



Nghiên cứu hấp phụ amoxicillin bằng carbon hoạt tính chế tạo từ vỏ sầu riêng Đắk Lắk: Động học và cân bằng đẳng nhiệt

Utilization of Dak Lak durian peel-derived activated carbon for amoxicillin adsorption: Equilibrium and kinetics

Phan Thị Kim Thu^{1,*}, Lê Minh Ngọc Hân¹, Nguyễn Thị Duyệt²

¹ Khoa KHTN&CN, Trường Đại học Tây Nguyên, 567 Lê Duẩn, Đắk Lắk, Việt Nam

² THPT Phú Hữu, TP Cần Thơ

* Email: ptkthu@ttn.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 12/07/2026

Accepted: 30/09/2026

Published: 30/09/2026

Keywords:

Durian shell; Activated carbon;

KOH activation;

Amoxicillin; Adsorption;

ABSTRACT

This study optimized the synthesis of durian shell-derived activated carbon (AC) via KOH chemical activation for the removal of amoxicillin (AMX) from aqueous solutions. The optimal conditions (KOH-to-biochar mass ratio of 2:1, impregnation time of 5 h, and activation temperature of 400 °C) yielded a material recovery of 46.2% and a specific surface area S_{BET} of 866.502 m²/g, a well developed micro-mesoporous structure with a total pore volume of 0.483 cm³/g and a point of zero charge pH_{pzc} of 6.5. AMX adsorption reached its maximum at pH 5.0–6.0, where AMX predominantly exists in its zwitterionic form driven by the simultaneous contributions of hydrogen bonding, π - π dispersion interactions, and capillary diffusion. The adsorption kinetics strictly followed the pseudo-second-order model ($R^2 > 0.99$), reaching equilibrium within 120 min, controlled simultaneously by boundary layer. Equilibrium data fitted well to the Langmuir isotherm model ($R^2 > 0.99$), yielding a maximum monolayer adsorption capacity of 92.85 mg/g at 298 K. These findings demonstrate that AC from durian shell is a low-cost, highly efficient, and environmentally friendly adsorbent for water treatment.

Giới thiệu chung

Sự tích tụ kháng sinh amoxicillin (AMX) thuộc nhóm β -lactam trong môi trường nước từ nước thải y tế và sinh hoạt đang đe dọa an ninh nguồn nước và sinh thái toàn cầu. Cấu trúc vòng β -lactam bền vững không chỉ gây độc hệ sinh vật thủy sinh mà còn thúc đẩy vi khuẩn kháng thuốc, đặt ra yêu cầu cấp thiết về công nghệ xử lý triệt để [1, 2].

Trong số các phương pháp xử lý, hấp phụ bằng carbon hoạt tính chế tạo từ phụ phẩm nông nghiệp

được đánh giá cao nhờ hiệu quả kinh tế và tính bền vững sinh thái [3, 4]. Tại Đắk Lắk, phụ phẩm vỏ sầu riêng phát sinh khối lượng rất lớn (chiếm 35–70% trọng lượng quả), gây ô nhiễm môi trường [5, 6] nhưng với hàm lượng lignocellulose cao, đây là tiền chất lý tưởng để kiến tạo khung carbon theo định hướng kinh tế tuần hoàn [7, 8].

Tuy nhiên, quy trình hoạt hóa hóa học bằng KOH để định hình cấu trúc mao quản của carbon từ vỏ sầu riêng Đắk Lắk chưa được khảo sát hệ thống. Cơ chế hóa lý bề mặt chi phối tương tác giữa khung carbon

với phân tử AMX ở trạng thái lưỡng cực (zwitterion) cũng là khoảng trống khoa học cần làm rõ.

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá hệ thống khả năng hấp phụ AMX của carbon hoạt tính chế tạo từ vỏ sấu riêng Đắk Lắk. Các yếu tố ảnh hưởng đến cấu trúc mao quản, động học, mô hình cân bằng đẳng nhiệt và cơ chế tương tác bề mặt được làm sáng tỏ, ngoài ra còn cung cấp giải pháp vật liệu chi phí thấp, hiệu quả cao cho kiểm soát ô nhiễm nước tại khu vực Tây Nguyên [9, 10].

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hóa chất và thiết bị

Các hóa chất được sử dụng trong nghiên cứu là dạng tinh khiết phân tích: Potassium hydroxide (KOH), amoxicillin (AMX, $C_{16}H_{19}N_3O_5S$), sodium hydroxide (NaOH), acid hydrochloric (HCl), sodium chloride (NaCl), nước cất, vỏ sấu riêng thu gom tại tỉnh Đắk Lắk. Lò nung của Trung Quốc, máy đo phổ hấp thụ phân tử UV-Vis.

Tổng hợp và đặc trưng carbon hoạt tính từ vỏ sấu riêng

Vỏ sấu riêng được rửa sạch, cắt nhỏ kích thước khoảng 1x1 cm, sấy khô ở 105 °C trong 24 giờ, nghiền mịn và rây đồng đều. Bột nguyên liệu được nhiệt phân yếm khí trong chén sứ đậy kín tại 500 °C với tốc độ 5-10 K/phút, giữ nhiệt trong 4 giờ thu được than sinh học.

Tiếp theo, than sinh học được tẩm dung dịch KOH theo tỷ lệ khối lượng KOH:than = 2:1, khuấy đều trong 5 giờ ở nhiệt độ phòng. Hỗn hợp được sấy khô ở 110°C trong 24 giờ, nung hoạt hóa yếm khí ở 400°C trong 1 giờ. Sản phẩm hoạt hóa được rửa bằng dung dịch HCl loãng, sau đó rửa nhiều lần bằng nước cất nóng đến pH trung tính (6.5 - 7.0), sấy khô ở 105 °C, nghiền mịn và bảo quản trong bình hút ẩm (ký hiệu là AC). Hiệu suất thu hồi vật liệu (H%) được xác định theo công thức:

$$H\% = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%$$

Cấu trúc tinh thể, nhóm chức bề mặt và hình thái học của AC được đánh giá tương ứng thông qua giản đồ XRD, phổ FTIR và ảnh SEM. Diện tích bề mặt riêng và phân bố kích thước mao quản được xác định bằng phương pháp Brunauer-Emmett-Teller (BET). Điểm đẳng điện pH_{pzc} được xác định từ thực nghiệm: Pha các dung dịch NaCl 0,1 M có pH ban đầu (pH_0) từ 2 đến 10, thêm bột AC với liều lượng 2 g/L, lắc đều đạt cân bằng, đo lại pH sau khi tách pha lỏng (pH_s). Điểm đẳng điện của vật liệu là giá trị pH_0 tại vị trí đường cong biến thiên ΔpH ($\Delta pH = pH_s - pH_0$) cắt trục hoành tại $\Delta pH = 0$.

Đánh giá khả năng hấp phụ Amoxicillin

Khả năng hấp phụ AMX được thực hiện bằng phương pháp tĩnh: Lắc đều dung dịch AMX (50 mL) có nồng độ ban đầu thay đổi (50 – 250 mg/L) với lượng AC xác định trên máy lắc ổn nhiệt (150 vòng/phút) ở nhiệt độ phòng. Khảo sát ảnh hưởng của các điều kiện vận hành bao gồm: pH dung dịch (2,0 - 10,0), khối lượng AC (0,02 - 0,20 g/50 mL), thời gian tiếp xúc (30 – 720 phút) và nồng độ AMX ban đầu (50 – 250 mg/L). Sau khi kết thúc thời gian lắc, hỗn hợp được ly tâm (5000 vòng/phút, 10 phút) và lọc qua màng lọc 0,45 μm để tách pha lỏng. Nồng độ AMX còn lại trong dung dịch được định lượng bằng phương pháp phổ hấp thụ phân tử UV-Vis tại bước sóng hấp thụ cực đại $\lambda_{max} = 272$ nm dựa trên đường chuẩn đã thiết lập. Dung lượng hấp phụ cân bằng q_e (mg/g) và hiệu suất loại bỏ H% được tính toán từ các số liệu nồng độ thực nghiệm theo công thức:

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

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

Với: m_0 : Khối lượng bột khô vỏ sấu riêng trước khi hoạt hóa (g); m_1 : Khối lượng của AC thu được (g); C_0 : Nồng độ ban đầu của AMX trong dung dịch (mg/L); C_e : Nồng độ của AMX còn lại tại thời điểm khảo sát (mg/L); V : Thể tích dung dịch AMX đem đi hấp phụ (L); m : Khối lượng của vật liệu AC cho vào bình phản ứng (g).

Dữ liệu thực nghiệm thu được được mô phỏng toán học bằng các mô hình động học (biểu kiến bậc 1, biểu kiến bậc 2) và các mô hình đẳng nhiệt hấp phụ (Langmuir, Freundlich).

Kết quả và thảo luận

Tối ưu hóa điều kiện tổng hợp vật liệu AC

Quy trình chế tạo AC từ vỏ sấu riêng được tối ưu hóa qua ba thông số: tỷ lệ khối lượng KOH:than, thời gian ngâm tẩm và nhiệt độ hoạt hóa (Bảng 1).

Tỷ lệ khối lượng KOH:than đóng vai trò quan trọng đối với sự hình thành cấu trúc lỗ xốp. Khi tăng tỷ lệ từ 1:1 lên 2:1, dung lượng hấp phụ AMX (q_e) tăng từ 28,5 mg/g lên đạt giá trị cực đại 43,16 mg/g, mặc dù hiệu suất thu hồi vật liệu giảm từ 58,4% xuống 46,2%. Sự thay đổi này là do có các phản ứng oxy hóa-khử giữa carbon và KOH ở nhiệt độ cao [11]:



Ở nhiệt độ cao, muối K_2CO_3 tiếp tục bị khử giải phóng oxide carbon, đồng thời các nguyên tử potassium kim loại tự do (K) bay hơi và xen cài vào giữa các lớp mạng carbon, làm giãn nở các lớp graphite và tạo nên hệ

thống vi mao quản phát triển. Tuy nhiên, khi tăng tỷ lệ kiềm lên 3:1 (MR3) và 4:1 (MR4) gây ra hiện tượng "quá hoạt hóa", đốt cháy vách ngăn và sập mạng lưới xốp, dẫn đến hiệu suất thu hồi giảm xuống 31,1% (MR4) và q_e sụt giảm còn 30,04 mg/g.

Bảng 1: Thông số tối ưu hóa quy trình tổng hợp AC và kết quả hấp phụ AMX sơ bộ ($C_0 = 100$ mg/L, $V = 50$ mL, $m = 0,05$ g, $t = 5$ h)

Mẫu		KOH: than (g:g)	Thời gian (h)	Nhiệt độ (°C)	Hiệu suất thu hồi (%)	q_e (mg/g)
MR1	Tỷ lệ ngâm tắm	1:1	5	400	58,4	28,5
MR2		2:1	5	400	46,2	43,16
MR3		3:1	5	400	38,5	37,06
MR4		4:1	5	400	31,1	30,04
MT1	Thời gian ngâm	2:1	3	400	50,1	33,08
MT2		2:1	4	400	48,3	38,04
MT3		2:1	5	400	45,9	43,03
MT4		2:1	6	400	45,7	42,42
MTe1	Nhiệt độ hoạt hóa	2:1	5	300	65,8	19,06
MTe2		2:1	5	400	46,1	43,05
MTe3		2:1	5	500	28,4	34,52

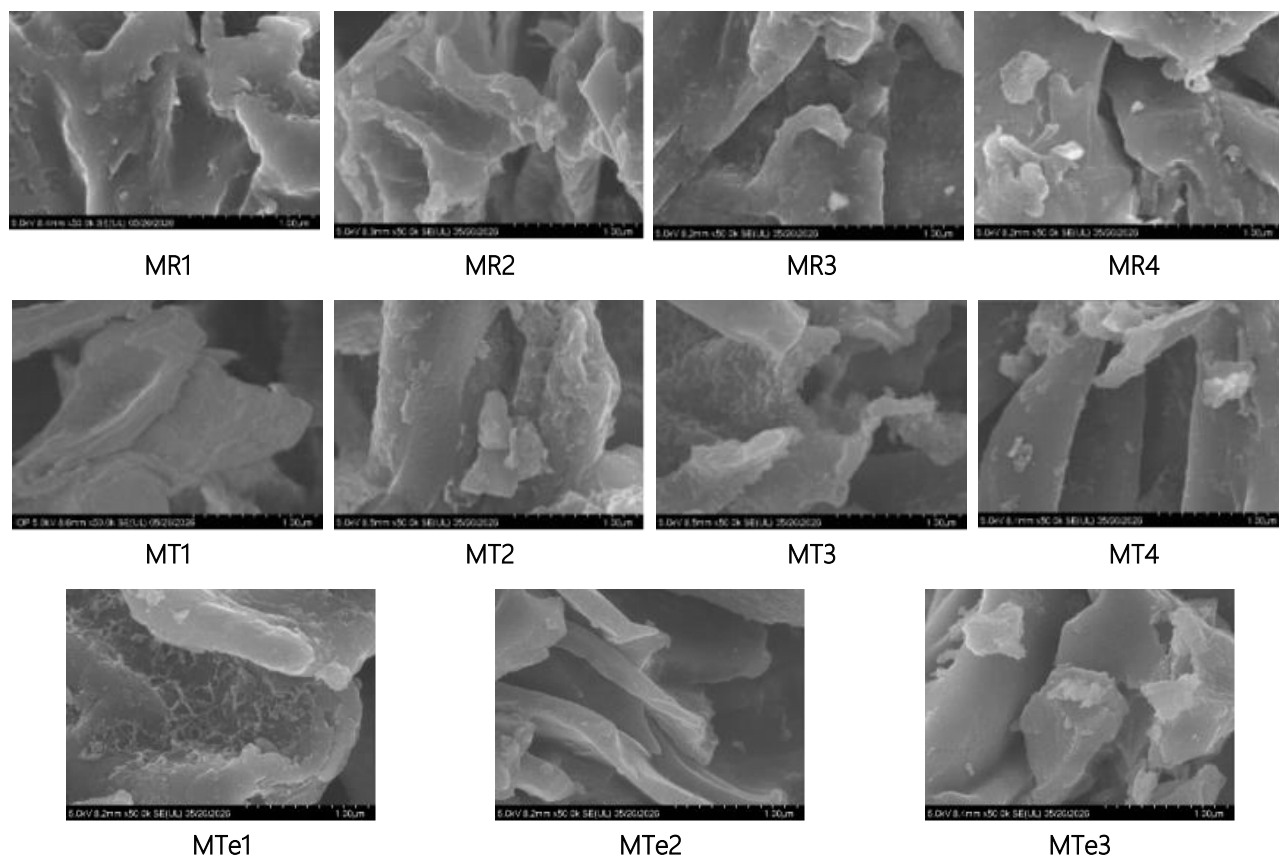
Khảo sát thời gian ngâm tắm cho thấy 5 giờ là thời gian đảm bảo sự khuếch tán đồng đều của các ion K^+ và OH^- vào sâu trong cấu trúc sườn carbon; kéo dài lên 6 giờ không có sự cải thiện đáng kể.

Về nhiệt độ hoạt hóa, ở 300 °C (MTe1), nhiệt lượng chưa đủ để phân hủy hoàn toàn các hợp chất dễ bay hơi, gây nghẽn phần lớn hệ thống lỗ xốp sơ cấp ($q_e = 19,06$ mg/g). Ở 400 °C (MR2), quá trình ăn mòn và khí hóa của kiềm diễn ra triệt để nhất [11]. Khi nâng lên 500 °C (MTe3) dung lượng hấp phụ và hiệu suất thu hồi vật liệu giảm đáng kể, hiện tượng đốt cháy và sụp đổ khung carbon cục bộ làm giảm các nhóm chức hoạt tính trên bề mặt [12].

Do đó, các điều kiện tổng hợp thích hợp nhất được xác định là: tỷ lệ KOH:than = 2:1, thời gian ngâm 5 giờ và nhiệt độ hoạt hóa 400 °C (Mẫu MR2/MT3/MTe2).

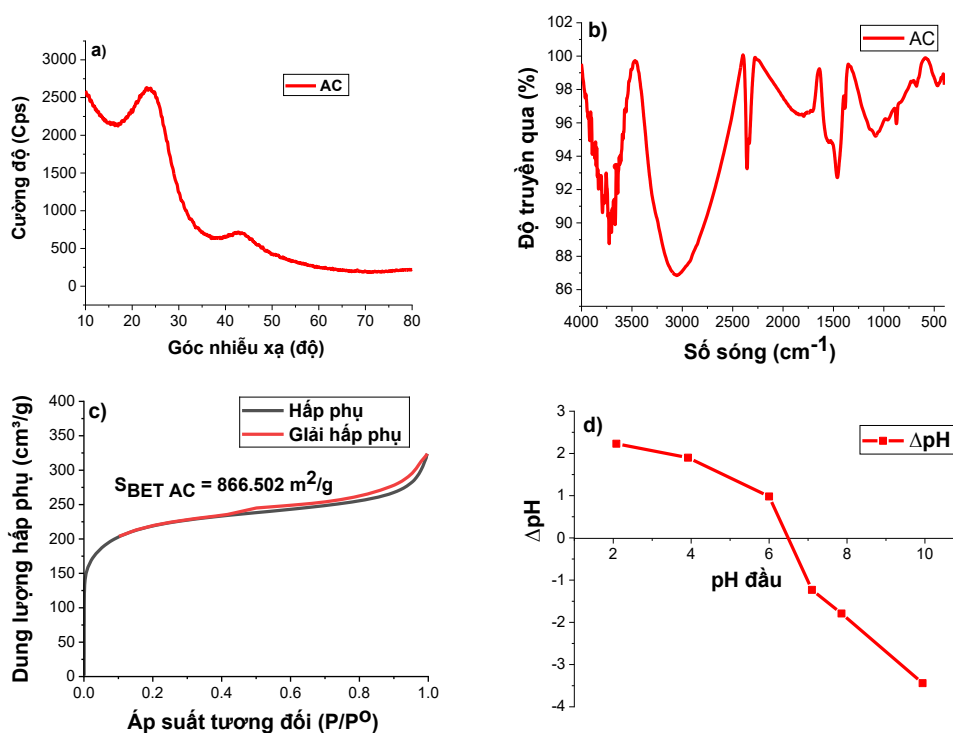
Đặc trưng cấu trúc và bề mặt

Ảnh SEM của 11 mẫu vật liệu (Hình 1) thể hiện sự phân hóa rõ rệt về hình thái bề mặt theo các điều kiện tổng hợp. Kết quả cho thấy tỷ lệ KOH:than là 2:1, ngâm 5 giờ, hoạt hóa ở 400 °C là điều kiện phù hợp nhất để phát triển hoàn thiện mạng lưới vi mao quản và mao quản trung bình dạng tổ ong đồng đều, khắc phục sự nghẽn xốp ở nhiệt độ thấp hoặc sập khung mao quản do quá hoạt hóa.



Hình 1: Ảnh SEM của vật liệu AC từ vỏ sầu riêng ở các điều kiện tổng hợp khác nhau

Cấu trúc pha (XRD), đặc trưng liên kết (FTIR), đặc trưng hấp phụ khử hấp phụ N₂ của mẫu MR2 được thể hiện trong hình 2.



Hình 2: Một số đặc trưng cấu trúc của AC (a) Giảm đồ nhiễu xạ tia X; (b) Phổ hồng ngoại; (c) Giảm đồ BET; (d) Đồ thị xác định điểm đẳng điện

Giảm đồ XRD ở Hình 2a thể hiện hai đỉnh nhiễu xạ rộng, từ có cường độ thấp tại $2\theta \approx 20^\circ - 24^\circ$, tương ứng với mặt (002) và $42^\circ - 44^\circ$, tương ứng với mặt (100), kết quả cho thấy pha carbon tồn tại chủ yếu ở dạng vô định hình. Đồng thời, không xuất hiện các đỉnh phổ của tạp chất vô cơ, chứng minh quy trình rửa bằng HCl và nước cất nóng đạt hiệu quả cao.

Hình 2b cho thấy, bề mặt AC giàu các nhóm chức phân cực chứa oxygen gồm dải dao động kéo dài O-H ($3400-3800\text{ cm}^{-1}$ và dải rộng 3050 cm^{-1}), C=C vòng thơm sp^2 xen phủ với C=O ($1580-1650\text{ cm}^{-1}$), biến dạng O-H/ C-H ($1420-1460\text{ cm}^{-1}$) và liên kết C-O ($1000-1150\text{ cm}^{-1}$). Các nhóm chức này đóng vai trò là tâm hoạt tính hình thành liên kết hydrogen và tương tác cho-nhận electron $\pi-\pi$.

Phương pháp BET cho thấy AC tổng hợp được thể hiện đặc tính lai giữa đường đẳng nhiệt Kiểu I và Kiểu IV (vòng trễ H4), chứng tỏ sự tồn tại đồng thời của hệ thống vi mao quản và mao quản trung bình. Diện tích bề mặt riêng đạt $866,502\text{ m}^2/\text{g}$, với tổng thể tích mao quản (V_{total} tại $P/P_0 = 0,99$) là $0,483\text{ cm}^3/\text{g}$. Trong đó, V_{micro} , tính theo phương pháp t-plot đạt $0,342\text{ cm}^3/\text{g}$, V_{meso} đạt $0,141\text{ cm}^3/\text{g}$, phù hợp cho quá trình khuếch tán và lưu giữ các phân tử hữu cơ có kích thước trung bình như AMX, S_{BET} này khá lớn so với một số carbon hoạt tính từ vỏ sấu riêng của một số công trình khác [13, 14].

Điểm đẳng điện là giá trị pH mà tại đó mật độ điện tích động trên bề mặt chất hấp phụ bằng không. Kết quả thực nghiệm trong Hình 2d cho thấy giá trị pH_{pzc} của AC đạt 6,5. Ở pH môi trường $< 6,5$, bề mặt carbon bị proton hóa tích điện dương; ngược lại, ở pH $> 6,5$, quá trình khử proton diễn ra làm bề mặt tích điện âm.

Đánh giá khả năng hấp phụ và cơ chế xử lý AMX

Để xác định hàm lượng AMX còn lại trong dung dịch sau hấp phụ, phương pháp phổ quang học tử ngoại - khả kiến (UV-Vis) được áp dụng tại bước sóng hấp thụ cực đại $\lambda_{\text{max}} = 272\text{ nm}$. Đường chuẩn biểu diễn mối quan hệ giữa độ hấp thụ quang (A) và nồng độ AMX (C, mg/L) được xây dựng trong khoảng tuyến tính 5 - 100 mg/L. Phương trình hồi quy tuyến tính thu được có dạng: $A = 0,224.C + 0,0202$ ($R^2 = 0,9964$).

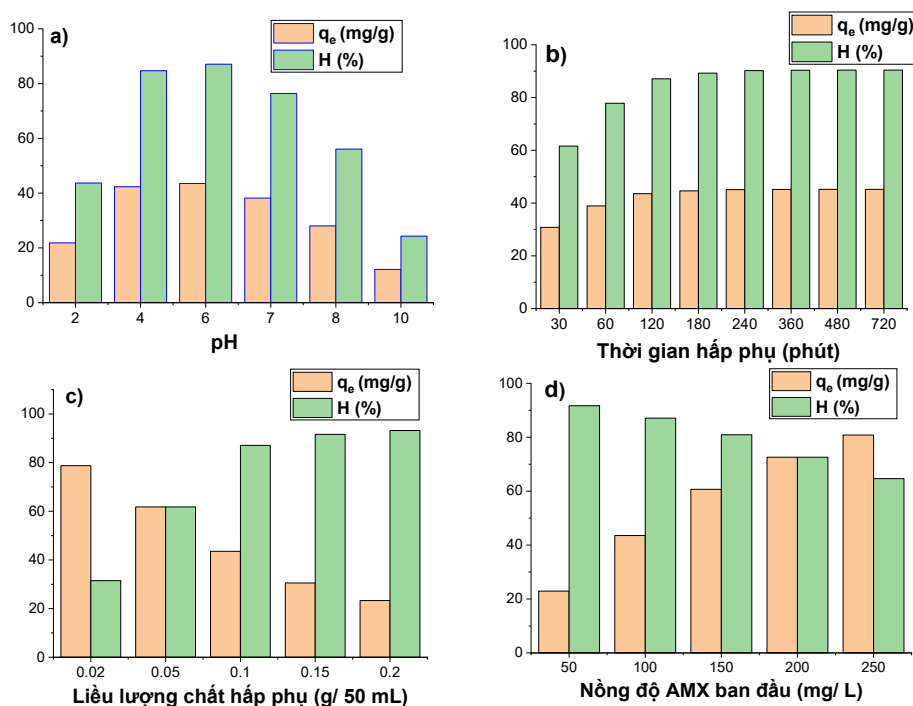
Trong nghiên cứu này, chúng tôi khảo sát sự ảnh hưởng của pH, thời gian hấp phụ, khối lượng vật liệu và nồng độ AMX ban đầu đến dung lượng và hiệu suất hấp phụ AMX sử dụng than hoạt tính từ vỏ sấu riêng.

Hình 3a thể hiện kết quả khảo sát ảnh hưởng của pH tới hiệu suất và dung lượng hấp phụ AMX 100 mg/L của AC 2 g/L sau 120 phút. Khi pH tăng từ 2 đến 6, khả năng hấp phụ đạt giá trị cao nhất trong khoảng pH = 4-6 (tốt nhất tại pH = 6), sau đó giảm dần khi tăng pH lên ngưỡng base (pH = 7-10). Cơ chế này được giải

thích dựa trên mối tương quan giữa điểm đẳng điện của vật liệu ($pH_{pzc} = 6,5$) và các hằng số phân ly acid của AMX ($pK_{a1} = 2,4$ nhóm $-COOH$; $pK_{a2} = 7,4$ nhóm $-NH_2$; $pK_{a3} = 9,6$ nhóm $-OH$ phenol) [3] [15], tuy nhiên khả năng phân li tới bậc 3 là rất yếu. Như vậy, tại vùng pH thấp ($pH < 2,4$), AMX tồn tại chủ yếu ở dạng cấu tử cation (AMX^+) trong khi bề mặt AC tích điện dương mạnh, gây lực đẩy tĩnh điện kết hợp với sự cạnh tranh vị trí của ion H^+ . Khi pH tăng lên 4 và 6 ($2,4 < pH < 7,4$), AMX chủ yếu tồn tại ở dạng lưỡng cực (zwitterion, $AMX^\pm$ với nhóm $-COO^-$ và $-NH_3^+$), trong khi bề mặt AC tích điện dương nhẹ, do đó, ngoài lực hút tĩnh điện yếu giữa các tâm hoạt tính, quá trình hấp phụ mạnh mẽ trong vùng này được chi phối chủ yếu bởi mạng lưới liên kết hydro giữa nhóm $-OH$, $-NH_2$ của AMX với các nhóm chức chứa oxy trên bề mặt vật liệu ($-COOH$, $-OH$), kết hợp với tương tác $\pi-\pi$ giữa vòng thơm của

phân tử amoxicillin và các mặt phẳng carbon thơm (sp^2) sẵn có trong cấu trúc carbon hoạt tính. [1, 15]. Khi pH tiếp tục tăng ($pH > 7,4$), AMX bị khử proton tạo thành cấu tử anion (AMX^- và AMX^{2-}), chịu lực đẩy tĩnh điện mạnh từ bề mặt AC tích điện âm ($pH > pH_{pzc}$). Xu hướng hấp phụ này thể hiện sự tương đồng cao với một số công bố [3, 6].

Kết quả khảo sát ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc, khối lượng vật liệu và nồng độ ban đầu (Hình 3b–d) cho thấy quá trình hấp phụ diễn ra nhanh trong 60 phút đầu và đạt cân bằng tại 120 phút. Tăng khối lượng AC làm tăng hiệu suất xử lý do tăng số lượng tâm hoạt tính trống. Ở nồng độ AMX 50 mg/L, hiệu suất hấp phụ đạt cực đại 91,70% ($q_e = 22,93$ mg/g). Các dữ kiện thực nghiệm này được dùng để tính dung lượng hấp phụ và xử lý số liệu theo các lý thuyết về động học hấp phụ và mô hình hấp phụ.



Hình 3: Một số yếu tố ảnh hưởng tới hiệu suất hấp phụ AMX: a) pH; b) Thời gian hấp phụ; c) Khối lượng AC; d) Nồng độ ban đầu AMX

Để nghiên cứu động học quá trình hấp phụ AMX 100 mg/L bằng AC 2 g/L, dữ liệu thực nghiệm được mô hình hóa theo các phương trình động học sau:

Mô hình biểu kiến bậc 1:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

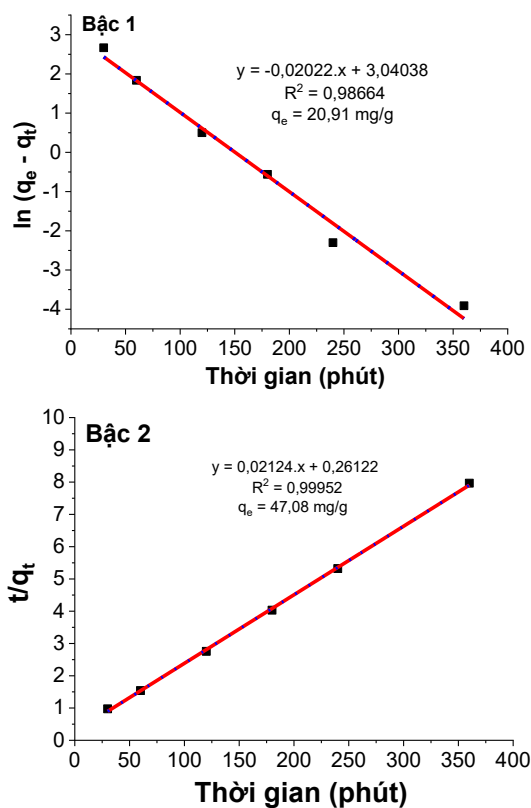
Mô hình biểu kiến bậc 2:

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

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

Kết quả thu được trên hình 4 cho thấy: Hệ số tương quan của dữ liệu thực nghiệm theo mô hình bậc 2 ($R^2 = 0,99952$) lớn hơn theo mô hình bậc 1 ($R^2 = 0,98664$). Hơn nữa, dung lượng hấp phụ cân bằng lý thuyết ($q_{e,cal} = 47,08$ mg/g) phù hợp chặt chẽ với thực nghiệm ($q_{e,exp} = 45,20$ mg/g) cho thấy quá trình hấp phụ bị chi phối chủ yếu bởi cơ chế tương tác hóa học. Sự tương thích cao với mô hình giả bậc hai biểu kiến phản ánh tốc độ hấp phụ phụ thuộc vào sự sẵn có của các tâm hấp phụ trên bề mặt vật liệu [12]. Tuy nhiên, điều này không đồng nhất với việc quá trình hấp phụ thuần túy là hấp phụ hóa học [6, 16]. Quá trình bắt giữ AMX trên

AC từ vỏ sấu riêng là một cơ chế hóa – lý phức hợp: lực hút mao quản vật lý hỗ trợ đưa phân tử vào vị trí, sau đó phân tử được neo giữ bền vững bởi tổ hợp liên kết hydro và tương tác phân tán π - π bề mặt [3, 7, 12].



Hình 4: Mô hình hóa dữ liệu thực nghiệm theo các mô hình động học giả phản ứng

Đẳng nhiệt hấp phụ mô tả mối quan hệ giữa lượng chất tan bị giữ lại trên bề mặt chất hấp phụ và lượng chất tan còn dư trong dung dịch ở trạng thái cân bằng và nhiệt độ không đổi. Kết quả khảo sát với nồng độ AMX ban đầu từ 50 đến 250 mg/L. Lý thuyết quá trình hấp phụ được nghiên cứu theo các mô hình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir (1) và Freundlich (2):

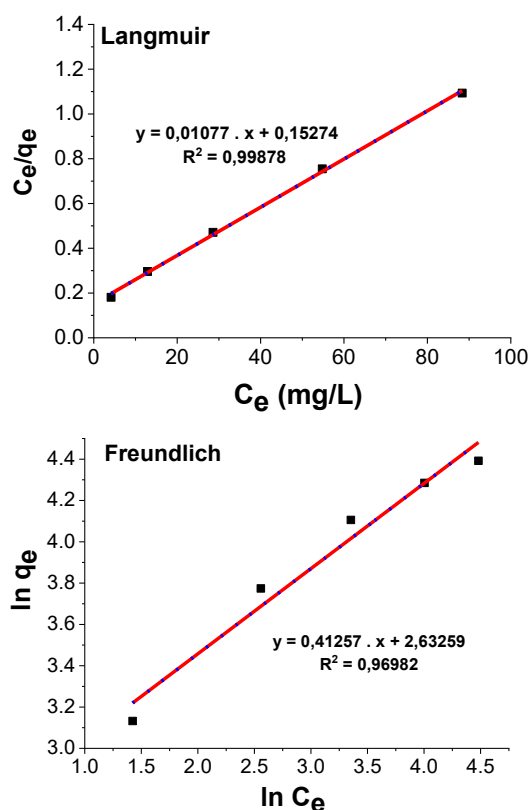
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{1}{q_{\max}} \cdot C_e \quad (1)$$

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2)$$

Trong đó K_L (L/mg), K_F (L/mg) lần lượt là hằng số hấp phụ theo mô hình đẳng nhiệt Langmuir và Freundlich. n là một hằng số trong phương trình Freundlich, C_e là nồng độ chất bị hấp phụ tại cân bằng hấp phụ.

Kết quả thể hiện trên hình 5 cho thấy, hệ số tương quan R^2 theo mô hình Langmuir lớn hơn Freundlich, chứng tỏ quá trình hấp phụ AMX diễn ra theo cơ chế đơn lớp trên bề mặt đồng nhất [6]. Dung lượng hấp phụ cực đại $q_{\max} = 92,85$ mg/g, hệ số tách R_L nằm trong khoảng 0,053 đến 0,221 (thỏa mãn điều kiện $0 <$

$R_L < 1$) nên quá trình hấp phụ rất thuận lợi, thể hiện khả năng cạnh tranh cao so với nhiều các loại carbon hoạt tính từ phụ phẩm nông nghiệp khác trong các công bố gần đây [16, 17]. Sự phù hợp với mô hình Langmuir trong phạm vi nồng độ nghiên cứu cho thấy quá trình hấp phụ diễn ra theo cơ chế bao phủ đơn lớp biểu kiến tại các vị trí hoạt động trên bề mặt với mức năng lượng phân bố tương đối đồng đều, không xảy ra sự tích tụ đa lớp vô hạn [18, 19].



Hình 5: Mô hình hóa dữ liệu thực nghiệm theo các lý thuyết hấp phụ

Kết luận

Nghiên cứu đã chế tạo thành công carbon hoạt tính từ phụ phẩm vỏ sấu riêng Đắc Lắc bằng phương pháp hoạt hóa KOH ở điều kiện tối ưu (tỷ lệ 2:1, thời gian 5 giờ, nhiệt độ 400 °C). Vật liệu có diện tích bề mặt riêng đạt 866,502 m²/g, tổng thể tích mao quản 0,483 cm³/g và $pH_{pzc} = 6,5$. Quá trình hấp phụ AMX đạt tối ưu ở pH 5,0 – 6,0 nhờ cơ chế kết hợp giữa tương tác π - π , liên kết hydrogen và sự tồn tại của AMX ở dạng lưỡng cực AMX[±]. Động học hấp phụ tuân theo mô hình biểu kiến bậc hai ($R^2 = 0,9995$), đạt cân bằng sau 120 phút. Cân bằng đẳng nhiệt phù hợp với mô hình Langmuir cho dung lượng đơn lớp cực đại đạt 92,85 mg/g. Kết quả khẳng định tiềm năng của việc tận dụng phụ phẩm nông nghiệp địa phương để sản xuất chất hấp phụ xử lý dư lượng dược phẩm kháng sinh trong nước thải.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài cơ sở Trường Đại học Tây Nguyên, mã số T2026-20CB.

Tài liệu tham khảo

1. I. Anastopoulos, I. Pashalidis, A.G. Orfanos, I.D. Manariotis, T. Tatarchuk, L. Sellaoui, A. Bonilla-Petriciolet, A. Mittal, A. Nunez-Delgado, J. Environ. Manage., 261 (2020) 110236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110236>
2. Y. El-Nahhal, N. El-Dahdouh, Ecotoxicol. Environ. Contam., 10(1) (2015) 13–21. <https://doi.org/10.5132/eec.2015.01.03>
3. D.R.S.I. Shah, J. Ind. Eng. Chem., 145 (2025) 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.01.001>
4. J. Goscianska, Microporous Mesoporous Mater., 331 (2022) 111650. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111650>
5. P.M. Tien, N.T.T. Huong, N.D. Khoa, CTU J. Innov. Sustain. Dev., 17(1) (2025) 91–100. <https://doi.org/10.22144/ctujoisd.2025.038>
6. A. Yazidi, L. Sellaoui, G.L. Dotto, A. Bonilla-Petriciolet, A.B. Lamine, Chem. Eng. J., 379 (2020) 122320. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122320>
7. Y. Zhou, S.Y. Leong, Q. Li, J. Water Process Eng., 55 (2023) 104222. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104222>
8. J. Wang, S. Kaskel, J. Mater. Chem., 22(45) (2012) 23710–23725. <https://doi.org/10.1039/c2jm34066f>
9. H. Hanafy, Z. Li, L. Sellaoui, A. Yazidi, H. Wang, E.C. Lima, A. Erto, Environ. Sci. Pollut. Res., 28(24) (2021) 30714–30721. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12696-1>
10. S. Roddaeng, P. Promvong, R. Anuwattana, Emergent Mater., 7(3) (2024) 1239–1251. <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00641-0>
11. B. Sajjadi, T. Zubatiuk, D. Leszczynska, J. Leszczynski, W.Y. Chen, Rev. Chem. Eng., 35(7) (2018) 777–815. <https://doi.org/10.1515/revce-2018-0003>
12. K.Y. Foo, B.H. Hameed, Diamond Relat. Mater., 128 (2022) 109275. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109275>
13. M.R. Bilad, AIP Conf. Proc., 2230(1) (2020) 030020. <https://doi.org/10.1063/5.0002422>
14. A.E. Ofomaja, J. Porous Mater., 28(1) (2020) 145–160. <https://doi.org/10.1007/s10934-020-00977-1>
15. A. Bhatnagar, M. Sillanpää, A. Witek-Krowiak, Chem. Eng. J., 157(2-3) (2010) 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.01.020>
16. O. Pezoti, A.L. Cazetta, K.C. Bedin, L.S. Souza, A.C. Martins, T.L. Silva, V.C. Almeida, Chem. Eng. J., 288 (2016) 778–788. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.12.042>
17. S.H. Lee, Processes, 12(8) (2024) 1552. <https://doi.org/10.3390/pr12801552>
18. K.Y. Foo, B.H. Hameed, Chem. Eng. J., 156(1) (2010) 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
19. J. Wang, X. Guo, Chemosphere, 258 (2020) 127279. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>