

## ONE-STEP SYNTHESIS OF ACTIVATED CARBON FROM SUGARCANE BAGASSE

Nguyen Thi Kieu Trinh, Nguyen Viet Anh, Nguyen Thi Nhan, Tran Thi Chau, Tran Dai Luat, Do Xuan Viet, Mai Xuan Dung\*, Dang Thi Thu Huyen  
Hanoi Pedagogical University 2

| ARTICLE INFO                                                                                | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Received:</b> 12/5/2021<br><b>Revised:</b> 28/6/2021<br><b>Published:</b> 01/7/2021      | <p>Activated carbon (AC) derived from biomass (BM) is a material that can reduce BM emission, be used for environmental treatment and increase the profit of agriculture production. The conversion of biomass (BM) into AC usually requires a two-step procedure including pyrolysis of BM into biochar (BC) and activation of BC into AC. While the earlier step is relatively simple and common for most BM the latter is complicate and high-temperature conditions are needed to activate solid-state reaction between BC and activating agents. In this paper, we demonstrate a one-step preparation of AC from sugarcane bagasse (SB) by pyrolysis of SB in the presence of NaOH catalyst. Nitrogen adsorption-desorption analysis revealed that AC has a surface area of 146.6 m<sup>2</sup>/g which is much higher than the surface area of BC and is about 40% as compared to the surface area of steam-activated AC at 500°C. The results indicate that the one-step method is a cost-effective procedure for the preparation of AC from BM.</p> |
| <b>KEYWORDS</b><br>Biochar<br>Activated carbon<br>Sugarcane bagasse<br>Biomass<br>Pyrolysis |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

## NGHIÊN CỨU TỔNG HỢP THAN HOẠT TÍNH TỪ BÃ MÍA BẰNG QUY TRÌNH MỘT GIAI ĐOẠN

Nguyễn Thị Kiều Trinh, Nguyễn Việt Anh, Nguyễn Thị Nhân, Trần Thị Châu, Trần Đại Luật, Đỗ Xuân Việt, Mai Xuân Dũng\*, Đặng Thị Thu Huyền  
Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2

| THÔNG TIN BÀI BÁO                                                                                   | TÓM TẮT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ngày nhận bài:</b> 12/5/2021<br><b>Ngày hoàn thiện:</b> 28/6/2021<br><b>Ngày đăng:</b> 01/7/2021 | <p>Than hoạt tính từ phế phẩm nông nghiệp (AC) là vật liệu giải quyết được nhiều vấn đề như giảm phát thải phế phẩm nông nghiệp (BM), xử lý môi trường và tăng giá trị của sản xuất nông nghiệp. Để chuyển hóa BM thành AC thường đòi hỏi hai giai đoạn là nhiệt phân BM để tạo thành than sinh học (BC) và hoạt hóa BC thành AC. Trong khi giai đoạn nhiệt phân BM là tương đối đơn giản và tương tự nhau cho hầu hết các BM thì giai đoạn hoạt hóa BC khá phức tạp, đòi hỏi nhiệt độ cao để kích hoạt các phản ứng pha rắn giữa BC và các tác nhân hoạt hóa. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày kết quả nghiên cứu tổng hợp AC từ bã mía (SB) bằng một giai đoạn nhiệt phân SB tẩm NaOH. Kết quả phân tích hấp phụ - giải hấp nitơ cho thấy, AC thu được có diện tích bề mặt (<math>S_{BET}</math>) bằng 146,6 m<sup>2</sup>/g. Giá trị này cao hơn nhiều so với diện tích bề mặt của BC tương ứng và đạt khoảng 40% so với AC đã hoạt hóa với hơi nước ở 500°C. Quy trình tổng hợp AC một bước có thể được sử dụng để chế tạo vật liệu hấp phụ với dung lượng hấp phụ tương đối tốt từ các loại BM khác nhau với chi phí thấp.</p> |
| <b>TỪ KHÓA</b><br>Than sinh học<br>Than hoạt tính<br>Bã mía<br>Phế phẩm nông nghiệp<br>Nhiệt phân   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

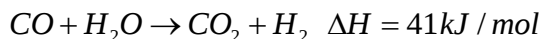
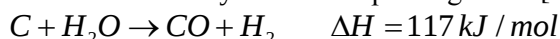
DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4479>

\* Corresponding author. Email: xdmai@hpu2.edu.vn

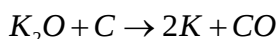
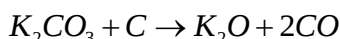
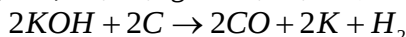
## 1. Giới thiệu

Theo số liệu thống kê của Nationalmaster (<https://www.nationmaster.com>), trong hơn 20 năm qua, Việt Nam là một trong những nước sản xuất mía đường nhiều nhất trên thế giới với sản lượng trung bình từ 15 đến 18 triệu tấn/năm. Sau khi ép lấy nước để sản xuất đường thì đồng thời cũng tạo ra khoảng 4,5 triệu tấn SB/năm. Đây là nguồn phế thải có giá trị, đã và đang được sử dụng làm nguyên liệu lò hơi, sản xuất bột giấy, phân bón hoặc được ủ thành thức ăn cho gia súc. Với sản lượng khô toàn thế giới lớn (khoảng 54 triệu tấn/năm) và chứa chủ yếu là cellulose (50% cellulose, 25% hemicellulose và 25% lignin), SB được đánh giá là nguyên liệu quan trọng để sản xuất BC và AC giá rẻ [1], [2], góp phần nâng cao giá trị của cây mía và giảm phát thải chất thải rắn.

Tương tự như các BM khác [3]–[5], BC có thể được sản xuất bằng phương pháp nhiệt phân yếm khí ở nhiệt độ cao (khoảng từ 350 đến 500°C) để than hóa cellulose (ở khoảng 300°C) và lignin (từ 310 đến 500°C) [2]. Trong quá trình này, cellulose và hemicellulose sẽ bị dehydrat hóa trong khi lignin sẽ trải qua các quá trình phức tạp hơn để giải phóng ra các tiểu phân dễ bay hơi như nước, methanol, acetone, acetaldehyde, monolignols, mono-phenols, catechol, hydrogen, methane, ethane, ethylene, CO và CO<sub>2</sub> [6]. Các tiểu phân dễ bay hơi là sản phẩm của quá trình ngưng tụ giữa các nhóm phân cực trên các mạch polymer. Các quá trình ngưng tụ như vậy thường dẫn tới các mạch carbon bó sát vào nhau làm cho BC có rất ít các lỗ xốp với tổng diện tích bề mặt thấp, khoảng ~25 m<sup>2</sup>/g [2], [7]. Ở trạng thái này, BC có thể được sử dụng làm nguyên liệu đốt lò hoặc làm vật liệu cải tạo đất [4]. Để tăng diện tích bề mặt cho BC, qua đó tăng giá trị ứng dụng của BC, người ta thường phải hoạt hóa BC bằng phương pháp hóa học hoặc vật lý ở nhiệt độ cao. Trong phương pháp hoạt hóa vật lý, BC được xử lý với CO<sub>2</sub> hoặc H<sub>2</sub>O ở nhiệt độ cao nhằm kích hoạt phản ứng giữa các tác nhân này với C theo phương trình: [6]



Trong phương pháp hoạt hóa hóa học, các ion kim loại kiềm đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra các phân tử khí dễ bay hơi, hoạt động ở nhiệt độ cao, ví dụ:



Kim loại K hình thành dễ dàng phản ứng với các nhóm chức phân cực còn lại của BC để tạo thành hơi nước; hơi nước và CO, CO<sub>2</sub> có tác dụng hoạt hóa BC như quá trình hoạt hóa vật lý nói trên.

Quá trình hai bước tổng hợp AC từ BM có thể được thay thế bằng quá trình nhiệt phân một bước BM trong sự có mặt của xúc tác như ZnCl<sub>2</sub> hay H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> [5], [8], [9]. Các chất xúc tác này có vai trò chủ yếu là ngăn cản sự hình thành các đại phân tử hydrocarbon thơm từ lignin, làm giảm nhiệt độ của quá trình dehydrat hóa lignin và phá hủy mạng lưới cấu trúc carbon ở nhiệt độ cao để tạo thành các kênh lỗ xốp [10]. Xét ở góc độ môi trường, việc sử dụng xúc tác ZnCl<sub>2</sub> có thể phát thải chất ô nhiễm thứ cấp là ion Zn<sup>2+</sup>, đồng thời tiềm ẩn nguy cơ phát thải Cl<sub>2</sub> và hợp chất hữu cơ chứa Cl.

Chúng tôi nhận thấy rằng, NaOH là hợp chất của kim loại kiềm có giá thành rẻ (rẻ hơn KOH), ít độc hại và có nhiệt độ nóng chảy ~318°C (thấp hơn nhiệt độ nóng chảy của KOH, 360°C) phù hợp làm xúc tác để hoạt hóa BM thành AC thông qua quá trình phân hủy nhiệt một giai đoạn. Để kiểm chứng giả thuyết này, chúng tôi nghiên cứu tổng hợp AC từ SB trong sự có mặt của NaOH. Kết quả phân tích cấu trúc xốp cho thấy, AC thu được có diện tích bề mặt đạt 146,6 m<sup>2</sup>/g, cao hơn nhiều so với BC (~25 m<sup>2</sup>/g) và đạt khoảng 40% so với diện tích bề mặt của AC hoạt hóa bằng hơi nước [2].

## 2. Thực nghiệm

### 2.1. Hóa chất, thiết bị

Hóa chất bao gồm NaOH (99,8%, Aladdin), methylene blue hydrate (MB, 96%, Aladdin) và HCl (35-37%, Merk) được sử dụng để pha chế dung dịch với nước cất hai lần. Các thiết bị để tổng hợp mẫu và tiến hành thí nghiệm đánh giá khả năng hấp phụ của AC với MB bao gồm tủ sấy (Memmert UN75, Đức), lò nung (SH Scientific, Hàn Quốc), máy lắc ngang (JEIOTECH, Hàn Quốc), máy li tâm (Hettich MIKRO, Đức) và máy quang phổ hấp thụ UV-2450 (Shimadzu, Nhật Bản). Các thiết bị để đặc trưng vật liệu bao gồm TriStar II 3020 (Micromeritics, Mỹ) và Spectrum Two (Perkin Elmer, Mỹ).

### 2.2. Tổng hợp AC từ SB

SB được lấy từ các cửa hàng ép nước mía trên địa bàn phường Xuân Hòa, thành phố Phúc Yên, tỉnh Vĩnh Phúc. SB sau đó được cắt nhỏ (~1-2 cm) bằng kéo và rửa sạch với nước máy, nước cất một lần trước khi sấy khô ở 120°C trong 12 giờ. Sau khi sấy khô, SB được ngâm vào trong dung dịch NaOH 1M trong 30 phút, để róc nước trước khi tiếp tục sấy khô ở 120°C qua đêm. SB đã tẩm NaOH tiếp tục được nung đến 450°C với tốc độ tăng nhiệt là 20 độ/phút, thời gian lưu ở 450°C là 1 giờ để thu được AC. Để loại bỏ NaOH, AC được rửa sạch với nước cất cho đến khi dịch lọc trung tính trước khi được sấy khô để tiến hành các nghiên cứu tiếp theo.

### 2.3. Đặc trưng cấu trúc vật liệu

Diện tích bề mặt, thể tích lỗ xốp, sự phân bố kích thước lỗ xốp của AC được nghiên cứu bằng phương pháp hấp phụ - giải hấp nitơ trên thiết bị TriStar II 3020. Phổ hồng ngoại FT-IR của AC được đo trên máy Spectrum Two.

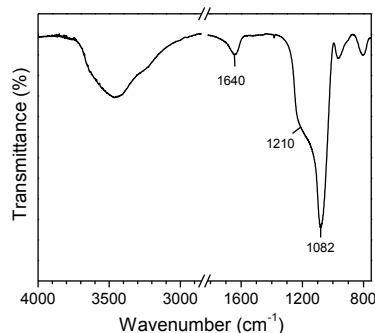
Để đánh giá tiềm năng ứng dụng của AC làm vật liệu hấp phụ, chúng tôi sử dụng MB làm mô hình nghiên cứu cho chất màu hữu cơ. Cho 0,3 g AC vào các bình tam giác chứa 50 ml dung dịch MB có nồng độ khác nhau (5; 15; 25; 50; 75; và 100 mg/L) rồi tiến hành lắc trong 2 giờ với tốc độ 200 chu kỳ/phút ở nhiệt độ phòng. Nồng độ của MB trong dung dịch trước và sau khi hấp phụ được xác định bằng phương pháp phổ. Cụ thể, phổ hấp thụ UV-Vis của 10 dung dịch MB chuẩn có nồng độ từ 1 đến 10 mg/L được đo trên máy UV-2450 để xây dựng đường chuẩn về sự phụ thuộc của độ hấp thụ ở 665 nm (Abs) vào nồng độ MB ( $C_{MB}$ ). Phương trình đường chuẩn xác định được là:  $Abs = 0,0875C_{MB} - 0,0268$  với  $R^2 = 0,9998$ . Để xác định nồng độ MB trong dung dịch trước và sau khi hấp phụ, dung dịch MB được pha loãng với hệ số nhất định (hệ số pha loãng tùy thuộc vào nồng độ đầu của MB) và đo độ hấp thụ ở 665 nm. Để loại bỏ AC khỏi dung dịch MB sau quá trình hấp phụ, hỗn hợp được ly tâm ở tốc độ 4000 vòng/phút trong 5 phút. Nồng độ MB trong dung dịch được tính toán dựa vào kết quả đo độ hấp thụ ở 665 nm, phương trình đường chuẩn và hệ số pha loãng.

## 3. Kết quả và thảo luận

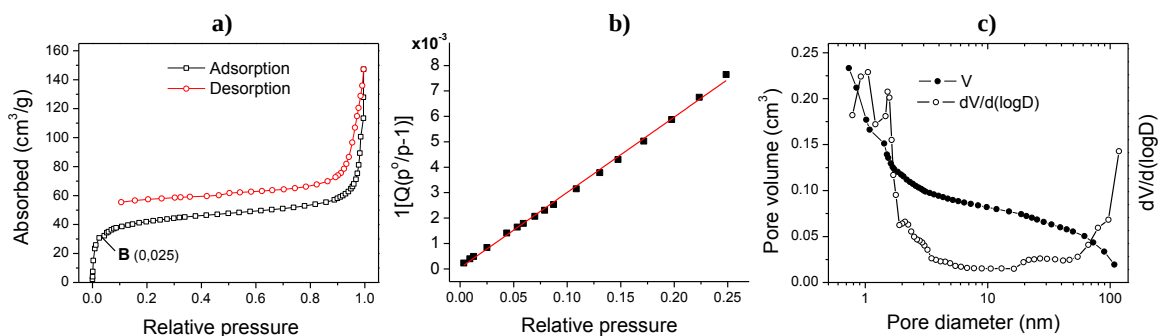
Từ giản đồ phân tích nhiệt trọng của SB đã công bố [2], [11], theo đó quá trình nhiệt phân của SB gồm các giai đoạn: bay hơi các thành phần nhẹ ở dưới 120°C, dehydrat hóa và phân hủy hemicellulose trong khoảng từ 220°C đến 315°C, dehydrat hóa và phân hủy cellulose trong khoảng từ 315°C đến 400°C và phân hủy lignin, cracking C-C, ngưng tụ carbon, than hóa ở khoảng từ 350°C đến 500°C. Cực đại giản đồ nhiệt trọng cho các giai đoạn hủy hemicellulose, cellulose và lignin lần lượt là 220°C, 325°C và 420 - 460°C [2], [11]. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã lựa chọn nhiệt độ để sấy và nhiệt phân SB lần lượt là 120°C và 450°C.

Phổ hồng ngoại của AC được trình bày trên hình 1. Phổ IR có các vùng hấp thụ đặc trưng gồm: 3460  $cm^{-1}$  ( $H_2O$  hấp phụ), 3200-3000  $cm^{-1}$  (C-H trong hydrocarbon thơm), 1640  $cm^{-1}$  (C=C trong hydrocarbon thơm) và 1080-1210  $cm^{-1}$  (C-O-C) [2]. Có thể thấy, AC thu được thiếu các nhóm chất phân cực như C=O và COOH và không thấy xuất hiện các cực đại hấp phụ đặc trưng

của C-H no. Điều này chứng tỏ quá trình phân hủy SB dưới tác dụng của NaOH là tương đối hiệu quả để tạo thành vật liệu dầu C ở 450°C. Các nghiên cứu trước đây cho thấy, NaOH dễ dàng thâm vào giữa các sợi cellulose để bẻ gãy liên kết giữa lignin với hemicellulose, cellulose; thúc đẩy quá trình phân hủy hemicellulose và có thể phá vỡ mạnh cellulose để tạo thành các lỗ nhỏ trên thành và vỏ cellulose [12], [13].



Hình 1. Phổ hồng ngoại của AC



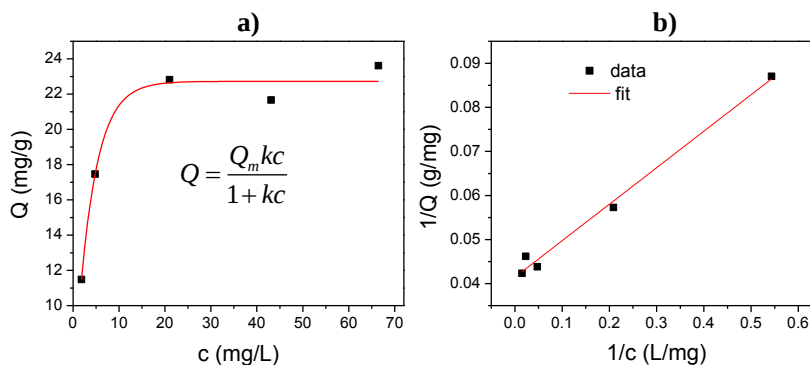
Hình 2. a) Giản đồ hấp phụ - giải hấp  $N_2$  của AC ở 77K, b) Đường hấp phụ tuyến tính BET xác định diện tích bề mặt và c) Sự phân bố kích thước lỗ của AC theo BJH

Cấu trúc xốp của AC là thông số quan trọng để đánh giá tiềm năng ứng dụng của nó. Để nghiên cứu tính chất này, chúng tôi đã tiến hành đo hấp phụ - giải hấp đẳng nhiệt  $N_2$  ở 77K, kết quả được trình bày trên hình 2. Theo phân loại của IUPAC [14], đường hấp phụ đẳng nhiệt (hình 2a) của AC thuộc nhóm II với điểm “đầu gối” B ở áp suất tương đối  $p_0/p = 0,025$ . B là điểm kết thúc quá trình hấp phụ đơn lớp và việc B ở  $p_0/p = 0,025$  thấp chứng tỏ quá trình hấp phụ  $N_2$  trên AC ở  $p_0/p < 0,025$  chủ yếu quá trình ngưng tụ trong các vi lỗ [14], [15]. Khi áp suất tương đối tăng, lượng  $N_2$  hấp phụ tăng tuyến tính và không đạt giá trị bão hòa ở  $p_0/p \approx 1$  chứng tỏ có sự hình thành đa lớp  $N_2$  hấp phụ trên AC. Đường giải hấp  $N_2$  trễ so với đường hấp phụ (hình 2a) và hiện tượng trễ trải dài trong khoảng áp suất tương đối rộng và không đóng kín. Hiện tượng đường trễ không đóng kín tương đối phổ biến đối với vật liệu carbon [15]-[17] và được giải thích do lỗ xốp của AC bị biến dạng sau quá trình hấp phụ  $N_2$  hoặc AC chứa các vi lỗ dạng lọ mực có tác dụng giam giữ các phân tử  $N_2$  hấp phụ đến mức chúng không thể bay hơi trong quá trình giải hấp.

Để tính diện tích bề mặt của AC, chúng tôi đã sử dụng phương pháp Brunauer-Emmett-Teller (BET) để xây dựng đường tuyến tính  $1/[Q(p_0/p-1)]$  theo  $p_0/p$  (hình 2b). Từ các giá trị độ dốc  $(c-1)/Q_{mc}$  và điểm cắt trục tung  $1/Q_{mc}$  tính được diện tích bề mặt riêng  $S_{BET} = Q_m N_A s / V = 146,6 \text{ m}^2/\text{g}$ . Trong các phương trình nêu trên,  $Q$  và  $Q_m$  là thể tích khí hấp phụ,  $c$  là hằng số BET,  $N_A$  là số Avogadro,  $s$  là diện tích hình chiếu của một phân tử  $N_2$  hấp phụ và  $V$  là thể tích của một mol  $N_2$ .

Giản đồ phân tích thể tích hấp phụ theo đường kính lỗ theo phương pháp Barrett-Joyner-Halenda (BJH) (hình 2c) cho thấy, tổng thể tích lỗ xốp  $V$  của AC đạt khoảng  $0,23 \text{ cm}^3$ , trong đó khoảng  $0,13 \text{ cm}^3$  là đóng góp của các lỗ xốp có đường kính  $D < 3 \text{ nm}$ . Đường vi phân của  $V$  theo

D cho thấy các lỗ xốp phổ biến có đường kính là ~1 nm, 1,5 nm và 2,1 nm; Đường kính lỗ trung bình là 1,9 nm. Kết quả phân tích lỗ xốp phù hợp với hiện tượng trên đồ thị hấp phụ - giải hấp trên hình 2a.



Hình 3. a) Đồ thị hấp phụ đẳng nhiệt MB trên AC và b) Đường tuyến tính  $1/Q$  theo  $1/c$

Để đánh giá khả năng ứng dụng của AC làm vật liệu hấp phụ, chúng tôi đã tiến hành thử nghiệm hấp phụ MB trên AC ở điều kiện hấp phụ tĩnh. Sau 2 giờ hấp phụ, nồng độ MB ở trạng thái cân bằng được xác định bằng phương pháp phổ. Kết quả khảo sát sự hấp phụ MB trên AC được trình bày trên hình 3. Các điểm thực nghiệm trên hình 3 là dung lượng hấp phụ cân bằng  $Q$  ở các nồng độ cân bằng  $c$ ; Đường nối liền trên hình 3a là đồ thị hấp phụ đẳng nhiệt Langmuir:  $Q = Q_m kc / (1 + kc)$ , trong đó  $Q_m$  là dung lượng hấp phụ đơn lớp bão hòa và  $k$  là hằng số hấp phụ Langmuir. Để tìm giá trị  $Q_m$ , chúng tôi vẽ đồ thị  $1/Q$  theo  $1/c$  (hình 3b) và tìm được giá trị  $Q_m$  từ điểm cắt của đường tuyến tính với trục  $1/Q$  và bằng 24,5 mg/g ( $R^2 = 0,9878$ ). Giá trị này cao hơn nhiều so với SB (~9,1 mg/g) [1], tương đương với AC hoạt hóa bằng hơi nước (~21 mg/g) [2] nhưng thấp hơn nhiều so với AC hoạt hóa với  $ZnCl_2$  hay  $CO_2$  ở nhiệt độ cao [7], [18].

#### 4. Kết luận

Trong bài báo này chúng tôi đã trình bày kết quả nghiên cứu tổng hợp than hoạt tính từ bã mía bằng phương pháp nhiệt phân một bước với xúc tác NaOH. Kết quả cho thấy, than hoạt tính thu được có diện tích bề mặt khoảng 146,6 m<sup>2</sup>/g với tổng thể tích lỗ xốp khoảng 0,23 cm<sup>3</sup>/g, trong đó ~0,13 cm<sup>3</sup>/g do đóng góp của các vi lỗ có đường kính trung bình khoảng 1,9 nm. Than có dung lượng hấp phụ cực đại đối với methylene blue 24,5 mg/g. Các kết quả này cho thấy có thể sử dụng phương pháp nhiệt phân một bước với xúc tác NaOH để tổng hợp vật liệu hấp phụ khá tốt từ các phế phẩm nông nghiệp.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ từ nguồn kinh phí phát triển Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội 2 qua đề tài có mã số SV.2020.SP2.08.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] T. C. A. Siqueira, I. Z. da Silva, A. J. Rubio, R. Bergamasco, F. Gasparotto, E. A. de S. Paccola, and N. U. Yamaguchi, "Sugarcane bagasse as an efficient biosorbent for methylene blue removal: Kinetics, isotherms and thermodynamics," *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, vol. 17, 2020, doi: 10.3390/ijerph17020526.
- [2] F. Rahmawati, A. F. Ridasepri, Chairunnisa, A. T. Wijayanta, K. Nakabayashi, J. Miyawaki, and T. Miyazaki, "Carbon from bagasse activated with water vapor and its adsorption performance for methylene blue," *Appl. Sci.*, vol. 11, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3390/app11020678.

- [3] P. T. N. Lan, "Denaturing the activated charcoal that are produced from the agricultural waste to be as an absorbent material in treating ammonium in water," *Journal of water resources & environmental engineering*, vol. 52, pp. 129-137, 2016.
- [4] N. T. Q. Hung, L. K. Thong, and N. M. Ky, "Agricultural residues biomass potential and applying efficiency for household scale biochar production in Go Cong Tay, Tien Giang province," *Science & Technology Development*, vol. 20, pp. 68-78, 2020.
- [5] T. V. Thuan, "Preparation of activated carbon from sugarcane bagasse using  $\text{ZnCl}_2$  for the removal of  $\text{Cu}^{2+}$  ion from aqueous solution: application of response surface methodology (rsm)," *Vietnam J. Sci. Technol.*, vol. 54, 2018, doi: 10.15625/2525-2518/54/1a/11838.
- [6] W. J. Liu, H. Jiang, and H. Q. Yu, "Thermochemical conversion of lignin to functional materials: a review and future directions," *Green Chem.*, vol. 17, pp. 4888-4907, 2015, doi: 10.1039/c5gc01054c.
- [7] K. Y. Foo, L. K. Lee, and B. H. Hameed, "Preparation of activated carbon from sugarcane bagasse by microwave assisted activation for the remediation of semi-aerobic landfill leachate," *Bioresour. Technol.*, vol. 134, pp. 166-172, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.01.139.
- [8] D. Montané, V. Torné-Fernández, and V. Fierro, "Activated carbons from lignin: Kinetic modeling of the pyrolysis of Kraft lignin activated with phosphoric acid," *Chem. Eng. J.*, vol. 106, pp. 1-12, 2005, doi: 10.1016/j.cej.2004.11.001.
- [9] E. Gonzalez-Serrano, T. Cordero, J. Rodríguez-Mirasol, and J. J. Rodríguez, "Development of Porosity upon Chemical Activation of Kraft Lignin with  $\text{ZnCl}_2$ ," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 36, pp. 4832-4838, 1997, doi: 10.1021/ie970261q.
- [10] Z. Liu, Y. Huang, and G. Zhao, "Preparation and Characterization of Activated Carbon Fibers from Liquefied Wood by  $\text{ZnCl}_2$  Activation," *BioResources*, vol. 11, pp. 3178-3190, 2016.
- [11] S. A. El-Sayed and M. E. Mostafa, "Pyrolysis characteristics and kinetic parameters determination of biomass fuel powders by differential thermal gravimetric analysis (TGA/DTG)," *Energy Convers. Manag.*, vol. 85, pp. 165-172, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.05.068.
- [12] J. Shi, Y. Lu, Y. Zhang, L. Cai, and S. Q. Shi, "Effect of thermal treatment with water,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  and  $\text{NaOH}$  aqueous solution on color, cell wall and chemical structure of poplar wood," *Sci. Rep.*, vol. 8, pp. 1-9, 2019, doi: 10.1038/s41598-018-36086-9.
- [13] C. Wang, H. Li, M. Li, J. Bian, and R. Sun, "Revealing the structure and distribution changes of Eucalyptus lignin during the hydrothermal and alkaline pretreatments," *Sci. Rep.*, vol. 7, pp. 1-10, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-00711-w.
- [14] M. Thommes, K. Kaneko, A. V. Neimark, J. P. Olivier, F. Rodriguez-Reinoso, J. Rouquerol, and K. S. W. Sing, "Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)," *Pure Appl. Chem.*, vol. 87, pp. 1051-1069, 2015, doi: 10.1515/pac-2014-1117.
- [15] J. Yue, Z. Wang, J. Chen, M. Zheng, Q. Wang, and X. Lou, "Investigation of pore structure characteristics and adsorption characteristics of coals with different destruction types," *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 37, pp. 623-648, 2019, doi: 10.1177/0263617419868076.
- [16] M. Abunowara, M. A. Bustam, S. Sufian, M. Babar, U. Eldemerdash, H. Suleman, R. Bencini, and S. Ullah, "Characterization of Mukah-Balingian and Merit-Pila Coals before and after Subcritical  $\text{CO}_2$  Exposure Using Surface-Area Techniques," *J. Environ. Eng.*, vol. 146, 2020, Art. no. 04020087, doi: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001761.
- [17] V. Gargiulo, A. Gomis-Berenguer, P. Giudicianni, C. O. Ania, R. Ragucci, and M. Alfè, "Assessing the Potential of Biochars Prepared by Steam-Assisted Slow Pyrolysis for  $\text{CO}_2$  Adsorption and Separation," *Energy and Fuels*, vol. 32, pp. 10218-10227, 2018, doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b01058.
- [18] L. A. R. Giusto, F. L. Pissetti, T. S. Castro, and F. Magalhães, "Preparation of Activated Carbon from Sugarcane Bagasse Soot and Methylene Blue Adsorption," *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 228, 2017, doi: 10.1007/s11270-017-3422-5.