

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG HẤP PHỤ ION Pb^{2+} TRONG NƯỚC BẰNG VẬT LIỆU $Ti_3C_2T_x$ - MXene

INVESTIGATION OF Pb^{2+} ION ADSORPTION FROM AQUEOUS SOLUTION USING $Ti_3C_2T_x$ - MXene

Cao Thị Hồng^{1,2}, Nguyễn Thị Thơm^{1,*}, Phạm Thị Năm¹,
Nguyễn Thái Dương³, Phạm Đình Phi⁴,
Phạm Thị Thu Giang⁴, Trần Đại Lâm¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huinh5804.2025.171>

TÓM TẮT

Ô nhiễm chì (Pb^{2+}) trong nước là một vấn đề nghiêm trọng, gây ảnh hưởng lớn đến sức khỏe con người và môi trường. Trong những năm gần đây, $Ti_3C_2T_x$ - MXene, một họ vật liệu hai chiều gồm cacbua và nitrua kim loại chuyển tiếp đã thu hút sự quan tâm nhờ khả năng biến đổi nhóm chức bề mặt linh hoạt và đặc tính ưa nước cao, giúp tăng hiệu quả hấp phụ kim loại nặng. Nghiên cứu này tập trung khảo sát khả năng hấp phụ ion Pb^{2+} trong nước của vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene. Các yếu tố ảnh hưởng như thời gian tiếp xúc, nồng độ ban đầu của Pb^{2+} , pH và khối lượng vật liệu hấp phụ đã được tối ưu hóa. Kết quả cho thấy quá trình hấp phụ tuân theo mô hình đẳng nhiệt Langmuir và động học giả bậc hai, cho thấy cơ chế hấp phụ chủ yếu là hóa lý. Vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene thể hiện khả năng xử lý tốt đối với ion Pb^{2+} với dung lượng hấp phụ cực đại tính toán được khoảng 189,75mg/g, cho thấy $Ti_3C_2T_x$ - MXene là vật liệu hấp phụ triển vọng, thân thiện môi trường trong xử lý nước nhiễm kim loại nặng.

Từ khóa: Vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene; hấp phụ, ion Pb^{2+} , xử lý nước.

ABSTRACT

Lead (Pb^{2+}) contamination in water is a serious issue that poses significant threats to human health and the environment. In recent years, $Ti_3C_2T_x$ - MXene, a family of two-dimensional materials composed of transition metal carbides and nitrides, has garnered considerable attention due to its tunable surface functional groups and high hydrophilicity, which enhance its efficiency in heavy metal adsorption. This study investigates the adsorption performance of $Ti_3C_2T_x$ - MXene for Pb^{2+} ions in aqueous solutions. Key influencing factors, including contact time, initial Pb^{2+} concentration, pH, and adsorbent dosage, were optimized. The results indicated that the adsorption process follows the Langmuir isotherm and pseudo-second-order kinetic models, suggesting a predominantly physico-chemical adsorption mechanism. $Ti_3C_2T_x$ - MXene demonstrated excellent Pb^{2+} removal capability, with a maximum adsorption capacity of approximately 189.75 mg/g, highlighting its potential as an environmentally friendly and efficient adsorbent for the treatment of heavy metal-contaminated water.

Keywords: $Ti_3C_2T_x$ - MXene material, adsorption, Pb^{2+} ions, water treatment.

¹Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

²Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

³Trường Đại học Sư phạm Hà Nội

⁴Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nguyenthomsp@gmail.com

Ngày nhận bài: 22/02/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/5/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2025

1. GIỚI THIỆU

Trong nhiều thập kỷ qua, ô nhiễm nguồn nước đã trở thành một thách thức toàn cầu nghiêm trọng [1]. Trong

số các tác nhân gây ô nhiễm, kim loại nặng - đặc biệt là chì (Pb^{2+}) - được xem là một trong những mối nguy hiểm đáng lo ngại nhất do độc tính cao và khả năng tích lũy

sinh học trong cơ thể sinh vật. Các ion kim loại nặng, điển hình như thủy ngân, có thể gây tổn thương gan, thận, làm mềm xương và dẫn đến các rối loạn thần kinh nghiêm trọng như phù phổi, suy tim và viêm cầu thận [2].

Nhiều phương pháp đã được nghiên cứu để xử lý nước thải chứa Pb^{2+} , bao gồm thẩm thấu ngược, kết tủa hóa học, trao đổi ion, đông tụ và hấp phụ [3]. Trong đó, phương pháp hấp phụ nổi bật nhờ tính đơn giản, hiệu quả và chi phí vận hành thấp. Gần đây, MXene - một họ vật liệu hai chiều với cấu trúc tương tự graphene - đã thu hút sự quan tâm mạnh mẽ nhờ các tính chất lý hóa đặc biệt. Các nghiên cứu gần đây cho thấy MXene là vật liệu hấp phụ đầy triển vọng trong việc loại bỏ ion Pb^{2+} trong nước, nhờ diện tích bề mặt lớn, khả năng trao đổi ion linh hoạt và khả năng tái sử dụng tốt [4, 5].

MXene là nhóm vật liệu có công thức tổng quát $M_{n+1}X_nT_x$, trong đó M là kim loại chuyển tiếp, X là nguyên tố carbon hoặc nitơ, và T_x đại diện cho các nhóm chức bề mặt như $-OH$, $-O$, và $-F$ [6]. Cấu trúc đặc biệt này không chỉ mang lại diện tích bề mặt lớn mà còn cung cấp khả năng tương tác mạnh với các ion kim loại nặng. MXene đã chứng minh hiệu quả trong việc loại bỏ thuốc nhuộm hữu cơ, kim loại nặng và các chất ô nhiễm độc hại khác khỏi môi trường nước [7]. Ngoài ra, tính tương thích sinh học, dễ dàng chức năng hóa, độ dẫn điện cao và tính ưa nước của MXene khiến nó trở thành vật liệu lý tưởng cho nhiều ứng dụng như xử lý môi trường, lưu trữ năng lượng, điện tử, cảm biến và xúc tác [8, 9].

Thông thường MXene được tổng hợp bằng cách ăn mòn chọn lọc "etching" từ tiền chất Ti_3AlC_2 -MAX trong dung dịch HF. Cùng với đó, một phương pháp thay thế cho việc sử dụng HF trực tiếp đã được phát triển, sử dụng muối florua (như LiF) kết hợp với axit mạnh (HCl). Phương pháp này tạo ra HF tại chỗ (HF *insitu*), để ăn mòn hóa học lớp nhôm trong cấu trúc Ti_3AlC_2 -MAX, qua đó thu được $Ti_3C_2T_x$ -MXene mà không cần tiếp xúc trực tiếp với HF độc hại [10].

Năm 2019, Yanjie Dong và cộng sự đã phát triển vật liệu composite MXene/alginate nhằm loại bỏ hiệu quả ion Pb^{2+} và Cu^{2+} từ dung dịch nước. Kết quả cho thấy vật liệu này đạt hiệu suất hấp phụ tương ứng là 382,7mg/g và 87,6mg/g chỉ sau 15 phút tiếp xúc [11]. Gần đây hơn, năm 2023, Umair Ali Asif cùng cộng sự đã phát triển hệ vật liệu composite giữa MXene và chitosan phủ trên bột polyurethane để xử lý ion Cr(VI) trong nước thải công nghiệp. Vật liệu tổng hợp này không chỉ thân thiện môi trường mà còn đạt hiệu suất hấp phụ Cr(VI) khoảng 70% trong 10 phút đầu và trên 60% sau 3 giờ với nồng độ ion 20ppm [12].

Có thể thấy hiệu suất hấp phụ của vật liệu chịu ảnh hưởng đáng kể bởi các yếu tố của quá trình hấp phụ bao gồm thời gian tiếp xúc, khối lượng chất hấp phụ, nhiệt độ, nồng độ ion kim loại nặng ban đầu và pH dung dịch. Trong nghiên cứu này, một quy trình đơn giản được đề xuất để tổng hợp vật liệu $Ti_3C_2T_x$ -MXene từ tiền chất Ti_3AlC_2 -MAX thông qua phương pháp khắc chọn lọc bằng dung dịch HF [13]. Vật liệu $Ti_3C_2T_x$ -MXene tổng hợp được sử dụng để hấp phụ ion Pb^{2+} trong nước.

2. THỰC NGHIỆM VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Hóa chất và dụng cụ

Hóa chất Ti_3AlC_2 -MAX (98%, kích thước < 200 μ m), axit hydrofluoric (HF, 48%), $Pb(NO_3)_2$ (99,0%), NaOH (40g/mol, $\geq$ 99%) và HCl (36%) là sản phẩm của hãng Sigma Aldrich. Các thiết bị bao gồm: Cân phân tích 5 số Mettler Toledo (Đức), máy khuấy từ gia nhiệt VELP (Ý), máy siêu âm S60H Elmasonic (Đức) và máy ly tâm Hermle Z366K (Đức).

2.2. Chuẩn bị vật liệu hấp phụ MXene- Ti_3C_2

Vật liệu $Ti_3C_2T_x$ -MXene được tổng hợp từ tiền chất Ti_3AlC_2 -MAX bằng phương pháp ăn mòn chọn lọc "etching" trong dung dịch HF [14]. Trên cơ sở lý thuyết, Ti_3AlC_2 -MAX sẽ phản ứng với axit HF sau đó tách Al ra khỏi tiền chất Ti_3AlC_2 để thu được $Ti_3C_2T_x$ -MXene. Cân chính xác 3,0g Ti_3AlC_2 và đổ từ từ vào bình Teflon có chứa 30mL HF (48%) sau đó đậy nắp bình. Hỗn hợp này được đun cách thủy trên máy khuấy từ gia nhiệt trong khoảng thời gian tối ưu là 36h với nhiệt độ 35°C và tốc độ khuấy 250 vòng/phút. Hỗn hợp sau đó được đưa đi ly tâm rửa bằng nước cất nhiều lần đến khi pH trung tính. Dung dịch sau đó được siêu âm 30 phút ở nhiệt độ phòng và ly tâm thêm 2 - 3 lần thu lấy chất rắn.

2.3. Khảo sát khả năng hấp phụ ion Pb^{2+} của vật liệu $Ti_3C_2T_x$ -MXene

Chuẩn bị dung dịch Pb^{2+} : Để pha được 500mL dung dịch Pb^{2+} nồng độ 50ppm, cân chính xác 0,03996g $Pb(NO_3)_2$ trên cân phân tích 5 số tiếp theo cho vào bình định mức, rót từ từ nước cất đồng thời khuấy dung dịch để $Pb(NO_3)_2$ tan hết, định mức dung dịch đến 500mL thu được dung dịch Pb^{2+} nồng độ 50ppm.

2.3.1. Khảo sát ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc

Thí nghiệm được thực hiện bằng cách cho 50 mg vật liệu $Ti_3C_2T_x$ -MXene vào 50mL dung dịch Pb^{2+} 30ppm ở $pH_0 = 5,9$. Dung dịch được khuấy ở tốc độ 450 vòng/phút với thời gian khác nhau (10, 20, 30, 45, 60, 80, 90, 100, 110 và 120 phút), sau đó lọc và đo nồng độ Pb^{2+} còn lại bằng phổ hấp thụ nguyên tử (AAS). Dữ liệu thu được dùng để

phân tích theo mô hình động học giả bậc nhất (pseudo-first-order) và giả bậc hai (pseudo-second-order).

2.3.2. Khảo sát ảnh hưởng của nồng độ ban đầu Pb^{2+}

Các dung dịch Pb^{2+} với nồng độ khác nhau: 5, 10, 20, 30, 40 và 50ppm được chuẩn bị. Thí nghiệm được tiến hành với 50mL dung dịch Pb^{2+} nồng độ khác nhau được tiếp xúc với 50 mg $Ti_3C_2T_x$ - MXene ở pH = 5,9 trong thời gian 90 phút ở tốc độ khuấy 450 vòng/phút. Dung lượng hấp phụ tại trạng thái cân bằng được tính toán để xây dựng mô hình đẳng nhiệt (Langmuir, Freundlich).

2.3.3. Khảo sát ảnh hưởng của pH dung dịch

Ảnh hưởng của pH được khảo sát trong khoảng từ 2 đến 10 bằng cách điều chỉnh pH dung dịch Pb^{2+} 30ppm bằng NaOH hoặc HCl 1M. Sau đó cho 50mg $Ti_3C_2T_x$ - MXene vào, khuấy ở tốc độ 450 vòng/phút trong thời gian 90 phút, lọc và phân tích nồng độ Pb^{2+} còn lại trong dung dịch.

2.3.4. Khảo sát ảnh hưởng của khối lượng $Ti_3C_2T_x$ - MXene

Thí nghiệm được tiến hành với khối lượng vật liệu thay đổi từ 20, 30, 40 và 50mg trong 50mL dung dịch Pb^{2+} 30ppm ở $pH_0 = 5,9$. Thời gian tiếp xúc giữ cố định 90 phút. Mục tiêu là xác định liều lượng $Ti_3C_2T_x$ - MXene tối ưu để đạt hiệu suất hấp phụ cao nhất.

2.4. Các phương pháp xử lý và phân tích số liệu

2.4.1. Xác định hiệu suất và dung lượng hấp phụ

Dựa vào đường chuẩn sự phụ thuộc của độ hấp thụ quang vào nồng độ ion ta xác định được nồng độ ion của Cd^{2+} trong dung dịch sau khi hấp phụ từ đó tính toán các thông số hiệu suất H (%) và dung lượng hấp phụ Q (mg/g) theo các công thức sau:

Hiệu suất hấp phụ:

$$H = \frac{(C_0 - C_i) \times 100}{C_0} (\%) \quad (1)$$

Dung lượng hấp phụ ion kim loại :

$$Q = \frac{(C_0 - C_i) \times V}{m} (mg/g) \quad (2)$$

Trong đó: H: Hiệu suất hấp phụ (%).

Q: Dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng (mg/g).

C_0 : Nồng độ ion kim loại ban đầu (mg/l).

C_i : Nồng độ ion kim loại tại thời điểm hấp phụ đạt cân bằng (mg/l).

V: Thể tích dung dịch ion kim loại (l).

m: Khối lượng $Ti_3C_2T_x$ - MXene (g).

2.4.2. Nghiên cứu động học phản ứng của quá trình hấp phụ Pb^{2+}

Để xác định động học hấp phụ của quá trình xử lý Pb^{2+} sử dụng vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene, các số liệu thực nghiệm khảo sát ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc (được thay đổi từ 5 đến 120 phút) được phân tích sử dụng 2 mô hình động học: động học giả bậc 1 theo Lagergren và; động học giả bậc 2 theo McKay - Ho. Phương trình tuyến tính của 2 mô hình tương ứng là (3) và (4).

+ Mô hình động học giả bậc 1:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3)$$

+ Mô hình động học giả bậc 2: áp dụng số liệu thực nghiệm của sự biến đổi dung lượng hấp phụ theo thời gian của quá trình hấp phụ Cd^{2+} .

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 \cdot q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

Trong đó, t: thời gian diễn ra phản ứng (phút)

q_t : dung lượng hấp phụ tại thời điểm t (mg/g)

q_e : dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng (mg/g)

K_1 : hằng số hấp phụ giả bậc 1 (phút⁻¹)

K_2 : hằng số cân bằng (g/mg.phút)

2.4.3. Nghiên cứu mô hình hấp phụ đẳng nhiệt

+ Phương trình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir

Đối với sự hấp phụ chất tan trong dung dịch trên bề mặt chất hấp phụ rắn phương trình Langmuir được viết dưới dạng:

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (5)$$

Trong đó: q_e : dung lượng hấp phụ của chất bị hấp phụ; q_m : lượng chất bị hấp phụ cực đại đơn lớp trên một đơn vị khối lượng chất bị hấp phụ; K_L : hằng số hấp phụ Langmuir (phụ thuộc vào bản chất hệ hấp phụ và nhiệt độ); C_e : nồng độ cân bằng của dung dịch.

+ Phương trình đẳng nhiệt hấp phụ Freundlich

Phương trình đẳng nhiệt hấp phụ Freundlich là một phương trình kinh nghiệm áp dụng cho sự hấp phụ trên bề mặt không đồng nhất. Ở dạng tuyến tính phương trình này có dạng:

$$\ln q_e = \ln K_F + 1/n \ln C_e \quad (6)$$

Trong đó: C_e : nồng độ cân bằng của dung dịch.

q_e : Dung lượng cân bằng hấp phụ.

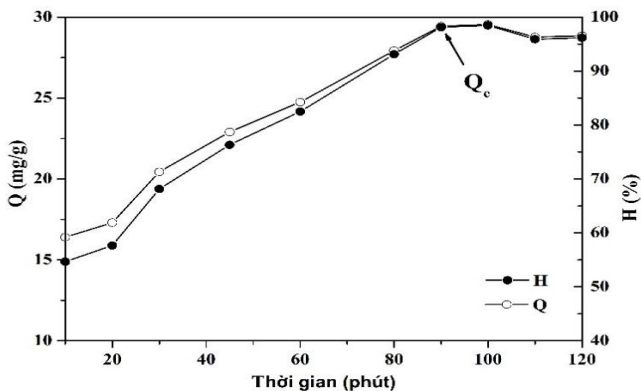
K_F : hằng số Freundlich đặc trưng cho dung lượng và cường độ hấp phụ.

n: hằng số thực nghiệm.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc

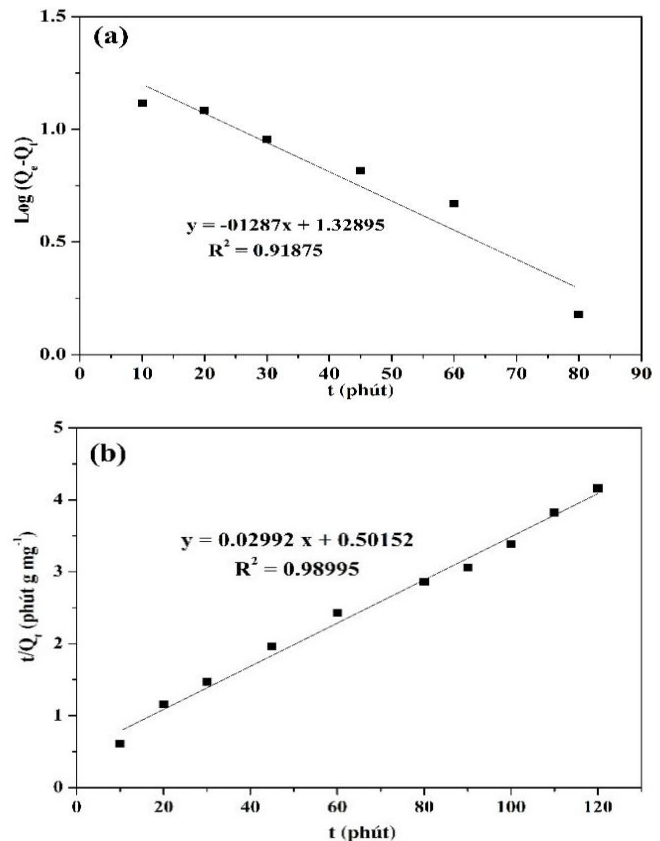
Hình 1 biểu diễn sự thay đổi của hiệu suất hấp phụ (H , %) và dung lượng hấp phụ (Q , mg/g) theo thời gian tiếp xúc trong quá trình hấp phụ ion Pb^{2+} sử dụng vật liệu Ti_3C_2Tx -MXene. Trong khoảng 0 - 100 phút, cả hai đại lượng H và Q đều tăng nhanh theo thời gian. Cụ thể, Q tăng từ khoảng 15mg/g lên đến gần 29mg/g, trong khi H tăng từ khoảng 50% lên đến gần 98%. Điều này chứng tỏ các vị trí hoạt hóa trên bề mặt Ti_3C_2Tx - MXene còn trống nhiều và tốc độ khuếch tán ban đầu cao. Sau 100 phút, cả H và Q gần như đạt trạng thái cân bằng, không tăng đáng kể trong khoảng 100 - 120 phút. Đây chính là thời điểm đạt trạng thái hấp phụ cân bằng (q_e), với dung lượng hấp phụ cực đại (Q_e) $\approx$ 29mg/g và hiệu suất hấp phụ $H \approx$ 99%. Xu hướng tiệm cận đường nằm ngang sau 100 phút cho thấy rằng hầu hết ion Pb^{2+} trong dung dịch đã bị loại bỏ, và các vị trí hấp phụ trên vật liệu gần như đã được lấp đầy. Thời gian cân bằng hấp phụ là khoảng 90 phút, được chọn làm thời gian tiếp xúc tối ưu cho các khảo sát tiếp theo. Cơ chế hấp phụ ban đầu nhanh, sau đó chậm dần về cân bằng, phù hợp với đặc điểm động học giả bậc hai, thường gặp trong quá trình hấp phụ hóa lý (chemisorption).



Hình 1. Sự phụ thuộc của dung lượng và hiệu suất hấp phụ vào thời gian tiếp xúc của quá trình loại bỏ Pb^{2+} sử dụng vật liệu Ti_3C_2Tx - MXene

Từ các số liệu thu được chúng tôi tính toán để xây dựng và phân tích mô hình động học hấp phụ Pb^{2+} của Ti_3C_2Tx - MXene theo hai mô hình động học giả bậc nhất và động học giả bậc hai. Từ hình 2a giá trị $R^2 = 0,91875$ cho thấy sự phù hợp tương đối giữa dữ liệu thực nghiệm và mô hình giả bậc nhất. Tuy nhiên, độ lệch đáng kể so với đường tuyến tính ở các thời điểm sau ($t > 50$ phút) cho thấy mô hình này không mô tả tốt quá trình hấp phụ tại giai đoạn cuối - tức là khi gần đạt trạng thái cân bằng. Điều này gợi ý rằng quá trình hấp phụ có thể không đơn thuần là quá trình khuếch tán vật lý bề mặt. Biểu đồ hình

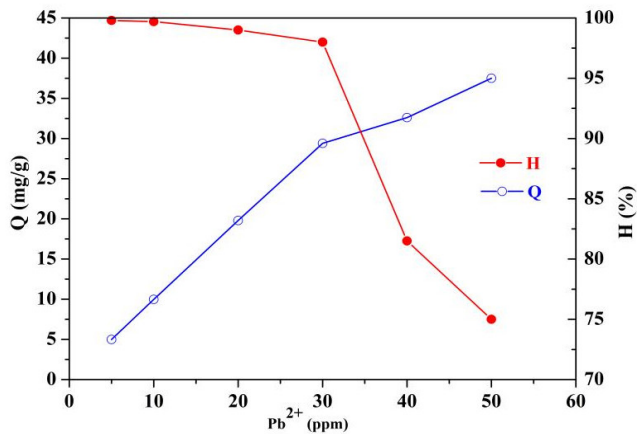
2b thể hiện mối quan hệ giữa t/Q_t và thời gian t có thể thấy giá trị R^2 rất cao 0,98995 (gần tiệm cận 1), cho thấy mô hình động học giả bậc hai phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm. Điều này phản ánh rằng quá trình hấp phụ Pb^{2+} lên vật liệu Ti_3C_2Tx chịu chi phối chủ yếu bởi cơ chế hấp phụ hóa - lý, trong đó xảy ra tương tác điện tích, liên kết bề mặt hoặc trao đổi ion giữa Pb^{2+} và nhóm chức bề mặt Ti_3C_2Tx - MXene.



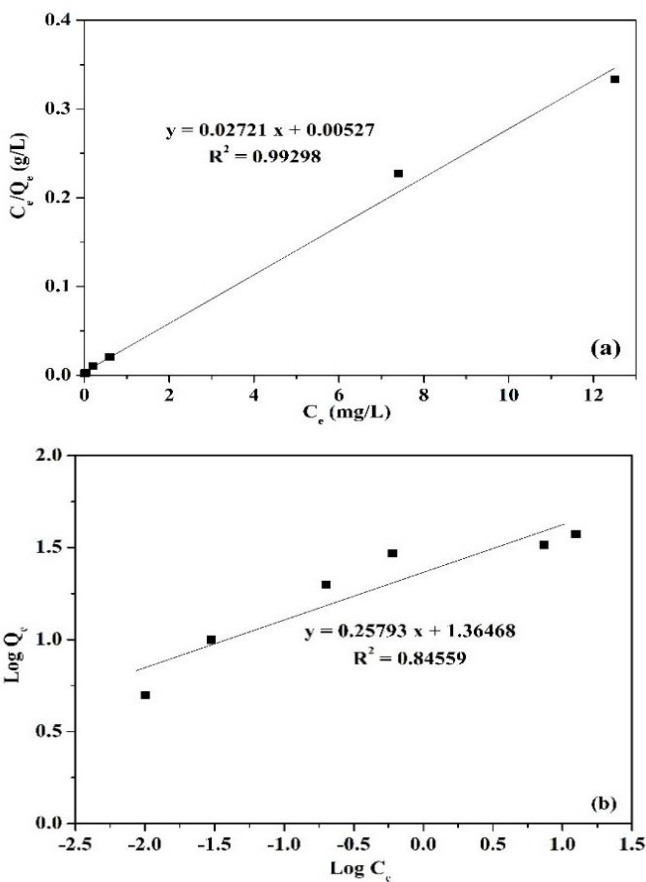
Hình 2. Mô hình động học của quá trình loại bỏ Pb^{2+} sử dụng bột Ti_3C_2Tx - MXene: (a) Động học giả bậc 1 Lagergren; (b) Động học giả bậc 2 McKay and Ho

3.2. Kết quả ảnh hưởng của nồng độ Pb^{2+}

Biểu đồ thể hiện sự thay đổi của hiệu suất hấp phụ Pb^{2+} (H , %) và dung lượng hấp phụ (Q , mg/g) theo thời gian, khi sử dụng 0,05 g Ti_3C_2Tx - MXene để xử lý dung dịch Pb^{2+} . Dựa trên kết quả hình 3 cho thấy hiệu suất hấp phụ Pb^{2+} (H) tăng dần và đạt giá trị cực đại khoảng 98 - 99% khi nồng độ Pb^{2+} trong khoảng 10 - 30ppm, sau đó giảm về khoảng 75% ở nồng độ Pb^{2+} 50ppm. Sự suy giảm này có thể do số lượng vị trí hấp phụ trên Ti_3C_2Tx - MXene bị bão hòa khi nồng độ ion Pb^{2+} lớn, dẫn đến hiện tượng cạnh tranh giữa các ion Pb^{2+} và khả năng hấp phụ ngược. Dung lượng hấp phụ Q (mg/g) tăng liên tục, đạt cực đại khoảng 37,5mg/g, cho thấy mặc dù hiệu suất suy giảm ở nồng độ cao nhưng tổng lượng Pb^{2+} được giữ lại trên mỗi gam vật liệu vẫn cao.



Hình 3. Sự phụ thuộc của dung lượng và hiệu suất hấp phụ vào nồng độ Pb^{2+} sử dụng vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene



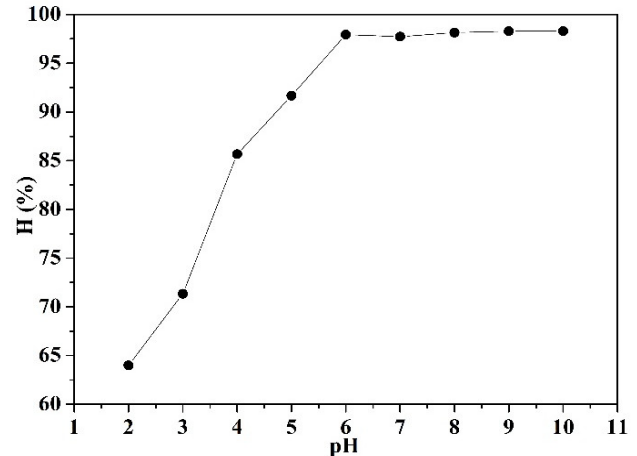
Hình 4. Đường đẳng nhiệt hấp phụ theo mô hình đẳng nhiệt Langmuir (a) và Freundlich (b) sử dụng vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene

Các số liệu được phân tích dựa theo hai mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir và Freundlich (hình 4). Từ hệ số tương quan R^2 cho thấy phương trình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir ($R^2 = 0,99298$, rất gần 1) phù hợp rất tốt với dữ liệu thực nghiệm của quá trình hấp phụ Pb^{2+} , tốt hơn phương trình đẳng nhiệt Freundlich. Điều đó có thể nói quá trình hấp phụ Pb^{2+} lên bề mặt vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene là đơn lớp. Giá trị dung lượng hấp phụ cực đại tính toán

được từ mô hình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir là khoảng 189,75mg/g. Kết quả này cho thấy vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene có dung lượng hấp phụ cực đại rất cao đối với Pb^{2+} , chứng tỏ tiềm năng ứng dụng của vật liệu trong thực tế.

3.3. Kết quả ảnh hưởng của pH dung dịch

Hình 3.5 biểu diễn sự biến đổi hiệu suất xử lý Pb^{2+} của 0,05g vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene để xử lý 50mL dung dịch Pb^{2+} 30ppm ở nhiệt độ 20°C trong thời gian 90 phút với pH thay đổi từ 2 đến 10. Kết quả cho thấy pH dung dịch tăng, hiệu suất xử lý Pb^{2+} tăng tương ứng. Ở pH thấp (pH < 4), hiệu quả hấp phụ ion Pb^{2+} thấp, khoảng 65 - 70%. Kết quả này có thể được giải thích là ở pH thấp, do sự cạnh tranh giữa ion H^+ với ion Pb^{2+} tại các vị trí liên kết trên bề mặt chất hấp phụ, làm giảm khả năng hấp phụ Pb^{2+} lên bề mặt vật liệu. Như vậy ở môi trường axit mạnh, khả năng hấp phụ của $Ti_3C_2T_x$ - MXene là không hiệu quả. Trong khoảng giá trị pH từ $pH_0 = 5,9$ đến khoảng pH = 7, hiệu suất xử lý đạt khoảng 98%. Khi điều chỉnh pH dung dịch trong khoảng 8 - 10 chúng tôi quan sát thấy đã có sự kết tủa hydroxit của chì vì vậy các số liệu đo AAS nồng độ ion Pb^{2+} sau quá trình hấp phụ trong khoảng 8 - 10 mang tính chất tham khảo. Do đó, $pH_0 = 5,9$ được lựa chọn để khảo sát ảnh hưởng của khối lượng chất hấp phụ $Ti_3C_2T_x$ - MXene.

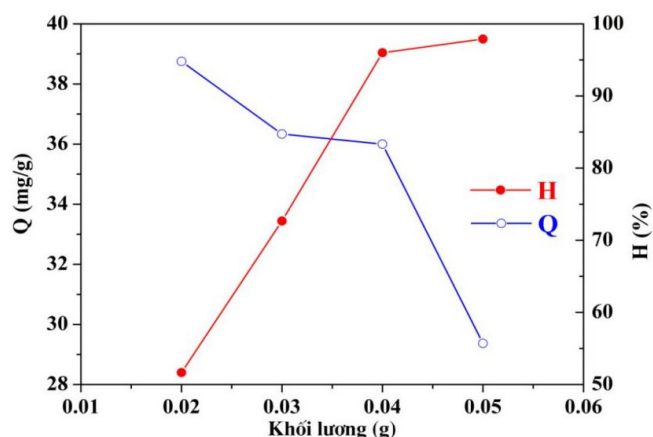


Hình 5. Sự biến đổi của hiệu suất xử lý Pb^{2+} theo pH của vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene

3.4. Kết quả ảnh hưởng của khối lượng chất hấp phụ

Ảnh hưởng của khối lượng vật liệu $Ti_3C_2T_x$ - MXene thay đổi từ 0,02 đến 0,05g ở $pH_0 = 5,9$ đến hiệu suất xử lý Pb^{2+} 30ppm được thể hiện trên hình 6. Kết quả cho thấy khối lượng chất hấp phụ tăng từ 0,02g lên 0,05g, hiệu suất xử lý tăng nhanh từ 60% đến 98%. Điều này hợp lý vì càng nhiều chất hấp phụ, càng có nhiều bề mặt tiếp xúc, nên nhiều ion Pb^{2+} được giữ lại khỏi dung dịch. Ngược lại, Q giảm dần khi khối lượng tăng, từ ~39mg/g (ở 0,02g)

xuống còn ~28mg/g (ở 0,05g). Từ kết quả này có thể thấy khi tăng lượng chất hấp phụ, tổng lượng ion bị hấp phụ có thể tăng, nhưng phân bố Pb^{2+} trên mỗi gam chất hấp phụ giảm do bề mặt không được sử dụng hết. Do đó khối lượng 0,04g Ti_3C_2Tx - MXene là lượng chất hấp phụ thích hợp được lựa chọn trong nghiên cứu này. Kết quả này cũng tương đồng so với các kết quả nghiên cứu đã được công bố [15].



Hình 6. Sự biến đổi dung lượng và hiệu suất hấp phụ theo khối lượng Ti_3C_2Tx - MXene

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của vật liệu Ti_3C_2Tx - MXene trong việc hấp phụ ion Pb^{2+} từ dung dịch nước. Kết quả cho thấy khả năng loại bỏ Pb^{2+} phụ thuộc mạnh vào các điều kiện hấp phụ như thời gian tiếp xúc, pH dung dịch, nồng độ ban đầu của Pb^{2+} và khối lượng chất hấp phụ. Hiệu suất hấp phụ đạt tối ưu tại thời gian tiếp xúc khoảng 90 phút ở $pH_0 = 5,9$, cho thấy điều kiện trung tính - axit yếu là thích hợp nhất cho cơ chế tương tác giữa Ti_3C_2Tx - MXene và Pb^{2+} . Nồng độ Pb^{2+} ban đầu càng cao thì lượng hấp phụ riêng (Q) càng lớn, nhưng hiệu suất hấp phụ (H%) có xu hướng giảm nhẹ do bão hòa các vị trí hấp phụ. Ngoài ra, khi tăng khối lượng Ti_3C_2Tx - MXene từ 0,02g đến 0,05g, hiệu suất hấp phụ Pb^{2+} tăng từ khoảng 60% lên 98%. Vật liệu Ti_3C_2Tx - MXene đạt dung lượng hấp phụ cực đại tính toán được khoảng 189,75mg/g.

Nhìn chung, Ti_3C_2Tx - MXene thể hiện hiệu suất hấp phụ Pb^{2+} cao, sự hấp phụ diễn ra nhanh, với khả năng thích ứng linh hoạt trong các điều kiện xử lý nước khác nhau. Kết quả này cho thấy Ti_3C_2Tx - MXene là vật liệu hấp phụ tiềm năng, hứa hẹn ứng dụng trong công nghệ xử lý nước nhiễm kim loại nặng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ (ĐTĐLCN.66/22).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Yihan Wu, Hongwei Pang, Yue Liu, Xiangxue Wang, Shujun Yu, Dong Fu, Jianrong Chen, Xiangke Wang, "Environmental remediation of heavy metal ions by novel-nanomaterials: A review," *Environ Pollut*, 246, 608-620, 2019.
- [2]. Xubiao Luo, Tingting Shen, Lin Ding, Weiping Zhong, Jianfeng Luo, Shenlian Luo, "Novel thymine-functionnalized MIL-101 prepared by post-synthesis and enhanced emoval of Hg^{2+} from water," *Journal os Hazardous Materials*, 306(5), 313-322, 2016.
- [3]. Shoufang Xu, Lingxin Chen, Jinhua Li, Yafeng Guan, Hongzhi Lu, "Novel Hg^{2+} -imprinted polymers based on thymine- Hg^{2+} - thymine interaction for highly selective preconcentration of Hg^{2+} in water samples," *Journal os Hazardous Materials*, 237-238 (30), 347-354, 2012.
- [4]. Wang S., Liu Y., Lu Q. F., Zhuang H., "Facile preparation of biosurfactant-functionalized Ti_2CT_x MXene nanosheets with an enhanced adsorption performance for Pb (II) ions," *Journal of Molecular Liquids*, 297, 111810, 2020.
- [5]. Shahzad A., Rasool K., Miran W., Nawaz M., Jang J., Mahmoud K. A., Lee D. S., "Two-dimensional Ti_3C_2Tx MXene nanosheets for efficient copper removal from water," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5 (12), 11481 - 11488, 2017.
- [6]. Michael Naguib, Murat Kurtoglu, Volker Presser, Jun Lu, Junjie Niu, Min Heon, Lars Hultman, Yury Gogotsi, Michel W. Barsoum, "Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of $Ti_3 AlC_2$," *Advanced Materials*, 23(37), 4248-4253, 2011.
- [7]. Yang J., Wu J. X., Lu Q. F., Lin T. T., "Facile preparation of lignosulfonate-graphene oxide-polyaniline ternary nanocomposite as an effective adsorbent for Pb (II) ions," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(5), 1203 - 1211, 2014.
- [8]. Ning-Ning Wang, Hao Wang, Yu-Ying Wang, You-Hao Wei, Jing-Yu Si, Anthony Chun Yin Yuen, Jin-Song Xie, Bin Yu, San-E Zhu, Hong-Dian Lu, Wei Yang, Qing Nian Chan, Guan-Heng Yeoh, "Robust, lightweight, hydrophobic, and fire-retarded polyimide/MXene aerogels for effective oil/water separation," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(43), 40512-40523, 2019.
- [9]. C.J. Zhang, V. Nicolosi, "Graphene and MXene-based transparent conductive electrodes and supercapacitors," *Energy Storage Materials*, 16, 102-125, 2019.
- [10]. Peng Q., Guo J., Zhang Q., Xiang J., Liu B., Zhou A., Tian Y., "Unique lead adsorption behavior of activated hydroxyl group in two-dimensional titanium carbide," *Journal of the American Chemical Society*, 136 (11), 4113 - 4116, 2014.
- [11]. Mishra S., Verma N., "Surface ion imprinting-mediated carbon nanofiber-grafted highly porous polymeric beads: Synthesis and application towards selective removal of aqueous Pb (II)," *Chemical Engineering Journal*, 313, 1142 - 1151, 2017.
- [12]. Yanjie Dong, Dashen Sang, Chengdong He, Xinfeng Sheng, Longwen Lei, "MXene/alginate composites for lead and copper ion removal from aqueous solutions," *RSC Adv*, 9, 29015, 2019,

[13]. Umair Ali Asif, Khalid Mahmood, Salman Raza Naqvi, Muhammad Taqi Mehran, Tayyaba Noor, "Development of high-capacity surface-engineered MXene composite for heavy metal Cr (VI) removal from industrial wastewater," *Chemosphere*, 326, 138448, 2023.

[14]. Cao Thị Hồng, Nguyễn Thị Thơm, Phạm Thị Năm, Nguyễn Thu Phương, Vũ Thị Thu, Đinh Thị Mai Thanh, Ngô Văn Hoàn, Trần Đại Lâm, "Ảnh hưởng của nồng độ HF và thời gian siêu âm đến tính chất của vật liệu 2D-MXene-Ti₃C₂ tổng hợp bằng phương pháp hóa học ướt," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 67(2)2, 35-39, 2025.

[15]. Abhishek Kagalkar, Swapnil Dharaskar, Nitin Chaudhari, "Development of MXene for removal of lead (Pb²⁺) ions from wastewater," *Water Practice & Technology*, 19(3), 911-936, 2024.

AUTHORS INFORMATION

**Cao Thi Hong^{1,2}, Nguyen Thi Thom¹, Pham Thi Nam¹,
Nguyen Thai Duong³, Pham Dinh Phi⁴, Pham Thi Thu Giang⁴,
Tran Dai Lam¹**

¹Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam

²Graduate University of Sciences and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam

³Hanoi National University of Education, Vietnam

⁴Hanoi University of Industry, Vietnam