

Nghiên cứu than sinh học từ thực vật xâm hại để xử lý thuốc nhuộm trong môi trường nước

Using biochar derived from invasive plant for treatment of dye in aqueous solution

Nguyễn Thị Thanh Huyền^{a,b*}, Nguyễn Thanh Hoàng^{a,b}, Nguyễn Xuân Cường^{a,b*}
Thị Thanh Huyền Nguyễn^{a,b*}, Thanh Hoang Nguyen^{a,b}, Xuan Cuong Nguyen^{a,b*}

^a*Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^b*Khoa Môi trường và Công nghệ Hóa, Trường Đại học Duy Tân, Việt Nam*

^a*Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam*

^b*Faculty of Environmental Chemical Engineering, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam*

(Ngày nhận bài: 14/5/2020, ngày phản biện xong: 20/5/2020, ngày chấp nhận đăng: 20/8/2020)

Tóm tắt

Than sinh học (biochar/ BC) từ cây mai dương (*Mimosa pigra*) được nghiên cứu loại bỏ thuốc nhuộm Crystal violet (CV) trong môi trường nước. Các đặc trưng của BC được xác định bằng phương pháp quang phổ hồng ngoại, kính hiển vi điện tử quét và diện tích bề mặt riêng. Hiệu quả hấp phụ CV của BC đạt giá trị cao nhất tại liều lượng 15 g/L và không thay đổi nhiều trong khoảng pH từ 4 đến 10. Thí nghiệm ảnh hưởng của thời gian cho thấy, hiệu quả loại bỏ CV tăng nhanh trong 30 phút đầu tiên, đặc biệt chỉ sau 5 phút phản ứng, hiệu suất hấp phụ CV đã đạt trên 70%. Thời gian đạt trạng thái cân bằng với nồng độ CV 50 mg/L và liều lượng BC 15 g/L là 360 phút. Dung lượng hấp phụ CV tối đa của BC theo mô hình đẳng nhiệt Langmuir đạt 30.27 mg/g.

Từ khóa: than sinh học; cây mai dương; Crystal violet; hấp phụ.

Abstract

The biochar (BC) from invasive plant *Mimosa pigra* was studied to remove Crystal/Gentian violet (CV) dye from aqueous solution. The properties of BC were determined using Fourier-transform infrared spectroscopy, scanning electron microscope and Brunauer–Emmett–Teller method. The optimal dose for removing CV by BC was 15 g/L and the optimal pH ranged from 4 to 10. The CV adsorption increased significantly in the first 30 min, especially after first 5 min the removal efficiency reached over 70%. With the CV concentration of 50 mg/L and dosage of 15 g/L, the adsorption reaction for CV removal established the equilibrium at 360 min. An increase in temperature from 27.5°C to 45 °C increased the removal efficiency of CV. Maximum adsorption capacity was found to be 30.27 mg/g.

Keywords: biochar; *Mimosa pigra*; Crystal violet; adsorption.

1. Giới thiệu

Sự phát triển của ngành công nghiệp đang tạo ra nhiều loại chất thải, tiềm ẩn nguy cơ gây ô nhiễm môi trường. Trong đó, ngành dệt nhuộm là ngành sử dụng nhiều loại thuốc

nhuộm: như methylene blue, methylene orange, Crystal violet...[10, 22]. Có chứa một nồng độ cao chất màu hữu cơ bền vi sinh khó xử lý. Thuốc nhuộm không chỉ gây màu cho nước thải, mà còn là tác nhân gây ô nhiễm môi

*Corresponding Author: Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam;
Faculty of Environmental Chemical Engineering, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam;
Email: nguyenthithanhhhuyenmtk7@gmail.com; nguyensexuancong4@duytan.edu.vn

trường và gây tác động đến sức khỏe con người [2, 10]. Theo thống kê, chất thải chứa thuốc nhuộm chiếm 15 - 20% tổng lượng nước thải và ngành công nghiệp dệt nhuộm được xem như là một trong những ngành gây ô nhiễm nghiêm trọng đối với môi trường [6].

Hiện nay, có rất nhiều phương pháp như keo tụ, oxy hóa nâng cao, công nghệ màng và hấp phụ đã được sử dụng để xử lý thuốc nhuộm. Tuy nhiên, một số phương pháp như oxy hóa nâng cao, keo tụ,... thường có chi phí lớn và có thể gây nguồn ô nhiễm thứ cấp [3]. Trong khi đó, phương pháp hấp phụ có nhiều ưu điểm như: chi phí thấp, hiệu quả cao, dễ vận hành [11, 20], ít tạo bùn và đặc biệt vật liệu có thể tái sử dụng nhiều lần. Chính vì vậy, đây là phương pháp đã và đang được quan tâm và mở rộng nghiên cứu để đưa vào ứng dụng cho khử màu nước thải.

Than sinh học (biochar, BC) - là vật liệu cacbon có tiềm năng lớn trong hấp phụ thuốc nhuộm từ môi trường nước. Các kết quả nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng, hiệu quả hấp phụ thuốc nhuộm bằng BC phụ thuộc rất lớn vào nguyên liệu thô ban đầu [5, 7]. Do đó, việc nghiên cứu và thử nghiệm nhiều loại nguyên liệu mới để đánh giá khả năng xử lý thuốc nhuộm trong môi trường nước, góp phần mở rộng ứng dụng của BC là cần thiết.

Cây mai dương (*Mimosa pigra*) - hay còn gọi là trinh nữ thân gỗ, trinh nữ đầm lầy, trinh nữ nhọn - là một loại cây sinh trưởng nhanh, phát triển mạnh, cây cao tới khoảng 6m, phân nhiều nhánh, thân và cành có nhiều gai nhọn, thường mọc nhiều ở nơi đất trũng, ẩm ướt, ven sông suối. Khi sinh sôi mạnh có thể nhanh chóng tạo thành những thảm, rừng cây bụi lớn, là loài cây xâm lấn các loài cây khác, đe dọa làm hoang mạc và nghèo hóa đất canh tác, làm ảnh hưởng lớn đến môi trường sinh thái và các loài động thực vật khác. Vì vậy, việc tận dụng

cây mai dương làm nguồn nguyên liệu để chế tạo BC sẽ mang lại ý nghĩa lớn về kinh tế lẫn môi trường.

Mục tiêu nghiên cứu là nhằm đánh giá hiệu quả, khả năng hấp phụ CV bằng BC từ cây mai dương. Nghiên cứu này được thực hiện theo dạng mẻ quy mô phòng thí nghiệm với các đặc trưng của BC được xác định bằng các phương pháp quang phổ hồng ngoại (FTIR), kính hiển vi điện tử quét (SEM) và diện tích bề mặt riêng (BET).

2. Nguyên liệu và phương pháp

2.1. Nguyên liệu

Nguyên liệu thô trong nghiên cứu này là thân cây mai dương được thu nhận ở cánh đồng gần Trường Đại học Duy Tân, tại thành phố Đà Nẵng. Thuốc nhuộm CV có công thức $C_{25}H_{30}ClN_3$ (99%), khối lượng phân tử 407.979 $g \cdot mol^{-1}$, tỷ trọng 1.19 g/cm^3 , được mua từ công ty Xilong (Xilong Chemical Co. Ltd). Nồng độ 200mg/L dung dịch CV được chuẩn bị bằng hòa tan 0.2g CV trong 1.000mL nước cất 2 lần. Ngoài ra trong nghiên cứu này còn sử dụng các hóa chất: natri clorua (NaCl - 99%), axit clohydric (HCl - 37%), natri hydroxit (NaOH - 32%) được mua từ công ty Việt Mỹ, tại thành phố Đà Nẵng.

2.2. Chế tạo than sinh học

Thân cây mai dương được băm nhỏ và phơi ngoài môi trường tự nhiên 2 - 3 ngày, sau đó đem xay nhỏ, rửa và sấy ở 105°C trong 24h. Nguyên liệu sạch được nung trong lò với mức gia nhiệt 10°C/phút cho đến 500°C và lưu trong 2h trước khi lấy ra. BC được rửa sạch 2 lần và sàng bằng rây có kích thước lỗ 0.3 μm . Cuối cùng, BC đem sấy khô trong lò sấy 24h ở nhiệt độ 80 °C. Nguyên liệu ban đầu và than sinh học sau khi tổng hợp được thể hiện ở Hình 1.



Cây mai dương → Cây mai dương (băm nhỏ) → Cây mai dương (sây mịn) → Than sinh học (Thô, 500°C) → Than sinh học (nghiên, rây số 30)

Hình 1. Nguyên liệu và than sinh học

2.3. Đặc trưng than sinh học

BC được xác định pH, độ ẩm, thành phần bay hơi và độ tro. Độ ẩm, bay hơi và tro được xác định bằng quy chuẩn quốc tế ASTM D-1762-84. pH được đo bằng máy đo chỉ tiêu HI98107 pHep trong điều kiện: bỏ BC vào nước cất theo tỉ lệ khối lượng 1:20, khuấy từ 5 phút trước khi đo pH. pH đẳng điện được xác định bằng phương pháp dịch chuyển (drift method) (có bổ sung muối). Lấy 20mL NaCl 0,1M đặt vào 6 cốc riêng biệt và điều chỉnh pH 2, 4, 6, 8, 10, 12 ($\pm 0,1$ pH) bằng HCl 0.1 M và NaOH 0.1 M. Sau đó, cho 0.2 g BC vào mỗi cốc rồi khuấy 250 vòng/phút trong 24h ở nhiệt độ phòng. Thể hiện giá trị pH thay đổi (pH sau - pH ban đầu) trên biểu đồ (trục tung), pH ban đầu (trục hoành), điểm giao cắt giữa trục tung và biểu đồ chính là điểm đẳng điện (pH mà tại đó điện tích dung dịch = 0).

Diện tích bề mặt riêng được xác định bằng phương pháp hấp phụ/giải hấp ni-tơ (thiết bị ASAP 2020) và mô hình Brunauer-Emmett-Teller. Nghiên cứu bề mặt của BC được thực hiện bằng phương pháp kính hiển vi điện tử quét (SIGMA/Carl Zeiss). Nghiên cứu các nhóm chức được xác định bằng phương pháp quang phổ hồng ngoại của BC (FTIR, InfraLUM FT-08).

2.4. Thí nghiệm hấp phụ

Thí nghiệm dạng mẻ được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố gồm: thời gian, liều lượng, nhiệt độ và pH. Các thí nghiệm dùng 25 mL dung dịch CV, sau khi thí nghiệm kết thúc, dung dịch được li tâm (để tách bỏ than) với tốc độ 4.000 vòng/phút

(UNIVERSAL 320R) trong 10 phút. Dung dịch sau li tâm sẽ được đo bằng máy UV-vis (Carry 60 - Agilent, USA) tại bước sóng 580 nm. Ngoại trừ thí nghiệm thời gian hấp phụ, tất cả các thí nghiệm đều kéo dài trong 60 phút tại điều kiện nhiệt độ phòng ($26 \pm 2^\circ\text{C}$, 1 atm).

Thí nghiệm liều lượng được thực hiện trong khoảng 3 - 50g/L trong dung dịch CV có nồng độ 50mg/L và khuấy 250 vòng/phút. Trong thí nghiệm ảnh hưởng hấp phụ bởi pH, khoảng pH được chọn là từ 2 - 12 với nồng độ CV 50mg/L, liều lượng BC 15g/L. Điều kiện trong thí nghiệm thời gian: liều lượng của BC 15g/L, nồng độ CV 50mg/L, thời gian lấy mẫu theo thứ tự 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 và 1440 phút. Thí nghiệm ảnh hưởng nhiệt độ được thực hiện ở 3 giá trị nhiệt độ 27.5, 35, và 45°C.

Dung lượng hấp phụ và hiệu suất hấp phụ tại thời điểm t (mg/g) lần lượt được tính theo công thức (1) và (2) như sau:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m} \quad (1)$$

$$E_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot 100}{C_0} \quad (2)$$

trong đó: C_0 (mg/L) và C_t (mg/L) là nồng độ ban đầu và nồng độ tại thời điểm t , V (mL) là thể tích của CV, m (g) là khối lượng BC, q_t (mg/g) là tổng lượng CV được hấp phụ tại thời điểm t và E_t (%) là hiệu suất hấp phụ.

2.5. Động học và đẳng nhiệt hấp phụ

Nghiên cứu này sử dụng hai mô hình động học và hai mô hình đẳng nhiệt. Mô hình động học gồm: mô hình động học bậc 1 (pseudo-first-order/PFO) (công thức 3, 4) và mô hình

động học bậc 2 (pseudo-second-order/PSO) (công thức 5, 6); mô hình đẳng nhiệt gồm: mô hình Langmuir (công thức 7) và mô hình Freundlich (công thức 8).

Mô hình PFO [15]:

Phương trình đường thẳng:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_{p1} t \quad (3)$$

Phương trình phi tuyến:

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_{p1} t}) \quad (4)$$

Mô hình PSO [4, 12]:

Phương trình đường thẳng:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_{p2} q_e^2} \quad (5)$$

Phương trình phi tuyến:

$$q_t = \frac{q_e^2 k_{p2} t}{1 + q_e k_{p2} t} \quad (6)$$

trong đó: q_t (mg/g) là lượng hấp phụ tại thời điểm t , q_e (mg/g) dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng và k_{p1} (1/phút) là hằng số PFO và k_{p2} (g/mg.phút) là hằng số PSO.

Mô hình Langmuir [16]:

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (7)$$

trong đó: q_e (mg/g) là dung lượng hấp phụ tại thời điểm cân bằng, q_m (mg/g) là hấp phụ tối đa K_L (L/mg) là hằng số Langmuir và C_e (mg/L) nồng độ đạt trạng thái cân bằng của CV.

Mô hình Freundlich [9]:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (8)$$

trong đó: K_F là hằng số Freundlich (mg/g (mg/L)⁻ⁿ), n là hệ số lũy thừa Freundlich.

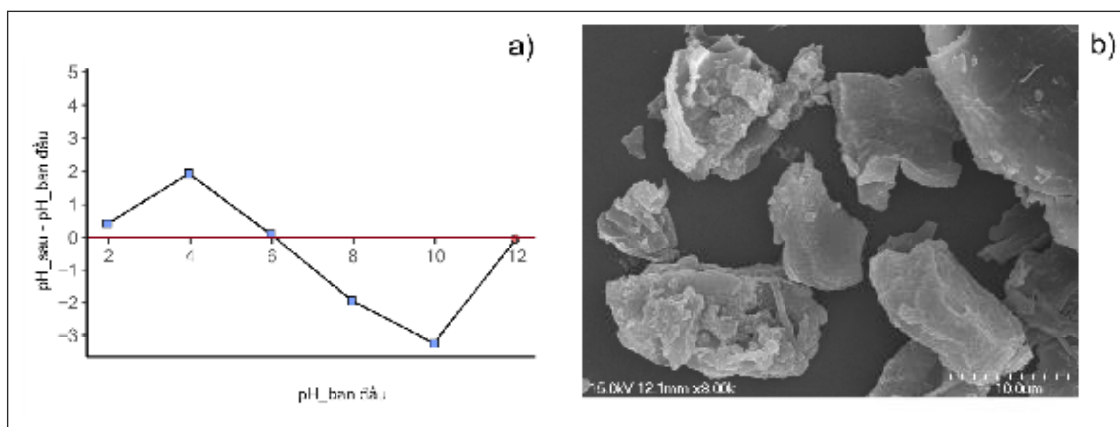
3. Kết quả và thảo luận

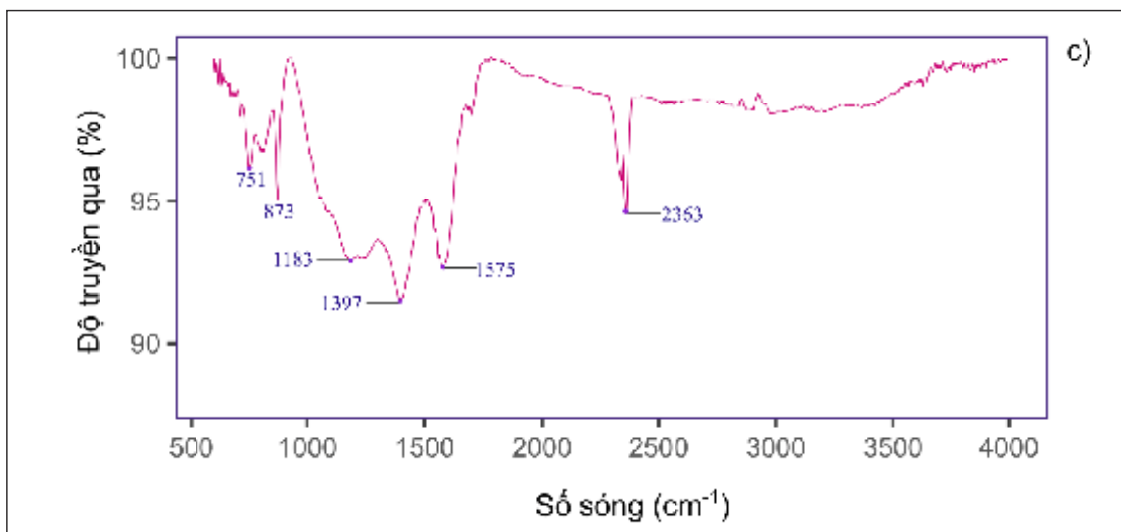
3.1. Đặc điểm than sinh học

Đặc điểm BC được thể hiện ở Bảng 1. BC có độ ẩm khá cao, đạt 13.7% và độ tro là 2.79%. Theo một số nghiên cứu trước đây, BC có độ tro giao động 1.1% - 1.5% [8] và 2.72% [5]. pH đẳng điện của BC là 6.02. Giá trị này có nghĩa rằng, tổng điện tích bề mặt sẽ mang điện tích âm (-) nếu pH của dung dịch lớn hơn 6.02 và ngược lại. Diện tích bề mặt riêng và tổng thể tích lỗ hổng của BC tương ứng 285.53 cm²/g và 0.153 m³/g. Kết quả này là khá cao so với một số nghiên cứu gần đây, chẳng hạn BC từ phân cừu là: 160.53 m²/g, phân thỏ: 21.14 m²/g, phân heo: 13.36 m²/g [24]; lá cây (*Magnolia Grandiflora L.*): 27.3 m²/g [13]. Với kích thước lỗ trung bình là 2.16 nm, BC có tiềm năng cao trong hấp phụ thông qua cơ chế lỗ hổng (kích thước phân tử CV 1.6 nm) [17].

Bảng 1. Đặc trưng vật lý của than sinh học từ cây mai dương

Diện tích bề mặt riêng (m ² /g)	Kích thước lỗ trung bình (nm)	Thể tích lỗ (cm ³ /g)	Độ ẩm (%)	Tro (%)	pH đẳng điện	pH của BC
285.53	2.16	0.153	13.17	2.79	6.02	6.66





Hình 2. Đặc điểm than sinh học: a) pH đẳng điện, b) SEM, c) FTIR

Mối quan hệ giữa pH ban đầu và ΔpH ($\text{pH}_{\text{sau}} - \text{pH}_{\text{ban đầu}}$) được thể hiện ở Hình 2a. Dựa vào Hình 2a, có thể thấy rằng giá trị pH_{pzc} của BC là 6.02. Kết quả này thấp hơn một số nghiên cứu với $\text{pH}_{\text{pzc}} = 8.5$ của BC từ gỗ sồi và BC từ chất thải đô thị [2, 23]. Dựa vào ảnh SEM ở Hình 2b thấy rằng, bề mặt BC có kích thước 5-10 μm , dạng mảnh không đồng nhất. Đặc tính này phù hợp cho vật liệu hấp phụ.

Dựa vào Hình 2c, ta thấy rằng đỉnh hấp phụ tại 1.575 cm^{-1} tương ứng với các liên kết ba $\text{C}\equiv\text{C}$ - và $\text{C}\equiv\text{N}$ [18]. Dải hấp phụ từ 1.575 - 1.585 cm^{-1} chứng tỏ tồn tại nhóm cacboxyl [14], khoảng 400 - 1.500 cm^{-1} tương ứng với nhóm $\text{C}=\text{O}$ và $\text{C}=\text{C}$ trên bề mặt BC [1] và dải hấp phụ từ 3000 - 4000 cm^{-1} tương ứng với sự tồn tại nhóm OH. Sự tồn tại của các nhóm chức này là điều kiện, tiềm năng để xảy ra các phản ứng hóa học - hấp phụ hóa học diễn ra giữa BC và phân tử CV.

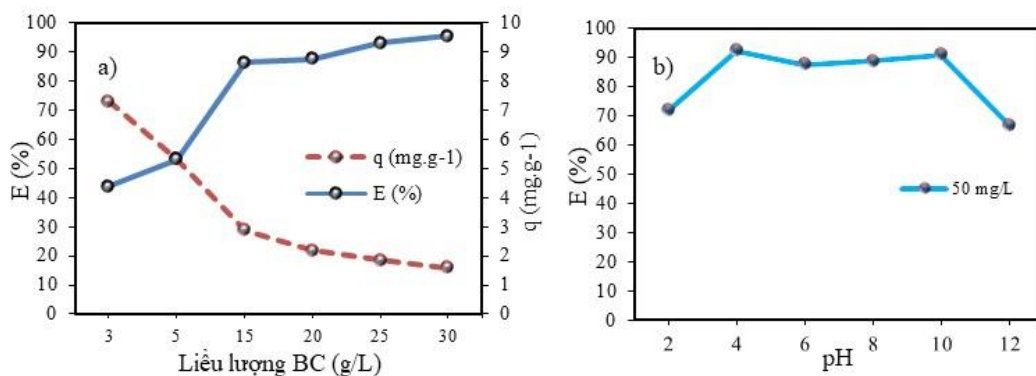
3.2. Hiệu quả hấp phụ và yếu tố ảnh hưởng

3.2.1. Ảnh hưởng của liều lượng và pH

Ảnh hưởng của liều lượng và pH được thể hiện ở Hình 3. Kết quả cho thấy rằng, liều

lượng ảnh hưởng rất lớn và tỉ lệ thuận với hiệu quả hấp phụ CV của BC (Hình 3a). Điều này được lý giải bởi cơ chế hấp phụ như sau: khi liều lượng gia tăng sẽ kéo theo sự gia tăng tổng bề mặt hấp phụ, tức là số tâm hấp phụ của BC trong dung dịch tăng, dẫn đến hiệu quả loại bỏ CV cũng tăng. Khi đạt đến trạng thái cân bằng, hiệu quả hấp phụ dung dịch sẽ tăng chậm và dần đạt giá trị ổn định [21, 24]. Khi liều lượng BC đạt đến 15 g/L thì hiệu quả loại bỏ CV đạt 83 - 87%, liều lượng 15 g/L được xem là liều lượng hấp phụ CV tối ưu.

Hình 3b thể hiện sự biến động hiệu suất hấp phụ CV bởi sự thay đổi pH của dung dịch. Khi pH tăng từ 4 - 10, hiệu quả loại bỏ CV không thay đổi nhiều và đạt giá trị ổn định từ 87 - 92%, pH 2 và 12, hiệu quả loại bỏ CV thấp nhất đạt 66 - 70%. Tại pH < 4 hoặc pH > 10, môi trường trong dung dịch mang tính axit mạnh hoặc kiềm mạnh, có thể đã ảnh hưởng đến cơ chế hấp phụ bình thường của BC và làm giảm hiệu quả xử lý CV. Như vậy, khoảng pH tối ưu cho hấp phụ CV đối với BC là pH từ 4 - 10.

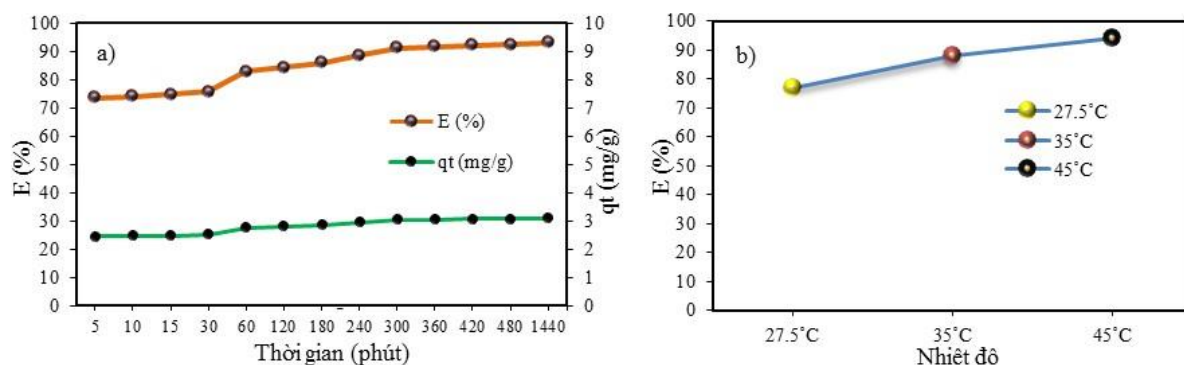


Hình 3. Kết quả hấp phụ CV ảnh hưởng bởi liều lượng (a) và pH (b)

3.2.2. Ảnh hưởng của thời gian và nhiệt độ

Ảnh hưởng của thời gian và nhiệt độ đến hấp phụ CV được thể hiện trong Hình 4. Kết quả cho thấy, hiệu suất hấp phụ CV chịu ảnh hưởng rất lớn bởi thời gian, tốc độ hấp phụ nhanh ở khoảng 30 - 60 phút đầu tiếp xúc. Đặc biệt, chỉ sau 5 phút phản ứng, hiệu quả loại bỏ CV đạt

trên 70%. Dựa vào biểu đồ Hình 4a thấy rằng, tại 60 phút với hiệu suất hấp phụ CV đạt khoảng 83%. Điểm đạt trạng thái cân bằng hấp phụ là tại thời điểm 360 phút, sau thời gian đó hiệu suất hấp phụ tăng không đáng kể và gần như ổn định ở 92%.



Hình 4. Kết quả hấp phụ ảnh hưởng bởi thời gian phản ứng (a) và nhiệt độ (b)

Thí nghiệm ảnh hưởng nhiệt độ được thực hiện với nồng độ ban đầu 50 mg/L, ở điều kiện nhiệt độ 27.5°C, 35°C và 45°C, kết quả được thể hiện trong Hình 4, khi tăng nhiệt độ phản ứng thì dung lượng hấp phụ tăng, đồng thời tốc độ hấp phụ cũng tăng. Khi tăng nhiệt độ 45°C thì hiệu quả loại bỏ CV đạt 94%.

3.3. Động học và đẳng nhiệt hấp phụ

Giá trị các thông số động học và biểu đồ được thể hiện ở Bảng 2 và Hình 5. Dung lượng hấp phụ CV tối đa của BC đạt 30.27 mg/g. Dựa R² có thể thấy rằng: Hai mô hình động học PSO và PFO phản ánh không tốt kết quả thí nghiệm (R² thấp: 0.28 và 0.66). RSS ở Bảng 2 cũng cho

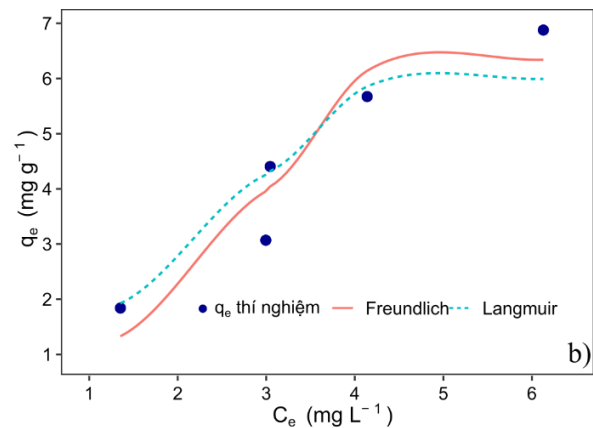
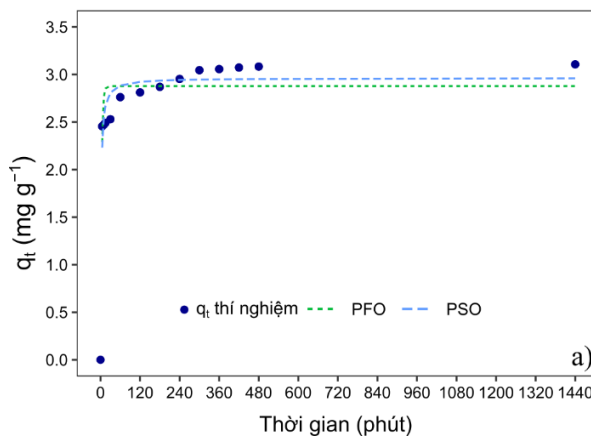
thấy, mô hình PSO có kết quả mô phỏng dữ liệu thí nghiệm tốt hơn mô hình PFO. Hình 5a cũng cho thấy, đường biểu diễn của mô hình PSO gần với kết quả thí nghiệm hơn so với PFO.

Mô hình Langmuir có sai số RSS (1.19) nhỏ hơn mô hình Freundlich (1.26), tuy nhiên sự khác nhau là không lớn. Bên cạnh đó, dựa vào giá trị R², cho thấy rằng, mô hình Freundlich có hệ số xác định lớn hơn, chứng tỏ kết quả dự báo của Freundlich chính xác hơn Langmuir. Nhận định này một phần được thể hiện ở biểu đồ trên Hình 5b. Điều này có thể đưa ra giả thiết hấp phụ rằng: cơ chế hấp phụ CV của BC trong nghiên cứu này tuân theo giả thiết của mô hình

Freudlich, đó là hấp phụ trên bề mặt BC không đồng nhất [13]. Trong trường hợp này, bề mặt hấp phụ BC được coi đồng nhất trong điều kiện chất hấp phụ chỉ bị thu hút bởi một loại nhóm chức trên bề mặt.

Bảng 2. Kết quả thông số các mô hình động học và đẳng nhiệt của quá trình hấp phụ CV trên BC từ cây mai dương.

Mô hình	Thông số	Giá trị
PFO	k_{p1}	0.33
	q_e	2.86
	RSS	0.52
	R^2	0.28
PSO	k_{p2}	0.22
	q_e	2.94
	RSS	0.25
	R^2	0.66
Langmuir	q_m	30.27
	K_l	0.05
	RSS	1.19
	R^2	0.88
Freudlich	N	1.18
	K_F	1.52
	RSS	1.26
	R^2	0.9



Hình 5. Biểu đồ thể hiện kết quả mô phỏng động học (a) và đẳng nhiệt hấp phụ (b)

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã chế tạo BC từ cây mai dương vào ứng dụng xử lý CV trong quy mô phòng thí nghiệm. Hấp phụ CV của BC đạt hiệu suất tối ưu tại 15 g/L và pH không thay đổi nhiều trong khoảng pH từ 4 đến 10. Thí nghiệm ảnh hưởng của thời gian cho thấy, hiệu quả loại bỏ CV tăng nhanh trong 30 phút đầu tiên, đặc biệt chỉ sau 5 phút phản ứng, hiệu quả loại bỏ

CV đạt trên 70%. Thời gian đạt trạng thái cân bằng với nồng độ CV 50 mg/L và liều lượng BC 15 g/L là 360 phút. Dung lượng hấp phụ CV tối đa của BC theo mô hình đẳng nhiệt Langmuir đạt 30.27 mg/g. Than sinh học từ cây mai dương có tiềm năng lớn trong loại bỏ thuốc nhuộm, mở ra cơ hội sử dụng thực vật xâm hại cho mục đích cải thiện môi trường.

Tài liệu tham khảo

- [1] Abdel-Fattah, Tarek M., et al. (2015), "Biochar from woody biomass for removing metal contaminants and carbon sequestration", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 22, pp. 103-109.
- [2] Babaei, Ali Akbar, et al. (2016), "Experimental and modeling study on adsorption of cationic methylene blue dye onto mesoporous biochars prepared from agrowaste", *Desalination and Water Treatment*. 57(56), pp. 27199-27212.
- [3] Barka, Nouredine, Abdennouri, Mohammed, and Makhfouk, Mohammed E. L. (2011), "Removal of Methylene Blue and Eriochrome Black T from aqueous solutions by biosorption on *Scolymus hispanicus* L.: Kinetics, equilibrium and thermodynamics", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 42(2), pp. 320-326.
- [4] Blanchard, G., Maunaye, M., and Martin, G. (1984), "Removal of heavy metals from waters by means of natural zeolites", *Water Research*. 18(12), pp. 1501-1507.
- [5] Bordoloi, Neon, et al. (2017), *Adsorption of Methylene blue and Rhodamine B by using biochar derived from Pongamia glabra seed cover*, Vol. 77, wst 2017579.
- [6] Chandra, Ram (2016), *Environmental Waste Management*, CRC Press, Boca Raton.
- [7] Dai, Yingjie, et al. (2019), "The adsorption, regeneration and engineering applications of biochar for removal organic pollutants: A review", *Chemosphere*. 223, pp. 12-27.
- [8] Demirbas, Ayhan (2004), "Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 72(2), pp. 243-248.
- [9] Freundlich, Herbert (1907), Über die Adsorption in Lösungen, *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, Editor^Editors, p. 385.
- [10] Hao, Oliver J., Kim, Hyunook, and Chiang, Pen-Chi (2000), "Decolorization of Wastewater", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 30(4), pp. 449-505.
- [11] He, Jinsong, et al. (2018), "Treatment of methylene blue containing wastewater by a cost-effective micro-scale biochar/polysulfone mixed matrix hollow fiber membrane: Performance and mechanism studies", *Journal of Colloid and Interface Science*. 512, pp. 190-197.
- [12] Ho, Yuh-Shan (2006), "Second-order kinetic model for the sorption of cadmium onto tree fern: A comparison of linear and non-linear methods", *Water Research*. 40(1), pp. 119-125.
- [13] Ji, Bin, et al. (2019), "Removal of methylene blue from aqueous solutions using biochar derived from a fallen leaf by slow pyrolysis: Behavior and mechanism", *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 7(3), p. 103036.
- [14] Kołodzyńska, D. and Bąk, J. (2018), "Use of three types of magnetic biochar in the removal of copper(II) ions from wastewaters", *Separation Science and Technology*. 53(7), pp. 1045-1057.
- [15] Lagergren, S. (1898), "Zur Theorie der Sogenannten Adsorption Gelöster Stoffe, Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens", *Handlingar*. 24, pp. 1-39.
- [16] Langmuir, Irving (1918), "THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS, MICA AND PLATINUM", *Journal of the American Chemical Society*. 40(9), pp. 1361-1403.
- [17] Oksman, Kristiina, et al. (2014), *HANDBOOK OF GREEN MATERIALS Processing Technologies, Properties and Applications (In 4 Volumes)*.
- [18] Samsuri, Abd Wahid, Sadegh-Zadeh, Fardin, and Seh-Bardan, Bahi Jalili (2013), "Adsorption of As(III) and As(V) by Fe coated biochars and biochars produced from empty fruit bunch and rice husk", *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1(4), pp. 981-988.
- [19] Shawabkeh, Reyad A. and Tutunji, Maha F. (2003), "Experimental study and modeling of basic dye sorption by diatomaceous clay", *Applied Clay Science*. 24(1), pp. 111-120.
- [20] Singh, Kunwar P., et al. (2011), "Optimizing adsorption of crystal violet dye from water by magnetic nanocomposite using response surface modeling approach", *Journal of Hazardous Materials*. 186(2), pp. 1462-1473.
- [21] Sun, Lei, Wan, Shungang, and Luo, Wensui (2013), "Biochars prepared from anaerobic digestion residue, palm bark, and eucalyptus for adsorption of cationic methylene blue dye: Characterization, equilibrium, and kinetic studies", *Bioresource Technology*. 140, pp. 406-413.
- [22] Tan, Kah Aik, Morad, Norhashimah, and Qi Ooi, Jie (2016), *Phytoremediation of Methylene Blue and Methyl Orange Using Eichhornia crassipes*, Vol. 7, 724-728.
- [23] Zhang, Bing, Wu, Yunhai, and Cha, Ligen (2019), "Removal of methyl orange dye using activated biochar derived from pomelo peel wastes: performance, isotherm, and kinetic studies", *Journal of Dispersion Science and Technology*, pp. 1-12.
- [24] Huang, W., Chen, J., and Zhang, J. (2018), "Adsorption characteristics of methylene blue by biochar prepared using sheep, rabbit and pig manure", *Environ Sci Pollut Res Int*. 25(29), pp. 29256-29266.