



Nghiên cứu chế tạo cacbon hoạt tính từ rác thải nhựa polyethylene terephthalate (PET) và ứng dụng loại bỏ phẩm màu hữu cơ trong nước

Fabrication of activated carbon from polyethylene terephthalate plastic waste (PET) and their application for the removal of organic dyes in aqueous solution

Nguyễn Trần Hùng^{1,*}, Nguyễn Thị Linh², Nguyễn Thị Hồng Phượng²

¹ Viện Hóa Học và Vật liệu, 17 Hoàng Sâm, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội

² Viện Kỹ thuật Hóa học, Đại học Bách Khoa Hà Nội

*Email: tran75@vienhoahocvatlieu.com.vn

ARTICLE INFO

Received: 31/5/2022

Accepted: 20/6/2022

Published: 23/6/2022

Keywords:

Activated carbon, plastic wastes, polyethylene terephthalate, physical activation, adsorption

ABSTRACT

Synthetic plastics have been considered as non-biodegradable materials. Polyethylene terephthalate (PET), one types of synthetic plastics, is commonly employed in many daily products. However, the end-use of the PET-based products is usually discarded to the environment, which causes serious problems to the ecosystem and human health. In this work, PET plastic waste was utilized to fabricate the activated carbon using the physical activating approach. The CO₂ gas was used as activating agent. The effects of activating temperature, carbonizing and activating time on the surface areas of activated carbon were investigated. The prepared activated carbon was well-characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), FTIR, and BET. The resultant activated carbon prepared from the FET plastic waste revealed high absorption toward methylene blue in aqueous solution in a wide range of pH solutions. The fabrication of activated carbon from the plastic waste not only address the environmental issues, but also produce high-value activated carbon for the environmental remediation.

Giới thiệu chung

Nhựa được sử dụng phổ biến trong mọi mặt của đời sống sinh hoạt và sản xuất như làm bao gói, đồ gia dụng, trong xây dựng, giao thông, công nghiệp điện, điện tử và các ứng dụng khác. Năm 2017, trên thế giới sản xuất được hơn 348 triệu tấn nhựa và dự đoán tăng lên gấp 4 lần vào năm 2050 [1]. Kể từ sau khi được đưa vào sản xuất và ứng dụng dân dụng vào những năm 1950, thì có khoảng 6,3 tỉ tấn nhựa đã được thải ra, trong đó có khoảng 79% là được chôn lấp và thải ra

môi trường [2]. Rác thải nhựa rất khó bị phân huỷ trong môi trường tự nhiên. Mỗi loại chất nhựa có số năm phân huỷ khác nhau với thời gian rất dài, hàng trăm năm có khi tới hàng nghìn năm. Rác thải nhựa gây ra nhiều ảnh hưởng xấu đến môi trường sinh thái và sức khỏe con người, do đó việc tìm ra giải pháp xử lý rác thải nhựa là một trong những vấn đề hết sức cấp thiết. Các nhà máy xử lý và tái sinh nhựa thương mại hiện nay chủ yếu là sử dụng các phương pháp xử lý và tái sinh cơ học. Hiện nay tại châu Âu hơn 5 triệu tấn rác thải nhựa được tái sinh bằng phương pháp cơ học,

<https://doi.org/10.51316/jca.2022.024>

chỉ khoảng 50.000 tấn được xử lý và tái sinh bằng phương pháp hóa học [3]. Phương pháp xử lý cơ học thường phức tạp do cần những dây chuyền thu gom riêng biệt các chất thải dẫn đến chi phí khá cao. Bên cạnh đó công nghệ xử lý và tái sinh bằng hóa học được cho là có tính kinh tế, có khả năng tái sinh triệt để. Rất nhiều các nhà khoa học gần đây trên thế giới đã tập trung vào nghiên cứu phát triển công nghệ tái sinh rác thải nhựa thành các vật liệu trên cơ sở cacbon như graphene, ống nano cacbon và đặc biệt là cacbon hoạt tính [4-9]. Công nghệ được sử dụng khá phổ biến để tái sinh rác thải nhựa thành cacbon hoạt tính là hoạt hóa vật lý [10-13]. Nhóm của Qiao đã sử dụng dòng hơi nước nóng để hoạt hóa PVC trong chế tạo cacbon hoạt tính [4]. Rác thải nhựa PET cũng được sử dụng khá phổ biến làm nguyên liệu đầu vào để chế tạo cacbon hoạt tính [7, 14-17]. Đầu tiên nhựa PET được cacbon hóa ở nhiệt độ 700°C trong môi trường khí N₂ với hiệu suất cacbon đạt được khoảng 20% [5]. Phương pháp hoạt hóa vật lý còn sử dụng CO₂ để hoạt hóa cacbon từ nhựa PET. Almaza'n-Almaza'n và đồng nghiệp đã thành công trong việc thay đổi cấu trúc của cacbon hoạt tính bằng cách kiểm soát một số điều kiện công nghệ thu được cacbon hoạt tính có diện tích bề mặt, cấu trúc lỗ xốp và thể tích hấp phụ cao [6]. Tuy nhiên có thể thấy khi tiến hành thực hiện theo phương pháp hoạt hóa vật lý, các điều kiện chế tạo như thời gian dài, nhiệt độ cacbon hóa và hoạt hóa lớn, điều đó gây khó khăn và tiêu tốn nhiều năng lượng [16, 18].

Bài báo này trình bày nghiên cứu chế tạo cacbon hoạt tính từ nhựa thải PET theo phương pháp hoạt hóa vật lý bằng khí CO₂ để tìm ra được thời gian, nhiệt độ tối ưu. Đồng thời trình bày một số kết quả ứng dụng của cacbon hoạt tính thu được trong việc hấp phụ, xử lý màu của thuốc nhuộm xanh methylene trong nước.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Nguyên liệu

Nhựa thải PET được thu gom là các vỏ chai nhựa. Sau đó các chai nhựa được cắt nhỏ từ 1-3mm, rửa sạch và sấy khô.

Hóa chất, thiết bị

Hóa chất: Iod tinh thể, Na₂S₂O₃.5H₂O, hồ tinh bột, khí CO₂, xanh methylene, nước cất.

Thiết bị: Lò nung ống Tube Furnace 21100, tủ sấy, máy khuấy từ, cân phân tích, máy đo quang UV-VIS.

Chế tạo cacbon hoạt tính

Giai đoạn cacbon hóa: Cân một lượng vừa đủ nhựa PET cho vào thuyền sứ, đưa thuyền sứ vào lò nung ống. Trong suốt quá trình nung, môi trường trong lò ống là môi trường có thổi khí CO₂ liên tục. Giai đoạn cacbon hóa được tiến hành trong thời gian và nhiệt độ xác định. Sau khi nung xong, sản phẩm cacbon hóa thu được sẽ được làm nguội [7, 15].

Công thức tính hiệu suất cacbon hóa:

$$H = \frac{m_{\text{than hóa}}}{m_{\text{nhựa}}} \cdot 100\%$$

Giai đoạn hoạt hóa: Sản phẩm cacbon hóa được nung trong lò ống (môi trường khí CO₂), quá trình được tiến hành trong thời gian và nhiệt độ xác định [7, 15]. Sau thời gian hoạt hóa, sản phẩm được làm nguội. Rồi tiếp tục nghiền cacbon hoạt tính thu được thành bột mịn. Các mẫu cacbon hoạt tính dạng bột mịn được đem đi xác định chỉ số iod và lựa chọn ra mẫu tốt nhất đem đi phân tích đặc trưng cấu trúc và đo diện tích bề mặt.

Công thức tính hiệu suất hoạt hóa:

$$H = \frac{m_{\text{cacbon hoạt tính}}}{m_{\text{than hóa}}} \cdot 100\%$$

Quá trình hoạt hóa vật lý được thực hiện bằng cách sử dụng khí CO₂, khí này sẽ đóng vai trò là khí hoạt hóa. CO₂ sẽ phản ứng với cacbon của nguyên liệu để tạo ra các lỗ xốp làm tăng diện tích bề mặt riêng và còn có tác dụng ngăn cản sự xâm nhập của khí oxi (O₂) [16].



Đánh giá đặc trưng cấu trúc vật liệu

Đặc điểm hình thái cấu trúc bề mặt của cacbon hoạt tính được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) của hãng HITACHI S-4800 (Nhật Bản). Các nhóm chức năng trên bề mặt cacbon hoạt tính đã chế tạo được khảo sát bằng phổ hồng ngoại Fourier (FTIR) của hãng Perkin Elmer, model Spectrum Two (Anh). Đo nhiễu xạ tia X (XRD) bằng máy của hãng X'Pert PRO Panalytical PW3040/60 (Hà Lan) với nguồn bức xạ Cu-K α 0,15405 nm được sử dụng để nghiên cứu độ kết tinh của mẫu. Phương pháp hấp phụ - giải hấp phụ Nitơ sử dụng máy Tristar 3000-Micromeritics được sử dụng để xác định diện tích bề mặt riêng BET của mẫu cacbon hoạt tính.

Khảo sát khả năng hấp phụ xanh methylene (MB) của vật liệu tổng hợp

Ảnh hưởng của pH dung dịch: Cho 10mg cacbon hoạt tính hấp phụ trong 10ml dung dịch MB 10ppm có các pH khác nhau, thời gian hấp phụ 20 phút.

Ảnh hưởng của lượng cacbon hoạt tính: Cho các lượng cacbon hoạt tính là 10mg, 20mg, 30mg, 40mg, 50mg thực hiện hấp phụ trong 10ml dung dịch MB 10ppm tại pH = 7 trong thời gian 20 phút.

Ảnh hưởng của thời gian hấp phụ: Cho 10mg cacbon hoạt tính hấp phụ trong 10ml dung dịch MB 10ppm (pH = 7) với các thời gian khác nhau: 15 phút, 20 phút, 25 phút, 30 phút, 35 phút, 40 phút.

Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch MB: Cho 10mg cacbon hoạt tính hấp phụ trong 10ml dung dịch MB (pH = 7) với các nồng độ khác nhau trong thời gian 35 phút.

Các mẫu hấp phụ được tiến hành trên máy khuấy từ. Sau khuấy xong thì lọc bỏ phần rắn, dung dịch thu được thực hiện đo độ hấp thụ quang bằng máy UV-VIS.

Từ đó tính được hiệu suất hấp phụ của cacbon hoạt tính được chế tạo theo công thức:

$$H = \frac{C_o - C}{C_o} \cdot 100\%$$

Trong đó:

C_o , C lần lượt là nồng độ ban đầu và sau khi hấp phụ của MB (ppm)

H: hiệu suất (%)

Dung lượng hấp phụ cực đại của cacbon hoạt tính được xác định dựa vào đồ thị của phương trình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir dạng tuyến tính:

$$\frac{C_{cb}}{q} = \frac{1}{b \cdot q_{max}} + \frac{1}{q_{max}} \cdot C_{cb} \quad (1)$$

Trong đó:

q , q_{max} : dung lượng hấp phụ cân bằng và dung lượng hấp phụ cực đại (mg/g)

b : hằng số Langmuir

C_{cb} : nồng độ chất bị hấp phụ ở trạng thái cân bằng (ppm)

Kết quả và thảo luận

Khảo sát các ảnh hưởng đến chế tạo cacbon hoạt tính từ nhựa PET bằng phương pháp hoạt hóa vật lý

Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian đến giai đoạn cacbon hóa

Bảng 1: Ảnh hưởng của nhiệt độ đến hiệu suất cacbon hóa

Mẫu	Nhiệt độ (°C)	Thời gian (phút)	Hiệu suất (%)
4015	400	15	13.98
4515	450	15	13.67
5015	500	15	13.69
5515	550	15	13.45
6015	600	15	12.5

Khảo sát nhiệt độ nung từ 400°C đến 600°C trong thời gian nung 15 phút có thể thấy hiệu suất giảm dần và thấy rõ sự giảm hiệu suất đột ngột ở 600°C. Điều này có thể được giải thích là do trước 600°C các chất dễ bay hơi và hơi nước đã được giải phóng khỏi nguyên liệu và đến 600°C bắt đầu có sự hình thành lỗ xốp làm phát triển cấu trúc mao quản của cacbon hoạt tính nên khối lượng có sự thay đổi rõ rệt. Từ đó lựa chọn nhiệt độ 550°C làm nhiệt độ của quá trình cacbon hóa.

Bảng 2: Ảnh hưởng của thời gian đến hiệu suất cacbon hóa

Mẫu	Nhiệt độ (°C)	Thời gian (phút)	Hiệu suất (%)
5515	550	15	13.45
5520	550	20	13.28
5525	550	25	13.1
5530	550	30	12.97

Khảo sát thời gian nung ở 550°C từ 15 đến 30 phút thấy rằng khi thời gian tăng thì hiệu suất cacbon hóa giảm dần. Điều này có thể giải thích rằng khi thời gian càng tăng thì sự phân hủy cấu trúc và các chất dễ bay hơi càng lớn. Tuy nhiên tại 550°C hiệu suất quá trình không có sự thay đổi lớn, vì vậy lựa chọn thời gian của giai đoạn cacbon hóa là 15 phút.

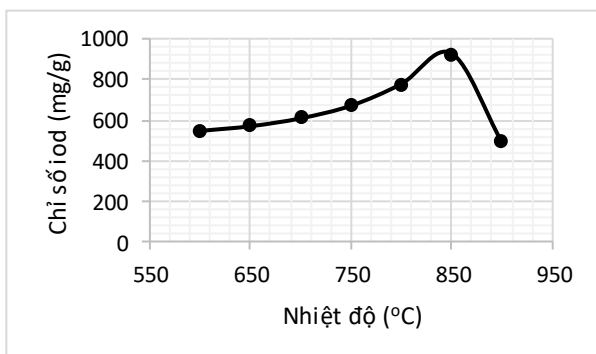
Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian đến giai đoạn hoạt hóa

Từ kết quả Bảng 3 và Hình 1 thấy rằng, từ khoảng nhiệt độ 600°C đến 800°C hiệu suất và chỉ số lod không có sự thay đổi đáng kể. Tuy nhiên khi đạt đến nhiệt độ 850°C chỉ số lod tăng lên rõ rệt, có thể giải thích rằng tại nhiệt độ 850°C cấu trúc mao quản được hoàn thiện và khả năng hấp phụ lod đạt hiệu quả cao nhất. Ở nhiệt độ 900°C, hiệu suất và chỉ số lod giảm đột ngột chứng tỏ quá trình đã chuyển sang giai đoạn tro hóa,

các lỗ mao quản bị phá vỡ ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng của cacbon hoạt tính tạo thành. Vì vậy lựa chọn 850 °C là nhiệt độ thích hợp cho quá trình hoạt hóa.

Bảng 3: Ảnh hưởng của nhiệt độ đến quá trình hoạt hóa

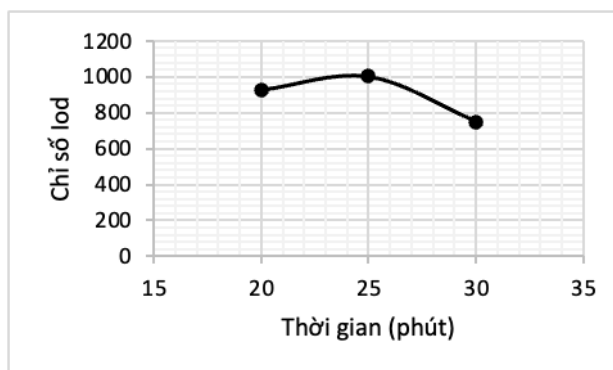
Mẫu	Nhiệt độ (°C)/ thời gian (phút) cacbon hóa	Nhiệt độ hoạt hóa (°C)	Thời gian hoạt hóa (phút)	Hiệu suất (%)
AC6020	550/15	600	20	11,31
AC6520	550/15	650	20	11,30
AC7020	550/15	700	20	11,21
AC7520	550/15	750	20	9,79
AC8020	550/15	800	20	9,5
AC8520	550/15	850	20	8,69
AC9020	550/15	900	20	8,09



Hình 1: Đồ thị thể hiện sự thay đổi chỉ số iod khi nhiệt độ hoạt hóa thay đổi

Bảng 4: Ảnh hưởng của thời gian đến quá trình hoạt hóa

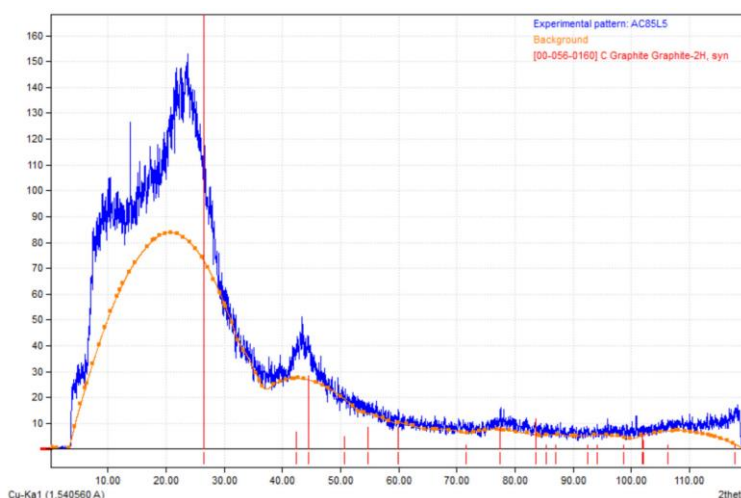
Mẫu	Nhiệt độ (°C)	Thời gian (phút)	Hiệu suất (%)	Chỉ số iod (mg/g)
AC8520	850	20	8,69	927,1
AC8525	850	25	8,57	1003,3
AC8535	850	30	8,02	749,3



Hình 2: Đồ thị thể hiện sự thay đổi chỉ số iod khi thời gian hoạt hóa thay đổi

Từ kết quả thu được trong Bảng 4 và Hình 2 thấy rằng trong thời gian hoạt hóa 25 phút có hiệu suất thay đổi không đáng kể so với thời gian 20 phút và chỉ số iod đạt giá trị cao nhất. Chỉ số iod và hiệu suất bị giảm ở thời gian 30 phút, có thể thấy rằng hệ thống mao quản được hình thành đã bị tro hóa làm cho diện tích bề mặt riêng bị giảm. Vì vậy lựa chọn 25 phút là thời gian hoạt hóa thích hợp.

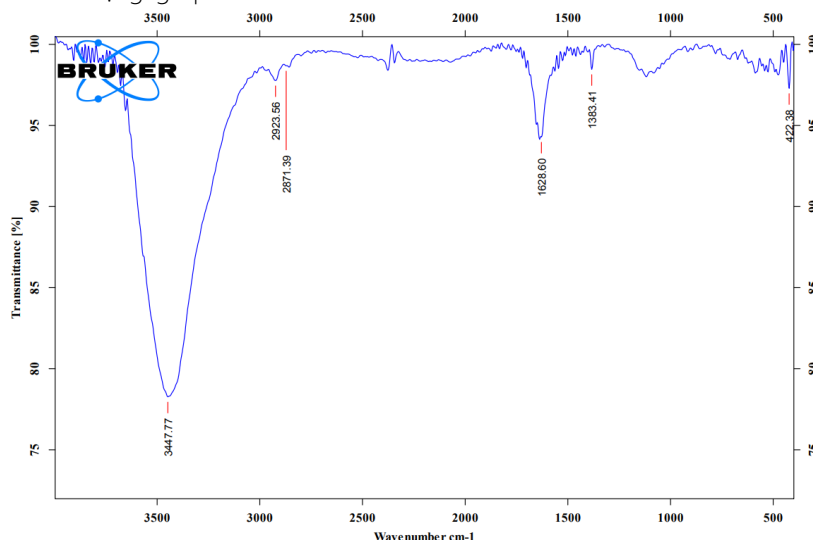
Đặc trưng cấu trúc của cacbon hoạt tính chế tạo từ nhựa thải PET theo phương pháp hoạt hóa vật lý



Hình 3: Giải đồ XRD của mẫu cacbon hoạt tính chế tạo được từ nhựa PET bằng phương pháp hoạt hóa vật lý khi hoạt hóa ở 850°C trong 20 phút

Từ Hình 3 cho thấy giản đồ nhiễu xạ tia X của mẫu cacbon hoạt tính đã chế tạo. Đỉnh nhiễu xạ có cường độ tăng trong phạm vi từ 10-30 độ là do sự hiện diện của các lỗ rỗng liên tục làm tán xạ bức xạ tia X [18]. Và sau đó các đỉnh nhiễu xạ XRD yếu đi, có thể thấy rằng thành cacbon hoạt tính có dạng graphit nên có nhiều

khuyết tật trên thành dẫn đến sự giảm kết tinh graphit của cacbon hoạt tính (JCPDS no. 00-056-0160). Và như vậy, trong quá trình hoạt hóa mong muốn tạo ra nhiều khuyết tật trên thành cacbon để tăng diện tích bề mặt của cacbon hoạt tính.

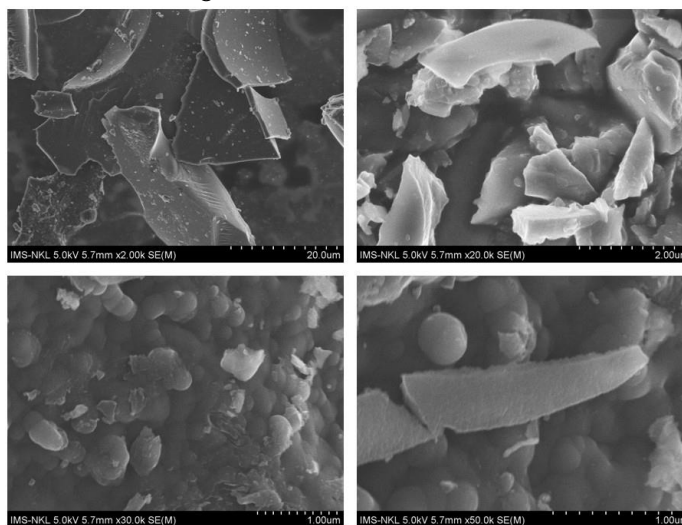


Hình 4: Phổ FTIR của mẫu cacbon hoạt tính đã chế tạo

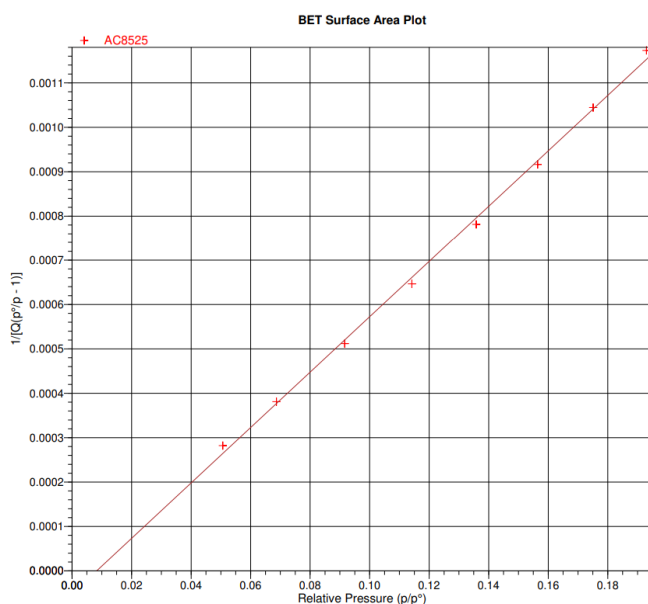
Đặc trưng bề mặt hóa học của cacbon hoạt tính được thể hiện qua phổ FTIR. Một loạt các vân phổ đặc trưng được thể hiện trong đồ thị cho thấy sự hiện diện của các nhóm chức hóa học. Vân phổ dao động tại 3447.77 cho thấy có nhóm -OH trên cấu trúc bề mặt cacbon hoạt tính [14]. Vân phổ dao động ở khoảng 2923.56 và 2871.39 cho thấy có xuất hiện liên kết C-H của vòng thơm benzen và của ankan. Vân phổ dao động ở khoảng 1600 đặc trưng cho liên kết C=C, tại vân phổ ở khoảng 1300 đặc trưng cho liên kết C-O. Sự xuất hiện của các nhóm chức -OH có thể là do hấp phụ của hơi ẩm của các cacbon hoạt tính trong điều kiện

bảo quản thông thường, còn sự xuất hiện của nhóm chức C-O nhiều khả năng là do phản ứng giữa C và CO₂ tạo thành cấu trúc xốp và có sự xuất hiện của liên kết C-O. Kết quả cho thấy cacbon hoạt tính thu được thích hợp cho sự hấp phụ các hợp chất hữu cơ bao gồm cả thuốc nhuộm hữu cơ.

Hình ảnh bề mặt cacbon hoạt tính chế tạo từ nhựa thải PET được thể hiện qua ảnh chụp SEM. Có thể thấy rằng bề mặt của cacbon hoạt tính tương đối nhẵn, chưa thấy rõ sự hiện diện của các lỗ xốp, mao quản trên bề mặt.



Hình 5: Ảnh SEM của mẫu cacbon hoạt tính chế tạo được từ nhựa PET ở các độ phân giải khác nhau.

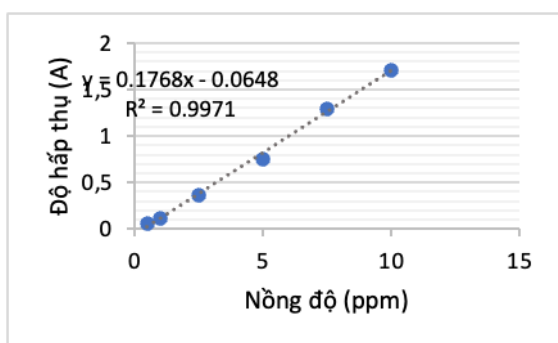


Hình 6: Đẳng nhiệt hấp phụ nito của cacbon hoạt tính chế tạo từ nhựa thải PET ở 77,3K

Diện tích bề mặt là một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng hấp phụ của cacbon hoạt tính. Về nguyên lý đó là đẳng nhiệt hấp phụ nito cho xác định thể tích lớp phủ đơn phân tử. Khi biết diện tích che phủ của N₂ ở trạng thái hấp phụ có thể tính được bề mặt riêng của chất hấp phụ [19]. Với kết quả đo diện tích bề mặt BET thấy được rằng mẫu cacbon hoạt tính cacbon hóa ở 550°C trong 15 phút, hoạt hóa ở 850°C trong 25 phút cho diện tích bề mặt riêng là 703,4 m²/g.

Khảo sát khả năng hấp phụ xanh metylene (MB) của cacbon hoạt tính chế tạo từ nhựa thải PET

Xây dựng đường chuẩn xác định nồng độ MB

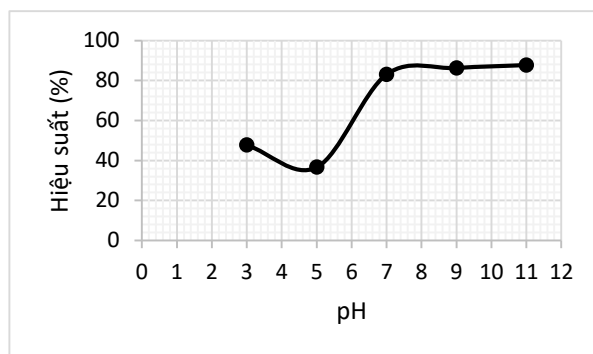


Hình 7: Đồ thị đường chuẩn của dung dịch MB

Phương trình đường chuẩn của MB:

$$y = 0,1768x - 0,0648 \text{ với hệ số tương quan } R^2 = 0,9971$$

Ảnh hưởng của pH dung dịch đến hiệu quả hấp phụ



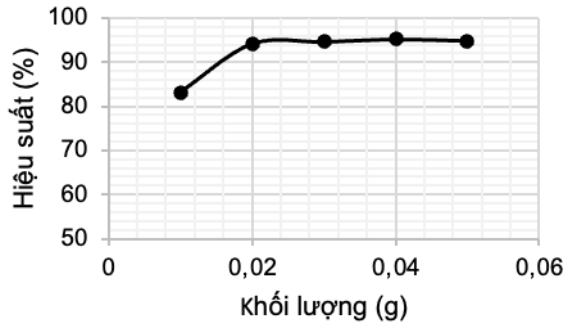
Hình 8: Đồ thị thể hiện sự thay đổi hiệu suất hấp phụ MB khi pH thay đổi

Từ Hình 8 thấy rằng khi pH < 7 (môi trường axit) thì hiệu suất hấp phụ MB của cacbon hoạt tính chỉ dưới 50% nhưng khi pH ≥ 7 thì hiệu suất hấp phụ đạt trên 80%. Khảo sát cho thấy cacbon hoạt tính hấp phụ tốt trong môi trường pH ≥ 7. Do vậy các quá trình tiếp theo sẽ được tiến hành khảo sát trong môi trường trung tính, điều này phù hợp với điều kiện thực tế khi xử lý nước thải dệt nhuộm trong đời sống.

Ảnh hưởng của lượng cacbon hoạt tính đến hiệu quả hấp phụ

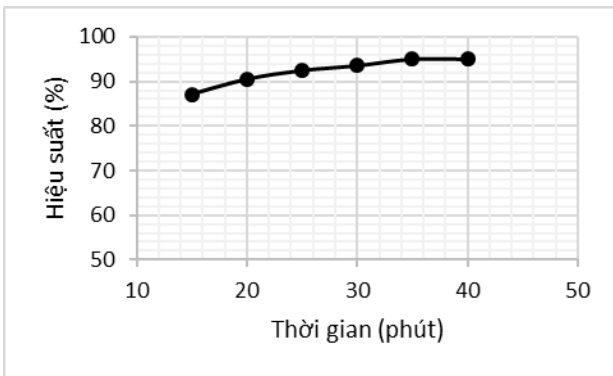
Từ kết quả khảo sát cho ta thấy, khối lượng cacbon hoạt tính càng lớn thì hiệu suất hấp phụ càng tăng. Cụ thể với khối lượng than 0,01g chỉ cho hiệu quả hấp phụ đạt 83,212% trong khi đó khi tăng dần lượng than hấp phụ lên 0,02 hiệu suất đạt 94% và không có sự thay đổi nhiều khi tăng dần khối lượng than hấp phụ. Vì vậy

lượng than 0,02g là điều kiện thích hợp để cân và khảo sát các quá trình hấp phụ tiếp theo.



Hình 9: Đồ thị thể hiện sự thay đổi hiệu suất hấp phụ MB khi lượng cacbon thay đổi

Ảnh hưởng của thời gian hấp phụ đến hiệu quả hấp phụ

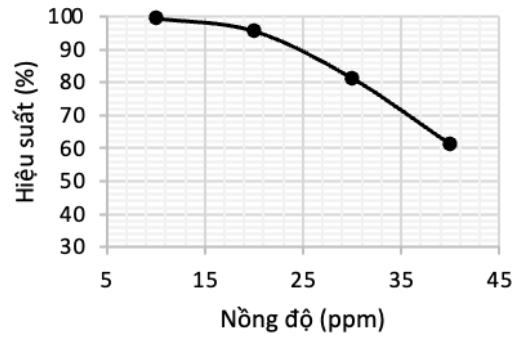


Hình 10: Đồ thị thể hiện sự thay đổi hiệu suất hấp phụ khi thời gian hấp phụ thay đổi

Từ kết quả thu được ta thấy hiệu suất hấp phụ tỉ lệ thuận với thời gian hấp phụ, thời gian hấp phụ càng tăng thì hiệu suất tăng và dần ổn định. Cụ thể, trong thời gian hấp phụ từ 15 đến 35 phút, hiệu suất tăng dần từ 87,11% đến 95,03% và đến 40 phút thì hiệu suất hấp phụ ổn định ở 95,03%. Như vậy ở thời gian 35 phút thì quá trình hấp phụ đạt cân bằng.

Ảnh hưởng của nồng độ MB đến hiệu quả hấp phụ

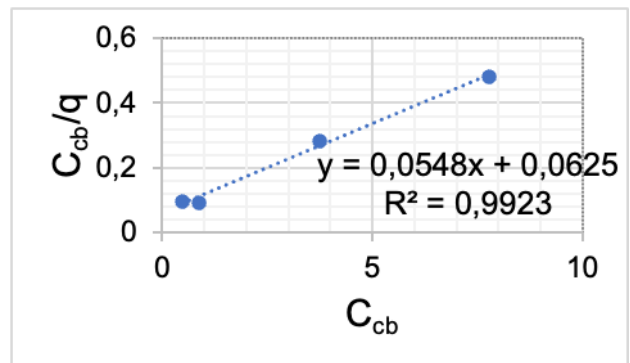
Từ kết quả thực nghiệm cho thấy trong cùng một điều kiện, khả năng hấp phụ giảm dần khi tăng dần nồng độ MB. Khi tăng nồng độ dung dịch từ 10ppm đến 20ppm hiệu suất giảm không đáng kể (khoảng 4%) nhưng khi nồng độ tăng đến 30% hiệu suất hấp phụ màu đã giảm xuống 81,34% và khi nồng độ đạt 40% hiệu suất hấp phụ chỉ còn 61,18%.



Hình 11: Đồ thị thể hiện sự thay đổi hiệu suất hấp phụ khi nồng độ MB thay đổi

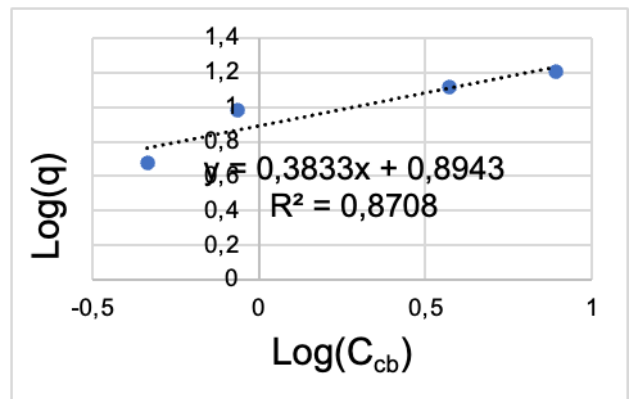
Khảo sát dung lượng hấp phụ MB của cacbon hoạt tính chế tạo từ nhựa PET

Dựa trên kết quả ảnh hưởng của nồng độ MB đến hiệu quả hấp phụ, ta nghiên cứu mô hình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir và Freundlich.



Hình 12: Đồ thị thể hiện đường đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir của cacbon hoạt tính đối với MB

Như vậy phương trình đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir là $y = 0,0548x + 0,0625$ với hệ số tương quan $R^2 = 0,9923$. Suy ra dung lượng hấp phụ cực đại tính được là $q_{max} = 18,284 \text{ mg/g}$



Hình 13: Đồ thị thể hiện đường đẳng nhiệt hấp phụ Freundlich của cacbon hoạt tính đối với MB

Phương trình đường đẳng nhiệt hấp phụ Freundlich là: $y = 0,3833x + 0,8943$ với hệ số tương quan R^2 là 0,8708.

Kết quả thu được từ hai mô hình cho thấy rằng cacbon hoạt tính đã chế tạo có quá trình hấp phụ phù hợp với mô hình hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir hơn. Như vậy sự hấp phụ MB của cacbon hoạt tính là hấp phụ đơn lớp và hấp phụ xảy ra như nhau tại mọi vị trí trên bề mặt vật liệu.

Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã chế tạo thành công vật liệu cacbon hoạt tính từ nhựa thải PET theo phương pháp hoạt hóa vật lý bằng khí CO_2 ở điều kiện cụ thể: than hóa ở 550°C trong 15 phút, hoạt hóa ở 850°C trong 25 phút. Diện tích bề mặt riêng của cacbon hoạt tính là $703,4 \text{ m}^2/\text{g}$. Cacbon hoạt tính từ nhựa thải PET có khả năng hấp thụ tốt đối với MB ở môi trường có $\text{pH} \geq 7$. Quá trình hấp phụ MB của cacbon hoạt tính được mô tả theo đẳng nhiệt hấp phụ Langmuir với dung lượng hấp phụ cực đại là $18,284 \text{ mg/g}$.

Tài liệu tham khảo

1. Qureshi, M.S., et al., *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 152 (2020) 104804. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104804>
2. Geyer, R., J.R. Jambeck, and K.L. Law, *Sci. Adv.* 7 3 (2017) e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
3. d'Ambrières, W., *Field Act. Sci. Rep. J. Field Act.* 19 (2019) 12-21.
4. Qiao, W., et al., *Carbon* 7 42 (2004) 1327-1331. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.01.035>
5. Bóta, A., et al., *Langmuir* 24 13 (1997) 6502-6509. <https://doi.org/10.1021/la9700883>
6. Almazán-Almazán, M.C., et al., *Fuel Process. Technol.* 2 91 (2010) 236-242. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.003>
7. Esfandiari, A., T. Kaghazchi, and M.J.J.o.t.T.I.o.C.E. Soleimani 4 43 (2012) 631-637. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2012.02.002>
8. Parra, J., et al., in *Studies in Surface Science and Catalysis*, Elsevier, 2002, p. 537-543. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(02\)80178-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(02)80178-1)
9. Bazargan, A., C.W. Hui, and G.J.P.c.h.p.s. McKay, *Porous carbons from plastic waste*, 2013, p. 1-25. https://doi.org/10.1007/12_2013_253
10. Almazan-Almazan, M.C., et al. 23 110 (2006) 11327-11333. <https://doi.org/10.1021/jp056946i>
11. Cho, M.-H., et al. 2 24 (2010) 1389-1395. <https://doi.org/10.1021/ef901127v>
12. Zhou, J., et al. 12 68 (2018) 1269-1277. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1460282>
13. Zhang, Z.-a., et al. 116 (2009) 91-95. <https://doi.org/10.1007/s11771-009-0015-5>
14. Mendoza-Carrasco, R., et al. 181 (2016) 522-535. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.070>
15. Ali, E., K. Tahereh, and S.J.R.J.C.E. 15 (2011) 433-437.
16. Sanal, A., et al. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2017. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/176/1/012055>
17. Domingo-García, M., et al. 12 195 (2010) 3810-3813. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.090>
18. Bratek, W., et al. 100 (2013) 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.12.021>
19. T. P. Mai, M.X.K., A. T. Phạm, *Than hoạt tính và ứng dụng*, NXB Khoa học kỹ thuật, 2020.