

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG HẤP PHỤ Cd^{2+} TRONG MÔI TRƯỜNG NƯỚC CỦA VERMICULITE GIÃN NỖ

STUDY ON Cd^{2+} ADSORPTION ON THE EXPANDED VERMICULITE

Nguyễn Mạnh Hà¹, Nguyễn Duy Đạt¹, Đào Thu Hà¹,
Nguyễn Thị Thu Phương¹, Nguyễn Thị Thoa¹, Trần Quang Hải¹,
Phạm Thị Mai Hương¹, Nguyễn Văn Huy²,
Hà Huy Hưng³, Vũ Ngọc Doãn³, Trần Văn Chính^{4,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huivh5804.2025.294>

TÓM TẮT

Chất hấp phụ vermiculite giãn nở được chế tạo từ nguyên liệu vermiculite thô thông qua hai bước: xử lý bởi H_2O_2 30% ở 60°C trong 1 giờ và sấy vi sóng 5 lần, mỗi lần 60 giây (60s/5 lần). Vermiculite giãn nở có nhiều lớp xếp chồng và xen kẽ nhau có diện tích bề mặt riêng tăng lên 36,970 m^2/g so với 5,943 m^2/g của vermiculite thô ban đầu. Một số tính chất khác của chất hấp phụ cũng được đánh giá bằng các phương pháp như TGA-DTG, XRD, BET. Ảnh hưởng của nồng độ Cd^{2+} ban đầu, thời gian đến khả năng hấp phụ của vermiculite giãn nở đã được nghiên cứu. Quá trình hấp phụ tuân theo mô hình động học bậc 2 và mô hình đẳng nhiệt Langmuir với dung lượng hấp phụ Cd^{2+} cực đại là 37,313 mg/g . Vermiculite giãn nở có thể được coi là chất hấp phụ hiệu quả và tiềm năng ứng dụng trong thực tế để xử lý các chất ô nhiễm với chi phí thấp.

Từ khóa: Hấp phụ, vermiculite giãn nở, kim loại nặng, môi trường nước.

ABSTRACT

Expanded vermiculite adsorbent was prepared through two steps: treatment with 30% H_2O_2 at 60°C for 1 hour and microwave drying for 60 seconds/5 times. Expanded vermiculite has many stacked and interlaced layers with a specific surface area increased to 36.970 m^2/g compared to 5.943 m^2/g of the original raw vermiculite. Some other properties of the adsorbent were also evaluated by methods such as TGA-DTG, XRD, and BET. The effects of initial Cd^{2+} concentration and time on the adsorption capacity of expanded vermiculite were studied. The adsorption process followed the second-order kinetic model and Langmuir isotherm model with a maximum Cd^{2+} adsorption capacity of 37.313 mg/g . Expanded vermiculite can be considered an effective adsorbent and has potential for practical application in the treatment of pollutants at low cost.

Keywords: Adsorption, expanded vermiculite, heavy metal, aqueous media.

¹Khoa Công nghệ Hóa, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trường Hóa và Khoa học sự sống, Đại học Bách khoa Hà Nội

³Khoa Hóa lý - Kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự

⁴Viện Hóa học - Vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

*Email: chinhpkq@gmail.com

Ngày nhận bài: 10/01/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 26/3/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

1. GIỚI THIỆU

Cadmium là một kim loại nặng xâm nhập vào môi trường nước thông qua các hoạt động sản xuất công nghiệp như mạ kim loại, pin Cd-Ni, thuốc trừ sâu, phân

bón, luyện kim, nhựa, chất tạo màu,... [1]. Ion Cd^{2+} được coi là chất gây ung thư và ức chế hoạt động của gan, thận và phổi, ngoài ra nó cũng gây ra sự thoái hóa xương, huyết áp cao, phá hủy hồng cầu,... Tổ chức Y tế Thế giới

khuyến cáo rằng, nồng độ Cd^{2+} tối đa trong nước uống chỉ là 0,003mg/L và trong nước thải là 2mg/L [2]. Do đó cần phải có phương pháp loại bỏ Cd^{2+} ra khỏi nguồn nước trước khi thải ra môi trường.

Nhiều phương pháp vật lý và hóa học khác nhau đã được sử dụng để loại bỏ và thu hồi kim loại nặng từ dung dịch nước bị ô nhiễm như điện phân, siêu lọc, công nghệ màng và thẩm thấu ngược,... Trong số đó, hấp phụ là giải pháp thay thế hứa hẹn nhất và hiệu quả vì nó tiết kiệm chi phí, dễ vận hành và giảm thiểu chất thải thứ cấp [3].

Vermiculite là một khoáng silicate thuộc loại mica có cấu trúc lớp 2:1 (2 tấm silica tứ diện, 1 tấm alumina bát diện), có trữ lượng dồi dào và giá thành rẻ hơn so với một số loại khoáng sét khác như montmorillonite, hectorite và saponite [4]. Vermiculite có khả năng trao đổi ion cao, bề mặt mang điện tích âm, trơ về mặt hóa học, dạng giãn nở có diện tích bề mặt riêng lớn, có lợi cho quá trình hấp phụ kim loại nặng [4, 5]. Nhiều báo cáo đã sử dụng vermiculite làm chất hấp phụ xử lý các thành phần ô nhiễm như: Pb^{2+} [6]; Cr(VI) , Cd^{2+} [7-10]; As(V) [11]; Hg(II) [12]; Cu^{2+} , Ni^{2+} [13]. Theo như tổng quan tài liệu, vermiculite giãn nở và vermiculite biến tính là chất hấp phụ hiệu quả để loại bỏ các ion kim loại nặng. Tuy nhiên, tại Việt Nam việc nghiên cứu hấp phụ ion Cd^{2+} bởi vermiculite vẫn chưa được thực hiện, chỉ một vài công bố về vermiculite giãn nở hấp phụ As(V) [14], một số dung môi hữu cơ [15] và Hg^{2+} [16].

Trong nghiên cứu này, trình bày khả năng hấp phụ Cd^{2+} trong môi trường nước bởi vermiculite giãn nở từ khoáng vermiculite tự nhiên. Các đặc tính của vermiculite giãn nở cũng như nghiên cứu đẳng nhiệt và động học của quá trình hấp phụ được thể hiện chi tiết dưới đây.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Hóa chất

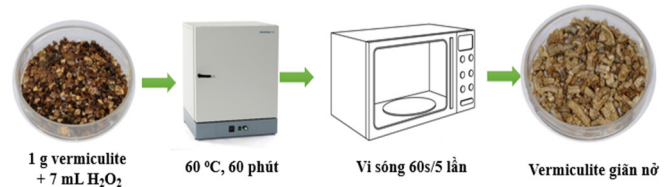
Khoáng vermiculite có kích thước khoảng 3 - 5mm (Trung Quốc), H_2O_2 (30%, Xilong-Trung Quốc), $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (99%, Kermel-Trung Quốc).

Dung dịch Cd^{2+} gốc có nồng độ 500mg/L được chuẩn bị như sau: hòa tan 1,375g $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ trong 500mL nước cất thu được 500mL dung dịch Cd^{2+} 1000mg/L để sử dụng cho các thí nghiệm hấp phụ.

2.2. Chế tạo vermiculite giãn nở

Cho 1g vermiculite cho vào đĩa petri (d = 120mm) có chứa 7mL H_2O_2 . Sau đó đĩa petri có nắp đậy được giữ trong tủ sấy ở 60°C trong 60 phút. Tiếp theo, đĩa petri được chuyển vào lò vi sóng (Sharp R-21A1SVN, 800W, Nhật Bản) để gia nhiệt bởi bức xạ vi sóng trong 60 giây, sau đó mẫu được lấy ra môi trường không khí để làm mát

và cho bay hơi dung dịch. Chu trình làm nóng-mát này được thực hiện lặp lại 5 lần cho đến khi dung dịch gần như bay hơi hoàn toàn [15]. Cuối cùng vermiculite giãn nở được sấy ở 120°C trong 1h và bảo quản trong bình hút ẩm để sử dụng trong các thí nghiệm.



Hình 1. Sơ đồ mô tả quá trình chế tạo vermiculite giãn nở

2.3. Nghiên cứu khả năng hấp phụ Cd^{2+} của vermiculite giãn nở

Từng thí nghiệm hấp phụ được thực hiện như sau: cho 0,1g vermiculite giãn nở vào các bình tam giác 250mL chứa 50mL dung dịch Cd^{2+} . Các bình tam giác được đặt trên máy lắc với tốc độ 100 vòng/phút. Sau đó, dung dịch được tách khỏi chất hấp phụ bằng lọc hút chân không và xác định nồng độ Cd^{2+} sau hấp phụ bằng phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử AAS trên thiết bị Shimadzu - AA7000. Đẳng nhiệt hấp phụ được thực hiện ở nồng độ Cd^{2+} ban đầu từ 5mg/L đến 80mg/L trong 180 phút và động học hấp phụ được thực hiện với nồng độ Cd^{2+} ban đầu là 20mg/L trong thời gian từ 10 phút đến 180 phút.

Dung lượng hấp phụ cân bằng của vermiculite giãn nở được xác định theo công thức:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Hiệu suất hấp phụ vermiculite giãn nở được tính theo công thức:

$$H\% = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \cdot 100\% \quad (2)$$

Trong đó:

- C_o và C_e (mg/L) lần lượt là nồng độ dung dịch Cd^{2+} ban đầu và cân bằng.

- V (L) là thể tích dung dịch Cd^{2+} và m (g) là khối lượng chất hấp phụ.

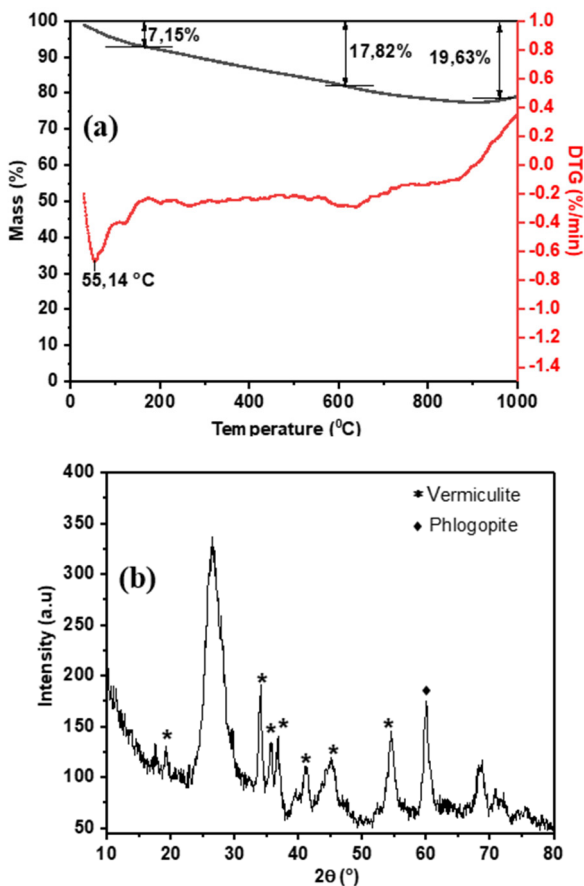
2.4. Đặc tính của vật liệu

Thành phần pha được phân tích bằng phương pháp nhiễu xạ tia X trên thiết bị D8-Advance (Bruker). Hình thái và thành phần các nguyên tố được phân tích trên thiết bị Hitachi S-4600. Diện tích bề mặt riêng được đo trên thiết bị NOVA touch 2LX/Quantachrome.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc tính của vermiculite giãn nở

Giải đồ phân tích nhiệt trọng lượng (TGA) và vi phân (DTG) của vermiculite giãn nở thể hiện ở hình 2a thấy rằng, trong khoảng nhiệt độ từ 40 - 1000°C tổng độ mất khối lượng là 19,63% được phân bố ở 3 vùng. Vùng thứ nhất ở khoảng 40 - 200°C với độ hụt 7,15%, đồng thời xuất hiện peak thu nhiệt ở 55,14°C do sự bay hơi nước hấp phụ trên bề mặt của vermiculite giãn nở. Vùng thứ hai diễn ra ở khoảng 200 - 650°C với độ hụt thêm khoảng 10,67% do sự thoát các phân tử nước tiếp xúc với các cation trong các lớp xen kẽ của vermiculite [17]. Cuối cùng là vùng giữa 650 - 1000°C ghi nhận độ hụt 1,81% liên quan đến sự khử hydroxyl để hình thành pha tinh thể mới enstatite [17, 18].

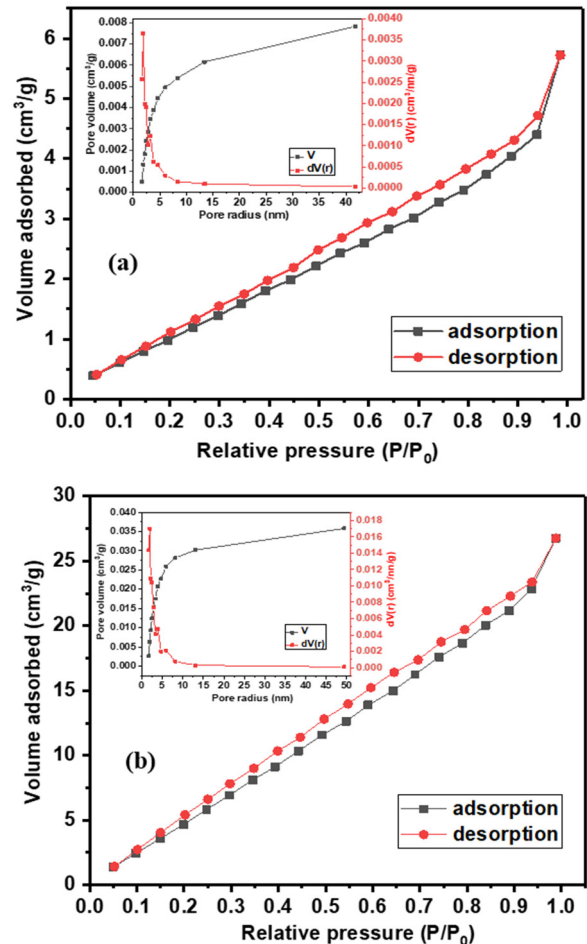


Hình 2. Giải đồ TGA-DTG (a) và giải đồ XRD (b) của vermiculite giãn nở

Thành phần pha của vermiculite giãn nở phân tích bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD), kết quả thể hiện ở hình 2b. Trên giải đồ XRD chủ yếu xuất hiện các peak của pha vermiculite (ký hiệu dấu *) tại các vị trí $2\theta = 19,23^\circ; 34,11^\circ; 35,80^\circ; 36,82^\circ; 41,22^\circ; 45,12^\circ$ và $54,55^\circ$ (theo COD 901-6797). Ngoài ra còn xuất hiện peak tại $2\theta = 60,06^\circ$ (ký hiệu ♦) là pha của phlogopite (theo COD

901-6905) thuộc họ mica phyllosilicate với công thức $\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ [19]. Như vậy, các kết quả trên ghi nhận sự ổn định về cấu trúc của vermiculite sau quá trình giãn nở.

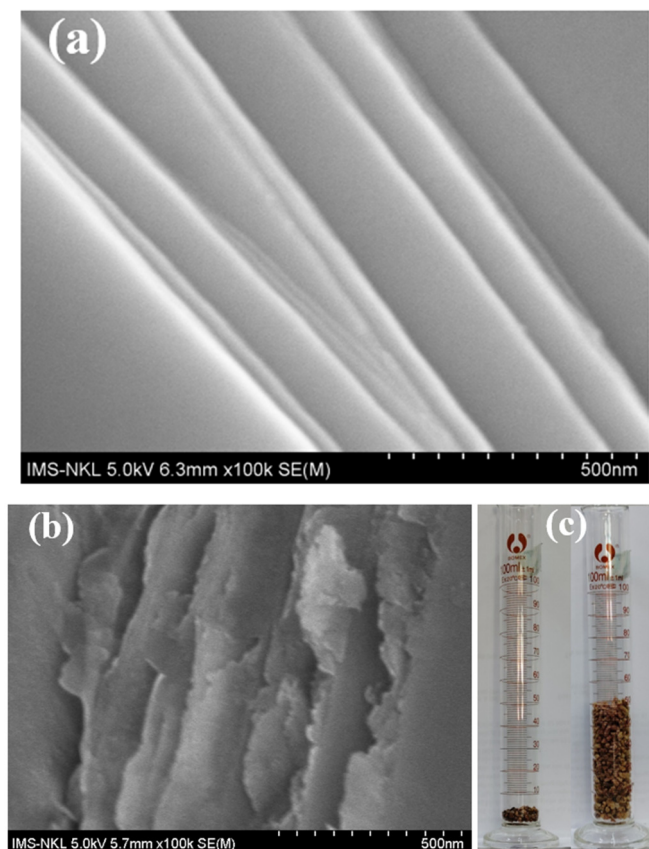
Hình 3 mô tả đường đẳng nhiệt hấp phụ - giải hấp phụ N_2 ở 77K và sự phân bố kích thước mao quản của vermiculite và vermiculite giãn nở.



Hình 3. Đường đẳng nhiệt hấp phụ - giải hấp N_2 và sự phân bố kích thước mao quản của (a) của vermiculite và (b) vermiculite giãn nở

Có thể quan sát thấy rằng, dạng đường cong hấp phụ - giải hấp phụ của vermiculite và vermiculite giãn nở đều thuộc dạng IV có hiện tượng trễ H3 theo phân loại của UIPAC là vật liệu mao quản trung bình có cấu trúc xốp dạng tấm [9]. Diện tích bề mặt riêng theo BET, thể tích và đường kính mao quản theo BJH của vermiculite lần lượt là $5,943\text{m}^2/\text{g}$; $0,0078\text{cm}^3/\text{g}$ và $3,82\text{nm}$; của vermiculite giãn nở lần lượt là $36,970\text{m}^2/\text{g}$; $0,0358\text{cm}^3/\text{g}$ và $3,79\text{nm}$. Như vậy, sau quá trình giãn nở đã làm tăng đáng kể diện tích bề mặt riêng của vermiculite từ $5,943\text{m}^2/\text{g}$ lên $36,970\text{m}^2/\text{g}$ và thể tích mao quản tăng 4,5 lần. Điều này sẽ thuận lợi và cải thiện khả năng hấp phụ các chất ô nhiễm của vermiculite.

Để quan sát rõ hơn về hình thái của vật liệu, vermiculite và vermiculite giãn nở được phân tích bởi SEM, kết quả thể hiện ở hình 4.

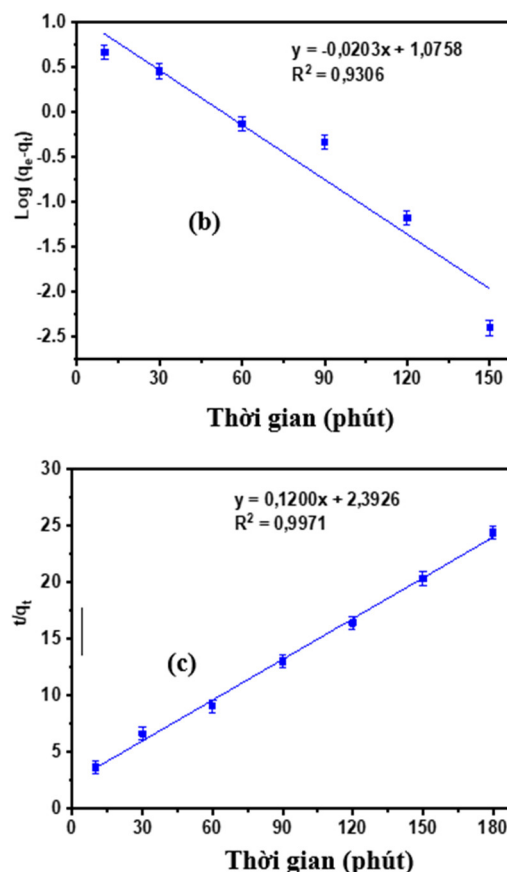
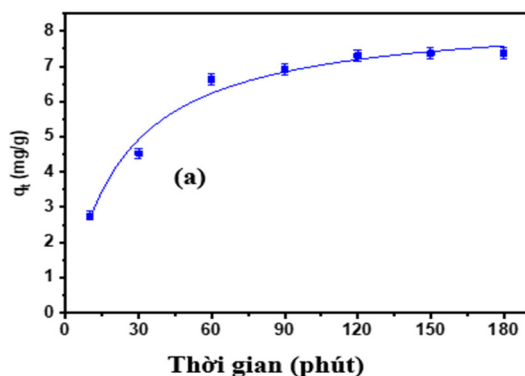


Hình 4. Ảnh SEM của (a) vermiculite, (b) vermiculite giãn nở và (c) so sánh thể tích của vermiculite trước và sau khi giãn nở

Theo hình 4a, vermiculite có cấu trúc dạng tấm lớn với bề mặt tương đối mịn, xếp chồng nhau có liên kết chặt chẽ và độ xốp tối thiểu. Sau giãn nở, các tấm lớn này bị bong tróc, khiến các lớp nở và tách ra làm tăng thể tích so với vermiculite ban đầu (hình 4b,c). Điều này, làm tăng diện tích bề mặt riêng lên gấp 6,22 lần như kết quả phân tích BET ở trên.

3.2. Khả năng hấp phụ Cd^{2+} của vermiculite giãn nở

3.2.1. Động học hấp phụ



Hình 5. (a) động học hấp phụ, đồ thị dạng tuyến tính (b) giả bậc 1 và (c) giả bậc 2 đối với Cd^{2+} của vermiculite giãn nở

Đường động học hấp phụ Cd^{2+} của vermiculite giãn nở mô tả trên hình 5a thấy rằng, dung lượng hấp phụ Cd^{2+} tăng khi thời gian tiếp xúc tăng và đạt trạng thái cân bằng sau khoảng 120 phút. Ban đầu trên bề mặt của vật liệu có sẵn các vị trí tâm hấp phụ, khi các vị trí này được lấp đầy, tốc độ hấp phụ giảm dần cho đến khi đạt được trạng thái cân bằng.

Trong nghiên cứu này, các mô hình động học giả bậc 1 và bậc 2 được sử dụng để nghiên cứu quá trình hấp phụ Cd^{2+} của vật liệu. Các phương trình tuyến tính lần lượt là (phương trình (1) và (2)) [7]:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad (3)$$

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

Trong đó, q_e (mg/g), q_t (mg/g) là dung lượng hấp phụ Cd^{2+} ở trạng thái cân bằng và tại thời điểm t ; k_1 (L/phút) và k_2 (mg/g.phút) là hằng số tốc độ bậc 1 và bậc 2.

Đồ thị động học dạng tuyến tính và các tham số trong các mô hình động học hấp phụ Cd^{2+} của vermiculite giãn nở được thể hiện ở hình 5b,c và bảng 1.

Bảng 1. Các tham số trong các mô hình động học hấp phụ Cd^{2+}

Động học hấp phụ giả bậc 1			Động học hấp phụ giả bậc 2			
q_e (mg/g)	k_1 (L/phút)	R^2	q_{exp} (mg/g)	q_{cal} (mg/g)	k_2 (mg/g.phút)	R^2
11,906	0,047	0,930	7,376	8,333	0,006	0,997

Từ kết quả bảng 1 thấy rằng, hằng số tương quan theo mô hình động học hấp phụ giả bậc 2 lớn hơn theo mô hình động học giả bậc 1 và gần với đơn vị ($R^2 = 0,997$). Ngoài ra, giá trị dung lượng hấp phụ cân bằng tính theo thực nghiệm (7,376mg/g) và giá trị tính theo mô hình động học giả bậc 2 (8,333mg/g) là tương đương nhau, trong khi đó giá trị này tính theo mô hình động học giả bậc 1 là khác nhau nhiều hơn. Như vậy, quá trình hấp phụ Cd^{2+} của vermiculite giãn nở tuân theo mô hình động học giả bậc 2.

3.2.2. Đẳng nhiệt hấp phụ

Các mô hình đẳng nhiệt Langmuir và Freundlich được áp dụng để mô tả quá trình hấp phụ Cd^{2+} của vermiculite giãn nở có phương trình dạng tuyến tính lần lượt là (phương trình (3) và (4)) [7]:

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

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (6)$$

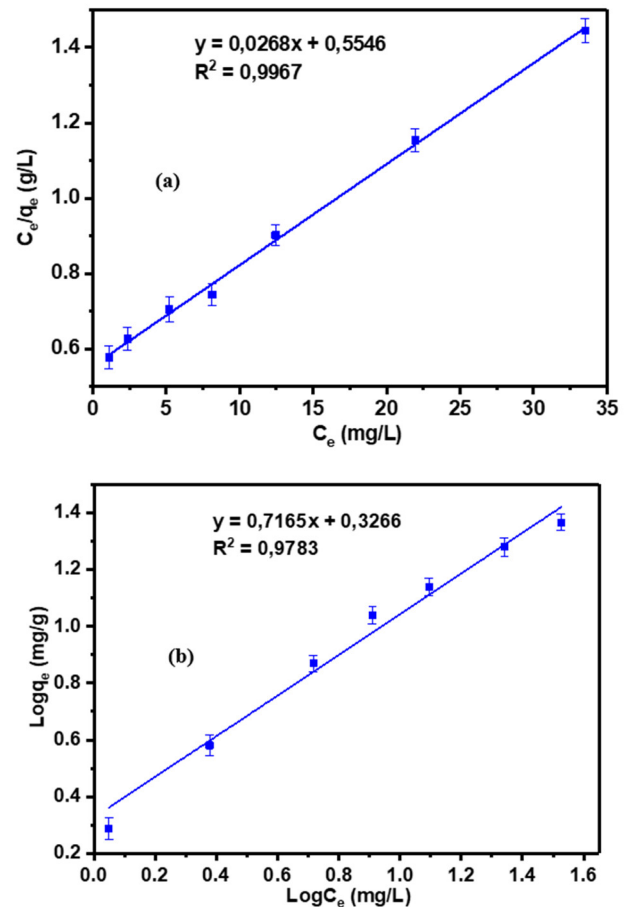
Trong đó: q_e (mg/g), q_m (mg/g), C_e (mg/L), K_L (L/mg) lần lượt là dung lượng hấp phụ cân bằng, dung lượng cực đại, nồng độ Cd^{2+} cân bằng và hằng số Langmuir. K_F ((mg/g).(L/mg) $^{1/n}$) là hằng số Freundlich và n là hệ số không đồng nhất.

Ngoài ra, trong mô hình đẳng nhiệt Langmuir, tham số " R_L " là một hằng số không thứ nguyên được gọi là tham số cân bằng có dạng sau [7]:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0} \quad (7)$$

Tham số R_L biểu thị khả năng tương thích của quá trình hấp phụ giữa chất hấp phụ và chất bị hấp phụ. Quá trình hấp phụ được coi là phù hợp khi $0 < R_L < 1$. Nếu $R_L > 1$, quá trình hấp phụ được coi là không thuận lợi. Giá trị R_L bằng 1 biểu thị mối quan hệ tuyến tính trong quá trình hấp phụ, trong khi R_L bằng 0 biểu thị quá trình hấp phụ là không thuận nghịch [7].

Đồ thị và các tham số của mô hình đẳng nhiệt Langmuir và Freundlich lần lượt thể hiện ở hình 6 và bảng 2.

Hình 6. Đẳng nhiệt hấp phụ (a) Langmuir và (b) Freundlich đối với Cd^{2+} của vermiculite giãn nởBảng 2. Các tham số trong các mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Cd^{2+}

Mô hình Langmuir				Mô hình Freundlich		
q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R_L	R^2	K_F ((mg/g). $x(\text{L/mg})^{1/n}$)	n	R^2
37,313	0,048	0,206-0,807	0,996	1,386	1,396	0,978

Theo kết quả bảng 2, hệ số tương quan R^2 đối với cả hai mô hình đẳng nhiệt hấp phụ là khá cao ($R^2 > 0,85$), các giá trị hệ số n và tham số R_L đều nằm trong khoảng thuận lợi cho quá trình hấp phụ ($1 < n < 10$; $0 < R_L < 1$). Do đó, cả hai mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir và Freundlich đều là mô hình thuận lợi để mô tả quá trình hấp phụ Cd^{2+} của vermiculite giãn nở. Tuy nhiên, hằng số tương quan đối với mô hình Langmuir ($R^2 = 0,996$) cao hơn hằng số tương quan trong mô hình Freundlich ($R^2 = 0,978$) cho nên mô hình Langmuir phù hợp hơn mô hình Freundlich. Dung lượng hấp phụ Cd^{2+} cực đại của vật liệu vermiculite giãn nở tính theo mô hình Langmuir là 37,313mg/g. Mô hình Langmuir đưa ra giả thuyết rằng sự hấp phụ Cd^{2+} trên vermiculite giãn nở xảy ra đơn lớp và bề mặt chất hấp phụ là đồng đều.

Bảng 3. So sánh dung lượng hấp phụ Cd²⁺ cực đại của một số chất hấp phụ

Chất hấp phụ	Dung lượng hấp phụ Cd ²⁺ cực đại, (mg/g)	Tài liệu tham khảo
Than hoạt tính chế tạo từ gỗ (ALC)	28,2	[20]
ALC/Fe ₃ O ₄	39,6	[20]
Biochar	13,24	[21]
Zeolite-Y	14,006	[22]
Fe ₃ O ₄ /cyclodextrin polymer	27,7	[23]
Vermiculite giãn nở	37,313	Nghiên cứu này

Bảng 3 so sánh dung lượng hấp phụ Cd²⁺ cực đại của một số chất hấp phụ khác với vermiculite trong nghiên cứu này. Thấy rằng, vermiculite giãn nở là một chất hấp phụ hiệu quả để loại bỏ Cd²⁺ khỏi môi trường nước.

4. KẾT LUẬN

Vermiculite giãn nở đã được chế tạo thành công bằng phương pháp gồm hai bước xử lý bởi H₂O₂ và kết hợp sấy vi sóng trong thời gian ngắn. Vật liệu được tách lớp cao và đồng đều có diện tích bề mặt riêng 36,970m²/g, tăng gấp khoảng 6 lần so với vermiculite thô ban đầu. Vermiculite giãn nở được đánh giá khả năng hấp phụ Cd²⁺ trong môi trường nước theo phương pháp gián đoạn, sự hấp phụ Cd²⁺ trên vermiculite giãn nở phù hợp với mô hình động học giả bậc 2 và mô hình đẳng nhiệt Langmuir. Dung lượng hấp phụ Cd²⁺ cực đại tính theo mô hình Langmuir là 37,313mg/g. So với một số chất hấp phụ khác, vermiculite giãn nở cũng là một chất hấp phụ hiệu quả để loại bỏ Cd²⁺ khỏi môi trường nước.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội trong đề tài mã số 60-2024-RD/HĐ-ĐHCN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. X. Yuan, S. Ma, C. Zhao, X. Chen, Y. Zhou, S. Xi, S. Liu, "Cadmium (II) ion adsorption of an industrial liquid waste-derived ferric oxide loaded with chitosan: Parameters optimization, isotherms, kinetics and thermodynamics," *Desalination Water Treatment*, 319, 100578, 2024.

[2]. M. Basu, A. K. Guha, L. Ray, "Adsorption behavior of cadmium on husk of lentil," *Process Safety Environmental Protection*, 106, 11-22, 2017.

[3]. Á. Villabona-Ortiz, C. Tejada-Tovar, Á. D. Gonzalez-Delgado, "Adsorption of Cd²⁺ ions from aqueous solution using biomasses of theobroma cacao, zea mays, manihot esculenta, dioscorea rotundata and elaeis guineensis," *Applied Sciences*, 11, 6, 2657, 2021.

[4]. O. Duman, S. Tunç, T. G. Polat, "Determination of adsorptive properties of expanded vermiculite for the removal of CI Basic Red 9 from aqueous solution: kinetic, isotherm and thermodynamic studies," *Applied Clay Science*, 109, 22-32, 2015.

[5]. V. E. dos Anjos, J. R. Rohwedder, S. Cadore, G. Abate, M. T. Grassi, "Montmorillonite and vermiculite as solid phases for the preconcentration of trace elements in natural waters: adsorption and desorption studies of As, Ba, Cu, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Sr, V, and Zn," *Applied Clay Science*, 99, 289-296, 2014.

[6]. S. Gu, L. Wang, X. Mao, L. Yang, C. Wang, "Selective adsorption of Pb (II) from aqueous solution by triethylenetetramine-grafted polyacrylamide/vermiculite," *Materials*, 11, 4, 514, 2018.

[7]. N. Prakash, M. Soundararajan, S. Arungalai Vendan, P. Sudha, N. Renganathan, "Contemplating the feasibility of vermiculate blended chitosan for heavy metal removal from simulated industrial wastewater," *Applied Water Science*, 7, 4207-4218, 2017.

[8]. C. Marcos, V. Medoro, A. Adawy, "Modified vermiculite as adsorbent of hexavalent chromium in aqueous solution," *Minerals*, 10, 9, 749, 2020.

[9]. H. S. d. C. Neves, T. L. da Silva, M. G. C. da Silva, R. Guirardello, M. G. A. Vieira, "Ion exchange and adsorption of cadmium from aqueous media in sodium-modified expanded vermiculite," *Environmental Science Pollution Research*, 1-17, 2022.

[10]. Y. Chen, H. Sun, T. Peng, T. Gao, W. Ding, T. Hui, L. Jiang, "The Expanded Vermiculite Was Quickly Prepared by the Catalytic Action of Manganese Dioxide on Hydrogen Peroxide and Its Adsorption Properties to Cd," *Molecules*, 28, 2, 817, 2023.

[11]. M. Mondal, A. K. Ray, "Removal of As (V) using low cost adsorbents: aerocrete and vermiculite modified with iron oxy-hydroxide," *Adsorption*, 26, 387-396, 2020.

[12]. F. H. do Nascimento, J. C. Masini, "Influence of humic acid on adsorption of Hg (II) by vermiculite," *Journal of Environmental Management*, 143, 1-7, 2014.

[13]. A. Bourliva, A. Sikilidis, L. Papadopoulou, M. Betsiou, K. Michailidis, C. Sikilidis, A. Filippidis, "Removal of Cu²⁺ and Ni²⁺ ions from aqueous solutions by adsorption onto natural palygorskite and vermiculite," *Clay Minerals*, 53, 1, 1-15, 2018.

[14]. K. H. Binh, N. V. Huy, N. M. Viet, "Nghiên cứu chế tạo vermiculite giãn nở sử dụng tác nhân H₂O₂ và vi sóng ứng dụng cho hấp phụ Asen trong nước," *Journal of Military Science Technology*, 100, 77-82, 2024.

[15]. N. Van Huy, K. H. Binh, T. Van Chinh, N. T. H. Phuong, V. T. Thien, D. T. Trang, N. T. H. Phuong, V. T. Hang, T. V. Hoai, "Fabrication of expanded vermiculite using the mixed methods of microwave and H₂O₂ and their application for adsorption," *Vietnam Journal of Catalysis Adsorption*, 12, 2, 95-99, 2024.

[16]. L. T. Trần, "Nghiên cứu biến tính khoáng sét vermiculit nhằm nâng cao khả năng hấp phụ kim loại nặng trong nước," *Journal of Science: Earth Environmental Sciences*, 32, 3, 2016.

[17]. G. de Vargas Brião, M. G. da Silva, M. G. A. Vieira, "Expanded vermiculite as an alternative adsorbent for the dysprosium recovery," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 127, 228-235, 2021.

[18]. L. Ma, X. Su, Y. Xi, J. Wei, X. Liang, J. Zhu, H. He, "The structural change of vermiculite during dehydration processes: A real-time in-situ XRD method," *Applied Clay Science*, 183, 105332, 2019.

[19]. S. K. Haldar, *Introduction to mineralogy and petrology*. Elsevier, 2020.

[20]. S. J. Peighambardoust, R. Foroutan, S. H. Peighambardoust, H. Khatooni, B. Ramavandi, "Decoration of Citrus limon wood carbon with Fe_3O_4 to enhanced Cd^{2+} removal: a reclaimable and magnetic nanocomposite," *Chemosphere*, 282, 131088, 2021.

[21]. W. K. Kim, T. Shim, Y. S. Kim, S. Hyun, C. Ryu, Y. K. Park, J. Jung, "Characterization of cadmium removal from aqueous solution by biochar produced from a giant Miscanthus at different pyrolytic temperatures," *Bioresource technology*, 138, 266-270, 2013.

[22]. A. K. Bahgaat, H. E. S. Hassan, A. A. A. Melegy, A. M. Abd-El Kareem, M. H. Mohamed, "Removal of Cd^{2+} from aqueous solution by zeolite synthesized from Egyptian kaolin," *Ukrainian journal of veterinary agricultural sciences*, 3, 2, 12-23, 2020.

[23]. A. Z. M. Badruddoza, Z. B. Z. Shawon, W. J. D. Tay, K. Hidajat, M. S. Uddin, " Fe_3O_4 /cyclodextrin polymer nanocomposites for selective heavy metals removal from industrial wastewater," *Carbohydrate polymers*, 91, 1, 322-332, 2013.

AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Manh Ha¹, Nguyen Duy Dat¹, Dao Thu Ha¹,
Nguyen Thi Thu Phuong¹, Nguyen Thi Thoa¹, Tran Quang Hai¹,
Pham Thi Mai Huong¹, Nguyen Van Huy², Ha Huy Hung³,
Vu Ngoc Doan³, Tran Van Chinh⁴**

¹Faculty of Chemical Technology, Hanoi University of Industry, Vietnam

²School of Chemistry and Life Sciences, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

³Faculty of Physical Chemistry and Engineering, Military Technical Academy, Vietnam

⁴Institute of Chemistry and Materials, Academy of Military Science and Technology, Vietnam