



Nghiên cứu đẳng nhiệt hấp phụ Ni(II) trong dung dịch bằng than sinh học từ thân cây khoai mì

Investigation of the Ni(II) adsorption isotherm onto biochar derived from cassava stem

Đình Văn Phúc^{1,2,*}, Nguyễn Thành Hưng¹, Trương Thị Thanh Vân³,
 Lê Nguyễn Trung Tín³, Phạm Nguyễn Kim Tuyến^{3,*}

¹ Viện Khoa học liên ngành, trường Đại học Nguyễn Tất Thành

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

³ Khoa Môi trường, trường Đại học Sài Gòn

*Email: dvphuc@ntt.edu.vn, phngktuyen@sgu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 07/09/2025

Accepted: 05/10/2025

Published: 30/12/2025

Keywords:

Cassava stem;
 Biochar;
 Adsorption;
 Wastewater.

ABSTRACT

In this study, biochar was synthesized from Cassava stem via a pyrolysis at 700 °C within 60 minutes. This biochar was used as an adsorbent to remove Ni(II) from an aqueous solution. Effects of pH, adsorption time, and initial concentration of Ni were investigated. Results showed that the adsorption of Ni(II) onto biochar derived from Cassava stem obtained the maximum at pH = 8 and adsorption time = 1080 min with maximum adsorption capacity calculated from Langmuir of 31.77 mg/g. Isotherm and kinetic studies indicated that the Sips model gave the best fit with experimental data. This study shows the potential application of Cassava stem biochar on the treatment of polluted Ni(II) wastewater.

Giới thiệu chung

Sự phát triển của các ngành công nghiệp đã kéo theo một lượng lớn nước thải chứa kim loại nặng được xả thải vào môi trường, gây ra các tác động xấu đối với các hệ sinh vật và con người. Trong số các kim loại nặng, độc, niken là một trong những kim loại có thể gây ảnh hưởng xấu tới môi trường thực vật, động vật và con người. Theo QCVN 08:2023/BTNMT: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt cho biết giá trị giới hạn tối đa của thông số niken ảnh hưởng tới sức khỏe con người là 0,1 mg/L. Thông số được quy định này là thông số có khả năng gây tổn hại sức khỏe khi nước mặt được con người trực tiếp sử dụng (không qua xử lý) cho các mục đích khác nhau [1]. Bên cạnh đó QCVN 40:2011/BTNMT: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về nước thải công nghiệp quy định giá trị niken trong nước thải công nghiệp khi xả vào nguồn

nước được dùng cho mục đích cấp nước sinh hoạt phải đạt 0,2 mg/L [2]. Khi tiếp xúc với nước chứa hàm lượng niken cao có thể bị tức ngực, đổ mồ hôi, hời hợt, chóng mặt, mất ngủ và tiêu chảy [3]. Sự hấp thụ ion niken qua da có thể gây ra bệnh viêm da, phát ban, nổi mẩn đỏ và nếu nghiêm trọng có thể gây loét và mụn mủ [3]. Niken là nguyên nhân gây dị ứng kim loại thường gặp nhất. Khoảng 10 - 15% dân số trên thế giới bị dị ứng niken và trong đó khoảng 13 - 18% phụ nữ và 3 - 6 % nam giới bị dị ứng với niken và tần suất dị ứng niken vẫn ngày càng gia tăng. Sự tiếp xúc giữa niken và phổi sẽ dẫn đến xuất huyết, phù nề, mất trật tự tế bào phế nang, thoái hóa xơ phổi và biểu mô phế quản. Đôi khi có người chết do hội chứng suy hô hấp ở người lớn (ARDS) do niken gây ra. Đã có nghiên cứu thực nghiệm chỉ ra rằng các hợp chất niken có tác dụng mạnh gây ung thư và gây quái thai, làm tăng tỷ lệ tử vong trước và sau khi sinh [3-5]. Mức độ ảnh

hưởng của niken có tùy thuộc vào nguồn phát sinh và mức độ phơi nhiễm. Trong nghiên cứu gần đây cho thấy các đối tượng có mức phơi nhiễm cao với niken (> 2,04 mg/kg) sẽ có các triệu chứng như tăng bạch cầu, creatinine tăng, thiếu máu, đau lưng, đau bụng, sốt và buồn nôn [6].

Các phương pháp xử lý kim loại niken trong nước thường được sử dụng như xúc tác, hấp phụ, oxy hóa nâng cao, keo tụ và màng lọc, điện hóa [7, 8]. Trong đó, hấp phụ là một trong những phương pháp hiệu quả và đơn giản [9]. Đặc biệt, việc sử dụng than sinh học có nguồn gốc từ phế phẩm nông nghiệp làm chất hấp phụ để loại bỏ niken trong nước đã thu hút nhiều nhà khoa học nghiên cứu trong những năm gần đây. Cụ thể, Zhengtao Shen và cộng sự (2017) đã nghiên cứu đặc tính và cơ chế hấp phụ của Ni(II) từ than sinh học được sản xuất từ viên rơm lúa mì (WSP550, WSP700) và trấu (RH550, RH700) ở các nhiệt độ nhiệt phân lần lượt là 550°C và 700°C [10]. Kết quả cho thấy khả năng hấp phụ niken của than sinh học từ rơm lúa mì WSP550 và WSP700 lần lượt là 12,69 mg/g và 25,19 mg/g cao hơn khả năng của than sinh học từ trấu RH550 là 6,9 mg/g và RH700 là 10,21 mg/g. Yiyi Deng và cộng sự (2019) tổng hợp than sinh học từ rơm rạ ở nhiệt độ 400 °C và 700 °C. Kết quả cho thấy khả năng hấp phụ cực đại Ni(II) của vật liệu than sinh học ở nhiệt độ 700 °C (54,60 mg/g) cao gấp đôi vật liệu nung ở nhiệt độ 400 °C (27,31 mg/g) [11]. Khả năng loại bỏ Ni(II) bởi than sinh học được chế tạo từ lá dứa (lá khóm) [12], vỏ măng cụt [13], bã mía [14]...cũng đã được nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu đã khẳng định tiềm năng sử dụng than sinh học trong loại bỏ kim loại nặng Ni có trong môi trường nước. Tuy nhiên, việc sử dụng than sinh học từ thân khoai mì để hấp phụ Ni trong dung dịch còn hạn chế.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng thân cây khoai mì – một loại phụ phẩm chủ yếu – để làm than sinh học, từ đó đánh giá khả năng hấp phụ Ni (II) trong dung dịch của vật liệu này. Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hấp phụ như pH, thời gian và nồng độ đầu được khảo sát chi tiết. Bản chất và dung lượng hấp phụ được đánh giá qua các mô hình đẳng nhiệt Langmuir, Freundlich và Sips.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Thực nghiệm

Nickel (II) nitrate hexahydrate: công thức hóa học $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; NaOH (Merck, 99,9 %); HNO_3 (Merck, 65 %); NaCl (Merck, 99 %). Tất cả các hóa chất sử dụng là hóa chất tinh khiết, dùng trong phân tích.

<https://doi.org/10.62239/jca.2025.059>

Phương pháp nghiên cứu

Chế tạo vật liệu than sinh học.

Thân cây khoai mì sau khi được thu gom tại huyện Củ Chi, Thành phố Hồ Chí Minh sẽ được rửa sạch bụi bẩn bằng nước máy. Sau đó khoai mì được cắt nhỏ ra các đoạn có kích thước từ 1 – 2 cm và tiến hành sấy khô ở nhiệt độ 100 °C đến khi khối lượng thân cây khoai mì không thay đổi. Thân cây khoai mì đã sấy khô sẽ được nung ở nhiệt độ 700 °C trong vòng 60 phút ở điều kiện yếm khí. Than sinh học sau tổng hợp sẽ được rửa với nước cất và sấy khô và nghiền mịn. Cuối cùng thu được thành phẩm là than sinh học từ thân cây khoai mì.

Nghiên cứu quá trình hấp phụ.

Quá trình hấp phụ được thực hiện bằng phương pháp hấp phụ tĩnh. Ảnh hưởng của pH (2,0 – 8,0), thời gian (5 – 1440 phút) và nồng độ của Ni (5 – 380 mg/L) lần lượt được khảo sát. Để đánh giá khả năng hấp phụ, nồng độ của dung dịch niken trước và sau hấp phụ được xác định bằng máy AAS ZA300 bằng kỹ thuật ngọn lửa. Dung lượng hấp phụ được tính bằng công thức sau:

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

Trong đó:

Q_e : Dung lượng hấp phụ (mg/g)

C_o : Nồng độ trước hấp phụ của dung dịch (mg/L)

C_e : Nồng độ sau hấp phụ của dung dịch (mg/L)

V : Thể tích dung dịch (L)

m : Khối lượng của than sinh học

Các mô hình đẳng nhiệt hấp phụ

Để đánh giá khả năng hấp phụ tối đa cũng như dự đoán bản chất của quá trình hấp phụ Ni trên vật liệu than sinh học từ thân cây khoai mì, trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng 3 mô hình đẳng nhiệt hấp phụ: Langmuir, Freundlich và Sips.

Mô hình đẳng nhiệt Langmuir

Mô hình đẳng nhiệt Langmuir (1918) là một trong những mô hình hấp phụ đơn giản nhất. Mô hình này giả định độ phủ đơn lớp, năng lượng liên kết không đổi giữa bề mặt chất hấp phụ và chất bị hấp phụ, và không có tương tác giữa các chất bị hấp phụ [15].

Phương trình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir có dạng:

$$Q_e = \frac{K_L \times Q_{\max} C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

Trong đó:

Q_e : Dung lượng hấp phụ (mg/g)

Q_{\max} : Dung lượng hấp phụ cực đại (mg/g)

C_e : Nồng độ sau hấp phụ của dung dịch (mg/L)

K_L : Hằng số Langmuir (L/mg).

Mô hình đẳng nhiệt Freundlich.

Mô hình hấp phụ đẳng nhiệt Freundlich mô tả quá trình hấp phụ thuận nghịch và không lý tưởng. Không giống như mô hình đẳng nhiệt Langmuir, mô hình Freundlich không bị giới hạn đối với sự hình thành đơn lớp, trong đó có thể áp dụng nó cho sự hấp phụ đa lớp [16].

Phương trình hấp phụ đẳng nhiệt Freundlich có dạng:

$$Q_e = K_F \cdot C_e^{1/n} \quad (3)$$

Trong đó:

Q_e : Dung lượng hấp phụ (mg/g)

C_e : Nồng độ sau hấp phụ của dung dịch (mg/L)

K_F : Hằng số hấp phụ Freundlich

n : Hằng số, luôn lớn hơn 1.

Mô hình Sips.

Mô hình Sips là dạng kết hợp của biểu thức Langmuir và Freundlich để tính toán các hệ hấp phụ không đồng nhất và phá vỡ giới hạn của nồng độ chất hấp phụ tăng lên liên quan đến mô hình đẳng nhiệt Freundlich. Ở nồng độ chất hấp phụ thấp, mô hình giảm xuống đường đẳng nhiệt Freundlich; trong khi ở nồng độ cao, nó tính toán được đặc tính khả năng hấp phụ đơn lớp của đường đẳng nhiệt Langmuir. Theo nguyên tắc chung, các tham số của phương trình bị phụ thuộc chủ yếu bởi các yếu tố pH, nhiệt độ và nồng độ [17]:

$$Q_e = \frac{Q_S K_S C_e^{n_S}}{1 + K_S C_e^{n_S}} \quad (4)$$

Trong đó:

Q_e : Dung lượng hấp phụ (mg/g)

Q_S : Dung lượng hấp phụ cực đại tính theo mô hình Sips (mg/g)

C_e : Nồng độ sau hấp phụ của dung dịch (mg/L)

K_S : (L/mg) và n_S là hằng số của mô hình.

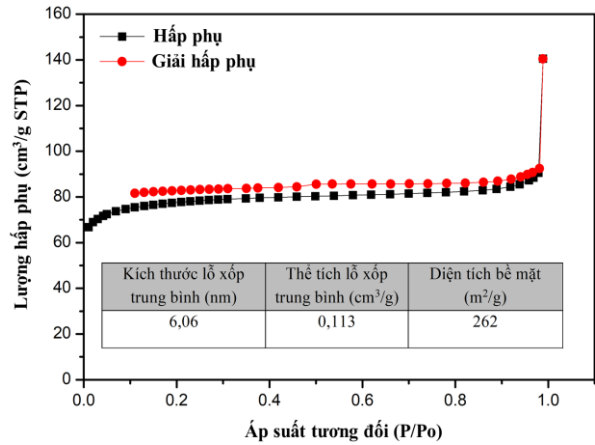
Kết quả và thảo luận

Đặc trưng của vật liệu

Diện tích bề mặt và kích thước lỗ xốp là các đặc trưng quan trọng ảnh hưởng đến khả năng hấp phụ của các vật liệu xốp nói chung và vật liệu than sinh học nói riêng. Kết quả phân tích diện tích bề mặt và kích thước lỗ xốp của than sinh học tổng hợp được từ thân khoai mì được trình bày trong Hình 1.

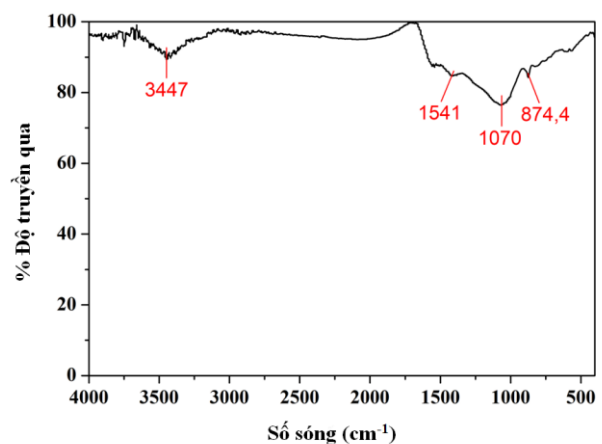
Từ Hình 1 cho thấy, kích thước của lỗ xốp trung bình là 6,06 nm nằm trong khoảng lỗ xốp trung bình từ 2 – 50 nm, thể hiện than sinh học từ thân cây khoai mì có đặc

trung của vật liệu mesopore, thuận lợi làm vật liệu hấp phụ [18-20]. Diện tích bề mặt xác định bằng phương trình Barrett-Joyner-Halenda (BJH) của than sinh học từ thân cây khoai mì khoảng 262 m²/g và thể tích lỗ xốp khoảng 0,113 cm³/g.



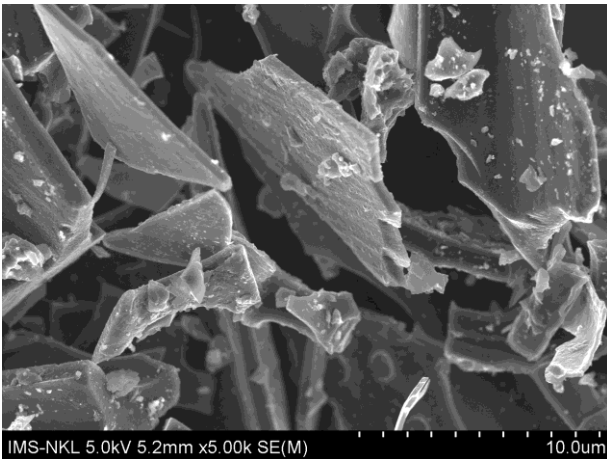
Hình 1: Diện tích bề mặt và kích thước lỗ xốp của than sinh học từ thân cây khoai mì

Hình 2 là phổ FT-IR của vật liệu than sinh học từ thân khoai mì. Tại số sóng 874,4 cm⁻¹ là dao động uốn cong của liên kết C-H vòng thơm [21], trong khi đó, dao động tại số sóng 1070 cm⁻¹ và 1541 cm⁻¹ được cho là của liên kết –C–O [22] và –C=C [23]. Dao động tại số sóng 3447 cm⁻¹ đặc trưng cho nhóm –OH trong nước hấp phụ. Các nhóm chức đặc trưng này thuận lợi cho quá trình hấp phụ do sự hình thành phức chất với các ion kim loại [24].



Hình 2: Phổ FT-IR của than sinh học tổng hợp từ thân khoai mì.

Thuộc tính bề mặt của vật liệu được xác định bằng phương pháp kính hiển vi điện tử quét bề mặt (SEM) và được thể hiện ở Hình 3. Kết quả quan sát cho thấy, bề mặt vật liệu tương đối gồ ghề, không đồng nhất, thuận lợi cho quá trình hấp phụ của vật liệu.



Hình 3: Ảnh SEM của vật liệu than sinh học từ thân khoai mì

Thuộc tính bề mặt của vật liệu được xác định bằng phương pháp kính hiển vi điện tử quét bề mặt (SEM) và được thể hiện ở Hình 3. Kết quả quan sát cho thấy, bề mặt vật liệu tương đối gồ ghề, không đồng nhất, thuận lợi cho quá trình hấp phụ của vật liệu.

Các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hấp phụ Ni(II) bằng than sinh học

Ảnh hưởng của pH

Ảnh hưởng của pH là một trong những yếu tố quan trọng quyết định đến khả năng hấp phụ của vật liệu. Để khảo sát sự ảnh hưởng của pH đến khả năng hấp phụ, dung dịch Ni(II) được chỉnh theo dải pH từ 2 đến 8 bằng HNO₃ và NaOH ở các nồng độ thích hợp. Thí nghiệm được tiến hành ở nhiệt độ 307K, thời gian là 1440 phút, nồng độ dung dịch Ni(II) ban đầu là 290 mg/L. Kết quả cho thấy khả năng hấp phụ Ni(II) tỉ lệ thuận với pH, nghĩa là càng tăng giá trị pH thì khả năng hấp phụ Ni(II) của vật liệu càng tăng. Khả năng hấp phụ Ni(II) tốt nhất ở giá trị pH bằng 8 với dung lượng hấp phụ lên đến 25,48 mg/g. Việc dung lượng hấp phụ tăng dần khi tăng giá trị pH cho thấy vật liệu than sinh học từ thân cây khoai mì khi hấp phụ dung Ni(II) trong môi trường bazơ tốt hơn môi trường axit. Điều đó có thể được lý giải bằng giá trị của điểm đẳng điện (pHpzc). pHpzc của than sinh học từ thân cây khoai mì cho giá trị là 8 (Hình 4a). Khi pH dung dịch Ni(II) cao hơn pHpzc, bề mặt vật liệu sẽ tích điện âm và tương tác hiệu quả với các cation. Trong khi pH dung dịch Ni(II) thấp hơn pHpzc thì bề mặt vật liệu sẽ tích điện dương và tương tác hiệu quả với các anion [25]. Như vậy, giá trị pH tốt nhất cho quá trình hấp phụ dung dịch Ni(II) là 8. Khả năng hấp phụ của Ni(II) trên vật liệu than sinh học từ thân cây khoai mì chịu ảnh hưởng của pH được trình bày trong Hình 4b.

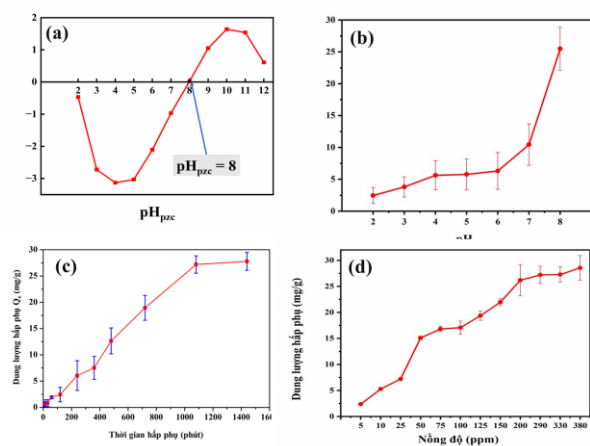
Ảnh hưởng của thời gian

<https://doi.org/10.62239/jca.2025.059>

Thời gian là yếu tố ảnh hưởng quan trọng tiếp theo cần khảo sát. Thí nghiệm được tiến hành tại pH tốt nhất (pH = 8), nồng độ dung dịch Ni(II) ban đầu là 290 mg/L. Thời gian hấp phụ thay đổi từ 5 cho đến khi đạt trạng thái cân bằng hấp phụ và nhiệt độ là 307 K. Kết quả thời gian hấp phụ càng tăng thì dung lượng hấp phụ càng tăng. Dung lượng hấp phụ tại thời điểm 5 phút đạt khoảng 0,59 mg/g và tăng dần đến 27,20 mg/g tại thời điểm 1080 phút. Từ 1080 phút đến 1440 phút dung lượng hấp phụ thay đổi không nhiều, điều này cho thấy quá trình hấp phụ đạt trạng thái cân bằng hấp phụ từ phút 1080 trở đi. Chọn 1080 phút làm thời gian hấp phụ tối ưu. Khả năng hấp phụ của vật liệu than sinh học từ cây khoai mì chịu ảnh hưởng của yếu tố thời gian được trình bày trong Hình 4c.

Ảnh hưởng của nồng độ

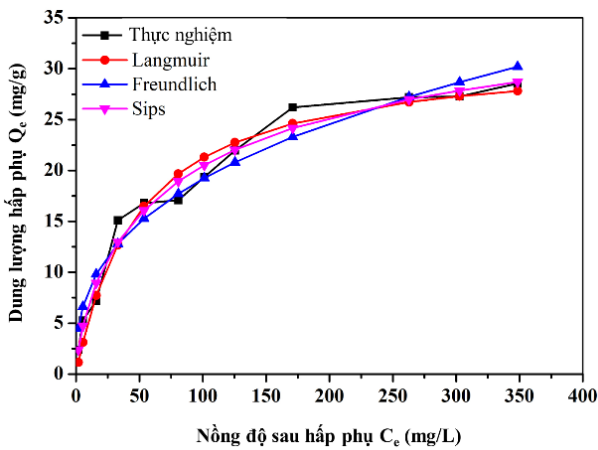
Nồng độ là yếu tố quan trọng tiếp theo được khảo sát. Tại thời điểm 1080 phút với pH tối ưu bằng 8, sử dụng 0,05 gam vật liệu để hấp phụ dung dịch Ni(II) ban đầu được thay đổi từ 5 mg/L đến 380 mg/L. Kết quả ảnh hưởng của nhiệt độ - nồng độ đến khả năng hấp phụ của vật liệu cho thấy dung lượng hấp phụ tăng dần khi tăng nồng độ dung dịch ban đầu. Với nồng độ 5 mg/L dung lượng hấp phụ đạt 2,37 mg/g và tăng dần đến 28,55 mg/g với nồng độ dung dịch ban đầu là 380 mg/L. Từ nồng độ 290 mg/L đến 380 mg/L dung lượng hấp phụ không có sự thay đổi nhiều do có sự bão hòa tâm hấp phụ với một lượng vật liệu cố định. Khả năng hấp phụ của vật liệu than sinh học từ thân cây khoai mì chịu ảnh hưởng của yếu tố nồng độ được trình bày trong Hình 4d.



Hình 4: Điểm đẳng điện của vật liệu (a); Ảnh hưởng của pH (b), thời gian (c) và nồng độ đầu của Ni (II) (d) đến khả năng hấp phụ của vật liệu than sinh học từ thân cây khoai mì.

Đẳng nhiệt hấp phụ

Thông số và đồ thị của các mô hình đẳng nhiệt hấp phụ được thể hiện trong Bảng 1 và Hình 5. Kết quả cho thấy khi khảo sát các mô hình đẳng nhiệt hấp phụ thì dữ liệu thực nghiệm phù hợp với mô hình Sips hơn so với mô hình Langmuir và mô hình Freundlich do có giá trị R^2 lớn nhất là 0,9803 và giá trị χ^2 nhỏ nhất là 1,2531. Vì mô hình Sips là mô hình 3 tham số kết hợp giữa mô hình Langmuir và Freundlich [17], nên từ kết quả trên cho thấy vật liệu than sinh học từ thân cây khoai mì trong quá trình hấp phụ Ni(II) tuân theo đồng thời cả hai mô hình Langmuir và Freundlich, nghĩa là vừa có thể hấp phụ đơn lớp vừa hấp phụ đa lớp.



Hình 5: Đồ thị phi tuyến các mô hình đẳng nhiệt ở 307K

Bảng 1: Các thông số đẳng nhiệt tính toán từ các mô hình ở 307K

	Langmuir	Freundlich	Sips
RMSE	1,56	1,8	1,27
R^2	0,9702	0,9604	0,9803
χ^2	2,7003	4,25	1,2531
Q_{max} (mg/g)	31,77	-	-
k_L (L/mg)	0,0201	-	-
K_f	-	3,58	-
$((mg/g).(L/mg)^{1/n})$	-	2,75	-
n	-	2,75	-
Q_s (L/g)	-	-	1,660
α (L/mg)	-	-	0,0411
β	-	-	0,698

Bảng 2 cho thấy dung lượng hấp phụ của vật liệu than sinh học từ thân cây khoai mì ứng dụng xử lý Ni(II) trong dung dịch nước cao hơn một số vật liệu than sinh học khác. Bảng so sánh cho thấy tiềm năng của than sinh học từ thân khoai mì trong việc xử lý cation kim loại nặng Ni(II) trong nước. Từ đó, hướng đến việc ứng dụng than sinh học từ thân khoai mì để loại bỏ Ni(II) trong nước thải thật và xử lý một số kim loại khác.

Bảng 2: So sánh dung lượng hấp phụ của các vật liệu than sinh học từ các nguồn khác

Vật liệu	Dung lượng hấp phụ	Tài liệu tham khảo
Thân khoai mì	31,77 mg/g	Nghiên cứu này
Gỗ liễu	9,8 mg/g	[26]
Phân gia súc	11,1 mg/g	[26]
Viên rơm lúa mì	25,06 mg/g	[10]
Trấu	10,15 mg/g	[10]
Viên nén gỗ mềm	3,35 mg/g	[27]
Viên nén rơm	11,5 mg/g	[27]
Miscanthus		
Hạt chà là	19,54 mg/g	[28]
Vỏ hạnh nhân	22,22 mg/g	[29]
Vỏ quả óc chó	13,92 mg/g	[30]
Vỏ dưa hấu	59,88 mg/g	[31]
Lá dứa (thơm)	44,88 mg/g	[12]

Kết luận

Vật liệu than sinh học từ thân khoai mì đã được sử dụng để loại bỏ hiệu quả Ni (II) trong dung dịch nước với dung lượng hấp phụ tối đa là 31,77 mg/g trong điều kiện tối ưu pH = 8,0 thời gian hấp phụ là 1080 phút. Vật liệu có khả năng loại bỏ Ni tốt hơn so với một số than sinh học có nguồn gốc từ các loại phụ phẩm nông nghiệp khác cho thấy tiềm năng ứng dụng của vật liệu trong xử lý nước thải ô nhiễm kim loại nặng niken.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Nguyễn Tất Thành trong đề tài mã số 2024.01.106/HĐ-KHCN.

Tài liệu tham khảo

1. QCVN 08:2023/BTNMT, Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt (2023).
2. QCVN 40:2011/BTNMT, Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về nước thải công nghiệp (2011).
3. R. Kiran, R. Bharti, R. Sharma, Mater. Today Proc., 51 (2022) 880–885, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.278>
4. G. Genchi, A. Carocci, G. Lauria, M.S. Sinicropi, A. Catalano, Int. J. Environ. Res. Public Health, 17(3) (2020) 679, <https://doi.org/10.3390/ijerph17030679>
5. W. Begum, S. Rai, S. Banerjee, S. Bhattacharjee, M.H. Mondal, A. Bhattarai, B. Saha, RSC Adv., 12(15) (2022) 9139–9153, <https://doi.org/10.1039/d2ra00378c>

6. R.S.B. Fischer, J.M. Unrine, C. Vangala, W.T. Sanderson, S. Mandayam, K.O. Murray, *PLoS One*, 15(11) (2020) e0240988. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240988>
7. K. Dermentzis, *J. Hazard. Mater.*, 173(1–3) (2010) 647–652, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.133>
8. F. Fu, Q. Wang, *J. Environ. Manage.*, 92(3) (2011) 407–418, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
9. M. Ghasemi, M. Naushad, N. Ghasemi, Y. Khosravi-Fard, *J. Ind. Eng. Chem.*, 20(4) (2014) 2193–2199, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.09.050>
10. Z. Shen, Y. Zhang, O. McMillan, F. Jin, A. Al-Tabbaa, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24(14) (2017) 12809–12819, <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8847-2>
11. Y. Deng, S. Huang, D.A. Laird, X. Wang, Z. Meng, *Chemosphere*, 218 (2019) 308–318, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.081>
12. K. Iamsaard, C.H. Weng, L.T. Yen, J.H. Tzeng, C. Poonpakdee, Y.T. Lin, *Bioresour. Technol.*, 344(A) (2022) 126131, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126131>
13. D. Anitha, A. Ramadevi, R. Seetharaman, *Mater. Today Proc.*, 45 (2021) 718–722, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.748>
14. L.T.H. Phan, T.T.T. Hiền, *Khoa học & Công nghệ*, 22 (2019) 42–47.
15. J.K. Singh, N. Verma, *Aqueous Phase Adsorption – Theory, Simulations and Experiments*, CRC Press (2019).
16. M.A. Al-Ghouti, D.A. Da'ana, *J. Hazard. Mater.*, 393 (2020) 122383, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>
17. K.Y. Foo, B.H. Hameed, *Chem. Eng. J.*, 156(1) (2010) 2–10, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
18. L.M. Ferreira, R.R. de Melo, A.S. Pimenta, T.K.B. de Azevedo, C.B. de Souza, *Biomass Convers. Bioref.*, 12(4) (2020) 1181–1192, <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00660-x>
19. K.V. Kumar et al., *J. Mater. Chem. A*, 7(17) (2019) 10104–10137, <https://doi.org/10.1039/c9ta00287a>
20. M. Thommes, K. Kaneko, A.V. Neimark, J.P. Olivier, F. Rodriguez-Reinoso, J. Rouquerol, K.S.W. Sing, *Pure Appl. Chem.*, 87(9–10) (2015) 1051–1069, <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
21. Y. Xie et al., *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 230 (2022) 113107, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113107>
22. Z. Cai, C. Jiang, X.F. Xiao, Y.S. Zhang, L. Liang, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 359(1) (2018) 012046, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/359/1/012046>
23. S. Daffalla, *Int. J. Mol. Sci.*, 26(17) (2023) 8499, <https://doi.org/10.3390/ijms26178499>
24. V.-P. Dinh, Z. Li, E. Ye, in: Z. Li, J. Zheng, E. Ye (Eds.), *Sustainable Nanotechnology*, RSC Publ., (2022) 144–162.
25. N. Fiol, I. Villaescusa, *Environ. Chem. Lett.*, 7(1) (2008) 79–84, <https://doi.org/10.1007/s10311-008-0139-0>
26. S. Wang, J.H. Kwak, M.S. Islam, M.A. Naeth, M.G. El-Din, S.X. Chang, *Sci. Total Environ.*, 712 (2020) 136538, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136538>
27. Z. Shen et al., *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 25(15) (2018) 14626–14635, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1674-2>
28. Z. Mahdi, Q.J. Yu, A. El Hanandeh, *J. Environ. Chem. Eng.*, 6(1) (2018) 1171–1181, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.021>
29. M. Kılıç, Ç. Kirbiyık, Ö. Çepelioğullar, A.E. Pütün, *Appl. Surf. Sci.*, 283 (2013) 856–862, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.033>
30. V.G. Georgieva, L. Gonsalvesh, M.P. Tavlieva, *J. Mol. Liq.*, 312 (2020) 112788, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112788>
31. X. Chen, Q. Zhang, V. Achal, *J. Environ. Eng. Sci.*, 15(3) (2020) 99–106, <https://doi.org/10.1680/jenes.19.00026>