

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG HẤP PHỤ CAFFEINE CỦA THAN SINH HỌC VỎ CÀ PHÊ HOẠT HÓA BẰNG K_2CO_3

NGÔ KIM CHI^{1*}, NGUYỄN HOÀI LINH¹, ĐẶNG NGỌC PHƯƠNG¹, PHẠM PHƯƠNG THẢO²,
TRẦN LÊ MINH², ĐỖ THỦY TIÊN³, VŨ PHƯƠNG UYÊN³, ĐẶNG VĂN HÙNG⁴,
HOÀNG THỊ THU HƯƠNG², ĐINH THỊ TÚ²

¹ Viện Hóa học các hợp chất thiên nhiên, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST)

² Trường Hóa và Khoa học Sự sống (SCLS)

³ Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2

⁴ Trường Đại học Khoa học - Đại học Quốc gia Hà Nội

Tóm tắt:

Vỏ cà phê nhiệt phân và hoạt hóa tạo vật liệu hấp phụ caffeine hiệu quả thay thế sử dụng dung môi và than hoạt tính nhập ngoại loại caffeine trong nước, tạo vật liệu mới hấp phụ caffeine, kim loại nặng, thuốc trừ sâu, hóa chất và được phẩm sử dụng trong lĩnh vực môi trường và nâng cao giá trị cho sản xuất cà phê, tạo mô hình xanh trong ngành sản xuất cà phê và thực phẩm. Than sinh học vỏ cà phê (BC) và than hoạt hóa ($BC-K_2CO_3$) đã hấp phụ caffeine từ dịch chiết cà phê nhân chứa caffeine; đo hiệu quả hấp phụ caffeine và phân tích. Theo đó, than sinh học nhiệt phân từ vỏ cà phê (BC) và than hoạt hóa với K_2CO_3 ở $400^\circ C$ là $BC-K_2CO_3$ đánh giá cấu trúc vi mô bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM), quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR), khảo sát hiệu suất, đánh giá khả năng hấp phụ caffeine và các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hấp phụ. Điều kiện hấp phụ tối ưu ở nồng độ caffeine ban đầu $\leq 0,025$ g/mL, liều lượng dùng than sinh học 0,1 g/mL, trong thời gian 120 phút. Quá trình hấp phụ caffeine của BC và $BC-K_2CO_3$ tuân theo lý thuyết hấp phụ Freundlich ($R^2 > 0,992$). Than sinh học $BC-K_2CO_3$ đạt được dung lượng hấp phụ tối đa Q_m là 33,74 mg/g, cao hơn so với than sinh học BC chưa hoạt hóa với Q_m 13,99 mg/g.

Từ khóa: Than sinh học, vỏ cà phê, chất thải cà phê, diện tích bề mặt, dung lượng hấp phụ caffeine tối đa.

Ngày nhận bài: 2/1/2025; Ngày sửa chữa: 4/2/2025; Ngày duyệt đăng: 18/2/2025.

Study on the caffeine adsorption capacity of coffee husk biochar activated by K_2CO_3

Abstract:

Pyrolyzed and activated coffee husks create an efficient caffeine-adsorbing material, serving as an alternative to imported activated carbon and solvents for caffeine removal from water. This new adsorbent material can also capture caffeine, heavy metals, pesticides, chemicals, and pharmaceuticals, contributing to environmental applications. Additionally, it enhances the value of coffee production and promotes a green model in the coffee and food industries. Biochar derived from the pyrolysis of coffee husks (BC) and activated carbon ($BC-K_2CO_3$) adsorbed caffeine from green coffee extract containing caffeine are measured and analyzed for caffeine adsorption efficiency. Accordingly, BC and $BC-K_2CO_3$ at $400^\circ C$ were analyzed for their microstructure evaluation by scanning electron microscope (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Adsorption performance, caffeine removal capacity, and factors influencing the adsorption process were also evaluated. The optimal adsorption conditions were an initial caffeine concentration of ≤ 0.025 g/mL, a biochar dosage of 0.1 g/mL, and a contact time of 120 minutes. The caffeine adsorption process of both BC and $BC-K_2CO_3$ followed the Freundlich adsorption isotherm model ($R^2 > 0.992$). The maximum adsorption capacity (Q_m) of $BC-K_2CO_3$ was 33.74 mg/g, which was higher than that of non-activated BC, which had a Q_m of 13.99 mg/g.

Keywords: Biochar, coffee husk, coffee waste, surface area, maximum caffeine adsorption.

JEL Classifications: Q56, Q57, Y10, O13, R11.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việt Nam là nước xuất khẩu cà phê Robusta hàng đầu thế giới, đóng góp đáng kể vào nền kinh tế quốc gia. Quá trình chế biến cà phê nhân tạo thải ra đáng kể lượng vỏ cà phê trên 1 kg hạt cà phê nhân. Lượng vỏ này làm than sinh học (Biochar) khi nhiệt phân ở nhiệt độ 300-700°C hoặc hoạt hóa dùng KOH, H₃PO₄, CO₂, hơi nước tạo vật liệu lọc nước, xử lý khí thải, hấp phụ caffeine, thuốc trừ sâu, kim loại nặng, xử lý nước thải, hấp phụ các chất thơm, dược phẩm điển hình là caffeine. Nhu cầu cần vật liệu hấp phụ caffeine thay thế các phương pháp sử dụng dung môi hữu cơ độc hại và thay thế than hoạt tính nhập khẩu đắt tiền để hấp phụ caffeine trong phương pháp dùng nước, than hoạt tính hấp phụ caffeine tạo các sản phẩm cà phê không chứa caffeine dành riêng cho những người nhạy cảm với caffeine (hạt cà phê decaf). Nhiều nghiên cứu đưa ra hạt và vỏ cà phê của Việt Nam có chứa caffeine (Minh, 2022), tuy vậy với nhiệt độ nhiệt phân cao 400°C - 500°C trên nhiệt độ phân hủy caffeine và đặc biệt có hoạt hóa tác nhân kiềm K₂CO₃ thì lượng caffeine còn có thể tồn dư thấp, nhưng có lợi thế tạo lỗ rỗng xốp phù hợp và các nhóm chức hóa học trên bề mặt biochar sau hoạt hóa và thích hợp làm chất hấp phụ caffeine để thăm dò sản xuất vật liệu hấp phụ caffeine trong nước thay thế các phương pháp loại bỏ caffeine dùng dung môi hữu cơ như methylene chloride, chloroform hoặc ethyl acetate giải quyết vấn đề môi trường, giảm dư lượng hóa chất và chi phí. Phương pháp chiết xuất caffeine bằng CO₂ siêu tới hạn thân thiện với môi trường hơn những yêu cầu chi phí thiết bị đắt, làm việc với môi trường áp suất lớn (Peker, 1992) thì việc nghiên cứu sử dụng than sinh học nổi lên như một giải pháp bền vững và đầy triển vọng các năm gần đây.

Elvio et al. (2022) chứng minh khả năng hấp phụ caffeine của than lá dừa hoạt hóa đạt 73,83mg/g với điều kiện nhiệt độ nhiệt phân ở điều kiện dưới 500°C và hoạt hóa K₂CO₃ tạo vật liệu (BC-K₂CO₃) để phát triển vật liệu chi phí thấp, tái chế vỏ, cành cắt tỉa, bã cà phê trong sản xuất cà phê đồng thời tạo vật liệu hấp phụ caffeine và xử lý caffeine trong nước thải hiệu quả. Bài báo được thực hiện nhằm tận dụng nguồn vật liệu phụ phẩm của sản xuất cà phê, nhiệt phân, hoạt hóa K₂CO₃, đánh giá khả năng hấp phụ caffeine để làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo tạo vật liệu an toàn thân môi trường, hiệu quả hấp phụ cao hơn có lợi về môi trường, kinh tế và làm vật

liệu chính trong sản xuất sản phẩm cà phê decaf thay thế than hoạt tính nhập khẩu.

2. NGUYÊN LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Nguyên liệu

Vỏ và hạt cà phê nhân vùng Cư M'gar, Đắk Lắk thu nhận biochar và dịch chiết chứa caffeine cho thử nghiệm.

2.2. Thí nghiệm

- *Phương pháp thu than sinh học vỏ cà phê (BC) và than hoạt hóa (BC-K₂CO₃):* 3g vỏ cà phê nghiền và lèn chặt trong cốc có nắp và phân chậm trong điều kiện yếm khí tốc độ gia nhiệt 100/phút, nhiệt độ đến 400°C, duy trì trong 30 phút thu biochar không hoạt hóa (BC). BC và K₂CO₃ trộn theo tỷ lệ khối lượng 1:3, phản ứng 2 giờ, nhiệt phân như trên.

- *Phương pháp chiết dịch chứa caffeine từ cà phê nhân:* Cà phê nhân nghiền, ngâm chiết nước khử ion theo tỷ lệ 10 mL/g ở 80°C trong 3 giờ. Chiết xuất cà phê chỉnh ổn định ở pH = 6,3-6,7 và bảo quản ở -4°C để thực hiện các thí nghiệm hấp phụ caffeine.

- *Phương pháp đo hiệu quả hấp phụ caffeine:* Thiết lập thí nghiệm về ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc (10 - 180 phút) đến hiệu suất hấp phụ ở pH = 6,3- 6,7, liều lượng than sinh học dùng 0,01-0,15 g/mL, tốc độ khuấy 100 vòng/phút. Ảnh hưởng của liều lượng dùng than sinh học đến khả năng loại bỏ caffeine ở pH = 6,5, tốc độ khuấy 100 vòng/phút trong 120 phút. Nồng độ caffeine ban đầu (0,01-0,27g/mL), hiệu suất hấp phụ thực hiện trong điều kiện tương tự, liều sử dụng than sinh học 0,1 g/mL, tốc độ khuấy 100 vòng/phút trong 120 phút, thử nghiệm tiến hành ở nhiệt độ thường 32°C trong bình ổn nhiệt.

- *Phương pháp phân tích:* Cấu trúc vi mô của than sinh học được phân tích bằng kỹ thuật SEM. Phổ FTIR được thực hiện bằng thiết bị Bruker Tensor 27 IR (Mỹ) trong dải phổ từ 400 cm⁻¹ đến 4.000 cm⁻¹.

Khả năng hấp phụ caffeine được đánh giá theo mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir (1) và Freundlich (2):

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_m} C_e + \frac{1}{bQ_m} \quad (1); \quad q_e = K_F C_e^n \quad (2)$$

Trong đó: q_e (mg/g) và C_e (mg/L) là nồng độ caffeine ở trạng thái cân bằng trong pha rắn và pha lỏng. Q_m (mg/g) là dung lượng hấp phụ tối đa của vật liệu. b (kl/g) là hằng số cân bằng liên quan đến năng lượng hấp phụ. k_F và n là hằng số của mô hình Freundlich. Khả năng hấp phụ có thể tuân mô hình giả động học bậc một (3); bậc hai (4) .

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3)$$

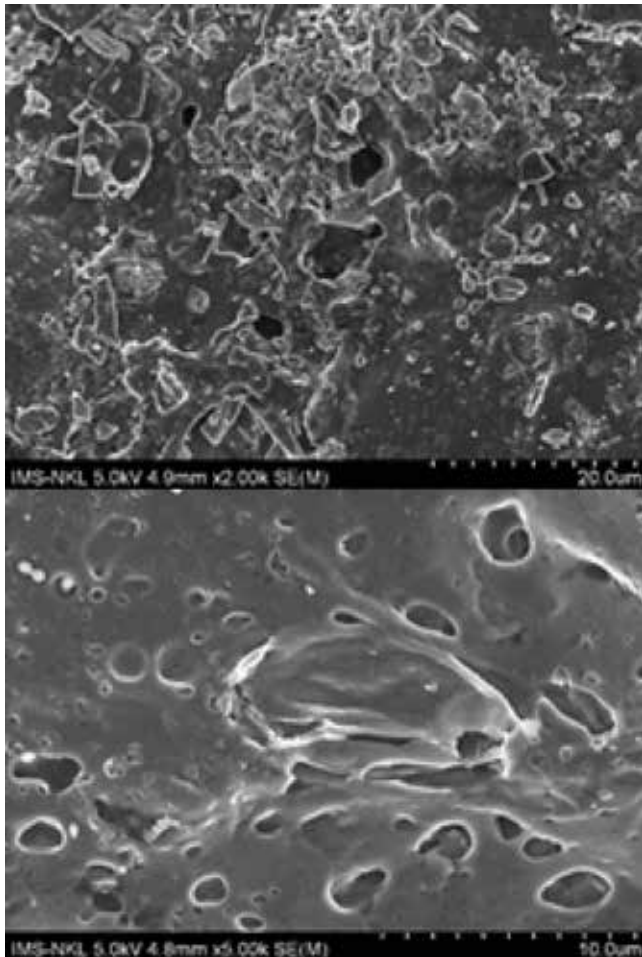
$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} (t) \quad (4)$$

Trong đó: q_t (mg/g) là dung lượng hấp phụ tại thời điểm t (phút). q_e (mg/g) là dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng. k_1 (phút⁻¹) và k_2 (g/mg/phút) là hằng số tốc độ hấp phụ.

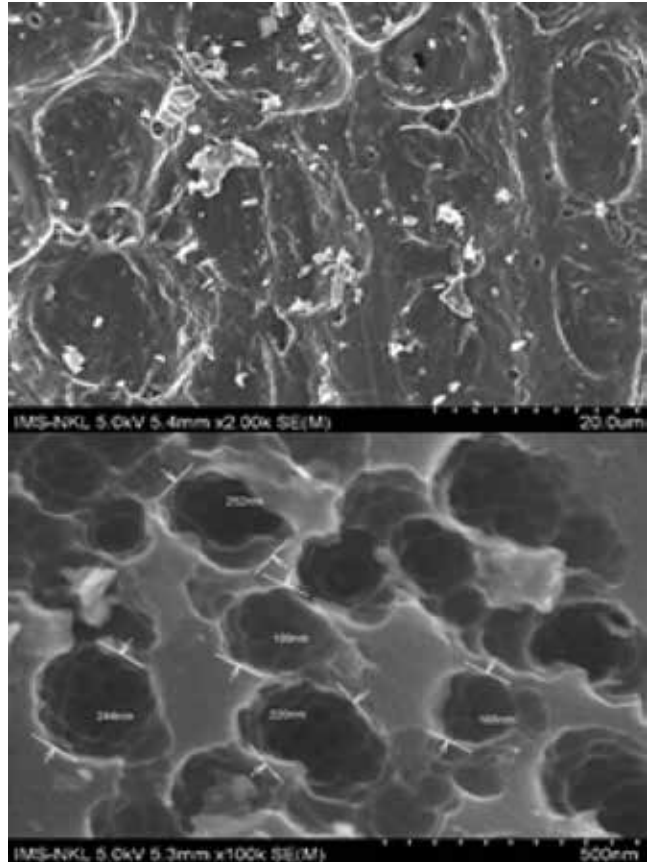
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc điểm của than sinh học

Hình ảnh SEM (Hình 1 và Hình 2) cho thấy BC có bề mặt gồ ghề và BC-K₂CO₃ hoạt hóa có bề mặt rỗng xốp, gồ ghề, nhiều lỗ xốp với kích thước trong khoảng 100 nm đến 300 nm (BC-K₂CO₃). Đặc điểm này giúp vật liệu có khả năng hấp phụ và giữ lại các chất ô nhiễm tốt. Quá trình xử lý nhiệt ở nhiệt độ cao có thể gây ra sự phân hủy của các thành phần như cellulose và lignin trong vật liệu, đồng thời làm mở rộng cấu trúc lỗ xốp và góp phần nâng cao hiệu suất hấp phụ.

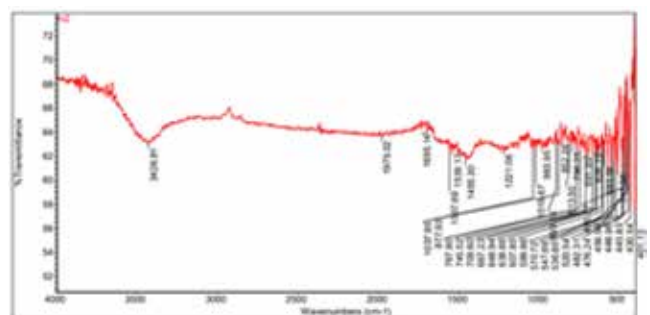


▲ Hình 1. Hình ảnh SEM của BC

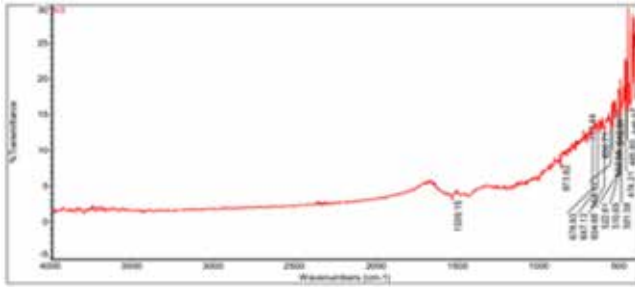


▲ Hình 2. Hình ảnh SEM của BC-K₂CO₃

Phổ FTIR (Hình 3 và 4) cho thấy nhóm chức trên bề mặt của than BC-K₂CO₃ nằm trong khoảng từ 500 - 4.000 cm⁻¹. Nhóm OH có trong cellulose, lignin, nước hoặc có thể là dao động hóa trị N-H trong amin (bậc một, bậc hai) và nhóm carbohydrate có dao động 3.400 - 3.600 cm⁻¹. Dao động gần giá trị 1.700 - 1.750 cm⁻¹ cho thấy liên kết C=C hay carboxylic axit. Dao động trong khoảng 1.300 - 1.000 cm⁻¹ cho liên kết C-O. Vật liệu BC-K₂CO₃ sau hấp phụ thấy có dịch chuyển đỉnh 3.400 cm⁻¹ do caffeine tạo liên kết H với biochar, tạo đỉnh 1.650 cm⁻¹ do C=O của caffeine bám vào bề mặt biochar, hấp phụ caffeine điển hình bằng dao động 1.539,15 cm⁻¹ đặc trưng cho C-N trong vòng purine là có caffeine hấp phụ trên bề mặt vật liệu, giảm dao động 1.300-1.000 cm⁻¹ do caffeine liên kết với các nhóm oxy hóa của biochar BC-K₂CO₃ (Hình 4).



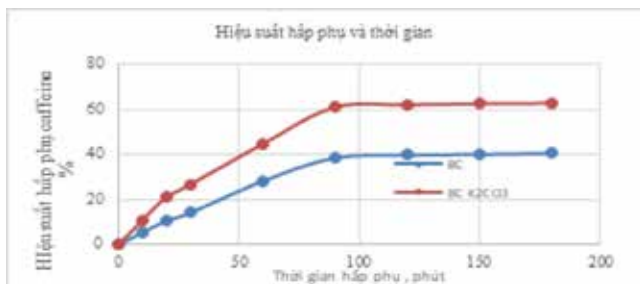
▲ Hình 3. FTIR biochar vỏ cà phê BC-K₂CO₃ trước



▲ Hình 4. FTIR biochar BC-K₂CO₃ sau hấp phụ

3.2. Ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc

Thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc đến hiệu suất xử lý caffeine thực hiện trong khoảng thời gian từ 10 đến 180 phút ở pH 6,7. Hình 5 cho thấy, sau 30 phút đầu tiên, tốc độ hấp phụ tăng chậm. Từ 30 đến 120 phút, tốc độ hấp phụ tiếp tục tăng, sau dần ổn định và đạt trạng thái cân bằng sau 120 phút với cả BC và BC-K₂CO₃. Quá trình hấp phụ nhanh ban đầu là do caffeine thay thế ion dương trên bề mặt vật liệu. Trong giai đoạn tiếp xúc ban đầu, than sinh học có nhiều vị trí hấp phụ trống, nồng độ caffeine trong nước cao nhất, do đó quá trình hấp phụ diễn ra mạnh mẽ, dẫn đến hiệu suất hấp phụ tăng nhanh. Giai đoạn tiếp theo có tốc độ tăng chậm hơn phản ánh sự suy giảm quá trình hấp phụ vật lý do đạt trạng thái cân bằng ion. Sự gia tăng chậm này là do quá trình hấp phụ hóa học và khuếch tán caffeine vào trong vật liệu và các vị trí hoạt động dần bão hòa.



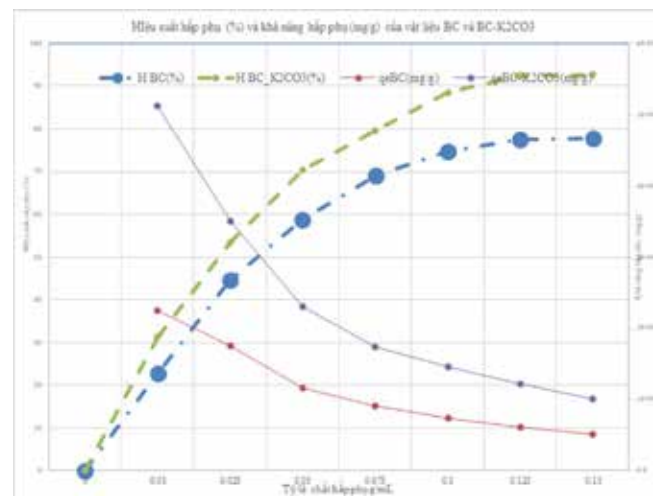
▲ Hình 5. Hiệu suất hấp phụ Caffeine theo thời gian của vật liệu BC; BC-K₂CO₃

Động học hấp phụ caffeine trình bày trong Bảng 1 và Hình 6a,b. Bảng 1 thấy hệ số tương quan R² của vật liệu trong mô hình giả động học bậc hai cao (>0,999). Đặc biệt, đối với BC-K₂CO₃, giá trị R² đạt giá trị 1. Tuy nhiên, giá trị q_e thực nghiệm cần được so sánh với giá trị q_e tính toán từ hai mô hình. Mô hình giả động học bậc hai cho giá trị q_e gần với giá trị thực nghiệm hơn. Do đó, có thể kết luận rằng quá trình xử lý caffeine phù hợp với mô hình động học giả bậc hai.

3.3. Ảnh hưởng của liều lượng than sinh học đến khả năng hấp phụ

Thí nghiệm thay đổi liều lượng than sinh học (g/mL) thực hiện ở pH 6,7, thời gian tiếp xúc 120

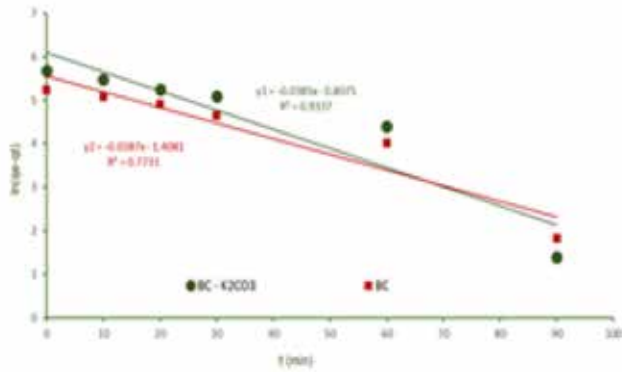
phút, tỷ lệ giữa khối lượng vật liệu và thể tích dung dịch trong khoảng từ 0,01 đến 0,15 g/mL. Hình 7 thấy hiệu suất hấp phụ caffeine tăng nhanh đối với BC và BC-K₂CO₃ khi liều lượng than sinh học tăng từ 0,01 đến 0,1 g/mL. Khi liều lượng than sinh học tăng lên 0,15 g/mL, hiệu suất không tăng đáng kể. Liều lượng than sinh học tối ưu để đạt hiệu suất hấp phụ cao là 0,1 g/mL. Khi lượng vật liệu cao hơn, diện tích tiếp xúc tăng lên, nhiều caffeine bị hấp phụ trên bề mặt đến một mức nhất định, khả năng hấp phụ caffeine không tăng đáng kể do sự chồng lấp của các lớp hấp phụ có thể che khuất các vị trí hoạt động, Hình 7a.



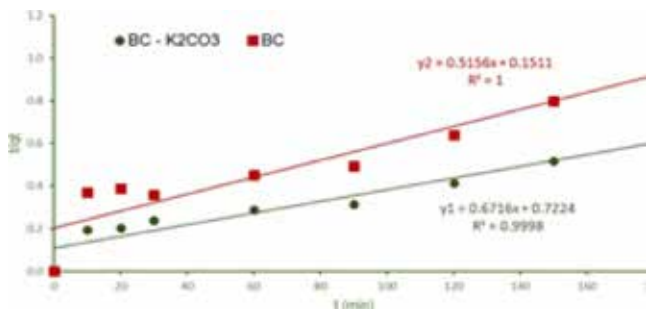
▲ Hình 7a. Hiệu suất, khả năng hấp phụ và lượng dùng vật liệu BC, BC-K₂CO₃

Bảng 1. Thông số mô hình giả động học bậc 1, bậc 2 và mô hình Langmuir, Freundlich

Thông số mô hình	Vật liệu thử		R ²	
	BC	BC-K ₂ CO ₃	BC	BC-K ₂ CO ₃
Giả ĐH bậc 1				
k1 (l.min ⁻¹)	0,038	0,040	0,934	0,773
qe1 (mg.g ⁻¹)	1,48	1,94		
Giả ĐH bậc 2				
k2 (g.(mg.min ⁻¹))	0,624	1,758	0,999	1
qe2 (mg.g ⁻¹)	1,48	1,94		
Langmuir				
b (L.mg ⁻¹)	0,029	0,015	0,864	0,806
Qm (mg.g ⁻¹)	13,99	33,74		
Freundlich				
K (mg.g ⁻¹)	1,199	1,197	0,992	0,963
n	0,834	0,692		



▲ Hình 6a. Mô hình giả động học bậc 1 hấp phụ caffeine của BC, BC-K₂CO₃



▲ Hình 6b. Mô hình giả động học bậc 2 hấp phụ caffeine của BC, BC- BC-K₂CO₃

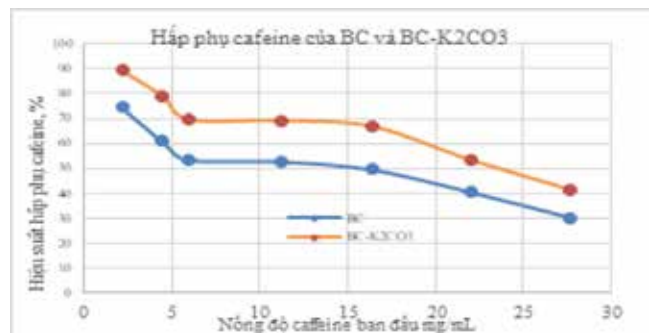
Trong giai đoạn tiếp xúc ban đầu, than sinh học có nhiều vị trí hấp phụ trống, nồng độ caffeine trong nước cao nhất, do đó quá trình hấp phụ diễn ra mạnh, hiệu suất xử lý tăng nhanh. Giai đoạn tiếp theo tốc độ tăng chậm hơn phản ánh sự suy giảm của quá trình hấp phụ vật lý do đạt trạng thái cân bằng ion và do quá trình hấp phụ hóa học và sự khuếch tán của caffeine vào bên trong vật liệu, sau đó các vị trí hoạt động dần bão hòa.

3.4. Ảnh hưởng nồng độ caffeine ban đầu đến khả năng hấp phụ

Để đánh giá ảnh hưởng của nồng độ caffeine ban đầu, các thí nghiệm được thực hiện với vật liệu BC và BC-K₂CO₃ ở liều lượng dùng than sinh học 0,05 g/mL, tốc độ khuấy 100 rpm trong 120 phút. Nồng độ caffeine ban đầu được khảo sát trong khoảng từ 0,02 đến 0,27 g/mL. Hình 7b cho thấy hiệu suất hấp phụ của BC và BC-K₂CO₃ lần lượt đạt 75,1% và 89,7%.

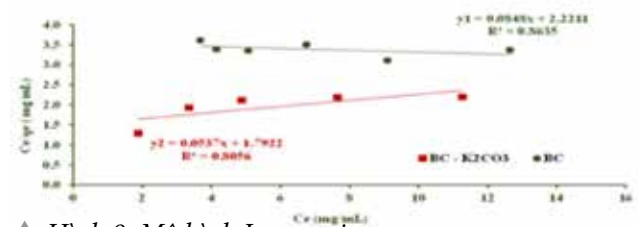
Khi nồng độ caffeine ban đầu tăng từ 0,02 lên 0,27 g/mL, hiệu suất hấp phụ giảm từ 75,1% xuống 30,3% đối với BC và từ 89,7% xuống 41,6% đối với BC-K₂CO₃. Nguyên nhân là do khả năng hấp phụ tối đa của vật liệu bị giới hạn. Khi bề mặt vật liệu không còn đủ vị trí hấp phụ để hấp phụ caffeine, tăng nồng độ caffeine trong khi giữ nguyên liều lượng vật liệu sẽ làm tăng lượng caffeine tự do, trong khi lượng caffeine đã hấp phụ không thay đổi, dẫn đến hiệu suất hấp phụ giảm dần.

Đẳng nhiệt hấp phụ caffeine: Các nghiên cứu về cân bằng hấp phụ cho thấy khả năng hấp phụ của than sinh học mô tả bằng mô hình Langmuir và Freundlich. Kết quả thí nghiệm được trình bày trong Bảng 1, Hình 6ab, các hằng số được thể hiện trong Bảng 1. Mức độ phù hợp giữa mô hình và dữ liệu thực nghiệm đánh giá thông qua hệ số tương quan R². Hệ số R² trong Bảng 1 cho thấy quá trình hấp phụ caffeine phù hợp với lý thuyết hấp phụ Freundlich đối với cả BC và BC-K₂CO₃ (R² lần lượt là 0,992 và 0,963).

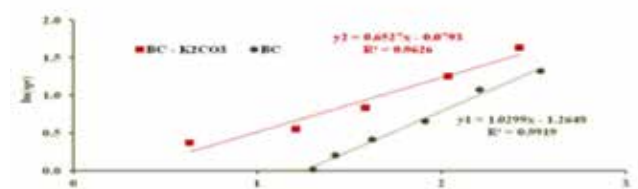


▲ Hình 7b. Hiệu quả hấp phụ caffeine của vật liệu BC, BC-K₂CO₃ và nồng độ caffeine ban đầu

Theo mô hình Langmuir giá trị R² của cả hai loại vật liệu đều nằm trong khoảng từ 0,8 đến 0,9. Điều này cho thấy, quá trình hấp phụ của than sinh học BC, BC-K₂CO₃ không chỉ tuân theo mô hình tuyến tính hoặc bão hòa mà còn phụ thuộc vào khoảng nồng độ hoạt động. Cơ chế hấp phụ caffeine có thể diễn ra theo cả cơ chế đơn lớp, đa lớp. Quá trình hấp phụ caffeine có thể không tuân theo một cơ chế hấp phụ duy nhất, mà có thể kết hợp nhiều cơ chế khác nhau như trao đổi ion, hấp phụ hóa học (chemisorption) và tạo phức (complexation). Do đó, việc sử dụng mô hình hấp phụ Langmuir hoặc Freundlich chỉ cung cấp một mô tả tương đối về quá trình hấp phụ của vật liệu thực nghiệm.



▲ Hình 8. Mô hình Langmuir



▲ Hình 9. Mô hình Freundlich



3.5. Khả năng hấp phụ caffeine các của biomass

Các nghiên cứu trước đây N. Elvio, Keerthanan, Correa-Navarro đã đánh giá khả năng hấp phụ caffeine của than sinh học biomass từ vỏ mía và than cây chè có khả năng hấp phụ caffeine từ 3,52 - 15,4 mg/g, O. Muter, 2019 cho biết biochar mùn của hấp phụ caffeine 13,2 mg/L trong nước thải, nghiên cứu sử dụng biochar vỏ cà phê hoạt hóa bằng K₂CO₃ ở 400°C, dễ dàng sản xuất than sinh học và chế tạo thiết bị sản xuất than sinh học tại địa phương và ứng dụng làm vật liệu hấp phụ caffeine và đạt khả năng hấp phụ cực đại đạt 33,74 mg/g, cao hơn so với đối chứng chỉ đạt 13,99 mg/g.

Bảng 2. Than biochar và hiệu quả hấp phụ caffeine

BC	Co (mg/l)	m (g/l)	S (m ² /g)	Qe (mg/g)	pH
BC _{bã mía} [Correa, 2019] 700°C, 2h	100	10	-	9,12	2
BC _{chè} [Elvio, 2019] 700°C, 2h	50	1	576,09	15,4	3,5
BC _{vỏ cà phê}	2-27	5	<10	13,99	6,5
BC-K ₂ CO ₃	2-27	1	<70	33,74	6,5

4. KẾT LUẬN

Phụ phẩm cà phê dồi dào có tiềm năng sản xuất vật liệu hấp phụ BVMT và tăng giá trị sản phẩm chế biến của ngành hàng cà phê Việt Nam, góp phần ứng phó với biến đổi khí hậu. Biochar vỏ cà phê hoạt hóa BC-K₂CO₃ có bề mặt thô và nhiều lỗ xốp với kích thước từ 100 nm đến 300 nm, sử dụng với lượng 0,1g/mL, thời gian hấp phụ 120 phút, nồng độ caffeine đầu thấp hơn 0,025 g/mL, cho hiệu suất hấp phụ đạt trên 89,75%. Khả năng hấp phụ caffeine của than sinh học BC-K₂CO₃ phù hợp với lý thuyết hấp phụ Freundlich với hệ số tương quan cao R² (>0,992). BC-K₂CO₃ thể hiện dung lượng hấp phụ tối đa (Q_m = 33,74 mg/g) cao hơn mẫu đối chứng BC (Q_m = 13,99 mg/g) cùng chế độ nhiệt phân không hoạt hóa K₂CO₃. Nghiên cứu mở ra hướng phát triển mới vật liệu hấp phụ caffeine từ vỏ, cành cắt tỉa, bã cà phê tạo các sản phẩm mới có giá trị kinh tế cao, thúc đẩy kinh tế tuần hoàn. Thời gian tới, cần có thêm nghiên cứu tối ưu hóa sản xuất biochar (mở rộng nguyên liệu biomass, chế độ nhiệt phân, hoạt hóa) để tạo vật liệu xanh hấp phụ chọn lọc và tăng hiệu quả vật liệu. Đặc biệt, cần có chính sách khuyến khích nghiên cứu các sản phẩm xanh và đẩy mạnh ứng dụng, thương mại hóa và hỗ trợ doanh nghiệp, đơn vị sản xuất thực hiện các mô hình kinh tế tuần hoàn, sản phẩm xanh từ tái sử dụng phụ phẩm sản xuất cà phê, chế biến thực phẩm có lợi cho môi trường, sức khỏe và tạo giá trị gia tăng, uy tín cho các ngành hàng sản xuất của Việt Nam



▲ Thiết bị sản xuất vật liệu biochar quy mô hộ cho thử nghiệm tại Cư Suê - Cư M'gar - Đắk Lắk

Lời cảm ơn: Nghiên cứu do Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam tài trợ cho hoạt động của Nghiên cứu viên cao cấp, mã NCVCC07.08/24-24 về nghiên cứu khả năng hấp phụ caffeine trong nước bằng than sinh học vỏ cà phê và Nghiên cứu công nghệ decaf sử dụng than sinh học tuần hoàn dịch chiết và tái sử dụng chất thải tại các cơ sở sản xuất cà phê quy mô nhỏ tại Đắk Lắk do UBND tỉnh Đắk Lắk tài trợ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. H. Peker, M.P. Srinivasan, J.M. Smith, B.J. McCoy, Caffeine extraction rates from supercritical carbon coffee beans with dioxide, *AICHE J.* 38 (1992) 761-770.
2. N. Elvio, T. Alex. Highly effective adsorption of caffeine by a novel activated carbon prepared from coconut leaf, *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29, 50661-50674.
3. S. Keerthanan, B. Amit, M. Kushani, J. Chamila. Engineered tea-waste biochar for the removal of caffeine, a model compound in pharmaceuticals and personal care products (PPCPs), from aqueous media, *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 19, 100847.
4. Correa- Navarro, Y. M. Moreno- Piraján, J. C. Giraldo, L. Rodríguez- Estupiñan. Caffeine adsorption by fique bagasse biochar produced at various pyrolysis temperatures, *Oriental Journal of Chemistry*, 2019, 35, 538-546.
5. O. Muter, I. Perkons, V. Bartkevičs. Removal of pharmaceutical residues from wastewater by woodchip-derived biochar, *Desalination and Water Treatment*, 2019, 159, 110-120.
6. P.T.H. Minh, N. K.Chi, P. M. Quan, N.H. Linh, D.N. Phuong, N. X. Tung, D.T. Tien, D.T.Tu. Nghiên cứu hoạt chất sinh học từ chất chiết cà phê xanh cho ngành dược mỹ phẩm, vật liệu nano từ cà phê Robusta Đắk Lắk. *Tạp chí phân tích Hóa, Lý và Sinh học - Tập 27, Số 3/2022*, 225-231.