



Sự hấp phụ Cu(II) trong dung dịch nước bằng vật liệu lá thông ba lá *Pinus kesiya* Adsorption of Cu(II) ions from aqueous solutions using *Pinus kesiya* biomass

Huỳnh Phương Thảo^{1,*}, Nguyễn Văn Hạ¹, Nguyễn Ngọc Tuấn², Nguyễn Tiến Đạt²

¹Trường Đại học Đà Lạt, số 01 Phù Đổng Thiên Vương, phường 8, Đà Lạt, Lâm Đồng.

²Viện nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt, số 01 Nguyễn Tử Lực, phường 8, Đà Lạt, Lâm Đồng.

*Email: thaohp@dlu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 25/4/2021

Accepted: 25/8/2021

Published: 15/10/2021

Keywords:

Copper, biosorption, pine leaves biomass, kinetic models, Langmuir isotherm model

ABSTRACT

The present study attempted to analyze the biosorption behavior of pine leaves (*Pinus kesiya*) biomass to remove Cu(II) ions from aqueous solutions. The effects of pH solution, contact time, initial metal concentration and temperature on adsorption capacity were examined in batch experiments. The characterisation studies were carried out using Scanning Electron Microscope (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR). Freundlich and Langmuir isotherm models were used to describe the adsorption behaviour of Cu(II) ions onto pine leaves. The maximum adsorption capacities (q_{max}) estimated from the Langmuir isotherm model were 20.88 mg/g. Adsorption mechanism was explored by Pseudo first-order and Pseudo second-order kinetic models, and it was found that the process followed second order kinetics. This study demonstrates that *P. kesiya* leaves are promising adsorbent for the removal of Cu(II) ions from aqueous solution owing to its high adsorption capacity and, especially, naturally and abundantly available at a low cost.

Giới thiệu chung

Nước từ lâu là một tài nguyên thiên nhiên quý giá, là thành phần chủ yếu của môi trường sống, quyết định sự thành công trong các chiến lược, kế hoạch phát triển kinh tế-xã hội, quốc phòng, an ninh quốc gia. Ngày nay, với sự phát triển kinh tế, khoa học kỹ thuật, với tốc độ công nghiệp hóa, đô thị hóa khá nhanh và sự gia tăng dân số gây áp lực ngày càng nặng nề đối với nguồn tài nguyên nước.

Thực tế hiện nay, tình trạng quy hoạch các khu đô thị chưa gắn liền với vấn đề xử lý chất thải, hầu hết nước thải từ các nhà máy, các cơ sở sản xuất tại các khu công nghiệp, khu chế xuất chỉ được xử lý sơ bộ, thậm

chí thải trực tiếp ra môi trường, hậu quả là gây ô nhiễm môi trường nước nghiêm trọng [1].

Đồng là kim loại nặng gây độc khi ở nồng độ thấp. Đồng được biết đến từ xa xưa và được thừa nhận là một trong những kim loại hữu ích cho con người. Tuy nhiên, bằng cách xâm nhập vào cơ thể người qua đường tiêu hóa, qua da và qua đường hô hấp, lượng đồng trong cơ thể trở nên dư thừa gây ra các triệu chứng như buồn nôn, nặng hơn là phá hủy gan, thận, thậm chí có thể gây tử vong. Vì vậy, việc xử lý các ion kim loại, đặc biệt là ion Cu(II) từ nước thải trước khi thải chúng ra môi trường là vấn đề cấp thiết không chỉ trong nghiên cứu khoa học mà cả trong sản xuất công nghiệp [2].

Trên thực tế, đã có nhiều phương pháp khác nhau nhằm tách loại kim loại nặng ra khỏi môi trường nước, một số phương pháp phổ biến như: phương pháp kết tủa hóa học, trao đổi ion, hấp phụ, thẩm thấu ngược, lọc nano, keo tụ ... Các phương pháp trên thường gặp phải một số nhược điểm chung là giá đầu tư và chi phí vận hành cao, yêu cầu một lượng lớn hóa chất để khử, trung hòa và kết tủa, ngoài ra còn tạo ra một lượng lớn bùn thải khó phân hủy đòi hỏi phải có các bước xử lý tiếp theo. Phương pháp hấp phụ đã được chứng minh là một phương pháp hiệu quả trong việc xử lý nước thải công nghiệp, với các ưu điểm như xử lý hiệu quả kim loại nặng ở nồng độ thấp, thiết kế đơn giản, chi phí đầu tư thấp, dễ vận hành, ít tổn diện tích và đặc biệt không phát sinh bùn thải trong quá trình xử lý [3,4].

Trong các công trình trước, chúng tôi đã công bố khả năng hấp phụ Pb(II), Cd(II) trong môi trường nước bằng vật liệu lá thông ba lá thu tại Đà Lạt. Kết quả cho thấy, loại vật liệu này được xử lý rất đơn giản, chi phí xử lý thấp, khả năng hấp phụ Pb(II), Cd(II) đều rất tốt, >95% [5,6,7]. Trong bài báo này, chúng tôi tiếp tục công bố kết quả nghiên cứu khả năng hấp phụ ion Cu(II) trong môi trường nước bằng vật liệu lá thông ba lá *Pinus kesiya*.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Thiết bị, dụng cụ và hóa chất

Thiết bị và dụng cụ: Máy quang phổ hấp thụ nguyên tử Shimadzu AA – 6800 có đèn catốt rỗng của Cu hấp thụ ở bước sóng $\lambda_{Cu} = 324,8\text{nm}$ tại Trung tâm phân tích – Viện nghiên cứu hạt nhân Đà Lạt; cân phân tích chính xác 0,0001g (Satorius, Đức); máy khuấy từ gia nhiệt (IKA, Đức); lò nung (Nabertherm, Đức); tủ sấy (SheLab, Anh); máy đo pH (Inolab 730, Đức); rây có kích thước: 125 μm và 212 μm ; các ống nghiệm polyetylen (P.E) đựng mẫu, dung tích 10 mL và các dụng cụ thí nghiệm khác.

Hóa chất: Axit nitric HNO_3 ($d=1,35\text{g/ml}$) nồng độ 65%, NaOH, KCl, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, mẫu chuẩn đơn và đa nguyên tố (Merck, Đức).

Chuẩn bị vật liệu

Lá thông sử dụng trong quá trình nghiên cứu là lá thông ba lá (*Pinus kesiya* Royle ex Gordon) được thu thập tại khuôn viên khoa Hóa học và Môi trường – Đại học Đà Lạt.

Đây là những lá thông đã rụng, khô. Lá thông khô được rửa sạch để loại bỏ hoàn toàn bụi và các chất bẩn bám dính, tiến hành ngâm bằng nước sạch trong một ngày. Sau đó rửa lại bằng nước cất đến khi nước rửa không có màu nâu đục, thao tác này nhằm loại bỏ màu của lá thông có thể gây ảnh hưởng đến quá trình xử lý sau này. Mẫu lá thông được cắt nhỏ với kích thước khoảng 2 cm, tiến hành sấy khô ở nhiệt độ 80°C cho đến khối lượng không đổi (24 giờ), sau đó mẫu được nghiền nhỏ và rây để có kích thước trong khoảng: $125\ \mu\text{m} < d \leq 212\ \mu\text{m}$, mẫu được đựng trong lọ plastic, vận chuyển nắp và được bảo quản ở nhiệt độ phòng, trong bình hút ẩm.

Cách tiến hành xác định điểm tích điện không của vật liệu: Cho 0,5 gam vật liệu vào các bình tam giác chứa sẵn 50 ml dung dịch KCl 0,1M có các giá trị pH_i tương ứng 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 rồi đậy kín, khuấy với tốc độ 150 vòng/phút trong 24 giờ. Sau đó, lọc lấy dung dịch và đo giá trị pH (gọi là pH_i).

Thí nghiệm hấp phụ

Để khảo sát khả năng hấp phụ ion Cu(II) của vật liệu, chúng tôi sử dụng phương pháp hấp phụ tĩnh.

Cân 0,5 gam vật liệu lá thông cho vào các bình tam giác có chứa 50 mL dung dịch ion Cu(II) có nồng độ C_0 . Điều chỉnh pH trong khoảng từ 2 đến 8; tiến hành khuấy với tốc độ 150 phút/vòng trong thời gian từ 10 đến 240 phút. Sau đó lọc lấy dung dịch để xác định nồng độ ion Cu(II) còn lại, từ đó tính được lượng ion Cu(II) bị hấp phụ. Lượng ion Cu(II) hấp phụ trên vật liệu được đánh giá thông qua thông số dung lượng hấp phụ q (mg/g) hoặc hiệu suất hấp phụ H (%).

Dung lượng hấp phụ (hấp dung) được xác định bằng biểu thức:

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

Hiệu suất hấp phụ của vật liệu được xác định bằng biểu thức:

$$H = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$

Trong đó:

q là dung lượng hấp phụ (mg/g),

C_0 nồng độ ion kim loại ban đầu trong dung dịch (mg/L).

C_e nồng độ ion kim loại còn lại trong dung dịch sau khi hấp phụ (mg/L).

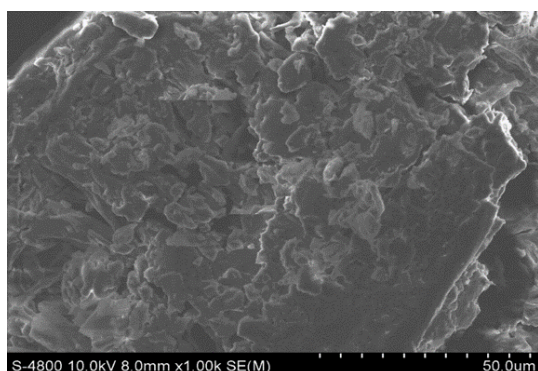
m là khối lượng chất hấp phụ đã dùng (g)

V là thể tích dung dịch (L).

Kết quả và thảo luận

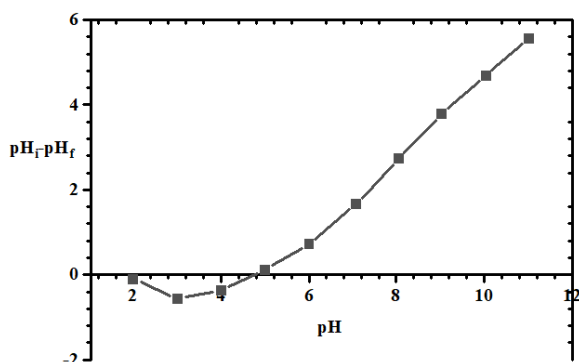
Đặc trưng cấu trúc của vật liệu

Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) của lá thông được trình bày trong Hình 1 cho thấy vật liệu có bề mặt gồ ghề, không đồng nhất và có nhiều lỗ xốp tạo điều kiện lưu giữ các ion kim loại trên bề mặt vật liệu.



Hình 1: Ảnh SEM của vật liệu

Kết quả xác định pH_{pzc} của vật liệu được cho ở Hình 2. Kết quả thu được cho phép dự đoán điểm điện tích không của vật liệu ở khoảng 4,5.

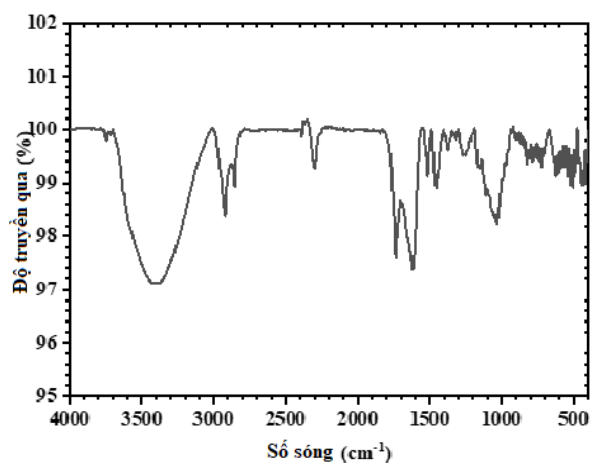


Hình 2: Đồ thị xác định pH_{pzc} của vật liệu

Như vậy, khi pH của dung dịch nhỏ hơn pH_{pzc} thì bề mặt của vật liệu hấp phụ mang điện tích dương và sẽ hấp phụ anion tốt hơn. Ngược lại, nếu pH dung dịch lớn hơn pH_{pzc} , bề mặt vật liệu mang điện tích âm và sẽ hấp phụ cation tốt hơn. pH_{pzc} là một yếu tố xác nhận khả năng hấp phụ ion kim loại trong điều kiện các tâm hấp phụ trên bề mặt chất hấp phụ mang điện tích trái dấu với điện tích của ion kim loại. Do đó, dựa vào pH_{pzc} có thể dự đoán khả năng hấp phụ của vật liệu đối với các dạng tồn tại của ion kim loại ở giá trị pH bất kỳ [5].

Phổ hồng ngoại FTIR (Hình 3) được dùng để giải thích cấu trúc của vật liệu. Dải rộng tại $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ cho

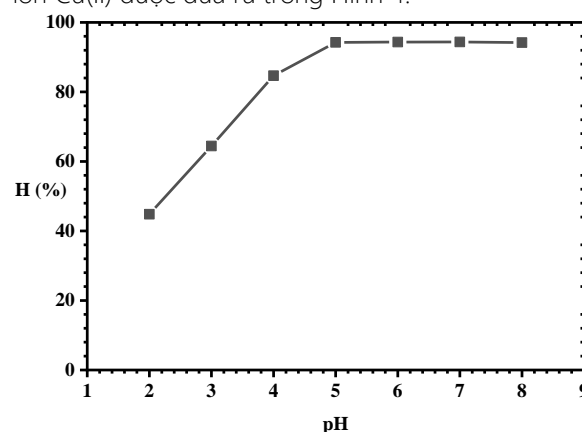
thấy nhóm OH bị kéo căng. Dải cường độ thấp hơn tại $2925-2913\text{ cm}^{-1}$ cho thấy sự dao động của nhóm CH_2 liên kết với gốc methyl và metylen, dao động biến dạng của liên kết C–H. Tại khoảng 1735 cm^{-1} có sự dao động của nhóm C=O của nhóm cacbonyl có trong hemicellulose và vùng giữa $1630-1600\text{ cm}^{-1}$ biểu hiện liên kết C=C kéo căng của vòng thơm và liên kết C=C. Dải $1400-1300\text{ cm}^{-1}$ biểu hiện dao động của nhân thơm và vòng gắn với nhóm C–O trong lignin. Tại 1035 cm^{-1} cho thấy sự biến dạng của liên kết C–H và C–O của cellulose, hemicellulose và lignin hoặc dao động hóa trị C–O–C trong cellulose và hemicellulose, cũng có thể là sự có mặt của liên kết C–N của amin. Vùng $663-653\text{ cm}^{-1}$ cho thấy cấu trúc của vòng thơm [8].



Hình 3: Phổ hồng ngoại của vật liệu

Ảnh hưởng của pH dung dịch

Kết quả khảo sát ảnh hưởng của pH đến sự hấp phụ ion Cu(II) được đưa ra trong Hình 4.



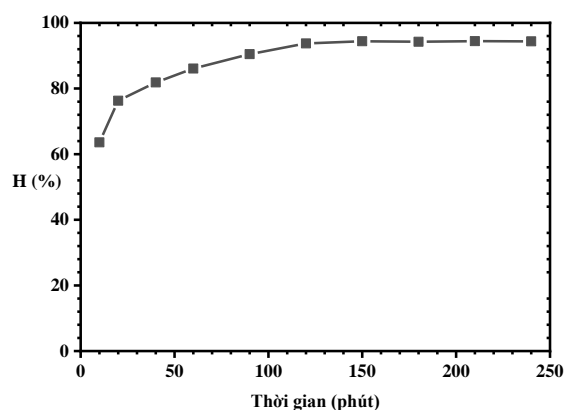
Hình 4: Ảnh hưởng của pH đến hiệu suất hấp phụ ion Cu(II) (thời gian khuấy 180 phút, nồng độ ion Cu(II) ban đầu 50 mg/L)

Kết quả thực nghiệm cho thấy hiệu suất hấp phụ tăng khi tăng pH từ 2 đến 4 và đạt hiệu suất cao trong

khoảng pH từ 5 đến 6. Trong môi trường pH thấp hơn pH_{pzc} , bề mặt vật liệu dễ bị proton hóa dẫn đến mang tích điện dương, lực tương tác giữa chất hấp phụ và chất bị hấp phụ là lực đẩy tĩnh điện, làm cản trở quá trình hấp phụ các ion này lên bề mặt vật liệu. Khi pH tăng dần, nồng độ ion OH^- cũng tăng dần, sự hấp phụ cạnh tranh giữa các cation kim loại với ion H^+ giảm. Mặt khác, pH dung dịch lớn thì điện tích âm trên bề mặt vật liệu tăng lên, làm tăng lực hút tĩnh điện giữa chất hấp phụ và chất bị hấp phụ, dẫn đến sự hấp phụ ion kim loại tăng. Tuy nhiên, tăng pH lên giá trị cao hơn $pH > 6$ sẽ làm xuất hiện kết tủa hydroxit, ảnh hưởng đến hiệu suất hấp phụ [9,10]. Giá trị $pH=5$ (hiệu suất hấp phụ đạt 94,24%) được lựa chọn cho các thí nghiệm tiếp theo.

Xác định thời gian đạt cân bằng hấp phụ

Kết quả khảo sát ảnh hưởng của thời gian đến sự hấp phụ ion Cu(II) được đưa ra trong Hình 5.



Hình 5: Ảnh hưởng của thời gian đến hiệu suất hấp phụ ion Cu(II) ($pH=5$, nồng độ ion Cu(II) ban đầu 50 mg/L)

Kết quả thực nghiệm được biểu diễn ở Hình 5. Cho thấy hiệu suất hấp phụ tăng nhanh ở vùng 10-80 phút; sau khoảng 120-150 phút, hiệu suất hấp phụ thay đổi không đáng kể, đồ thị là đường thẳng nằm ngang, chứng tỏ sự hấp phụ đã đạt cân bằng [11]. Do đó, thời gian hấp phụ là 120 phút được lựa chọn cho các thí nghiệm tiếp theo.

Nghiên cứu động học của quá trình hấp phụ

Mô hình động học biểu kiến bậc nhất là:

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - \frac{k_1}{2.303} t$$

Mô hình động học biểu kiến bậc hai là:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

Trong đó q_e và q_t lần lượt là dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng và tại thời điểm t (mg/g), k_1 là hằng số tốc độ biểu kiến bậc nhất (phút^{-1}), k_2 là hằng số tốc độ biểu kiến bậc hai (g/mg.phút). Kết quả khảo sát động học hấp phụ ion Cu(II) bằng vật liệu lá thông được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1: Các tham số động học hấp phụ ion Cu(II) bằng lá thông

Động học bậc 1	R^2	0,8735
	$q_{e,cal}$ (mg/g)	1,1243
	k_1 (phút^{-1})	0,0136
$q_{e,exp}$ (mg/g)		4,72
Động học bậc 2	R^2	0,9998
	$q_{e,cal}$ (mg/g)	4,8614
	k_2 (g/mg.phút)	0,0338

Từ kết quả nghiên cứu cho thấy, mô hình động học bậc hai có hệ số hồi quy ($R^2 > 0,99$) cao hơn mô hình động học bậc nhất. Dung lượng hấp phụ q_e tính toán từ phương trình động học bậc hai là 4,8614 mg/g chênh lệch không đáng kể so với kết quả thực nghiệm. Như vậy, mô hình động học biểu kiến bậc hai mô tả phù hợp hơn quá trình hấp phụ ion Cu(II) của vật liệu lá thông [12]. Do đó, có thể dự đoán quá trình hấp phụ ion Cu(II) bởi vật liệu lá thông chủ yếu là quá trình hóa học liên quan đến việc tạo phức giữa các ion kim loại với các nhóm chức trên bề mặt vật liệu [11].

Nghiên cứu cân bằng hấp phụ đẳng nhiệt

Nghiên cứu cân bằng hấp phụ đẳng nhiệt được tiến hành với các nồng độ đầu khác nhau của ion Cu(II). Các yếu tố ảnh hưởng khác như $pH=5$, thời gian khuấy 120 phút, lượng chất hấp phụ là 0,5 g được giữ nguyên không đổi trong suốt quá trình tiến hành thí nghiệm.

Mô hình đường đẳng nhiệt Langmuir:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_{max}} + \frac{1}{q_{max}} C_e$$

Trong đó, q_e (mg/g) là lượng chất tan bị hấp phụ tại thời điểm cân bằng của mỗi thí nghiệm, q_{max} (mg/g) là lượng chất tan bị hấp phụ cực đại ứng với trường hợp tất cả các tâm trên bề mặt chất hấp phụ đã bị chiếm, K_L là hằng số hấp phụ Langmuir (L/mg), C_e là nồng độ chất bị hấp phụ trong pha lỏng tại thời điểm cân bằng (mg/L).

Dựa vào mô hình đẳng nhiệt Langmuir có thể xác định được khả năng hấp phụ tối đa (q_{max}) trên bề mặt đơn lớp của vật liệu.

Từ giá trị của K_L có thể xác định hằng số tách R_L thông qua biểu thức:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0}$$

Giá trị R_L sẽ cho biết sự thuận lợi của quá trình hấp phụ.

$R_L = 0$: quá trình hấp phụ là một chiều

$R_L > 1$: quá trình hấp phụ là không thuận lợi

$0 < R_L < 1$: quá trình hấp phụ là thuận lợi

$R_L = 1$: quá trình hấp phụ là tuyến tính

Mô hình đẳng nhiệt Freundlich: quan hệ giữa dung lượng hấp phụ cân bằng và nồng độ cân bằng của chất bị hấp phụ được biểu diễn với dạng tuyến tính theo phương trình:

$$\lg q_e = \frac{1}{n} \lg C_e + \lg K_F$$

Trong đó, K_F là hằng số Freundlich và $1/n$ là hệ số đặc trưng cho tính không đồng nhất của bề mặt chất hấp phụ.

Kết quả thực nghiệm nghiên cứu cân bằng hấp phụ đẳng nhiệt được trình bày ở Bảng 2.

Bảng 2: Các thông số đẳng nhiệt hấp phụ ion Cu(II) theo Langmuir và Freundlich

Mô hình Langmuir	q_{\max} (mg/g)	20,88
	K_L (L.mg)	0,0858
	R_L	0,1896
	R^2	0,9916
Mô hình Freundlich	K_F (L ⁿ .g)	3,7897
	n	2,6483
	R^2	0,9256

Từ phương trình đẳng nhiệt hấp phụ Freundlich dạng tuyến tính, giá trị n thu được nằm trong khoảng từ 1÷10 là khoảng thuận lợi cho sự hấp phụ, chứng tỏ là thông là vật liệu hấp phụ tốt ion Cu(II) [10,13].

Từ phương trình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir dạng tuyến tính, xác định dung lượng hấp phụ cực đại của ion Cu(II) là 20,88 mg/g. Giá trị R_L nằm trong khoảng $0 < R_L < 1$ cho thấy quá trình hấp phụ là thuận lợi [12].

Sự hấp phụ các ion Cu(II) của vật liệu hấp phụ từ lá thông được miêu tả khá tốt theo 2 mô hình. Tuy nhiên, hệ số hồi quy của phương trình Langmuir lớn hơn so với hệ số hồi quy của phương trình Freundlich, chứng tỏ sự hấp phụ các ion kim loại ion Cu(II) theo mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir phù hợp hơn so với mô hình Freundlich.

Nghiên cứu nhiệt động học hấp phụ

Việc tính toán các tham số nhiệt động học cũng được dùng để khẳng định lại bản chất của quá trình hấp phụ [14]. Các tham số này bao gồm biến thiên năng lượng tự do Gibbs (ΔG), biến thiên entanpi (ΔH) và biến thiên entropi (ΔS).

$$\Delta G = -RT \ln K_C$$

$$K_C = K_L \cdot 1000 \cdot 55,5 \cdot M$$

Sự thay đổi của entropi theo nhiệt độ được xác định dựa vào phương trình Van't Hoff.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Mối quan hệ giữa hằng số cân bằng K_L và entanpi được xác định theo phương trình của Clausius-Clapeyron:

$$\ln K_C = -\frac{\Delta G}{RT} = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT}$$

trong đó,

K_C (L/mol) là hằng số cân bằng của quá trình hấp phụ

K_L (L/mg) là hằng số cân bằng hấp phụ Langmuir,

M (g/mol) là khối lượng nguyên tử của ion kim loại

T (K) là nhiệt độ dung dịch,

R là hằng số khí (8,314 J/mol.K)

Bảng 3: Các thông số nhiệt động học hấp phụ ion Cu(II)

Nhiệt độ (K)	ΔG (kJ/mol)	ΔH (kJ/mol)	ΔS (J/mol.K)
303	-32,63	0,42	109,06
313	-33,72		
323	-34,81		

ΔG có giá trị âm ở các nhiệt độ nghiên cứu và giá trị âm càng âm khi nhiệt độ dung dịch tăng chứng tỏ quá trình hấp phụ tự xảy ra và tăng theo nhiệt độ. Giá trị ΔH dương cho biết quá trình hấp phụ các ion kim loại lên vật liệu lá thông là quá trình thu nhiệt. ΔS có giá trị dương cho thấy quá trình hấp phụ các ion làm tăng mức độ hỗn loạn trên bề mặt phân cách pha rắn – lỏng, nghĩa là các ion kim loại tập trung nhiều trên bề mặt chất hấp phụ [13,14].

Kết luận

Đã nghiên cứu hình thái học, định tính và phân tích những nhóm chức chủ yếu có thể tham gia vào quá

trình hấp phụ kim loại của vật liệu lá thông và xác định điểm đẳng điện của vật liệu khoảng 4,5.

Khả năng hấp phụ ion Cu(II) của vật liệu lá thông đạt hiệu quả tốt nhất tại pH=5, thời gian đạt cân bằng hấp phụ là 120 phút với hiệu suất hấp phụ 94,24%.

Động học hấp phụ tuân theo phương trình động học bậc 2. Sự hấp phụ các ion Cu(II) của vật liệu hấp phụ từ lá thông theo mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir phù hợp hơn so với mô hình Freundlich. Dung lượng hấp phụ cực đại ion Cu(II) trên vật liệu là 20,88 mg/g.

Các tham số nhiệt động học tính toán được đã khẳng định bản chất của quá trình hấp phụ ion Cu(II) trên vật liệu lá thông là quá trình thu nhiệt, tự xảy ra tại nhiệt độ nghiên cứu.

Tài liệu tham khảo

1. Benaïssa H. and Elouchdi M.A., Chemical Engineering and Processing 46 (2007) 614-622. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.08.006>
2. Qiaoqiao Zhou, Nan Yang, Youzhi Li, Bo Ren, et al, Global Ecology and Conservation 22 (2020) e00925. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925>
3. Hansen H. K., Arancibia F. and Gutiérrez C, Journal of Hazardous Materials, 180(1) (2010) 442-448. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.050>
4. Barakat M.A, Arabian Journal of Chemistry 4 (2011) 361-377. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>
5. Phuong-Thao Huynh, Ngoc-Tuan Nguyen, Ha Nguyen Van, Phuong-Tung Nguyen, Trinh Duy Nguyen, Van-Phuc Dinh, Desalination and Water Treatment 173 (2020) 383-393. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.24807>
6. Huynh Phuong Thao, Tran Duc Tiep, Nguyen Van Ha, Nguyen Ngoc Tuan, Do Tam Nhan, Journal of chemistry 55(3e12) (2017) 162-166.
7. Huynh Phuong Thao, Nguyen Van Ha, Nguyen Ngoc Tuan, VietNam Analytical Sciences Society 24(1) (2019) 46-49.
8. HaipingYang, Rong Yan, Hanping Chen, Dong Ho Lee, Chuguang Zheng, Fuel 86 (2007) 1781-1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
9. Asgarzadeh S., Rostamian R., Faez E., Maleki A. Hiua D., Desalination and Water Treatment 57(31) (2015) 1-8. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1067831>
10. Lasheen M.R., Ammar N.S. and Ibrahim H.S, Solid State Sci 14(2) (2012) 202-210. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2011.11.029>
11. Malik D. S., JainAnuj C. K. and Yadav K, Applied Water Science 7(5) (2017) 2113-2136. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0401-8>
12. Wan-Chi Tsai, Sonia Ibarra-Buscano, Chi-Chuan Kan, Cybelle Morales Futralan, et al, Desalination and Water Treatment 57(21) (2016) 9799-9812. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1035676>
13. Nthiga Esther Wanja, Jane Murungi, Ahmed Hassan Ali and Ruth Wanjau, International Journal of Science and Research 5(8) (2016) 671-679. <https://doi.org/10.21275/ART2016929>
14. Xueyong Zhou and Xin Zhou, Chem Eng Commun, 201(11) (2014) 1459-1467. <https://doi.org/10.1080/00986445.2013.818541>