



DOI:10.22144/ctujos.2026.076

## CHẾ TẠO THAN SINH HỌC BIẾN TÍNH TỪ VỎ MÍT THÁI PHẾ PHẨM ỨNG DỤNG HẤP PHỤ INDIGO CARMINE

Huỳnh Nhất Quý<sup>1,2</sup>, Hà Mỹ Tiên<sup>1,2</sup>, Nguyễn Minh Nhựt<sup>3</sup>, Hồ Ngọc Tri Tân<sup>3</sup>, Nguyễn Việt Nhân Hòa<sup>3</sup> và Đặng Huỳnh Giao<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Học viên cao học ngành Kỹ thuật Hóa học Khóa 31, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

<sup>2</sup>Phòng thí nghiệm Ứng dụng Kỹ thuật Hóa học, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

<sup>3</sup>Trường Bách khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ (Corresponding author): dhgiao@ctu.edu.vn

### Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 12/12/2025

Sửa bài (Revised): 02/01/2026

Duyệt đăng (Accepted): 06/04/2026

**Title:** Preparation of modified biochar from waste Thai jackfruit peels for Indigo carmine adsorption

**Author(s):** Huynh Nhat Quy<sup>1,2</sup>, Ha My Tien<sup>1,2</sup>, Nguyen Minh Nhut<sup>3</sup>, Ho Ngoc Tri Tan<sup>3</sup>, Nguyen Viet Nhan Hoa<sup>3</sup> and Dang Huynh Giao<sup>2,3\*</sup>

**Affiliation(s):** <sup>1</sup>Post-graduate student of Chemical Engineering K31, College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam; <sup>2</sup>Applied Chemical Engineering Lab, College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam; <sup>3</sup>College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam

### TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, than sinh học (TSH) biến tính từ vỏ mít Thái được chế tạo bằng phương pháp nhiệt phân và đánh giá khả năng hấp phụ Indigo carmine (IC) trong môi trường nước giả thải. Các đặc trưng cấu trúc của TSH biến tính từ vỏ mít Thái (Bio-P500) được xác định bằng các phương pháp phân tích hiện đại như FT-IR, SEM, EDX và khả năng hấp phụ khí nitơ. Kết quả cho thấy vật liệu Bio-P500 có diện tích bề mặt riêng (1113,8 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>) và thể tích lỗ xốp lớn (1,2 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>). Vật liệu Bio-P500 có hiệu suất hấp phụ IC lên đến 99,1% với dung lượng hấp phụ thu được là 39,7 mg.g<sup>-1</sup> sau 60 phút ở nhiệt độ phòng. Mô hình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir đã mô tả tốt nhất trạng thái cân bằng hấp phụ với R<sup>2</sup> = 0,994. Hơn nữa, kết quả động học hấp phụ cho thấy quá trình hấp phụ có lợi cho việc loại bỏ IC được kiểm soát bằng mô hình giả bậc một (PFO). Ngoài ra, vật liệu còn có khả năng tái sử dụng ba lần với hiệu suất hấp phụ trên 90%, thể hiện tiềm năng ứng dụng xử lý thuốc nhuộm trong nước thải công nghiệp, góp phần bảo vệ môi trường cũng như phát triển công nghiệp gắn liền với hóa học xanh.

**Từ khóa:** Hấp phụ, Indigo carmine, than sinh học biến tính, thuốc nhuộm, vỏ mít Thái

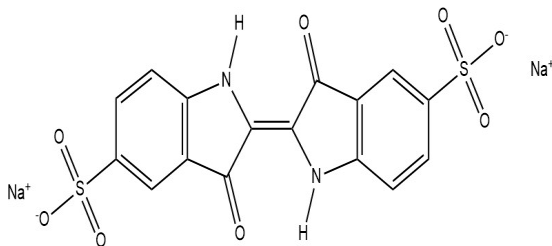
### ABSTRACT

In this study, biochar derived from Thai jackfruit peel was prepared through pyrolysis and subsequently modified to evaluate its adsorption performance toward Indigo Carmine (IC) in simulated wastewater. The structural characteristics of the modified biochar (Bio-P500) were analyzed using advanced techniques, including FT-IR, SEM, EDX, and nitrogen adsorption measurements. The results revealed that Bio-P500 exhibits a high specific surface area (1113.8 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>), a large pore volume (1,2 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>). Bio-P500 achieved a maximum IC removal efficiency of 99.1%, with an adsorption capacity of 39.7 mg.g<sup>-1</sup> after 60 minutes at room temperature. The Langmuir isotherm adsorption model best described the adsorption equilibrium with R<sup>2</sup> = 0.994. Furthermore, the adsorption kinetic results showed that the adsorption process was beneficial for IC removal controlled by the pseudo-first-order (PFO) model. In addition, the material is also reusable with an adsorption efficiency of over 90% after three cycles, showing high potential in the application of dye treatment in industrial wastewater, contributing to environmental protection as well as industrial development associated with green chemistry.

**Keywords:** Adsorption, dyes, Indigo carmine, modified biochar, Thai jackfruit peel

## 1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, đất nước ta đang trong giai đoạn phát triển, từng bước hội nhập quốc tế, hướng đến mục tiêu công nghiệp hóa hiện đại hoá nhằm nâng cao cuộc sống của người dân và thúc đẩy sự phát triển kinh tế - xã hội. Tuy nhiên, bên cạnh những lợi ích kinh tế mang lại là vấn đề ô nhiễm môi trường, đặc biệt là ô nhiễm nguồn nước ngày càng trở nên đáng báo động. Nguồn nước gần các nhà máy, xí nghiệp thường xuyên bị ô nhiễm nặng nề do các chất hữu cơ độc hại, đặc biệt là nước thải của ngành công nghiệp dệt may do chứa các chất gây ô nhiễm không phân hủy sinh học (Tkaczyk et al., 2020; Tanyol et al., 2021). Theo thống kê, có hơn 80.000.000 tấn thuốc nhuộm được sản xuất mỗi năm trên toàn thế giới (Manzoor & Sharma, 2020). Những chất độc hại này không những ảnh hưởng trực tiếp đến hệ sinh thái mà còn tiềm ẩn nguy cơ ảnh hưởng đến sức khỏe con người (Khan et al., 2022). Trước thực trạng đó, vấn đề cấp thiết được đặt ra là phải nghiên cứu các loại vật liệu có khả năng xử lý hiệu quả nguồn nước bị ô nhiễm. Indigo carmine (IC) là một trong những loại thuốc nhuộm được sử dụng phổ biến làm chất tạo màu xanh trong ngành công nghiệp như dệt may, in ấn, giấy, nhựa,... (Secula et al., 2011). IC được báo cáo là độc hại đối với con người, gây bệnh tăng huyết áp, hạ huyết áp, rối loạn tiêu hóa và kích ứng da (Ristea & Zarnescu., 2023). Cấu trúc hóa học của Indigo carmine được thể hiện ở Hình 1.



**Hình 1. Cấu trúc hóa học của Indigo carmine**

Nước thải dệt nhuộm được xử lý bằng nhiều phương pháp như lọc màng (Liang et al., 2016), keo tụ (Hussein & Jasim., 2021), quá trình phân hủy quang xúc tác (Khan et al., 2024), cũng như hấp phụ (Roy et al., 2023). Trong đó, hấp phụ là một trong những phương pháp phổ biến để xử lý nước thải phẩm nhuộm bởi tính kinh tế, đơn giản, hiệu quả cao và ít gây hại cho môi trường (Zaouak et al., 2018; Khan et al., 2023). Có rất nhiều vật liệu được sử dụng trong phương pháp hấp phụ, trong đó TSH là một vật liệu nổi bật nhờ có cấu trúc xốp, diện tích bề mặt riêng lớn, giàu nhóm chức và khả năng hấp phụ vượt trội. TSH được tạo ra với nguồn sinh khối sẵn

có từ phụ phẩm nông nghiệp như bã mía, rơm rạ, lõi ngô, vỏ trấu,... Mỗi loại sinh khối khác nhau được sử dụng để chế tạo ra TSH có cấu trúc lỗ xốp và diện tích bề mặt riêng khác nhau, điều này ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả hấp phụ của nó. Tuy nhiên, TSH thu được sau quá trình nung trực tiếp vẫn còn thiếu các nhóm chức và diện tích bề mặt riêng còn hạn chế, khiến nó chưa thể phát huy tối đa khả năng hấp phụ các hợp chất như thuốc nhuộm. Do đó, để nâng cao hiệu quả hấp phụ, việc biến tính TSH là điều cần thiết (Sizmur et al., 2017). Một số phương pháp biến tính TSH đã được nghiên cứu như plasma (Luo et al., 2019), sử dụng chất oxy hóa (Qin et al., 2019), vật lý (Sakhiya et al., 2020), hóa học (Akhil et al., 2021). Trong đó, khi phương pháp biến tính hóa học được áp dụng, cấu trúc lỗ xốp và diện tích bề mặt riêng được gia tăng đáng kể, giúp khả năng tiếp xúc giữa vật liệu và thuốc nhuộm tốt hơn. Song song đó, lượng cacbon thu được bằng phương pháp hóa học được nhiều hơn, mang lại hiệu quả tái sử dụng cao hơn (Akhil et al., 2021).

Tại Việt Nam, việc nghiên cứu và ứng dụng TSH ngày càng được quan tâm nhờ nguồn sinh khối dồi dào từ phụ phẩm nông nghiệp. Kết quả nghiên cứu của Ton-That et al. (2023) đã chứng minh khả năng ứng dụng TSH từ vỏ mít trong xử lý thuốc nhuộm hữu cơ, khi vật liệu tổng hợp bằng nhiệt phân ở 500°C đạt diện tích bề mặt khoảng 13 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> và loại bỏ tới 96,57% thuốc nhuộm xanh methylene chỉ sau 60 phút. Tiếp nối hướng khai thác phụ phẩm nông nghiệp, Nhi và ctv. (2024) đã chứng minh tiềm năng to lớn của phụ phẩm nông nghiệp, đặc biệt là vỏ mít Thái, trong việc phát triển chất xúc tác Fenton dị thể để xử lý pentachlorophenol (PCP) trong nước. Bằng cách biến đổi vỏ mít thành than hoạt tính mang sắt (Fe/JAC), kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng nhiệt độ và tỷ lệ Fe/JAC có ảnh hưởng quan trọng đến hiệu quả phân hủy, với điều kiện tối ưu đạt được ở 500°C và tỷ lệ Fe/JAC 20%. Qua đó cho thấy tiềm năng lớn của vỏ mít Thái ứng dụng làm TSH để xử lý môi trường. Đặc biệt, tỉnh Hậu Giang hiện là một trong những vùng trồng mít Thái (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) lớn nhất Đồng bằng sông Cửu Long, với diện tích khoảng 5.585 ha, năng suất trung bình 23,1 tấn/ha và sản lượng hằng năm hơn 33.000 tấn (Khong, 2022). Điều này cho thấy nguồn sinh khối từ vỏ mít tại địa phương rất phong phú, mở ra triển vọng to lớn trong việc tận dụng để phát triển vật liệu hấp phụ và xúc tác thân thiện môi trường phục vụ xử lý nước thải.

Trong nghiên cứu này, TSH biến tính từ vỏ mít Thái được chế tạo bằng phương pháp nhiệt phân và ứng dụng hấp phụ thuốc nhuộm IC trong môi trường

nước giả thải. Kết quả nghiên cứu mang lại nhiều đóng góp quan trọng trong việc tối ưu hóa hiệu quả quản lý và sử dụng tài nguyên sẵn có, mà còn giúp gia tăng giá trị của các phụ phẩm nông nghiệp, chúng được biến thành nguồn nguyên liệu xanh, sạch, thân thiện với môi trường. Vật liệu thu được thể hiện diện tích bề mặt riêng lớn thể tích lỗ xốp cao, dẫn đến hiệu suất và dung lượng hấp phụ IC vượt trội lên đến 99,1%, cùng với thời gian đạt cân bằng ngắn sau 20 phút. Bên cạnh đó, việc tái sử dụng và biến các phụ phẩm này thành các sản phẩm hữu ích không chỉ giúp giảm thiểu lãng phí mà còn giảm bớt gánh nặng ô nhiễm môi trường, bảo vệ hệ sinh thái tự nhiên.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Nguyên liệu

Nguyên liệu được sử dụng trong quá trình nghiên cứu bao gồm: Phosphoric acid ( $H_3PO_4$ ) xuất xứ Trung Quốc (độ tinh khiết 85%), Indigo carmine ( $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$ ) dạng tinh thể xuất xứ Merch-Đức (độ tinh khiết  $\geq 80\%$ ), Hydrochloric acid (HCl) xuất xứ Xilong, Trung Quốc (độ tinh khiết 36 - 38%), Sodium hydroxide (NaOH) xuất xứ Xilong - Trung Quốc (độ tinh khiết  $\geq 96\%$ ). Tất cả các thuốc thử hóa học và dung môi đều được mua từ các loại phân tích có bán trên thị trường, không cần tinh chế thêm. Về nguyên liệu, vỏ mít Thái được thu gom từ xã Phụng Hiệp, Thành phố Cần Thơ.

### 2.2. Chế tạo TSH và TSH biến tính

Vỏ mít Thái được rửa sạch, cắt nhỏ rồi phơi khô dưới ánh nắng mặt trời, sau đó sấy ở  $105^\circ C$  trong 24 giờ. Sau đó, việc nhiệt phân được tiến hành ở các nhiệt độ khác nhau gồm  $400^\circ C$ ,  $500^\circ C$  và  $600^\circ C$  với tốc độ gia nhiệt  $10^\circ C \cdot \text{phút}^{-1}$  và thời gian lưu nhiệt trong 2 giờ (Prahas et al., 2008). Sản phẩm thu được rửa bằng nước cất đến khi pH trung tính, sấy ở nhiệt độ  $105^\circ C$ , trong 24 giờ và rây đến kích thước hạt 0,1 mm, thu được các mẫu TSH thô Bio 400, Bio 500 và Bio 600.

Tương tự, TSH biến tính được chế tạo bằng cách ngâm vỏ mít Thái với  $H_3PO_4$  85% trong 24 giờ trước khi tiến hành nhiệt phân ở cùng các mức nhiệt độ khảo sát  $400^\circ C$ ,  $500^\circ C$  và  $600^\circ C$  (Ibrahim et al., 2020). Các sản phẩm sau khi nung được rửa đến pH trung tính, sấy  $105^\circ C$  trong 24 giờ và rây với kích thước hạt 0,1 mm, thu được TSH biến tính Bio P400, Bio P500, Bio P600. Hiệu suất tổng hợp TSH được tính theo phương trình:

$$H_{TSH} (\%) = \frac{m_s}{m_d} 100 \% (1)$$

Trong đó:  $H_{TSH}$  là hiệu suất tổng hợp TSH (%);  $m_s$  là khối lượng sau khi nung (g) và  $m_d$  là khối lượng trước khi nung (g).

### 2.3. Phương pháp xác định đặc trưng cấu trúc

Phổ hồng ngoại hồng ngoại Fourier (FT-IR) được đo bằng máy PerkinElmer MIR/NIR Frontier, khoảng dao động là  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ , dùng để xác định các nhóm chức. Việc phân tích nhiệt trọng lượng (TGA) của vật liệu được thực hiện bằng cách sử dụng thiết bị Labsys Eco TGA/DTG 1600, vận hành với chương trình nhiệt  $10^\circ C \cdot \text{phút}^{-1}$  trong không khí, dùng để khảo sát độ bền nhiệt của vật liệu. Hình thái bề mặt vật liệu được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) sử dụng thiết bị FESEM S-4800. Phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX) được đo bằng máy Bruker Nano Berlin (Germany), dùng để phân tích thành phần hóa học của vật liệu. Phương pháp Brunauer-Emmett-Teller (BET) được đo bằng máy Quantachrome NOVA 1200e, để xác định diện tích bề mặt riêng của vật liệu.

### 2.4. Thí nghiệm hấp phụ IC của TSH biến tính

Để đánh giá một cách toàn diện tiềm năng ứng dụng của vật liệu TSH biến tính từ vỏ mít Thái ở  $500^\circ C$  trong xử lý IC, quá trình khảo sát khả năng hấp phụ phẩm nhuộm IC của vật liệu TSH biến tính được tiến hành thông qua các thí nghiệm thay đổi khối lượng TSH (2-12 mg), thời gian (10-90 phút), nồng độ IC ( $20-150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) và pH (4-10). Sau khi phản ứng, dung dịch được lọc và nồng độ IC còn lại được đo bằng UV-Vis tại bước sóng 610 nm để tính hiệu suất loại bỏ. Thí nghiệm được thực hiện dựa trên việc thay đổi luân phiên từng yếu tố để xác định điều kiện tối ưu cho quá trình hấp phụ, các thí nghiệm được lặp lại ba lần nhằm đảm bảo độ tin cậy của kết quả. Hiệu suất hấp phụ được tính theo phương trình sau:

$$H(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} 100 \% (2)$$

Trong đó:  $C_0$  là nồng độ IC ban đầu ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) và  $C_t$  là nồng độ IC còn lại ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

Động học quá trình hấp phụ IC của TSH được nghiên cứu theo mô hình biểu kiến bậc nhất (phương trình 3) mô tả động học hấp phụ chủ yếu chịu chi phối bởi các vị trí bề mặt chưa bị chiếm chỗ, thường gắn với cơ chế hấp phụ vật lý ở giai đoạn đầu. Mô hình biểu kiến bậc hai (phương trình 4) phản ánh quá trình hấp phụ chịu chi phối bởi các tương tác hóa học giữa IC các nhóm chức trên TSH, cho khả năng dự đoán tốt dung lượng hấp phụ cân bằng. Mô hình

mô hình Intra-particle diffusion (khuếch tán nội hạt) (phương trình 5) dùng để đánh giá vai trò của khuếch tán IC vào bên trong lỗ xốp của TSH và xác định liệu khuếch tán nội hạt có phải là bước khống chế tốc độ hấp phụ hay không.

Phương trình động học biểu kiến bậc nhất:

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

Phương trình động học biểu kiến bậc hai:

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

Phương trình Intra-particle diffusion:

$$q_t = k_i t^{0.5} + C \quad (5)$$

Trong đó:  $q_t$  là dung lượng hấp phụ (DLHP) IC tại thời điểm  $t$  ( $\text{mg.g}^{-1}$ ),  $q_e$  là DLHP IC tại thời điểm cân bằng ( $\text{mg.g}^{-1}$ ),  $k_1$  là hằng số tốc độ hấp phụ biểu kiến bậc nhất ( $\text{phút}^{-1}$ ),  $k_2$  là hằng số tốc độ hấp phụ biểu kiến bậc hai ( $\text{g.mg.phút}^{-1}$ ),  $k_i$  là hằng số tốc độ khuếch tán trong hạt,  $t$  là thời gian và  $C$  là hằng số biểu diễn độ dày của lớp biên.

Đẳng nhiệt hấp phụ IC lên TSH được nghiên cứu bằng mô hình hấp phụ Langmuir và Freundlich. Mô hình đẳng nhiệt hấp phụ được sử dụng để nghiên cứu mối quan hệ giữa lượng chất hấp phụ trên bề mặt chất hấp phụ và sự tương tác các phân tử chất hấp phụ với chất bị hấp phụ. Các mô hình đẳng nhiệt thể hiện sự phân bố phân tử thuốc nhuộm giữa pha rắn và lỏng, do đó thông tin định tính về vị trí cân bằng được cung cấp trong quá trình hấp phụ. Đường đẳng nhiệt Langmuir – mô tả quá trình hấp phụ đơn lớp trên bề mặt đồng nhất với số lượng vị trí hấp phụ hữu hạn, Dubinin-Radushkevich (D-R) – dùng để đánh giá năng lượng hấp phụ và xác định bản chất vật lý hay hóa học của quá trình hấp phụ, Freundlich - mô tả hấp phụ đa lớp trên bề mặt không đồng nhất với sự phân bố năng lượng hấp phụ khác nhau. Ba mô hình trên là những mô hình nổi tiếng và được sử dụng rộng rãi nhất để mô tả đường đẳng nhiệt hấp phụ (Ahmad Khan et al., 2023).

Phương trình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir:

$$\frac{q_e}{C_e} = \frac{1}{q_{max}} \times C_e + \frac{1}{K_L \times q_{max}} \quad (6)$$

Phương trình hấp phụ đẳng nhiệt Freundlich :

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

Trong đó:  $q_e$ : DLHP tại thời điểm cân bằng ( $\text{mg.g}^{-1}$ ),  $q_{max}$ : DLHP cực đại ( $\text{mg.g}^{-1}$ ),  $K_L$ : Hằng số đặc trưng tương tác của chất hấp phụ và chất bị hấp phụ ( $\text{L.mg}^{-1}$ ),  $K_F$  là hằng số hấp phụ Freundlich,  $n$

là hằng số tốc độ Freundlich biểu thị cường độ hấp phụ.

Mô hình D-R được biểu diễn bởi hai biểu thức :

$$q_e = q_{max} \cdot \exp(-K_{DR} \varepsilon^2) \quad (8)$$

$$\varepsilon = RT \left(1 + \frac{1}{C_e}\right) \quad (9)$$

Trong đó:  $K_{DR}$  là hằng số tốc độ DR liên quan đến năng lượng hấp phụ,  $q_{max}$  là DLHP cực đại của chất hấp phụ ( $\text{mg.g}^{-1}$ ),  $E$  là năng lượng hấp phụ trung bình trên mỗi phân tử chất hấp phụ cần thiết để chuyển một mol chất hấp phụ từ dung dịch sang bề mặt chất hấp phụ,  $\varepsilon$  biểu thị thế hấp phụ Polanyi là hàm của nhiệt độ,  $R$  là hằng số khí lý tưởng  $8,314 \text{ J.(mol.K}^{-1})$  và  $T$  là nhiệt độ tuyệt đối (K).

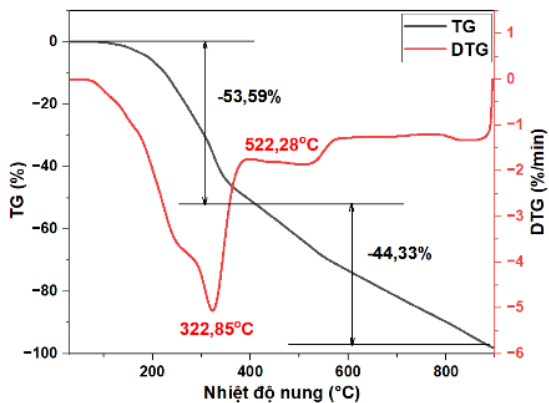
## 2.5. Quy trình tái sử dụng TSH biến tính

TSH biến tính từ vỏ mít Thái sau khi đánh giá khả năng hấp phụ đối với IC được tiếp tục khảo sát khả năng thu hồi và tái sử dụng thông qua quá trình rửa bằng nước cất. Cụ thể, phần TSH sau khi hấp phụ được tách ra khỏi dung dịch bằng phương pháp ly tâm. Tiếp theo, TSH được rửa với nước cất trong khoảng 3 - 5 ngày, mỗi ngày tiến hành rửa 3 lần, đồng thời kết hợp xử lý siêu âm từ 3 đến 5 phút. Vật liệu sau rửa đã được lọc và sấy  $105^\circ\text{C}$  trong 24 giờ, các thí nghiệm đánh giá khả năng hấp phụ được tiếp tục tiến hành theo quy trình đã áp dụng trước đó thông qua phương pháp UV-Vis. Phương pháp phân tích SEM và FT-IR được sử dụng để xác định độ ổn định cấu trúc của vật liệu sau thu hồi.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Đặc tính của vỏ mít Thái

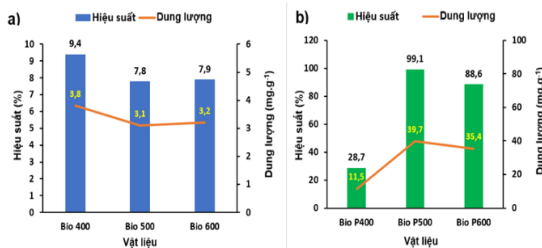
Kết quả phân tích giản đồ nhiệt trọng lượng của vỏ mít Thái cho thấy xu hướng giảm dần của trọng lượng trên đường cong TGA (Hình 2). Giai đoạn đầu chỉ có sự mất khối lượng nhỏ, chủ yếu do bay hơi của hơi nước và các hợp chất dễ bay hơi có khối lượng phân tử thấp. Từ  $140^\circ\text{C}$  đến  $320^\circ\text{C}$ , khối lượng giảm mạnh đến 53,59%, phản ánh quá trình phân hủy hemicellulose và một phần cellulose. Giai đoạn cuối, từ  $350^\circ\text{C}$  đến  $550^\circ\text{C}$ , sự giảm khối lượng liên quan đến phân hủy lignin, cacbon rắn và phần cellulose còn lại với tốc độ chậm hơn. Ở các nghiên cứu trước đó, các mô hình tương tự đã được xác định trong quá trình phân hủy nhiệt của bã mía (Yaghoubi et al., 2018), lá thông (Mandal et al., 2019), vỏ mít (Kardam & Khanam., 2025).



**Hình 2. Giảm đồ TGA của vỏ mite Thái**

**3.2. Đánh giá sơ bộ khả năng hấp phụ IC của TSH và TSH biến tính từ vỏ mite Thái**

Trong điều kiện cố định gồm 10 mg vật liệu, dung dịch IC 20 mg.L<sup>-1</sup>, thể tích 20 mL, thời gian 60 phút, khả năng hấp phụ của các mẫu TSH (Bio 400, Bio 500, Bio 600) và TSH biến tính (Bio P400, Bio P500, Bio P600) đã được so sánh. Kết quả đánh giá sơ bộ khả năng hấp phụ IC được trình bày ở Hình 3 cho thấy Bio P500 đạt hiệu suất loại bỏ cao nhất là 99,1% với dung lượng hấp phụ 39,7 mg.g<sup>-1</sup>, vượt trội so với các mẫu khác chỉ từ 3,1-35,4 mg.g<sup>-1</sup>. Ở mẫu Bio P600, do sự phân hủy mạnh các nhóm chức và mức độ cacbon hóa cao làm bề mặt trở nên trơn hơn dẫn đến hiệu suất hấp phụ giảm. Do đó, Bio P500 được lựa chọn là vật liệu tối ưu để tiến hành các nghiên cứu chi tiết tiếp theo.

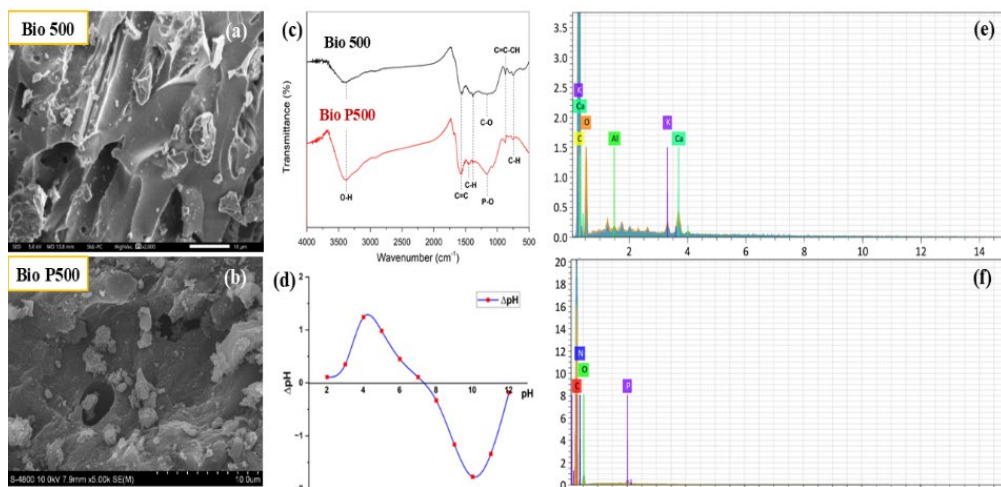


**Hình 3. Biểu đồ đánh giá khả năng hấp phụ IC của TSH (a) và TSH biến tính (b)**

**3.3. Phân tích cấu trúc đặc trưng của TSH và TSH biến tính ở 500°C**

Kính hiển vi điện tử quét (SEM) của TSH chứng minh quá trình biến tính bằng H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> gây ra những thay đổi lớn về hình thái bề mặt và sự phân bố, sắp xếp lại các lỗ rỗng. Hình 4b cho thấy rằng bề mặt xuất hiện nhiều lỗ xốp rõ rệt, với các hốc rỗng phân bố đồng đều hơn so với TSH (Hình 4a). Đồng thời, bề mặt có xu hướng trở nên xốp hơn, hệ thống mao quản phát triển, dẫn đến tăng diện tích bề mặt riêng và nâng cao khả năng hấp phụ.

Phổ FT-IR của Bio 500 và Bio P500 được trình bày trong Hình 4c phản ánh sự khác biệt về các nhóm chức sau biến tính. Cường độ dải hydroxyl 3383-3419 cm<sup>-1</sup> tăng mạnh ở Bio P500 chứng tỏ sự hình thành thêm nhóm phân cực khi xử lý TSH bằng H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Liên kết C=C trong vòng thơm dịch chuyển từ 1555 cm<sup>-1</sup> (Bio 500) lên 1576 cm<sup>-1</sup> (Bio P500) chứng tỏ cấu trúc thơm được tăng cường sau biến tính. Đặc biệt, Bio P500 xuất hiện thêm đỉnh tại 1163 cm<sup>-1</sup> đặc trưng cho liên kết P-O. Sự thay đổi về vị trí và cường độ của các đỉnh này khẳng định sự biến đổi cấu trúc hóa học thành công của vật liệu.



**Hình 4. Kết quả SEM của TSH Bio 500 (a) và Bio P500 (b), phổ FT-IR (c), điểm đẳng nhiệt pH<sub>pzc</sub> của Bio P500 (d) và phân tích EDX của TSH Bio 500 (e) và Bio P500 (f).**

Kết quả phân tích phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX) cho thấy mẫu Bio 500 có hàm lượng cacbon tăng lên đến 77,24% do sự phân hủy và thoát ra của các nguyên tố khác, trong khi oxygen giảm còn 18,55% (Hình 4e). Với mẫu TSH biến tính, thành phần chính là carbon 84,92%, oxygen 11,38%, cùng với sự xuất hiện của phosphorus (0,73%) và nitrogen (Hình 4f). Những biến đổi này cho thấy hiệu quả của quá trình biến tính TSH bằng  $H_3PO_4$  kết hợp nhiệt phân đã nâng cao hàm lượng carbon, giảm oxygen, loại bỏ tạp chất và đồng thời tích hợp thêm phosphorus và nitrogen vào khung cấu trúc.

Ngoài sự khác biệt về nhóm chức, diện tích bề mặt riêng cũng là yếu tố quan trọng của TSH, được xác định bằng phương pháp BET (Bảng 2). Kết quả cho thấy quá trình biến tính hóa học kết hợp nhiệt phân đã làm tăng đáng kể diện tích bề mặt, thể tích và sự đa dạng lỗ xốp so với TSH chưa biến tính, góp phần hình thành hệ thống mao quản phát triển, từ đó nâng cao hiệu quả hấp phụ IC của vật liệu.

**Bảng 2. Diện tích bề mặt riêng và kích thước lỗ xốp của Bio 500 và Bio P500**

Vật liệu	$S_{BET}$ ( $m^2.g^{-1}$ )	Đường kính lỗ xốp (nm)	Thể tích lỗ xốp ( $cm^3.g^{-1}$ )
Bio 500	6,2	6,4	0,009967
Bio P500	1113,8	4,1	1,2

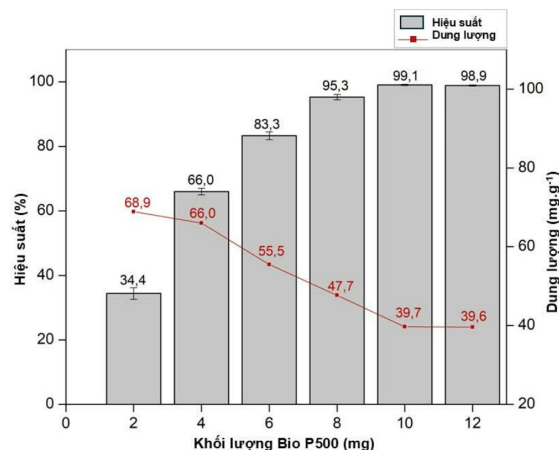
Điểm đẳng điện của Bio P500 được thể hiện trong Hình 4d xác định ở giao điểm của đồ thị với trục hoành có giá trị là 7,3 và pH của dung dịch IC ở nồng độ  $20 mg.L^{-1}$  là 5,7. Kết quả cho dự đoán rằng, vật liệu có khả năng hấp phụ các anion ở pH dung dịch nhỏ hơn điểm đẳng điện, bề mặt vật liệu sẽ tích điện tích dương do sự giải hấp phụ ion  $H^+$  và vật liệu Bio P500 hấp phụ tốt các phân tử IC mang điện tích âm.

### 3.4. Khả năng xử lý IC của TSH biến tính từ vỏ mít Thái ở $500^\circ C$ tại các điều kiện phản ứng khác nhau

Liều lượng chất hấp phụ là thông số quan trọng, quyết định trực tiếp đến hiệu quả khử màu cũng như chi phí xử lý trên một đơn vị dung dịch. Do đó, khối lượng TSH biến tính (Bio P500) đã được khảo sát như một yếu tố ảnh hưởng chính đến hiệu suất hấp phụ thuốc nhuộm IC, với kết quả thể hiện ở Hình 5.

Kết quả cho thấy liều lượng chất hấp phụ có ảnh hưởng rõ rệt đến hiệu suất loại bỏ IC. Khi khối lượng Bio P500 tăng từ 2 đến 8 mg, hiệu suất hấp phụ tăng nhanh từ 34,4% lên 95,3%, trong khi dung lượng hấp phụ (DLHP) giảm dần từ 68,9 xuống 47,7  $mg.g^{-1}$ . Điều này được lý giải bởi sự gia tăng số vị trí hoạt

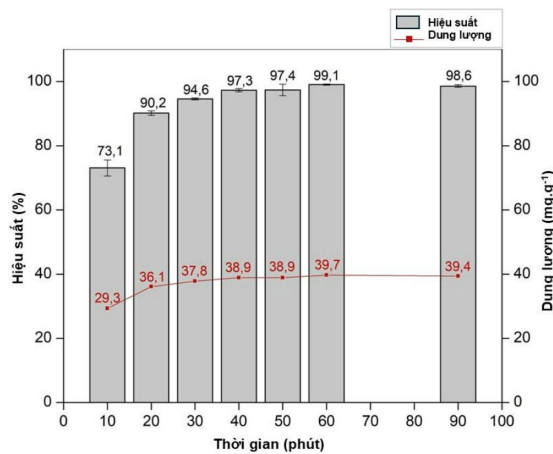
động và diện tích bề mặt sẵn có, cho phép nhiều phân tử IC khuếch tán vào các lỗ rỗng và gắn kết vào tâm hấp phụ, nhưng đồng thời dẫn đến sự phân bố không đồng đều trên một đơn vị khối lượng vật liệu (Bonilla-Petriciolet et al., 2017). Ở 10 mg, hiệu suất đạt cực đại 99,1% và gần như bão hòa ở 12 mg (98,9%), trong khi DLHP giảm còn khoảng 39,6  $mg.g^{-1}$ . Xu hướng này phản ánh mối quan hệ nghịch giữa hiệu suất và DLHP, phù hợp với các nghiên cứu trước đây về tác động của liều lượng hấp phụ (Silva et al., 2018). Như vậy, 10 mg Bio P500 được xác định là khối lượng tối ưu để đạt hiệu quả xử lý cao, đồng thời duy trì sự cân bằng giữa hiệu suất và mức sử dụng vật liệu. Việc so sánh với nghiên cứu của Sikdar et al. (2020) sử dụng TSH từ bã trà cho thấy cần tới 1 g vật liệu để đạt hiệu suất 95% trong xử lý 100 mL dung dịch IC, kết quả của nghiên cứu này nổi bật hơn khi chỉ cần 10 mg TSH biến tính từ vỏ mít Thái (Bio P500) đã đạt hiệu suất 99,1% với 20 mL dung dịch. Điều này chứng tỏ vật liệu Bio P500 có hiệu quả hấp phụ vượt trội, tiết kiệm đáng kể lượng vật liệu cần sử dụng và được lựa chọn là khối lượng tối ưu cho các khảo sát tiếp theo. Vì vậy, 10 mg TSH biến tính Bio P500 được chọn là khối lượng tối ưu để thực hiện các nghiên cứu tiếp theo.



**Hình 5. Ảnh hưởng của khối lượng TSH biến tính Bio P500 đến hiệu suất hấp phụ IC (nồng độ IC  $20 mg.L^{-1}$ , thời gian 60 phút, nhiệt độ phòng)**

Ngoài ảnh hưởng của hàm lượng chất hấp phụ thì thời gian là một yếu tố rất quan trọng trong quá trình loại bỏ thuốc nhuộm IC. Kết quả khảo sát thời gian được thể hiện ở Hình 6. Qua biểu đồ có thể thấy được, hiệu suất hấp phụ tăng nhanh chóng trong 40 phút đầu với hiệu suất từ 73,1% lên đến 97,3% và DLHP cũng tăng đáng kể từ 29,3  $mg.g^{-1}$  lên 38,9  $mg.g^{-1}$ . Đây là giai đoạn đầu mà nhiều vị trí hoạt động trên bề mặt vật liệu còn trống, cho phép các

phân tử IC nhanh chóng liên kết, dẫn đến hiệu suất gia tăng rõ rệt. Sau 40 phút, tốc độ hấp phụ chậm dần: trong khoảng 40 - 60 phút, hiệu suất chỉ tăng từ 97,3% lên 99,1% và DLHP từ 38,9 lên 39,7 mg.g<sup>-1</sup>. Khi kéo dài thời gian tiếp xúc đến 90 phút, hiệu suất 98,6% và DLHP 39,4 mg.g<sup>-1</sup> gần như không thay đổi, chứng tỏ các vị trí hấp phụ đã gần như bão hòa, quá trình tiến đến trạng thái cân bằng, trong đó hấp phụ và giải hấp xảy ra đồng thời.

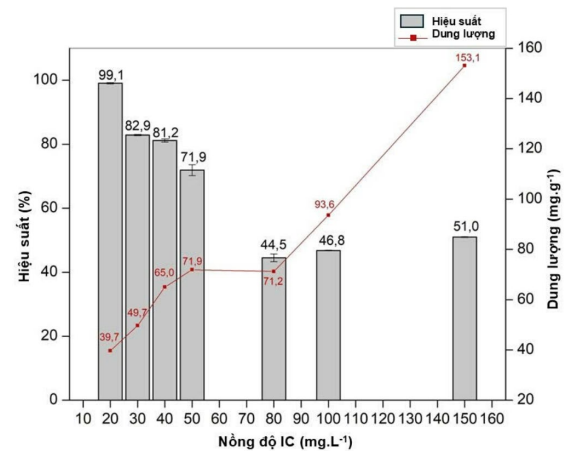


**Hình 6. Ảnh hưởng của thời gian đến hiệu suất hấp phụ IC (khối lượng Bio P500 10 mg, nồng độ IC 20 mg.L<sup>-1</sup>, nhiệt độ phòng)**

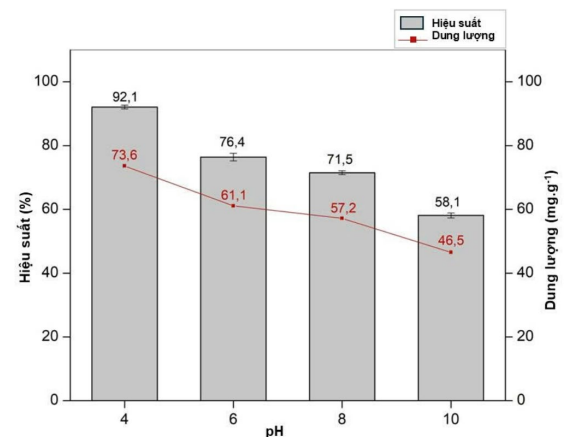
Kết quả khảo sát thời gian tương tự như nghiên cứu của Harrache et al. (2019), tác giả đã tiến hành khảo sát hấp phụ IC trên than hoạt tính thương mại trong khoảng thời gian 0-90 phút, kết quả cho thấy khả năng hấp phụ của IC tăng theo thời gian và đạt cực đại sau 45 phút tiếp xúc rồi dần tiến tới giá trị ổn định. Ở khảo sát này, thời gian 60 phút được chọn là thời gian tối ưu để thực hiện khảo sát tiếp theo.

Như đề cập ở trên, nồng độ IC có tác động mạnh mẽ đến khả năng hấp phụ thuốc nhuộm IC của vật liệu. Do đó, nồng độ của dung dịch IC là yếu tố được chọn để khảo sát bao gồm các khoảng từ 20 đến 150 mg.L<sup>-1</sup>. Kết quả nghiên cứu được trình bày trong Hình 7. Ở nồng độ 20 mg.L<sup>-1</sup>, hiệu suất xử lý đạt cao nhất 99,1%, trong khi DLHP còn thấp. Khi tăng nồng độ từ 30 đến 80 mg.L<sup>-1</sup>, hiệu suất giảm mạnh từ 82,9% xuống 44,5%, nhưng DLHP lại tăng từ 49,7 lên 71,2 mg.g<sup>-1</sup>, do các vị trí hoạt động dần bão hòa nên dung lượng phân tử IC tiếp xúc nhiều hơn (Sikdar et al., 2020). Đáng chú ý, tại 100 và 150 mg.L<sup>-1</sup>, hiệu suất có xu hướng tăng nhẹ đến 51,0%, đồng thời DLHP tăng mạnh lên 153,1 mg.g<sup>-1</sup>. Xu hướng này phù hợp với nhận định của Karaca et al. (2008) cho rằng nồng độ cao làm kéo dài thời gian cân bằng do sự kết hợp của các monomer thuốc nhuộm hạn chế khuếch tán trong hạt. Do đó, nồng

độ 20 mg.L<sup>-1</sup> được xem là tối ưu cho khả năng xử lý IC bởi vật liệu Bio P500.



**Hình 7. Ảnh hưởng của nồng độ IC đến hiệu suất hấp phụ (khối lượng Bio P500 10 mg, thời gian 60 phút, nhiệt độ phòng)**



**Hình 8. Ảnh hưởng của pH đến hiệu suất hấp phụ IC (khối lượng Bio P500 10 mg, nồng độ IC 20 mg.L<sup>-1</sup>, thời gian 60 phút, nhiệt độ phòng)**

Bên cạnh đó, độ pH của dung dịch cũng ảnh hưởng đến sự hấp phụ bằng cách điều chỉnh điện tích bề mặt chất hấp phụ cũng như mức độ ion hóa của các thành phần có trong dung dịch. Kết quả ở Hình 8 cho thấy pH có ảnh hưởng rõ rệt đến quá trình hấp phụ IC. Khi pH tăng từ 4 đến 10, hiệu suất giảm từ 92,1% xuống 58,1%, đồng thời DLHP cũng giảm từ 73,6 xuống 46,5 mg.g<sup>-1</sup>. Hiện tượng này được giải thích do sự thay đổi điện tích bề mặt của vật liệu và trạng thái ion hóa của thuốc nhuộm. Ở pH 4 - 6, bề mặt vật liệu mang điện tích dương nên dễ dàng hút các phân tử IC mang điện tích âm, làm tăng hiệu suất hấp phụ. Ngược lại, ở pH cao, quá trình khử proton khiến bề mặt giàu điện tích âm, dẫn đến lực đẩy tĩnh điện với IC và giảm hiệu quả xử lý.

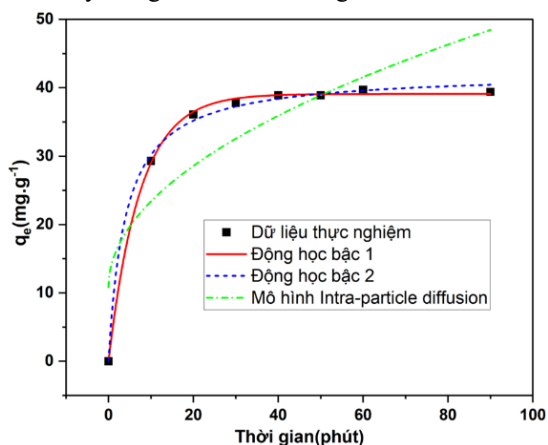
Do đó, pH được xem là yếu tố quyết định trong quá trình hấp phụ, trong khi biến tính bằng  $H_3PO_4$  góp phần cải thiện diện tích bề mặt và tăng cường hiệu quả loại bỏ IC.

### 3.5. Mô hình động học quá trình hấp phụ IC lên TSH

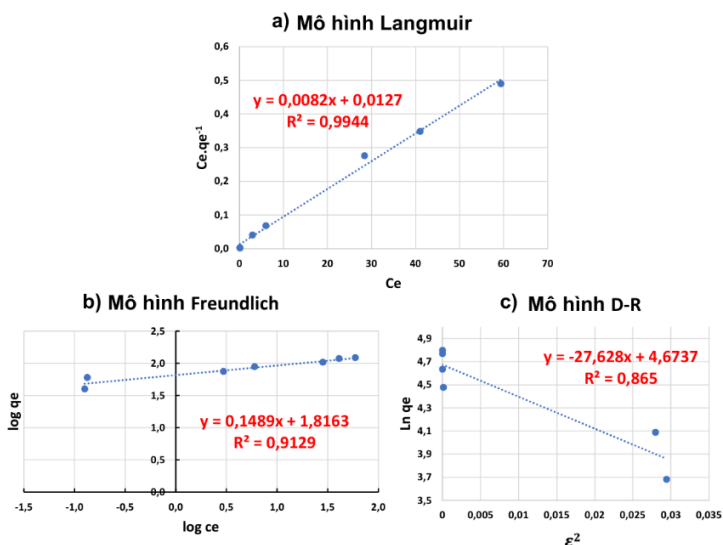
Động học hấp phụ được khảo sát thông qua các mô hình biểu kiến bậc nhất (PFO), biểu kiến bậc hai (PSO) và khuếch tán nội hạt. Kết quả thí nghiệm với nồng độ IC ban đầu  $20 \text{ mg.L}^{-1}$ , khối lượng TSH 10 mg và thời gian từ 0 đến 90 phút (Hình 9, Bảng 3) cho thấy DLHP tăng nhanh trong 20 phút đầu, sau đó dần đạt trạng thái cân bằng, đặc trưng cho quá trình hấp phụ nhanh ở vật liệu có diện tích bề mặt lớn và khả năng tương tác cao. Kết quả dữ liệu trong Bảng 3 cho thấy mô hình PFO phù hợp hơn với quá trình hấp phụ thuốc nhuộm IC lên TSH biến tính từ vỏ mít Thái so với mô hình PSO và Intra-particle diffusion. Điều này được chứng minh qua hệ số tương quan  $R^2$  của các mô hình PFO, PSO và Intra-particle diffusion lần lượt là 0,999; 0,997 và 0,7. Có thể thấy rằng tuy hệ số  $R^2$  của hai mô hình PFO và mô hình PSO là tương tự nhau và lớn hơn so với hệ số  $R^2$  của mô hình Intra-particle diffusion tuy nhiên DLHP của PFO có quan hệ gần nhất với DLHP tối đa ở quá trình thực nghiệm để loại bỏ IC với các điều kiện tối ưu bằng vật Bio P500 là  $39,7 \text{ mg.g}^{-1}$ . Do đó, nghiên cứu này được tuân theo động học PFO là quá trình hấp phụ trên bề mặt đơn lớp.

### 3.6. Mô hình đẳng nhiệt hấp phụ IC lên TSH

Đường đẳng nhiệt hấp phụ mô tả mối quan hệ giữa khối lượng chất bị hấp phụ trên mỗi đơn vị khối lượng của chất hấp phụ và nồng độ cân bằng của chất bị hấp phụ trong pha lỏng. Quá trình hấp phụ IC lên TSH được khảo sát thông qua ba mô hình đẳng nhiệt: Langmuir, Freundlich và Dubinin–Radushkevich (D–R). Dữ liệu thực nghiệm thu được từ các thí nghiệm hấp phụ hàng loạt với nồng độ IC từ 20 đến  $150 \text{ mg.L}^{-1}$ , 10 mg vật liệu trong 24 giờ đã được sử dụng. Ở nồng độ thấp, việc hấp phụ thường tuân theo mô hình Langmuir (hấp phụ trên bề mặt đơn lớp), còn ở nồng độ cao có thể chuyển sang mô hình Freundlich (hấp phụ đa lớp). Kết quả thu được trình bày trong Hình 10 và Bảng 4.



Hình 9. Mô hình động học hấp phụ IC lên vật liệu Bio P500



Hình 10. Đường đẳng nhiệt hấp phụ phù hợp với đường cong IC trên vật liệu Bio P500

Ghi chú: a - mô hình Langmuir, b - mô hình Freundlich, c - mô hình D-R.

**Bảng 3. Các giá trị tham số của mô hình động học PFO, PSO và Intra-particle diffusion**

	$Q_e$ (mg.g <sup>-1</sup> )	$K_i$	$R^2$	C
<b>Động học giả kiến bậc 1</b>	39,1	0,135	0,999	–
<b>Động học giả kiến bậc 2</b>	42,24	0,0591	0,997	–
<b>Mô hình Intra-particle diffusion</b>	–	3,97	0,700	10,82

**Bảng 4. Các thông số đẳng nhiệt hấp phụ IC của Bio P500**

	$q_{max}$ (mg.g <sup>-1</sup> )	K	n	$R^2$	E (kJ.mol <sup>-1</sup> )
Langmuir	121,95	0,646	–	0,994	–
Freundlich	–	65,51	6,72	0,913	–
Dubinin-Radushkevich	107,09	–	–	0,865	0,13

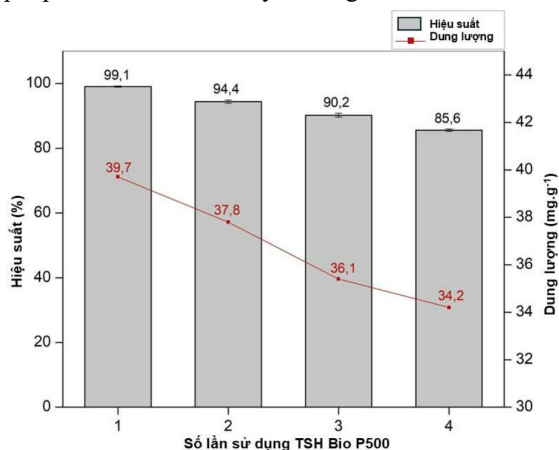
Dựa trên kết quả từ Bảng 4 và Hình 9, có thể xác định rằng mô hình Langmuir là phù hợp nhất để mô tả quá trình hấp phụ IC lên vật liệu Bio P500, với hệ số tương quan cao ( $R^2 = 0,994$ ), cho thấy cơ chế hấp phụ đơn lớp trên bề mặt đồng nhất. Mô hình D–R với năng lượng hấp phụ  $E = 0,13$  kJ/mol ( $< 8$  kJ/mol) khẳng định bản chất hấp phụ vật lý, phù hợp với cấu trúc vi mao quản của vật liệu. Mô hình Freundlich cũng thể hiện mức độ tương thích tương đối ( $R^2 = 0,913$ ), phản ánh tính không đồng nhất của bề mặt hấp phụ, tuy nhiên Langmuir vẫn là mô hình tối ưu, cho thấy tiềm năng ứng dụng cao của Bio P500 trong xử lý ô nhiễm nước.

**3.7. Khả năng thu hồi và tái sử dụng TSH biến tính từ vỏ mít Thái ở 500 °C**

Để tăng cường hiệu quả sử dụng TSH biến tính ở 500°C đã chế tạo, khả năng thu hồi và tái sử dụng mang ý nghĩa vô cùng quan trọng. Quá trình giải hấp IC bằng phương pháp rửa nước cất được đánh giá, các thí nghiệm được thực hiện dựa trên điều kiện tối ưu đã khảo sát trước đó với khối lượng Bio P500 là 10 mg, nồng độ IC là 20 mg.L<sup>-1</sup>, tại nhiệt độ phòng trong 60 phút và pH là 4. Kết quả khảo sát khả năng thu hồi và tái sử dụng của vật liệu Bio P500 được trình bày trong Hình 11.

Kết quả cho thấy TSH biến tính từ vỏ mít Thái Bio P500 duy trì khả năng hấp phụ IC sau nhiều chu kỳ tái sử dụng. Hiệu suất loại bỏ đạt 99,1% với DLHP 39,7 mg.g<sup>-1</sup> trong lần đầu, sau đó giảm còn 94,4% 37,8 mg.g<sup>-1</sup> ở chu kỳ thứ nhất và hai lần tiếp theo hiệu suất giảm với các giá trị lần lượt là 90,2%, 85,6% ứng với DLHP lần lượt là 36,1 mg.g<sup>-1</sup> và 34,2 mg.g<sup>-1</sup>. Kết quả quá trình thực nghiệm có thể cho thấy rằng Bio P500 có khả năng thu hồi tốt và có thể sử dụng ít nhất 3 lần. Bên cạnh đó, hình ảnh SEM (Hình 12a) chỉ ra sự suy giảm số lượng lỗ xốp và hư hỏng cấu trúc bề mặt sau nhiều chu kỳ, song vẫn tồn tại một phần mao quản hoạt động. Việc phân tích FT-IR (Hình 12b) cho thấy các nhóm chức đặc trưng

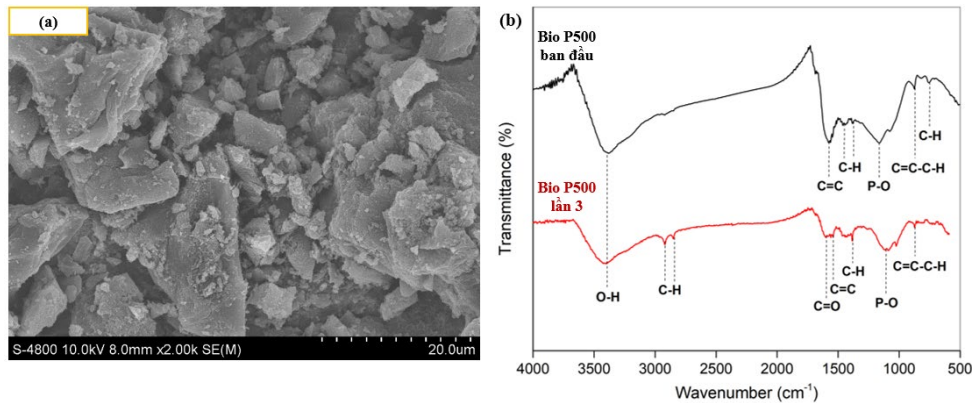
được bảo toàn sau ba lần sử dụng, chứng minh khả năng tái sử dụng của vật liệu dù hiệu suất giảm dần. Nhìn chung, Bio P500 được tổng hợp trong điều kiện đơn giản, thân thiện môi trường, đáp ứng xu hướng hóa học xanh và có tiềm năng ứng dụng trong xử lý IC, góp phần bảo vệ môi trường và phát triển công nghiệp bền vững. Bên cạnh đó, kết quả quá trình khảo sát cho thấy Bio P500 cho hiệu quả xử lý IC trong nước giả thải cao hơn so với một số phương pháp khác được trình bày ở Bảng 5.



**Hình 11. Hiệu suất hấp phụ IC của TSH Bio P500 sau các lần sử dụng (khối lượng Bio P500 10 mg, nồng độ IC 20 mg.L<sup>-1</sup>, thời gian 60 phút, nhiệt độ phòng)**

**Bảng 5. So sánh hiệu suất loại bỏ IC giữa Bio P500 và các phương pháp khác.**

Phương pháp xử lý	Hiệu suất (%)	Tham khảo
TSH biến tính	99,1	
GO composite	99,0	Waly et al. (2025)
Hạt Moringa oleifera	93,0	El-Kammah et al. (2022)
Ống cacbon nano	98,7	Dastgerdi et al. (2019)



Hình 12. Kết quả SEM (a) và phổ FT-IR (b) của TSH Bio P500 sau 3 lần thu hồi

#### 4. KẾT LUẬN

Vật liệu TSH biến tính từ vỏ mít Thái Bio P500 đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp nhiệt phân ở 500°C kết hợp biến tính  $H_3PO_4$ , cho hiệu quả cao trong hấp phụ thuốc nhuộm IC. Kết quả các phân tích FT-IR, SEM, EDX và BET cho thấy vật liệu có cấu trúc xốp phát triển, phân bố lỗ rỗng không đồng đều và mang nhiều nhóm chức hoạt động, góp phần nâng cao khả năng hấp phụ. Kết quả khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hấp phụ IC cho điều kiện tối ưu: 10 mg Bio P500 ứng với

20mL dung dịch IC có nồng độ  $20 \text{ mg.L}^{-1}$  trong thời gian 60 phút ở nhiệt độ phòng, pH là 4 đã cho hiệu suất hấp phụ cao đạt 99,1% và DLHP đạt  $39,7 \text{ mg.g}^{-1}$ . Quá trình hấp phụ tuân theo mô hình Langmuir ( $R^2 = 0,994$ ), cơ chế chủ yếu là hấp phụ vật lý theo Dubinin–Radushkevich và động học phù hợp với mô hình giả bậc nhất. Bio P500 có thể tái sử dụng ít nhất ba lần với hiệu suất trên 90%. Kết quả nghiên cứu cho thấy TSH biến tính là vật liệu tiềm năng có thể xử lý chất thải dệt nhuộm, góp phần bảo vệ môi trường.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ahmad Khan, F., Ahad, A., Shah, S. S., & Farooqui, M. (2023). Adsorption of crystal violet dye using *Platanus orientalis* (Chinar tree) leaf powder and its biochar: equilibrium, kinetics and thermodynamics study. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(16), 4820-4840.  
<https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1931854>
- Akhil, D., Lakshmi, D., Kartik, A., Vo, D. V. N., Arun, J., & Gopinath, K. P. (2021). Production, characterization, activation and environmental applications of engineered biochar: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 2261-2297.  
<https://doi.org/10.1007/s10311-020-01167-7>
- Bonilla-Petriciolet, A., Mendoza-Castillo, D. I., & Reynel-Ávila, H. E. (Eds.). (2017). *Adsorption processes for water treatment and purification* (Vol. 256). Berlin: Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-58136-1>
- Dasterdi, Z. H., Meshkat, S. S., & Esrafil, M. D. (2019). Enhanced adsorptive removal of Indigo carmine dye performance by functionalized carbon nanotubes based adsorbents from aqueous solution: equilibrium, kinetic, and DFT study. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 9(4), 323-334.  
<https://doi.org/10.1007/s40097-019-00321-0>
- El-Kammah, M., Elkhatib, E., Gouveia, S., Cameselle, C., & Aboukila, E. (2022). Enhanced removal of Indigo Carmine dye from textile effluent using green cost-efficient nanomaterial: Adsorption, kinetics, thermodynamics and mechanisms. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 29, 100753.  
<https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100753>
- Harrache, Z., Abbas, M., Aksil, T., & Trari, M. (2019). Thermodynamic and kinetics studies on adsorption of Indigo Carmine from aqueous solution by activated carbon. *Microchemical Journal*, 144, 180-189.  
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.09.004>
- Hussein, T. K., & Jasim, N. A. (2021). A comparison study between chemical coagulation and electro-coagulation processes for the treatment of wastewater containing reactive blue dye. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1946-1950.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.240>
- Ibrahim, H., Abid, M. K., & Zain, H. H. M. (2020). Heavy Metal Ions Adsorption from Aqueous Solution by Jackfruit Peel as Activated Biochar Low-Cost Adsorbent. *Journal of Advanced*

- Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 67(2), 154-165.
- Karaca, S., Gürses, A., Açıkyıldız, M., & Ejder, M. (2008). Adsorption of cationic dye from aqueous solutions by activated carbon. *Microporous and Mesoporous materials*, 115(3), 376-382. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2008.02.008>
- Kardam, S., & Khanam, S. (2025). Characterization of jackfruit peel as a promising resource for different thermo-chemical processes. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 6, 100055. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2024.100055>
- Khan, M. D., Singh, A., Khan, M. Z., Tabraiz, S., & Sheikh, J. (2023). Current perspectives, recent advancements, and efficiencies of various dye - containing wastewater treatment technologies. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103579. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103579>
- Khan, S., Naushad, M., Govarthanan, M., Iqbal, J., & Alfadul, S. M. (2022). Emerging contaminants of high concern for the environment: Current trends and future research. *Environmental Research*, 207, 112609. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112609>
- Khan, S., Noor, T., Iqbal, N., & Yaqoob, L. (2024). Photocatalytic dye degradation from textile wastewater: a review. *ACS omega*, 9(20), 21751-21767. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00887>
- Ton-That, L., Pham, H. D., Duong, B. N., Luu, T. T., Nguyen, D. K., Nguyen, N. A., & Dinh, V. P. (2023). Adsorption of methylene blue from aqueous solution by biochar prepared from jackfruit peel: isotherm model studies. *Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption*, 12(1), 1-7. <https://doi.org/10.51316/jca.2023.001>
- Nhi, N. H. Y., Ngàn, N. T. T., Trang, B. L. Q., Quàn, Đ. N., & Thuan, N. T. (2024). Statistical Effect Of Activation Condition for Heterogeneous Fenton Catalyst Derived From Jackfruit Peel Waste on Pentachlorophenol Removal in Water. *VNUHCM Journal of Earth Science and Environment*, 8(1), 888-895.
- Khong, D. T. (2022). Research for solutions for improving the value chain of jackfruit in Hau Giang province. Hue University Journal of Science: Economic and development issue, 131(5C), 83-101 (in Vietnamese).
- Liang, P., Rivallin, M., Cerneaux, S., Lacour, S., Petit, E., & Cretin, M. (2016). Coupling cathodic Electro-Fenton reaction to membrane filtration for AO7 dye degradation: A successful feasibility study. *Journal of Membrane Science*, 510, 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.071>
- Luo, J., Jin, M., Ye, L., Cao, Y., Yan, Y., Du, R., ... & Lee, Y. (2019). Removal of gaseous elemental mercury by hydrogen chloride non-thermal plasma modified biochar. *Journal of Hazardous Materials*, 377, 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.05.045>
- Mandal, S., Haydary, J., Bhattacharya, T. K., Tanna, H. R., Husar, J., & Haz, A. (2019). Valorization of pine needles by thermal conversion to solid, liquid and gaseous fuels in a screw reactor. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 3587-3599. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0386-7>
- Manzoor, J., & Sharma, M. (2020). Impact of textile dyes on human health and environment. *In Impact of textile dyes on public health and the environment* (pp. 162-169): IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0311-9.ch008>
- Prahas, D., Kartika, Y., Indraswati, N., & Ismadji, S. J. C. E. J. (2008). Activated carbon from jackfruit peel waste by H3PO4 chemical activation: Pore structure and surface chemistry characterization. *Chemical Engineering Journal*, 140(1-3), 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.08.032>
- Qin, P., Huang, D., Tang, R., Gan, F., Guan, Y., & Lv, X. (2019). Enhanced adsorption of sulfonamide antibiotics in water by modified biochar derived from bagasse. *Open chemistry*, 17(1), 1309-1316. <https://doi.org/10.1515/chem-2019-0141>
- Roy, M. N., Hossain, M. T., Hasan, M. Z., Islam, K., Rokonzaman, M., Islam, M. A., ... & Bashar, M. M. (2023). Adsorption, kinetics and thermodynamics of reactive dyes on chitosan treated cotton fabric. *Textile & Leather Review*, 6, 211-232. <https://doi.org/10.31881/TLR.2023.030>
- Sakhiya, A. K., Anand, A., & Kaushal, P. (2020). Production, activation, and applications of biochar in recent times. *Biochar*, 2, 253-285. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1>
- Secula, M. S., Crețescu, I., & Petrescu, S. (2011). An experimental study of indigo carmine removal from aqueous solution by electrocoagulation. *Desalination*, 277(1-3), 227-235. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.031>
- Sikdar, D., Goswami, S., & Das, P. (2020). Activated carbonaceous materials from tea waste and its removal capacity of indigo carmine present in solution: synthesis, batch and optimization study. *Sustainable Environment Research*, 30, 1-16. <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00070-8>
- Silva, J. S. D., Rosa, M. P. D., Beck, P. H., Peres, C., Dotto, G. L., Kessler, F., & Grasel, F. S. (2018). Preparation of an alternative adsorbent from Acacia Mearnsii wastes through acetosolv method and its application for dye removal.

- Journal of Cleaner Production*, 180, 386-394.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.201>
- Sizmur, T., Fresno, T., Akgül, G., Frost, H., & Moreno-Jiménez, E. (2017). Biochar modification to enhance sorption of inorganics from water. *Bioresource technology*, 246, 34-47.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.082>
- Tanyol, M., Yildirim, N. C., & Alparslan, D. (2021). Electrocoagulation induced treatment of indigo carmine textile dye in an aqueous medium: the effect of process variables on efficiency evaluated using biochemical response of *Gammarus pulex*. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(39), 55315-55329.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-14819-0>
- Tkaczyk, A., Mitrowska, K., & Posyniak, A. (2020). Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *Science of the total environment*, 717, 137222.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222>
- Waly, S. M., El-Wakil, A. M., Waly, M. M., El-Maaty, W. M. A., & Awad, F. S. (2025). Enhanced removal of indigo carmine dye from aqueous solutions using polyaniline modified partially reduced graphene oxide composite. *Scientific Reports*, 15(1), 15555.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-98115-8>
- Yaghoubi, E., Xiong, Q., Doranehgard, M. H., Yeganeh, M. M., Shahriari, G., & Bidabadi, M. (2018). The effect of different operational parameters on hydrogen rich syngas production from biomass gasification in a dual fluidized bed gasifier. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 126, 210-221.  
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.03.005>
- Zaouak, A., Noomen, A., & Jelassi, H. (2018). Gamma-radiation induced decolorization and degradation on aqueous solutions of Indigo Carmine dye. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 317(1), 37-44.  
<https://doi.org/10.1007/s10967-018-5835-z>