kesavan, and T. Kim, "Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Based MXene Oxide Nanosheets for Resistive Memory and Synaptic Learning Applications," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13, 5216-5227, 2021.
- [18]. Abdurehman Tariq H., U. Nisar, J. James Abraham, Z. Ahmad, S. AlQaradawi, R. Kahraman, and R. A. Shakoor, "TiO<sub>2</sub> encrusted MXene as a High-Performance anode material for Li-ion batteries," *Applied Surface Science*, 583, 152441, 2022.

**AUTHORS INFORMATION**

**Ngo Van Hoanh<sup>1</sup>, Phung Xuan Thinh<sup>2</sup>, Le Trung Hieu<sup>1</sup>,  
Nguyen Van Canh<sup>1</sup>, Ho Ngoc Minh<sup>1</sup>, Nguyen Minh Viet<sup>3</sup>,  
Nguyen Tran Hung<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Chemistry and Materials, Academy of Military Science and Technology, Vietnam

<sup>2</sup>Department of Education, Academy of Military Science and Technology, Vietnam

<sup>3</sup>Faculty of Chemical Technology, Hanoi University of Industry, Vietnam