

DOI:10.22144/ctujos.2026.008

## ĐIỀU CHẾ THAN HOẠT TÍNH TỪ VỎ CỬ ẤU: ỨNG DỤNG HẤP PHỤ THUỐC NHUỘM VÀ LÀM ĐIỆN CỰC SIÊU TỤ ĐIỆN

Trần Thị Hồng Ngân<sup>1\*</sup>, Trần Trung Dũng<sup>1</sup>, Huỳnh Nguyễn Như Ngọc<sup>1</sup> và Trần Văn Mẫn<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Trường Trung học phổ thông Lấp Vò 1, Việt Nam

<sup>2</sup>Phòng thí nghiệm Hóa Lý Ứng dụng, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>3</sup>Khoa Hóa học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ (Corresponding author): hngandhsHoa10@gmail.com

### Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 21/05/2025

Sửa bài (Revised): 02/07/2025

Duyệt đăng (Accepted): 03/12/2025

**Title:** Synthesis of activated carbon from *Trapa bicornis* shell: Applications for aqueous dye adsorption and supercapacitor electrodes

**Author:** Tran Thi Hong Ngan<sup>1\*</sup>, Tran Trung Dung<sup>1</sup>, Huynh Nguyen Nhu Ngoc<sup>1</sup> and Tran Van Man<sup>2,3</sup>

**Affiliation(s):** <sup>1</sup>Lap Vo 1 High School, Dong Thap Province, Viet Nam; <sup>2</sup>Applied Physical Chemistry Laboratory, University of Science, Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Viet Nam; <sup>3</sup>Faculty of Chemistry, University of Science, Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Viet Nam

### TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, kết quả tổng hợp và khảo sát ứng dụng của vật liệu than hoạt tính (AC) từ phế phẩm vỏ củ ấu cho hai mục tiêu: xử lý nước thải và lưu trữ năng lượng được trình bày. Vật liệu được điều chế thành công bằng phương pháp nung pha rắn và hoạt hóa hóa học bằng potassium hydroxide (KOH). Phân tích XRD xác nhận cấu trúc carbon vô định hình đặc trưng, với đỉnh nhiễu xạ rộng tại  $2\theta \approx 23-30^\circ$  và  $45^\circ$ . Vật liệu có bề mặt xốp và diện tích bề mặt riêng đạt  $774 \text{ m}^2/\text{g}$ . Trong ứng dụng xử lý môi trường, vật liệu đã được thử nghiệm trên mẫu nước thải thực tế từ làng nghề dệt chiếu Định Yên (Đồng Tháp), cho hiệu suất khử màu 99,89% và giảm trên 70% chỉ số BOD<sub>5</sub> và COD. Ngoài ra, khi ứng dụng làm điện cực siêu tụ điện trong dung dịch điện giải  $1,0 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ , vật liệu ghi nhận điện dung riêng cực đại là  $32 \text{ F/g}$  tại mật độ dòng  $0,5 \text{ A/g}$ , điện thế  $1 \text{ V}$  và duy trì 86,5% điện dung sau 2000 chu kỳ.

**Từ khóa:** Carbon vô định hình, siêu tụ điện, than hoạt tính, vỏ củ ấu

### ABSTRACT

This study presents the synthesis and application of activated carbon (AC) derived from *Trapa bicornis* shell waste for dual purposes: wastewater treatment and energy storage. The AC was successfully prepared via solid-state pyrolysis and chemical activation with potassium hydroxide (KOH). XRD analysis confirmed a characteristic amorphous carbon structure with broad diffraction peaks at  $2\theta \approx 23-30^\circ$  and  $45^\circ$ . The material exhibited a porous surface with a high specific surface area of  $774 \text{ m}^2/\text{g}$ . For environmental remediation, the AC was tested on real wastewater from a traditional sedge mat dyeing village, achieving 99.89% color removal and over 70% reduction in BOD<sub>5</sub> and COD. Furthermore, as a supercapacitor electrode material in  $1.0 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$  electrolyte, the AC delivered a maximum specific capacitance of  $32 \text{ F/g}$  at  $0.5 \text{ A/g}$ ,  $1 \text{ V}$  potential, and maintained 86.5% of its initial capacitance after 2000 cycles.

**Keywords:** Activated Carbon, Amorphous Carbon, Supercapacitor, *Trapa bicornis* shell

## 1. GIỚI THIỆU

Siêu tụ điện hóa (electrochemical supercapacitor) là thiết bị lưu trữ năng lượng với nhiều ưu điểm như mật độ công suất lớn ( $\geq 10$  kW/kg), điện dung riêng lớn (vài đến vài trăm F/g), khả năng phóng/sạc nhanh, tuổi thọ hoạt động dài. Trong nhiều thập kỷ qua, các vật liệu điện cực được sử dụng trong siêu tụ thường là oxit kim loại, các polymer dẫn điện, các vật liệu nano carbon có diện tích bề mặt lớn. Tuy nhiên, vật liệu nano và polymer dẫn điện có chi phí sản xuất cao nên các vật liệu này bị hạn chế khả năng ứng dụng (Hasbullah & Noor, 2022; Teo et al., 2016).

Trong bối cảnh đó, việc tìm kiếm các tiền chất carbon giá rẻ, bền vững từ sinh khối nông nghiệp đang là một xu hướng được quan tâm. Vô cù ầu, với hàm lượng cellulose, hemicellulose và lignin (Khodayari et al., 2021), nổi lên như một nguồn nguyên liệu đầy hứa hẹn để làm vật liệu hấp phụ xử lý nước và làm điện cực siêu tụ điện. Quá trình chuyển hóa sinh khối thành than hoạt tính thường bao gồm hai giai đoạn chính: (i) nhiệt phân ở nhiệt độ trong khoảng 400 – 700 °C nhằm loại bỏ các thành phần bay hơi và hình thành bộ khung carbon và (ii) hoạt hóa bề mặt bằng phương pháp hóa học hoặc vật lý để phát triển hệ thống lỗ xốp trong cấu trúc carbon, qua đó làm tăng diện tích bề mặt riêng của vật liệu (Ukkakimapan et al., 2020).

Trên thế giới đã có một số báo cáo về việc sử dụng vô cù ầu để tổng hợp vật liệu carbon. Năm 2018, vô cù ầu lần đầu tiên được sử dụng để điều chế vật liệu carbon (dùng trong phân tích điện hóa), bằng phương pháp nhiệt phân và sau đó xử lý trong môi trường acid (Wang et al., 2019). Năm 2021, vô cù ầu được nhiệt giải trong điều kiện có mặt KOH để làm vật liệu trong việc hấp phụ khí CO<sub>2</sub> (Zhao et al., 2021). Trong cùng năm này, một quy trình xanh tổng hợp vật liệu carbon pha tạp nitrogen từ nguồn nguyên liệu vô cù ầu và vô trứng (Hsu et al., 2021).

Mặc dù đã có những nghiên cứu ban đầu, việc khảo sát một cách hệ thống quy trình hoạt hóa hoá học bằng KOH và đánh giá đồng thời trên cả hai ứng dụng xử lý nước thải và siêu tụ điện từ vô cù ầu Việt Nam vẫn còn là một hướng đi mới. Vì vậy, trong nghiên cứu này, than hoạt tính (AC) được điều chế từ vô cù ầu có nguồn gốc Lấp Vò, Đồng Tháp. Quy trình thực hiện qua hai giai đoạn: tiền carbon hóa vô cù ầu trong môi trường khí Ar ở nhiệt độ 300°C trong 1 giờ, sau đó trộn với KOH tỷ lệ 1:2 và hoạt hóa trong môi trường Ar ở nhiệt độ 800°C trong 1 giờ. Các đặc tính về cấu trúc và hình thái của AC

được khảo sát bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD) và hiển vi điện tử quét (SEM). Hiệu quả ứng dụng của vật liệu được đánh giá thông qua khả năng xử lý nước thải nhuộm và các tính chất điện hóa (đo quét thế vòng tuần hoàn - CV, và phóng sạc dòng cố định - GCD) khi làm điện cực siêu tụ điện.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Thiết bị, hóa chất

Hóa chất được sử dụng trong nghiên cứu gồm: KOH (Sigma – Aldrich), Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Sigma – Aldrich), N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) (Fisher), Poly(vinylidene fluoride) (PVDF) (Sigma – Aldrich), C65 (MTI).

Quy trình tổng hợp vật liệu AC được nung trong lò nung ống, model GSL-1100X tại Phòng thí nghiệm Hóa Lý Ứng dụng – Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh.

Quy trình khảo sát khả năng hấp phụ methylen xanh của AC-vô cù ầu theo thời gian được đo bằng thiết bị đo UV-Vis, model: V-670 tại Phòng thí nghiệm Hóa Nano, bộ môn Hoá Lý, Khoa Hoá học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh.

Đánh giá cấu trúc của AC vật liệu thu được sử dụng nhiễu xạ tia X (XRD) trên máy Bruker D8 – Advanced tại Phòng thí nghiệm phân tích trung tâm, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh. Phép đo sử dụng nguồn CuK $\alpha$  có bước sóng  $\lambda=0,15418$  nm, góc quét 2 $\theta$  từ 10 ° đến 80 °, độ phân giải 0,020 ° và thời gian lấy mẫu là 0,25 giây. Hình thái của AC được khảo sát bằng phương pháp hiển vi điện tử quét (SEM) trên thiết bị Jeol JSM-IT 200 tại Phòng thí nghiệm phân tích trung tâm, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh. Diện tích bề mặt riêng được nghiên cứu bằng phương pháp hấp phụ và giải hấp phụ khí N<sub>2</sub> trên thiết bị Quantachrome Autosorb-iQ2, tại Viện Công nghệ Hóa học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Đánh giá tụ điện bằng phương pháp điện hoá quét thế vòng tuần hoàn (Cyclic Voltammetry, CV) được thực hiện ở nhiều tốc độ quét khác nhau 5, 10, 20, 50, 75 và 100 mV/s trong vùng thế từ 0 V đến 1,0 V trong chất điện ly 1,0 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Để đánh giá khả năng hấp phụ đồng thời các thông số ô nhiễm trong nước thải nhuộm chiếu bằng vật liệu chế tạo từ vô cù ầu, các chỉ số độ màu, pH, BOD<sub>5</sub>, COD trong dung dịch nước thải nhuộm chiếu trước và sau hấp phụ được phân tích với thời gian cân bằng 90 phút, thể tích dung dịch 500 mL, khối

lượng vật liệu hấp phụ sử dụng 0,5 gam. Kết quả phân tích được thực hiện tại Trung tâm Kiểm định và Kiểm nghiệm tỉnh Đồng Tháp. Các phương pháp phân tích tuân thủ theo các tiêu chuẩn hiện hành, cụ thể như sau:

– pH: xác định theo phương pháp điện cực [TCVN 6492:2011].

– Độ màu: xác định theo phương pháp so màu [TCVN 6185:2015].

– Nhu cầu oxy hóa học (COD): xác định theo phương pháp chuẩn độ kali dicromat [SMEWW 5220C:2023].

– Nhu cầu oxy sinh hóa sau 5 ngày (BOD<sub>5</sub>): xác định theo phương pháp pha loãng và đo oxy hòa tan [SMEWW 5210B:2023].

**2.2. Quy trình tổng hợp vật liệu AC**

Vỏ củ ấu được sấy khô và nghiền mịn thành bột, sau đó nung 4,00 gam bột ấu ở nhiệt độ 300°C trong 1 giờ, môi trường khí Ar với lưu lượng khí 0,2 L/min (ký hiệu mẫu AC 300). Mẫu AC 300 được phối trộn với KOH (2,00 gam AC 300 : 4,00 gam KOH) và tiếp tục nung ở 800°C trong 1 giờ, điều kiện khí trơ Ar (lưu lượng khí 0,2 L/min). Mẫu sau khi nung được rửa qua nhiều lần với nước cất đến khi pH = 7. Sau đó, mẫu được sấy chân không ở 80°C thu sản phẩm được ký hiệu là AC-vỏ ấu.

**2.3. Quy trình tạo màng điện cực và lắp tụ điện**

Hỗn hợp vật liệu hoạt tính AC-vỏ ấu, chất dẫn điện carbon C65 và chất kết dính PVdF pha trong dung môi NMP 10% được chuẩn bị theo tỉ lệ khối lượng 80:10:10 bằng cách khuấy trộn trong máy trộn Thinky. Sau khi thu được dung dịch có dạng keo sệt, hỗn hợp này được phủ lên nền Nickel (Ni) sử dụng kỹ thuật Doctor-blade, sau đó sấy trong điều kiện chân không ở 80 °C trong vòng 12 giờ để tạo thành lớp màng điện cực.

Tụ điện đối xứng được lắp ráp theo cấu trúc Swagelok với hai điện cực hình tròn có diện tích bề mặt là 1,27 cm<sup>2</sup> và mật độ vật liệu hoạt tính 3,98 mg/cm<sup>2</sup>. Hai điện cực này được ngăn cách bằng màng lọc Whatman, với dung dịch điện ly là 1,0 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

**2.4. Khảo sát thời gian cân bằng của quá trình hấp phụ MB của AC từ vỏ ấu**

Để khảo sát quá trình hấp phụ MB bằng AC vỏ củ ấu, 0,1 gam vật liệu được cho hấp phụ 100 mL dung dịch MB 600ppm trong các khoảng thời gian khác nhau: 5 phút, 10 phút, 15 phút, 30 phút, 45 phút, 60 phút, 90 phút, 120 phút.

Các dung dịch được pha loãng sau khi hấp phụ để phù hợp với đường chuẩn đã xây dựng. Sau đó, các dung dịch MB sau pha loãng được tiến hành đo quang ở các thời gian hấp phụ khác nhau và lấy kết quả độ hấp thụ ở bước sóng 664 nm bằng máy đo UV-Vis.

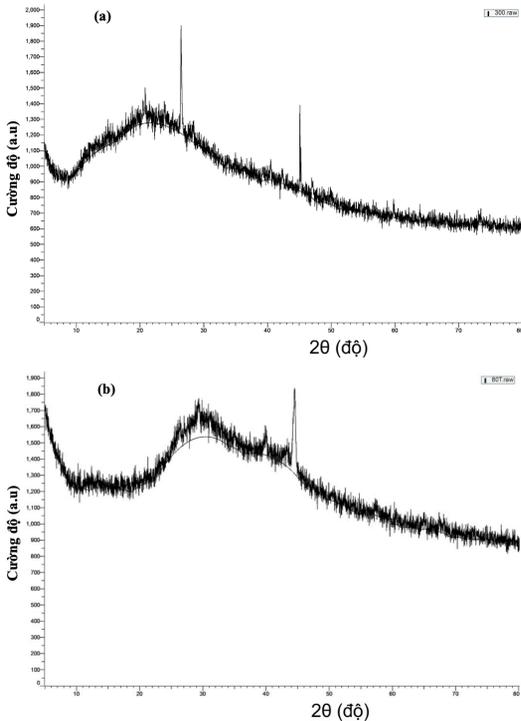
**3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

**3.1. Phân tích cấu trúc và hình thái của các mẫu AC**

Kết quả nhiễu xạ tia X của AC-vỏ ấu nung giai đoạn 1 và 2 được thể hiện trong Hình 1. Cả hai giai đoạn nung các mẫu carbon đều có đỉnh nhiễu xạ rộng từ 20° đến 27°, tương ứng với sự nhiễu xạ trên mặt phẳng (002), đặc trưng cho carbon vô định hình. Đối với mẫu AC-vỏ ấu ở khoảng 2θ ≈ 43 - 45°, được quy cho sự nhiễu xạ trên các mặt phẳng (100) và (101), xuất hiện đỉnh nhiễu xạ rộng hơn so với mẫu AC 300, đỉnh này không phản ánh sự sắp xếp giữa các lớp, mà thể hiện trật tự nguyên tử carbon bên trong một mặt phẳng graphene (Li et al., 2007). Kết quả này cho thấy ở giai đoạn 2, khi tăng nhiệt độ nung lên 800°C và hoạt hoá với KOH, vật liệu carbon từ vỏ ấu được hình thành nhiều hơn so với 300°C.

**Bảng 2. Một số chỉ tiêu chất lượng nước trước và sau xử lý bằng AC-vỏ ấu**

Chỉ tiêu	Trước hấp phụ	Sau hấp phụ	Hiệu suất (%)	Cột A QCVN	Cột B QCVN	Đơn vị tính
pH	7,52	7,49	-	6-9	5,5-9	-
Màu sắc	11981	12,66	99,89	50	150	TCU
COD	291,2	84,6	70,95	75	150	mg/L
BOD <sub>5</sub>	196,0	54,0	72,45	30	50	mg/L

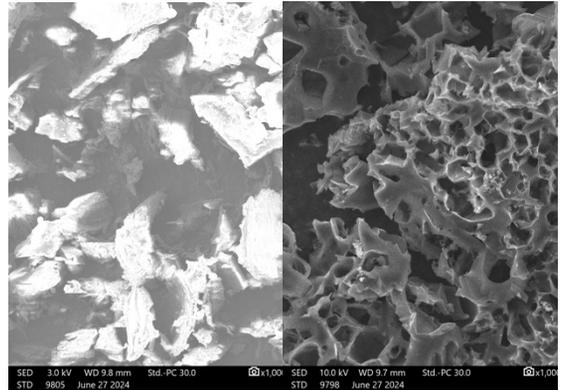


**Hình 1. Giải đồ XRD của các mẫu vật liệu a) nung giai đoạn 1 và b) nung giai đoạn 2**

Ngoài ra, dựa vào kết quả phân tích EDX được thể hiện trong Hình 2, cho thấy vật liệu chủ yếu bao gồm hai nguyên tố là Carbon (C, chiếm 89,29% khối lượng) và Oxygen (O, chiếm 10,71% khối lượng). Phân tích EDX không phát hiện thấy sự tồn tại của Kali (K) hay Silic (Si), là các tạp chất vô cơ có thể xuất hiện từ chất hoạt hóa KOH hoặc từ nguồn sinh khối ban đầu, chứng tỏ các hợp chất của nó (như  $K_2CO_3$  hay KOH dư) đã được loại bỏ hoàn toàn trong quá trình rửa.

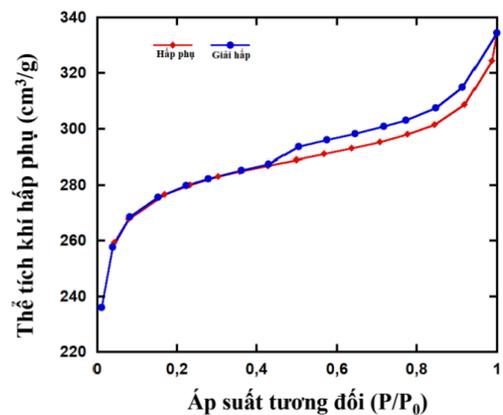
Từ hai kết quả XRD và EDX cho thấy quy trình tổng hợp đã tạo ra vật liệu than hoạt tính từ vỏ củ ấu có độ tinh khiết cao.

Hình thái bề mặt của vật liệu trước và sau quá trình hoạt hóa được thể hiện trong Hình 2. Kết quả được thể hiện ở Hình 2a cho thấy vật liệu sau giai đoạn tiền carbon hóa có các hạt kích thước không đồng đều và bề mặt còn đặc, ít lỗ xốp. Ngược lại, sau khi được hoạt hóa bằng KOH (Hình 2b), cấu trúc vật liệu đã có sự thay đổi rõ rệt. Bề mặt trở nên gồ ghề và xuất hiện nhiều lỗ xốp. Điều này khẳng định hiệu quả của quá trình hoạt hóa trong việc tạo ra diện tích bề mặt lớn.



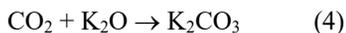
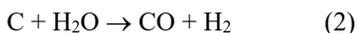
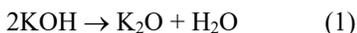
**Hình 2. Ảnh SEM các mẫu nung ở giai đoạn 1 (a) và giai đoạn 2 sau hoạt hóa (b)**

Tính chất bề mặt của vật liệu còn được đặc trưng thông qua diện tích bề mặt riêng, được xác định bằng phương pháp Brunauer–Emmett–Teller (BET). Hình 3 trình bày đường đẳng nhiệt hấp phụ/giải hấp phụ khí  $N_2$  của vật liệu, có dạng đường cong loại IV theo phân loại của IUPAC. Đường cong này xuất hiện một vòng lặp đặc trưng trong khoảng áp suất tương đối ( $P/P_0$ ) từ 0,4 đến 0,6, phản ánh sự hiện diện của các mao quản trung bình (mesopores) trong cấu trúc vật liệu (Ma et al., 2018). Điều này cũng phù hợp khi nhận thấy đường kính mao quản trung bình của vật liệu khoảng 1 – 30 nm. Diện tích riêng bề mặt của mẫu AC-vỏ ấu là  $774 \text{ m}^2/\text{g}$ . So sánh với kết quả nghiên cứu của Tai and Anh (2024) tổng hợp vật liệu từ vỏ củ ấu bằng phương pháp thủy nhiệt đã tạo ra  $Fe_2O_3$  phủ lên bề mặt biochar ( $84,212 \text{ m}^2/\text{g}$ ), kết quả diện tích bề mặt của vật liệu AC-vỏ ấu vượt trội hơn.



**Hình 3. Đường đẳng nhiệt hấp phụ/giải hấp  $N_2$  của mẫu AC-vỏ ấu**

Có thể giải thích sự hoạt hoá hoá học giúp tăng diện tích bề mặt riêng của vật liệu do KOH là một trong các tác nhân hoạt hóa bề mặt. Ban đầu KOH phản ứng theo pha rắn – rắn và tiếp theo là phản ứng rắn – lỏng, được mô tả qua các phương trình phản ứng dưới đây (Jin et al., 2021):



Ở khoảng 400°C, KOH bị phân hủy thành K<sub>2</sub>O và H<sub>2</sub>O như mô tả trong phản ứng (1). Carbon có trong vỏ ấu phản ứng với hơi nước, tạo thành CO và H<sub>2</sub> theo phản ứng (2). Khí CO tiếp tục tham gia phản ứng với H<sub>2</sub>O để sinh ra lượng lớn H<sub>2</sub> như ở phản ứng (3). Khi nhiệt độ tăng đến 800°C, CO<sub>2</sub> phản ứng với K<sub>2</sub>O để tạo thành K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> theo phản ứng (4). Đồng thời, K<sub>2</sub>O tiếp tục bị khử bởi khí H<sub>2</sub> và carbon, tạo thành kim loại K theo các phản ứng (5) và (6). Một giả thiết đã được đề xuất cho rằng sự hình thành của K đóng vai trò thúc đẩy quá trình hoạt hóa và tạo điều kiện cho các nguyên tử K xâm nhập vào giữa các lớp carbon. Giai đoạn hoạt hóa được thực hiện trong môi trường khí trơ, tiếp theo là bước rửa bằng nước cất nhằm loại bỏ các tạp chất còn lại, từ đó hình thành cấu trúc vi xốp có diện tích bề mặt riêng cao.

### 3.2. Khảo sát khả năng hấp phụ methylen xanh của AC-vỏ củ ấu theo thời gian

Để nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian tới khả năng hấp phụ MB thì phản ứng được thực hiện với điều kiện gồm 0,1 gam AC-vỏ củ ấu, 100 ml dung dịch MB 600 ppm, nhiệt độ phòng ở các khoảng thời gian 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 phút. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của thời gian đến hiệu suất hấp phụ MB được thể hiện ở Bảng 1.

Từ các kết quả ở Bảng 1 cho thấy dung lượng hấp phụ của vật liệu tăng khi thời gian hấp phụ tăng từ 5 đến 120 phút. Khả năng hấp phụ tương đối tốt trong thời gian 30 phút đầu. Hiệu suất hấp phụ cao, đạt 91,08%, có thể được lý giải bởi sự hiện diện của hệ thống lỗ xốp có đường kính ở mức trung bình (micropores), tạo điều kiện thuận lợi cho sự khuếch tán và hấp phụ của các phân tử có kích thước lớn như methylene blue (MB) (Nasrullah et al., 2019). Bên cạnh đó, lực Van der Waals và lực

hút tĩnh điện cũng góp một phần vào việc giữ các phân tử MB trên bề mặt vật liệu. Dung lượng hấp phụ đạt cực đại ở 90 phút. Từ 90 đến 120 phút dung lượng hấp phụ thay đổi không đáng kể sau khi đạt được sự hấp phụ hoàn toàn. Như vậy, thời gian hấp phụ là 90 phút là thích hợp nhất và được giữ cố định cho các thí nghiệm tiếp theo.

**Bảng 1. Các thông số hấp phụ MB trên AC-vỏ ấu.**

Thời gian (min)	C <sub>0</sub>	C <sub>e</sub>	A(%)
5	154,89	600	74,18
10	116,46	600	80,59
15	89,58	600	85,07
30	53,51	600	91,08
45	49,78	600	91,70
60	32,67	600	94,56
90	14,29	600	97,62
120	13,96	600	97,67

### 3.3. Đánh giá khả năng hấp phụ

Quá trình thu mẫu nước thải nhuộm được thực hiện theo đúng TCVN 6663-3:2016. Mẫu nước được lấy từ làng chiếu truyền thống tại xã Định Yên, tỉnh Đồng Tháp. Mẫu nước sau khi lấy được bảo quản ở nhiệt độ khoảng 20°C. Trong bài nghiên cứu này các phương pháp phân tích mẫu nước, gửi về Trung tâm Kiểm định và Kiểm nghiệm tỉnh Đồng Tháp.

Để có cơ sở đánh giá thực trạng ô nhiễm trong nước thải nhuộm chiếu, khảo sát một số chỉ tiêu trong mẫu nước được tiến hành và thu kết quả như sau: độ màu (11981 TCU); pH (7,52); BOD<sub>5</sub> (196 mg/L), COD (291,2 mg/L). Kết quả này cho thấy các thông số ô nhiễm trong nước thải nhuộm chiếu là rất cao, vượt xa các giá trị giới hạn quy định tại Cột B của QCVN 40:2011/BTNMT (quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về nước thải công nghiệp, áp dụng cho các nguồn nước không dùng cho mục đích cấp nước sinh hoạt (Ministry of Natural Resources and Environment, 2011)).

Để đánh giá tổng quan khả năng hấp phụ đồng thời các thông số ô nhiễm trong nước thải nhuộm chiếu bằng AC-vỏ ấu, chúng tôi tiến hành phân tích các chỉ số độ màu, pH, BOD<sub>5</sub>, COD trong dung dịch nước thải nhuộm chiếu trước và sau hấp phụ với thời gian cân bằng 90 phút, thể tích dung dịch 500 mL, khối lượng vật liệu hấp phụ sử dụng 0,5 gam, tốc độ khuấy 650 rpm. Hiệu suất hấp phụ chất nhuộm A(%) được tính toán theo công thức:

$$A = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

Trong đó:  $C_0$  và  $C_c$  lần lượt là thông số chỉ tiêu chất lượng nước trước và sau khi xử lý bằng AC-vỏ ấu

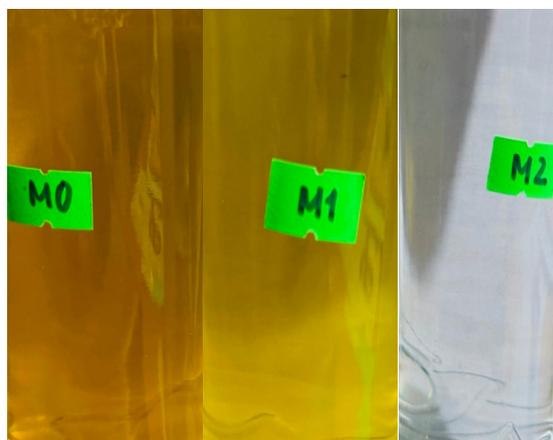
Kết quả hấp phụ nước thải nhuộm chiếu được thể hiện trong Bảng 2. Kết quả xử lý mẫu nước thải nhuộm chiếu thực tế sau 90 phút hấp phụ cho thấy vật liệu than hoạt tính từ vỏ củ ấu có hiệu quả rất cao đối với nhiều chỉ tiêu ô nhiễm. Thông số màu sắc giảm mạnh từ 11981 TCU xuống 12,66 TCU, đạt hiệu suất 99,89%, đáp ứng cả cột A và B của

QCVN 40:2011/BTNMT. Đối với các chỉ tiêu ô nhiễm hữu cơ, nồng độ COD giảm từ 291,2 mg/L xuống còn 84,6 mg/L (hiệu suất 70,95%). Giá trị này đã đáp ứng được quy chuẩn tại Cột B (giới hạn 150 mg/L). Tương tự, nồng độ BOD<sub>5</sub> giảm từ 196 mg/L xuống còn 54,0 mg/L (hiệu suất 72,45%). Tuy nhiên, nồng độ này vẫn còn cao hơn một chút so với giới hạn tại Cột B (50 mg/L), điều này có thể được lý giải là do nồng độ ô nhiễm đầu vào của mẫu nước thải thực tế là rất cao.

**Bảng 2. Một số chỉ tiêu chất lượng nước trước và sau xử lý bằng AC-vỏ ấu**

Chỉ tiêu	Trước hấp phụ	Sau hấp phụ	Hiệu suất (%)	Cột A QCVN	Cột B QCVN	Đơn vị tính
pH	7,52	7,49	-	6-9	5,5-9	-
Màu sắc	11981	12,66	99,89	50	150	TCU
COD	291,2	84,6	70,95	75	150	mg/L
BOD <sub>5</sub>	196,0	54,0	72,45	30	50	mg/L

Nhìn chung, các kết quả này cho thấy vật liệu AC-vỏ ấu có khả năng hấp phụ xử lý tốt các chỉ tiêu màu sắc, BOD<sub>5</sub>, COD trong nước thải nhuộm chiếu.



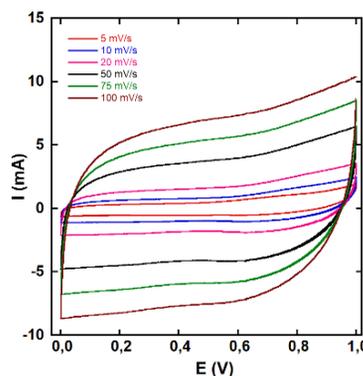
**Hình 4. Các mẫu dung dịch nước nhuộm chiếu (a) chưa xử lý qua vật liệu than vỏ củ ấu, (b) xử lý qua AC 300 và (c) xử lý qua AC-vỏ ấu**

Có thể giải thích việc loại bỏ các chất ô nhiễm hữu cơ (góp phần tạo nên chỉ số BOD<sub>5</sub> và COD) và phẩm nhuộm là do diễn ra chủ yếu thông qua cơ chế hấp phụ hóa lý (Dąbrowski, 2001). Cụ thể, quá trình này bao gồm: hấp phụ vật lý: các phân tử ô nhiễm bị khuếch tán và giữ lại bên trong hệ thống lỗ xốp phức tạp của AC-vỏ ấu nhờ các lực tương tác yếu như lực Van Der Waals; hấp phụ hóa học: có sự hình thành các tương tác mạnh hơn như liên kết hydro hoặc tương tác  $\pi$ - $\pi$  giữa các vòng thơm của phân tử thuốc nhuộm và bề mặt graphitic của AC-vỏ ấu. Các nhóm

chức chứa oxy trên bề mặt carbon cũng đóng vai trò là các tâm hấp phụ tích cực.

**3.4. Phân tích quét thế vòng tuần hoàn**

Đường cong quét thế vòng tuần hoàn (CV) tại các tốc độ quét khác nhau được thể hiện trong Hình 5. Tất cả các đường cong CV đều có hình dạng đối xứng giống hình chiếc lá và không xuất hiện các đỉnh oxy hóa khử rõ rệt, cho thấy cơ chế tích điện chủ yếu là điện dung lớp kép và quá trình hấp phụ/khử không Faraday, đồng thời phản ứng điện trở giữa điện cực và chất điện ly Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> là thấp (Silva et al., 2015). Khi tăng tốc độ quét, diện tích bao quanh đường cong CV giảm dần, dẫn đến sự suy giảm điện dung của vật liệu ở tốc độ quét cao. Giá trị điện dung riêng được tính toán từ các đường cong CV theo phương trình (1).



**Hình 5. Đường cong quét thế vòng tuần hoàn của mẫu AC 800 ở các tốc độ quét khác nhau**

$$C = \frac{S}{2 \times v \times m \times \Delta E} \quad (1)$$

Trong đó: S là diện tích hình học của đường cong CV, v là tốc độ quét thế (V/s), m là khối lượng vật liệu hoạt động (g) và ΔE là khoảng quét thế (V).

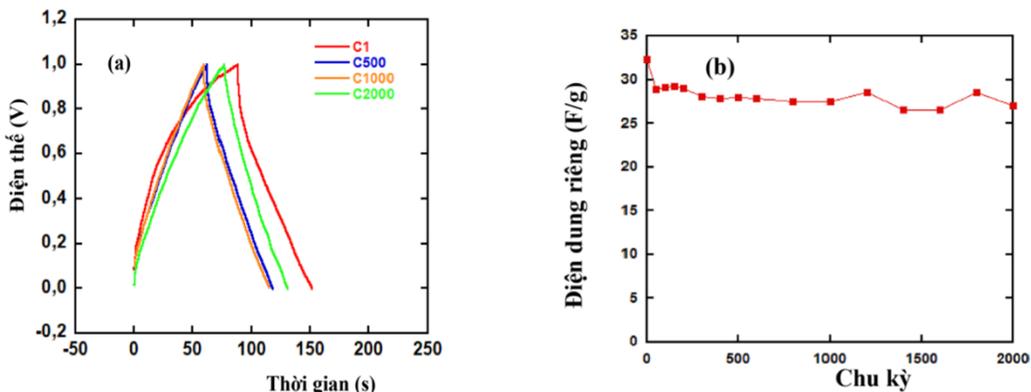
Cụ thể, ở tốc độ quét chậm 5 mV/s điện dung của các mẫu AC-vỏ ầu là 32 F/g và giảm xuống còn 28 F/g ở tốc độ 100 mV/s. Nguyên nhân ở các tốc độ quét thấp, các ion trong dung dịch điện phân có nhiều thời gian để khuếch tán vào các lỗ rỗng của vật liệu điện cực và tương tác với toàn bộ bề mặt điện hóa. Điều này giúp tối đa hóa quá trình tích lũy điện tích và duy trì điện dung cao. Khi tốc độ quét tăng lên, các ion không có đủ thời gian để thâm nhập vào sâu bên trong cấu trúc vi mô của vật liệu. Do đó, sự tương tác với bề mặt điện cực giảm, dẫn đến sự giảm điện dung (Simon & Gogotsi, 2008). Để đánh giá khách quan, giá trị 32 F/g ở tốc độ quét 5 mV/s được so sánh với các vật liệu tương tự trong các công trình đã công bố. Ví dụ, nghiên cứu của Thinh et al. (2025) về than hoạt tính từ vỏ sấu riêng, cũng hoạt hóa bằng KOH và đo trong dung dịch Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, đã ghi nhận mức điện dung riêng cao hơn, đạt 70 F/g. Sự khác biệt này có thể được lý giải chủ yếu là do diện tích bề mặt riêng của vật liệu từ vỏ sấu riêng (1591 m<sup>2</sup>/g) cao hơn đáng kể so với vật liệu từ vỏ củ ầu trong nghiên cứu này (774 m<sup>2</sup>/g).

**3.5. Phân tích phóng xạ dòng cố định**

Các đường cong phóng và sạc điện (Hình 6a) của mẫu vật liệu có dạng đường cong phóng xạ đối xứng. Hình dạng này đặc trưng cho quá trình phóng xạ đều và ổn định, biểu thị rằng mẫu than hoạt tính này có đặc điểm điện hóa tốt, với sự cân bằng giữa

quá trình hấp thụ và giải phóng ion. Quá trình sạc (0 đến khoảng 100 giây) điện thế tăng tuyến tính theo thời gian cho thấy quá trình sạc ổn định, không có hiện tượng phân cực rõ rệt. Quá trình phóng (100 đến 150 giây) đường cong điện thế giảm tuyến tính, biểu hiện của quá trình phóng đều, chứng minh điện cực hoạt động ổn định. Thời gian phóng sạc sau 2000 chu kỳ khoảng 140 giây. Có thể giải thích nguyên nhân dao động là do trong các chu kỳ đầu (khoảng 1200 chu kỳ đầu), các ion trong chất điện giải dần dần thâm sâu và tiếp xúc được với toàn bộ các lỗ xốp trên bề mặt carbon, làm tăng diện tích bề mặt hiệu dụng và làm tăng điện dung. Hiện tượng gia tăng điện dung này đã được ghi nhận trong nhiều nghiên cứu về vật liệu carbon xốp (Pandolfo & Hollenkamp, 2006). Sau khi đạt trạng thái bão hòa, sự suy giảm điện dung từ chu kỳ 1800 trở đi là do sự bào mòn của điện cực: quá trình phóng sạc lặp đi lặp lại có thể làm cho các điện cực than hoạt tính bị bào mòn dần dần, làm giảm độ dẫn điện của vật liệu và dẫn đến hiệu suất phóng nạp giảm. Sự bào mòn này đặc biệt xảy ra khi vật liệu phải chịu áp lực dòng điện cao và lặp lại nhiều lần (Inal et al., 2023).

Hình 6b của mẫu AC-vỏ ầu qua 2000 chu kỳ phóng sạc cho thấy sự suy giảm điện dung riêng dần dần theo số chu kỳ phóng sạc. Sau 2000 chu kỳ, điện dung duy trì được 86,5%. So với mẫu than hoạt tính vỏ trái sấu riêng của nhóm nghiên cứu Thinh et al. (2025) cũng được hoạt hóa bằng KOH, đã cho thấy khả năng duy trì 86% điện dung ban đầu sau 1000 chu kỳ phóng sạc, vật liệu từ vỏ củ ầu không chỉ có hiệu suất duy trì điện dung tương đương mà còn thể hiện độ ổn định trong một số chu kỳ dài gấp đôi.



**Hình 6. Đường cong phóng xạ (a) và độ bền phóng xạ (b) với mật độ dòng điện 0,5 A/g ở điện thế 1V của mẫu AC-vỏ củ ầu trong dung dịch điện ly Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M**

#### 4. KẾT LUẬN

Than hoạt tính từ vỏ củ ấu bằng phương pháp nung pha rắn kết hợp hoạt hóa hoá học bằng KOH được điều chế thành công trong nghiên cứu. Kết quả cho thấy vật liệu là carbon vô định hình và bề mặt xốp, tại điều kiện nung 800°C (AC-vỏ ấu) cho diện tích bề mặt riêng lớn 774 m<sup>2</sup>/g. Khi ứng dụng hấp phụ xử lý môi trường, vật liệu AC-vỏ ấu đã thể hiện hiệu suất vượt trội, với khả năng loại bỏ gần như hoàn toàn màu trong nước thải nhuộm chiếu (99,89%) và làm giảm đáng kể các chỉ số ô nhiễm như BOD<sub>5</sub> và COD (trên 70%). Ngoài ra, trong lĩnh vực lưu trữ năng lượng, vật liệu AC-vỏ ấu khi được sử dụng làm điện cực cho tụ điện đối xứng cho tiềm năng đáng kể, với mức điện dung riêng đạt 32 F/g và độ bền chu kỳ ấn tượng, duy trì 86,5% sau 2000 chu kỳ phóng sạc.

Những kết quả nghiên cứu này không chỉ khẳng định vỏ củ ấu là một tiền chất sinh khối đầy hứa hẹn để chế tạo vật liệu carbon cao cấp, mà quan trọng hơn, nó còn mở ra một hướng đi thực tiễn để phát triển các loại vật liệu đa chức năng "xanh" và chi phí thấp từ nguồn tài nguyên bản địa. Triển vọng ứng dụng của vật liệu này là rất lớn, từ việc cung cấp một giải pháp xử lý nước thải hiệu quả cho các làng nghề, khu công nghiệp, đến việc góp phần tạo ra các thiết bị tích trữ năng lượng giá rẻ, qua đó thúc đẩy mạnh mẽ mô hình kinh tế tuần hoàn tại Việt Nam.

#### LỜI CẢM ƠN

Đề tài này được tài trợ bởi Trường Đại học Cần Thơ, Mã số: 7309.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

- Dąbrowski, A. (2001). Adsorption – from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 93(1-3), 135–224.  
[https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8)
- Inal, I. I.G., Koyuncu, F., & Perez-Page, M. (2023). Improving the rate capability of microporous activated carbon-based supercapacitor electrodes using non-porous graphene oxide. *Journal of Porous Materials*, 30(5), 1775-1787.  
<https://doi.org/10.1007/s10934-023-01459-7>
- Hasbullah, M. F. I., & Noor, M. N. (2022). Studies on Durian Peel Biomass Derived Activated Carbon for Energy Storage Application. *Int. J. Electroactive Mater*, 10, 68-77.
- Hsu, C.-H., Pan, Z.-B., Qu, H.-T., Chen, C.-R., Lin, H.-P., Sun, I.-W., Huang, C.-Y., & Li, C.-H. (2021). Green synthesis of nitrogen-doped multiporous carbons for oxygen reduction reaction using water-caltrop shells and eggshell waste. *RSC Advances*, 11(26), 15738–15747.  
<https://doi.org/10.1039/D1RA02100A>
- Khodayari, A., Thielemans, W., Hirn, U., Van Vuure, A. W., & Seveno, D. (2021). *Cellulose-hemicellulose interactions-ananoscale view. Carbohydrate Polymers*, 270, 118364.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118364>
- Li, Z. Q., Lu, C. J., Xia, Z. P., Zhou, Y., & Luo, Z. (2007). X-ray diffraction patterns of graphite and turbostratic carbon. *Carbon*, 45(8), 1686–1695.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.03.038>
- Ma, L., Wang, G., Jiang, C., Bao, H., & Xu, Q. (2018). Synthesis of core-shell TiO<sub>2</sub>@g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> hollow microspheres for efficient photocatalytic degradation of rhodamine B under visible light. *Applied Surface Science*, 430, 263-272.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.282>
- Nasrullah, A., Saad, B., Bhat, A. H., Khan, A. S., Danish, M., Isa, M. H., & Naeem, A. (2019). Mangosteen peel waste as a sustainable precursor for high surface area mesoporous activated carbon: Characterization and application for methylene blue removal. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1190–1200.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.094>
- Jin, C., Nai, J., Sheng, O., Yuan, H., Zhang, W., Tao, X., & Lou, X. W. D. (2021). Biomass-based materials for green lithium secondary batteries. *Energy & Environmental Science*, 14(3), 1326-1379.  
<https://doi.org/10.1039/D0EE02848G>
- Tai, D., K., & Anh, H. T. T. (2024). Magnetic Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/biochar composite prepared by hydrothermal method for Cu<sup>2+</sup> removal in water. *Dong Thap University Journal of Science*, 13(2), 99–107 (in Vietnamese)  
<https://doi.org/10.52714/dthu.13.2.2024.1239>
- Teo, E. Y. L., Muniandy, L., Ng, E. P., Adam, F., Mohamed, A. R., Jose, R., & Chong, K. F. (2016). High surface area activated carbon from rice husk as a high performance supercapacitor electrode. *Electrochimica Acta*, 192, 110-119.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.140>
- Thinh, N. Q., Liem, P. T., Thang, H. S., & Man, T. V. (2025). Study of electrochemical properties of activated carbon from durian shell for supercapacitor applications. *Can Tho University Journal of Science*, 61(3A), 86–90. (in Vietnamese)  
<https://doi.org/10.22144/ctujos.2025.097>

- Pandolfo, A. G., & Hollenkamp, A. F. (2006). Carbon properties and their role in supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 157(1), 11-27.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.02.065>
- Silva, R. M., Bastos, A. C., Oliveira, F. J., Conte, D. E., Fan, Y., Pinna, N., & Silva, R. F. (2015). Catalyst-free growth of carbon nanotube arrays directly on Inconel substrates for electrochemical carbon-based electrodes. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(34), 17804-17810.  
<https://doi.org/10.1039/C5TA03734D>
- Simon, P., & Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 7(11), 845-854.  
<https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- Zhao, Z., Ma, C., Chen, F., Xu, G., Pang, R., Qian, X., Shao, J., & Hu, X. (2021). Water caltrop shell-derived nitrogen-doped porous carbons with high CO<sub>2</sub> adsorption capacity. *Biomass and Bioenergy*, 145, 105969.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105969>
- Ministry of Natural Resources and Environment (2011). *National technical regulation on industrial wastewater: QCVN 40:2011/BTNMT*. Hanoi, Vietnam (in Vietnamese).  
<https://cdnmedia.eurofins.com/apac/media/311773/qcvn-40-nuoc-thai-cn.pdf>