



Tổng hợp và đánh giá khả năng hấp phụ thuốc kháng ung thư 5-FU của vật liệu khung hữu cơ kim loại ZIF-4

Synthesis and evaluation of adsorption ability of 5-FU anti-cancer drug onto a metal-organic framework (ZIF-4)

Nguyễn Văn Mỹ^{1,*}, Phan Đặng Thanh An¹, Lưu Tuyết Vũ¹, Đặng Hoàng Dương¹, Nguyễn Thanh Bình¹, Trương Quốc Phú¹, Nguyễn Minh Thái¹, Nguyễn Thục Bình¹, Phan Nhật Nam¹, Nguyễn Văn Hoàng²

¹ Khoa Hoá học, Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

² Khoa Hoá học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

* Email: mynv@hcmue.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 04/07/2026

Accepted: 12/09/2026

Published: 30/09/2026

Keywords:

Drug delivery; MOFs;

Anti-cancer; Biomedicine

ABSTRACT

In this contribution, the efficient adsorption of the anti-cancer drug 5-fluorouracil (5-FU) onto ZIF-4 synthesized via a solvothermal approach was reported. The synthesized material exhibited an exceptional 5-FU adsorption capacity of 314.4 mg g⁻¹. Full characterizations of ZIF-4 were conducted using modern analytical techniques, elucidating its high crystallinity, thermal stability, and porous structure. The N₂ adsorption-desorption isotherms at 77K revealed a specific surface area of 417.7 m² g⁻¹. Batch adsorption studies demonstrated that the process best fits the Langmuir and pseudo-second-order kinetic models, indicating a monolayer chemisorption mechanism. These findings highlight the potential of ZIF-4 as a highly promising carrier for high-capacity drug delivery applications to support the anti-cancer therapy.

Giới thiệu chung

Ung thư đang là một trong những nguyên nhân hàng đầu gây tử vong trên toàn cầu, trong đó các bệnh lý ác tính ở phổi, vú và đại trực tràng là ba dạng phổ biến nhất của căn bệnh này [1]. Theo số liệu thống kê của GLOBOCAN, trong năm 2022, có gần 20 triệu ca mắc ung thư mới được ghi nhận trên toàn thế giới. Mặc dù hoá trị và xạ trị vẫn là những liệu pháp lâm sàng chủ đạo trong điều trị ung thư, song hoá trị liệu truyền thống vẫn còn thiếu hiệu quả bởi các tác dụng phụ nghiêm trọng và đặc tính dược động học kém, bắt nguồn từ sự thiếu tính chọn lọc đối với khối u. Do đó, các hệ thống dẫn truyền thuốc đúng mục tiêu đã thu hút sự quan tâm lớn của các nhà nghiên cứu và nổi lên như một hướng tiếp cận đầy hứa hẹn cho liệu pháp điều trị kháng ung thư.

5-Fluorouracil (5-FU) là một chất chống chuyển hóa mạnh, được sử dụng rộng rãi trong điều trị nhiều bệnh lý ác tính khác nhau, bao gồm ung thư vú và ung thư đại trực tràng. Cụ thể là, 5-FU có hoạt tính cao và cơ chế hoạt động chính của nó liên quan đến quá trình chuyển hoá nội bào thành các chất chuyển hoá có hoạt tính, qua đó ức chế cạnh tranh với enzyme thymidylate synthase. Sự ức chế này làm cạn kiệt nguồn cung cấp thymidine triphosphate nội bào - một tiền chất thiết yếu cho quá trình sao chép DNA - từ đó chấm dứt chu kì tế bào và gây tổn thương DNA nghiêm trọng. Hơn nữa, sự lồng ghép sai lệch của các chất chuyển hoá 5-FU trực tiếp vào cấu trúc RNA và DNA sẽ phá vỡ các quá trình bình thường của tế bào, cuối cùng kích hoạt chu trình tự hủy ở các tế bào ung thư đang tăng sinh nhanh chóng [2]. Tuy nhiên, hiệu quả lâm sàng của thuốc

kháng ung thư bị hạn chế đáng kể do thời gian bán hủy sinh học ngắn (10-25 phút) trong máu người cùng độc tính toàn thân nghiêm trọng [3], đòi hỏi phải sử dụng thuốc thường xuyên, gây ảnh hưởng lớn đến các mô khỏe mạnh. Do đó, việc phát triển các hệ chất mang thuốc thông minh với kích thước nano có ý nghĩa quan trọng trong các thực nghiệm lâm sàng. Hơn một thập kỉ qua, các nhà khoa học đã tập trung nghiên cứu để phát triển nhiều hệ thống tải thuốc 5-FU khác nhau, chẳng hạn như nano chitosan [4], SBA-15 [5], hay các vật liệu composite từ graphene oxide [6] với những đặc tính hứa hẹn. Tuy nhiên, chúng vẫn bộc lộ một số nhược điểm đáng kể, như hiệu suất mang thuốc thấp, dung lượng tải thuốc kém và hiện tượng giải phóng nhanh chóng thuốc kháng ung thư. Do đó, việc tìm kiếm các hệ vật liệu mang thuốc mới thể hiện hiệu năng vượt trội trong việc đóng gói, dẫn truyền thuốc hướng đích đến và giải phóng có kiểm soát là yêu cầu hết sức cấp thiết.

Cho đến nay, vật liệu khung hữu cơ - kim loại (MOFs), đặc biệt là khung zeolitic imidazolate (ZIFs), đã trở thành những vật liệu tiên phong trong các ứng dụng y sinh nhờ diện tích bề mặt riêng lớn, độ xốp có thể điều chỉnh và khả năng tương thích sinh học cao. Cụ thể, các cấu trúc ZIF được cấu tạo từ các tâm kim loại và các phối tử imidazolate, cho phép tạo ra những cấu trúc có khả năng linh hoạt cao. Đáng chú ý, cấu trúc của chúng chủ yếu bao gồm các cụm kim loại-kẽm – một nguyên tố vi lượng thiết yếu trong cơ thể người – và các phối tử imidazolate, vốn là những chất tương tự về mặt cấu trúc với amino acid histidine. Nhờ các thành phần mang bản chất tương đồng nội sinh này, ZIFs thể hiện tính tương thích sinh học vượt trội, làm nổi bật tiềm năng to lớn của chúng trong định hướng điều trị ung thư. Trong những thập kỉ gần đây, ZIFs cũng đã được nghiên cứu rộng rãi trên nhiều lĩnh vực khác nhau, như xử lý nước thải [7,8], xúc tác [9,10], lưu trữ và tách khí [10,11]. Đặc biệt, nhiều nghiên cứu đã sử dụng vật liệu ZIF như những chất mang nano tiềm năng cho liệu pháp ung thư [12,13], mang lại những kết quả khả quan về khả năng đóng gói thuốc và động học giải phóng, đi kèm với độ an toàn sinh học cao. Tuy nhiên, để mang phù hợp các thuốc phân tử nhỏ như 5-FU, các chất mang nano cần có cấu trúc lỗ xốp tương đối phù hợp nhằm kiểm soát hiệu quả động học giải phóng thuốc. Với định hướng đó, chúng tôi đề xuất tổng hợp một vật liệu ZIF tâm kẽm, cụ thể là ZIF-4, sở hữu kích thước lỗ xốp tương thích với kích thước phân tử 5-FU [14] và có khả năng tương thích sinh học cao. Trong công trình này, vật liệu ZIF-4 đã được tổng hợp thành công và đánh giá khả năng hấp phụ hiệu quả thuốc kháng ung thư 5-FU. Thông qua việc khảo sát một cách có hệ thống về đẳng

nhiệt và động học hấp phụ của vật liệu này đã mở ra nhiều hướng nghiên cứu tiềm năng và hướng tới các ứng dụng dẫn truyền thuốc đúng đích đến trong tương lai.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hoá chất

Các hoá chất được mua từ các nhà cung cấp thương mại với độ tinh khiết cao, bao gồm zinc nitrate hexahydrate ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 98%), 5-fluorouracil ($\text{C}_4\text{H}_3\text{FN}_2\text{O}_2$, 98%), imidazole ($\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_2$, 98%), *N,N*-dimethylformamide (DMF, 98%) và ethanol (EtOH, 99%). Các hoá chất đều đạt chuẩn phân tích và được sử dụng trực tiếp mà không qua bất kì các bước xử lý khác.

Tổng hợp vật liệu ZIF-4

Dựa vào nghiên cứu đã được công bố trước [14], vật liệu ZIF-4 được tổng hợp thông qua phương pháp nhiệt dung môi. Cụ thể, 0,245 mL dung dịch $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,15 M) và 1,855 mL dung dịch imidazole (0,3 M) trong dung môi DMF được phối trộn trong một vial thủy tinh dung tích 4 mL. Hỗn hợp được xử lý siêu âm trong 10 phút để đảm bảo tính đồng nhất, sau đó được gia nhiệt ở 85 °C trong 3 ngày. Sau khoảng thời gian trên, hỗn hợp được làm nguội đến nhiệt độ phòng, chất rắn màu trắng được thu thập bằng phương pháp li tâm và được rửa kĩ bằng dung môi DMF (10 mL mỗi ngày, thực hiện trong 2 ngày) nhằm loại bỏ các tiền chất chưa phản ứng. Phần chất rắn tiếp tục được trao đổi với dung môi EtOH trong 2 ngày tiếp theo (15 mL mỗi ngày). Cuối cùng, sản phẩm được hoạt hoá trong môi trường chân không ở 120 °C trong 1 ngày để loại bỏ các phân tử dung môi ra khỏi cấu trúc và thu được sản phẩm ZIF-4 tinh khiết dưới dạng chất rắn màu trắng.

Đặc điểm cấu trúc vật liệu ZIF-4

Cấu trúc của vật liệu được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ tia X dạng bột (PXRD). Sự hiện diện của các nhóm chức được ghi nhận thông qua phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FT-IR). Độ bền nhiệt được đánh giá thông qua phương pháp phân tích nhiệt trọng lượng (TGA). Hình thái học và sự phân bố nguyên tố được phân tích bằng kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM) và phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX). Các đặc tính cấu trúc xốp được xác định thông qua đẳng nhiệt hấp phụ - giải hấp phụ N_2 tại 77K, áp dụng mô hình Brunauer-Emmett-Teller (BET).

Khảo sát hấp phụ thuốc 5-FU

Khả năng hấp phụ thuốc của ZIF-4 được đánh giá thông qua các khảo sát hấp phụ. Để xác định khối lượng chất hấp phụ tối ưu, các khối lượng ZIF-4 đã hoạt hoá khác nhau (từ 2 đến 25 mg) được cho vào 40 mL dung dịch 5-FU (20 mg L^{-1}) và khuấy trong 24 giờ. Kết quả cho thấy, khối lượng 10

mg đạt hiệu suất hấp phụ tối ưu và liều lượng này được sử dụng cho tất cả các khảo sát tiếp theo.

Đối với các nghiên cứu đẳng nhiệt, 10 mg ZIF-4 được cho vào 40 mL dung dịch 5-FU với các nồng độ đầu từ 50 đến 800 mg L⁻¹, sau đó khuấy trong 24 giờ. Các khảo sát động học được tiến hành bằng cách theo dõi quá trình hấp phụ của 10 mg ZIF-4 trong 40 mL dung dịch 5-FU 10 mg L⁻¹ tại các mốc thời gian xác định (từ 15 đến 180 phút). Cụ thể, 3 mL mẫu từ mỗi khảo sát được lấy ra tại các thời điểm xác định để quan sát sự thay đổi nồng độ 5-FU trong dung dịch, sau đó được li tâm nhiều lần nhằm tách vật liệu rắn. Nồng độ 5-FU còn lại được định lượng bằng máy quang phổ tử ngoại - khả kiến (UV-Vis) tại bước sóng hấp thụ cực đại $\lambda_{\max} = 265$ nm, dựa trên một đường chuẩn được xây dựng từ các dung dịch chuẩn (2 đến 16 mg L⁻¹). Theo đó, dung lượng hấp phụ (mg g⁻¹) và hiệu suất hấp phụ (%) được tính toán dựa trên các phương trình dưới đây:

$$\text{Dung lượng hấp phụ (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m} \quad (1)$$

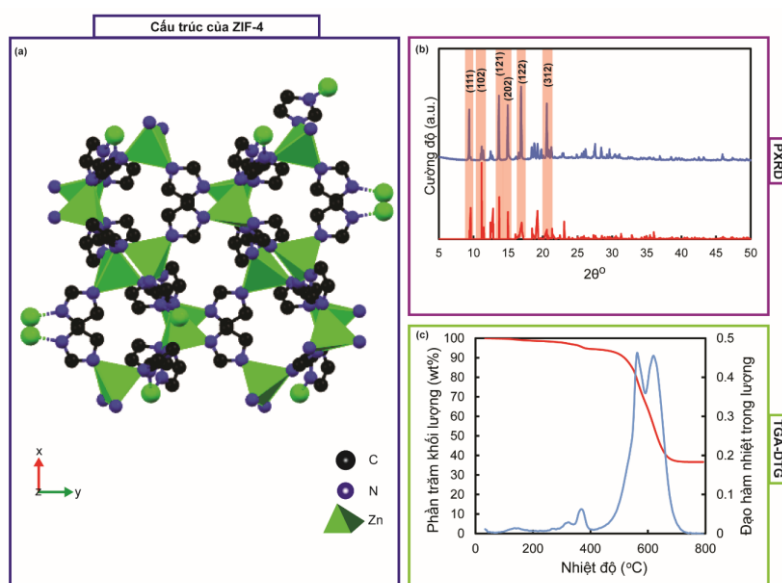
$$\text{Hiệu suất hấp phụ (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \cdot 100 \quad (2)$$

Trong đó, C_0 và C_t lần lượt là nồng độ đầu và nồng độ tại thời điểm t của 5-FU trong dung dịch.

Kết quả và thảo luận

Đặc điểm cấu trúc của vật liệu ZIF-4

Vật liệu ZIF-4 sở hữu cấu trúc không gian ba chiều đặc trưng với hình thái học dạng *cag* và được xây dựng từ các cụm kim loại ZnN₄ và các cầu nối hữu cơ imidazole với đường kính nội mao quản khoảng 4,74 Å [14] (Hình 1a). Quá trình tổng hợp thành công vật liệu ZIF-4 được xác nhận thông qua phương pháp nhiễu xạ tia X dạng bột (PXRD), trong đó các đỉnh nhiễu xạ thực nghiệm thể hiện sự phù hợp cao với giản đồ ZIF-4 mô phỏng. Đáng chú ý, các đỉnh nhiễu xạ sắc nét tại góc 2θ tương ứng với các mặt mạng (111), (102), (121), (202) và (122) đã minh chứng cho độ kết tinh cao của khung mạng được tổng hợp (Hình 1b).

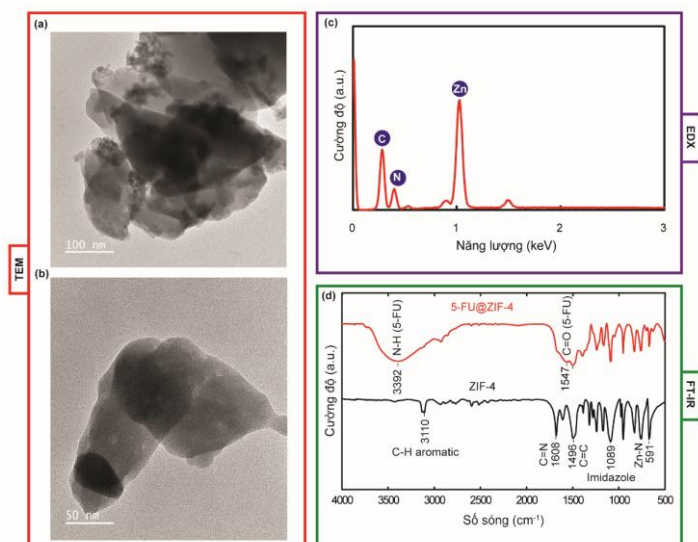


Hình 1: Cấu trúc của ZIF-4 được hình thành từ cụm kim loại ZnN₄ và linker imidazole (a). Màu sắc nguyên tử: Zn: xanh lục, C: đen, N: xanh lam. Các nguyên tử H được ẩn đi. Giản đồ PXRD của vật liệu ZIF-4 hoạt hoá (xanh lam) và của vật liệu ZIF-4 mô phỏng (đỏ) (b). Giản đồ phân tích nhiệt trọng lượng TGA (đỏ) và vi phân nhiệt trọng lượng DTG (xanh lam) của vật liệu ZIF-4 (c).

Phân tích nhiệt trọng lượng và vi phân nhiệt trọng lượng (TGA-DTG) cho thấy ZIF-4 thể hiện độ bền nhiệt vượt trội lên đến 380 °C (Hình 1c). Vượt qua ngưỡng nhiệt độ này, một sự sụt giảm khối lượng đáng kể khoảng ~63,33% đã được ghi nhận trong khoảng nhiệt độ từ 550 đến 600 °C, tương ứng với sự phân hủy của các phối tử imidazole và sự sụp đổ của toàn bộ khung mạng cấu trúc. Ảnh TEM ở các thang đo 100 nm và 50 nm cho thấy vật liệu có dạng các khối đa diện với kích thước hạt dao động trong khoảng từ 200 đến 300 nm (Hình 2a và

2b). Bên cạnh đó, kết quả phổ EDX của vật liệu ZIF-4 xác nhận sự hiện diện và phân bố đồng đều của các nguyên tố Zn, C, N trên bề mặt vật liệu (Hình 2c), qua đó cung cấp minh chứng rõ nét về độ tinh khiết hoá học và tính đồng nhất cấu trúc của vật liệu đã qua hoạt hóa. Kết quả phổ FT-IR chỉ ra độ tinh khiết cao của cấu trúc, thể hiện qua sự biến mất của dải dao động stretching N-H thuộc imidazole tự do (3300 - 3500 cm⁻¹) cùng với sự xuất hiện của dao động stretching Zn-N tại 591 cm⁻¹ đã khẳng định sự hình thành liên kết phối trí giữa các

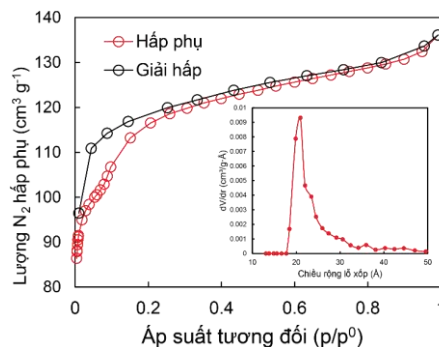
tâm kim loại và nguyên tử N của cầu nối imidazole. Các dải hấp thụ đặc trưng khác của cầu nối imidazole - bao gồm dao động stretching C=C (1496 cm^{-1}), dao động stretching C=N (1608 cm^{-1}) và dao động bending của vòng thơm imidazole (1089 cm^{-1}) - cũng được ghi nhận.



Hình 2: Ảnh TEM của vật liệu ZIF-4 với thang đo 100 nm (a) và 50 nm (b). Phổ EDX của vật liệu ZIF-4 (c). Phổ FT-IR của vật liệu ZIF-4 và 5-FU@ZIF-4 (d)

Đặc tính cấu trúc xốp và diện tích bề mặt riêng của ZIF-4 được đánh giá toàn diện thông qua đường đẳng nhiệt hấp phụ - giải hấp N_2 tại 77K bằng mô hình Brunauer-Emmett-Teller (BET) (Hình 3), cho thấy vật liệu sở hữu diện tích bề mặt riêng khoảng $417,7\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$. Đường đẳng nhiệt hấp phụ thuộc dạng đường đẳng nhiệt hấp phụ lai giữa loại I(b) và loại II, chủ yếu là loại I(b) tương ứng với hệ vật liệu có cấu trúc lỗ xốp vi mao quản và một phần mao quản trung bình có kích thước nhỏ hơn 2,5 nm, có thể là do sự hình thành

Đặc biệt, sự hấp phụ 5-FU thành công đã được xác minh rõ ràng thông qua phổ FT-IR sau hấp phụ (5-FU@ZIF-4), thể hiện qua sự xuất hiện của các dải hấp thụ mới tương ứng với dao động stretching N-H (3392 cm^{-1}) và C=O (1547 cm^{-1}) của phân tử thuốc (Hình 2d).

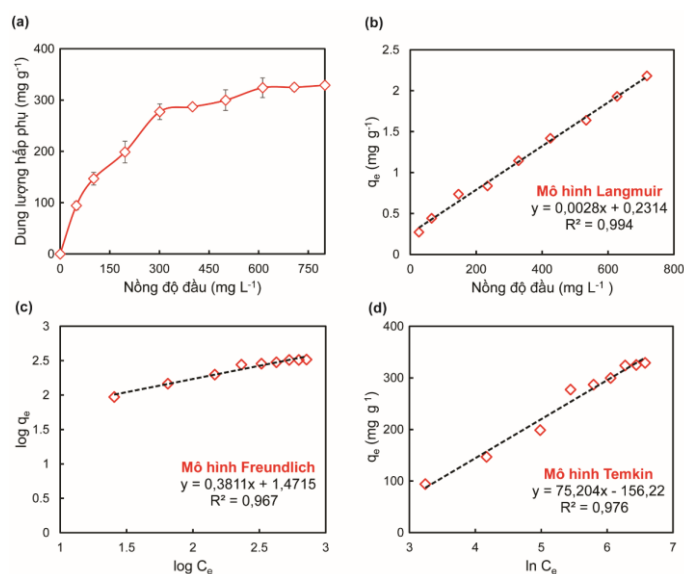


Hình 3: Đường đẳng nhiệt hấp phụ - giải hấp N_2 ở 77 K phân bố kích thước mao quản theo mô hình NLDFT

những khuyết tật trong cấu trúc. Vòng trễ của đường đẳng nhiệt hấp phụ - giải hấp N_2 ở 77K của vật liệu thuộc dạng vòng trễ H4, tương ứng với đường đẳng nhiệt hấp phụ có sự kết hợp giữa loại I và II.

Khảo sát khả năng hấp phụ 5-FU của vật liệu ZIF-4

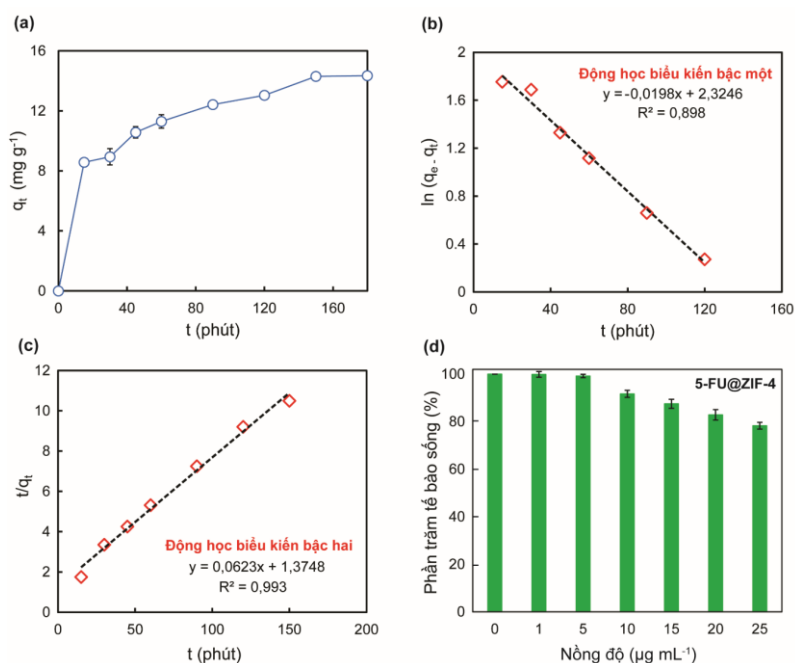
Quá trình hấp phụ của 5-FU vào ZIF-4 được đánh giá thông qua các mô hình đẳng nhiệt Langmuir, Freundlich và Temkin (Hình 4).



Hình 4: Đường đẳng nhiệt hấp phụ 5-FU của vật liệu ZIF-4 (a); Các mô hình đẳng nhiệt hấp phụ: Langmuir (b), Freundlich (c) và Temkin (d)

Trong số các mô hình được khảo sát, mô hình đẳng nhiệt Langmuir thể hiện mức độ phù hợp cao nhất với dữ liệu thực nghiệm, minh chứng qua hệ số $R^2 = 0,994$, qua đó làm sáng tỏ cơ chế hấp phụ đơn lớp trên bề mặt đồng nhất của vật liệu. Đáng chú ý, vật liệu đạt dung lượng hấp phụ cực đại theo thực nghiệm ($q_{e,exp}$) cao khoảng $314,4 \text{ mg g}^{-1}$. Ngược lại, các mô hình Freundlich và Temkin đều cho hệ số tương quan thấp hơn, phản ánh những hạn chế của chúng trong việc mô tả cơ chế hấp phụ thuốc 5-FU của hệ vật liệu này. Bên cạnh đó,

hệ số tương quan cao thu được từ mô hình động học biểu kiến bậc hai ($R^2 = 0,993$) (Hình 5c) đã khẳng định sự hấp phụ hoá học chiếm ưu thế trong suốt quá trình hấp phụ thuốc 5-FU vào vật liệu ZIF-4. Ở đây, dung lượng hấp phụ thuốc 5-FU cao của vật liệu có thể được giải thích là do hình thành các tương tác hoá học mạnh giữa khung cấu trúc vật liệu với các phân tử 5-FU, bao gồm liên kết hydrogen liên phân tử, tương tác $\pi - \pi$ giữa vòng pyrimidine và vòng imidazole, cùng với các tương tác phối trí với các tâm kẽm trong cluster của vật liệu [15].



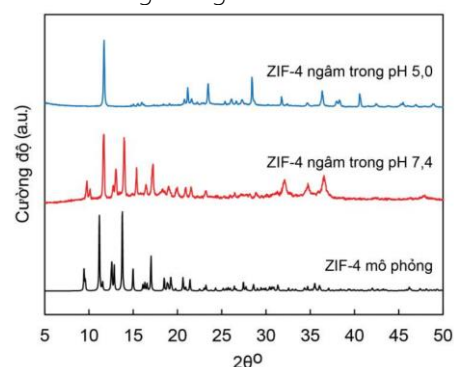
Hình 5: Đường động học hấp phụ 5-FU bởi ZIF-4 (a); Các mô hình động học: biểu kiến bậc 1 (b), bậc 2 (c) và khả năng tương thích sinh học của vật liệu sau khi hấp phụ 5-FU (5-FU@ZIF-4) với tế bào thường HDF (d)

Đặc biệt, độc tính của hệ dẫn thuốc 5-FU@ZIF-4 đã được khảo sát thông qua phép thử WST-1 trên dòng tế bào thường HDF (Hình 5d). Cụ thể là, 5-FU@ZIF-4 duy trì khả năng sống sót của tế bào thường ở mức cao lên đến 83% và 79% ở các nồng độ cao 20 và $25 \mu\text{g mL}^{-1}$ tương ứng.

Bảng 1: Các thông số tính toán từ các mô hình đẳng nhiệt hấp phụ của sự hấp phụ 5-FU vào vật liệu ZIF-4

Mô hình	Thông số	Giá trị
Langmuir	$q_{max,calc} \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	357,14
	$K_L \text{ (L.mg}^{-1}\text{)}$	0,0121
	R^2	0,994
	R_L	0,0841
Freundlich	$K_F \text{ ((mg g}^{-1}\text{) (L mg}^{-1}\text{)}^{1/n}\text{)}$	32,486
	$1/n$	0,3608
	R^2	0,967
Temkin	$K_T \text{ (L mg}^{-1}\text{)}$	0,1378
	$b \text{ (J mol}^{-1}\text{)}$	34,37
	R^2	0,976

Bên cạnh đó, giản đồ XRD ở hình 6 thể hiện vật liệu bền ở môi trường pH của tế bào cơ thể người ($\text{pH}=7,4$), nhưng bắt đầu có sự phân rã dần cấu trúc ở pH môi trường nội bào của tế bào ung thư ($\text{pH}=5,0$). Kết quả chỉ ra tiềm năng lớn của hệ vật liệu 5-FU@ZIF-4 cho ứng dụng kháng tế bào ung thư của các thực nghiệm in vitro và in vivo trong tương lai.



Hình 6: Giản đồ PXRD của vật liệu ZIF-4 mô phỏng (màu đen), ngâm trong môi trường pH 7,4 (màu đỏ) và pH 5,0 (màu xanh)

Kết luận

Tóm lại, vật liệu ZIF-4 với độ kết tinh cao đã được tổng hợp thành công và chứng minh được hiệu năng vượt trội trong vai trò là chất mang thuốc kháng ung thư 5-FU. Quá trình hấp phụ thuốc tuân theo mô hình đẳng nhiệt Langmuir và động học biểu kiến bậc hai, chỉ ra dung lượng hấp phụ cực đại cao đạt khoảng 314,4 mg g⁻¹, cùng với cơ chế hấp phụ hoá học chiếm ưu thế. Đặc biệt, vật liệu sau khi mang thuốc thể hiện khả năng tương thích sinh học cao với dòng tế bào thường HDF ở khoảng nồng độ cao (25 µg mL⁻¹). Những phát hiện này khẳng định ZIF-4 là một vật liệu tiềm năng cho việc phát triển các hệ thống dẫn truyền thuốc với dung lượng hấp phụ cao trong hỗ trợ điều trị ung thư.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2026-SPS-05.

Tài liệu tham khảo

1. F. Bray, M. Laversanne, H. Sung, J. Ferlay, R.L. Siegel, I. Soerjomataram, A. Jemal, *CA Cancer J. Clin.*, 74 (2024) 229–263. <https://doi.org/10.3322/caac.21834>
2. N. Zhang, Y. Yin, S.-J. Xu, W.-S. Chen, *Molecules*, 13 (2008) 1551–1569. <https://doi.org/10.3390/molecules13081551>
3. R. Díaz, Á. Segura, J. Aparicio, V. Calderero, Á. Guerrero, L. Pellín, *J. Chemother.*, 16 (2004) 599–603. <https://doi.org/10.1179/joc.2004.16.6.599>
4. P. Miralinaghi, P. Kashani, E. Moniri, M. Miralinaghi, *Mater. Res. Express*, 6 (2019) 065305. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0831>
5. E. Beňová, D. Bergé-Lefranc, V. Zelenák, M. Alması, V. Huntošová, V. Hornebecq, *Appl. Surf. Sci.*, 504 (2020) 144028. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144028>
6. E. Kahraman, N.E. Aydin, G. Nasun-Saygili, *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, 80 (2023) 104153. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104153>
7. H.-P. Jing, C.-C. Wang, Y.-W. Zhang, P. Wang, R. Li, *RSC Adv.*, 4 (2014) 54454–54462. <https://doi.org/10.1039/C4RA08820D>
8. M.A. Nazir, T. Najam, K. Shahzad, M.A. Wattoo, T. Hussain, M.K. Tufail, S.S.A. Shah, A.U. Rehman, *Surf. Interfaces*, 34 (2022) 102324. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2022.102324>
9. R.R. Kuruppathparambil, T. Jose, R. Babu, G.-Y. Hwang, A.C. Kathalikkattil, D.-W. Kim, D.-W. Park, *Appl. Catal. B: Environ.*, 182 (2016) 562–569. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.10.005>
10. U.P.N. Tran, K.K.A. Le, N.T.S. Phan, *ACS Catal.*, 1 (2011) 120–127. <https://doi.org/10.1021/cs1000625>
11. S. Yan, D. Zhu, Z. Zhang, H. Li, G. Chen, B. Liu, *Appl. Energy*, 248 (2019) 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.097>
12. S. Mirzanejad, M. Bagherzadeh, A. Bayrami, H. Daneshgar, A. Bahrami, M. Mahdavi, *Sci. Rep.*, 15 (2025) 18793. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03542-2>
13. S. Chen, H. Pang, J. Sun, K. Li, *Mater. Chem. Front.*, 8 (2024) 1195–1211. <https://doi.org/10.1039/D3QM01020A>
14. Z. Zheng, Z. Rong, H.L. Nguyen, O.M. Yaghi, *Inorg. Chem.*, 62 (2023) 20861–20873. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.3c02322>
15. J. Hao, C. Chen, K. Pavelic, F. Ozer, *Int. J. Mol. Sci.*, 25 (2024) 9292. <https://doi.org/10.3390/ijms25179292>