

Ảnh hưởng của phương pháp xử lý thủy nhiệt và biến tính với chất hoạt động bề mặt đến đặc tính bề mặt và khả năng hấp phụ methyl violet của than sinh học từ bã mía

Lê Thị Lan¹, Lâm Trung Nghĩa¹, Nguyễn Minh Phương¹, Đào Sỹ Đức¹, Vũ Ngọc Duy¹, Nguyễn Thị Thanh Tâm², Hà Minh Ngọc^{1,3}, Lê Vũ Tiến^{1*}

¹Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, phường Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Hải Phòng, 171 Phan Đăng Lưu, phường Phù Liễn, TP. Hải Phòng, Việt Nam

³Phòng Thí nghiệm trọng điểm về Vật liệu tiên tiến ứng dụng trong Phát triển xanh, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, phường Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 17/7/2026; ngày chuyển phản biện 19/7/2026; ngày nhận phản biện 28/7/2026; ngày chấp nhận đăng 12/8/2026

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, than sinh học (BC) nhiệt phân từ bã mía được lần lượt biến tính bởi quá trình thủy nhiệt ở 200°C/4 giờ (BC-HT), biến tính hóa học với chất hoạt động bề mặt sodium dodecyl sulfate (BC-SDS), và kết hợp hai quá trình trên (BC-HT-SDS). Kết quả cho thấy, xử lý thủy nhiệt làm tăng diện tích bề mặt riêng của BC, đồng thời làm thế zeta âm hơn. Ngược lại, biến tính bằng SDS làm giảm diện tích bề mặt nhưng làm tăng độ âm của thế zeta, cho thấy sự thay đổi đáng kể đặc tính bề mặt vật liệu. Ở nồng độ SDS 6 g/l, vật liệu thể hiện khả năng hấp phụ phẩm màu methyl violet (MV) cao. Dữ liệu cân bằng hấp phụ được mô tả phù hợp hơn bởi mô hình Langmuir, với $q_{\max}$ của BC-SDS và BC-HT-SDS lần lượt là 25,25 và 26,60 mg/g, cao hơn đáng kể so với BC (17,67 mg/g) và BC-HT (19,16 mg/g). So với thủy nhiệt, biến tính bề mặt BC bởi SDS có vai trò quan trọng hơn giúp nâng cao dung lượng hấp phụ của vật liệu. Sự cải thiện khả năng hấp phụ MV không chỉ phụ thuộc vào diện tích bề mặt mà còn liên quan đến sự thay đổi hóa học và điện tích bề mặt nhờ SDS.

*Tác giả liên hệ: Email: Levutien.costi@gmail.com

Từ khóa: biến tính SDS, hấp phụ, methyl violet, than sinh học bã mía, xử lý thủy nhiệt, xử lý nước.

Chỉ số phân loại: 2.4, 2.7

Effects of hydrothermal treatment and surfactant modification on the surface properties and methyl violet adsorption capacity of sugarcane bagasse-derived biochar

Thi Lan Le¹, Trung Nghia Lam¹, Minh Phuong Nguyen¹, Sy Duc Dao¹, Ngoc Duy Vu¹, Thi Thanh Tam Nguyen², Minh Ngoc Ha^{1,3}, Vu Tien Le^{1*}

¹VNU University of Science, Vietnam National University - Hanoi, 334 Nguyen Trai Street, Thanh Xuan Ward, Hanoi, Vietnam

²Hai Phong University, 171 Phan Dang Luu Street, Phu Lien Ward, Hai Phong City, Vietnam

³Key Laboratory of Advanced Materials for Green Growth, VNU University of Science, Vietnam National University - Hanoi, 334 Nguyen Trai Street, Thanh Xuan Ward, Hanoi, Vietnam

Received 17 July 2026; revised 28 July 2026; accepted 12 August 2026

Abstract:

In this study, than sinh học (BC) derived from sugarcane bagasse by pyrolysis was sequentially modified by hydrothermal treatment at 200°C for 4 h (BC-HT), chemical modification with the surfactant sodium dodecyl sulfate (BC-SDS), and by both processes (BC-HT-SDS). Hydrothermal treatment increased the specific surface area of BC while shifting the zeta potential toward more negative values. In contrast, SDS modification decreased the specific surface area but increased the negative magnitude of the zeta potential, indicating substantial changes in the surface properties of the material. At an SDS concentration of 6 g/l, the modified materials exhibited high adsorption capacity for methyl violet (MV). The adsorption equilibrium data were better described by the Langmuir model, with maximum adsorption capacities ($q_{\max}$) of 25.25 and 26.60 mg/g for BC-SDS and BC-HT-SDS, respectively, which were significantly higher than those of BC (17.67 mg/g) and BC-HT (19.16 mg/g).

Compared to hydrothermal treatment, surface modification of BC with SDS played a more important role in enhancing the adsorption capacity of the material. The improvement in MV adsorption performance was not solely dependent on the specific surface area but was also associated with the modification of surface chemistry and surface charge by SDS.

Keywords: adsorption, hydrothermal treatment, methyl violet, SDS modification, sugarcane bagasse biochar, water treatment.

Classification numbers: 2.4, 2.7

1. Đặt vấn đề

Cùng với sự phát triển của kinh tế - xã hội thì sự phát triển của các ngành công nghiệp cũng kéo theo những thách thức nhất định. Các ngành công nghiệp như dệt may, nhuộm vải, giấy, mỹ phẩm, thực phẩm, sản xuất nhựa thường sử dụng thuốc nhuộm hữu cơ để tạo màu cho các mặt hàng này. Mỗi năm, có khoảng 700.000 tấn thuốc nhuộm chế tạo được sử dụng cho ngành dệt may [1] và khoảng 10-15% thuốc nhuộm sử dụng trong các ngành công nghiệp được đổ trực tiếp vào nguồn nước, dẫn đến ô nhiễm nghiêm trọng môi trường nước [2]. Đây thường là những chất khó phân hủy sinh học. Sự hiện diện của chúng trong môi trường nước có thể gây cản trở quá trình truyền qua của ánh sáng, từ đó cản trở quá trình quang hợp của thực vật thủy sinh; gây độc cho sinh vật thủy sinh, ảnh hưởng đến hệ sinh thái nước [3]. Trong số các phương pháp xử lý nhóm chất ô nhiễm này trong môi trường nước, phương pháp sử dụng vật liệu hấp phụ có nguồn gốc từ sinh khối và phụ phẩm nông nghiệp được đánh giá có nhiều ưu điểm nhờ tính sẵn có của nguồn nguyên liệu đầu vào với chi phí thấp, thân thiện với môi trường và phù hợp với xu hướng kinh tế tuần hoàn trong sản xuất nông nghiệp [4]. Than sinh học là một sản phẩm được tạo ra qua quá trình nhiệt phân các vật liệu hữu cơ (vỏ trấu, rơm, lõi ngô, bã mía...) trong môi trường yếm khí hoặc hoàn toàn nghèo oxy ở nhiệt độ từ 200 đến 900°C. Nhờ diện tích bề mặt phát triển, cấu trúc nhiều lỗ trống trên bề mặt, và sự xuất hiện của nhóm chức -OH, -COOH trên bề mặt, than sinh học có khả năng hấp phụ, lưu giữ các chất ô nhiễm thông qua cơ chế hấp phụ vật lý, tương tác tĩnh điện, trao đổi ion và liên kết hóa học bề mặt. Bã mía là một nguồn phụ phẩm nông nghiệp dồi dào ở quốc gia nhiệt đới như Việt Nam. Theo Niên giám thống kê quốc gia năm 2024, lượng bã mía phát sinh hàng năm tại Việt Nam là khoảng hơn 10.000 tấn/năm.

Trong những năm gần đây, biến tính than sinh học bằng các chất hoạt động bề mặt anion đã trở thành một hướng nghiên cứu được quan tâm nhằm nâng cao khả năng hấp phụ các chất ô nhiễm trong môi trường nước. A. Oraon và cs (2024) [5] đã chế tạo than sinh học từ vỏ quả *Pterospermum acerifolium* và biến tính bằng natri dodecyl sulfate (SDS). Kết quả cho thấy, quá trình biến tính giúp cải thiện cấu trúc mao quản, tăng mật độ điện tích âm trên bề mặt và nâng cao đáng kể khả năng hấp phụ thuốc nhuộm methylene blue so với than sinh học ban đầu. Tương tự, A.K. Anas và cs (2021) [6] đã sử dụng sodium dodecylbenzen sulfonate (SDBS) để biến tính than sinh học và nhận thấy hiệu suất loại bỏ methylene blue tăng rõ rệt nhờ sự xuất hiện của các nhóm sulfonate mang điện tích âm, làm tăng tương tác tĩnh điện giữa vật liệu và thuốc nhuộm cation.

Bên cạnh việc sử dụng chất hoạt động bề mặt, nhiều nghiên cứu còn kết hợp than sinh học với các vật liệu chức năng nhằm nâng cao hiệu quả hấp phụ. K. Tian và cs (2025) [7] đã phát triển vật liệu than sinh học chức năng hóa bằng hệ nanomicelle SDS/SAP và cho thấy khả năng cố định thuốc nhuộm cũng như kim loại nặng vượt trội so với than sinh học thông thường. Sự kết hợp này làm gia tăng số lượng tâm hấp phụ hoạt động, đồng thời tăng cường cả cơ chế hấp phụ vật lý lẫn hấp phụ hóa học trên bề mặt vật liệu.

N.T.T. Nhan và cs (2024) [8] đã nghiên cứu bước đầu biến tính than sinh học từ bã mía với SDS nồng độ 0,3 g/l. Kết quả cho thấy, dung lượng hấp phụ phẩm màu của vật liệu sau khi biến tính với SDS tăng 1,3 lần so với vật liệu than sinh học ban đầu.

Quá trình hoạt hóa bằng quá trình thủy nhiệt với hơi nước được cho là giải pháp xanh, giúp mở rộng các lỗ mao quản, tăng diện tích bề mặt vật liệu than sinh học [9, 10]. Kết quả nghiên cứu của V.T.T. Huyen và cs (2024) [9] than sinh học từ vỏ trấu sau khi thủy nhiệt với hơi nước có diện tích bề mặt riêng BET và thể tích lỗ tăng khoảng 2 lần so với vật liệu ban đầu, pH_{pzc} của vật liệu sau thủy nhiệt là 6,92.

Mặc dù đã có các nghiên cứu về biến tính than sinh học bằng SDS và xử lý thủy nhiệt, tuy nhiên đây là những nghiên cứu đơn lẻ từng phương pháp biến tính. Hiện nay, chưa có nghiên cứu một cách hệ thống quy trình kết hợp hai bước: (1) biến tính vật lý (thủy nhiệt) và (2) biến tính hóa học (biến tính với chất hoạt động bề mặt dạng anion là SDS). Vì vậy, trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung nghiên cứu hiệu ứng hiệp đồng của cả 2 bước biến tính với mục tiêu chế tạo vật liệu than sinh học được chế tạo từ bã mía có dung lượng hấp phụ phẩm màu MV cao. Đây là những quy trình biến tính đơn giản. Quá trình thủy nhiệt có thể giúp làm mở rộng kích thước lỗ rỗng, tăng diện tích bề mặt, trong khi đó

việc sử dụng SDS nhằm giúp gia tăng điện tích âm trên bề mặt than sinh học từ bã mía, cải thiện đặc tính bề mặt và nâng cao khả năng hấp phụ thuốc nhuộm cation MV trong môi trường nước.

2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

2.1. Thực nghiệm

2.1.1. Quy trình chế tạo vật liệu

Quy trình tiền xử lý bã mía: bã mía được ngâm, rửa sạch bằng nước loại bỏ tạp chất, sau đó lắc với HNO_3 0,01M trong 2 giờ loại bỏ lượng vết kim loại. Rửa sạch bằng nước cất đến pH trung tính. Sấy khô ở 100°C trong 12 giờ. Bã mía sau khi tiền xử lý và sấy khô được nung ở $(600 \pm 10^\circ\text{C})$, tốc độ gia nhiệt $5^\circ\text{C}/\text{phút}$, trong thời gian 90 phút. Hiệu suất thu hồi sau khi nung BC từ bã mía đạt 24,7%.

Vật liệu than sinh học biến tính bằng chất hoạt động bề mặt, than sinh học được lắc với các dung dịch SDS có nồng độ 0,3; 1; 3; 6 và 9 g/l trong 6 giờ với tốc độ 120 vòng/phút, sau đó lọc và sấy khô ở 100°C trong 12 giờ để thu được vật liệu BC-SDS-x g/l (x là nồng độ của SDS biến tính).

Đối với biến tính kết hợp phương pháp thủy nhiệt, 10 g than sinh học được trộn với 25 ml nước cất để làm ướt bề mặt và thủy nhiệt ở 200°C trong 4 giờ trong môi trường kín, sau đó lọc và sấy khô ở nhiệt độ 100°C trong 12 giờ để thu được vật liệu BC-HT. Vật liệu này tiếp tục được biến tính bởi các dung dịch SDS có nồng độ khác nhau thu được vật liệu BC-HT-SDS-x g/l (x là nồng độ của SDS biến tính).

2.1.2. Quy trình khảo sát khả năng hấp phụ của các vật liệu

Cân chính xác 0,25 g vật liệu cho vào 7 bình nón dung tích 250 ml. Thêm lần lượt 50 ml dung dịch phẩm màu MV nồng độ 50 mg/l vào 7 bình nón và lắc trong những khoảng thời gian khác nhau là 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 phút.

Sau khi lắc, lọc bỏ vật liệu. Nồng độ còn lại của MV trong dung dịch thu được sau khi lọc được xác định bằng cách đo độ hấp thụ quang trên thiết bị quang phổ hấp thụ phân tử tại bước sóng 584 nm.

2.1.3. Nghiên cứu các mô hình hấp phụ đẳng nhiệt

Dung lượng hấp phụ của các vật liệu được xác định thông qua thí nghiệm hấp phụ MV ở các nồng độ ban đầu khác nhau (40, 60, 100, 150 và 200 mg/l) tại thời gian

cân bằng hấp phụ đã xác định trong mục 2.1.2. Thí nghiệm được thực hiện lặp lại 2 lần để tính giá trị trung bình.

Các số liệu thực nghiệm thu được, xây dựng đồ thị tương ứng với các mô hình Langmuir, Freundlich, từ đó đánh giá sự phù hợp của các mô hình và tính toán dung lượng hấp phụ cực đại và các thông số của mô hình hấp phụ.

2.2. Các phương pháp nghiên cứu các đặc trưng vật liệu

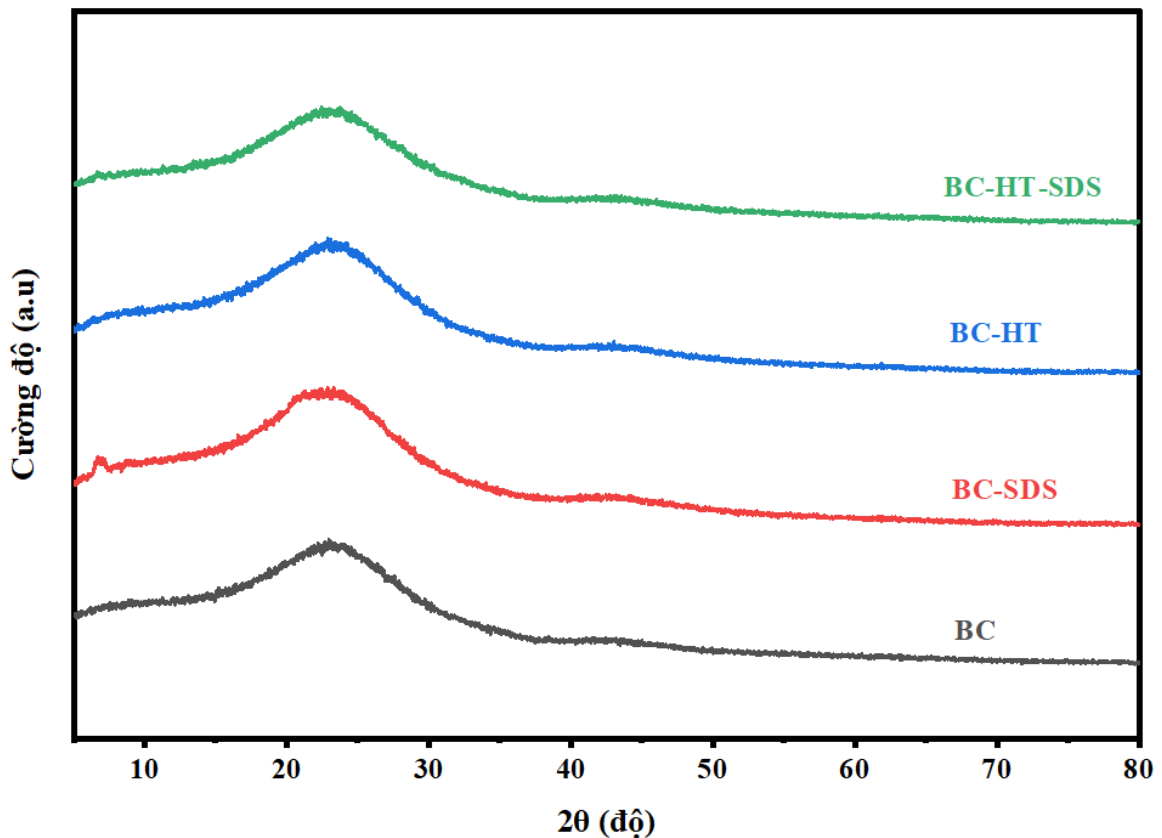
Vật liệu than sinh học sau khi chế tạo được nghiên cứu cấu trúc tinh thể, hình thái bề mặt. Phân tích cấu trúc tinh thể bằng phép đo nhiễu xạ tia X (Rigaku Miniflex 6G), phân tích hình ảnh bề mặt vật liệu bằng phép đo hiển vi điện tử quét (SEM, Tabletop Microscopes TM4000Plus), xác định sự thay đổi các nhóm chức bề mặt của vật liệu trước và sau biến tính bằng phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (Jasco FTIR-4600). Phân bố thành phần các nguyên tố được đánh giá bằng phương pháp phổ tán xạ năng lượng tia X (SEM-EDS mapping) trên thiết bị Hitachi Tabletop Microscopes TM4000Plus kết nối đầu dò OXFORD EDS MICSF+/X-STREAM2. Đồng thời, thế zeta của vật liệu cũng được xác định trên thiết bị Malvern Zetasizer Nano ZS90 để đánh giá đặc trưng điện tích trên bề mặt vật liệu. Diện tích bề mặt BET và thể tích lỗ mao quản của các vật liệu được xác định trên thiết bị Micromeritics TriStar II Plus.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Đặc trưng, cấu trúc vật liệu

3.1.1. Kết quả phân tích cấu trúc tinh thể của vật liệu

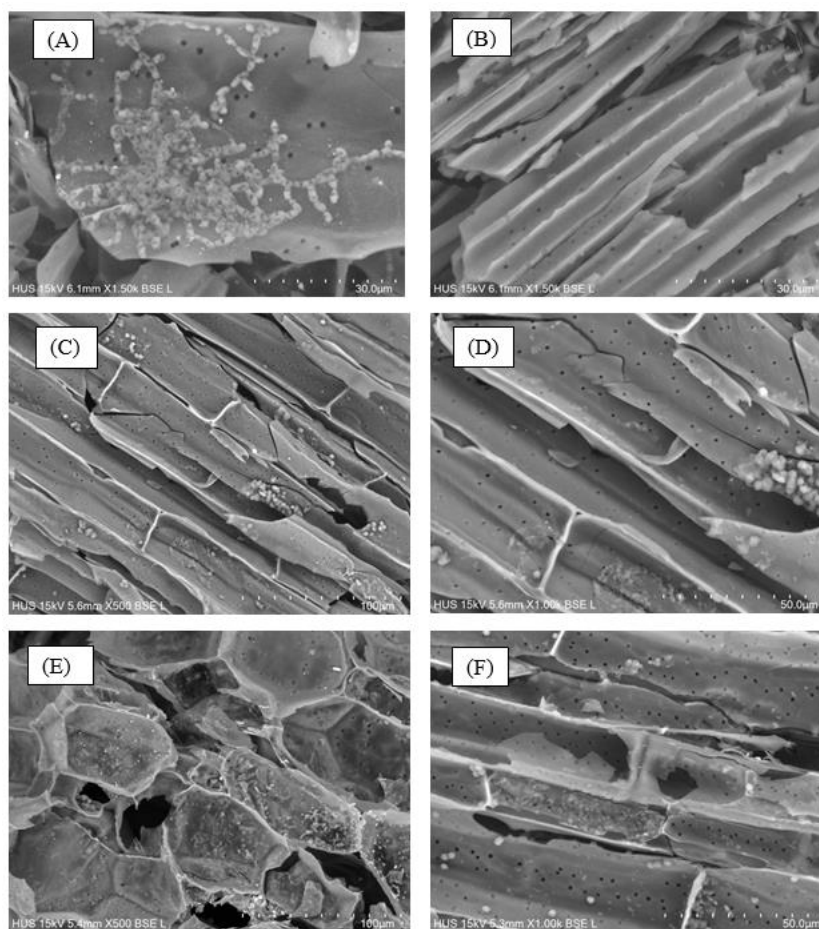
Kết quả cho thấy, các vật liệu chủ yếu mang đặc trưng của carbon vô định hình với sự xuất hiện của các đỉnh nhiễu xạ rộng thay vì các đỉnh sắc nét. Phổ XRD của các mẫu cho thấy tất cả vật liệu đều xuất hiện đỉnh nhiễu xạ rộng trong khoảng $2\theta \approx 22^\circ$, đặc trưng cho mặt phẳng (002) của cấu trúc carbon vô định hình. Sau xử lý thủy nhiệt và biến tính SDS, không quan sát thấy sự xuất hiện của các pha tinh thể mới rõ rệt. Kết quả cho thấy, các quá trình biến tính không gây biến đổi lớn về cấu trúc pha carbon quan sát được bằng XRD (hình 1).



Hình 1. Giảm đồ nhiễu xạ tia X của vật liệu BC, BC-SDS, BC-HT, BC-HT-SDS.

3.1.2. Kết quả phân tích hình thái bề mặt vật liệu

Kết quả phân tích SEM cho thấy, bề mặt của các mẫu vật liệu có sự thay đổi khá rõ sau quá trình biến tính và xử lý thủy nhiệt. Vật liệu BC-HT có bề mặt nhiều khe rãnh và cấu trúc lỗ rỗng đồng nhất hơn so với mẫu BC ban đầu (hình 2A, 2B). Điều này có thể do quá trình thủy nhiệt với hơi nước đã góp phần loại bỏ một phần tạp chất còn bám trên bề mặt vật liệu, từ đó giúp các lỗ rỗng trong vật liệu có thể được làm sạch và mở rộng hơn.



Hình 2. Ảnh SEM của các mẫu vật liệu than sinh học mẫu BC (A); mẫu BC-HT (B); mẫu BC-SDS (C, D); mẫu BC-HT-SDS (E, F).

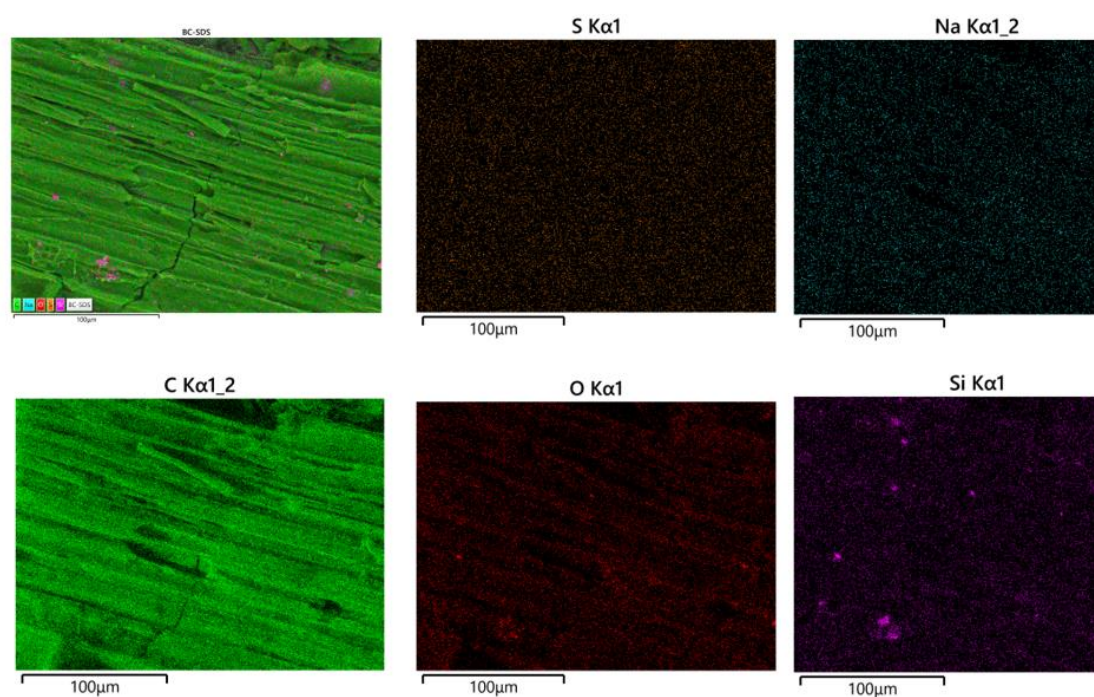
Sau khi biến tính SDS, trên bề mặt các vật liệu BC-SDS (hình 2C, 2D) và BC-HT-SDS (hình 2E, 2F), có các đốm trắng hoặc màng mỏng được cho là tác nhân biến tính SDS phân tán khá đồng nhất trên cấu trúc mao quản. Ở mẫu BC-HT-SDS (hình 2E, 2F) có thể quan sát thấy SDS được phân tán đồng đều hơn và với mật độ nhiều hơn trên bề mặt và trong hệ thống cấu trúc mao quản của vật liệu.

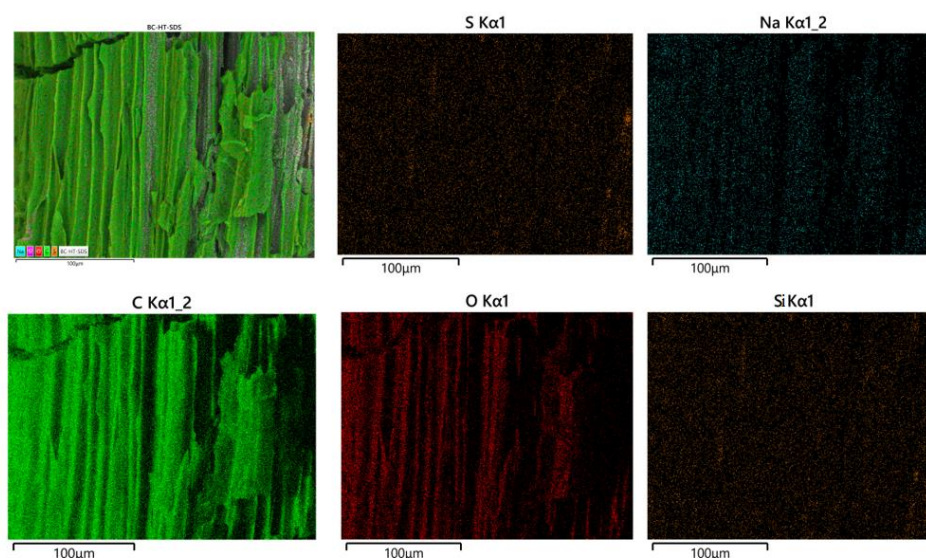
3.1.3. SEM-EDS mapping

Kết quả phân tích thành phần nguyên tố trong các mẫu vật liệu cho thấy, sau khi biến tính với SDS, đã thấy có sự xuất hiện tỷ lệ nhỏ S (0,54-0,65% khối lượng) và Na (0,13-0,26% khối lượng) trên cả hai vật liệu BC-SDS và BC-HT-SDS (bảng 1). Các thành phần này được phân bố khá đồng nhất trên bề mặt vật liệu (hình 3, 4). Bên cạnh đó, tỷ lệ % C của 2 mẫu vật liệu sau biến tính với SDS cũng tăng lên so với mẫu chưa biến tính. Điều này có thể do sự bao phủ của các mạch alkyl trong phân tử SDS trên bề mặt.

Bảng 1. Thành phần các nguyên tố trong các mẫu vật liệu.

Nguyên tố (% khối lượng)	BC	BC-HT	BC-SDS	BC-HT-SDS
C	69,38	74,19	81,88	75,15
O	30,02	24,73	16,54	23,63
Si	0,60	1,08	0,90	0,31
S	-	-	0,54	0,65
Na	-	-	0,13	0,26

**Hình 3. Ảnh SEM-EDS mapping của vật liệu BC-SDS.**



Hình 4. Ảnh SEM-EDS mapping của vật liệu BC-HT-SDS.

3.1.4. Diện tích bề mặt vật liệu (BET)

Các giá trị diện tích bề mặt, diện tích vi mao quản, thể tích mao quản và thể tích vi mao quản của các vật liệu BC, BC-HT và BC-HT-SDS được trình bày trong bảng 2. Kết quả cho thấy, các vật liệu có diện tích bề mặt khá lớn, phần lớn được tạo thành nhờ các hệ vi mao quản, với tổng diện tích vi mao quản chiếm khoảng 74-80%. Trong đó, vật liệu than sinh học từ bã mía sau khi thủy nhiệt có tổng diện tích bề mặt cao hơn khoảng 1,2 lần so với vật liệu ban đầu chưa thủy nhiệt. Đồng thời, tổng thể tích mao quản và vi mao quản của vật liệu sau thủy nhiệt cũng tăng khoảng 1,2 lần so với vật liệu BC ban đầu. Điều này là minh chứng rõ ràng cho vai trò của quá trình thủy nhiệt trong việc mở rộng các lỗ mao quản và tăng diện tích bề mặt của vật liệu.

Sau khi biến tính với chất hoạt động bề mặt SDS, diện tích bề mặt vật liệu và thể tích mao quản đều giảm đi khá nhiều (bảng 2). Điều này cho thấy, chất SDS đã được hấp phụ vào trong các lỗ mao quản, vi mao quản và trên bề mặt than sinh học biến tính thủy nhiệt.

Bảng 2. Diện tích bề mặt và thể tích mao quản của các vật liệu.

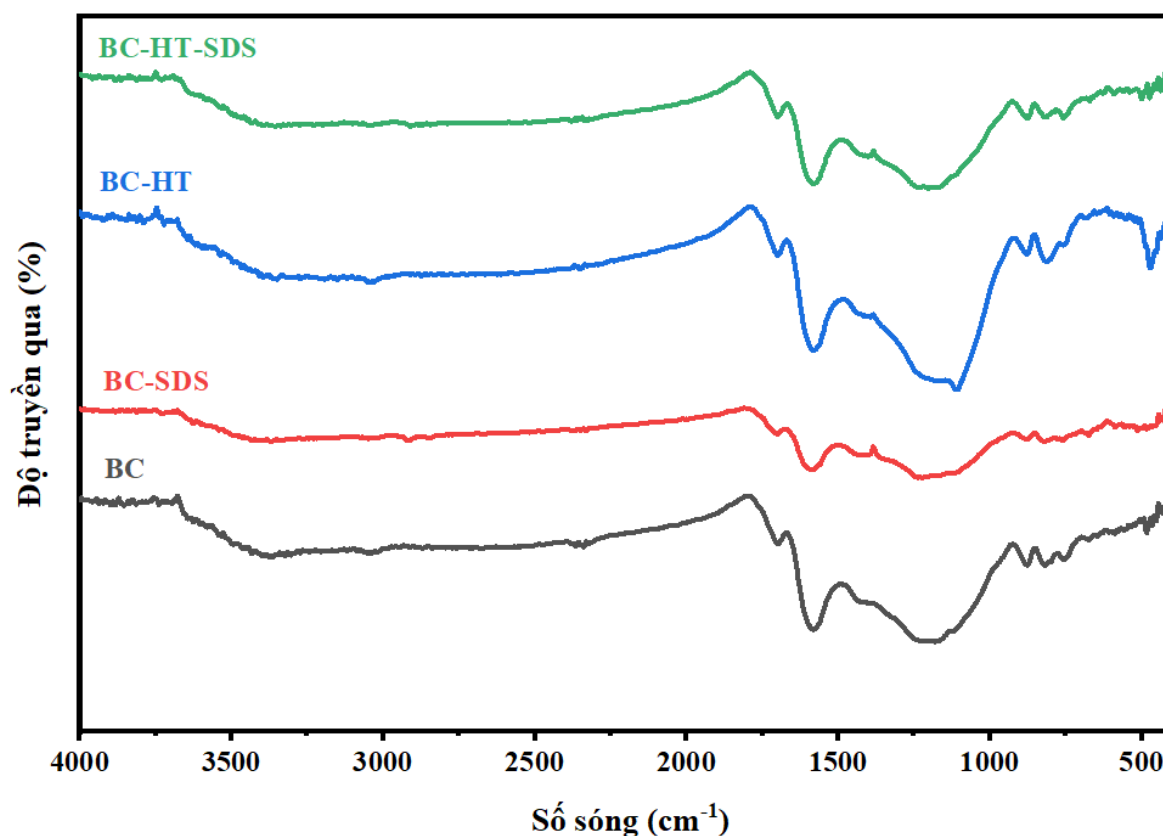
Vật liệu	Tổng diện tích- S_t (m^2/g)	Tổng diện tích vi mao quản- S_{micro} (m^2/g)	Tổng thể tích mao quản- V_t (cm^3/g)	Thể tích vi mao quản- V_{micro} (cm^3/g)	Kích thước mao quản (nm)
BC	378	281	0,188	0,143	2,26
BC-HT	450	363	0,221	0,174	2,35
BC-HT-SDS	92,3	69,6	0,0602	0,0328	0,725

3.1.5. Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR)

Phổ FTIR của mẫu BC chưa biến tính xuất hiện dải hấp thụ rộng tại khoảng 3420 cm^{-1} đặc trưng cho dao động kéo giãn của nhóm hydroxyl (-OH) trên bề mặt vật liệu. Đỉnh hấp thụ tại khoảng 1700 cm^{-1} liên quan đến dao động của nhóm C=O trong nhóm carboxyl hoặc carbonyl, đỉnh tại 1585 cm^{-1} có thể gán cho dao động của liên kết C=C trong vòng thơm. Dải hấp thụ ở khoảng $1000\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ được cho là dao động đặc trưng của nhóm C-H, dao động kéo giãn của nhóm C-O trong nhóm carboxylic, ester và nhóm C-O-C. Còn các peak trong khoảng $700\text{-}900\text{ cm}^{-1}$ có thể đặc trưng cho dao động uốn C-H ngoài mặt phẳng của cấu trúc vòng thơm aromatic [7].

Đối với mẫu BC-HT, phổ FTIR không xuất hiện các dao động mới so với mẫu BC nhưng cường độ của các nhóm chức chứa oxy có tăng nhẹ, chứng tỏ sự gia tăng của các nhóm carboxyl và hydroxyl trên bề mặt vật liệu sau xử lý thủy nhiệt.

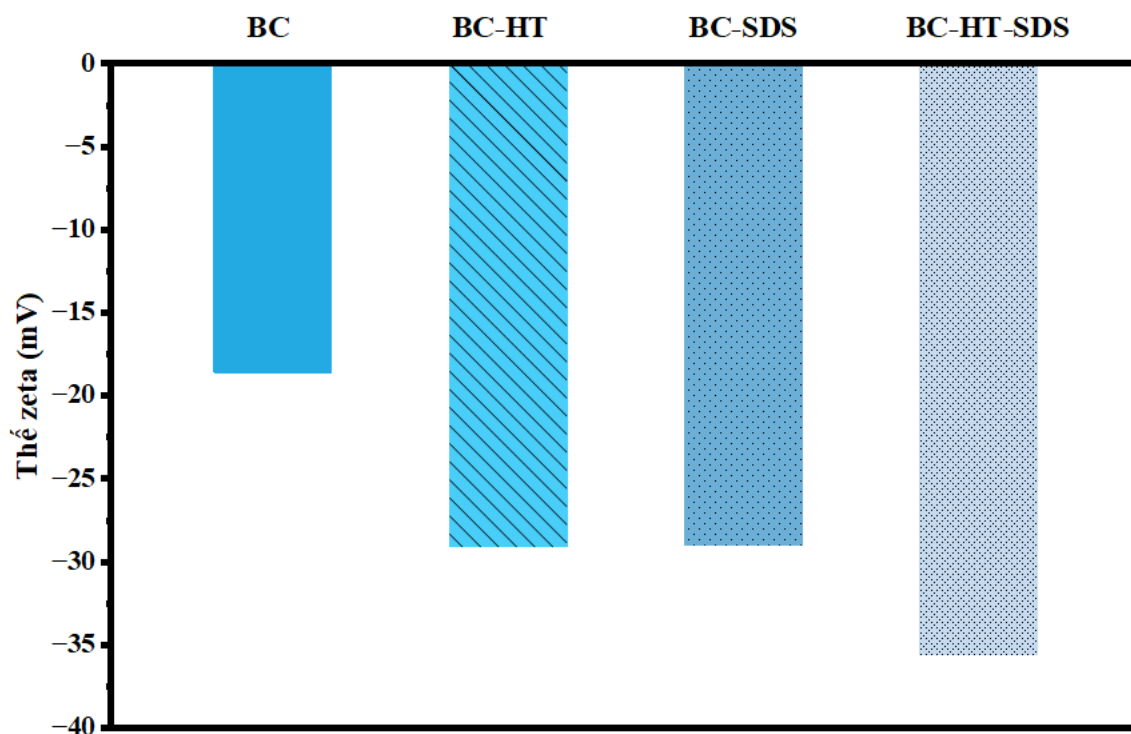
Đối với phổ FTIR của các vật liệu sau khi biến tính với SDS là BC-SDS và BC-HT-SDS, có sự giảm cường độ khá rõ của một số đỉnh hấp thụ tại khoảng 1700 cm^{-1} , 1585 cm^{-1} cũng như các dao động trong khoảng $700\text{-}900\text{ cm}^{-1}$. Điều này có thể do sự tương tác giữa SDS và các nhóm C=O, C=C và hiệu ứng bao phủ bề mặt than sinh học của chất hoạt động bề mặt. Bên cạnh đó, đỉnh hấp thụ ở khoảng 1380 cm^{-1} có sự tăng nhẹ và được quan sát rõ hơn ở các mẫu vật liệu biến tính với SDS, điều này có thể liên quan đến nhóm sulfate ($-\text{SO}_3^-$) của SDS [11]. Sự chuyển dịch nhẹ của dải hấp thụ về khoảng $1250\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ được quan sát thấy ở các mẫu sau khi biến tính với SDS có thể do sự xuất hiện của các nhóm S=O trên bề mặt vật liệu [11].



Hình 5. Phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) của các vật liệu BC, BC-SDS, BC-HT, BC-HT-SDS.

3.1.6. Thế zeta của vật liệu

Khi được phân tán trong dung dịch nước có pH trung tính ($\text{pH} \approx 7$), thế zeta của các vật liệu BC, BC-HT, BC-SDS và BC-HT-SDS lần lượt là -18,6; -29,1; -29,0; -35,6 mV (hình 6). Vật liệu BC và BC-HT có bề mặt tích điện âm có thể là do sự tồn tại của các nhóm chức chứa oxy trên bề mặt như phenol, carboxyl... Trong đó, BC sau thủy nhiệt (BC-HT) có điện tích âm hơn nhờ sự gia tăng số lượng nhóm chức chứa oxy trên bề mặt sau thủy nhiệt. Đồng thời, cũng dễ dàng nhận thấy sau khi biến tính với SDS, bề mặt vật liệu BC-SDS (-29,0 mV) trở nên âm hơn so với vật liệu BC (-18,6 mV); và bề mặt vật liệu BC-HT-SDS (-35,6 mV) cũng trở nên âm hơn so với vật liệu BC-HT (-29,1 mV). Kết quả khẳng định rõ ràng vai trò của SDS đối với sự biến đổi điện tích bề mặt vật liệu. Hơn thế nữa, việc kết hợp 2 bước thủy nhiệt và biến tính với SDS đã tạo nên hiệu ứng hiệp đồng, làm gia tăng đáng kể số lượng tâm hấp phụ mang điện tích âm trên bề mặt vật liệu, giúp cho quá trình hấp phụ phẩm màu MV mang điện tích dương thuận lợi hơn.



Hình 6. Thế zeta của các vật liệu tại pH trung tính.

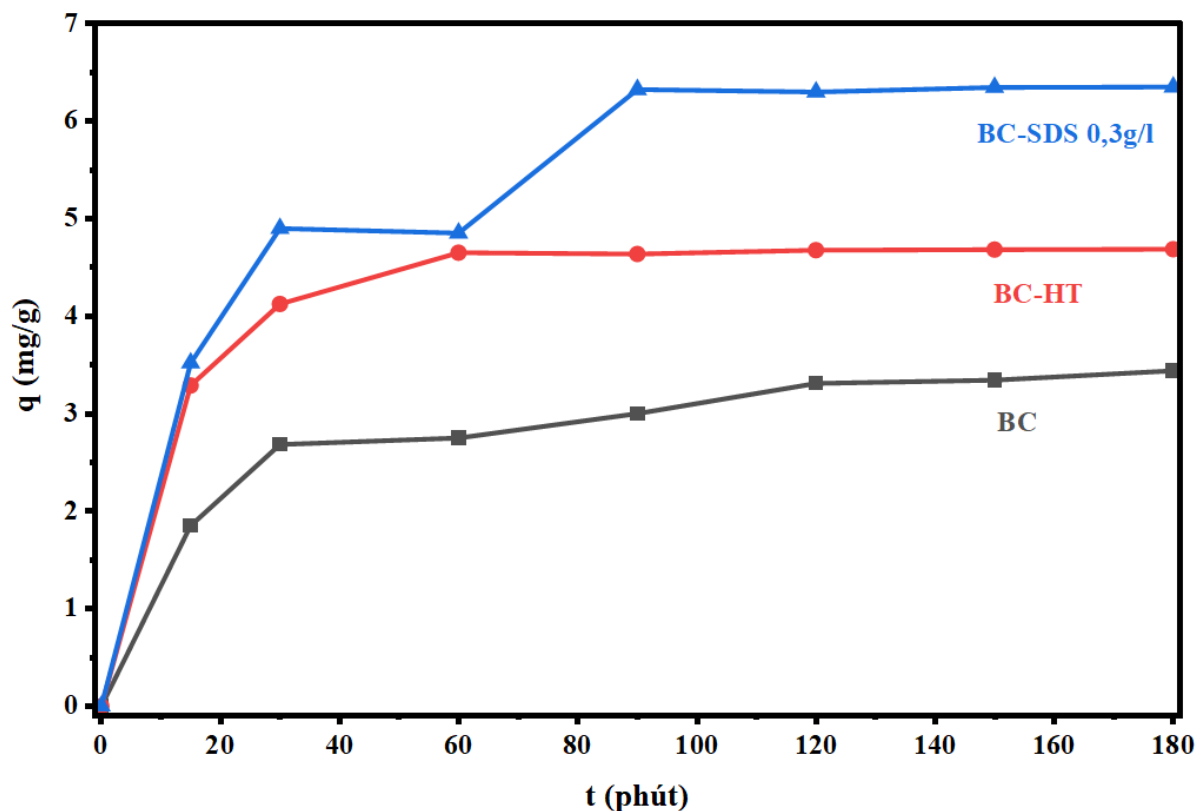
3.2. Khả năng hấp phụ của vật liệu

Kết quả so sánh dung lượng hấp phụ phẩm màu MV theo thời gian của 3 mẫu vật liệu BC, BC-SDS, BC-HT được trình bày trong hình 7. Kết quả cho thấy, dung lượng hấp phụ MV của các vật liệu đều tăng nhanh trong giai đoạn đầu của quá trình hấp phụ, sau đó tốc độ hấp phụ giảm dần và tiến tới trạng thái cân bằng tại 120 phút. Ta có thể thấy dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng tăng theo thứ tự: $BC < BC-HT < BC-SDS$ 0,3 g/l.

Kết quả này cho thấy, quá trình thủy nhiệt đã góp phần tăng dung lượng hấp phụ của vật liệu lên khoảng 1,5 lần. Quá trình thủy nhiệt bằng hơi nước được cho là có thể giúp mở rộng các lỗ mao quản, tăng diện tích bề mặt vật liệu, từ đó làm tăng dung lượng hấp phụ của vật liệu [9, 10]. Điều này phù hợp với kết quả diện tích BET được đưa ra trong bảng 2. Theo đó, các giá trị diện tích bề mặt, diện tích vi mao quản, thể tích mao quản và thể tích vi mao quản của vật liệu BC-HT cao hơn so với vật liệu BC ban đầu (bảng 2).

Đối với vật liệu biến tính bằng tác nhân hóa học là SDS, dung lượng hấp phụ tăng đáng kể. Mẫu BC-SDS 0,3 g/l có dung lượng hấp phụ khi ở trạng thái cân bằng cao gấp hơn 2 lần so với than sinh học chưa biến tính và khoảng 1,5 lần so với vật liệu chỉ xử lý thủy nhiệt. Kết quả cho thấy, SDS đóng vai trò quan trọng trong việc làm thay đổi đặc tính bề mặt của vật liệu, sự xuất hiện các nhóm sulfate mang điện tích âm lên bề mặt vật liệu

giúp tăng cường tương tác tĩnh điện giữa vật liệu với phẩm màu cation MV [5-7]. Điều này cũng phù hợp với các kết quả EDS-mapping, FTIR và thế zeta của các vật liệu BC trước và sau biến tính với SDS được trình bày trong mục 3.1.3, 3.1.5, 3.1.6.



Hình 7. Đồ thị khảo sát thời gian cân bằng hấp phụ của các vật liệu BC, BC-HT và BC-SDS 0,3 g/l.

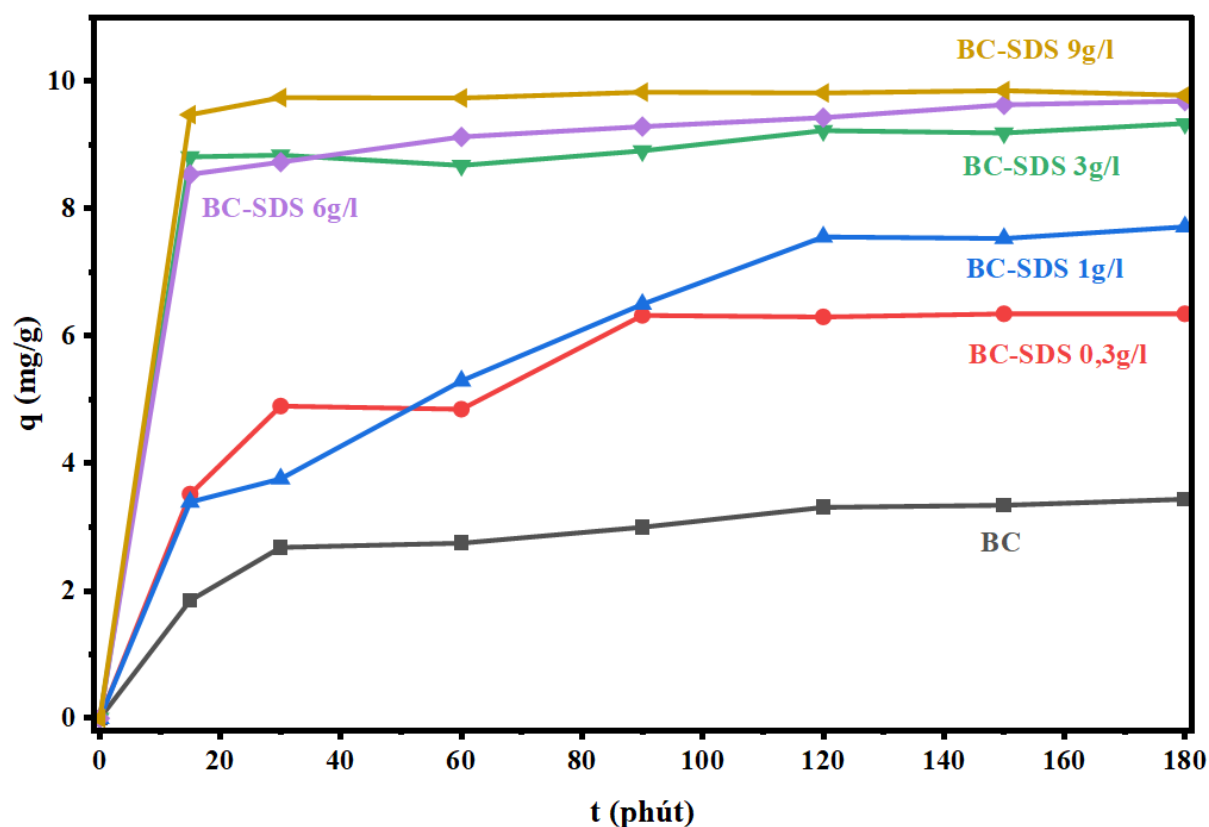
Như vậy, kết quả cho thấy phương pháp biến tính hóa học bằng SDS giúp cải thiện khả năng hấp phụ MV của than sinh học rõ rệt hơn so với phương pháp biến tính vật lý bằng thủy nhiệt. Do đó, ảnh hưởng của nồng độ SDS đến dung lượng hấp phụ của các vật liệu BC và BC-HT sẽ được tập trung nghiên cứu.

3.2.1. Ảnh hưởng của nồng độ SDS biến tính trên vật liệu BC

Kết quả nghiên cứu cho thấy, dung lượng hấp phụ MV của vật liệu BC tăng lên khi tăng nồng độ SDS. Khi nồng độ SDS tăng 0,3-1 g/l, dung lượng hấp phụ MV của vật liệu BC tăng từ từ theo thời gian và chỉ đạt cân bằng sau 120 phút (hình 8). Trong khi đó, khi bắt đầu tăng nồng độ SDS biến tính từ 3 g/l quá trình hấp phụ MV trên các mẫu vật liệu BC biến tính diễn ra rất nhanh ngay trong giai đoạn đầu (15-30 phút) và đạt cân bằng hấp phụ trong khoảng 60-90 phút. Đặc biệt ở các mẫu BC-SDS 3-9 g/l có

dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng cao hơn đáng kể so với các mẫu BC biến tính với SDS trong khoảng nồng độ <3 g/l (hình 8).

Điều này có thể được giải thích là do ở khoảng nồng độ SDS biến tính thấp (<3 g/l) các lỗ mao quản và bề mặt vật liệu BC có thể chưa bị bao phủ hết bởi SDS, nên ngoài quá trình hấp phụ hóa học giữa SDS và phẩm màu MV trên bề mặt, còn có cả quá trình hấp phụ vật lý của MV vào các lỗ mao quản của than sinh học. Khi nồng độ SDS biến tính ≥ 3 g/l, SDS có thể đã bao phủ các lỗ mao quản và bề mặt BC, nên sự tương tác của MV với SDS trên bề mặt vật liệu BC-SDS diễn ra rất nhanh trong khoảng 15-30 phút đầu tiên (hình 8).

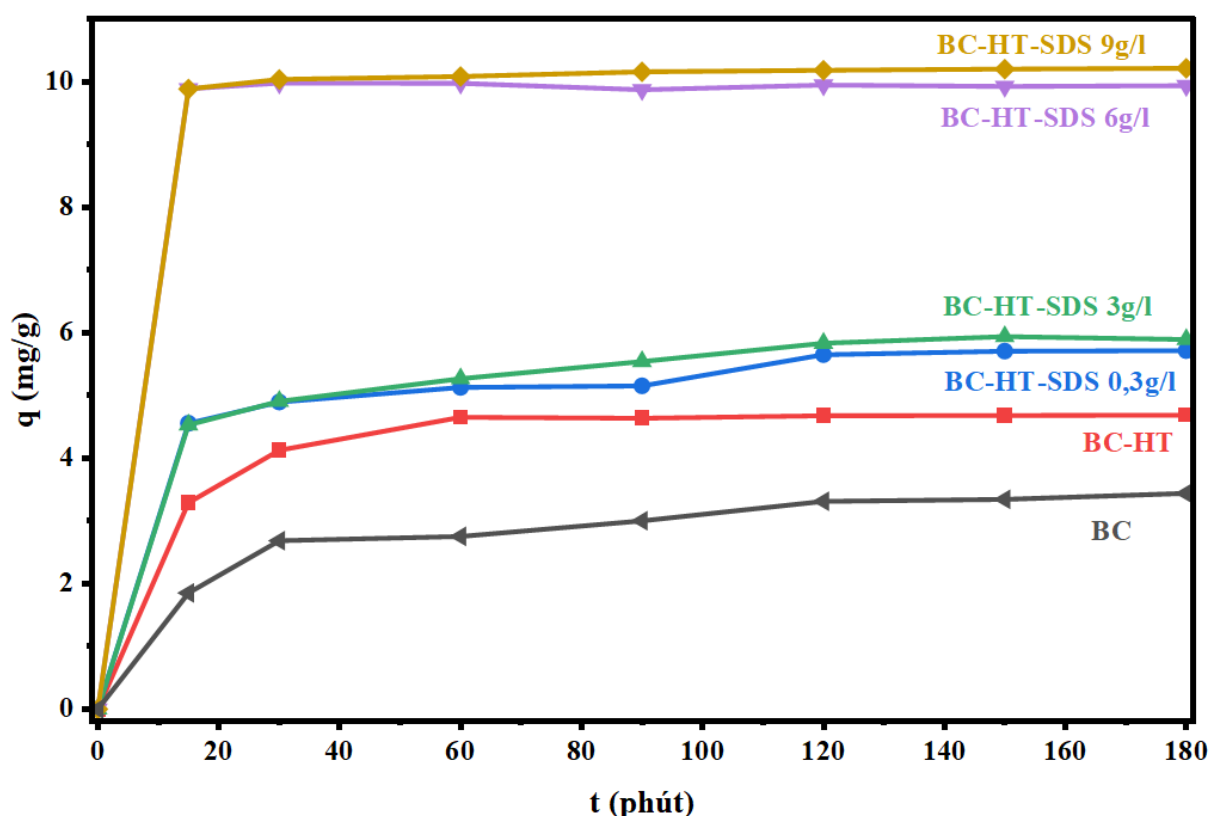


Hình 8. Ảnh hưởng của nồng độ SDS biến tính trên vật liệu BC.

3.2.2. Ảnh hưởng của nồng độ SDS biến tính trên vật liệu BC-HT

Kết quả chỉ ra trong hình 9 cho thấy, khi bắt đầu tăng nồng độ SDS biến tính từ 6-9 g/l quá trình hấp phụ MV trên các mẫu vật liệu BC biến tính diễn ra rất nhanh ngay trong 15 phút đầu tiên và đạt cân bằng hấp phụ được thiết lập nhanh chóng trong khoảng 60-90 phút. Đồng thời, dung lượng hấp phụ MV của các mẫu BC-HT-SDS 6 và 9 g/l

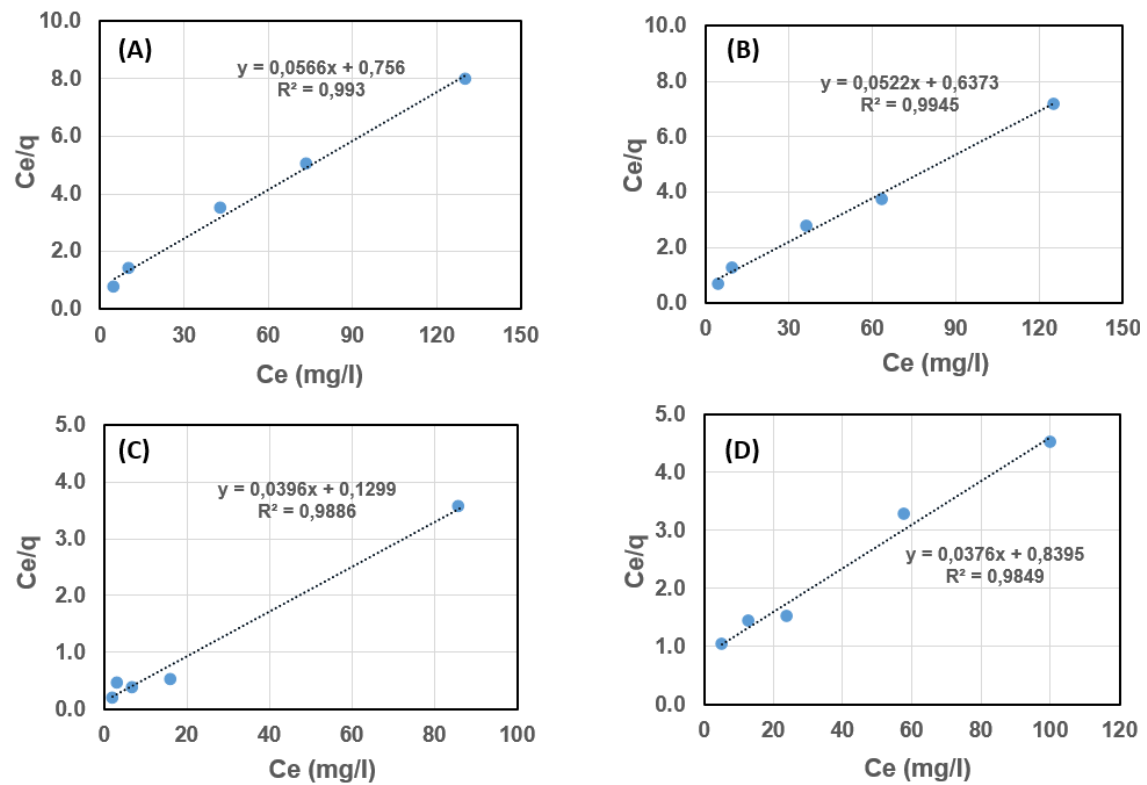
tại thời điểm cân bằng cũng cao hơn đáng kể so với các mẫu BC-HT được biến tính bởi SDS trong khoảng nồng độ ≤ 3 g/l.



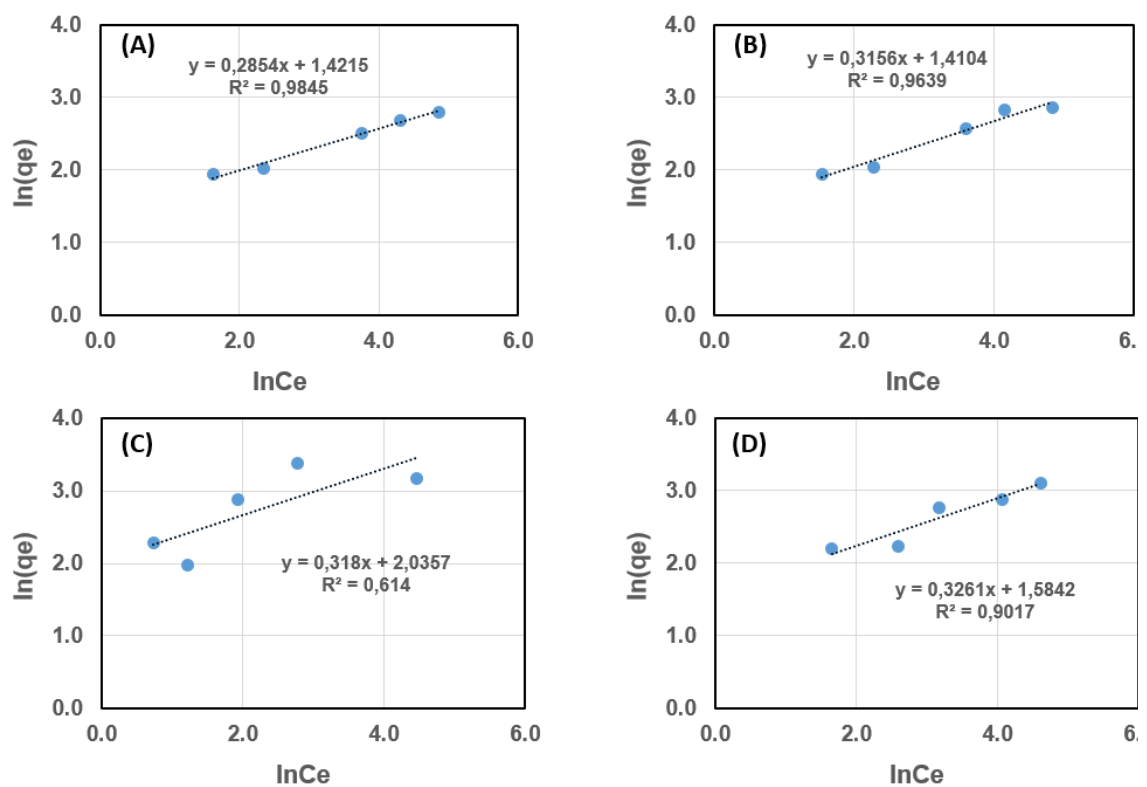
Hình 9. Ảnh hưởng của nồng độ SDS biến tính trên vật liệu BC-HT.

3.3. Các mô hình đẳng nhiệt hấp phụ

Kết quả nghiên cứu các mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir và Freundlich cho thấy, quá trình hấp phụ phẩm màu MV trên các vật liệu BC, BC-HT, BC-SDS 6 g/l và BC-HT-SDS 6 g/l đều được mô tả phù hợp hơn bởi mô hình Langmuir trong khoảng nồng độ khảo sát (hình 10, 11), với hệ số tương quan theo mô hình Langmuir lần lượt là $R^2=0,993$; $0,9945$; $0,9886$ và $0,9849$. Như vậy, có thể coi quá trình hấp phụ trên bề mặt các vật liệu khảo sát là đơn lớp, bề mặt hấp phụ là đồng nhất. Hệ số R_L được xác định từ hằng số Langmuir K_L theo phương trình $R_L = \frac{1}{1+K_L \cdot C_0}$ của các vật liệu đều có giá trị $0,02-0,1$. Các giá trị này đều nằm trong khoảng $0 < R_L < 1$, cho thấy quá trình hấp phụ là thuận lợi.



Hình 10. Mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir của các vật liệu BC (A); BC-HT (B); BC-SDS 6 g/l (C) và BC-HT-SDS 6 g/l (D).



Hình 11. Mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Freundlich của các vật liệu BC (A); BC-HT (B); BC-SDS 6 g/l (C) và BC-HT-SDS 6 g/l (D).

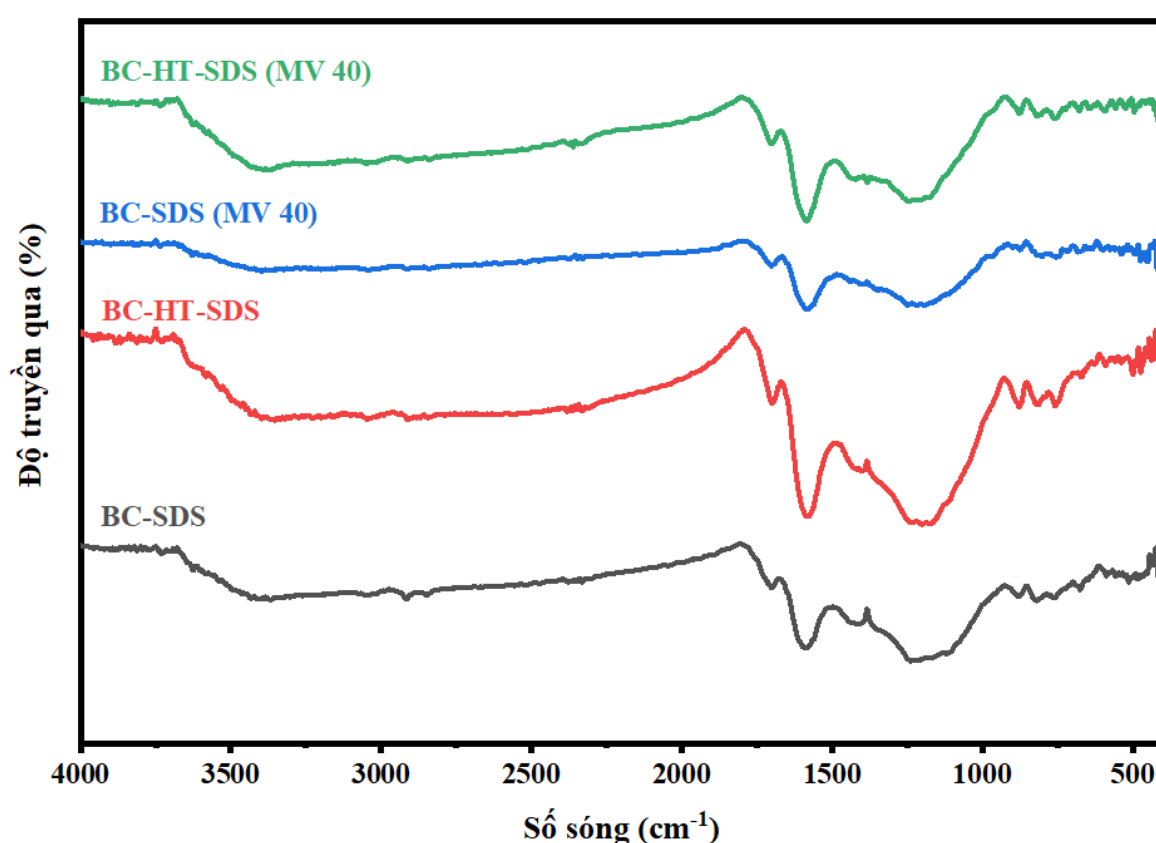
Bảng 3. Các thông số mô hình hấp phụ MV của vật liệu BC, BC-HT, BC-SDS và BC-HT-SDS.

Mô hình hấp phụ	Các thông số	BC	BC-HT	BC-SDS	BC-HT-SDS
Langmuir	K_L (l/mg)	0,0749	0,0819	0,3050	0,0450
	$q_{\max}$ (mg/g)	17,67	19,16	25,25	26,60
	R^2	0,9930	0,9945	0,9886	0,9849
Freundlich	K_F	4,143	4,098	7,658	4,875
	n	3,504	3,169	3,145	3,067
	R^2	0,9845	0,9639	0,614	0,9017

Dung lượng hấp phụ cực đại $q_{\max}$ tính theo mô hình Langmuir của các vật liệu tương ứng là BC (17,67 mg/g) < BC-HT (19,16 mg/g) < BC-SDS (25,25 mg/g) < BC-HT-SDS (26,60 mg/g) (bảng 3). Dung lượng hấp phụ cực đại của các vật liệu trong nghiên cứu này đều cao hơn so với vật liệu than sinh học bã mía không biến tính (10,58 mg/g) và than sinh học bã mía biến tính với SDS nồng độ 0,3 g/l (14,68 mg/g) được báo cáo bởi N.T.T. Nhan và cs (2024) [8]. Trong khi đó, kết quả tương tự được quan sát thấy trong các mẫu than sinh học từ thân cải dầu (30,12 mg/g) và than sinh học từ thân đậu phộng (23,98 mg/g) [12].

Kết quả cho thấy, mặc dù quá trình thủy nhiệt cũng góp phần nâng cao dung lượng hấp phụ, nhưng quá trình biến tính hóa học bề mặt vật liệu bởi chất hoạt động bề mặt dạng anion SDS đóng vai trò quan trọng hơn, giúp cải thiện đáng kể khả năng hấp phụ phẩm màu cation methyl violet. Quá trình thủy nhiệt giúp tăng diện tích bề mặt và diện tích lỗ mao quản của vật liệu (bảng 2). Ngược lại, quá trình biến tính với SDS mặc dù làm giảm diện tích bề mặt và diện tích lỗ mao quản của vật liệu, nhưng với sự xuất hiện của SDS quá trình hấp phụ hóa học của MV trên bề mặt vật liệu sẽ là chủ đạo. Sự tương tác giữa SDS và MV trên bề mặt vật liệu cũng đã được chứng minh khi so sánh phổ FTIR của các mẫu vật liệu trước và sau khi hấp phụ MV (hình 12). Kết quả cho thấy, sự giảm đi đáng kể về cường độ của các dao động tại khoảng 1700, 1585, 1000-1300 và khoảng 700-900 cm^{-1} , chứng tỏ quá trình hấp phụ MV đã diễn ra trên bề mặt

vật liệu có thể liên quan tới tương tác π - π giữa các vòng thơm trong cấu trúc của MV và BC và liên kết hydro với các nhóm chức chứa oxy trên bề mặt BC. Đặc biệt, so với các mẫu BC-SDS và BC-HT-SDS trước khi hấp phụ, đỉnh hấp thụ ở khoảng 1380 cm^{-1} của các mẫu vật liệu sau khi hấp phụ MV gần như biến mất. Điều này có thể liên quan tới sự hình thành tương tác tĩnh điện giữa nhóm sulfate ($-\text{SO}_3^-$) mang điện tích âm của SDS với phẩm màu MV mang điện tích dương [6, 11, 13]. Kết quả này cũng phù hợp với giá trị thế zeta của các vật liệu trước và sau khi biến tính được trình bày trong hình 6.



Hình 12. Phổ FTIR của các vật liệu BC-SDS, BC-HT-SDS, BC-SDS (MV 40 mg/l), BC-HT-SDS (MV 40 mg/l).

Bên cạnh đó, thế zeta của các vật liệu BC-SDS và BC-HT-SDS sau hấp phụ MV tại pH trung tính lần lượt là $-4,31$ và $-7,68\text{ mV}$, cho thấy số tâm hấp phụ tích điện âm đã giảm đi đáng kể trên bề mặt các vật liệu sau hấp phụ. Như vậy, có thể thấy tương tác tĩnh điện giữa các phân tử phẩm màu cation MV và các tâm hấp phụ sulfate ($-\text{SO}_3^-$) mang điện tích âm của SDS là cơ chế hấp phụ chính trên bề mặt vật liệu biến tính với SDS.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, than sinh học từ bã mía đã được nghiên cứu biến tính bằng quá trình thủy nhiệt và chất hoạt động bề mặt SDS. Biến tính than sinh học bởi SDS giúp bổ sung thêm các nhóm sulfate ($-\text{SO}_3^-$) mang điện tích âm trên bề mặt vật liệu. Đồng thời, việc kết hợp quy trình gồm 2 bước thủy nhiệt và biến tính với SDS đã tạo nên hiệu ứng hiệp đồng, làm gia tăng đáng kể số lượng tâm hấp phụ mang điện tích âm trên bề mặt vật liệu, giúp cải thiện hiệu quả xử lý phẩm màu cation MV. Trong đó, nồng độ SDS đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao khả năng hấp phụ của vật liệu. Các vật liệu BC-SDS 6 g/l và BC-HT-SDS 6 g/l cho hiệu quả hấp phụ tốt nhất và thời gian đạt cân bằng hấp phụ ngắn hơn rõ rệt so với các vật liệu còn lại. Quá trình hấp phụ của cả 2 vật liệu đều tuân theo mô hình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir. Dung lượng hấp phụ cực đại của các vật liệu BC-SDS 6 g/l và BC-HT-SDS 6 g/l tính theo mô hình Langmuir lần lượt là 25,25 và 26,60 mg/g, cao hơn gấp khoảng 1,4-1,5 lần so với than sinh học không biến tính.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Ledakowicz, K. Paździor (2021), “Recent achievements in dyes removal focused on advanced oxidation processes integrated with biological methods”, *Molecules*, **26(4)**, DOI: 10.3390/molecules26040870.
- [2] J.N. Wekoye, W.C. Wanyonyi, P.T. Wangila, et al. (2020), “Kinetic and equilibrium studies of Congo red dye adsorption on cabbage waste powder”, *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, **2**, pp.24-31, DOI: 10.1016/j.enceco.2020.01.004.
- [3] M.M. Felista, W.C. Wanyonyi, G. Ongera (2020), “Adsorption of anionic dye (Reactive Black 5) using macadamia seed husks: Kinetics and equilibrium studies”, *Scientific African*, **7**, DOI: 10.1016/j.sciaf.2020.e00283.
- [4] L. Goswami, A. Kushwaha, S.R. Kafle, et al. (2022), “Surface modification of than sinh học for dye removal from wastewater”, *Catalysts*, **12**, DOI: 10.3390/catal12080817.
- [5] A. Oraon, A.K. Prajapati, M. Ram, et al. (2024), “Synthesis, characterization, and application of microporous than sinh học prepared from *Pterospermum acerifolium* plant fruit shell waste for methylene blue dye adsorption:

The role of surface modification by SDS surfactant”, *Biomass Conversion and Biorefinery*, **14**, pp.931-953, DOI: 10.1007/s13399-022-02320-8.

[6] A.K. Anas, S.Y. Pratama, A. Izzah, et al. (2021), “Sodium dodecylbenzene sulfonate-modified than sinh học as an adsorbent for the removal of methylene blue”, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, **16(1)**, pp.188-195, DOI: 10.9767/bcrec.16.1.10323.188-195.

[7] K. Tian, C. Li, H. Liu, et al. (2025), “Functionalization of than sinh học using SDS/SAP nanomicelles enhanced its immobilization capacity for dyes and heavy metals in water”, *Scientific Reports*, **31**, pp.11899-11914, DOI: 10.1038/s41598-025-91229-z.

[8] N.T.T. Nhan, N.T.T. Trang, L.V. Tien, et al. (2024), “Enhancing methyl violet adsorption on sugarcane bagasse-based than sinh học via modification with sodium dodecyl sulfate”, *Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption*, **13(4)**, pp.26-31, DOI: 10.62239/jca.2024.069.

[9] V.T.T. Huyen, V.Q. Huy, P.T. Anh, et al. (2024), “Highly effective and green method to improve the adsorption performance of rice husk than sinh học”, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, **21**, pp.8931-8942, DOI: 10.1007/s13762-024-05554-3.

[10] B. Sajjadi, W.Y. Chen, N.O. Egiebor (2019), “A comprehensive review on physical activation of than sinh học for energy and environmental applications”, *Reviews in Chemical Engineering*, **35(6)**, pp.735-776, DOI: 10.1515/revce-2017-0113.

[11] A.M. Shaker, M. Khedawy, A.A. Moneer, et al. (2025), “Loading of anionic surfactant on eco-friendly than sinh học and its applications in Cr(VI) removal: Adsorption, kinetics, and reusability studies”, *BMC Chemistry*, **19**, DOI: 10.1186/s13065-024-01363-4.

[12] R.K. Xu, A.Z. Zhao, J.H. Yuan, et al. (2011), “Adsorption of methyl violet from aqueous solutions by the than sinh họcs derived from crop residues”, *Bioresource Technology*, **102(22)**, pp.10250-10256, DOI: 10.1016/j.biortech.2011.08.089.

[13] Q. Chai, L. Lu, Y. Lin, et al. (2018), “Effects and mechanisms of anionic and nonionic surfactants on than sinh học removal of chromium”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **25**, pp.18443-18450, DOI: 10.1007/s11356-018-1933-2.

