

Tổng hợp vật liệu 2D-MXene-Ti₃C₂ bằng phương pháp ăn mòn chọn lọc MAX-Ti₃AlC₂ trong hydrogen fluoride

Cao Thị Hồng^{1,2}, Nguyễn Thị Thơm^{1*}, Phạm Thị Năm¹, Hoàng Thái Hà³, Đinh Thị Mai Thanh³, Trần Đại Lâm¹

¹Viện Kỹ thuật Nhiệt đới, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

³Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 1/6/2023; ngày chuyển phân biên 5/6/2023; ngày nhận phân biên 30/6/2023; ngày chấp nhận đăng 3/7/2023

Tóm tắt:

Vật liệu cấu trúc hai chiều mới - MXene là tên gọi của một số cacbua, nitrua hoặc cacbonitrua kim loại chuyển tiếp, có các tính chất độc đáo như mô đun Young cao, độ dẫn nhiệt, dẫn điện cao, bề mặt ưa nước, có khả năng hấp phụ cao và hấp phụ chọn lọc ion. Vật liệu này đang nhận được sự quan tâm nghiên cứu cho những ứng dụng rộng rãi trong tích trữ năng lượng, xúc tác, cảm biến, điện tử và xử lý môi trường. MXene thường được tổng hợp bằng ba phương pháp: ăn mòn, từ trên xuống và từ dưới lên. Trong đó, ăn mòn là phương pháp được sử dụng rộng rãi. Trong bài báo này, 2D-MXene-Ti₃C₂ được tổng hợp bằng phương pháp ăn mòn từ tiền chất MAX-Ti₃AlC₂ trong dung dịch HF. Ảnh hưởng của các thông số tổng hợp như nhiệt độ và thời gian tổng hợp đến các tính chất đặc trưng của vật liệu đã được khảo sát. Các kết quả thu được cho thấy, nồng độ HF 30%, nhiệt độ 35°C và thời gian 36 giờ là phù hợp để tổng hợp được 2D-MXene-Ti₃C₂ có sự tách lớp tốt. Sự ăn mòn chọn lọc nguyên tố Al được xác nhận từ kết quả gián đo nhiễu xạ tia X (EDX) với sự giảm 94,1% hàm lượng nhôm (từ 24,08 xuống còn 1,43%). Đồng thời, một cấu trúc phân lớp cũng được quan sát trên ảnh hiển vi điện tử quét (SEM).

Từ khóa: ăn mòn chọn lọc, MAX-Ti₃AlC₂, MXene-Ti₃C₂, tách lớp, vật liệu 2D.

Chỉ số phân loại: 2.4, 2.5

Synthesis of 2D-MXene-Ti₃C₂ by etching method from MAX-Ti₃AlC₂ in hydrogen fluoride solution

Thi Hong Cao^{1,2}, Thi Thom Nguyen^{1*}, Thi Nam Pham¹, Thai Ha Hoang³, Thi Mai Thanh Dinh³, Dai Lam Tran¹

¹Institute for Tropical Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

²Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

³University of Science and Technology of Hanoi, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Received 1 June 2023; revised 30 June 2023; accepted 3 July 2023

Abstract:

Novel materials of two-dimensional material - MXene are transition metal carbides, nitrides or carbonitrides, which have unique properties such as high Young's modulus, thermal conductivity, high electrical conductivity, hydrophilic surface, high adsorption capacity, and ion-selective adsorption. These materials are receiving research attention for applications in energy storage, catalysis, sensing, electronics and environmental remediation. MXene materials were usually synthesised by three methods, including etching, top-down and bottom-up. In which, etching is a common method that is used widely to synthesise MXene materials. In this article, 2D-MXene-Ti₃C₂ materials were synthesised by etching method from MAX-Ti₃AlC₂ in HF solution. The effects of synthesis parameters such as temperature and time on the characteristics of the materials were investigated. The obtained results show that the concentration of HF 30%, the temperature of 35°C and the time of 36 hours are suitable for synthesising 2D-MXene-Ti₃C₂ with good delamination. The Al elements were selected corrosion, which was confirmed by the results of energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) spectra with a decrease of 94.1% Al amount (from 24.08 to 1.43%). Simultaneously, a layered structure was observed on the scanning electron microscope (SEM) images of MXene materials.

Keywords: delamination, MAX-Ti₃AlC₂, MXene-Ti₃C₂, selective etching, 2D materials.

Classification numbers: 2.4, 2.5

*Tác giả liên hệ: Email: nguyenthithomsp@gmail.com

1. Đặt vấn đề

Vùng Đồng bằng sông Cửu Long đang phải đối mặt với những thách thức lớn do biến đổi khí hậu và xâm nhập mặn, đặc biệt nguồn nước, an ninh lương thực. Việc phát triển các vật liệu và công nghệ tiên tiến ứng dụng trong xử lý nước mặn được xem là một trong những giải pháp hàng đầu giúp khu vực này ứng phó với tình trạng khan hiếm nước ngọt hiện nay.

Vật liệu 2D nhận được sự quan tâm kể từ năm 2004 khi các nhà khoa học khám phá ra graphene và sự tách lớp cũng như những ứng dụng của chúng [1]. Gần đây, một loại vật liệu mới là cacbua/nitrit kim loại chuyển tiếp hai chiều được gọi là Mxene [2], đã ngày càng thu hút sự chú ý vì tính độc đáo của chúng. Nhiều đặc tính nổi bật như mô đun Young cao, độ dẫn nhiệt/dẫn điện cao, bề mặt ưa nước, khả năng hấp phụ cao và hấp phụ chọn lọc ion nên chúng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực khác nhau như xúc tác, cảm biến sinh học và hóa học, siêu tụ điện, pin điện và hấp phụ [3-6].

Thông thường, MXene được tạo ra bằng cách ăn mòn có chọn lọc pha MAX [7], là một loại cacbua hoặc nitrua có công thức chung là $M_{n+1}AX_n$ ($n=1, 2, 3$), trong đó, M là kim loại chuyển tiếp, A thuộc nhóm IIIA hoặc IVA, X là C hoặc N [8, 9]. Trong pha MAX, liên kết M-A yếu hơn và có thể bị phá vỡ so với liên kết M-X [1, 10]. Do đó, MXene thường được tổng hợp thông qua việc loại bỏ các lớp liên kết yếu của nguyên tử A [11].

MXene thể hiện các tính chất khác nhau tùy thuộc vào điều kiện tổng hợp như kích thước và thành phần pha MAX, bản chất của chất ăn mòn, nồng độ chất ăn mòn, bản chất của dung môi, nhiệt độ tổng hợp, thời gian tổng hợp và thời gian siêu âm tách lớp... [12]. Tuy nhiên, các hạt MXene tổng hợp hầu hết được xếp chồng lên nhau tạo thành cấu trúc dạng tấm với kích thước lớn, điều này cản trở rất nhiều đến việc sử dụng đầy đủ các vật liệu này, dẫn đến hiệu quả hoạt động thấp [13]. Vì vậy, việc nghiên cứu tổng hợp ra các hạt nano MXene có cấu trúc tách lớp là một thách thức lớn.

Theo hiểu biết của chúng tôi, việc sử dụng HF là một lựa chọn tốt để tổng hợp MXene bằng phương pháp ăn mòn hóa học ướt vì khả năng phản ứng cao của nó. Hầu hết các kỹ thuật tổng hợp MXene bằng phương pháp này là ăn mòn chọn lọc nguyên tố "A" trong tiền chất MAX, được thực hiện bằng ít nhất ba bước chính: i) Xử lý MAX trong dung dịch chứa flo (như dung dịch HF hoặc hỗn hợp của muối florua và axit clohydric để tạo ra các hạt MXene xếp chồng lên nhau; ii) Sử dụng dung môi hữu cơ hoặc các cation để đan cài vào cấu trúc MXene, làm cho cấu trúc MXene phồng lên [14]; iii) Sử dụng sóng siêu âm để tách các lớp MXene.

Trong nghiên cứu này, vật liệu 2D-MXene- Ti_3C_2 đã được tổng hợp bằng phương pháp ăn mòn chọn lọc "etching" tiền chất MAX- Ti_3AlC_2 trong dung dịch HF. Ảnh hưởng của một số yếu tố như nhiệt độ và thời gian tổng hợp đến các tính chất đặc trưng của vật liệu 2D-MXene- Ti_3C_2 đã được nghiên cứu.

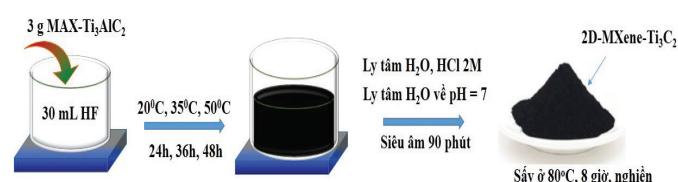
Vật liệu 2D-MXene- Ti_3C_2 tổng hợp được định hướng ứng dụng trong chế tạo điện cực composite xốp dẫn điện trên cơ sở carbon hoạt tính gáo dừa để xử lý nước nhiễm mặn tại khu vực Đồng bằng sông Cửu Long theo công nghệ điện dung khử ion (capacitive deionization - HCDI). Đây là một hướng nghiên cứu mới và tiềm năng có thể ứng dụng trong thực tiễn.

2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

2.1. Hóa chất, thiết bị

Hóa chất MAX- Ti_3AlC_2 (98%, <200 μm), HF (48%) và HCl (37%) là sản phẩm của Hãng Sigma Aldrich (Hoa Kỳ). Các thiết bị sử dụng trong nghiên cứu bao gồm: cân phân tích 5 số Mettler Toledo (Đức), máy khuấy từ VELP (Ý), máy siêu âm S60H Elmasonic (Đức) và máy ly tâm Hermle Z366K (Đức).

2.2. Tổng hợp 2D-MXene- Ti_3C_2



Hình 1. Tổng hợp 2D-MXene- Ti_3C_2 bằng phương pháp etching trong dung dịch HF.

2D-MXene- Ti_3C_2 được tổng hợp bằng phương pháp ăn mòn chọn lọc "etching" từ tiền chất MAX- Ti_3AlC_2 trong dung dịch HF (hình 1). 3 g bột MAX- Ti_3AlC_2 được thêm vào 30 ml HF trong lọ nhựa PP dung tích 50 ml, sau đó đậy nắp lọ. Hỗn hợp này được đun cách thủy trên máy khuấy từ gia nhiệt với thời gian etching khác nhau (24, 36 và 48 giờ) ở nhiệt độ thay đổi (20, 35 và 50°C). Hỗn hợp được ly tâm rửa bằng nước cất với tốc độ 9000 vòng/phút trong 5 phút (3 lần), bằng dung dịch axit HCl 2 M (thực hiện 3 lần), sau đó ly tâm rửa bằng nước cất đến pH trung tính. Dung dịch chứa 2D-MXene- Ti_3C_2 được siêu âm 90 phút ở nhiệt độ phòng và ly tâm thu lấy chất rắn 2D-MXene- Ti_3C_2 . Mẫu 2D-MXene- Ti_3C_2 được sấy khô chân không ở 80°C trong 8 giờ, nghiền bằng cối mã não thu được dạng bột mịn màu đen.

2.3. Phân tích đặc trưng tính chất của MAX- Ti_3AlC_2 và 2D-MXene- Ti_3C_2

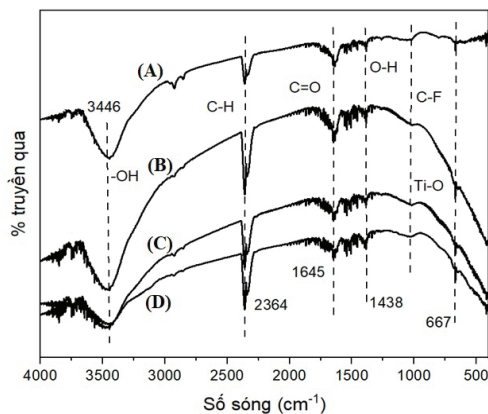
Các liên kết đặc trưng của MAX- Ti_3AlC_2 và MXene- Ti_3C_2 tổng hợp trong vùng bước sóng từ 600-4000 cm^{-1} được phân tích trên thiết bị NICOLET IS10 (Thermo Scientific, Mỹ). Hình thái học bề mặt và thành phần các nguyên tố của các vật liệu được phân tích bằng phương pháp SEM và phương pháp EDX sử dụng thiết bị Jeol 6490 JED 2300 (Jeol, Nhật Bản). Thành phần pha của MAX và MXene- Ti_3C_2 được phân tích bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) sử dụng bức xạ Cu K α ($\lambda=0,1546$ nm) ở 40 kV và 20 mA, bước quét 0,02°/s với 2 θ trong khoảng từ 5-65°, được ghi trên thiết bị SIEMENS D5005 Bruker, Đức. Phổ Raman được sử dụng để xác định thành phần cấu trúc của vật liệu, được đo trên thiết bị quang phổ XploRA

PLUS confocal Raman microscope (Horiba, Nhật Bản). Diện tích bề mặt riêng được xác định dựa trên phương pháp đo đẳng nhiệt hấp phụ-khử hấp phụ khí N_2 ở 77K trên thiết bị TriStar II, Micromeritics, Hoa Kỳ.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ tổng hợp

Phổ FT-IR của MAX- Ti_3AlC_2 và MXene- Ti_3C_2 tổng hợp ở các nhiệt độ khác nhau 20°C, 35°C và 50°C được thể hiện trên hình 2. Nhìn chung, phổ IR của chúng đều có hình dạng tương tự nhau. Trên phổ quan sát thấy pic hấp thụ cực đại ở khoảng số sóng 3446 và 1438 cm^{-1} , được gán cho dao động của nhóm hydroxyl trong nước ẩm. Ngoài ra, pic ở 1645, 1097 và 667 cm^{-1} có thể được quy kết cho dao động biến dạng của liên kết C=O, Ti-O; C-F [15].

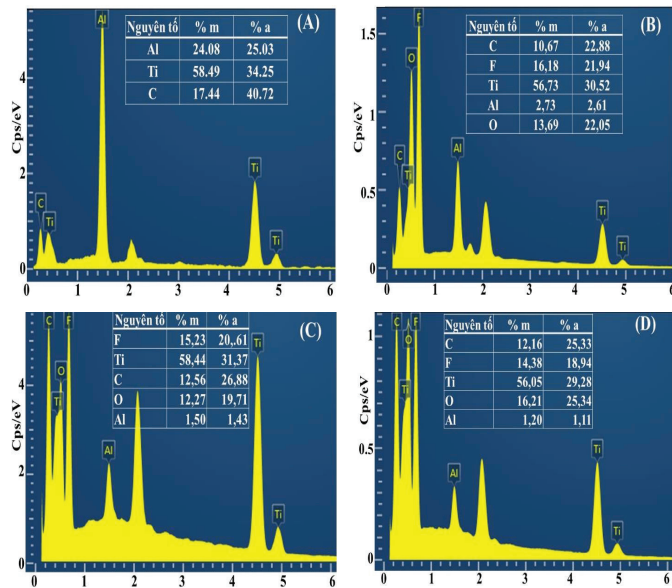


Hình 2. Phổ FT-IR của MAX- Ti_3AlC_2 (A) và 2D-MXene- Ti_3C_2 tổng hợp ở các nhiệt độ khác nhau: 20°C (B), 35°C (C) và 50°C (D) trong 48 giờ.

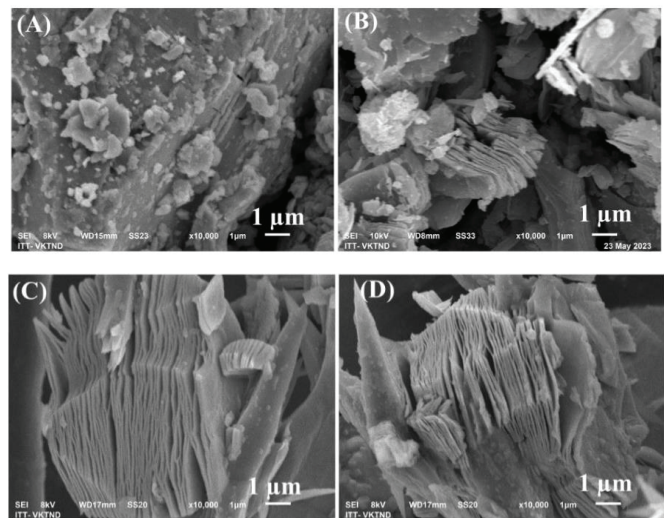
Thành phần các nguyên tố trong MAX- Ti_3AlC_2 và MXene- Ti_3C_2 tổng hợp ở nhiệt độ khác nhau, được phân tích sử dụng phương pháp EDX.

Trên hình 3A quan sát thấy, trên phổ EDX của MAX- Ti_3AlC_2 xuất hiện các pic đặc trưng cho nguyên tố Ti, C và Al với hàm lượng Al chiếm 24,08% theo khối lượng. Hàm lượng Al giảm đáng kể từ 24,08% xuống còn khoảng 1,1-2,6% sau quá trình ăn mòn được quan sát trong các mẫu MXene- Ti_3C_2 . Đây là kết quả của sự ăn mòn có chọn lọc nguyên tố Al, nó cho phép dự đoán về sự tách lớp trong cấu trúc của MXene (sẽ được quan sát bởi kết quả SEM bên dưới). Có thể thấy khi nhiệt độ tăng từ 20 lên 35°C, hàm lượng Al trong mẫu MXene giảm từ 2,73 xuống 1,50%. Tiếp tục tăng nhiệt độ phản ứng lên 50°C, hàm lượng Al giảm nhẹ từ 1,50 xuống 1,11% cho phép lựa chọn nhiệt độ 35°C là thích hợp để tổng hợp MXene. Ngoài ra, sự xuất hiện của O và F là kết quả của sự ăn mòn bởi HF.

SEM của MAX- Ti_3AlC_2 và 2D-MXene- Ti_3C_2 tổng hợp ở các nhiệt độ khác nhau được thể hiện trên hình 4. Ảnh SEM của MAX- Ti_3AlC_2 (hình 4A) có dạng hình tấm với cấu trúc có thể được phân lớp. Sau khi ăn mòn trong dung dịch HF, cấu trúc lớp được quan sát rất rõ. Đây là kết quả của sự ăn mòn có chọn lọc lớp nguyên tử Al xen giữa trong cấu trúc của MAX để tạo thành MXene. Luận giải này đã được chứng minh dựa trên kết quả đo EDX ở trên.



Hình 3. Phổ EDX của MAX- Ti_3AlC_2 (A) và 2D-MXene- Ti_3C_2 tổng hợp ở các nhiệt độ khác nhau: 20°C (B), 35°C (C) và 50°C (D) trong 48 giờ.

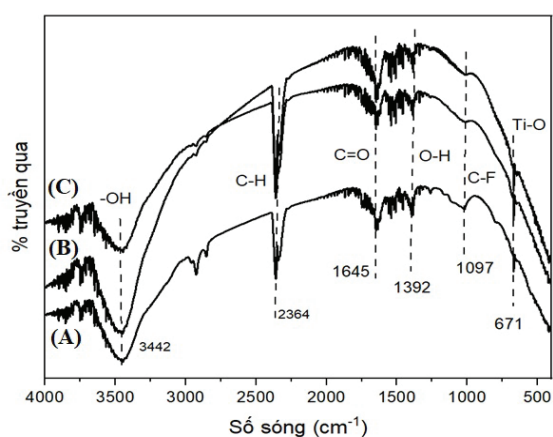


Hình 4. Ảnh SEM của MAX- Ti_3AlC_2 (A) và 2D-MXene- Ti_3C_2 tổng hợp ở các nhiệt độ khác nhau: 20°C (B), 35°C (C) và 50°C (D) trong 48 giờ.

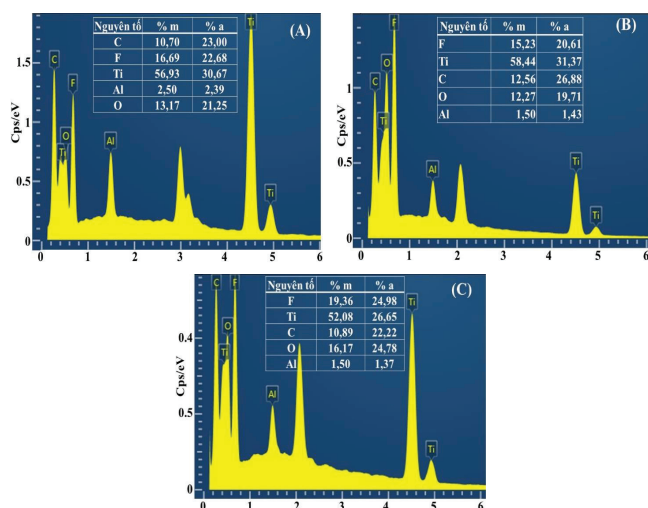
Từ kết quả EDX và ảnh SEM cho phép kết luận đã tổng hợp thành công vật liệu 2D-MXene- Ti_3C_2 bằng phương pháp ăn mòn MAX- Ti_3AlC_2 . Với cấu trúc tách lớp của 2D-MXene- Ti_3C_2 có thể dự đoán về sự tăng diện tích bề mặt riêng của các mẫu MXene so với mẫu MAX ban đầu. Kết quả về diện tích bề mặt riêng sẽ được minh chứng ở các nội dung nghiên cứu tiếp theo.

3.2. Ảnh hưởng của thời gian tổng hợp

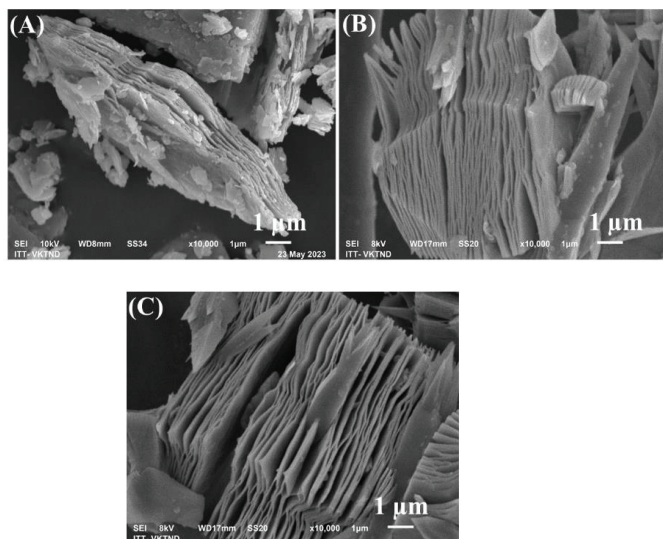
Phổ FT-IR của 2D-MXene- Ti_3C_2 tổng hợp ở 35°C với các thời gian khác nhau quan sát thấy các pic ở 3442, 1645, 1392, 1097 và 671 cm^{-1} có thể là do dao động làm các liên kết -OH, C=O, O-H, C-F và Ti-O kéo dài hơn nhưng vẫn phù hợp với các nghiên cứu trước đó [15] (hình 5).



Hình 5. Phổ FT-IR của 2D-MXene-Ti₃C₂ tổng hợp với các thời gian khác nhau: 24 giờ (A), 36 giờ (B) và 48 giờ (C).



Hình 6. Phổ EDX của các mẫu 2D-MXene-Ti₃C₂ tổng hợp với thời gian khác nhau: 24 giờ (A), 36 giờ (B) và 48 giờ (C).

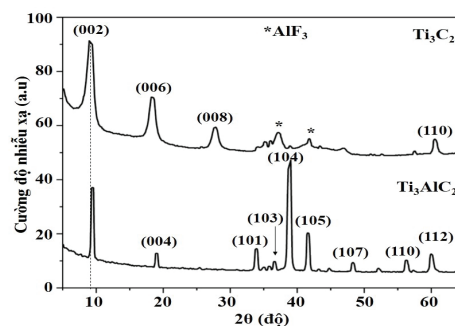


Hình 7. Ảnh SEM của 2D-MXene-Ti₃C₂ tổng hợp với thời gian khác nhau: 24 giờ (A), 36 giờ (B) và 48 giờ (C).

Thành phần các nguyên tố trong MXene tổng hợp ở thời gian khác nhau được thể hiện trên hình 6. Trên phổ EDX của các mẫu MXene tổng hợp ở các thời gian khác nhau quan sát thấy các pic đặc trưng cho Ti và C. Sự xuất hiện của O và F là kết quả của sự ăn mòn bởi HF. Hàm lượng nguyên tố Al giảm khi tăng thời gian tổng hợp từ 24 giờ lên 36 giờ (đạt 2,5 và 1,5% tương ứng). Tiếp tục tăng thời gian phản ứng lên 48 giờ, hàm lượng nhôm gần như không thay đổi. Ảnh SEM quan sát thấy sự tách lớp tốt của vật liệu sau quá trình ăn mòn (hình 7). Từ các kết quả này, chúng tôi lựa chọn thời gian 36 giờ là thích hợp để tổng hợp 2D-MXene-Ti₃C₂.

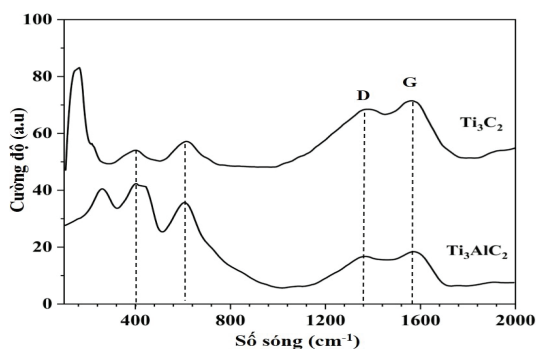
3.3. Đặc trưng của MAX-Ti₃AlC₂ và MXene-Ti₃C₂

Hình 8 trình bày giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu bột MAX-Ti₃AlC₂ và MXene-Ti₃C₂ được tổng hợp bằng phương pháp ăn mòn chọn lọc từ tiền chất MAX trong dung dịch axit HF. Các cực đại nhiễu xạ của vật liệu MAX được quan sát thấy ở $2\theta=9,5, 19, 34, 36,7, 38,9, 41,7, 48,3, 56,4, \text{ và } 60,1^\circ$. Trên giản đồ XRD của MXene-Ti₃C₂ do sự ăn mòn có chọn lọc của các lớp Al từ tiền chất MAX, các đỉnh đã có sự dịch chuyển các góc thấp hơn ($8,8^\circ$ và $18,2^\circ$). Sự dịch chuyển này dẫn tới khoảng cách d tăng lên (như được quan sát trong các ảnh SEM ở trên). Các sự gia tăng khoảng cách d là do sự mở rộng cấu trúc từ quá trình ăn mòn và sự thay thế đáng kể của Al bằng các nhóm kết thúc -F và -OH/=O. Hơn nữa, pic cực đại ở $2\theta=38,9^\circ$ gần như biến mất trong MXene-Ti₃C₂, xác nhận việc loại bỏ đáng kể các lớp Al khỏi Ti₃AlC₂. Đồng thời, một pic mới tại $27,7^\circ$ (008) được quan sát do sự hình thành của Ti₃C₂(OH)₂ [16]. Pic đặc trưng cho hợp chất AlF₃ tạo thành sau quá trình ăn mòn được ký hiệu bởi dấu (*) trên giản đồ. Kết quả này phù hợp với sự xuất hiện pic tương ứng cho nguyên tố F và O trong kết quả EDX ở trên.

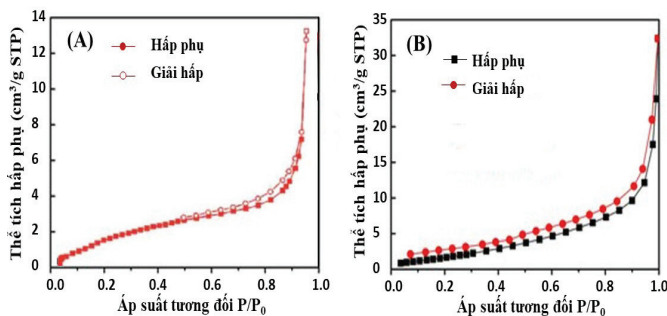


Hình 8. Giản đồ XRD của MAX-Ti₃AlC₂ và MXene-Ti₃C₂.

Phổ Raman của MAX-Ti₃AlC₂ (hình 9) quan sát thấy các đỉnh nằm ở khoảng số sóng 269, 423 và 613 cm⁻¹ đặc trưng cho dao động của các nguyên tử Ti và Al [17]. Pic ở số sóng 269 cm⁻¹ đặc trưng cho dao động của Al không được quan sát trên phổ của MXene-Ti₃C₂ do sự ăn mòn đáng kể của nguyên tử Al trong pha MAX. Ngoài ra, 2 đỉnh rộng khác được quan sát thấy trong khoảng 1000-1800 cm⁻¹ được gán cho dải D và G của carbon graphite. Cường độ hai dải này tăng trong mẫu MXene-Ti₃C₂ cho thấy các bề mặt đã tiếp xúc với nhiều carbon hơn, dự đoán về sự tăng cường đáng kể đặc tính truyền điện tích của lớp cacbua, thuận lợi cho việc cải thiện tính chất điện dung của vật liệu. Một pic với cường độ lớn ở số sóng khoảng 151 cm⁻¹ trên phổ của MXene-Ti₃C₂ có thể là do sự hình thành Ti₃C₂ bị oxy hóa [18].



Hình 9. Phổ Raman của MAX-Ti₃AlC₂ và MXene-Ti₃C₂.



Hình 10. Đường đẳng nhiệt hấp phụ N₂ của MAX-Ti₃AlC₂ (A) và 2D-MXene-Ti₃C₂ (B).

Bảng 1. Các thông số đặc trưng của MAX-Ti₃AlC₂ và 2D-MXene-Ti₃C₂.

Thông số	MAX-Ti ₃ AlC ₂	2D-MXene-Ti ₃ C ₂
Hình thái học bề mặt	Dạng hình tấm với cấu trúc có thể được phân lớp	Cấu trúc lớp
Hàm lượng Al (%m)	24,08	1,43
Thành phần pha	Ti ₃ AlC ₂	Ti ₃ C ₂ , AlF ₃ , Ti ₃ C ₂ (OH) ₂
Dao động đặc trưng	Ti, Al, carbon graphit	Ti, carbon graphit
Diện tích bề mặt riêng (m ² /g)	1,5981	9,3441
Thể tích vi mao quản (cm ³ /g)	0	0,000656
Tổng thể tích mao quản (cm ³ /g)	0,001094	0,00585
Độ rộng mao quản trung bình (nm)	2,3110	2,1954

Để minh chứng cho kết luận sự tách lớp trong cấu trúc của vật liệu MXene làm tăng diện tích bề mặt riêng của vật liệu so với tiền chất MAX, trong phần này phương pháp đẳng nhiệt hấp phụ N₂ theo phương pháp BET được sử dụng để xác định diện tích bề mặt riêng, kích thước lỗ xốp và thể tích lỗ xốp của vật liệu. Các thông số đặc trưng của vật liệu (diện tích bề mặt, tổng thể tích mao quản, đường kính mao quản) được trình bày trong hình 10 và bảng 1 cho thấy, diện tích bề mặt riêng của 2D-MXene-Ti₃C₂ tăng 5,8 lần so với vật liệu MAX (9,3441 và 1,5981 m²/g, tương ứng). Sự tăng diện tích bề mặt riêng theo BET được giải thích do quá trình ăn mòn trong dung dịch HF đã xảy ra ăn mòn có chọn lọc nguyên tố Al, làm cho cấu trúc vật liệu MXene có sự tách lớp, làm tăng độ xốp, tăng thể tích mao quản và vi mao quản của vật liệu.

4. Kết luận

Vật liệu 2D-MXene-Ti₃C₂ đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp ăn mòn chọn lọc từ tiền chất MAX-Ti₃AlC₂ trong dung dịch HF. Nghiên cứu này đã đưa ra được điều kiện thích hợp để tách lớp hiệu quả MXene-Ti₃C₂, sự ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian ăn

mòn đã được nghiên cứu. Bằng cách so sánh các tính chất của vật liệu tổng hợp được, chúng tôi đưa ra kết luận: nhiệt độ 35°C và thời gian 36 phút là tối ưu để thu được vật liệu MXene-Ti₃C₂ có sự tách lớp tốt.

LỜI CẢM ƠN

Nguyễn Thị Thơm được tài trợ bởi Chương trình Học bổng sau tiến sỹ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số: VINIF.2022.STS.44, đề tài cơ sở trẻ năm 2023 và được hỗ trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ (ĐTĐLCN.66/22). Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Naguib, V.N. Mochalin, M.W. Barsoum, et al. (2014), "MXene: A new family of two-dimensional materials", *Advanced Materials*, **26**(7), pp.992-1005, DOI: 10.1002/adma.201304138.
- [2] Z. Otgonbayar, S. Yang, I.J. Kim, et al. (2023), "Recent advances in two-dimensional MXene for supercapacitor applications: Progress, challenges, and perspectives", *Nanomaterials*, **13**(5), pp.919-958, DOI: 10.3390/nano13050919.
- [3] Y. Wang, Z. Niu, Y. Dai, et al. (2023), "Two-dimensional nanomaterial MXenes for efficient gas separation: A review", *Nanoscale*, **15**, pp.4170-4194, DOI: 10.1039/D2NR06625D.
- [4] J. Chen, W. Fu, F.L. Jiang, et al. (2023), "Recent advances in 2D metal carbides and nitrides (MXenes): Synthesis and biological application", *Journal of Materials Chemistry B*, **11**, pp.702-715, DOI: 10.1039/D2TB01503J.
- [5] A.A.P.R. Perera, K.A.U. Madhushani, B.T. Punchihewa, et al. (2023), "MXene-based nanomaterials for multifunctional applications", *Materials*, **16**(3), pp.1138-1162, DOI: 10.3390/ma16031138.
- [6] N. Goel, A. Kushwaha, M. Kuma (2022), "Two-dimensional MXenes: Recent emerging applications", *RSC Advances*, **12**(39), pp.25172-25193, DOI: 10.1039/D2RA04354H.
- [7] M. Naguib, O. Mashtalir, J. Carle, et al. (2012), "Two-dimensional transition metal carbides", *ACS Nano*, **6**(2), pp.1322-1331, DOI: 10.1021/nn204153h.
- [8] P. Eklund, J. Rosen, P.O. Å. Persson (2017), "Layered ternary M_{n+1}AX_n phases and their 2D derivative MXene: An overview from a thin-film perspective", *Journal Physics D: Applied Physics*, **50**(11), pp.113001-113015, DOI: 10.1088/1361-6463/aa57bc.
- [9] V.M.N. Hong, H. Huang, K. Zhou, et al. (2017), "Recent progress in layered transition metal carbides and/or nitrides (MXenes) and their composites: Synthesis and applications", *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, pp.3039-3068, DOI: 10.1039/C6TA06772G.
- [10] M. Khazaei, A. Ranjbar, K. Esfarjani, et al. (2018), "Insights into exfoliation possibility of MAX phases to MXenes", *Physical Chemistry Chemical Physics*, **20**, pp.8579-8592, DOI: 10.1039/C7CP08645H.
- [11] N.K. Chaudhari, H. Jin, B. Kim, et al. (2017), "MXene: An emerging two-dimensional material for future energy conversion and storage applications", *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, pp.24564-24579, DOI: 10.1039/C7TA09094C.
- [12] M. Alhabeb, K. Maleski, B. Anasori, et al. (2017), "Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide (Ti₃C₂T_x MXene)", *Chemistry of Materials*, **29**(18), pp.7633-7644, DOI: 10.1021/acs.chemmater.7b02847.
- [13] Y. Sun, H. Cheng, S. Gao, et al. (2012), "Freestanding tin disulfide single-layers realizing efficient visible-light water splitting", *Angewandte Chemie*, **51**(35), pp.8727-8731, DOI: 10.1002/ange.201204675.
- [14] J. Halim, M.R. Lukatskaya, K.M. Cook, et al. (2014), "Transparent conductive two-dimensional titanium carbide epitaxial thin films", *Chemical of Materials*, **26**(7), pp.2374-2381, DOI: 10.1021/cm500641a.
- [15] Q. Xue, H. Zhang, M. Zhu, et al. (2017), "Photoluminescent Ti₃C₂ MXene quantum dots for multicolor cellular imaging", *Advanced Materials*, **29**(15), pp.1604847-1604853, DOI: 10.1002/adma.201604847.
- [16] H. Wang, Y. Wu, J. Zhang, et al. (2015), "Enhancement of the electrical properties of MXene Ti₃C₂ nanosheets by post-treatments of alkalization and calcination", *Materials Letters*, **160**, pp.537-540, DOI: 10.1016/j.matlet.2015.08.046.
- [17] A. Sarycheva, Y. Gogotsi (2020), "Raman spectroscopy analysis of the structure and surface chemistry of Ti₃C₂T_x MXene", *Chemical of Materials*, **32**(8), pp.3480-3488, DOI: 10.1021/acs.chemmater.0c00359.
- [18] O. Kaipoldayev, Y. Mukhametkarimov, R. Nemkaeva, et al. (2017), "Studying of 2D titanium carbide structure by Raman spectroscopy after heat treatment in argon and hydrogen atmospheres", *Journal of Eurasian Chemistry Technology*, **19**(2), pp.197-200, DOI: 10.18321/ectj194.