RESEARCH ON METHYLENE BLUE DYE TREATMENT USING ADSORBENT MATERIAL MADE FROM TEXTILE WASTE

Hoang Trung Kien[1], Van Huu Tap[2*], Hoang Van Hung[2], Vi Thuy Linh[1], Nguyen Thi Bich Hanh[1], Nguyen Thi Mai Linh[1], Nguyen Thu Huong[1], Hoang Le Phuong[3], Van Huu Luong Nguyen[4], Do Diep Anh[2]
[1]TNU - University of Sciences, [2]Thai Nguyen University, [3]TNU - University of Technology, [4]Iris School, Thai Nguyen province

ARTICLE INFO

Received: 10/7/2025
Revised: 24/9/2025
Published: 24/9/2025

KEYWORDS

Biochar
Methylene blue
Textile waste
Adsorption
Wastewater

ABSTRACT

This study focuses on the use of biochar, pyrolyzed from textile waste at 600 °C under anaerobic conditions, to treat methylene blue dye in water and at the same time creating an environmentally friendly adsorbent material. Experiments were conducted to evaluate the effects of operating parameters such as pyrolysis temperature (400, 600, and 800 °C), solution pH (3–11), adsorbent mass (0.1–1.0 g), contact time (30–240 min), and initial methylene blue concentration (50–500 mg/L) on the treatment efficiency. The results showed that the optimal conditions included pyrolysis temperature of 600 °C, adsorption time of 90 min, methylene blue concentration of 100 mg/L, pH of 9 and biochar dosage of 0.4 g. Under these conditions, the color removal efficiency reached 97.97% and the COD reduction reached 68.38%, indicating significant organic pollution treatment ability. The adsorption data were consistent with the Freundlich isotherm model ($R^2 = 0.9365$, $K_F = 1.38$), reflecting the multilayer adsorption process on a heterogeneous surface with relatively high affinity. The research results indicated that biochar materials from textile waste can be applied in the treatment of industrial wastewater containing methylene blue, contributing to solving the problem of environmental pollution and promoting the trend of sustainable development in the chemical and environmental industries.

NGHIÊN CỨU XỬ LÝ THUỐC NHUỘM XANH METHYLENE BẰNG VẬT LIỆU HẤP PHỤ CHẾ TẠO TỪ CHẤT THẢI DỆT MAY

Hoàng Trung Kiên[1], Văn Hữu Tập[2*], Hoàng Văn Hùng[2], Vi Thùy Linh[1], Nguyễn Thị Bích Hạnh[1], Nguyễn Thị Mai Linh[1], Nguyễn Thu Hường[1], Hoàng Lê Phương[3], Văn Hữu Lương Nguyên[4], Đỗ Diệp Anh[2]
[1]Trường Đại học Khoa học - ĐH Thái Nguyên, [2]Đại học Thái Nguyên
[3]Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên, [4]Iris School, tỉnh Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 10/7/2025
Ngày hoàn thiện: 24/9/2025
Ngày đăng: 24/9/2025

TỪ KHÓA

Than sinh học
Xanh methylen
Chất thải dệt may
Hấp phụ
Nước thải

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc sử dụng than sinh học, được nhiệt phân từ rác thải dệt may ở nhiệt độ 600 °C trong điều kiện yếm khí, để xử lý thuốc nhuộm xanh methylen trong nước, đồng thời tạo ra một loại vật liệu hấp phụ thân thiện với môi trường. Các thí nghiệm được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của các thông số vận hành như nhiệt độ nhiệt phân (400, 600 và 800 °C), pH dung dịch (3–11), khối lượng vật liệu hấp phụ (0,1–1,0 g), thời gian tiếp xúc (30–240 phút) và nồng độ xanh methylene ban đầu (50–500 mg/L) đến hiệu quả xử lý. Kết quả cho thấy điều kiện tối ưu bao gồm nhiệt độ nhiệt phân 600 °C, thời gian hấp phụ 90 phút, nồng độ xanh methylene 100 mg/L, pH = 9 và liều lượng than sinh học 0,4 g. Dưới các điều kiện này, hiệu suất loại bỏ màu đạt 97,97% và giảm COD đạt 68,38%, cho thấy khả năng xử lý ô nhiễm hữu cơ đáng kể. Dữ liệu hấp phụ phù hợp với mô hình đẳng nhiệt Freundlich ($R^2 = 0,9365$, $K_F = 1,38$), phản ánh quá trình hấp phụ đa lớp trên bề mặt không đồng nhất và có ái lực tương đối cao. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng vật liệu than sinh học từ rác thải dệt may có thể ứng dụng trong xử lý nước thải công nghiệp có chứa xanh methylen, góp phần giải quyết bài toán ô nhiễm môi trường và thúc đẩy xu hướng phát triển bền vững trong ngành công nghiệp hóa chất và môi trường.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13207

* Corresponding author. *Email: vanhuutap@tnu.edu.vn*

1. Giới thiệu

Trong những thập kỷ gần đây, quá trình công nghiệp hóa nhanh, đặc biệt trong lĩnh vực dệt nhuộm, đã làm gia tăng áp lực lên môi trường nước. Nước thải phát sinh thường chứa các chất hữu cơ khó phân hủy, đặc biệt là thuốc nhuộm tổng hợp [1]. Thuốc nhuộm xanh methylen (MB) được sử dụng rộng rãi trong nhuộm vải, da, giấy và các sản phẩm hóa mỹ phẩm, là một trong những tác nhân gây ô nhiễm phổ biến do tính bền vững và độc tính sinh học cao [2]. MB không những có khả năng gây độc cho các sinh vật thủy sinh mà còn tiềm ẩn nguy cơ ảnh hưởng đến sức khỏe con người khi xâm nhập vào chuỗi nước sinh hoạt. Một số phương pháp xử lý truyền thống như keo tụ, lọc màng, phân hủy sinh học [3] và oxy hóa nâng cao cũng được sử dụng để xử lý nước thải có chứa MB. Tuy nhiên, các phương pháp này thường gặp một số hạn chế về chi phí, hiệu suất và khả năng tái sử dụng. Để phù hợp với sự phát triển đó, một số công nghệ hấp phụ bằng vật liệu carbon đã được nghiên cứu và phát triển, đặc biệt là than sinh học (biochar), nổi lên như một giải pháp hiệu quả, thân thiện với môi trường và kinh tế. Nguồn nguyên liệu cho sản xuất than sinh học rất đa dạng [4], [5]. Đã có nhiều nghiên cứu sử dụng các loại phế phụ phẩm, chất thải từ quá trình sản xuất nông nghiệp, công nghiệp để sản xuất than sinh học sử dụng cho quá trình hấp phụ như vỏ cam [6], thân cây dừa [7], [8], quả Kendu, vỏ cà phê, phụ phẩm từ cây thông [9], phế phẩm từ cây keo, than từ vỏ trấu, rơm rạ [10] và lông gà [11]. Ngành dệt may đóng vai trò quan trọng trong phát triển kinh tế ở nhiều quốc gia đang phát triển, nhưng cũng là một trong những ngành gây ô nhiễm môi trường nghiêm trọng nhất. Quá trình sản xuất tạo ra nhiều chất thải: rắn (vải vụn, bùn thải), nước thải (chứa phẩm nhuộm, kim loại nặng, chất tẩy) và khí thải từ công đoạn gia nhiệt [12]. Việc tận dụng chất thải không chỉ giảm chi phí sản xuất mà còn góp phần xử lý rác thải rắn, hướng đến mô hình kinh tế tuần hoàn. Nhiều phương pháp xử lý đã được nghiên cứu: vải thừa có thể tái sử dụng làm giẻ lau, sợi tái chế hoặc vật liệu cách nhiệt; bùn thải chứa xơ dệt được ép thành viên nhiên liệu dùng cho lò đốt công nghiệp. Phương pháp đốt thu hồi nhiệt năng được áp dụng rộng rãi, tuy nhiên cần hệ thống xử lý khí đạt chuẩn để kiểm soát các chất ô nhiễm như NOx và dioxin [13], [14]. Một phương pháp hiệu quả là nhiệt phân (pyrolysis), biến chất thải hữu cơ thành vật liệu carbon có khả năng hấp phụ cao. Than sinh học từ lõi và vỏ ngô có thể hấp phụ gần 98% thuốc nhuộm MB sau 20 phút, và duy trì hiệu suất trên 96% trong khoảng pH rộng [15]. Nghiên cứu này tái sử dụng rác thải dệt may để tạo than sinh học bằng nhiệt phân, sau đó thử nghiệm khả năng hấp phụ thuốc nhuộm MB.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Chế tạo vật liệu than sinh học từ rác thải dệt may bằng phương pháp nhiệt phân

Rác thải dệt may được lấy từ nhà máy Thành Hưng, thành phần chủ yếu là vải vụn và quần áo loại có tỷ lệ 60-80% là cotton, sau khi phân loại và phơi khô sẽ được nhiệt phân trong lò đốt yếm khí. Mô hình lò đốt do nhóm nghiên cứu chế tạo và thử nghiệm từ vật liệu là thép inox chịu được nhiệt độ cao, mô hình lò đốt có dạng hình trụ đứng chiều cao 1680 mm, đường kính 770 mm. Mô hình thiết kế buồng nhiệt phân có dung tích chứa 12 kg vải vụn. Rác thải dệt may sẽ được nhiệt phân với các điều kiện nhiệt độ là 400, 600 và 800 ^{o}C trong thời gian 2 giờ [16], [17]. Sau đó, vật liệu sẽ được làm nguội tự nhiên đến khi về nhiệt độ môi trường thì rửa sạch với nước cất và tiến hành sấy khô ở nhiệt độ 105 ^{o}C trong thời gian 2 giờ bằng tủ sấy Joytech, ON-21E tại phòng thí nghiệm Khoa Tài nguyên và Môi trường, Trường Đại học Khoa học - Đại học Thái Nguyên.

2.2. Khảo sát đặc điểm bề mặt, cấu trúc và thành phần hóa học của vật liệu

Hình thái học của vật liệu được khảo sát bằng kính hiển vi điện tử quét SEM (Scanning Electron Microscope) thông qua thiết bị Hitachi S4800, Nhật Bản; thành phần của vật liệu được xác định bằng phương pháp phổ tán xạ năng lượng phép đo EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy). Phép đo FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) được thực hiện trên máy Spectrum Two hãng PerkinElmer tại Khoa Hóa học, Trường Đại học Khoa học – Đại học Thái Nguyên.

2.3. Nghiên cứu khả năng hấp phụ MB của vật liệu than từ quá trình nhiệt phân rác thải công nghiệp dệt may

Dung dịch xanh methylen sử dụng trong thí nghiệm được chuẩn bị tại phòng thí nghiệm từ hóa chất MB (Meck – Đức) với nồng độ gốc 1000 mg/l. Từ dung dịch gốc, các dung dịch thí nghiệm được pha loãng để đạt các nồng độ khác nhau tùy theo mục đích nghiên cứu. Thí nghiệm được thiết kế để đánh giá khả năng hấp phụ MB của vật liệu than, khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố: pH môi trường, khối lượng vật liệu, thời gian hấp phụ, nồng độ MB ban đầu và nhiệt độ. Mỗi thí nghiệm được thực hiện lặp lại ba lần trong cùng điều kiện, và kết quả được tính dựa trên giá trị trung bình của ba lần đo, thí nghiệm kết thúc sẽ lọc lấy dung dịch sau hấp phụ và xác định độ màu ở bước sóng 664 nm sử dụng thiết bị UV-VIS (UV–VIS 2900, HITACHI, Nhật Bản) và COD. Các thí nghiệm cụ thể được mô tả như sau:

Ảnh hưởng của nhiệt độ: 0,2 g vật liệu than [18] đã chế tạo ở nhiệt độ 400, 600 và 800 ^{o}C được cân và cho vào bình tam giác 50 ml, sau đó thêm 25 ml dung dịch MB nồng độ 100 mg/l (đã điều chỉnh cố định pH = 9). Hỗn hợp được lắc trên máy lắc (Máy lắc ngang HY-4A, xuất xứ Trung Quốc) với tốc độ 120 vòng/phút trong 90 phút.

Ảnh hưởng của pH: Lượng 0,2 g vật liệu than (được chế tạo ở nhiệt độ tối ưu đã xác định được ở thí nghiệm trước) được cho vào bình tam giác 50 ml, thêm 25 ml dung dịch MB nồng độ 100 mg/l, với pH được điều chỉnh lần lượt ở các giá trị 3, 5, 7, 9 và 11 bằng máy đo pH (Máy HQ 40D, Hach, Mỹ). Hỗn hợp được lắc trong 90 phút.

Ảnh hưởng của khối lượng vật liệu: Các lượng vật liệu than (0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 g) được cân và cho vào bình tam giác 50 ml, sau đó thêm 25 ml dung dịch MB nồng độ 100 mg/l (điều chỉnh pH ở mức tối ưu đã xác định). Hỗn hợp được lắc trong 90 phút.

Ảnh hưởng của thời gian hấp phụ: Lượng vật liệu than tối ưu đã xác định được ở thí nghiệm trước được cho vào bình tam giác 50 ml cùng với 25 ml dung dịch MB nồng độ 100 mg/l (điều chỉnh pH ở mức tối ưu đã xác định được). Hỗn hợp được lắc trên máy lắc ở các khoảng thời gian khác nhau: 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 và 240 phút. Sau mỗi khoảng thời gian, mẫu được lọc để đánh giá hiệu quả xử lý theo thời gian.

Ảnh hưởng của nồng độ MB ban đầu: Lượng vật liệu than tối ưu đã xác định được ở thí nghiệm trước được cho vào bình tam giác 50 ml, thêm 25 ml dung dịch MB với các nồng độ ban đầu lần lượt là 50, 100, 200, 300 và 500 mg/l (điều chỉnh pH ở mức tối ưu đã xác định được). Hỗn hợp được lắc trong 90 phút.

Các thí nghiệm được thực hiện với các thông số cố định (trừ yếu tố đang khảo sát) nhằm đảm bảo tính nhất quán và độ tin cậy của kết quả.

Hiệu suất phân hủy MB được tính theo công thức (1) [18]:

$$H = \frac{C_0 - C_C}{C_0} x100\% \quad (1)$$

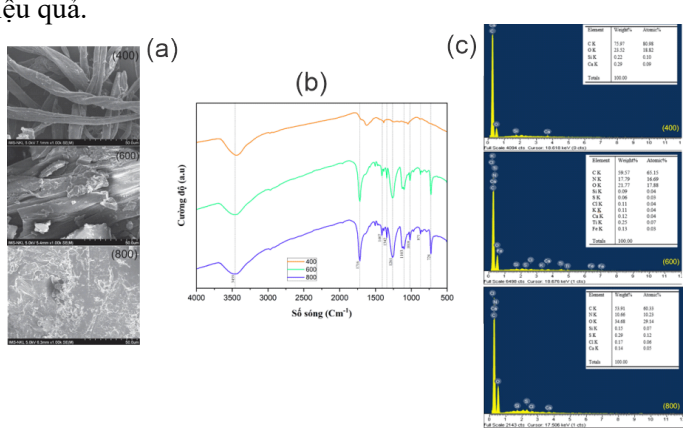
Trong đó: H% là hiệu suất hấp phụ MB; C_0 là nồng độ MB ban đầu (mg/l); C_c là nồng độ MB sau hấp phụ (mg/l).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc điểm của vật liệu than sinh học được nhiệt phân từ rác thải dệt may

Cấu trúc hình thái bề mặt của mẫu than được chế tạo ở các mức nhiệt độ 400 °C, 600 °C và 800 °C được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) (Hình 1a). Ở 400 °C, bề mặt của vật liệu vẫn giữ được dạng sợi dài, hình ống, với bề mặt tương đối nhẵn. Cấu trúc sợi nguyên sinh chưa bị phá vỡ nhiều, cho thấy mức độ cacbon hóa còn thấp và chưa hình thành rõ rệt các lỗ xốp. Khi tăng nhiệt độ lên 600 °C, trên bề mặt vật liệu xuất hiện nhiều vết nứt, mảnh vỡ dạng vảy và các cấu trúc không đều. Các sợi than bị phá vỡ, tạo ra các khoảng hổng trên bề mặt rõ rệt hơn. Điều này cho thấy các thành phần lignocellulose đã bị phân hủy mạnh hơn, dẫn đến sự gia tăng độ xốp, giúp cải thiện khả năng hấp phụ. Khi tăng nhiệt độ lên 800 °C, cấu trúc bề mặt trở nên

đặc, dính kết và gần như bị "nóng chảy", các sợi than ban đầu bị phá vỡ hoàn toàn. Bề mặt trở nên không định hình, có xu hướng phá vỡ hoàn toàn cấu trúc. Mặc dù có thể hình thành nhiều vi mao quản, nhưng việc bề mặt bị dính kết đông đặc lại có thể làm giảm số lượng khoảng trống dẫn đến hấp phụ kém hiệu quả.

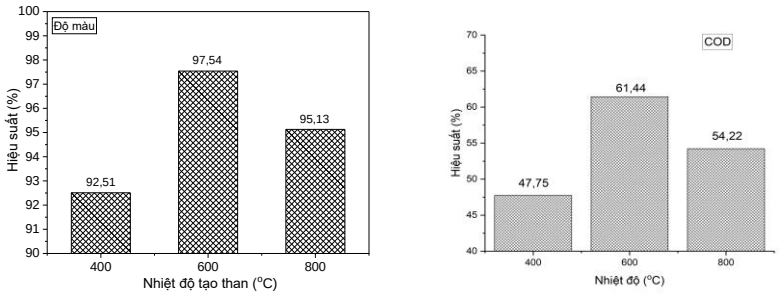


Hình 1. *Ảnh SEM (a), phổ FTIR (b) và EDS (c) của mẫu than nhiệt phân ở nhiệt độ 400, 600, 800 °C*

Kết quả phân tích FTIR (Hình 1b) cho thấy cả ba vật liệu ở ba khoảng nhiệt độ khác nhau đều ghi nhận các phổ đặc trưng của vật liệu vật liệu carbonate, dao động tại 3459 cm^{-1} các nhóm liên kết hydroxyl O–H của các phân tử polymer trên bề mặt chất hấp phụ, Đỉnh peak 1716 cm^{-1} đặc trưng cho liên kết C=O (có thể là carbonyl) [19]. Các peak 1342 cm^{-1} và 1407 cm^{-1}, tương ứng với liên kết C–H (có thể là CH_3/CH_2). Các số sóng 1103 cm^{-1}, 1018 cm^{-1} và 1261 cm^{-1} đặc trưng cho liên kết C–O (ether/ester hoặc acid) [20]. Các peak 871 cm^{-1} và 728 cm^{-1} liên quan đến các liên kết C-H của vòng thơm [1]. Từ kết quả trên cho thấy các nhóm carboxylic của vật liệu có mật độ khá cao có khả năng tương tác và liên kết với MB [21].

Kết quả phân tích phổ EDS từ Hình 1c, tương ứng với các mẫu được xử lý ở các nhiệt độ khác nhau (400, 600 và 800 °C), cung cấp thông tin chi tiết về thành phần hóa học. Mẫu 600 °C ghi nhận sự xuất hiện của nitơ, có thể do sự hiện diện của nhóm amin; ngoài ra, các kim loại chuyển tiếp như Ti, Fe, Ca, và Si được phát hiện với hàm lượng rất thấp. Nitơ cao, cho thấy quá trình khử hoặc biến đổi bề mặt có nhiều nhóm chức hoạt động, có nhiều loại tâm hấp phụ. Mỗi tâm hấp phụ đều chứa ái lực ion, kết quả cho thấy quá trình hấp phụ xảy ra trên bề mặt vật liệu chủ yếu là quá trình hấp phụ hóa học. Ở mẫu 800 °C, hàm lượng carbon tiếp tục giảm, nitơ giảm nhẹ và oxy tăng mạnh, có thể liên quan đến quá trình oxy hóa ở nhiệt độ cao, đồng thời cho thấy sự mất nitơ hoặc biến đổi sâu hơn trong cấu trúc carbon.

3.2. Khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ đến khả năng hấp phụ MB của vật liệu



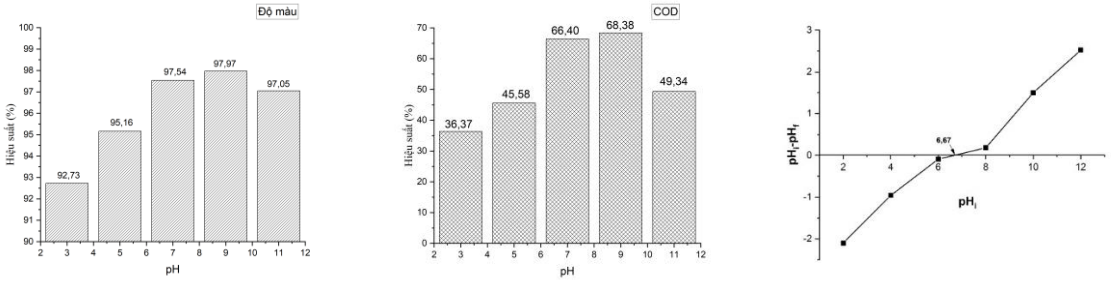
Hình 2. *Ảnh hưởng của nhiệt độ chế tạo than sinh học đến khả năng hấp phụ MB*

Kết quả từ Hình 2 cho thấy hiệu suất hấp phụ tăng từ 92,51% lên 97,54% đối với các vật liệu than sinh học chế tạo với nhiệt độ nhiệt phân tăng từ 400 °C lên 600 °C, nhưng có xu hướng giảm khi nhiệt độ tiếp tục tăng lên 800 °C. Hiện tượng này có thể được giải thích dựa trên đặc tính lý

hóa của vật liệu than sinh học. Ở nhiệt độ khoảng 600 °C, bề mặt than sinh học sau khi hoạt hóa chứa nhiều nhóm chức oxy hóa (–OH, –COOH, –C=O), tạo điều kiện thuận lợi cho tương tác tĩnh điện với cation MB^+ [22]. Đồng thời, cấu trúc graphitic của than sinh học với hệ thống π-electron đóng vai trò quan trọng trong tương tác π–π với vòng thơm của MB, góp phần ổn định quá trình hấp phụ. Ngoài ra, sự gia tăng cấu trúc mao quản ở nhiệt độ cao thúc đẩy quá trình hấp phụ vật lý diễn ra mạnh mẽ. Tuy nhiên, ở nhiệt độ 800 °C, hiệu suất hấp phụ giảm do cấu trúc bề mặt trở nên đặc, dính kết và gần như bị "nóng chảy", các sợi than ban đầu bị phá vỡ hoàn toàn, làm suy yếu tương tác tĩnh điện với MB^+. Sự ổn định của hiệu suất hấp phụ tại 600 °C chỉ ra rằng cơ chế hấp phụ chủ yếu phụ thuộc vào tương tác bề mặt, trong đó hấp phụ vật lý chiếm ưu thế nhờ độ xốp và khả năng trữ nước cao. Do đó, nhóm nghiên cứu đã lựa chọn than nhiệt phân ở 600 °C cho các thí nghiệm tiếp theo.

3.3. Khảo sát ảnh hưởng của pH đến khả năng hấp phụ MB

Kết quả ảnh hưởng của pH được trình bày trong Hình 3. Khi giá trị pH tăng từ 3 lên 9, hiệu suất xử lý màu tăng từ 92,73% lên 97,97%, trong khi hiệu suất COD tăng từ 36,37% lên 68,38%. Tuy nhiên, khi pH vượt quá 9, hiệu suất xử lý màu vẫn duy trì ở mức cao (> 97%), nhưng giảm nhẹ xuống còn 97,05%, và hiệu suất COD giảm xuống còn 49,34%. Kết quả chỉ ra rằng điểm đẳng điện (pHpzc) của vật liệu là 6,67, nghĩa là khi pH < 6,67, bề mặt vật liệu mang điện tích dương, và khi pH > 6,67, bề mặt mang điện tích âm. Ở pH < pHpzc, bề mặt tích điện dương thúc đẩy hấp phụ H^+, đặc biệt do sự hiện diện của nhóm amin (NH), dẫn đến hiệu suất hấp phụ thấp hơn ở các giá trị pH thấp. Ngược lại, khi pH > pHpzc, bề mặt tích điện âm nhờ hấp phụ OH^- và sự tham gia của nhóm carboxylic (COOH), kết hợp với lực hút tĩnh điện giữa bề mặt mang điện tích âm và cation MB^+, làm tăng hiệu suất hấp phụ ở các giá trị pH cao [23]. Hiệu suất tối ưu đạt được tại pH = 9, với giá trị lần lượt là 97,97% cho độ màu và 68,38% cho COD, nhờ bề mặt than sinh học mang điện tích âm hỗ trợ hấp phụ tĩnh điện và tương tác hóa học với các nhóm chức phân cực. Ở pH kiềm mạnh (10–11), mặc dù bề mặt vẫn tích điện âm, sự cạnh tranh hấp phụ với ion OH^- có thể làm giảm nhẹ hiệu suất xử lý màu và COD. Quá trình hấp phụ MB là kết quả của sự kết hợp giữa tương tác tĩnh điện và hấp phụ vật lý, pH = 9 được lựa chọn là pH tối ưu cho các thí nghiệm sau [24].

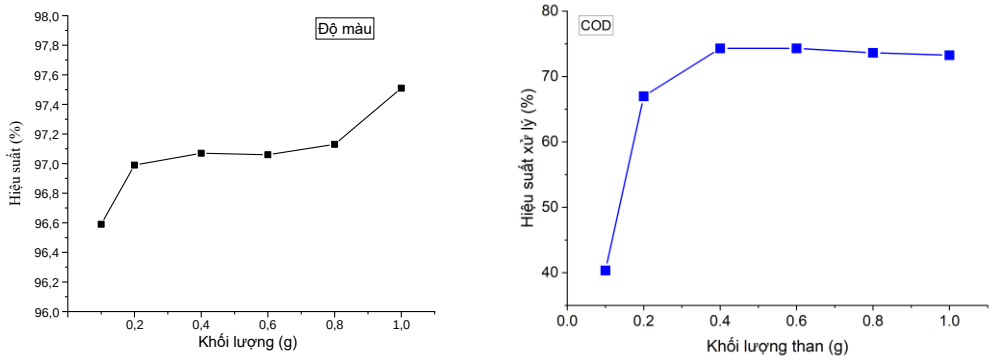


Hình 3. *Ảnh hưởng của pH đến khả năng hấp phụ MB và điểm đẳng điện của than sinh học từ rác thải dệt may được nhiệt phân ở nhiệt độ 600 ^oC*

3.4. Khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng vật liệu hấp phụ đến khả năng hấp phụ MB

Kết quả từ Hình 4 chỉ ra rằng khi khối lượng vật liệu than sinh học được tăng dần từ 0,1 g lên 1,0 g, hiệu suất hấp phụ MB có xu hướng tăng nhẹ. Cụ thể, hiệu suất loại màu tăng từ 96,5% (ở 0,1 g) lên 97,5% (ở 1,0 g), phản ánh sự gia tăng diện tích bề mặt tiếp xúc và số lượng vị trí hấp phụ khả dụng, từ đó nâng cao hiệu quả xử lý. Đồng thời, hiệu suất xử lý COD tăng rõ rệt từ 40% lên trên 72% trong cùng dải khối lượng, có thể được giải thích bằng việc sự hiện diện của nhiều vị trí hoạt tính hơn trên bề mặt vật liệu thúc đẩy hấp phụ các hợp chất hữu cơ khó phân hủy. Tuy nhiên, tốc độ tăng hiệu suất giảm dần khi khối lượng vượt quá 0,6 g, cho thấy hệ thống có thể đã tiếp cận trạng thái cân bằng hấp phụ, và việc bổ sung thêm vật liệu không còn tạo ra sự cải thiện đáng kể về hiệu quả. Hiện tượng này có thể liên quan đến việc bão hòa các vị trí hấp phụ hoặc sự

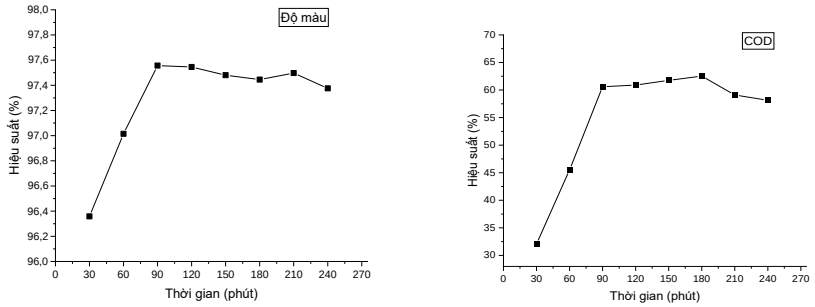
hạn chế trong quá trình khuếch tán MB vào các mao quản sâu bên trong vật liệu khi khối lượng tăng cao. Ngoài ra, sự gia tăng khối lượng vật liệu có thể dẫn đến hiện tượng tắc nghẽn mao quản hoặc giảm hiệu quả sử dụng bề mặt do chồng lấp giữa các hạt vật liệu, làm giảm khả năng tiếp xúc với dung dịch. Từ kết quả thực nghiệm cho thấy, khối lượng 0,4 g được nhóm nghiên cứu lựa chọn làm điều kiện tối ưu cho các thí nghiệm tiếp theo.



Hình 4. *Ảnh hưởng của hàm lượng vật liệu đến khả năng hấp phụ MB*

3.5. Khảo sát ảnh hưởng của thời gian hấp phụ đến hiệu suất hấp phụ MB

Kết quả từ Hình 5 chỉ ra rằng cả hai chỉ tiêu độ màu và COD đều tăng nhanh trong giai đoạn đầu và đạt trạng thái gần như ổn định sau khoảng 90 phút. Cụ thể, hiệu suất loại bỏ độ màu tăng từ 96,3% (sau 30 phút) lên khoảng 97,5% tại 90 phút, sau đó dao động nhẹ và không ghi nhận sự cải thiện đáng kể ở các mốc thời gian tiếp theo. Tương tự, hiệu suất loại bỏ COD tăng nhanh từ 32% lên khoảng 60% trong 90 phút đầu, rồi duy trì gần như không đổi cho đến 240 phút. Hiện tượng này phản ánh quá trình hấp phụ diễn ra mạnh ban đầu, khi bề mặt vật liệu còn chứa nhiều vị trí hấp phụ trống, tạo điều kiện cho sự gắn kết nhanh chóng của các phân tử MB. Sau khi các vị trí này bị chiếm dụng, sự cạnh tranh giữa các phân tử MB và quá trình khuếch tán vào các mao quản sâu bên trong vật liệu giảm dần, dẫn đến việc các khoảng hổng trên bề mặt tiến gần đến trạng thái cân bằng, làm cho hiệu suất hấp phụ không còn tăng rõ rệt. Ngoài ra, sự ổn định sau 90 phút có thể liên quan đến sự bão hòa bề mặt hoặc hạn chế trong khả năng khuếch tán do các lỗ rỗng sâu bị tắc nghẽn bởi các phân tử đã hấp phụ. Dựa trên phân tích, 90 phút được xác định là thời gian hấp phụ tối ưu cho nghiên cứu này, đảm bảo hiệu quả xử lý cao mà không cần kéo dài thời gian thí nghiệm.

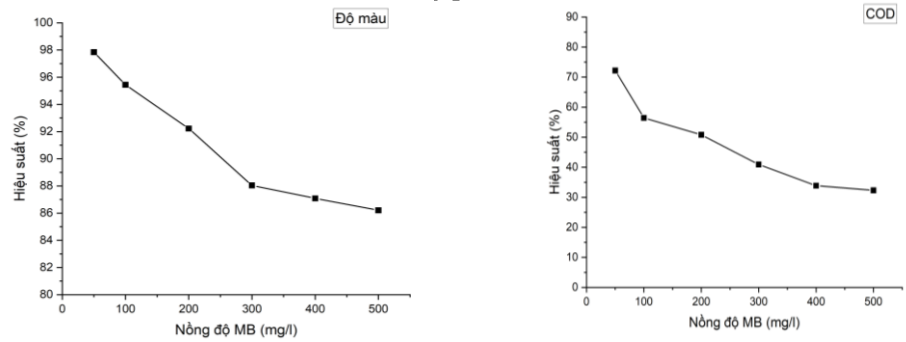


Hình 5. *Ảnh hưởng của thời gian đến hiệu suất hấp phụ MB*

3.6. Ảnh hưởng của nồng độ đến hiệu suất xử lý MB

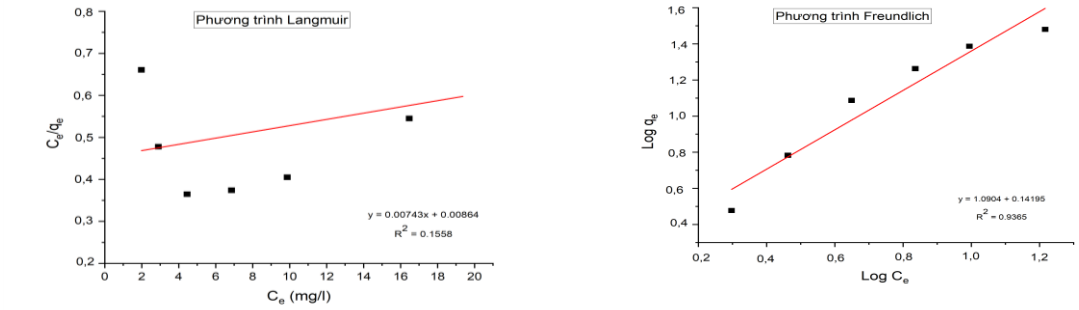
Ảnh hưởng của nồng độ MB được trình bày trong Hình 6. Khi nồng độ MB tăng từ 50 lên 500 mg/L, hiệu suất loại bỏ độ màu giảm từ 97,84% xuống 86,21%, cho thấy khả năng xử lý hiệu quả của vật liệu hấp phụ ngay cả ở nồng độ cao. Hiện tượng này có thể được giải thích bởi sự gia tăng gradient nồng độ giữa dung dịch và bề mặt vật liệu, thúc đẩy quá trình khuếch tán và hấp phụ các

phân tử MB vào các vị trí hoạt tính trên bề mặt than sinh học. Hơn nữa, hiệu suất xử lý COD đạt giá trị tối đa (~72%) tại nồng độ 50 mg/L, nhưng giảm dần khi tăng nồng độ. Sự suy giảm này có thể do hiện tượng bão hòa các vị trí hấp phụ hoặc sự cạnh tranh giữa các phân tử MB và các hợp chất hữu cơ khác, làm giảm hiệu quả loại bỏ COD. Ở nồng độ thấp, bề mặt vật liệu còn nhiều vị trí trống, quá trình hấp phụ chủ yếu diễn ra thông qua tương tác tĩnh điện giữa cation MB^+ và bề mặt mang điện tích âm, kết hợp với tương tác π–π giữa vòng thơm của MB và cấu trúc graphitic của than. Khi nồng độ tăng, gradient nồng độ lớn hơn thúc đẩy quá trình khuếch tán, tăng tốc độ hấp phụ và nâng cao hiệu suất xử lý. Tuy nhiên, khi nồng độ vượt ngưỡng tối ưu, các vị trí hấp phụ trên bề mặt vật liệu bị bão hòa, dẫn đến sự cạnh tranh giữa các phân tử MB và các hợp chất hữu cơ khác, làm giảm hiệu suất, đặc biệt đối với COD chất khó phân hủy. Kết quả này chỉ ra rằng cơ chế hấp phụ MB là sự kết hợp giữa hấp phụ vật lý và tương tác hóa học yếu.



Hình 6. *Ảnh hưởng của nồng độ đến hiệu suất xử lý MB*

3.7. Mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir và Freundlich



Hình 7. *Mô hình động học Langmuir và Freundlich cho quá trình hấp phụ MB*

Kết quả đánh giá quá trình hấp phụ xanh methylen (MB) thông qua mô hình hóa bằng phương trình Langmuir và Freundlich, được trình bày trong Hình 7 và Bảng 1, cho thấy sự khác biệt rõ rệt về mức độ phù hợp với dữ liệu thực nghiệm. Đồ thị tuyến tính hóa theo mô hình Langmuir (C_e/q_e so với C_e) biểu thị hệ số tương quan thấp ($R^2 = 0,1558$), cho thấy mô hình này không phù hợp để mô tả quá trình hấp phụ MB trong hệ nghiên cứu. Ngược lại, mô hình Freundlich thể hiện độ phù hợp cao với dữ liệu thực nghiệm, với hệ số tương quan R^2 đạt 0,9365. Bảng 1 khẳng định rằng quá trình hấp phụ diễn ra trên bề mặt không đồng nhất của vật liệu than sinh học, đồng thời cho thấy khả năng hình thành các lớp hấp phụ đa tầng. Đặc biệt, hệ số n từ mô hình Freundlich có giá trị xấp xỉ 1,00; kết quả này xác nhận rằng mô hình Freundlich là lựa chọn phù hợp hơn để mô tả cơ chế hấp phụ MB trên vật liệu được khảo sát.

Bảng 1. *Một số thông số của mô hình Langmuir và Feundlich*

Mô hình Langmuir			Mô hình Freundlich		
Q_{max}	K_L	R^2	K_F	n	R^2
11,03 (mg/g)	3,29 (l/mg)	0,1558	1,38	0,99	0,9365

4. Kết luận

Nghiên cứu đã chế tạo vật liệu than sinh học từ rác thải dệt may ở ba dải nhiệt độ khác nhau 400, 600 và 800 °C. Kết quả thử nghiệm khả năng hấp phụ đối với thuốc nhuộm MB trong nước cho thấy hiệu suất hấp phụ tối ưu là 97,97% cho độ màu và 68,38% cho COD với vật liệu được nhiệt phân ở nhiệt độ 600 °C, pH = 9, khối lượng vật liệu 0,4 g, nồng độ MB ban đầu 100 mg/L và thời gian hấp phụ 90 phút. Quá trình hấp phụ tuân theo mô hình Freundlich với hệ số tương quan R^2 = 0,9365 và hằng số KF = 1,38, xác nhận cơ chế hấp phụ đa lớp trên bề mặt không đồng nhất. Nghiên cứu này mở ra triển vọng ứng dụng vật liệu carbon nhiệt phân từ rác thải công nghiệp dệt may trong xử lý nước thải, góp phần quan trọng vào việc quản lý chất thải rắn và bảo vệ môi trường. Tuy nhiên, nghiên cứu giới hạn ở một thuốc nhuộm, điều kiện phòng thí nghiệm, chưa đánh giá tái sử dụng hay tối ưu hóa nhiệt độ đầy đủ. Các nghiên cứu tiếp theo nên thử nghiệm trên nước thải thực tế, tối ưu hóa bằng kích hoạt hóa học, đánh giá tái sử dụng, chi phí-lợi ích và mở rộng ứng dụng xử lý kim loại nặng, hướng tới kinh tế tuần hoàn và bảo vệ môi trường.

Lời cám ơn

Bài báo được thực hiện thông qua đề tài mã số: B2024-TNA-07 do Bộ Giáo dục và Đào tạo tài trợ kinh phí.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] P. Pattnaik and G. S. Dangayach, "Analysis of Influencing Factors on Sustainability of Textile Wastewater: a Structural Equation Approach," *Water. Air. Soil Pollut.,* vol. 230, no. 7, 2019, Art. no. 156.

[2] S. Benkhaya, S. M'rabet, and A. E. Harfi "A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes," *Inorganic Chemistry Communications,* vol. 115, pp. 107-891, 2020.

[3] G. A. Mahmoud, S. F. Mohamed, and H. M. Hassan, "Removal of methylene blue dye using biodegradable hydrogel and reusing in a secondary adsorption process," *Desalination and Water Treatment,* vol 54, pp. 2765–2776, 2015.

[4] T. Q. H. Nguyen, K. T. Le, M. K. Nguyen, and T. N. H. Le, "Potential of Biochar Production from Agriculture Residues at Household Scale: A Case Study in Go Cong Tay District, Tien Giang Province, Vietnam," *Environment and Natural Resources Journal,* vol. 16, no. 2, pp. 68-78, 2018.

[5] S. E. Ibitoye, C. Loha, R. M. Mahamood, T.-C. Jen, M. Alam, and I. Sarkar, "An overview of biochar production techniques and application in iron and steel industries," *Bioresour Bioprocess,* vol. 11, 2024, Art. no. 66.

[6] A. E. Nemr, O. Abdelwahab, A. El-Sikaily, and A. Khaled, "Removal of direct blue-86 from aqueous solution by new activated carbon developed from orange peel," *Journal of Hazardous Materials,* vol. 161, pp. 102-110, 2009.

[7] M. N. Chong, B. Jin, C. W. K. Chow, and C. Saint, "Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review," *Water Research,* vol. 44, no. 10, pp. 2997–3027, 2010.

[8] K. Y. Foo and B. H. Hameed, "Coconut husk derived activated carbon via microwave induced activation: Effects of activation agents, preparation parameters and adsorption performance," *Chemical Engineering Journal,* vol. 184, pp. 57 - 65, 2012.

[9] R. Ahmad, "Studies on adsorption of crystal violet dye from aqueous solution onto coniferous pinus bark powder (CPBP)," *Journal of Hazardous Materials,* vol. 171, pp. 767 - 773, 2009.

[10] A. I. Abd-Elhamid *et al.,* "Enhanced removal of cationic dye by eco-friendly activated biochar derived from rice straw," *Aplied Water Science,* vol. 10, pp. 10 - 45, 2020.

[11] A. Mittal, L. Kurup, and J. Mittal, "Freundlich and Langmuir adsorption isotherms and kinetics for the removal of Tartrazine from aqueous solutions using hen feathers," *Journal of Hazardous Materials,* vol. 146, pp. 243–248, 2007.

[12] T. D. Nguyen, D. D. Dang, and T. T. T. Phan, "Propose a research model: Factors affecting the logistics costs of textile and garment export enterprises in Vietnam," *HCMCOUJS-Economics and Business Administration,* vol. 19, no. 9, pp. 31 - 83, 2024.

[13] D. Chang, "Second: Redesigning the Textile Recycling Experience Using a Circular Economy," honors thesis, Texas State University, 2020.

[14] T. H. Nguyen, T. H. Khuat, T. M. Ngo, T. T. T. Nguyen, and T. T. Phan, "Study on Evaluating the Waste Gas Treatment Performance of the Incinerator in the Trial Operation Phase of the Soc Son

Waste-to-Energy Plant and Proposing Solutions to Improve Efficiency," *TNU Journal of Science and Technology,* vol. 228, no. 14, pp. 272 - 279, 2023.

[15]T. B. N. Duong, T. M. L. Nguyen, and T. T. Nguyen, "Study on the adsorption capacity of Methylene blue dye of adsorbent material made from corn cob and corn husk," *Forest Resources and Environment Management,* vol. 2, pp. 77-81, 2013.

[16]R. Miranda, C. Sosa-Blanco, D. Bustos-Martínez, and C. Vasile, "Pyrolysis of textile wastes, Kinetics and yields," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* vol. 80, pp. 489–495, 2007.

[17] L. Arjona, I. Barrós, A. Montero, R. R. Solís, A. Pérez, M. Á. Martín-Lara, G. Blázquez, and M. Calero, "Pyrolysis of textile waste: A sustainable approach to waste management and resource recovery," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 12, no. 6, 2024, Art. no. 114730.

[18]Q. D. Do, D. T. Bui, V. S. Nguyen, and T. C. Vo, "Production of biocarcoal from cassava skin waste application as methylene blue adsorptor in wastewater," *Journal of Science and Technology, Ho Chi Minh City University of Industry,* no. 66, pp. 22-29, 2023.

[19] M. A. Mokhtari and H. A. Sabzi, "3D porous bioadsorbents based on chitosan/alginate/cellulose nanofibers as efficient and recyclable adsorbents of anionic dye," *Carbohydrate Polymers,* vol. 265, 2021, Art. no. 118075.

[20]C. M. S. N. E. Mousa, V. R.-E. Pătescu, C. Onose, C. Tardei, D. Culiţă, O. Oprea, and D. Patroi, "Pb^{2+} removal from aqueous synthetic solutions by calcium alginate and chitosan coated calcium alginate," *Reactive and Functional Polymers,* vol. 109, pp. 137-150, 2016, doi: 10.1016/j.reactfunctpolym. 2016.11.001.

[21]S. R. Al-Mhyawi, N. A. Abdel-Tawab, and R. M. E. Nashar, "Synthesis and Characterization of Orange Peel Modified Hydrogels as Efficient Adsorbents for Methylene Blue (MB)," *Polymers,* vol. 15, 2022, doi: 10.3390/polym15020277.

[22]X. He, Z. Liu, W. Niu, L. Yang, T. Zhou, D. Qin, Z. Niu, and Q. Yuan, "Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of gas and biochar obtained from pyrolysis of crop residues," *Energy,* vol. 143, pp. 746-756, 2021.

[23]H. Li, V. L. Budarin, J. H. Clark, M. North, and X. Wu, "Research on adsorption of methylene blue in aqueous environment using activated carbon made from durian peels," *Journal of Hazardous Materials,* vol. 29, no. 2, 2023, Art. no. 129174.

[24]G. Crini and P. M. Badot, "Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature," *Progress in Polymer Science,* vol. 33, no. 4, pp. 399 - 447, 2008, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2007. 11.001.