



Vật liệu carbon aerogel từ giấy phế thải và khả năng hấp phụ VOC

Carbon aerogel materials synthesized from recycle paper and their VOC adsorption capacity

Lê Hữu Thành¹, Lê Thái Bình⁴, Lê Minh Trí¹, Phạm Thị Thanh Nhân³, Võ Hoàng Tùng², Nguyễn Trần Hùng^{1*}

¹ Viện Hóa học – Vật liệu/ Viện Khoa học và Công nghệ quân sự

² Viện Môi trường/ Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

³ Khoa Khoa học Cơ bản/ Trường ĐH Công Nghiệp Việt- Hưng

⁴ Khoa Xây dựng/ Trường Đại học Điện lực

*Email: tran75@vienhoahocvatlieu.com.vn

ARTICLE INFO

Received: 22/02/2023

Accepted: 02/5/2023

Published: 30/12/2023:

Keywords:

Carbon aerogel, Adsorbents material, Absorbing volatile organic compounds (VOCs)

ABSTRACT

This study presented the process of synthesizing carbon aerogel materials from waste paper for the purpose of absorbing volatile organic compounds (VOCs). The fabricated materials showed suitable properties as adsorbent materials: low density, high porosity and large surface area. The carbonization temperature and density of carbon aerogel were studied and showed a clear influence on the adsorption capacity of the materials. The adsorption capacity of the material has been tested and it is shown that it can reach 400 mg/g for toluene and acetone.

Gợi thiệu chung

Các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi (VOCs) là các chất có nhiệt độ sôi dao động từ 50 đến 260 °C dưới áp suất khí quyển [1]. Phát thải các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi là một trong những tác nhân chính gây ô nhiễm không khí. Nguồn gốc chính phát thải VOCs là từ các nhà máy lọc dầu, sản xuất nhiên liệu đốt, công nghiệp hóa chất, phân hủy trong sinh quyển và sinh khối, phát thải từ phương tiện giao thông,...[2]. Các VOCs phổ biến nhất được biết tới đó là hợp chất halogen, andehit, ancol, xeton, hợp chất thơm và ete [3]. Một trong số đó là toluene, là một VOCs điển hình, chiếm 7,5% tổng số VOCs tồn tại trong môi trường không khí. Nó không những gây độc hại tới sức khỏe con người mà còn gây ra hậu quả nghiêm trọng tới môi trường, như phá hủy tầng ôzôn, tạo ra hiện tượng

quang hóa sương quang hóa, ...[4]. Khi tiếp xúc với toluen trong không gian kín và thời gian dài sẽ gây kích ứng mắt, mũi và cổ họng, nghiêm trọng hơn là gây chóng mặt, đau đầu, suy giảm trí nhớ, thị lực và thậm chí có thể tử vong [1].

Cho đến nay, một loạt công nghệ xử lý toluene đã được áp dụng, chẳng hạn như đốt, phân hủy sinh học, hấp thụ, hấp phụ và oxy hóa có mặt chất xúc tác. Trong số các phương pháp này, hấp phụ là phương pháp được ứng dụng và xử lý hàng đầu trong nghiên cứu cũng như trong công nghiệp do chi phí xử lý rẻ, dễ dàng thu hồi các chất ô nhiễm, không tốn nhiều năng lượng. Mấu chốt của công nghệ hấp phụ là việc sử dụng các vật liệu hấp phụ có dung lượng hấp phụ cao như carbon hoạt tính, zeolit, MOFs, và một trong số đó là aerogel. [5-7]

Trong những năm gần đây, vật liệu aerogel đã và đang được quan tâm nghiên cứu và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực đời sống nói chung và khoa học nói riêng bởi các tính năng ưu việt như nhẹ, diện tích bề mặt riêng lớn và độ xốp cao [8, 9]. Aerogel là một dạng khí lẫn rắn, có tới 90% thể tích là không khí, do đó nó chỉ nặng hơn không khí 3 lần và nhẹ hơn thủy tinh tới 1.000 lần. Tuy chủ yếu là khí, nhưng aerogel có thể chịu được sức nặng gấp từ 500 đến 4.000 lần trọng lượng của nó. Nó cũng có khả năng cho không khí xuyên qua, chống cháy và có thể thấm cả dầu lẫn nước. Ngoài ra, aerogel vừa có thể làm dây dẫn điện vừa có thể trở thành một chất cách điện tốt nhất từ trước tới nay khi được pha trộn với một số vật liệu khác [10].

Có ba loại aerogel phổ biến nhất hiện nay đó là silica aerogel, carbon aerogel và aerogel oxit kim loại. Trong đó, carbon aerogel là loại được ứng dụng nhiều trong hóa học hấp phụ và xử lý khí thải, đặc biệt là các hợp chất hữu cơ dễ bay hơi VOCs bởi diện tích bề mặt lớn và độ xốp cao [11-13]. Trên thế giới, sử dụng carbon aerogel để hấp phụ hơi VOCs là một hướng nghiên cứu được quan tâm nhiều. Francisco José Maldonado-Hódar trong một nghiên cứu của mình năm 2011 được đăng trên Tạp chí Journal of Hazardous Materials đã chứng minh được khả năng hấp phụ cao của carbon aerogel tẩm Pt đối với xylene, toluene, và acetone [8]. Lixin Zhang và cộng sự đã tổng hợp vật liệu carbon aerogel lai tạp trên vật liệu khung hữu cơ-kim loại (MOF) để xử lý hơi toluene. Dung lượng hấp phụ cực đại của vật liệu với toluene đạt 511,2 mg/g [14-16].

Hiện nay, trong nước đã có một số nghiên cứu tổng hợp vật liệu carbon aerogel. Nhóm nghiên cứu của TS Nguyễn Trần Hùng, Viện Hóa học-Vật liệu, Viện Khoa học Công nghệ Quân sự đã có một số công bố chứng minh việc tổng hợp thành công vật liệu carbon aerogel từ giấy phế thải và biomass [19]. Vật liệu tổng hợp được có khối lượng riêng thấp, diện tích bề mặt cao, đường kính mao quản trung bình ở kích thước nanomet. Vật liệu đã được thử nghiệm hấp phụ các kim loại nặng trong nước và chứng minh hiệu quả cao. Tuy nhiên, việc nghiên cứu tổng hợp và ứng dụng carbon aerogel để xử lý hơi VOCs chưa được nghiên cứu nhiều. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện với mục tiêu chế tạo ra loại vật liệu hấp phụ mới, dựa trên khả năng hấp phụ cao của carbon aerogel nhằm thay thế các vật liệu cũ trong quá trình hấp phụ xử lý hơi VOCs.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Nguyên liệu tổng hợp, hóa chất

Nghiên cứu này sử dụng giấy phế thải (là các giấy thải đã in 2 mặt) làm nguyên liệu chính. Các hóa chất được sử dụng bao gồm NaOH dạng hạt, Urea (Trung Quốc), Ethanol 95% (Việt Nam) và nước cất hai lần.

Tổng hợp vật liệu

Vật liệu carbon aerogel được tổng hợp từ giấy phế thải theo quy trình sau: 13,4g urea và 1,933g NaOH được hòa tan bằng 100mL nước cất trong 1 cốc thủy tinh. 1g giấy phế thải được xé nhỏ và thêm vào dung dịch NaOH/urea đã pha ở trên, rung siêu âm hỗn hợp trong vòng 20 phút. Sau đó lọc tách cellulose và tiến hành rửa lần lượt bằng ethanol và nước cất. Quy trình rửa được lặp lại nhiều lần, cho tới khi nước sau khi rửa có pH trung tính. Mẫu được làm lạnh ở nhiệt độ -60 °C và sấy 24h trong thiết bị sấy đông khô Freeze dryer (Scientiz 10N) sau đó được rửa bằng ethanol 95% trong vòng 2 ngày, thay ethanol 2 lần/ngày. Sau khi được rửa bằng ethanol, mẫu được rửa bằng nước cất trong vòng 2 ngày, thay nước cất 3 lần/ngày. Tiếp theo, mẫu được sấy đông khô trong vòng 12h. Mẫu thu được sau khi sấy là cellulose sạch. Tiến hành nung mẫu trong môi trường Ar trong vòng 30 phút ở nhiệt độ từ 500 đến 800 °C (lò nung Kejia furnace, model KJ-T1200, 250-1200 °C) thu được vật liệu carbon aerogel.

Khảo sát cấu trúc vật liệu tổng hợp

Cấu trúc vật liệu aerogel được nghiên cứu bằng các phương pháp: xác định khối lượng riêng của vật liệu; chụp kính hiển vi microscope (PCE MM 800 10mm, 1600 x 1200 pixel); chụp ảnh kính hiển vi điện tử quét SEM trên thiết bị Hitachi S-4600; xác định diện tích bề mặt riêng bằng phương pháp BET (Mẫu được sấy tại nhiệt độ 105°C trong thời gian 120 phút và thực hiện đo trên thiết bị) và chụp phổ hồng ngoại xác định các liên kết với thiết bị đo phổ hồng ngoại IR Bruker Tensor II, kỹ thuật đo truyền qua, mẫu được ép viên với KBr. Các phép đo đều được thực hiện tại phòng Hóa Phân tích, Viện Hóa Học-Vật Liệu/ Viện Khoa học Công nghệ Quân sự.

Khảo sát khả năng xử lý VOCs của vật liệu carbon aerogel tổng hợp được

Khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ carbon hóa đến khả năng hấp phụ của vật liệu: Các mẫu vật liệu được tổng hợp theo quy trình đã trình bày với các nhiệt độ nung khác nhau được nghiên cứu: 500, 550, 600, 650, 700,

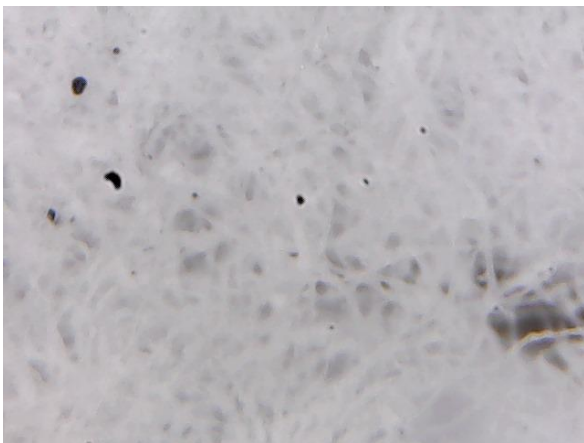
<https://doi.org/10.62239/jca.2023.068>

750 và 800 °C. Ống chứa vật liệu được đặt trong desicator chứa không khí có nồng độ toluen xác định và cảm biến VOCs (AeroQual S500VM sai số đo 0,001ppm trong khoảng 0÷25ppm) để đánh giá mức độ thay đổi nồng độ toluene trong không gian kín ở nhiệt độ 30°C. Sau mỗi thí nghiệm desicator được thổi không khí để đảm bảo không chứa toluene cho thí nghiệm tiếp theo.

Khảo sát ảnh hưởng của khối lượng riêng đến khả năng hấp phụ của vật liệu: Các mẫu vật liệu được tổng hợp theo quy trình đã trình bày với thể tích nước cất sử dụng để hòa tan urê và NaOH khác nhau được nghiên cứu: 50, 70, 80, 90, 100, 110 và 120 mL tương ứng với các mẫu M7, M6, M5, M4, M3, M2 và M1 thu được các mẫu vật liệu có khối lượng riêng khác nhau. Các bước tiếp theo được thực hiện tương tự thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ carbon hóa đến hiệu suất hấp phụ của vật liệu.

Khảo sát dung lượng hấp phụ cực đại của vật liệu với toluene và acetone: Sử dụng quy trình đã được tối ưu tổng hợp hai mẫu vật liệu T1 và T2 sử dụng khảo sát dung lượng hấp phụ cực đại của vật liệu aerogel tổng hợp được đối với toluene và acetone. Ống chứa vật liệu được đặt trong desicator chứa toluene hoặc acetone với áp suất 300mmHg và nhiệt độ 30°C. Mẫu được cân sau mỗi 2h cho tới khi khối lượng mẫu không tăng.

Kết quả và thảo luận

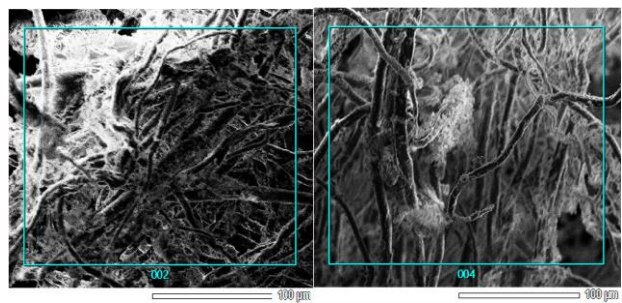


Hình 1: Kết quả chụp kính hiển vi microscope của vật liệu cellulose aerogel trước khi nung

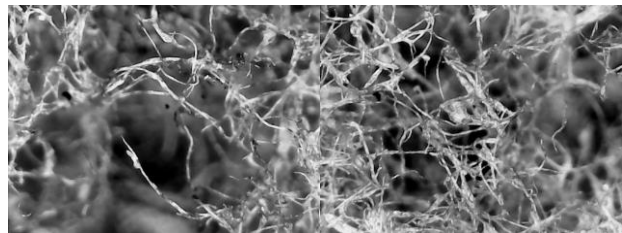
Hình chụp kính hiển vi của vật liệu cellulose aerogel trước khi nung (Hình 1) cho thấy cấu trúc dạng sợi nhỏ, liên kết với nhau rời rạc chưa chặt chẽ tạo thành dạng vật liệu xốp. Hình 2 là hình chụp SEM của cellulose aerogel trước khi nung và vật liệu carbon aerogel sau khi tổng hợp, có thể thấy vật liệu có cấu trúc sợi ngắn

hơn do bị gãy trong quá trình nung. Quá trình nung ở nhiệt độ cao cho thấy có sự thiêu kết của sợi cellulose tạo thành các sợi hay khối carbon có thể tích lớn hơn so với trước khi nung.

Phổ hồng ngoại của vật liệu trước và sau khi nung (Hình 3, 4) cho thấy vật liệu sau khi nung đã loại bỏ các liên kết có chứa liên kết với oxy, trong vùng 1850-1650 cm⁻¹ liên kết C=O thay thế bằng liên kết C=C co giãn và đặc biệt trong vùng 1600÷400 cm⁻¹ xuất hiện mạnh các liên kết C=C và =C-H trong vòng benzen. Sự xuất hiện các liên kết này có thể là do khi nung ở nhiệt độ có thể tạo thành các liên kết có bản chất graphitic của carbon.

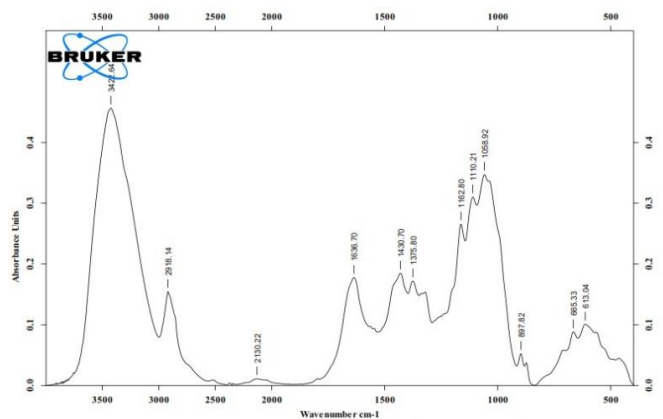


Cellulose aerogel



Carbon aerogel

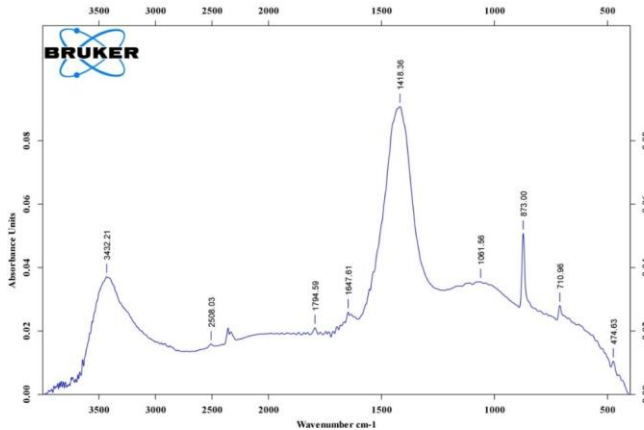
Hình 2: Hình chụp SEM của cellulose aerogel trước khi nung và vật liệu carbon aerogel sau khi tổng hợp



Hình 3: Phổ hồng ngoại của vật liệu aerogel trước khi nung

Khối lượng riêng của vật liệu aerogel: Kết quả tính toán khối lượng riêng của khối vật liệu cellulose aerogel cho <https://doi.org/10.62239/jca.2023.068>

thấy khối vật liệu có khối lượng riêng thấp. Một khối vật liệu khô có đường kính 4,8cm, chiều dày 2,2cm và thể tích 39,79 cm³ có khối lượng là 1,483g. Như vậy khối lượng riêng của vật liệu cellulose aerogel chỉ là 0,037 g/cm³.



Hình 4: Phổ hồng ngoại của vật liệu aerogel sau khi nung

Khối lượng riêng của các mẫu vật liệu carbon aerogel tổng hợp với các thể tích nước cất khác nhau và nung ở nhiệt độ 800°C được trình bày trong bảng 1. Thể tích nước sử dụng càng lớn thì khối lượng riêng càng nhỏ và ngược lại. Kết quả này có thể giải thích do sự xâm lấn của nước vào trong các sợi cellulose và khi đông đá, lượng nước định hình khoảng trống trong lỗ xốp, và khi nước bay hơi đi sẽ để lại vật liệu có cấu trúc xốp hơn khi lượng nước lớn. Tuy nhiên khi lượng nước lớn hơn 100 ml cấu trúc xốp của aerogel giòn, dễ bị phá hủy khi bị tác động cơ học, vì vậy mà lượng nước dùng để chế tạo aerogel được lựa chọn là 100 ml.

Bảng 1: Khối lượng riêng của các mẫu vật liệu carbon aerogel

Mẫu	Thể tích nước (ml)	Khối lượng riêng (g/cm ³)
M1	120	0,01
M2	110	0,011
M3	100	0,012
M4	90	0,014
M5	80	0,016
M6	70	0,017
M7	50	0,02

Diện tích bề mặt riêng của vật liệu carbon aerogel: Diện tích bề mặt riêng của vật liệu được xác định bằng phương pháp BET. Diện tích bề mặt riêng của carbon aerogel được tham khảo ở một nghiên cứu khác với

phương pháp tổng hợp vật liệu tương tự là 272 m²/g, đường kính lỗ mao quản trung bình là 14nm [17, 20]. Diện tích bề mặt riêng của carbon aerogel lớn là thông số quan trọng cho việc sử dụng này làm vật liệu hấp phụ trong tương lai.

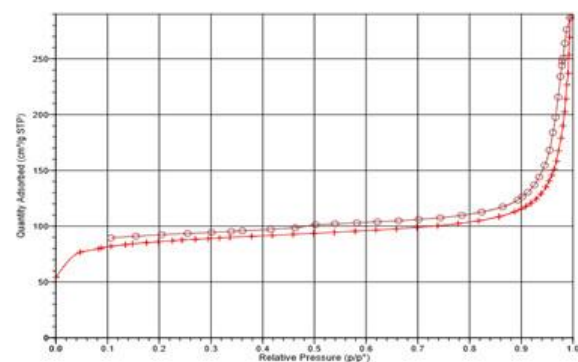
Kết quả so sánh một số tính chất như diện tích bề mặt riêng, đường kính lỗ xốp trung bình của hai loại vật liệu cellulose và carbon aerogel (trước và sau khi nung) được đưa ra ở bảng 2 và hình 5. Aerogel được chế tạo với thể tích nước hấp thụ là 100 ml và được nung ở 800°C.

Có thể thấy khối lượng riêng của vật liệu carbon aerogel giảm 3 lần so với cellulose aerogel, diện tích bề mặt riêng tăng rất nhiều, đường kính lỗ xốp trung bình giảm. Như vậy sau quá trình nung vật liệu cellulose đã được carbon hoá. Với giá trị diện tích bề mặt riêng cao, vật liệu có tiềm năng lớn để ứng dụng làm vật liệu hấp phụ.

Khả năng hấp phụ VOC của carbon aerogel

Bảng 2: So sánh tính chất của cellulose và carbon aerogel

STT	Tính chất	Cellulose aerogel	Carbon aerogel
1	Diện tích bề mặt riêng (BET) (m ² /g)	1,5	272
2	Đường kính lỗ xốp trung bình (nm)	18,98	14
3	Khối lượng riêng (g/cm ³)	0,037	0,012



Hình 5: Giản đồ hấp phụ - nhả hấp phụ N₂ của vật liệu aerogel chế tạo với lượng nước hấp phụ 100 ml và nung ở 800°C

Ảnh hưởng của nhiệt độ carbon hóa đến khả năng hấp phụ hơi toluene của vật liệu: Kết quả khảo sát ảnh

hưởng của nhiệt độ carbon hóa đến khả năng hấp phụ toluene của vật liệu trong cùng thời gian 50 phút và nhiệt độ 30°C được trình bày trong bảng 3. Có thể thấy rằng nhiệt độ carbon hóa càng cao, hiệu suất hấp phụ càng lớn (tăng từ 75,48% đến 88,49% khi nhiệt độ carbon hóa tăng từ 500 đến 800°C). Như vậy, khi nhiệt độ carbon hóa tăng, các cấu trúc cellulose ngày càng bị cắt ngắn, tạo nên vật liệu có diện tích bề mặt riêng lớn hơn. Đó có thể là nguyên nhân dẫn đến hiệu suất hấp phụ của carbon aerogel cao hơn khi nhiệt độ carbon hóa tăng. [18]

Bảng 3: Ảnh hưởng của nhiệt độ carbon hóa đến khả năng hấp phụ của vật liệu

Nhiệt độ carbon hoá (°C)	Nồng độ toluene trước (ppm)	Nồng độ toluene sau (ppm)	Hiệu suất (%)
500	10,0	2,452	75,48
550	10,0	2,074	79,26
600	10,0	1,545	84,55
650	10,0	1,489	85,11
700	10,0	1,364	86,36
750	10,0	1,252	87,48
800	10,0	1,151	88,49

Ảnh hưởng của khối lượng riêng của vật liệu đến khả năng hấp phụ: Khối lượng riêng của vật liệu carbon aerogel thấp hơn khoảng 3 lần so với vật liệu cellulose aerogel. Từ kết quả khảo sát ảnh hưởng của khối lượng riêng tới khả năng hấp phụ toluen của vật liệu (bảng 4), nhận thấy rằng khối lượng riêng của carbon aerogel càng nhẹ thì có hiệu suất hấp phụ càng cao. Kết quả này cũng phù hợp với việc tăng nhiệt độ carbon hóa thì cấu trúc cellulose càng bị cắt ngắn, khối lượng riêng của vật liệu càng nhẹ.

Bảng 4: Ảnh hưởng của khối lượng riêng đến khả năng hấp phụ của vật liệu

Mẫu	Khối lượng riêng g/cm ³	Nồng độ toluene trước (ppm)	Nồng độ toluene sau (ppm)	Hiệu suất (%)
M1	0,010	10,0	1,062	89,38
M2	0,011	10,0	1,105	88,95
M3	0,012	10,0	1,151	88,49

M4	0,014	10,0	1,204	87,96
M5	0,016	10,0	1,231	87,69
M6	0,017	10,0	1,281	87,19
M7	0,020	10,0	1,341	86,59

Dung lượng hấp phụ bão hòa của vật liệu với toluene và acetone: Dung lượng hấp phụ bão hòa của carbon aerogel đối với toluene và acetone được thực hiện khi cho dòng khí toluen và acetone qua vật liệu đến khi nồng độ của toluene và acetone không đổi ở buồng phía sau vật liệu hấp phụ. Các thí nghiệm được thực hiện ở nhiệt độ 30°C và áp suất 300mmHg.

Bảng 5: Dung lượng hấp phụ bão hòa của carbon aerogel

Mẫu	Nhiệt độ carbon hoá °C	Toluene mg/g	Acetone mg/g
T1	500	320	396
T2	800	401	340

Từ bảng 5, có thể nhận thấy dung lượng hấp phụ bão hòa với toluene của vật liệu tăng khi nhiệt độ carbon hóa tăng (tăng từ 320 mg/g lên 401 mg/g khi nhiệt độ carbon hóa tăng từ 500 đến 800°C). Tuy nhiên, với acetone, hiện tượng hoàn toàn ngược lại. Dung lượng hấp phụ bão hòa với acetone giảm từ 396 mg/g xuống còn 340 mg/g khi nhiệt độ carbon hóa tăng từ 500 đến 800°C. Nguyên nhân của hiện tượng này có thể do khi nhiệt độ carbon hóa tăng cao, cấu trúc cellulose bị cắt đứt tạo diện tích bề mặt riêng của vật liệu lớn, nhưng cấu trúc lỗ xốp nhẹ và kích thước khác biệt hơn. Khả năng hấp phụ của toluene và acetone còn phụ thuộc lớn vào các nhóm chức bề mặt. Với nhiệt độ carbon hóa cao, cấu trúc của vật liệu carbon hóa có thể được cải thiện, và các nhóm chức trên bề mặt vật liệu có thể tăng cường tính chất hóa học của mình, góp phần tăng khả năng tương tác với toluene và cải thiện khả năng hấp phụ của vật liệu. Trong khi đó đối với acetone khi nhiệt độ carbon hóa cao, bề mặt vật liệu có thể bị oxi hóa hoặc bị mất một số nhóm chức quan trọng, dẫn đến giảm khả năng tương tác với acetone. Do đó, dù diện tích bề mặt tăng lên nhưng khả năng hấp phụ acetone lại giảm đi. Do đó, khả năng hấp phụ của vật liệu có thể cao hơn với toluen và thấp hơn với acetone.

Kết luận

Nghiên cứu tổng hợp thành công vật liệu cacbon aerogel từ giấy phế thải có cấu trúc dạng lỗ xốp, khối lượng riêng thấp ($0,037 \text{ g/cm}^3$) và diện tích bề mặt cao, đây là những đặc tính tốt, thích hợp để sử dụng làm vật liệu hấp phụ. Các thí nghiệm nghiên cứu sự ảnh hưởng của nhiệt độ cacbon hóa và khối lượng riêng của vật liệu đến hiệu suất hấp phụ toluene cho thấy nhiệt độ cacbon hóa càng cao hoặc khối lượng riêng của vật liệu càng nhỏ thì hiệu suất hấp phụ toluen càng cao. Vật liệu tổng hợp được đã được nghiên cứu khả năng hấp phụ đối với toluene và acetone. Kết quả cho thấy dung lượng hấp phụ cực đại của vật liệu có thể đạt tới 400 mg/g đối với toluene và acetone.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Quốc phòng trong đề tài mã số KC.BM-11.

Tài liệu tham khảo

1. Yang C., Miao G., Pi Y., Xia Q., Wu J., Li Z. and Xiao J., *Chemical Engineering Journal* 2019 370 1128-1153.
2. Li X., Zhang L., Yang Z., Wang P., Yan Y. and Ran J., *Separation and Purification Technology* 235 (2020) 116213.
3. Kamal M.S., Razzak S.A., and Hossain M.M., *Atmospheric Environment* 140 (2016) 117-134.
4. Kim, S.C. and Shim W.G., *Applied Catalysis B: Environmental* 98 (3-4) (2010) 180-185.
5. Wei X., Wu S., Liu P., Huang S., Li X., Yang J., and Wu Y., *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11 (3) (2023) 109733.
6. Dou B., Li J., Wang Y., Wang H., Ma C., and Hao Z., *Journal of hazardous materials* 196 (2011) 194-200.
7. Soffian M.S., Halim F.Z., Aziz F., Rahman M.A., Amin M.A., and Chee D.N., *Environmental Advances* 9 (2022) 100259.
8. Dorcheh A.S. and Abbasi M.H., *Journal of Materials Processing Technology* 199 (1-3) (2008) 10-26.
9. Lee J.-H. and Park S.-J., *Carbon* 163 (2020) 1-18.
10. Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A., *Energy and Buildings* 43 (4) (2011) 761-769.
11. Maldonado-Hódar F.J., *Journal of Hazardous Material* 194 (2011) 216-222.
12. Maldonado-Hódar F. J., Moreno-Castilla C., Carrasco-Marín F., and Pérez-Cadenas A., *Journal of Hazardous Material* 148 (3) (2007) 548-552.
13. Cheng J., Cheng X., Wang Z., and Wang M., *Energy* 263 (2023) 125984.
14. Zhang L., Sun Q., Su T., Wang C., and Yang Y., *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (6) (2021) 106722.
15. Yang F., Li W., Ou R., Lu Y., Dong X., Tu W., Zhu W., Wang X., Li L., Yuan A., and Pan J., *Chinese Journal of Chemical Engineering* 47 (2022) 120-133.
16. Shadkam R., Naderi M., Ghazitabar A. and Akbari S., *Materials Today Communications* 28 (2021) 102610.
17. Pham T. H., Jung S. H., Kim Y. J. and Kim T., *Chemosphere* 268 (2021) 129319.
18. Nguyễn Thị Trang, Nguyễn Mạnh Tường, and Nguyễn Trần Hùng. *Tạp chí nghiên cứu khoa học và công nghệ Quân sự, Số Đặc san NĐMT* (2017) 229 - 235.
19. Đỗ Thị Thủy, Nguyễn Trần Hùng, Lê Hữu Thành, Hoàng Đình Hiền, Phạm Phương Thảo, *Tạp chí Tài nguyên và môi trường* (2019) 1 18-21.