

NGHIÊN CỨU HẤP PHỤ ĐỒNG THỜI ION KIM LOẠI Cu(II) VÀ Zn(II) BẰNG VẬT LIỆU COMPOSITE KẾT HỢP TỪ THAN Bùn U MINH VÀ XỈ THAN ĐÁ LÒ GẠCH

Đến tòa soạn 04-05-2023

Võ Thị Bích Trân¹, Nguyễn Hiếu Nhân², Nguyễn Minh Thảo³, Hồ Sỹ Thắng^{3*}

¹Sở Khoa học và Công nghệ Đồng Tháp

²Sở Tài nguyên môi trường Đồng Tháp

³Trường Đại học Đồng Tháp

* Email: hsthang@dtu.edu.vn

SUMMARY

STUDY ON THE CO-ADSORPTION OF Cu(II) AND Zn(II) BY THE COMPOSITE MATERIAL OF THE U MINH PEAT AND COAL SLAG

The composite material which has been simply prepared from U Minh peat and coal slag are used to adsorb the heavy metal ions in the aqueous medium. Characterizations from the images of SEM and BET show that the material 's surface look a rough surface with the specific area of 12.45 m².g⁻¹. The adsorption equilibrium is obtained after 120 minutes. The adsorption capacity (q_e) for Cu(II) and Zn(II) are 17.90 mg.g⁻¹ and 19.75 mg.g⁻¹ respectively. The adsorption kinetics of these adsorption processes are in the apparent second-order type 2 equation. The calculations of the adsorption isothermal from the experimental data indicate these adsorption processes have the high fitness in both models of Langmuir and Freundlich. All results express that this material can treat the water pollution containing Cu(II) and Zn(II).

Keyword: adsorption heavy metal ions; peat materials; coal slag.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nước thải của hoạt động công nghiệp và một số nghề truyền thống thường chứa một lượng đáng kể ion kim loại nặng, gây nguy hại cho sức khỏe con người khi tiếp xúc. Ảnh hưởng đến cây trồng, vật nuôi và góp phần gây ô nhiễm nguồn nước ngọt đang ngày càng khan hiếm. Rất cần thiết phải có biện pháp phù hợp để xử lý, đảm bảo tiêu chuẩn xả thải ra môi trường.

Hấp phụ là phương pháp xử lý được cho là hiệu quả đối với các ion kim loại bởi sự thân thiện với môi trường, xử lý triệt để. Nhiều loại vật liệu có diện tích bề mặt riêng cao, dung lượng hấp phụ lớn, hiệu suất cao đã được sử dụng. Bên cạnh đó, các loại khoáng sét, vật liệu có nguồn gốc từ nông nghiệp, công nghiệp cũng được tận dụng để chế tạo vật liệu, xử lý ion kim loại nặng trong môi trường nước [2, 5, 6, 7, 10, 11, 12].

Một thách thức được đặt ra, vật liệu dù có khả năng hấp phụ tốt, nhưng với khối lượng ít, nhỏ lẻ sẽ gặp không ít khó khăn khi phải xử lý một khối lượng nước thải lớn. Vật liệu với nguồn nguyên liệu dồi dào, phương pháp chế tạo đơn giản, dễ áp dụng và có thể sản xuất khối lượng lớn sẽ là hướng ưu tiên lựa chọn. Trong nghiên cứu này, chúng tôi chế tạo vật liệu có nguồn gốc từ than bùn và xỉ than của lò gạch, sử dụng để hấp phụ, xử lý đồng thời ion Cu(II), ion Zn(II) trong môi trường nước.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ THỰC NGHIỆM

- Hóa chất thí nghiệm, phân tích: Muối Cu(II) và Zn(II) để pha dung dịch chứa đồng thời ion Cu(II), Zn(II) nồng độ 150; 100; 70 và 50 ppm.

- Vật liệu hấp phụ: Than bùn U Minh, lấy ở độ sâu 1,5 m, trộn đều với xi than đá (tán nhỏ) của lò nung gạch, tỷ lệ 70:30 theo khối lượng. Sàng qua rây để loại bỏ cát, xác thực vật. Rửa bằng nước máy, phơi khô tự nhiên dưới nắng mặt trời.

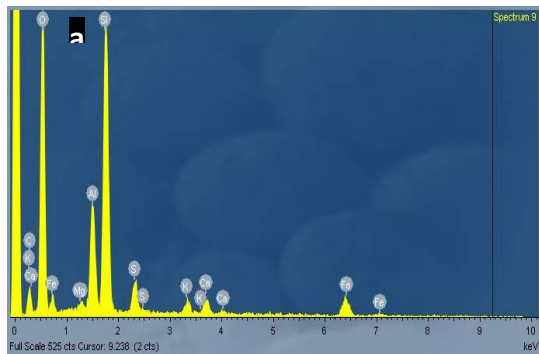
- Động học hấp phụ: Lấy 0,3 g vật liệu hấp phụ, cho vào 200 mL dung dịch Cu(II), Zn(II) nồng độ 100 ppm mỗi ion, khuấy từ nhẹ. Thời gian khảo sát 180 phút, sau mỗi khoảng thời gian nhất định, mẫu được lấy ra để phân tích nồng độ, xác định thời điểm quá trình hấp phụ đạt cân bằng. Dung lượng hấp phụ q_t được tính theo công thức (1.1) [2, 10]: $q_t = [(C_o - C_t).V]/m$ (1.1)

Trong đó, C_o , C_t lần lượt là nồng độ ban đầu và tại thời điểm t của dung dịch (ppm); V là thể tích dung dịch (lít - L); m là khối lượng chất hấp phụ sử dụng (gam).

Động học và các thông số của quá trình hấp phụ được khảo sát dựa trên ba phương trình động học biểu kiến [4, 8, 10]:

Phương trình bậc 1: $\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k.t$; phương trình bậc 2 loại 1: $1/(q_e - q_t) = 1/q_e + k.t$ và phương trình bậc 2 loại 2: $t/q_t = 1/(k.q_e^2) + t/q_e$.

- Đẳng nhiệt hấp phụ: Thay đổi nồng độ ban đầu của dung dịch Cu(II), Zn(II) lần lượt là 50 ppm;



70 ppm và 150 ppm. Đẳng nhiệt hấp phụ và các thông số tính toán dựa trên phương trình Langmuir và phương trình Freundlich [4, 8].

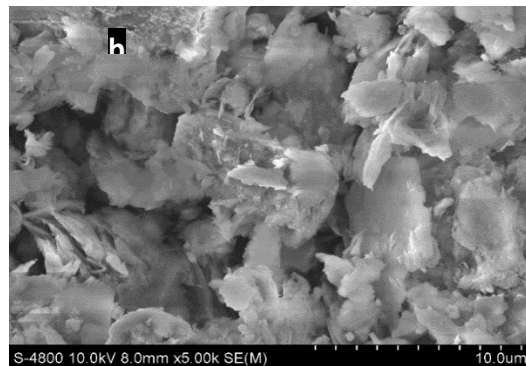
- Đặc trưng tính chất vật liệu: Mẫu SEM, mẫu EDX được đo trên thiết bị SEM-JSM-5300 (Nhật Bản); Mẫu BET đo trên thiết bị Micromeritics (Hoa Kỳ) và mẫu FT-IR đo trên thiết bị Shimadzu (Nhật Bản).

- Nồng độ Cu(II), Zn(II) tại các thời điểm được xác định trên máy quang phổ hấp thụ nguyên tử AAS 240FS (Agilent, Mỹ).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc trưng tính chất vật liệu

Thành phần của vật liệu được phân tích bằng phổ EDX, kết quả như trình bày trong Hình 1a. Trong vật liệu, tổng tỷ lệ % khối lượng của carbon và oxygen chiếm chỉ 66,49%, khá thấp. Ngoài các nguyên tố chính của than bùn là oxygen và carbon, trong vật liệu còn có các nguyên tố khác chiếm tỷ lệ khá cao như: Si (13,94%); Fe (6,36%); Al (6,01%); S (3,89%). Ngoài ra, còn có sự xuất hiện của Ca (1,74%); K (1,18%); Mg (0,39%). Hàm lượng Si, Fe, Al cao có thể do cát mịn, đất sét lẫn trong xi than của quá trình nung gạch.

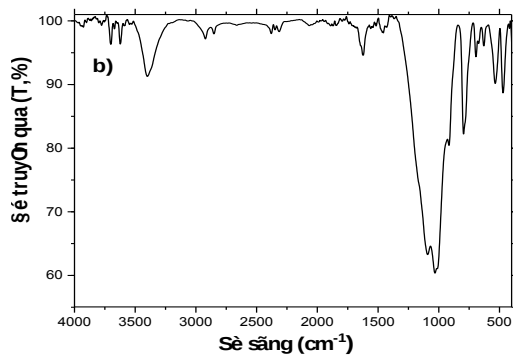
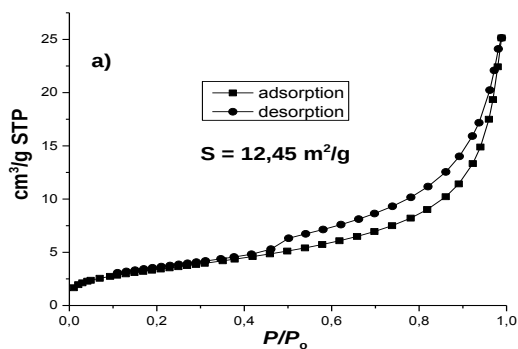


Hình 1. a) Phổ EDX và b) Quan sát SEM vật liệu hấp phụ

Quan sát SEM trong Hình 1b cho thấy, vật liệu chủ yếu là những vảy mỏng, bề mặt xù xì, độ xốp cao, kích thước không đồng đều bởi đây là sự trộn cơ học giữa than bùn, xi than rồi phơi khô. Quan sát SEM còn cho thấy, khe rỗng hay hốc trống giữa các hạt chiếm một khoảng khá lớn.

Kết quả hấp phụ - khử hấp phụ nitrogen trên Hình 2a thấy rằng, đường trễ có bước ngưng tụ

rõ ràng, đường hấp phụ - khử hấp phụ tách rời nhau, rộng. Diện tích bề mặt riêng tính theo phương trình BET, $S = 12,45 \text{ m}^2/\text{g}$, khá thấp đối với các hệ vật liệu hấp phụ nói chung. Tổng thể tích lỗ trống của vật liệu $V = 0,038141 \text{ cm}^3/\text{g}$, kích thước trung bình của lỗ trống $d = 11,736 \text{ nm}$, chủ yếu là khe rỗng giữa các hạt bởi hệ thống mao quản chưa được khơi thông.



Hình 2. a) Đường đẳng nhiệt hấp phụ - khử hấp phụ nitrogen và b) Phổ FT-IR của vật liệu

Đối với vật liệu chế tạo, biến tính than bùn trong môi trường acid hoặc base, diện tích bề mặt tăng lên đáng kể so với khi không biến tính, dao động trong khoảng từ 11,8 – 27,8 m²/g do mao quản được khơi thông và sắp xếp lại, khả năng hấp phụ cũng tăng lên do bề mặt được hoạt hóa, chứa nhiều nhóm chức có khả năng hấp phụ cao [3]. Còn than bùn sơ chế, diện tích bề mặt thấp do tính đặc chắc, mao quản chưa khơi thông, do vậy, diện tích có khi chỉ đạt 1,3 m²/g [7]. Diện tích bề mặt của vật liệu chế tạo từ than bùn trong nghiên cứu này tương đương với kết quả biến tính than bùn trong môi trường acid hoặc base, bởi được trộn với xỉ than nên độ xốp, diện tích bề mặt tăng.

Kết quả đặc trưng bằng phổ FT-IR trình bày trong Hình 2b cho thấy, trên bề mặt có nhiều loại nhóm chức khác nhau có khả năng hấp phụ cao như dải peak từ 1625,99 đến 1010,70 cm⁻¹, đặc trưng cho các nhóm chức có trong acid humic của than bùn, bao gồm cả nhóm (– OH), dạng phenol và nhóm (– COOH). Dải peak từ 694,37 đến 472,56 cm⁻¹, đặc trưng cho các nhóm (– SH), (– CS) [13].

3.2. Động học hấp phụ

Thời gian hấp phụ đạt cân bằng được xác định bằng cách: sau các khoảng thời gian 15; 30; 60; 90; 120; 150 và 180 phút, mẫu được lấy ra và phân tích nồng độ. Chọn thời điểm đạt cân bằng khi dung lượng hấp phụ q_t (mg/g) không tăng hoặc tăng không đáng kể. Nồng độ và dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng gọi là C_e (ppm) và q_e (mg/g). Kết quả hấp phụ ion Cu(II), nồng độ ban đầu $C_o = 98,37$ ppm và ion Zn(II), nồng độ ban đầu, $C_o = 102,45$ ppm được trình bày trong Bảng 1 (thực hiện ở pH = 6,1).

Quá trình hấp phụ xảy ra nhanh ở giai đoạn đầu, trước thời điểm 60 phút, sau đó sự hấp phụ giảm dần, và từ 120 phút trở về sau, dung lượng hấp phụ tăng không đáng kể đối với cả ion Cu(II) và ion Zn(II) như trình bày trong Bảng 1. Do vậy, có thể coi sự hấp phụ đạt cân bằng ở thời điểm 120 phút. Tương ứng với dung lượng hấp phụ cân bằng của ion Cu(II), $q_e = 17,90$ mg/g và của ion Zn(II), $q_e = 19,75$ mg/g.

Bảng 1. Số liệu và thời gian hấp phụ ion Cu(II) và ion Zn(II) của vật liệu

Thời gian (phút)		15	30	60	90	120	150	180
Ion Cu (II), $C_o = 98,37$ ppm	C_t (ppm)	83,34	78,45	75,82	73,41	71,52	71,47	71,54
	q_t (mg/g)	10,02	13,28	15,03	16,64	17,90	17,93	17,89
Ion Zn (II), $C_o = 102,45$ ppm	C_t (ppm)	84,36	79,34	75,28	73,02	72,83	72,65	72,74
	q_t (mg/g)	12,06	15,41	18,11	19,62	19,75	19,86	19,81

Với giá trị q_e (mg/g) trình bày trong Bảng 1, nhận thấy rằng dung lượng hấp phụ của vật liệu đối với ion Cu(II) và Zn(II) không cao, mặc dù nồng độ ban đầu C_o lớn (~ 100 ppm). Nguyên nhân có thể do vật liệu hấp phụ đồng thời cả hai

ion nên dung lượng đối với mỗi ion thấp. Vật liệu có nguồn gốc từ tự nhiên, dung lượng hấp phụ kim loại nặng dao động trong khoảng từ 19 – 32 mg/g [2, 9, 15]. Đối với một số loại vật liệu chế tạo than bùn, dung lượng hấp phụ ion Cu(II),

q_e dao động từ 10,49 – 25,02 mg/g, dung lượng hấp phụ ion Zn(II), q_e dao động từ 12 – 22,63 mg/g [1, 9, 14].

Quy luật và các thông số động học, dựa trên ba

phương trình biểu kiến: phương trình bậc 1, bậc 2 loại 1 và bậc 2 loại 2. Biến đổi số liệu hấp phụ ion Cu(II) và ion Zn(II) theo ba phương trình động học biểu kiến, cho kết quả như trong Bảng 2.

Bảng 2. Số liệu hấp phụ ion Cu(II) và ion Zn(II) theo các phương trình động học biểu kiến

t (phút)	q_t (mg/g)		$q_e - q_t$		$\ln(q_e - q_t)$		$1/(q_e - q_t)$		t/q_t	
	Cu(II)	Zn(II)	Cu(II)	Zn(II)	Cu(II)	Zn(II)	Cu(II)	Zn(II)	Cu(II)	Zn(II)
0	0	0	17,90	19,75	0,2884	2,9832	0,0559	0,0506	-	-
15	10,02	12,06	7,88	7,69	2,064	2,0399	0,1269	0,1300	1,4970	1,2438
30	13,28	15,41	4,62	4,34	1,530	1,4679	0,2164	0,2304	2,2590	1,9468
60	15,03	18,11	2,87	1,64	1,054	0,4947	0,3484	0,6097	3,9920	3,3131
90	16,64	19,62	1,26	0,13	0,2311	-2,040	0,7936	7,6923	5,4086	4,5871
120	17,90	19,75	0	0	-	-	-	-	6,7039	6,0759

Việc xác định quy luật động học biểu kiến của quá trình hấp phụ dựa vào hai thông số cơ bản của từng phương trình biểu kiến, đó là giá trị R^2 và so sánh giá trị dung lượng hấp phụ, q_e thực nghiệm (q_{eTN}) với q_e tính toán (q_{eLT}) từ phương trình động học. Phương trình nào có giá trị R^2 càng cao, sự phù hợp với phương trình đó càng lớn. Giá trị

q_{eTN} chênh lệch với q_{eLT} càng nhỏ, phương trình đó mô tả càng tốt quy luật động học hấp phụ. Thay số liệu hấp phụ của ion Cu(II), ion Zn(II) đã biến đổi ở Bảng 2 lần lượt vào các phương trình động học biểu kiến bậc 1, biểu kiến bậc 2 loại 1 và biểu kiến bậc 2 loại 2 dạng tuyến tính, cho kết quả trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Thông số động học hấp phụ ion Cu(II), ion Zn(II) của các phương trình động học biểu kiến

Phương trình	Hấp phụ ion Cu(II)	Hấp phụ ion Zn(II)
Bậc 1	$y = -0,0272.x + 2,6131$ $R^2 = 0,9567$; $q_{eLT} = 13,64$ mg/g	$y = -0,0521.x + 3,0226$ $R^2 = 0,9634$; $q_{eLT} = 20,54$ mg/g
Bậc 2 loại 1	$y = 0,0078.x + 0,0048$ $R^2 = 0,9236$; $q_{eLT} = 20,83$ mg/g	$y = 0,0762.x - 1,2305$ $R^2 = 0,6828$; $q_{eLT} = -0,76$ mg/g
Bậc 2 loại 2	$y = 0,0501.x + 0,8155$ $R^2 = 0,9968$; $q_{eLT} = 19,96$ mg/g; $q_{eTN} = 17,90$ mg/g $k = 0,0501$ ($g.mg^{-1}.phút^{-1}$)	$y = 0,0456.x + 0,5625$ $R^2 = 0,9994$; $q_{eLT} = 21,93$ mg/g; $q_{eTN} = 19,75$ mg/g $k = 0,0456$ ($g.mg^{-1}.phút^{-1}$)

So sánh các thông số của ba phương trình động học trong Bảng 3 cho thấy, quá trình hấp phụ ion Cu(II), ion Zn(II), phương trình bậc 2 loại 2 có giá trị R^2 cao hơn hẳn so với hai phương trình còn lại. Hơn nữa, giá trị q_{eTN} và q_{eLT} tính theo phương trình bậc 2 loại 2 của ion Cu(II), ion Zn(II) cũng chênh lệch không nhiều, khoảng 10%. Do đó, có thể khẳng định, quy luật động học hấp phụ ion Cu(II) và ion Zn(II) tuân theo phương trình biểu kiến bậc 2 loại 2.

Quá trình hấp phụ ion kim loại bằng vật liệu có nguồn gốc từ than bùn, rất nhiều công trình nghiên cứu có quy luật hấp phụ tuân theo phương trình biểu kiến bậc 2 loại 2 [4, 8, 9, 10], tương tự như kết quả của nghiên cứu này.

3.3. Đẳng nhiệt hấp phụ

Đẳng nhiệt hấp phụ ion Cu(II), ion Zn(II) được nghiên cứu dựa vào phương trình Langmuir (1.2) và phương trình Freundlich (1.3) [4, 8, 10].

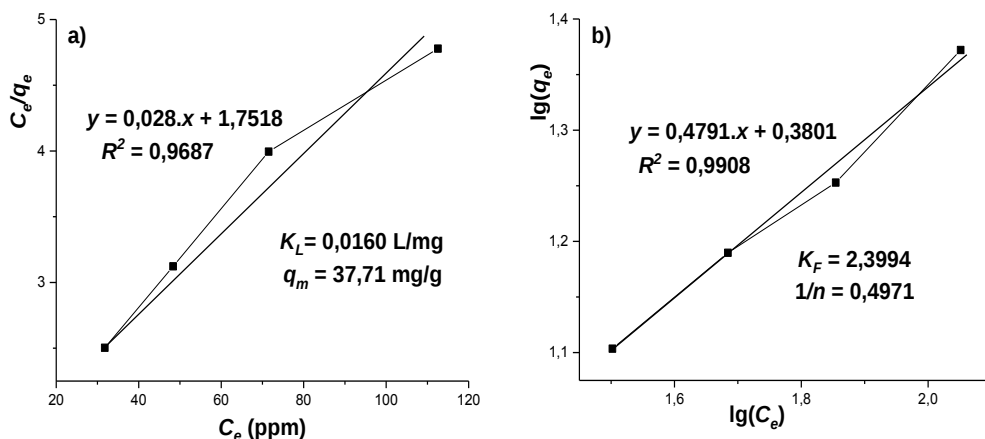
$$C_e/q_e = C_e/q_m + 1/(K_L.q_m) \quad (1.2)$$

$$\text{và } \lg(q_e) = \lg(K_F) + (1/n).\lg(C_e) \quad (1.3)$$

Cơ sở để xác định đẳng nhiệt hấp phụ là thay đổi nồng độ ban đầu C_o , ứng với mỗi C_o có nồng độ cân bằng C_e tương ứng. Trong nghiên cứu này, nồng độ ban đầu C_o là 150; 70 và 50 ppm. Biến đổi kết quả quá trình hấp phụ ion Cu(II) theo phương trình Langmuir (1.2) và phương trình Freundlich (1.3) cho kết quả như trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Số liệu hấp phụ ion Cu(II) được biến đổi theo phương trình đẳng nhiệt Langmuir và Freundlich

C_0 (ppm)	C_e (ppm)	q_e (mg/g)	C_e/q_e	$\lg(C_e)$	$\lg(q_e)$
147,89	112,56	23,55	4,7789	2,0514	1,3721
98,37	71,52	17,90	3,9955	1,8544	1,2529
71,56	48,34	15,48	3,1227	1,6843	1,1898
50,82	31,78	12,69	2,5037	1,5022	1,1036



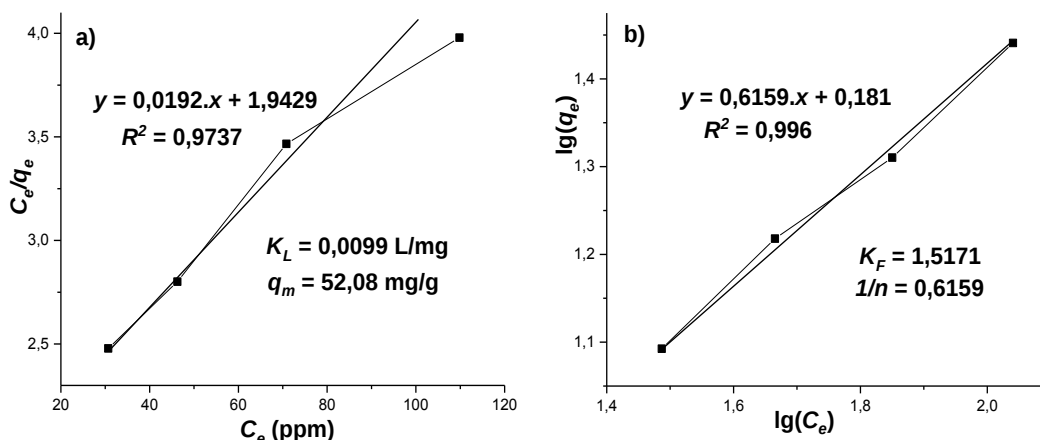
Hình 3. Phương trình đẳng nhiệt hấp phụ ion Cu(II): a) theo Langmuir và b) theo Freundlich

Đối với quá trình hấp phụ ion Cu(II), xử lý số liệu và xây dựng đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của C_e/q_e vào C_e theo phương trình đẳng nhiệt Langmuir và sự phụ thuộc của $\lg(q_e)$ vào $\lg(C_e)$ theo phương trình Freundlich, kết quả trình bày trong Hình 3. Xử lý số liệu theo phương trình Langmuir, thu được giá trị $R^2 = 0,9687$ (Hình 3a) và theo phương trình Freundlich, thu được giá trị $R^2 = 0,9908$ (Hình 3b). Giá trị R^2 của cả hai phương trình đẳng nhiệt đều cao, có thể kết luận sự hấp phụ ion Cu(II) bằng vật liệu hấp phụ chế tạo từ than bùn, xỉ than tuân theo cả hai phương trình. Khi thực hiện quá trình hấp phụ ion kim loại bằng vật liệu, thường rơi vào ba trường hợp như sau: (1) theo phương trình đẳng nhiệt Langmuir; (2) theo phương trình đẳng nhiệt Freundlich và (3) tuân theo cả hai mô hình [4, 10].

Dung lượng hấp phụ cực đại đối với ion Cu(II), tính từ phương trình đẳng nhiệt Langmuir, $q_m = 37,71$ mg/g, khá thấp so với nhiều loại vật liệu hấp phụ, trong đó có cả vật liệu hấp phụ chế tạo, biến tính, hoạt hóa than bùn. Tuy nhiên, đây là sự hấp phụ đồng thời, nếu cộng cả quá trình hấp phụ ion Zn(II), kết quả này cũng chấp nhận được. Theo kết quả tính toán của nhóm tác giả [2], than bùn, nếu được hoạt hóa và xử lý nhiệt trong điều kiện thích hợp, dung lượng hấp phụ cực đại (q_m) với ion Pb^{2+} có thể đạt tới 79,68 mg/g (than bùn Indonesian) và 82,31 mg/g (than bùn Ba Lan). Kết quả trên Hình 3b cho thấy, hằng số kinh nghiệm theo phương trình Freundlich, $1/n = 0,4971$, mô tả tốt quá trình hấp phụ ion Cu(II). Đối với quá trình hấp phụ ion Zn(II), biến đổi các số liệu thực nghiệm theo phương trình đẳng nhiệt Langmuir và Freundlich, cho kết quả như trong Bảng 5.

Bảng 5. Số liệu hấp phụ ion Zn(II) được biến đổi theo phương trình đẳng nhiệt Langmuir và Freundlich

C_0 (ppm)	C_e (ppm)	q_e (mg/g)	C_e/q_e	$\lg(C_e)$	$\lg(q_e)$
151,23	109,83	27,60	3,9793	2,0407	1,4409
101,48	70,83	20,43	3,4664	1,8502	1,3103
71,05	46,27	16,52	2,8008	1,6653	1,2180
49,23	30,67	12,37	2,4787	1,4867	1,0925



Hình 4. Phương trình đẳng nhiệt hấp phụ ion Zn(II): a) theo Langmuir và b) theo Freundlich

Xây dựng đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của C_e/q_e vào C_e theo phương trình Langmuir và sự phụ thuộc của $\lg(q_e)$ vào $\lg(C_e)$ theo phương trình Freundlich, kết quả được trình bày trong Hình 4. Kết quả trong Hình 4a, theo phương trình đẳng nhiệt Langmuir, giá trị $R^2 = 0,9737$ và trong Hình 4b, theo phương trình đẳng nhiệt Freundlich, giá trị $R^2 = 0,996$. Các giá trị R^2 đều cao, chứng tỏ cả hai phương trình đều mô tả tốt quá trình hấp phụ ion Zn(II), tương tự quá trình hấp phụ ion Cu(II). Theo phương trình Langmuir, dung lượng hấp phụ cực đại của ion Zn(II), $q_m = 52,08$ mg/g, cao hơn rất nhiều so với $q_m = 37,71$ mg/g khi hấp phụ ion Cu(II). Hằng số kinh nghiệm theo Freundlich, $1/n = 0,6159$, mô tả khá tốt quá trình hấp phụ ion Zn(II). Sự hấp phụ chủ yếu nghiêng theo cơ chế trao đổi giữa các nhóm chức trên bề mặt và ion kim loại, tương tự như nhóm tác giả [2].

Theo các nghiên cứu về hấp phụ ion kim loại bằng vật liệu, rất nhiều công trình có kết quả đẳng nhiệt hấp phụ tuân theo cả hai mô hình [4, 10]. Do vậy, trong hấp phụ ion Zn(II), cả hai phương trình đẳng nhiệt đều mô tả tốt cũng không phải là trường hợp ngoại lệ. Tuy nhiên, dung lượng hấp phụ cực đại, q_m , đối với ion Zn(II) còn khá khiêm tốn so với các loại vật liệu hấp phụ khác. Ưu điểm của vật liệu hấp phụ trong nghiên cứu này là dễ chế tạo, nguồn nguyên liệu sẵn có, dồi dào, đặc biệt là khu vực

U Minh (Cà Mau, Kiên Giang), có thể sản xuất khối lượng rất lớn.

4. KẾT LUẬN

Đã chế tạo được vật liệu hấp phụ từ than bùn và xỉ than đá của lò gạch, vật liệu có diện tích bề mặt riêng, $S = 12,45$ m²/g, có độ xốp tương đối cao. Nghiên cứu quá trình hấp phụ đồng thời ion Cu(II), ion Zn(II), kết quả cho thấy:

Thời gian phản ứng đạt cân bằng là 120 phút, dung lượng hấp phụ đối với ion Cu(II), $q_e = 17,90$ mg/g, đối với ion Zn(II), $q_e = 19,75$ mg/g. Quy luật động học hấp phụ tuân theo phương trình biểu kiến bậc 2 loại 2 đối với cả hai ion. Đẳng nhiệt hấp phụ tuân theo đồng thời cả phương trình Langmuir và Freundlich với hệ số R^2 cao, dung lượng hấp phụ cực đại của ion Cu(II), $q_m = 37,71$ mg/g, của ion Zn(II), $q_m = 52,08$ mg/g.

Khả năng hấp phụ của vật liệu không cao, tuy nhiên, ưu điểm là dễ chế tạo, nguồn nguyên liệu sẵn có và dồi dào, có thể sản xuất số lượng lớn. Do đó, có thể mở ra nhiều hướng ứng dụng khả thi của vật liệu hấp phụ. Đặc biệt là sử dụng vật liệu hấp phụ trong hệ thống đất ngập nước kiến tạo, phát huy vai trò hấp phụ và kích thích sự phát triển cây trồng của than bùn.

Lời cảm ơn:

Công trình được hoàn thành nhờ sự hỗ trợ của đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Bộ Giáo dục và Đào tạo. Mã số B2020.SPD.02.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. J. Allen, M. Murray, P. Brown, O. Flynn, *Resources*, (1994). Peat as an adsorbent for dyestuffs and metals in wastewater. *Conservation and Recycling*, **11(1-4)**, 25-39.
- [2] P. Bartczak, M. Norman, L. Klapiszewski, N. Karwanska, M. Kawalec, M. Baczynska, M. Wysokowski, J. Zdarta, F. Ciesielczyk, T. Jesionowski, (2015). Removal of nickel(II) and lead(II) ions from aqueous solution using peat as a low-cost adsorbent: A kinetic and equilibrium study. *Arabian Journal of Chemistry*, **11(8)**, 1209-1222.
- [3] P. A Brown, S. A. Gill and S. J. Allen, (2000). Review paper metal removal from wastewater using peat. *Wat. Res.*, **34(16)**, 3907-3916.
- [4] M. Calderol, C. Moraga, J. Leal, L. Agouborde, R. Navia, G. Vidal, (2008). The use of Magallanic peat as non-conventional sorbent for EDTA removal from wastewater. *Bioresource Technology*, **99(17)**, 8130-8136.
- [5] D. Couillard, (1994). Review the use of peat in wastewater treatment. *Wat. Res.*, **28(6)**, 1261-1274.
- [6] A. N. Fernandes, C. A. P. Almeida, N. A. Debacher, M. M. Souza Siera, (2010). Isotherm and thermodynamic data of adsorption of methylene blue from aqueous solution onto peat. *Journal of Molecular Structure*, **982(62-63)**, 62 – 65.
- [7] C. Gabaldon, P. Marzal, F. J. A. Hornos, (2006). Modelling Cd(II) removal from aqueous solutions by adsorption on a highly mineralized peat. Batch and fixed-bed column experiments. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **81(7)**, 1107 - 1112.
- [8] Y. S. Ho, G. McKay, (1998). Sorption of dye from aqueous solution by peat. *Chemical Engineering Journal*, **70(2)**, 115-124.
- [9] Y. Kalmykova, A. M. Stromvall, B. M. Steenari, (2008). Adsorption of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn on Sphagnum peat from solutions with low concentrations. *Journal of Hazardous Materials*, **152(2)**, 885-891.
- [10] A. R. Kul, H. Koyuncu, (2010). Adsorption of Pb(II) ions from aqueous solution by native and activated bentonite: Kinetic, equilibrium and thermodynamic study. *Journal of Hazardous Materials*, **179(1-3)**, 332-339.
- [11] T. Leiviskä, M. K. Khalid, H. Gogoi & J. Tanskanen, (2017). Enhancing peat metal sorption and settling characteristics. *Ecotoxicology and environmental safety*, **148**, 346-351.
- [12] M. Maharana, M. Manna, M. Sardar & S. Sen, (2021). Heavy metal removal by low-cost adsorbents. *Green Adsorbents to Remove Metals, Dyes and Boron from Polluted Water*, **49**, 245-272.
- [13] Nguyễn Hữu Đình, Trần Thị Đà, (1999). *Ứng dụng một số phương pháp phổ nghiên cứu cấu trúc phân tử*. Nhà xuất bản Giáo dục.
- [14] Đỗ Trà Hương, (2010). Nghiên cứu khả năng hấp phụ ion Cu^{2+} , Ni^{2+} của than bùn Việt Yên, Bắc Giang. *Tạp chí Khoa học và Công Nghệ*, **71(9)**, 63-67.
- [15] Nguyễn Thị Minh Sáng, Phạm Phương Thảo, Lê Thu Thủy, (2020). Nghiên cứu chế tạo than sinh học từ bã đậu nành để xử lý Cu^{2+} , Pb^{2+} trong nước. *Tạp chí phân tích Hóa, Lý và Sinh học*, **25(2)**, 159-163.