



DOI:10.22144/ctujos.2023.195

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG HẤP PHỤ XANH METHYLENE CỦA THAN SINH HỌC SẢN XUẤT TỪ CÀNH THANH LONG (*Hylocereus Sp.*)

Đỗ Hải Sâm^{1*}, Trần Tuyết Suong², Nguyễn Trung Hiệp², Trần Anh Khoa¹ và Thái Phương Vũ¹

¹Khoa Môi trường, Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh

²Viện Nghiên cứu phát triển bền vững, Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): dhsam@hcmunre.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 18/04/2023

Sửa bài (Revised): 11/05/2023

Duyệt đăng (Accepted): 24/06/2023

Title: Adsorption of methylene blue onto biochar derived from the dragon fruit branches (*Hylocereus Sp.*)

Author(s): Do Hai Sam*, Tran Tuyet Suong, Nguyen Trung Hiep, Tran Anh Khoa and Thai Phuong Vu

Affiliation(s): Ho Chi Minh University of Natural Resources and Environment

TÓM TẮT

Nghiên cứu trình bày quy trình xử lý cành thanh long (*Hylocereus sp.*) bằng phương pháp nhiệt phân ở 550°C để thu than sinh học (TSH) và ứng dụng xử lý chất màu xanh methylene (MB) trong nước thải. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi thời gian hấp phụ là 90 phút với nồng độ MB 40 mg/L thì hiệu suất hấp phụ có thể đạt > 95% đối với 0.3 g TSH sử dụng trong khoảng pH 8-11. Nghiên cứu xây dựng mô hình đẳng nhiệt cho thấy quá trình hấp phụ MB bằng TSH từ cành thanh long phù hợp với mô hình hấp phụ đơn lớp Langmuir với độ tuyến tính $R^2 = 0.9889$ và dung lượng hấp phụ cực đại là 13.7 mg/g. Khảo sát động học cho thấy mô hình động học biểu kiến bậc 2 là phù hợp để giải thích động học quá trình hấp phụ MB lên TSH. Các kết quả khảo sát này chứng tỏ TSH từ nhiệt phân cành thanh long có thể ứng dụng trong lĩnh vực xử lý nước thải bằng phương pháp hấp phụ nhằm giải quyết vấn đề ô nhiễm từ cành thanh long và MB.

Từ khóa: Cành thanh long, nhiệt phân, than sinh học, xanh methylene, xử lý nước

ABSTRACT

In this study, we utilized the dragon fruit branches (*Hylocereus sp.*) to produce biochar through pyrolysis at 550°C. This biochar was used to remove methylene blue in wastewater. The results showed that at the Methylene blue (MB) concentration of 40 mg/L, with adsorption time is 90 mins, the MB adsorption efficiency reached > 95% for 0.3 g of biochar in pH solution of 8-11. Research on adsorption isotherm model showed that the adsorption process of MB by biochar obtained from pyrolysis of dragon fruit branches is consistent with Langmuir monolayer adsorption model with $R^2 = 0.9889$ and $q_{max} = 13.7\text{mg/g}$. Biosorption kinetic data were properly fitted with the pseudo-second-order kinetic mode. All these results demonstrated that the biochar produced from dragon fruit branches by pyrolysis method, which can be applied in wastewater treatment field as the absorbent, helped to solve the environmental problem caused by both dragon fruit branches and MB.

Keywords: Biochar, dragon fruit branches, methylene blue, pyrolysis, water treatment

1. GIỚI THIỆU

Việt Nam là nước có diện tích và sản lượng thanh long lớn nhất châu Á và cũng là nước xuất khẩu thanh long hàng đầu thế giới (Thường và ctv., 2021; Như và ctv., 2023). Trong quá trình chăm sóc, khi cây đạt độ tuổi từ 4 năm trở lên sẽ xuất hiện những cành, bẹ không hữu dụng và thường được loại bỏ, cắt tỉa liên tục để đảm bảo khả năng đón ánh sáng. Hiện nay, lượng cành thanh long được thải hàng năm ước tính khoảng 12-15 tấn/ha và chưa có hướng xử lý phù hợp nhằm hạn chế ô nhiễm môi trường và tận dụng nguồn phụ phẩm nông nghiệp này (Khôi & Trúc, 2017; Tạp chí điện tử Nông thôn Việt, 2021). Nhiều mô hình xử lý cành thanh long đã được áp dụng tại các hộ trồng thanh long như: ủ phân vi sinh từ rác thanh long nhưng tốn chi phí và bốc mùi hôi thối, mô hình thùng rác sinh học tốn thời gian và khối lượng xử lý theo mẻ không nhiều...

Do thanh long thuộc họ xương rồng nên dựa vào các nghiên cứu xử lý cây xương rồng thể giới (Hadjittofi et al., 2014; Yu et al., 2018; Amari et al., 2019) cho thấy cành thanh long có nhiều tiềm năng ứng dụng trong việc sản xuất than sinh học (TSH) nhằm xử lý các chất ô nhiễm trong nước thải. Vì vậy, mục tiêu của nghiên cứu này là tạo ra TSH từ phụ phẩm cành thanh long bằng phương pháp nhiệt phân và chất thải dệt nhuộm xanh methylene (MB) được chọn làm yếu tố đánh giá hiệu quả hấp phụ của TSH tạo thành.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nguyên liệu và hóa chất

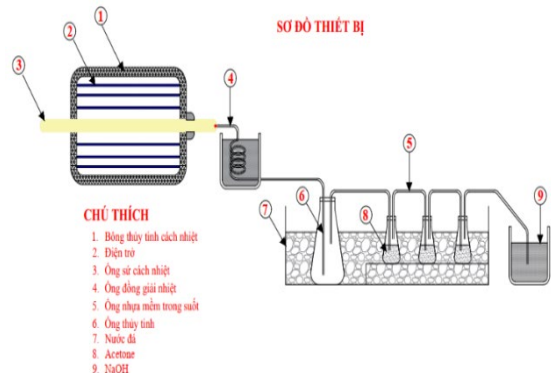
Cành thanh long thu được tại xã Thạnh Hòa, huyện Bến Lức, tỉnh Long An được tận dụng để chế tạo TSH. Dung dịch MB gốc được mua từ nhà sản xuất hóa chất Xilong Scientific, Quảng Đông, Trung Quốc.

2.2. Thí nghiệm

2.2.1. Quá trình nhiệt phân cành thanh long

Trước khi tiến hành nhiệt phân, mẫu cành thanh long tươi được sấy khô ở nhiệt độ 60°C để giảm độ ẩm của mẫu xuống 10%. Hình 1 trình bày sơ đồ than hóa cành thanh long trong thiết bị phản ứng tầng cố định nằm ngang, thiết bị bao gồm ống phản ứng chế tạo từ vật liệu ceramic có chiều dài 750 mm và đường kính 50x5 mm đặt trong lò gia nhiệt có điều khiển nhiệt độ. Mẫu cành thanh long có tiết diện ngang thích hợp (theo đường kính ống phản ứng) sau khi sấy khô được cắt ngắn thành đoạn dài 200 mm đặt vào giữa ống phản ứng để tiến hành than hóa. Quá trình được thực hiện theo từng mẻ ở nhiệt

độ 450 - 650°C trong môi trường khí N₂, thời gian nhiệt phân hoàn toàn cho mỗi mẻ là 40 phút.



Hình 1. Sơ đồ thiết bị quy trình than hóa

Sản phẩm TSH được nghiền và rây đến kích thước nhỏ hơn 0,9 mm sau đó tiến hành phân tích tính chất hóa học và đánh giá hiệu quả trong việc xử lý MB trong nước. Cụ thể quy trình thí nghiệm nhiệt phân cành thanh long dựa trên các nghiên cứu nhiệt phân xương rồng thu than hoạt tính (Hadjittofi et al., 2014; Amari et al., 2019).

2.2.2. Thực nghiệm khảo sát khả năng hấp phụ MB của than sinh học

Các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng hấp phụ MB của các TSH được sản xuất từ cành thanh long: pH, thời gian, khối lượng TSH và nồng độ dung dịch ban đầu được khảo sát. Các thí nghiệm hấp phụ thực hiện trên máy lắc (Jeio Tech, model OS-2000, Hàn Quốc) với tốc độ lắc là 150 vòng/phút ở nhiệt độ phòng.

Phân tích định lượng MB sau hấp phụ được thực hiện như sau: ly tâm loại bỏ chất hấp phụ, dung dịch MB sau hấp phụ được tiến hành pha loãng đến nồng độ phù hợp, rồi đo cường độ hấp phụ bằng phương pháp so màu tại bước sóng 665 nm sử dụng máy UV-Vis (Thermo Scientific, model Evolution 350, USA) và dựa vào đường chuẩn để suy ra nồng độ MB. Mỗi thí nghiệm khảo sát khả năng hấp phụ của TSH lặp lại 3 lần, lấy kết quả trung bình để đánh giá.

Hiệu quả hấp phụ MB được đánh giá thông qua dung lượng hấp phụ cân bằng q_e (mg/g) được tính toán bằng cân bằng chuyển khối:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{W} \quad (1)$$

Trong đó, C_0 và C_e (mg/L) là nồng độ MB đầu vào và đầu ra, V (L) là thể tích dung dịch hấp phụ và W (mg) là khối lượng than hấp phụ.

Động học của quá trình hấp phụ được nghiên cứu theo hai mô hình động học biểu kiến: mô hình biểu kiến bậc 1 (phương trình 2) và mô hình biểu kiến bậc 2 (phương trình 3).

Mô hình động học bậc 1:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

Mô hình động học bậc 2:

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

Trong đó, q_e là dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng (mg/g); q_t là dung lượng hấp phụ tại thời điểm t (mg/g); k_1 là hằng số tốc độ hấp phụ biểu kiến bậc nhất (ph^{-1}); k_2 là hằng số tốc độ hấp phụ biểu kiến bậc hai ($\text{g}/\text{mg}.\text{ph}$).

2.2.3. *Xác định tính chất của nguyên liệu và biochar*

Đặc tính hóa lý của TSH thu được từ nhiệt phân cành thanh long được đánh giá thông qua xác định diện tích bề mặt riêng BET (Brunauer–Emmett–Teller) trên thiết bị ASAP-200 và chụp ảnh bề mặt SEM (Scanning Electron Microscope) trên thiết bị Thermo Scientific, model Prisma E SEM, USA. Phổ hồng ngoại FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy) trên thiết bị Thermo Scientific (model Nicolet iS5, USA) được dùng để xác nhận các nhóm liên kết trên TSH trong vùng bước sóng 400 cm^{-1} đến 4000 cm^{-1} .

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. **Tính chất của TSH được sản xuất bằng phương pháp nhiệt phân cành thanh long**

Kết quả phân tích gần đúng ở Bảng 1 cho thấy cành thanh long có độ ẩm khoảng 23,03% chất bốc 54,14% và độ tro là 9,09%. Hàm lượng chất bốc trong nguyên liệu càng cao thì càng dễ cháy và than tạo thành càng xốp, đảm bảo cho mục đích nghiên cứu ứng dụng hấp phụ trong dung dịch nước thải (Yu et al., 2018; Ilham, 2018; Juli et al., 2021).

TSH thu được khi nhiệt phân ở nhiệt độ 450 – 650°C được tiến hành xác định thành phần và diện tích bề mặt riêng. Bảng 1 cho thấy khi nhiệt độ nhiệt phân tăng, hàm lượng chất bốc giảm, hàm lượng tro và cacbon cố định tăng, trong khi đó độ ẩm thay đổi không đáng kể. Tuy nhiên, có thể thấy rằng trong khoảng nhiệt độ 550 – 650°C, thành phần than có sự biến đổi nhỏ dưới 3,5%. Điều này có thể giải thích vì ở ngưỡng nhiệt độ 550°C thì các hợp chất hữu cơ và các nguyên tố khó bay hơi đã gần đạt ngưỡng bay hơi nên không tạo ra nhiều sự thay đổi trong thành phần TSH (Thảo và ctv., 2021). Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng TSH có hàm lượng cacbon cố định và chất bốc càng cao, hàm lượng tro càng thấp thì khả năng hấp phụ càng tốt (Yu et al., 2018; Juli et al., 2021). Kết hợp với sự tăng diện tích bề mặt riêng của TSH khi tăng nhiệt độ nhiệt phân, có thể dự đoán rằng các TSH thu được ở nhiệt độ nhiệt phân từ 550°C có khả năng hấp phụ chất thải trong dung dịch tốt hơn.

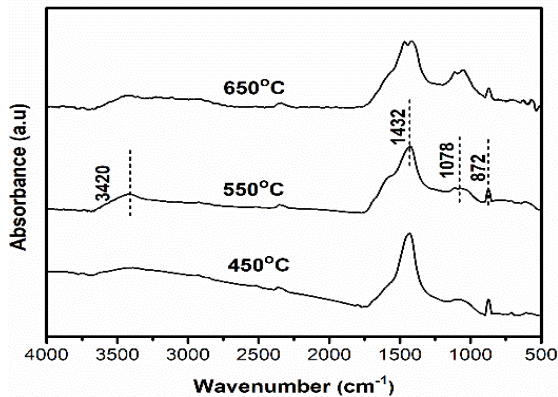
Bảng 1. Thành phần than sinh học ở các điều kiện nhiệt phân khác nhau

Nhiệt độ nhiệt phân	Phân tích gần đúng (%) (TCVN 9813:2013)				Diện tích bề mặt riêng (m^2/g)
	Độ ẩm	Độ tro	Chất bốc	Cacbon cố định	
Cành thanh long khô	23,03	9,09	54,14	13,74	---
450°C	0,56	16,63	21,28	61,53	257,12
550°C	0,35	17,78	10,51	71,36	371,83
650°C	0,33	17,21	8,62	73,84	386,04

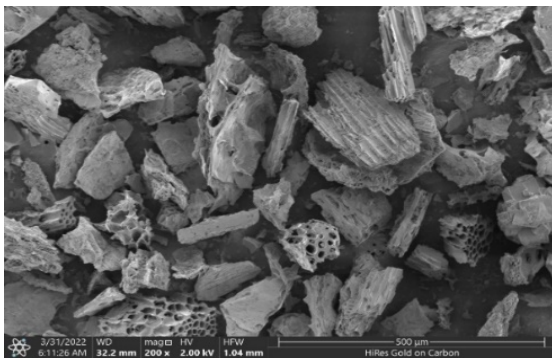
Kết quả phân tích phổ hồng ngoại FTIR ở Hình 2 cho thấy trên bề mặt mẫu TSH thu được khi nhiệt phân ở 550°C tồn tại các liên kết O-H (tần số 3420 cm^{-1}), liên kết C-H trong nhóm methyl (tần số 1432 cm^{-1}), liên kết C-OH (tần số 1078 cm^{-1}) và liên kết uốn C-H (tần số 872 cm^{-1}). Phổ FTIR của các mẫu TSH nhiệt phân ở 450°C và 650°C tương tự với mẫu nhiệt phân ở 550°C. Tuy nhiên, nhiệt độ nhiệt phân khác nhau thì sự phân bố các nhóm chức của TSH từ cành thanh long cũng khác nhau, cụ thể: cường độ peak 3420 cm^{-1} do nhóm O-H kéo dài đặc trưng cho nước ở trong bề mặt vật liệu hoặc khoáng chất

khác giảm dần khi nhiệt độ tăng từ 450°C đến 650°C. Điều này có thể là do nguyên tử hydro và oxy trong liên kết hydroxyl bị đứt gãy (Thảo và ctv., 2021).

Bên cạnh đó, kết quả phân tích SEM của TSH được nhiệt phân ở nhiệt độ 550°C thể hiện ở Hình 3 chứng tỏ TSH thu được từ nhiệt phân cành thanh long có dạng lỗ rỗng, xốp, chứa nhiều vi lỗ kích thước từ 2,1 đến 16,7 μm . Điều này tạo nhiều thuận lợi cho quá trình hấp phụ, giúp TSH có thể giữ được nhiều nhất chất ô nhiễm trong các lỗ rỗng (Mai & Tuyên, 2016).



Hình 2. FTIR của than được nhiệt phân ở nhiệt độ 550°C



Hình 3. Hình ảnh hiển vi SEM của than được nhiệt phân ở nhiệt độ 550°C

3.2. Khả năng hấp phụ MB của TSH

3.2.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ nhiệt phân cành thanh long

Bảng 2 cho thấy dung lượng hấp phụ tăng khi nhiệt độ nhiệt phân cành thanh long tăng từ 450 đến 650°C. Tuy nhiên, khả năng hấp phụ tăng nhanh trong khoảng nhiệt độ 450-550°C, và tăng không đáng kể ở nhiệt độ cao hơn 550°C, hiệu suất hấp phụ đạt khoảng 94%. Điều này có thể giải thích dựa trên sự khác nhau của thành phần than ở Bảng 1, khi hàm lượng cacbon cố định càng cao thì khả năng hấp phụ MB càng cao (Yu et al., 2018). Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ nhiệt phân đến tính chất hóa lý của TSH từ trấu (Thảo và ctv., 2021) chỉ ra rằng khi nhiệt độ nhiệt phân tăng thì các hợp chất hữu cơ và các nguyên tố khó bay hơi càng đạt ngưỡng bay hơi dẫn đến tạo ra nhiều không gian lỗ rỗng giúp tăng cường khả năng giữ các chất thải.

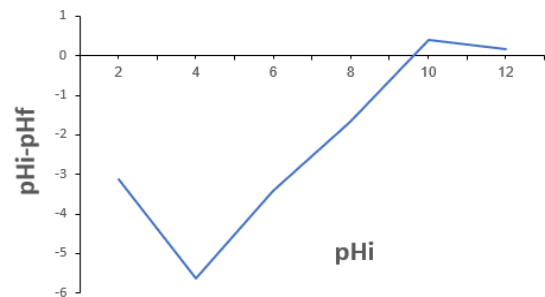
Bảng 2. Ảnh hưởng của nhiệt độ nhiệt phân đến khả năng hấp phụ MB

Nhiệt độ nhiệt phân	Co (mg/L)	Ce (mg/L)	qe (mg/g)	Hiệu suất H (%)
450 °C	20	2,17	1,783	89,15
550 °C	20	1,16	1,884	94,20
650 °C	20	1,11	1,889	94,45

Kết quả ở Bảng 1 và Bảng 2 cho thấy, nhiệt độ nhiệt phân được chọn ở 550°C để tiến hành nhiệt phân phụ phẩm cành thanh long ứng dụng vào xử lý MB trong nước thải do ở nhiệt độ này các chất bay hơi gần đạt ngưỡng bay hơi, việc tăng nhiệt độ nhiệt phân không tạo ra nhiều sự khác biệt trong thành phần than cũng như hiệu quả xử lý MB trong nước.

3.2.2. Ảnh hưởng của nồng độ MB, khối lượng TSH, thời gian hấp phụ, pH dung dịch

Không có điều kiện hấp phụ cố định tại đó khả năng hấp phụ tối đa đạt được, điều này liên quan đến bản chất của vật liệu hấp phụ và chất hấp phụ. Sự khác biệt về xu hướng TSH đối với cùng một khoảng pH có thể là do sự khác biệt về tương tác giữa các ion của chúng trong dung dịch. Đặc biệt, đối với quá trình hấp phụ, pH đẳng điện - pHPzc (pH point of zero charge) là một giá trị đóng vai trò quan trọng trong quá trình hấp phụ các loại ion từ dung dịch lên bề mặt chất rắn. Hình 4 cho thấy TSH tạo thành từ nhiệt phân cành thanh long ở 550°C có giá trị pH đẳng điện khoảng 9,6, thể hiện tính kiềm cao.

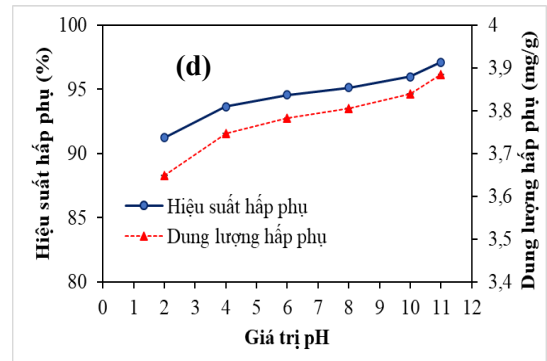
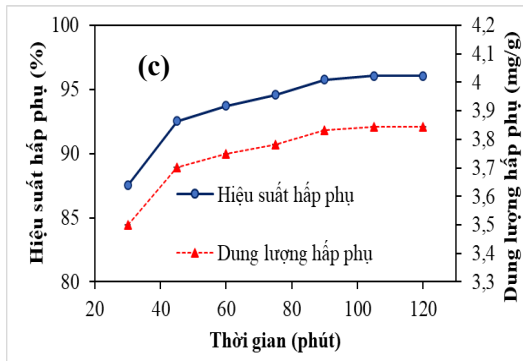
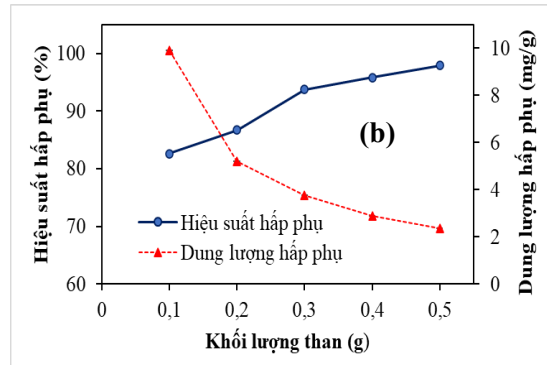
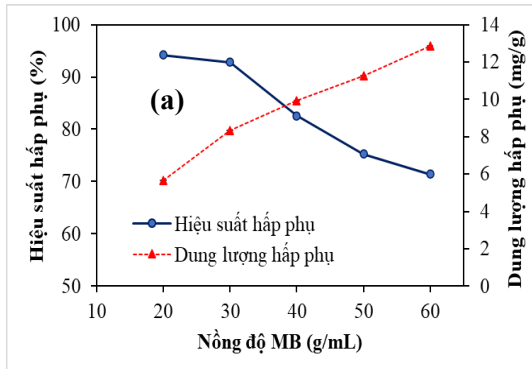


Hình 4. pH đẳng điện của TSH được nhiệt phân ở nhiệt độ 550°C

Hình 5 thể hiện ảnh hưởng của nồng độ MB ban đầu, khối lượng TSH, thời gian hấp phụ, pH dung dịch đến khả năng hấp phụ MB của TSH tạo thành từ nhiệt phân cành thanh long ở 550°C trong 40 phút. Hình 5a có thể thấy rằng khi tăng nồng độ MB từ 20-60 mg/L thì hiệu suất hấp phụ giảm từ 94% xuống 71%, trong khi đó dung lượng hấp phụ có tăng từ 5,7 mg/g đến 12,9 mg/g. Nồng độ MB ban đầu 40 mg/L được chọn để tiến hành những nghiên cứu tiếp theo, do ở nồng độ này có hiệu suất hấp phụ

MB và dung lượng hấp phụ tương đối cao khoảng trên 83% và 10 mg/g. Ngược lại với tăng nồng độ, Hình 5b cho thấy khi tăng khối lượng TSH từ 0,1-0,5g thì hiệu suất hấp phụ tăng và dung lượng hấp phụ giảm, sau khối lượng 0,3 g hiệu suất hấp phụ gần như thay đổi không đáng kể. Nhìn chung, ở khối lượng này vị trí hoạt động của vật liệu hấp thụ đã bị chất hấp phụ chiếm giữ và dung dịch đạt đến trạng thái cân bằng giữa MB và vật liệu hấp thụ sử dụng, việc tăng khối lượng TSH không làm thay đổi đáng kể hiệu suất hấp phụ (Hadjitofi et al., 2014).

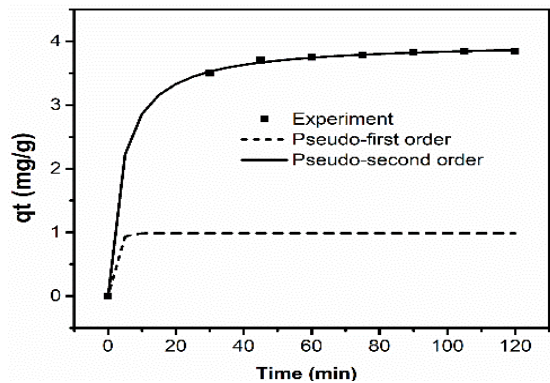
Hình 5c và Hình 5d cho thấy khi thời gian hấp phụ và pH dung dịch tăng, thì hiệu suất hấp phụ và dung lượng hấp phụ MB cũng tăng theo. Tuy nhiên, sau thời gian 90 phút thì hiệu suất hấp phụ tăng chậm do độ hấp phụ đã gần đạt ổn định. Vì vậy, chọn mốc thời gian 90 phút để tiến hành nghiên cứu các thí nghiệm tiếp theo và khoảng pH tối ưu cho quá trình hấp phụ MB của TSH thu được từ nhiệt phân cành thanh long là 8-11.



Hình 5. Ảnh hưởng của nồng độ MB ban đầu, khối lượng TSH, thời gian hấp phụ, pH dung dịch đến quá trình hấp phụ MB trong nước

3.2.3. Mô hình động học quá trình hấp phụ MB

Động học quá trình hấp phụ được đánh giá thông qua 2 mô hình động học biểu kiến là bậc nhất và bậc hai dựa vào kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian hấp phụ từ 15 đến 120 phút tới dung lượng hấp phụ MB ở các điều kiện hấp phụ: 40 mg/L MB, 0,3 g TSH và pH 7.



Hình 6. Mô tả số liệu thực nghiệm bằng phương trình động học hấp phụ giả bậc 1 và giả bậc 2

Kết quả tính toán các thông số động học trong mô hình ở Hình 6 cho thấy giá trị dung lượng hấp phụ cân bằng tính theo phương trình động học (q_t , cal) và giá trị dung lượng hấp phụ cân bằng tính từ nồng độ đầu và nồng độ cân bằng (q_t , exp) của mô hình động học bậc hai là tương đương nhau, trong khi kết quả này đối với mô hình động học bậc nhất lại khác nhau rất lớn. Từ đó có thể cho rằng quá trình hấp phụ MB bằng TSH sản xuất từ cành thanh long có thể mô tả theo phương trình động học hấp phụ giả

bậc hai với hệ số tin cậy $R^2 = 0,9998$. Điều này chứng tỏ, tốc độ hấp phụ thuộc nhuộm MB có thể được kiểm soát phần lớn bởi một quá trình hấp phụ hóa học, kết hợp với với các đặc tính hóa học của than và MB. Kết quả này cũng tương đồng với kết quả của các công trình nghiên cứu sự hấp phụ MB lên các vật liệu khác nhau như than từ xương rồng - *Opuntia ficus indica* (Barka, 2013; Sakr et al., 2015), than từ cây diên điển (Hiep, 2022).

Bảng 3. Các thông số động học trong phương trình Langmuir và Freundlich

Vật liệu hấp phụ	Mô hình Langmuir		Mô hình Freundlich			
	q_{max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	n	K_F (L ^{1/n} /g)	R^2
	13,70	0,531	0,9889	3,74	5,966	0,9318

Đẳng nhiệt của quá trình hấp phụ MB cũng được đánh giá qua hai mô hình hấp phụ phổ biến là mô hình đẳng nhiệt Langmuir và đẳng nhiệt Freundlich. Bảng 3 cho thấy quá trình hấp phụ TSH của MB phù hợp với phương trình đẳng nhiệt Langmuir (hấp phụ đơn lớp) khi mức độ tuyến tính đạt giá trị $R^2 = 0,9889$ và dung lượng hấp phụ cực đại đạt 13,7 mg/g. Trong khi đó, mức độ tuyến tính theo mô hình Freundlich có giá trị $R^2 = 0,9318$ thấp hơn. Như vậy, mô hình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir là mô hình thuận lợi để mô tả quá trình hấp phụ MB trên vật liệu hấp phụ là cành thanh long (Hamdaoui & Naffrechoux, 2007; Barka, 2013; Sakr et al., 2015).

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu tổng hợp thành công vật liệu TSH có khả năng hấp phụ cao với xanh methylene trong

nước bằng phương pháp nhiệt phân phụ phẩm nông nghiệp cành thanh long với các điều kiện tối ưu cho quá trình hấp phụ MB trong dung dịch nước thải. Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, TSH tạo thành phù hợp với mô hình hấp phụ đơn lớp Langmuir, quá trình hấp phụ diễn ra tốt khi pH dung dịch trong khoảng 8-11 với nồng độ MB khảo sát 40 mg/L, khối lượng 0,3 g và thời gian hấp phụ 90 phút. Hiệu suất và dung lượng hấp phụ MB đạt được là > 95% và > 3,8 mg/g. Nghiên cứu sản xuất TSH từ cành thanh long ứng dụng xử lý MB trong nước thải góp phần cung cấp phương pháp mới và hiệu quả trong xử lý phụ phẩm cành thanh long, thay thế những phương pháp xử lý rác thải truyền thống theo thói quen như phương pháp đốt truyền thống,... Đồng thời, những hướng xử lý hiệu quả MB trong nước thải dệt nhuộm bằng vật liệu rẻ tiền, phổ biến tại Việt Nam cũng được gợi ý trong nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Amari, A., Alalwan, B., Eldirderi, M. M., Mnif, W., & Rebah, B. F. (2019). Cactus material-based adsorbents for the removal of heavy metals and dyes: a review. *Materials Research Express*, 7, 012002-0120015. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5f32>

Barka, N., Ouzaouit, K., Abdennouri, M., & Makhfouk, M. E. (2013). Dried prickly pear cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes as a low-cost and eco-friendly biosorbent for dyes removal from aqueous solutions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2012.09.007>

Hadjittofi, L., Prodromou, M., & Pashalidis, I. (2014). Activated biochar derived from cactus fibres – Preparation, characterization and application on Cu(II) removal from aqueous solutions. *Bioresource Technology*, 159, 460-464. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.073>

Hamdaoui, O., & Naffrechoux, E. (2007). Modeling of adsorption isotherms of phenol and chlorophenols onto granular activated carbon: Part II. Models with more than two parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 147, 401-411. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.023>

Hiep, N. T., Thu, T. T. H., Quyen, L. T. T., Dong, P. D. D., Suong, T. T., & Vu, T. P. (2022). Biochar Derived from Sesbania Sesban Plant as a Potential Low-Cost Adsorbent for Removal of Methylene Blue. *Environment and Natural Resources Journal*, 20(6), 611-620. <https://doi.org/10.32526/enmrj/20/202200119>

Ilham, Z. (2018). Chapter 3 - Biomass classification and characterization for conversion to biofuels, in: S. Yusup, N.A. Rashidi (Eds.) Value-Chain of Biofuels, *Elsevier*, 69-87. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824388-6.00014-2>

- Juli, N. B., Talib, N., Yusoff Abas, S. R. M., Ahmad, N., & Alias A. B. (2021). Characterization of Hydrogel and Fly Ash from Biomass Egyptian, *Journal of Chemistry*, 64, 2819-2825.
- Khôi, L. Q., & Trúc, N. T. N (2017). Nghiên cứu xử lý cành thanh long thải bỏ bằng các chủng vi sinh vật có ích, kết hợp với phân chuồng để sản xuất phân hữu cơ sinh học, *đề tài NCKH thuộc Trung Tâm Kỹ thuật và Công nghệ sinh học*.
- Mai, V. T., & Tuyên, T. V. (2016). Nghiên cứu khả năng xử lý amoni trong môi trường nước của than sinh học từ lõi ngô biến tính bằng H₃PO₄ và NaOH, *Tạp chí Khoa học: Các Khoa học Trái đất và Môi trường*, 32, 274-281.
- Như, T. T. N., Mai, P. N., Cương, T. T, Huyền, D. T. T, Vy, N. D. T, Huệ, V. T. T, & Phong, N. V. (2023). Khả năng ức chế nấm *Neoscytalidium dimidiatum* gây bệnh đốm nâu thanh long của vi khuẩn *Pseudomonas* sp. *Tạp chí khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 59(1B), 132-139. <https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2023.015>
- Sakr, F., Alahiane, S., Sennaoui, A., Dinne, M., Bakas, I., & Assabbane, A. (2019). Removal of cationic dye (Methylene Blue) from aqueous solution by adsorption on two type of biomaterial of South Morocco. *Materials Today: Proceedings*, 22(1), 93-96. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.101>
- Tạp chí điện tử Nông thôn Việt. (2021). *Tận dụng cành thanh long già cỗi ủ phân hữu cơ sinh học*. <https://nongthonviet.com.vn/tan-dung-canh-thanh-long-gia-coi-u-phan-huu-co-sinh-hoc.ngn>
- Thảo, V. M. T., Khánh, N. M., Nguyễn, N. T. N., Anh, T. T., Niệm, P. T. A., Đức, N. T., Phi, N. N., Tuyên, N. T. B, Ngân, D. N., & Tường, T. N. Q. (2021). Ảnh hưởng của nhiệt độ nhiệt phân đến tính chất hóa lý của than sinh học từ trấu. *Tạp chí Khoa học-Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh*, 16(1), 121-135. <https://doi.org/10.46223/HCMCOUJS.tech.vi.16.1.898.2021>
- Thường, V. K, Bình, L. D., & Chi, V. T. D. (2021). Phát triển tài sản thương hiệu thanh long Bình Thuận. *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Phát triển Kinh tế Trường Đại học Tây Đô*, 12, 19-38.
- Yu, K. L., Show, P. L., Ong, H. C., Ling, T. C., Chen, W. H., & Salleh, M. A. M. (2018). Biochar production from microalgae cultivation through pyrolysis as a sustainable carbon sequestration and biorefinery approach, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 2047-2055. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1521-7>