



Nghiên cứu đẳng nhiệt quá trình hấp phụ kháng sinh Ciprofloxacin bởi vật liệu titanosilicate ETS-10

Investigation of the adsorption of Ciprofloxacin from aqueous solution using titanosilicate ETS-10

Dương Bích Ngọc^{1,2,3}, Phạm Văn Hiến^{4,5}, Lê Nguyễn Quang Tú^{1,2}, Nguyễn Thị Phương Tú^{1,2}, Hồ Thiên Hoàng⁶, Nguyễn Ngọc Duy⁷, 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 Trung tâm Đào tạo Hạt nhân, Viện Năng lượng Nguyên tử Việt Nam, Hà Nội, Việt Nam

⁴ Viện Công nghệ tiên tiến, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁵ Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁶ Đại học Đồng Nai, Thành phố Đồng Nai, Việt Nam

⁷ Trung tâm hạt nhân, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

* Email: dvphuc@ntt.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 21/07/2026

Accepted: 26/09/2026

Published: 30/09/2026

Keywords:

Adsorption; ETS-10; Ciprofloxacin; medical wastewater.

ABSTRACT

This study investigated the removal of ciprofloxacin (CIF) from aqueous solutions using the titanosilicate ETS-10 at 307 K. The effects of key operational parameters, including pH, contact time, and initial CIF concentration, were evaluated. The results indicated that the optimal conditions for CIF removal were achieved at pH = 6 with a contact time of 180 min. Equilibrium data were better described by the Langmuir-1 linear isotherm model than others, yielding a maximum monolayer adsorption capacity of 24.86 mg/g at 307 K. This performance compares favorably with several other reported adsorbents, suggesting that ETS-10 is a promising material for treating CIF-contaminated medical wastewater.

Giới thiệu chung

Sự xuất hiện của các hợp chất dược phẩm và dư lượng kháng sinh trong môi trường nước đang là một vấn đề cấp bách đối với an ninh nguồn nước toàn cầu [1,2]. Trong số các chất ô nhiễm mới nổi, ciprofloxacin (CIF) là một kháng sinh nhóm fluoroquinolone thế hệ thứ hai được sử dụng rộng rãi để điều trị các bệnh nhiễm trùng ở cả người và động vật [3]. Do khả năng hấp thụ và chuyển hóa không hoàn toàn trong cơ thể sinh vật, một lượng lớn hoạt chất này bị đào thải trực tiếp ra ngoài

môi trường qua nước thải sinh hoạt và y tế [4]. Nồng độ CIF trong nước thải bệnh viện và nước thải công nghiệp dược phẩm đã được ghi nhận dao động từ mức vài $\mu\text{g/L}$ đến hàng chục mg/L [5,6]. Sự dư thừa hàm lượng kháng sinh trong nguồn nước không chỉ gây độc cho các sinh vật thủy sinh mà còn làm gia tăng nguy cơ hình thành các chủng vi khuẩn kháng thuốc, đe dọa nghiêm trọng đến sức khỏe cộng đồng [1,7].

Để loại bỏ các chất ô nhiễm hữu cơ khó phân hủy sinh học trong môi trường nước như CIF, nhiều công nghệ

xử lý đã được phát triển như thẩm thấu ngược, phân hủy quang hóa và hấp phụ [4]. Trong đó, hấp phụ được đánh giá là phương pháp tối ưu hơn cả nhờ hiệu quả loại bỏ cao, quy trình vận hành đơn giản, chi phí thấp và không phát sinh các sản phẩm phụ độc hại [8]. Vật liệu titanosilicate vi mao quản Engelhard Titanosilicate-10 (ETS-10) là một họ zeotype đặc biệt được phát hiện vào năm 1989, sở hữu cấu trúc tinh thể ba chiều độc đáo được tạo thành từ các mạch bát diện TiO_6 liên kết góc với các tứ diện SiO_4 thông qua các nguyên tử oxy cầu nối. Cấu trúc này hình thành nên một hệ thống kênh dẫn vòng 12 cạnh với kích thước lỗ mở khoảng 0,8 nm [9]. Một đặc điểm nổi bật của ETS-10 là sự tồn tại của các chuỗi bát diện một chiều TiO_6 (... - O-Ti-O-Ti-O-...) mang điện tích âm, được bù trừ điện tích bởi các cation linh động như Na^+ và K^+ [10]. Nhờ dung lượng trao đổi ion lớn, tính chất ưa nước mạnh và cấu trúc xốp đồng đều, ETS-10 đã thu hút được sự quan tâm đặc biệt trong các ứng dụng trao đổi ion, xúc tác và hấp phụ chọn lọc các chất ô nhiễm [11].

Trong khuôn khổ của nghiên cứu này, ETS-10 được sử dụng làm chất hấp phụ để loại bỏ kháng sinh CIF trong môi trường nước. Nghiên cứu tập trung vào việc nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố như pH, thời gian đến quá trình hấp phụ, đồng thời sử dụng các mô hình đẳng nhiệt để đánh giá khả năng hấp phụ CIF của vật liệu ETS-10.

Thực nghiệm và Phương pháp nghiên cứu

Hóa chất

Kháng sinh ciprofloxacin (CIF) sử dụng trong nghiên cứu này là dạng tinh khiết phân tích. Dung dịch gốc CIF với nồng độ ban đầu được chuẩn bị bằng cách hòa tan lượng CIF chính xác trong nước cất siêu sạch. Các dung dịch làm việc có nồng độ thấp hơn được pha loãng từ dung dịch gốc này. Axit HCl 0,1M và NaOH 0,1 M được sử dụng để điều chỉnh giá trị pH của dung dịch khảo sát.

Tổng hợp vật liệu ETS-10

Vật liệu ETS-10 được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt từ hỗn hợp gel phản ứng có chứa nguồn silic từ vỏ trấu và nguồn titan từ TiCl_3 . Gel phản ứng thường được kiểm soát nghiêm ngặt theo tỷ lệ mol chuẩn 2,76 Na_2O : 2,1 K_2O : 1,0 TiO_2 : 6,12 SiO_2 : 0,33TPA-Br:165 H_2O . Quá trình thủy nhiệt được thực hiện trong bình phản ứng thủy nhiệt ở nhiệt độ 230 °C trong 24 giờ. Sản phẩm rắn thu được sau phản ứng được lọc, rửa sạch bằng nước cất để loại bỏ muối dư cho đến khi pH đạt mức trung hòa, sau đó sấy khô ở 100 °C, trước khi nung ở 500 °C trong 5 giờ để loại bỏ chất tạo cấu trúc và thu được vật liệu ETS-10 hoàn chỉnh.

Phương pháp xác định đặc trưng vật liệu

Các đặc tính cấu trúc và hình thái của vật liệu tổng hợp được tiến hành phân tích bằng các kỹ thuật hiện đại. Cấu trúc tinh thể được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ tia X dạng bột (P-XRD) trên thiết bị Bruker D8 Advance (nguồn bức xạ Cu K α , $\lambda=1,5401 \text{ \AA}$), với vùng quét 2θ từ 10° đến 80° (bước quét 0,02°, thời gian chờ 0,5 giây/bước). Hình thái và cấu trúc bề mặt được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM, Hitachi S-4800). Ngoài ra, các dao động đặc trưng được xác định bằng phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR, Jasco FT/IR-4X) tại 25 °C trong vùng số sóng 400-4000 cm^{-1} sử dụng kỹ thuật ép viên KBr. Cuối cùng, đặc tính kết cấu được đánh giá thông qua đường đẳng nhiệt hấp phụ-giải hấp phụ N_2 tại 77 K (Autosorb iQ) với diện tích bề mặt riêng được tính toán theo mô hình Brunauer-Emmett-Teller (BET).

Phương pháp hấp phụ CIF theo mẻ (batch adsorption)

Quá trình hấp phụ CIF lên vật liệu ETS-10 được tiến hành thông qua các thí nghiệm dạng mẻ ở nhiệt độ kiểm soát ổn định tại 307 K. Theo đó, 0,1 gram ETS-10 được cho vào các bình tam giác chứa 50 mL dung dịch CIF và lắc với tốc độ không đổi 250 vòng/phút. Các thông số hấp phụ được khảo sát bao gồm:

- ✓ Giá trị pH ban đầu của dung dịch được điều chỉnh trong khoảng từ 3 đến 11.
 - ✓ Thời gian hấp phụ trong khoảng từ 5 đến 360 phút.
 - ✓ Nồng độ đầu của CIF trong khoảng 10 đến 300 mg/L.
- Sau các khoảng thời gian xác định, hỗn hợp được lọc và thu lấy dung dịch sau hấp phụ. Nồng độ CIF trước và sau hấp phụ được xác định bằng phương pháp quang phổ tử ngoại - khả kiến (UV-Vis) tại bước sóng hấp phụ cực đại $\lambda_{\text{max}} = 274 \text{ nm}$. Dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng (Q_e , mg/g) được xác định theo công thức sau:

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

Trong đó:

C_0 và C_e lần lượt là nồng độ ban đầu và nồng độ sau hấp phụ (mg/L).

V là thể tích dung dịch hấp phụ (L).

m là khối lượng của vật liệu hấp phụ ETS-10 (g)

Các mô hình đẳng nhiệt hấp phụ phi tuyến tính và tuyến tính

Để đánh giá cơ chế tương tác ở cấp độ phân tử, dữ liệu thực nghiệm cân bằng hấp phụ CIF trên ETS-10 ở nhiệt độ 307 K đã được mô hình hóa bằng ba phương trình đẳng nhiệt là Langmuir, Freundlich và Temkin [12]. Bảng 1 trình bày các dạng phương trình tuyến tính và đồ thị tương ứng của ba mô hình này như sau:

Bảng 1: Các mô hình đẳng nhiệt tuyến tính

Mô hình	Công thức	Đồ thị
Langmuir-1	$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_m} \cdot C_e + \frac{1}{K_L \cdot Q_m}$	$\frac{C_e}{Q_e}$ theo C_e
Langmuir-2	$\frac{1}{Q_e} = \left(\frac{1}{K_L \cdot Q_m} \right) \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q_m}$	$\frac{1}{Q_e}$ theo $\frac{1}{C_e}$
Langmuir-3	$Q_e = Q_m - \left(\frac{1}{K_L} \right) \cdot \frac{Q_e}{C_e}$	Q_e theo $\frac{Q_e}{C_e}$
Langmuir-4	$\frac{Q_e}{C_e} = K_L \cdot Q_m - K_L \cdot Q_e$	$\frac{Q_e}{C_e}$ theo Q_e
Freundlich	$\log Q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e$	$\log Q_e$ theo $\log C_e$
Temkin	$Q_e = B \cdot \ln K_T + B \cdot \ln C_e$	Q_e theo $\ln C_e$

Trong đó:

Q_m là dung lượng hấp phụ đơn lớp cực đại của vật liệu.

K_L là hằng số hấp phụ Langmuir.

K_F là hằng số Freundlich.

$1/n$ là tham số phản ánh độ không đồng nhất của bề mặt và cường độ hấp phụ.

K_T là hằng số Temkin

B là hằng số liên quan đến nhiệt hấp phụ, được tính bằng biểu thức $B = \frac{RT}{b}$, trong đó $R = 8,314 \text{ J/(mol.K)}$;

b_T liên quan đến nhiệt hấp phụ (J/mol); T là nhiệt độ (K)

Kết quả và thảo luận

Đặc trưng của vật liệu

Các đặc trưng cấu trúc và hình thái của titanosilicate ETS-10 được trình bày tại Hình 1. Kết quả nhiễu xạ tia X (Hình 1a) cho thấy mẫu tổng hợp (màu xanh) xuất hiện các đỉnh nhiễu xạ nhọn, cường độ cao và vị trí hoàn toàn trùng khớp với mẫu ETS-10 chuẩn (màu đen) từ dữ liệu Crystallography Open Database (COD) (thẻ thông tin mã 7110493, tương ứng với Card-04-013-2831). Đặc biệt, sự xuất hiện của các đỉnh đặc trưng ở vùng góc 2θ khoảng $12,28^\circ$, $20,14^\circ$, $24,68^\circ$, $25,84^\circ$, $27,18^\circ$ và $35,61^\circ$ [13] là minh chứng cho việc tổng hợp thành công pha tinh thể ETS-10. Về hình thái, ảnh SEM (Hình 1b) cho thấy các tinh thể ETS-10 có dạng khối đa diện bipyramid đặc trưng với các góc cạnh và bề mặt tinh thể phẳng, sắc nét; kích thước các hạt trung bình dao động trung bình trong khoảng $5 - 10 \mu\text{m}$. Phổ FT-IR (Hình 1c) xác nhận các dao động đặc trưng của khung cấu trúc ETS-10: Đỉnh kép ở 1026 cm^{-1} và 960 cm^{-1} tương ứng với dao động kéo dẫn bất đối xứng

của liên kết Si – O – Si và liên kết Si – O – Ti; đỉnh nhọn tại 723 cm^{-1} đặc trưng cho dao động kéo dẫn của chuỗi bát diện -Ti – O – Ti- trong khi đỉnh nhỏ ở 662 cm^{-1} phản ánh cấu trúc vòng tinh thể. Ngoài ra, tín hiệu ở 1652 cm^{-1} và vùng hấp thụ rộng $3400-3625 \text{ cm}^{-1}$ được gán cho dao động biến dạng và kéo dẫn của nhóm -OH từ các phân tử nước hấp phụ tự do trong các mao quản[10,14]. Cuối cùng, đường đẳng nhiệt hấp phụ - khử phụ N_2 (Hình 1d) thể hiện dạng I điển hình của vật liệu vi mao quản với sự tăng nhanh lượng hấp phụ và dốc ở vùng áp suất tương đối rất thấp ($p/p^\circ < 0,05$), tương ứng với diện tích bề mặt tính theo mô hình BET đạt được là $S_{\text{bề mặt}} = 287,70 \text{ m}^2/\text{g}$.

Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hấp phụ

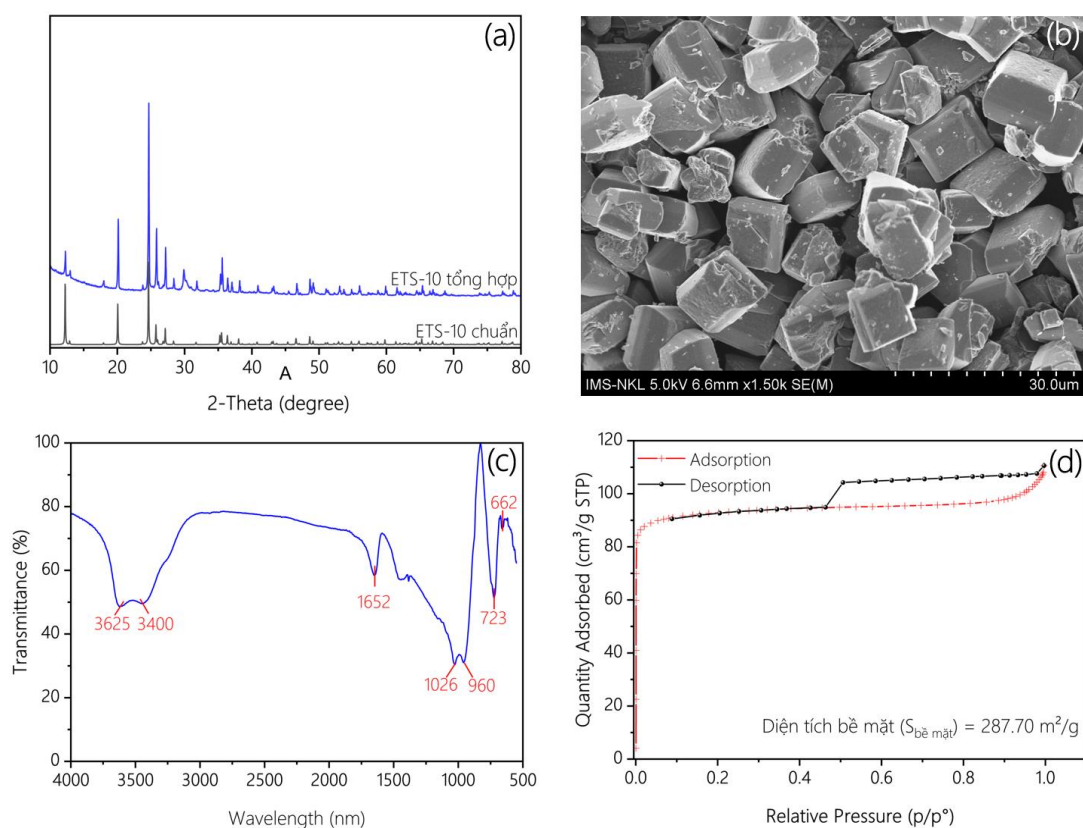
Ảnh hưởng của pH

pH của dung dịch là yếu tố quan trọng quyết định đến khả năng hấp phụ CIF của ETS-10 do nó trực tiếp ảnh hưởng đến điện tích bề mặt của vật liệu hấp phụ cũng như sự tồn tại của của CIF trong nước.

Phân tử CIF có đặc tính lưỡng cực với hai giá trị hằng số phân ly axit đặc trưng là $\text{pK}_{a1} = 5,9 - 6,1$ (liên quan đến nhóm cacboxylic – COOH) và $\text{pK}_{a2} = 8,7 - 8,9$ (liên quan đến nhóm amin trên vòng piperazine). Sự thay đổi pH môi trường dẫn đến sự tồn tại của CIF dưới các dạng điện tích khác nhau, cụ thể: Ở điều kiện pH thấp ($\text{pH} < 5,9$), CIF tồn tại chủ yếu dưới dạng cation mang điện tích dương (CIF^+) do sự proton hóa hoàn toàn của nhóm chức amin. Trong khoảng pH trung tính ($5,9 < \text{pH} < 8,9$), dạng lưỡng cực trung hòa ($\text{CIF}^\pm$) chiếm ưu thế do sự tự cân bằng điện tích trong nội bộ phân tử. Ở môi trường kiềm ($\text{pH} > 8,9$), CIF tồn tại chủ yếu dưới dạng anion mang điện tích âm (CIF^-).

Đối với vật liệu titanosilicate ETS-10 có giá trị điểm đẳng điện $\text{pH}_{\text{PZC}} = 8,6$, nghĩa là tại các giá trị pH của dung dịch nhỏ hơn 8,6, bề mặt vật liệu mang điện dương. Ngược lại, nếu pH của dung dịch lớn hơn 8,6, bề mặt vật liệu mang điện tích âm.

Hình 2a chỉ ra rằng hiệu quả loại bỏ CIF bằng ETS-10 đạt giá trị tối ưu tại $\text{pH} = 6$ với dung lượng hấp phụ là $13,13 \text{ mg/g}$. Ở các giá trị $\text{pH} < 6$, xảy ra lực đẩy tĩnh điện giữa các cation CIF^+ và bề mặt vật liệu tích điện dương, khả năng hấp phụ giảm. Trong khoảng pH từ 6 – 8, ngoài sự tương tác tĩnh điện giữa đầu -COO⁻ của CIF với bề mặt mang điện tích dương của vật liệu, các phân tử CIF tồn tại ở dạng phân tử dễ dàng khuếch tán sâu vào các lỗ xốp, dẫn đến khả năng hấp phụ tăng. Khi giá trị pH tăng dần từ mức trung tính đến kiềm, dung lượng hấp phụ CIF giảm mạnh. Sự suy giảm này được giải thích là do sự xuất hiện của lực đẩy tĩnh điện giữa các anion CIF^- mang điện âm và bề mặt âm của ETS-10.

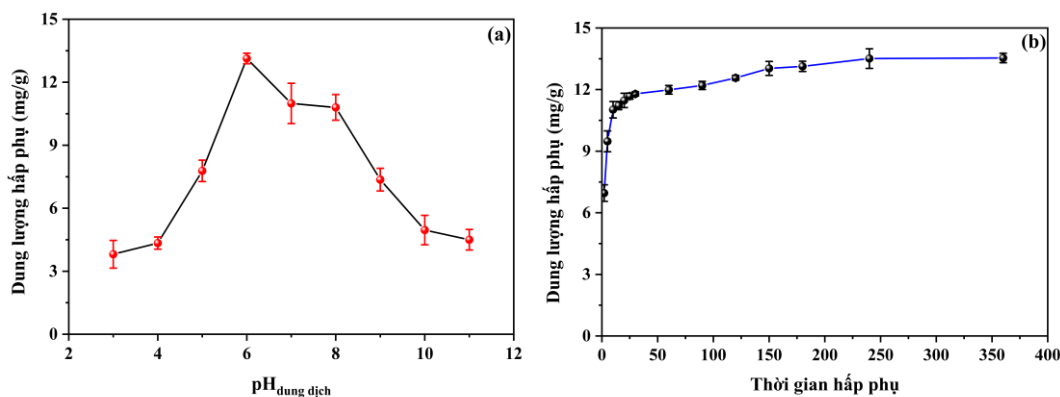


Hình 1: Kết quả phân tích đặc trưng của vật liệu: XRD (a); SEM (b); FT-IR (c) và BET (d)

Ảnh hưởng của thời gian tiếp xúc.

Hình 2b cho thấy trong giai đoạn đầu (0 – 10 phút), quá trình hấp phụ CIF lên ETS-10 diễn ra nhanh chóng do sự sẵn có của một lượng lớn các tâm hấp phụ trống trên bề mặt ngoài của vật liệu và chênh lệch nồng độ CIF giữa dung dịch và chất rắn. Sau khoảng thời gian này, tốc độ hấp phụ có xu hướng chậm dần và đạt trạng thái cân bằng sau 180 phút. Hiện tượng

này có thể được giải thích là do sự bão hòa dần của các vị trí hấp phụ thuận lợi trên bề mặt ngoài, cùng với sự gia tăng lực cản khuếch tán khi các phân tử CIF tiếp tục tiếp cận các vị trí sâu hơn bên trong cấu trúc xốp của vật liệu. Do đó, thời gian 180 phút được chọn là thời gian tối ưu để khảo sát đẳng nhiệt của quá trình hấp phụ CIF trên ETS-10.



Hình 2: Ảnh hưởng của pH (a) và Thời gian (b) đến quá trình hấp phụ CIF trên ETS-10

Đẳng nhiệt quá trình hấp phụ

Kết quả nghiên cứu đẳng nhiệt được thể hiện trên Hình 3 và các thông số đẳng nhiệt được trình bày trong Bảng 2.

Dựa trên giá trị hệ số tương quan tuyến tính (R^2) tính được từ các mô hình, cho thấy mức độ tương thích giữa dữ liệu thực nghiệm với các mô hình theo tứ tự lần lượt là: Langmuir-3 > Langmuir-1 > Langmuir-2 > Temkin > Langmuir-4 > Freundlich. Tuy nhiên, theo mô

hình Langmuir-3, giá trị dung lượng hấp phụ cực đại $Q_m = 0$ (do giá trị $a = 0$ trong phương trình đường thẳng $y = a + bx$ đi qua gốc tọa độ), là hoàn toàn không hợp lý. Do đó, mô hình Langmuir-1 là mô hình mô tả tốt nhất dữ liệu thực nghiệm của quá trình hấp phụ CIF bởi vật liệu ETS-10 tại 30K với hệ số tương quan R^2 lớn nhất ($R^2 = 0,9978$). Dung lượng hấp phụ cực đại tính từ mô hình Langmuir-1 là 24,86 mg/g.

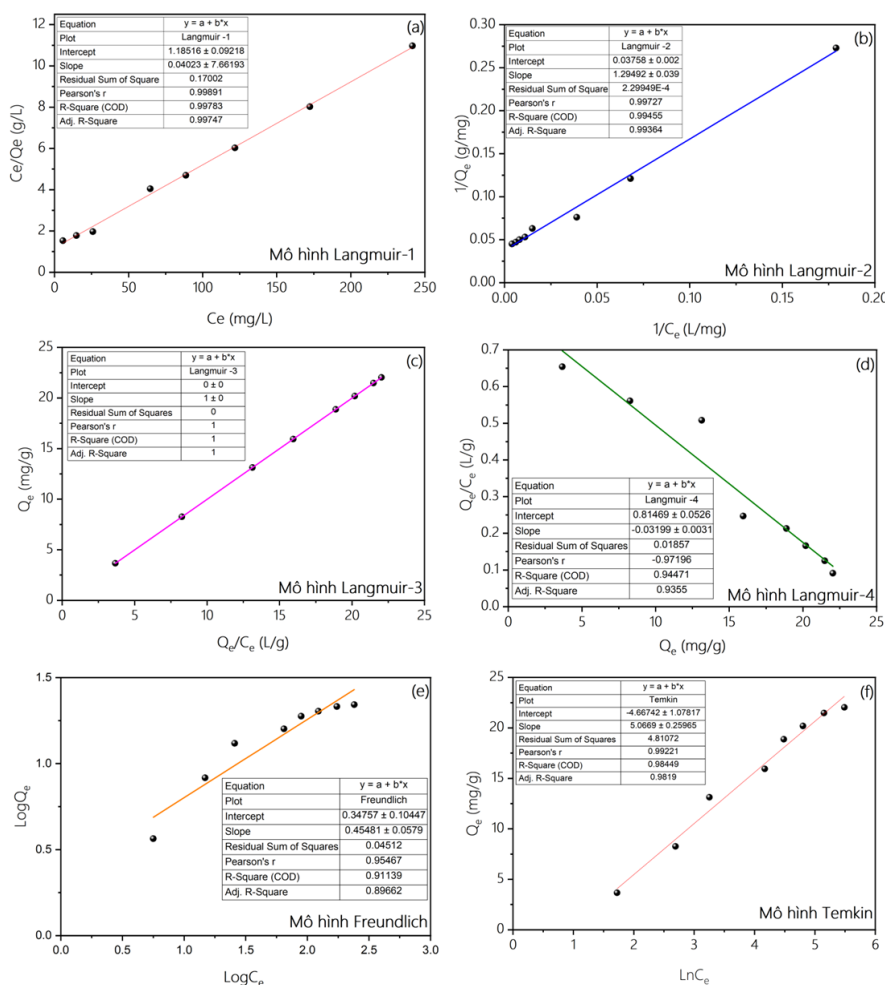
Tính chất thuận lợi của quá trình hấp phụ cũng được chứng minh thông qua hệ số phân tách (R_L):

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

Giá trị R_L tính toán nằm trong khoảng $0 < R_L < 1$ ở mọi nồng độ khảo sát, khẳng định quá trình hấp phụ CIF lên vật liệu titanosilicate ETS-10 là rất thuận lợi và có tính chất thuận nghịch tự nhiên.

Bảng 2: Các giá trị thông số đẳng nhiệt tính từ các mô hình

Mô hình	Các thông số đẳng nhiệt		Mô hình	Các thông số đẳng nhiệt	
Langmuir – 1	R^2	0,9978	Langmuir – 3	R^2	1,000
	Q_m (mg/g)	24,86		Q_m (mg/g)	0
	K_L	0,0339		K_L	-1
Langmuir – 2	R^2	0,9946	Langmuir – 4	R^2	0,9447
	Q_m (mg/g)	26,61		Q_m (mg/g)	25,47
	K_L	0,0290		K_L	0,0320
Freundlich	R^2	0,9114	Temkin	R^2	0,9845
	K_F [(mg/g).(L/mg) $^{1/n}$]	2,23		K_T (L/mg)	0,398
	n	2,20		b (J/mol)	504



Hình 3: Đồ thị các mô hình đẳng nhiệt tuyến tính: Langmuir – 1 (a); Langmuir – 2 (b); Langmuir – 3 (c); Langmuir – 4 (d); Freundlich (e); Temkin (f)

Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh khả năng ứng dụng hiệu quả vật liệu titanosilicate vi mao quản ETS-10 trong việc xử lý kháng sinh CIF ra khỏi môi trường nước. Quá trình hấp phụ đạt cực đại ở điều kiện tối ưu pH = 6 trong thời gian 180 phút ở nhiệt độ 307K. Dữ liệu thực nghiệm phù hợp với mô hình Langmuir-1, gợi ý quá trình hấp phụ có xu hướng tuân theo giả thiết hấp phụ đơn lớp diễn ra trên bề mặt ETS-10, với dung lượng hấp phụ cực đại đạt 24,86 mg/g. Nhiệt hấp phụ tính từ mô hình Temkin là 504 J/mol > 0 khẳng định bản chất của quá trình là tỏa nhiệt. Với độ bền cấu trúc và khả năng xử lý hiệu quả của ETS-10 bước đầu cho thấy tiềm năng nghiên cứu định hướng xử lý nước thải y tế và loại bỏ các dư lượng dược phẩm thể hệ mới, các khía cạnh bền vững và kinh tế cần được xác thực bằng các phân tích vòng đời (LCA) và thử nghiệm với nước thải thực tế.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong khuôn khổ đề tài mã số 103.02-2021.88. Chúng tôi cũng xin cảm ơn Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, TP. Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cơ sở vật chất cần thiết cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

1. X. Gao, X.W. Han, J. Sun, S. Wang, C. Lu, H. Zou, *Diamond Relat. Mater.*, 153 (2025) 112085. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.112085>
2. F.H. Kamgang Djioko, C.G. Fotsop, G. Kamgang Youbi, S.C. Nwanonyi, E.E. Oguzie, C. Ada Madu, *Mater. Chem. Phys.*, 315 (2024) 128994. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.128994>
3. X. Qi, H. Zou, S. Wang, J. Sun, X.-W. Han, *Chem. Eng. Sci.*, 333 (2026) 124218. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2026.124218>
4. M.M. Rahaman, S. Saha, C.K. Shaha, M.A. Alam, U.S. Akhtar, S. Karmaker, T.K. Saha, *Desalin. Water Treat.*, 325 (2026) 101631. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101631>
5. E. Mihelič, L. Fras Zemljič, M. Simonič, S. Gyergyek, A. Vesel, S. Hribnik, M. Bračič, I. Anžel, O. Plohl, *Int. J. Biol. Macromol.*, 312 (2025) 144006. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomac.2025.144006>
6. S. Munsif, K. Ayub, M. Nur-e-Alam, A. Ur-Rehman, Z. Ul-Haq, *Comput. Theor. Chem.*, 1252 (2025) 115355. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2025.115355>
7. L. Xiao, H. Zhang, X. Song, Y. Liu, J. Zhang, F. Wang, G. Yan, H. Zhang, T. Jin, J. Zhao, *Mater. Chem. Phys.*, 350 (2026) 131899. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131899>
8. Z. Wei, Q. Wu, S. Fang, X. Zou, R. Yu, J. Cao, L. Su, W. Liu, S. Cheng, J. Luo, *Sep. Purif. Technol.*, 392 (2026) 137177. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.137177>
9. L. Lv, F.Y. Lee, J. Zhou, F. Su, X.S. Zhao, *Microporous Mesoporous Mater.*, 96 (2006) 270. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2006.07.006>
10. V.-H. Pham, B.-N. Duong, D.-K. Nguyen, L. Ton-That, N.T. Dang, D. Thanh Khan, N.-Q. Tran, N.D. Nguyen, V.-P. Dinh, *Microporous Mesoporous Mater.*, 377 (2024) 113231. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113231>
11. B.-N. Duong, T.-P.-T. Nguyen, D.-K. Nguyen, T.-H. Nguyen, N.D. Nguyen, V.-P. Dinh, *Desalin. Water Treat.*, 321 (2025) 101045. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101045>
12. K.Y. Foo, B.H. Hameed, *Chem. Eng. J.*, 156 (2010) 2. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
13. T. Jin, W. Fu, H. Xia, Y. Zhang, L. Zhang, X. Jia, T. Tang, *Appl. Catal. A Gen.*, 679 (2024) 119754. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2024.119754>
14. Y.-C. Ng, C.-Y. Jei, M. Shamsuddin, *Microporous Mesoporous Mater.*, 122 (2009) 195. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.03.001>
15. N.G.B. Allou, P. Athéba, J. Saikia, K.A.-A. Soro, A.S. Ello, *Chem. Data Collect.*, 57 (2025) 101187. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2025.101187>