



Nghiên cứu đẳng nhiệt quá trình hấp phụ Pb(II) bởi vật liệu than sinh học từ bã cà phê Investigation of the Pb(II) adsorption from aqueous solution using biochar derived from ground coffee

Lê Nguyễn Quang Tú^{1,2}, Nguyễn Thị Phương Tú^{1,2}, Dương Bích Ngọc^{1,2},
Phạm Nguyễn Kim Tuyến³, Đinh Văn Phúc^{1,2,*}

¹ Viện Khoa học liên ngành, trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

² Trung tâm Phát triển Công nghệ cao Đại học Nguyễn Tất Thành, Khu Công nghệ cao Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam.

³ Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, trường Đại học Sài Gòn, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

* Email: dvphuc@ntt.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 28/07/2027

Accepted: 19/9/2026

Published: 30/9/2026

Keywords:

Biochar; biosorption;
Pb(II); ground coffee.

ABSTRACT

The adsorption of Pb(II) onto ground coffee-derived biochar from aqueous solution was studied. The prepared biochar was characterised using XRD, BET, FT-IR, and SEM. Effects of pH, adsorption time and initial concentration of Pb(II) were studied. The obtained results show that at an initial Pb(II) concentration of 48 mg/L and pH 5.5 (307 K), the adsorption reached equilibrium after 90 min with a removal efficiency of approximately 52%. The experimental data fitted best the Redlich-Peterson isotherm model, followed by the Langmuir, Temkin and Freundlich models, respectively. The maximum adsorption capacity calculated from the Langmuir model at 307K was 13.04 mg/g. These results indicate that ground coffee is a friendly, inexpensive and potential raw material for the preparation of biochar used as a bio-adsorbent to remove Pb(II) from effluent.

Giới thiệu chung

Sự tích tụ ion kim loại nặng trong môi trường nước do hoạt động công nghiệp hóa là một trong những thách thức môi trường nghiêm trọng [1]. Trái ngược với các hợp chất hữu cơ dễ bị phân hủy sinh học, ion chì (Pb(II)) có độ bền hóa học cao, không bị phân hủy sinh học và tích lũy sinh học qua chuỗi thức ăn [2]. Pb(II) được các cơ quan quản lý môi trường xếp vào nhóm độc tính cao, gây tổn thương hệ thần kinh trung ương, suy giảm chức năng thận, ức chế quá trình tổng hợp huyết cầu tố và ảnh hưởng tiêu cực đến sự phát triển thần kinh ở trẻ em [2]. Do đó, việc nghiên cứu các kỹ thuật xử lý Pb(II) hiệu quả từ nước thải trước khi xả thải ra nguồn tiếp nhận là bắt buộc.

Trong các công nghệ xử lý nước thải, phương pháp hấp phụ thể hiện nhiều ưu điểm về mặt kỹ thuật nhờ quy trình vận hành đơn giản, hiệu suất phân tách cao và khả năng hạn chế bùn thải thứ cấp [3]. Hiệu quả kinh tế - kỹ thuật của phương pháp này phụ thuộc vào việc phát triển vật liệu hấp phụ chi phí thấp, tính tái sử dụng cao từ phế phụ phẩm nông nghiệp [4]. Tại Việt Nam, quá trình chế biến và tiêu dùng cà phê phát thải lượng lớn bã cà phê (spent coffee grounds - SCG) [5]. Việc thải bỏ SCG không qua xử lý gây lãng phí nguồn carbon hữu cơ và gia tăng phát thải khí nhà kính (chủ yếu là CH₄) trong quá trình phân hủy yếm khí tại các bãi chôn lấp.

Thành phần cấu tạo của bã cà phê thô là sinh khối lignocellulose phức hợp, gồm 30–40% hemicellulose, 8–

15% cellulose, 20–30% lignin, cùng các hợp chất protein và lipid [5]. Cấu trúc này chứa các nhóm chức phân cực chứa oxy như hydroxyl, carboxyl và carbonyl. Thông qua quá trình nhiệt phân trong điều kiện thiếu oxy, SCG được chuyển hóa thành than sinh học (biochar) có mạng lưới carbon vô định hình ổn định, độ xốp bề mặt phát triển và duy trì các nhóm chức hoạt động trên bề mặt.

Nghiên cứu này trình bày quy trình chế tạo than sinh học từ bã cà phê bằng phương pháp nhiệt phân trong môi trường khí trơ. Đặc tính cấu trúc vi mô của vật liệu được phân tích bằng các phương pháp XRD, BET-BJH, FT-IR và SEM-EDX. Các thông số ảnh hưởng (pH, thời gian tiếp xúc, nồng độ ban đầu của Pb(II)) được khảo sát hệ thống, kết hợp mô hình hóa toán học cân bằng hấp phụ bằng các phương pháp đẳng nhiệt hai và ba thông số.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Nguyên liệu và hóa chất

Bã cà phê được thu gom từ các cửa hàng chế biến đồ uống tại Thành phố Hồ Chí Minh. Nguyên liệu thô được rửa sạch nhiều lần bằng nước cất ở nhiệt độ 80 °C nhằm loại bỏ hoàn toàn các tạp chất hữu cơ hòa tan, caffeine và lượng dầu béo tự do bám trên bề mặt. Sau đó, bã cà phê được sấy khô ở nhiệt độ 90 °C trong vòng 24 giờ và bảo quản trong bình hút ẩm.

Các hóa chất sử dụng trong nghiên cứu bao gồm chì nitrat ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), axit clohydric (HCl), natri hydroxit (NaOH) đều thuộc dạng tinh khiết phân tích (Merck, Đức). Nước cất hai lần được sử dụng để pha chế tất cả các dung dịch thực nghiệm.

Tổng hợp vật liệu

Quá trình nhiệt phân bã cà phê được thực hiện trong lò nung ở nhiệt độ ổn định 500 °C trong 2 giờ ở điều kiện kỵ khí. Than sinh học thô sau khi nguội được rửa bằng dung dịch HCl 0,1M để loại bỏ tạp chất tro vô cơ hòa tan và giải phóng các mao quản bị tắc nghẽn. Tiếp theo, vật liệu được rửa sạch bằng nước cất hai lần đến khi nước rửa đạt pH trung hòa. Than sinh học bã cà phê sau tinh chế được sấy khô ở 80 °C, nghiền nhỏ và lưu trữ trong bình thủy tinh khô trước khi đưa vào sử dụng.

Quy trình và phương pháp nghiên cứu

Các thí nghiệm hấp phụ dạng mẻ được tiến hành bằng cách cho 0,1 g than sinh học bã cà phê vào các bình chứa 50 mL dung dịch Pb(II) có nồng độ ban đầu cần khảo sát. Độ pH ban đầu của hệ được điều chỉnh chính xác bằng dung dịch HNO_3 hoặc NaOH loãng. Các bình chứa dung dịch và vật liệu được đặt vào máy lắc nhiệt độ ổn định ở tốc độ 150 vòng/phút.

Quá trình khảo sát các yếu tố ảnh hưởng được thực hiện theo nguyên tắc thay đổi một biến số vận hành và cố định các thông số còn lại, bao gồm: (i) pH dung dịch (từ 2,0 đến 5,5); (ii) thời gian tiếp xúc (từ 5 đến 480 phút); và (iii) nồng độ Pb(II) ban đầu (từ 15 đến 60 mg/L) tại nhiệt độ 307K.

Sau khi đạt thời gian hấp phụ thiết lập, hỗn hợp được ly tâm để tách hoàn toàn pha rắn. Nồng độ Pb(II) còn lại trong pha lỏng được đo bằng phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử (AAS). Dung lượng hấp phụ cân bằng q_e (mg/g) được tính toán theo công thức:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

Trong đó: C_0 và C_e lần lượt là nồng độ Pb(II) ban đầu và tại trạng thái cân bằng (mg/L); V là thể tích dung dịch (L); m là khối lượng than sinh học khô sử dụng (g).

Các phương pháp phân tích

Cấu trúc pha và độ vô định hình của than sinh học bã cà phê được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) trên thiết bị sử dụng bức xạ Cu- K_α ($\lambda = 0,15406$ nm). Các nhóm chức hóa học đặc trưng trên bề mặt vật liệu được nhận diện bằng phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR) trong dải số sóng 4000 – 400 cm^{-1} bằng kỹ thuật ép viên với KBr. Hình thái bề mặt được quan sát trực tiếp bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM). Diện tích bề mặt riêng được xác định dựa trên đường đẳng nhiệt hấp phụ-giải hấp phụ khí nitơ ở nhiệt độ hóa lỏng thông qua mô hình toán học Brunauer-Emmett-Teller (BET).

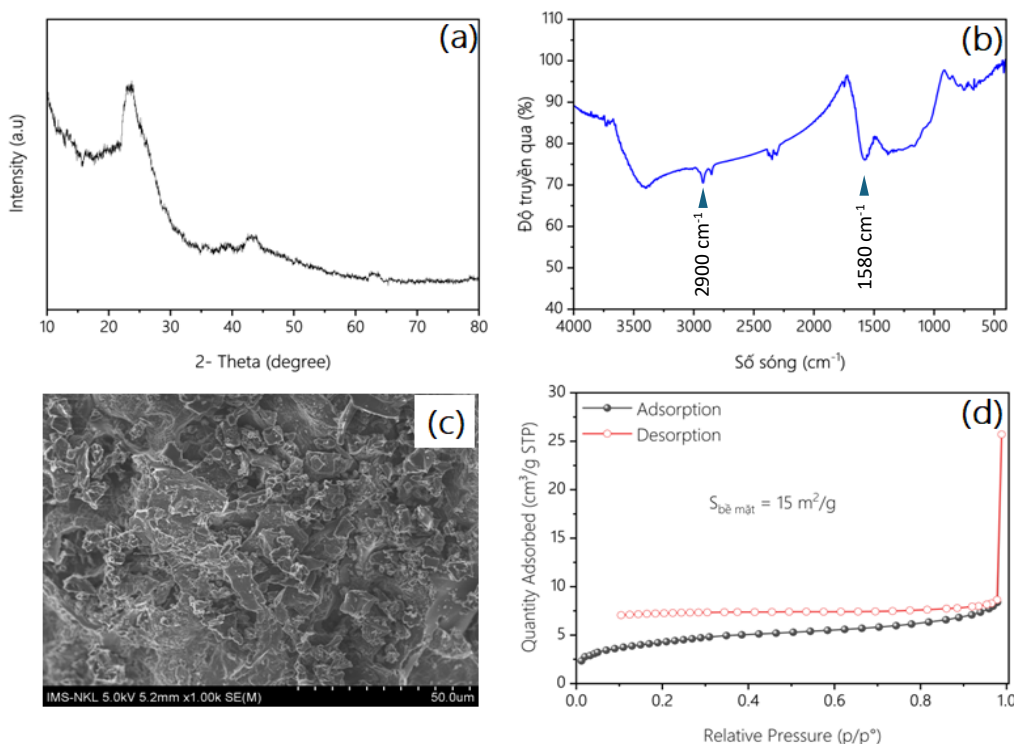
Kết quả và thảo luận

Các đặc trưng hóa lý của vật liệu than sinh học tổng hợp từ bã cà phê

Kết quả phân tích đặc trưng vật liệu than sinh học từ bã cà phê gồm cấu trúc, hình thái bề mặt và các dao động của các nhóm chức đặc trưng được thể hiện trong Hình 1. Cụ thể, giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) ở Hình 1a xuất hiện hai đỉnh nhiễu xạ tù rộng đặc trưng tại góc $2\theta \approx 23^\circ$ và 43° , phản ánh cấu trúc vô định hình với sự sắp xếp bất trật tự của các lớp carbon kiểu graphite [6]. Trên phổ FT-IR ở Hình 1b, dải hấp thụ rộng quanh vùng 3400 cm^{-1} đặc trưng cho dao động kéo giãn của nhóm hydroxyl ($-\text{OH}$), trong khi các đỉnh tại vùng 2900 cm^{-1} và 1580 cm^{-1} tương ứng với liên kết C–H aliphatic và liên kết đôi C=C hoặc C=O trên bề mặt than. Ảnh kính hiển vi điện tử quét (SEM) ở Hình 1c cho thấy bề mặt vật liệu gồ ghề, xuất hiện nhiều mảng mảnh vỡ liên kết không đều và các lỗ xốp phân bố rải rác, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hấp phụ. Bên cạnh đó, đường đẳng nhiệt hấp phụ - giải hấp N_2 ở Hình 1d mang đặc trưng

của đường đẳng nhiệt loại IV (theo phân loại IUPAC) với vòng trễ (hysteresis loop) xuất hiện ở dải áp suất tương đối 15 m²/g. Giá trị này phù hợp với đặc trưng của than

sinh học nhiệt phân thông thường khi chưa trải qua quá trình kích hoạt hoá học hay vật lý chuyên sâu để mở rộng vi mao quản [7].



Hình 1: Kết quả phân tích đặc trưng của than sinh học bã cà phê: XRD (a); FT-IR (b); Ảnh SEM (c) và Diện tích bề mặt BET (d)

Ảnh hưởng của pH dung dịch ban đầu và thời gian đến quá trình hấp phụ

Ảnh hưởng của pH dung dịch

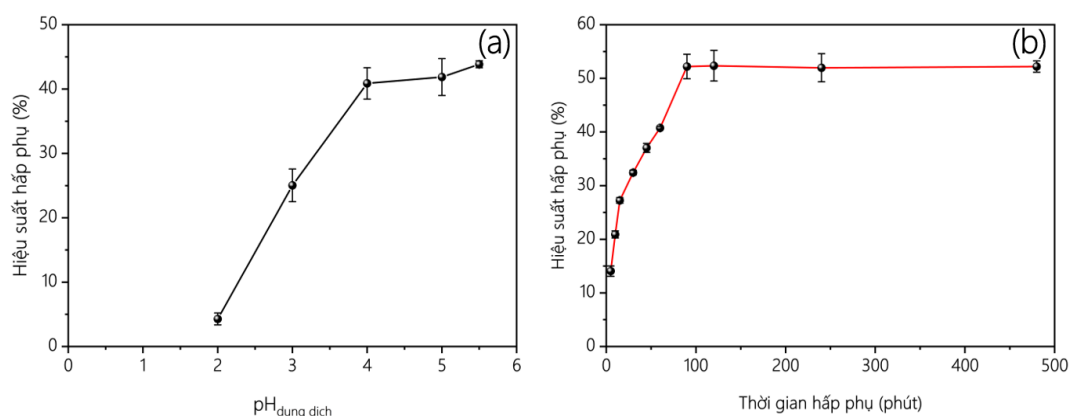
Giá trị pH của môi trường nước có ảnh hưởng mang tính quyết định đến trạng thái tồn tại của ion Pb(II) và trạng thái của các nhóm chức trên bề mặt của than sinh học bã cà phê. Kết quả ở Hình 2a cho thấy hiệu suất hấp phụ Pb(II) gia tăng rõ rệt từ dưới 5% lên xấp xỉ 44% khi pH dung dịch tăng từ 2,0 đến 5,5. Tại các giá trị pH > 5,5, ion Pb(II) có xu hướng chuyển hoá thành kết tủa hydroxide Pb(OH)₂ và dạng phức tan Pb(OH)⁺, làm sai lệch cơ chế hấp phụ thực tế. Do đó, dải pH từ 2,0 đến 5,5 được lựa chọn để đánh giá.

Ở vùng pH axit mạnh (pH 2,0 – 3,0), hiệu suất hấp phụ đạt giá trị rất thấp. Điều này là do nồng độ ion H₃O⁺ (hoặc H⁺) trong dung dịch rất cao, chiếm giữ ưu tiên và cạnh tranh gay gắt với các cation Pb²⁺ tại các vị trí liên kết [8]. Đồng thời, môi trường giàu proton khiến các nhóm chức chứa oxy trên bề mặt vật liệu (như –COOH và –OH) bị proton hoá thành các dạng mang điện tích dương (–COOH₂⁺ và –OH₂⁺), tạo ra lực đẩy tĩnh điện đáng kể đối với cation Pb²⁺, cản trở quá trình tiếp cận bề mặt [9].

Khi tăng pH lên khoảng 5,0 – 5,5, nồng độ H₃O⁺ tự do giảm mạnh, làm suy yếu sự cạnh tranh ion. Đồng thời, các nhóm chức axit yếu trên bề mặt than trải qua quá trình khử proton (deproton hoá) để trở thành các dạng phối trí thuận lợi hơn. Hiện tượng này làm giảm lực đẩy tĩnh điện và thúc đẩy tương tác tĩnh điện, tạo điều kiện thuận lợi cho cơ chế trao đổi ion và tạo phức bề mặt giữa cation Pb²⁺ với các nhóm chức chứa oxy. Do đó, giá trị pH 5,5 được xác định là thông số tối ưu cho các thí nghiệm đẳng nhiệt tiếp theo.

Ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc

Ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc đến quá trình hấp phụ Pb(II) bởi than sinh học được thể hiện trong Hình 2b. Trong khoảng 60 phút đầu, quá trình hấp phụ diễn ra rất nhanh khi hiệu suất tăng mạnh từ khoảng 14% lên hơn 40%. Tốc độ gia tăng nhanh này được giải thích là do sự sẵn có của lượng lớn các vị trí hấp phụ trống trên bề mặt vật liệu cùng chênh lệch nồng độ cao. Từ 90 phút trở đi, quá trình hấp phụ đạt trạng thái cân bằng với hiệu suất loại bỏ Pb(II) xấp xỉ 52%. Việc kéo dài thời gian tiếp xúc đến 480 phút không tạo ra biến động đáng kể do toàn bộ các vị trí hoạt tính bề mặt đã bị lấp đầy.



Hình 2: Ảnh hưởng của pH (a) và thời gian (b) đến quá trình hấp phụ Pb(II) của than sinh học từ bã cà phê

Đẳng nhiệt hấp phụ

Để làm sáng tỏ bản chất tương tác giữa ion Pb(II) và bề mặt than sinh học bã cà phê, dữ liệu thực nghiệm tại nhiệt độ 307K được phân tích và kiểm chứng bằng bốn mô hình đẳng nhiệt, gồm hai mô hình hai thông số (Langmuir, Freundlich) và hai mô hình ba thông số (Redlich-Peterson, Sips). Quá trình làm khớp dữ liệu được thực hiện bằng phương pháp hồi quy phi tuyến tính nhằm bảo toàn cấu trúc sai số thực nghiệm của hệ thống. Các mô hình đẳng nhiệt được mô tả bằng các phương trình toán học sau [10]:

-Mô hình Langmuir: Giả định quá trình hấp phụ xảy ra đơn lớp trên một bề mặt hoàn toàn đồng nhất, nơi năng lượng của tất cả các vị trí hoạt tính là tương đương và không có tương tác giữa các phân tử bị hấp phụ trên các vị trí cạnh nhau.

$$q_e = \frac{Q_L K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

-Mô hình Freundlich: Là phương trình thực nghiệm áp dụng cho quá trình hấp phụ đa lớp trên các bề mặt không đồng nhất, nơi năng lượng liên kết của các vị trí hấp phụ phân bố dạng hàm mũ.

$$q_e = K_F C_e^{1/n}$$

-Mô hình Redlich-Peterson: Là mô hình lai kết hợp các đặc tính của cả Langmuir và Freundlich. Phương trình chứa ba thông số hiệu chỉnh tự do, cho phép mô tả linh hoạt cả các hệ hấp phụ đồng nhất và không đồng nhất.

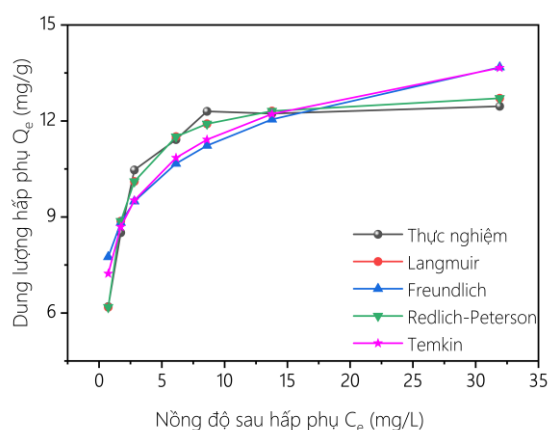
$$q_e = \frac{K_{RP} C_e}{1 + \alpha_{RP} C_e^\beta}$$

-Mô hình Temkin: Mô hình đẳng nhiệt Temkin xem xét đến ảnh hưởng của tương tác gián tiếp giữa các chất hấp phụ/chất bị hấp phụ lên quá trình hấp phụ; đồng thời, mô hình cũng giả định rằng nhiệt hấp phụ của tất cả các phân tử trong lớp giảm tuyến tính do sự gia tăng độ phủ bề mặt

$$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln(A_T C_e)$$

Trong đó, q_e là dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng (mg/g); C_e là nồng độ ion Pb(II) trong pha lỏng tại trạng thái cân bằng (mg/L); Q_L là dung lượng hấp phụ đơn lớp cực đại lý thuyết của vật liệu (mg/g); K_L là hằng số cân bằng Langmuir (L/mg); K_F là hằng số Freundlich ((mg/g)·(L/mg)^{1/n}); n là hằng số thực nghiệm phản ánh cường độ và mức độ thuận lợi của quá trình hấp phụ; K_{RP} là hằng số đẳng nhiệt Redlich-Peterson (L/g); α_{RP} là hằng số hiệu chỉnh của mô hình ((L/mg)^β); β là hệ số mũ không thứ nguyên (0 ≤ β ≤ 1); A_T là hằng số cân bằng liên kết Temkin tương ứng với thể gắn kết cực đại (L/mg); b_T là hằng số liên quan đến nhiệt hấp phụ (J/mol); $B_T = RT/b_T$ là thông số đặc trưng cho sự biến thiên nhiệt hấp phụ (kJ/mol); R là hằng số khí lý tưởng (8,314 J/(mol·K)); T là nhiệt độ tuyệt đối của hệ phản ứng.

Các điểm thực nghiệm (C_e, q_e) thu được từ chuỗi khảo sát nồng độ Pb(II) ban đầu (15-60 mg/L) được biểu diễn trực tiếp trên Hình 3 cùng với các đường khớp mô hình hồi quy phi tuyến tính. Kết quả đánh giá các thông số mô hình cùng các chỉ số kiểm định sai số (R^2 , RMSE, χ^2) được tổng hợp chi tiết trong Bảng 1. Kết quả tính toán các thông số từ các mô hình đẳng nhiệt được trình bày ở Bảng 1 cho thấy mô hình Redlich-Peterson và Langmuir mô tả dữ liệu thực nghiệm một cách vượt trội so với các mô hình còn lại. Với hệ số xác định lần lượt đạt $R^2 = 0,9854$ và $R^2 = 0,9853$, cả hai mô hình này đều thể hiện độ tương quan rất cao với dữ liệu thực nghiệm. Bên cạnh đó, sai số thực nghiệm của mô hình Redlich-Peterson (RMSE = 0,2853; $\chi^2 = 0,046$) và Langmuir (RMSE = 0,2861; $\chi^2 = 0,046$) đều ở mức thấp, khẳng định tính chính xác và độ tin cậy lớn của hai mô hình. Ngược lại, hai mô hình Freundlich và Temkin có hệ số R^2 thấp hơn đáng kể (lần lượt là 0,800 và 0,8641) đi kèm với các chỉ số sai số RMSE và χ^2 lớn hơn rõ rệt. Điểm đặc biệt là trong mô hình Redlich-Peterson, hằng số mũ đạt giá trị $\beta = 1,000$, làm phương trình Redlich-Peterson suy biến hoàn toàn về dạng đẳng nhiệt Langmuir.



Hình 3: Đồ thị các mô hình đẳng nhiệt

Bảng 1: Các thông số đẳng nhiệt hấp phụ Pb(II) lên than sinh học bã cà phê tại nhiệt độ 307K.

Mô hình	Các thông số đẳng nhiệt	
Langmuir	R^2	0,9853
	Q_L	13,04
	K_L	1,23
	RMSE	0,2861
	χ^2	0,046
Redlich-Peterson	R^2	0,9854
	K_{RP}	16,08
	α_{RP}	1,234
	β	1,000
	RMSE	0,2853
Freundlich	χ^2	0,046
	R^2	0,8000
	K_F	8,12
	n	6,64
	RMSE	1,055
Temkin	χ^2	0,753
	R^2	0,8641
	b_T	1,498
	A_T	94,99
	$B_T = RT/b_T$	1,70
	RMSE	0,870
	χ^2	0,469

Dựa trên sự tương thích này cùng các đặc trưng hoá lý của vật liệu, bản chất quá trình lưu giữ ion Pb(II) lên than sinh học bã cà phê được làm sáng tỏ theo các đặc điểm cơ chế sau. Sự phù hợp của mô hình Langmuir xác nhận quá trình hấp phụ xảy ra theo cơ chế đơn lớp trên một bề mặt có các tâm hoạt tính đồng nhất về mặt năng lượng, không có sự tương tác cản trở hay hấp phụ đa

lớp giữa các ion Pb(II) với dung lượng hấp phụ đơn lớp cực đại lý thuyết đạt $Q_L = 13,04$ mg/g. Do diện tích bề mặt riêng của than sinh học thô chỉ đạt 15 m²/g (Hình 1d), quá trình lưu giữ cơ học/vật lý đóng vai trò thứ yếu. Khả năng hấp phụ Pb(II) được chi phối chủ yếu bởi các tương tác hoá học (tạo phức bề mặt và phối trí) giữa ion Pb²⁺ với các cặp electron tự do trên các nhóm chức chứa oxy (như -OH, C=O, C-O) đã được ghi nhận trên phổ FT-IR (Hình 1b). Giá trị thông số Freundlich $n = 6,64$ (tương ứng $1/n = 0,15 < 1$) nằm trong khoảng từ 1 đến 10, kết hợp với thông số năng lượng Temkin $B_T = 1,70$ kJ/mol, khẳng định tương tác giữa ion chì và các vị trí hoạt tính trên bề mặt than sinh học bã cà phê diễn ra rất thuận lợi.

Đánh giá so sánh hiệu quả hấp phụ với các nghiên cứu khác

Bảng 2 so sánh dung lượng hấp phụ cực đại (Q_{max}) của than sinh học từ bã cà phê với các vật liệu hấp phụ có nguồn gốc từ các sinh khối khác. Số liệu so sánh chỉ ra ảnh hưởng của phương pháp chế tạo và nguồn gốc sinh khối đến dung lượng hấp phụ của vật liệu. Than sinh học bã cà phê chưa qua hoạt hóa hóa học trong nghiên cứu này sở hữu dung lượng hấp phụ đạt 13,04 mg/g, cao hơn đáng kể so với bã cà phê (2,46 mg/g).

Bảng 2: So sánh dung lượng hấp phụ Pb(II) cực đại của các vật liệu hấp phụ gốc cà phê và sinh khối khác.

Vật liệu chất hấp phụ	Q_{max} (mg/g)	TLTK
Bã cà phê	2,46	[11]
Vỏ cam	11,41	[12]
Than bã cà phê đã hoạt hoá	67,07	[13]
Than bã cà phê biến tính	229,67	[14]
Than bã cà phê	13,04	Nghiên cứu này

Trong bã cà phê, khả năng hấp phụ thấp do cấu trúc lignocellulose chưa được nhiệt phân, lỗ xốp chưa hình thành và các nhóm chức bị liên kết chặt trong mạng polymer sinh học. Tuy nhiên, khi so sánh với các dòng than hoạt tính bã cà phê được kích hoạt bằng hóa chất mạnh, dung lượng hấp phụ của than sinh học thô vẫn còn khoảng cách lớn. Việc xử lý bằng hóa chất mạnh (KOH, ZnCl₂, H₃PO₄) hoặc biến tính bề mặt tạo ra diện tích bề mặt riêng siêu cao (>500-1000 m²/g) và bổ sung mật độ lớn các nhóm chức tạo phức chuyên biệt, tạo ra bước nhảy vọt về dung lượng hấp phụ. Điều này định hướng nghiên cứu quan trọng trong tương lai, đó là cần áp dụng các biện pháp biến tính bề mặt phù hợp để nâng cấp mạnh mẽ khả năng xử lý của than sinh học bã cà phê.

Kết luận

Nghiên cứu đã tổng hợp thành công vật liệu than sinh học từ nguồn phế phụ phẩm bã cà phê thông qua quá trình nhiệt phân ở 500°C ở điều kiện thiếu oxy. Vật liệu thu được có cấu trúc carbon vô định hình, diện tích bề mặt riêng đạt 15 m²/g, có sự hiện diện của mao quản trung bình và các nhóm chức chứa oxy đặc trưng (-OH, C=O). Thử nghiệm hấp phụ dạng mẻ cho thấy quá trình loại bỏ ion Pb(II) đạt trạng thái cân bằng sau 90 phút tiếp xúc tại giá trị pH tối ưu là 5,5. Đánh giá cân bằng hấp phụ ở 307 K chỉ ra dữ liệu thực nghiệm đạt độ tương thích cao nhất với mô hình đẳng nhiệt Redlich-Peterson và Langmuir, tiếp theo là các mô hình Temkin và Freundlich. Dung lượng hấp phụ đơn lớp cực đại đối với Pb(II) tính toán từ mô hình Langmuir tại 307 K đạt 13,04 mg/g, cao hơn so với 1 số than sinh học từ các nguồn phụ phẩm nông nghiệp khác. Nghiên cứu khẳng định bã cà phê là nguồn nguyên liệu xanh, chi phí thấp và tiềm năng để chế tạo vật liệu hấp phụ sinh học hiệu quả trong xử lý kim loại nặng, đóng góp thiết thực vào phát triển nền kinh tế tuần hoàn. Nghiên cứu này tập trung làm sáng tỏ cân bằng đẳng nhiệt tại nhiệt độ môi trường thực tế (307 K). Các đánh giá mở rộng về hàm nhiệt động học (ΔG° , ΔH° , ΔS°) ở nhiều mức nhiệt độ khác nhau nhằm xác định tính tự phát và hiệu ứng nhiệt của hệ sẽ được tiếp tục triển khai trong các nghiên cứu chuyên sâu tiếp theo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh trong khuôn khổ đề tài mã số [2024.01.105].

Tài liệu tham khảo

1. S. Mishra, R.N. Bharagava, N. More, A. Yadav, S. Zainith, S. Mani, P. Chowdhary, *Environmental biotechnology: For sustainable future*, Springer, Singapore (2018) 103–125. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7284-0_5
2. K. Raj, A.P. Das, *Environ. Chem. Ecotoxicol.*, 5 (2023) 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.02.001>
3. R. Chakraborty, A. Asthana, A.K. Singh, B. Jain, A.B.H. Susan, *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 102 (2022) 342–379. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1722811>
4. A. Demirbas, *J. Hazard. Mater.*, 157 (2008) 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.024>
5. D.C. Vu, Q.T. Vu, L. Huynh, C.-H. Lin, S. Alvarez, X.T. Vo, T.H. Nguyen, *Int. J. Food Prop.*, 24 (2021) 1548–1558. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1977698>
6. M. Burachevskaya, T. Minkina, T. Bauer, I. Lobzenko, A. Fedorenko, M. Mazarji, S. Sushkova, S. Mandzhieva, A. Nazarenko, V. Butova, *Sci. Rep.*, 13 (2023) 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29215-w>
7. A. Kumar, E. Singh, A. Khapre, N. Bordoloi, S. Kumar, *Bioresour. Technol.*, 297 (2020) 122469. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122469>
8. O. Altin, O.H. Ozbelge, T. Dogu, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 74 (1999) 1131–1138. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199912\)74:12<1131::AID-JCTB158>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199912)74:12<1131::AID-JCTB158>3.0.CO;2-0)
9. S. Shi, J. Yang, S. Liang, M. Li, Q. Gan, K. Xiao, J. Hu, *Sci. Total Environ.*, 628 (2018) 499–508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.072>
10. K.Y. Foo, B.H. Hameed, *Chem. Eng. J.*, 156 (2010) 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
11. R. Lavecchia, F. Medici, S. Patterer, A. Zuorro, *Chem. Eng. Trans.*, 47 (2016) 295–300. <https://doi.org/10.3303/CET1647050>
12. Z. Xuan, Y. Tang, X. Li, Y. Liu, F. Luo, *Biochem. Eng. J.*, 31 (2006) 160–164. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.07.001>
13. J.-G. Kim, H.-B. Kim, K. Baek, *Sci. Total Environ.*, 886 (2023) 163891. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163891>
14. J. Hu, S. Yang, P. Ma, Z. Deng, *Desalin. Water Treat.*, 323 (2025) 101262. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.101262>