

การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าว  
เพื่อบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

จังหวัดกาฬสินธุ์ ประเทศไทย

DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION OF COCONUT-SHELL  
ACTIVATED CARBON FOR COMMUNITY-SCALE  
TREATMENT OF AQUACULTURE WASTEWATER  
IN KALASIN PROVINCE, THAILAND

อนงค์นาถ โรจนกร วังคำหาญ<sup>1</sup> อนุชา ศรีบุรัมย์<sup>2</sup> ปณัดดา โพธินาม<sup>1</sup> และธนัชพงษ์ วังคำหาญ<sup>1\*</sup>  
Anongnart Rotjanakorn Wangchamhan<sup>1</sup>, Anucha Sriburum<sup>2</sup>, Panatda Phothinam<sup>1</sup>  
and Tanachapong Wangkhamhan<sup>1\*</sup>

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวสำหรับบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระดับชุมชน จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยมีมุ่งเพิ่มมูลค่าของเสียทางการเกษตรและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกิจกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การศึกษาประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวด้วยกระบวนการคาร์บอนไนเซชันภายใต้การควบคุม และการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) (2) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี เช่น ความชื้น ปริมาณเถ้า สารระเหย และค่าการดูดซับไอโอดีน และ (3) การประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษโดยใช้น้ำเสียจริงจากชุมชน ผลการวิจัยพบว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกมีค่าการดูดซับไอโอดีนเฉลี่ย  $982.33 \pm 4.93$  มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งอยู่ในระดับสูงและสะท้อนถึงสมรรถนะการดูดซับที่ดี การทดสอบแบบ batch jar test

<sup>1</sup>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46230

<sup>1</sup>Faculty of Science and Health Technology, Kalasin University, Muang District, Kalasin Province 46230

<sup>2</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ อำเภอเมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000

<sup>2</sup>Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Muang District, Kalasin Province 46000

\*corresponding author e-mail: tanachapong.w@hotmail.com

Received: 8 November 2025; Revised: 7 April 2026; Accepted: 10 April 2026

DOI: <https://doi.org/10.14456/lsej.2026.11>

พบว่าสามารถลดแอมโมเนียไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) ได้ร้อยละ 34.21 ลดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ได้ร้อยละ 34.85 และลดไนโตรเจนเคลดาร์ตทั้งหมด (TKN) ได้ร้อยละ 43.35 พร้อมทั้งช่วยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (pH 7.0-8.0) ผลการศึกษายืนยันว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าว มีศักยภาพในการเป็นวัสดุดูดซับสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียในระดับชุมชน สามารถลดมลพิษจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยลดการพึ่งพาสารเคมีในกระบวนการบำบัด อีกทั้งยังสะท้อนแนวทางการจัดการของเสียชีวมวลแบบเพิ่มมูลค่าที่สอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนและโมเดลเศรษฐกิจ BCG ของประเทศไทย

**คำสำคัญ:** ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าว น้ำเสียเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การดูดซับ แอมโมเนียไนโตรเจน การเพิ่มมูลค่าชีวมวล

## Abstract

This study aimed to develop and evaluate the efficiency of coconut-shell activated carbon for treating wastewater from giant freshwater prawn ponds at the community scale in Kalasin Province, Thailand. The research was designed to enhance the value of local agricultural waste while reducing environmental impacts from aquaculture activities. The novelty of this study lies in the application of coconut-shell activated carbon to actual wastewater from community-based aquaculture systems, a context that has been less studied compared to laboratory-scale research, which primarily focuses on material preparation. The study consisted of three main stages: (1) production of activated carbon from coconut shells through controlled carbonization and chemical activation using phosphoric acid ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), (2) characterization of its physicochemical properties, including moisture content, ash content, volatile matter, and iodine adsorption value, and (3) evaluation of pollutant removal efficiency using actual wastewater collected from a community-based giant freshwater prawn farming enterprise in Buaban Subdistrict, Yang Talat District, Kalasin Province. The results showed that the activated carbon exhibited a high iodine adsorption capacity of  $982.33 \pm 4.93$  Milligrams per gram, indicating strong adsorption performance. Batch jar test experiments demonstrated that the material reduced ammonia-nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) by 34.21%, total suspended solids (TSS) by 34.85%, and total Kjeldahl nitrogen (TKN) by 43.35%. These findings confirm that coconut-shell activated carbon has strong potential as a low-cost adsorbent for community-scale wastewater treatment. The material effectively reduced

key pollutants, including ammonia-nitrogen, suspended solids, and total nitrogen, while improving water quality to conditions suitable for aquaculture. In addition, this approach promotes value-added utilization of biomass waste in alignment with the circular economy and Thailand's Bio-Circular-Green (BCG) model, thereby supporting sustainable community development across environmental, economic, and social.

**Keywords:** coconut-shell activated carbon, aquaculture wastewater, adsorption, ammonia-nitrogen, biomass valorization

## บทนำ

ประเทศไทยมีศักยภาพสูงด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะกุ้งก้ามกราม ซึ่งเป็นสัตว์เศรษฐกิจสำคัญที่สร้างรายได้มากกว่า 20,000 ล้านบาทต่อปี และเป็นอาชีพหลักของหลายชุมชน รวมถึงจังหวัดกาฬสินธุ์ (Southeast Asian Fisheries Development Center [SEAFDEC], 2022) อย่างไรก็ตาม การขยายตัวของบ่อเลี้ยงกุ้งในหลายพื้นที่ได้ก่อให้เกิดการสะสมของน้ำเสียที่มีสารมลพิษ โดยพบค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และสารอินทรีย์สูงเกินมาตรฐาน ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ ระบบนิเวศท้องถิ่น และสุขภาพของชุมชน (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2025) ปัญหาดังกล่าวสะท้อนถึงความจำเป็นในการพัฒนาเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ และเหมาะสมกับบริบทของชุมชนชนบทไทย ในขณะเดียวกันจังหวัดกาฬสินธุ์มีการแปรรูปมะพร้าวจำนวนมาก ทำให้เกิดของเสียชีวมวล เช่น เปลือกมะพร้าวและกะลามะพร้าวในปริมาณสูง หากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม อาจกลายเป็นแหล่งสะสมเชื้อโรคและแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก (Jaroensombut, 2024; Gainma et al., 2024) ภายใต้นโยบายเศรษฐกิจชีวภาพ-หมุนเวียน-สีเขียวของประเทศไทย (BCG Model) การนำของเสียทางการเกษตรกลับมาเพิ่มมูลค่าเป็นวัสดุเพื่อสิ่งแวดล้อมจึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจ โดยเฉพาะถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าว ซึ่งมีโครงสร้างไมโครพอร์ พื้นที่ผิวสูง และสามารถดูดซับสารมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ahmedna et al., 2000; Gupta & Suhas, 2009)

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ยืนยันศักยภาพของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวอย่างต่อเนื่อง โดย Chan et al. (2022) รายงานว่าคาร์บอนเชิงรูพรุนจากเปลือกมะพร้าวมีความเหมาะสมต่อการกำจัดสารมลพิษที่ย่อยสลายยากในน้ำเสีย ขณะที่ Shukla et al. (2020) ชี้ว่าวัสดุดูดซับต้นทุนต่ำจากของเสียอินทรีย์สามารถลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงพาณิชย์ และ Lawal et al. (2023) ยืนยันว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวสามารถดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำเสียจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ Gratiuto et al. (2008) ยังพบว่าการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้มากกว่า 900 ตารางเมตรต่อกรัม และเพิ่มค่าการดูดซับไอโอดีนเกิน

950 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่งผลให้วัสดุมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดแอมโมเนียและสารอินทรีย์จากน้ำเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดอื่น เช่น แกลบ ชานอ้อย หรือขี้ข้าวโพด เปลือกมะพร้าว มีข้อได้เปรียบในด้านปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง โครงสร้างเชิงกลโนเชลลูโลสที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็น วัสดุพูน และความแข็งแรงเชิงโครงสร้างที่เอื้อต่อการใช้งานทั้งในระบบแบบแบตช์และระบบคอลัมน์ จึงเหมาะต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและสมรรถนะการดูดซับสูง อีกทั้งยังสอดคล้องกับการใช้ ทรัพยากรท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์สูงสุดในระดับชุมชน

ในเชิงทฤษฎี กระบวนการดูดซับสามารถอธิบายได้ทั้งในรูปแบบการดูดซับทางกายภาพและ การดูดซับทางเคมี โดยอาศัยบทบาทร่วมกันของโครงสร้างรูพรุน พื้นที่ผิว และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิววัสดุ (Gupta & Suhas, 2009; Ioannidou & Zabaniotou, 2007) การกระตุ้นด้วย  $H_3PO_4$  ช่วยเพิ่มความ พูนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ (Gratuito et al., 2008) ขณะที่พฤติกรรมการดูดซับ ของวัสดุชีวมวลสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง Langmuir-Freundlich และจลนพลศาสตร์แบบ pseudo-second-order (Wang et al., 2022) แม้ว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรรวมถึงเปลือกมะพร้าว แต่ส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการเตรียมวัสดุและ การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ หรือใช้สารละลายสังเคราะห์มากกว่าน้ำเสียจริง

ดังนั้น ช่องว่างขององค์ความรู้จึงอยู่ที่การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวกับ น้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับชุมชน รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการ ใช้งานจริง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวโดยการกระตุ้น ด้วยกรดฟอสฟอริก และประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระดับ ชุมชน พร้อมทั้งวิเคราะห์ศักยภาพในการประยุกต์ใช้ตามแนวคิดเศรษฐกิจ BCG

### วิธีดำเนินการวิจัย

1. กรอบแนวคิดและการออกแบบการวิจัย การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ที่บูรณาการแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) เพื่อการจัดการของเสีย ชีวมวลและน้ำเสียในระดับชุมชน โดยมุ่งพัฒนาเทคโนโลยีถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวให้สามารถ ประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียอย่างยั่งยืน กระบวนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

- 1) การเก็บและเตรียมวัตถุดิบจากเปลือกมะพร้าวในชุมชน
- 2) การผลิตและปรับสภาพถ่านกัมมันต์
- 3) การทดสอบสมบัติของวัสดุและประสิทธิภาพการดูดซับสารมลพิษในน้ำเสียจากบ่อ เลี้ยงกุ้งก้ามกราม
- 4) การประเมินศักยภาพเชิงเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และการประยุกต์ใช้ในระดับชุมชน

กรอบแนวคิดดังกล่าวสะท้อนแนวทางการบูรณาการ “การจัดการของเสีย-การบำบัดน้ำ- การสร้างมูลค่าเพิ่ม” ตามกรอบ BCG Model ของประเทศไทย (Kunapongkiti et al., 2024)

2. พื้นที่ศึกษาและการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย พื้นที่ศึกษา คือ ชุมชนตำบลบัวบาน อำเภอยางตลาด จังหวัดกาฬสินธุ์ ดังแสดงในภาพที่ 1 (Figure 1) ซึ่งเป็นแหล่งเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามของวิสาหกิจชุมชนที่มีการเปลี่ยนน้ำในบ่อเลี้ยงทุก 10-15 วัน และยังไม่มียุทธศาสตร์บำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ตัวอย่างน้ำเสียถูกเก็บจาก 3 จุด ได้แก่ 1) บ่อเลี้ยงกุ้งก่อนเปลี่ยนน้ำ 2) ท่อระบายน้ำออก และ 3) แหล่งน้ำภายนอกที่รับน้ำทิ้ง การเก็บตัวอย่างดำเนินการเดือนละ 1 ครั้ง ในช่วงฤดูเพาะเลี้ยงระหว่างเดือนมกราคม-มิถุนายน โดยเก็บตัวอย่างแบบผสมรวม (composite sampling) เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของระบบมากที่สุด จากนั้นเก็บรักษาและขนส่งตามมาตรฐาน APHA (2023) เพื่อควบคุมคุณภาพของตัวอย่างและเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์ (Basha et al., 2023; Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2025; Saad et al., 2024)

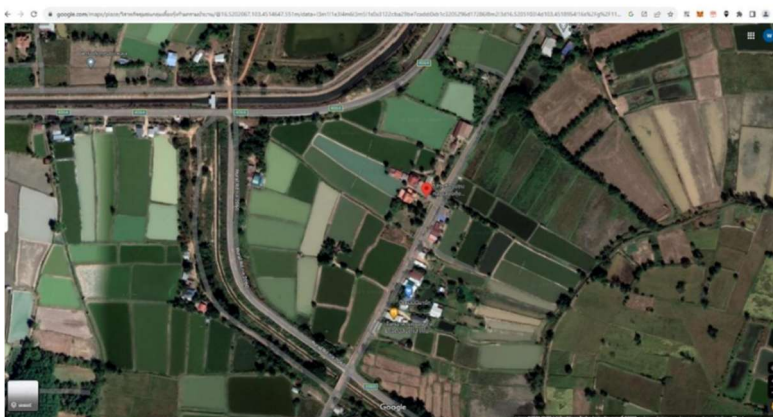


**Figure 1** Aerial view of the giant freshwater prawn farming area in Buaban Subdistrict, Yang Talat District, Kalasin Province, Thailand.

3. การผลิตและกระตุ้นถ่านกัมมันต์ เปลือกมะพร้าวถูกคัดเลือกจากแหล่งชุมชนในพื้นที่ศึกษา จากนั้นนำมาทำความสะอาดเพื่อลดสิ่งปนเปื้อน เช่น ดิน เศษอินทรีย์วัตถุ และสารตกค้างบนผิววัสดุ ก่อนนำไปตากแห้งจนมีความชื้นลดลงในระดับเหมาะสม เพื่อลดผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการคาร์บอนไนซ์ หลังจากนั้น วัสดุถูกเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ดังภาพที่ 2 (Figure 2) ที่อุณหภูมิ 500–600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ “ถ่านดิบ (char)” ซึ่งเป็นวัสดุตั้งต้นที่มีโครงสร้างคาร์บอนพื้นฐานและพร้อมสำหรับการกระตุ้นทางเคมี

ถ่านดิบที่ได้ถูกนำไปกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ , 30%) ในอัตราส่วน 1 : 3 (กรด : ถ่าน) และให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อพัฒนาโครงสร้างรูพรุนและเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุ กระบวนการนี้อาศัยบทบาทของกรดฟอสฟอริกในการช่วยคายน้ำและแตกพันธะขององค์ประกอบอินทรีย์ภายในชีวมวล ส่งผลให้เกิดการพัฒนาของโครงสร้างไมโครพอร์และเมโซพอร์

อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมรรถนะการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (Ahmedna et al., 2000; Youmee, 2015; Saleem et al., 2024)

ภายหลังการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ถูกล้างด้วยน้ำกลั่นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำล้างอยู่ใกล้เคียงสภาวะเป็นกลาง ( $\text{pH} \approx 7$ ) เพื่อลดกรดตกค้างที่อาจรบกวนสมบัติการดูดซับและการวิเคราะห์ในขั้นต่อไป จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ  $105^\circ\text{C}$  เพื่อกำจัดความชื้นส่วนเกิน และทำให้วัสดุมีความคงตัวก่อนการนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

การเลือกใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากรายงานของ Gratuito et al. (2008) และ Li et al. (2008) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นด้วย  $\text{H}_3\text{PO}_4$  สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณไมโครพอร์ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวได้อย่างชัดเจน รวมทั้งช่วยเพิ่มค่าการดูดซับไอโอดีนและประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษเมื่อเทียบกับถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น นอกจากนี้ งานของ Sujiono et al. (2022) และ Yu et al. (2024) ยังสนับสนุนว่าการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดมีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นผิว หมู่ฟังก์ชันออกซิเจน และความสามารถในการดูดซับของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ

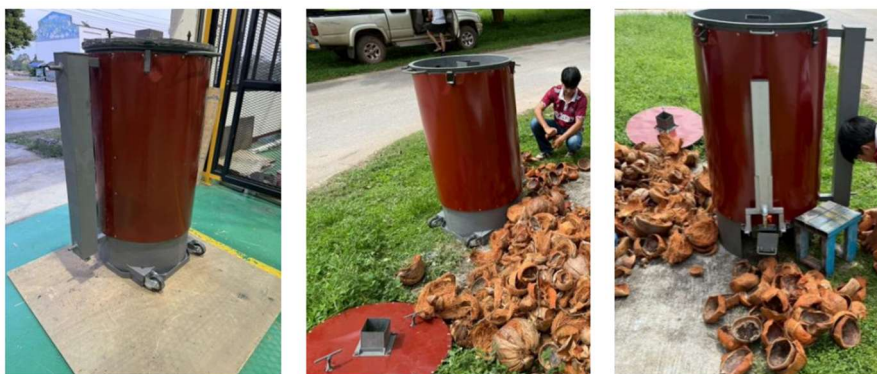


**Figure 2** Smokeless carbonization furnace used for producing coconut-shell activated carbon under controlled pyrolysis conditions.

4. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ สมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ถูกวิเคราะห์เพื่อประเมินคุณภาพของวัสดุและความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งก้ามกราม โดยครอบคลุมทั้งด้านโครงสร้างรูพรุน พื้นที่ผิว ลักษณะสัณฐานวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิววัสดุ ดังนี้

4.1 ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) วิเคราะห์เพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการดูดซับและประเมินการพัฒนาของโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กถึงขนาดกลางของถ่านกัมมันต์ ดังภาพที่ 3 (Figure 3)

4.2 ค่าความชื้น ปริมาณเถ้า และสารระเหย วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D2867-17 และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินคุณสมบัติพื้นฐานของถ่านกัมมันต์และเปรียบเทียบกับเกณฑ์ของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งหมดถูกนำมาใช้เพื่อประเมินคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้น เปรียบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิง และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของวัสดุกับประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย โดยอ้างอิงแนวทางการวิเคราะห์และการตีความผลจากงานของ Ahmedna et al. (2000), Islam et al. (2017) และ Sujiono et al. (2022) ซึ่งรายงานว่าสมบัติด้านพื้นที่ผิว ความพรุน และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวมีผลต่อสมรรถนะของถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสีย



Figure 3 Physical appearance of coconut-shell activated carbon samples.

## 5. การประเมินประสิทธิภาพการดูดซับสารมลพิษ

5.1 การทดลองแบบแบตช์ (Batch adsorption test) ทำการทดลองโดยเติมถ่านกัมมันต์ในช่วง 1–5 กรัม/ลิตร ลงในน้ำเสียจริงปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่ pH 7–8 และกวนด้วยเครื่อง magnetic stirrer ที่ความเร็ว 150 rpm เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นกรองและวิเคราะห์ค่าแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) ไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ฟอสฟอรัสรวม (TP) และสารแขวนลอย (TSS) ตามวิธีมาตรฐาน APHA (Islam et al., 2017; Li et al., 2008) ประสิทธิภาพการกำจัดคำนวณจากสมการ

$$\text{Removal efficiency (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ  $C_0$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษ และ  $C_t$  คือความเข้มข้นของสารมลพิษหลังการดูดซับที่เวลา  $t$

5.2 การทดลองแบบคอลัมน์ (Column adsorption test) ระบบคอลัมน์ถูกออกแบบโดยใช้ท่อแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร บรรจุถ่านกัมมันต์เป็นชั้นกรอง และให้น้ำเสียไหลผ่านจากด้านบนลงล่างในอัตรา 10 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อจำลองการบำบัดน้ำเสียในระบบจริง ระดับชุมชน ค่าผลการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลอง Langmuir, Freundlich, Temkin และ pseudo-second-order kinetic model เพื่ออธิบายสมดุลและกลไกการดูดซับของวัสดุพอลิเมอร์

สมการการดูดซับของถ่านกัมมันต์สามารถอธิบายได้จากกราฟ adsorption isotherm ดังแสดงในภาพที่ 4 (Figure 4)

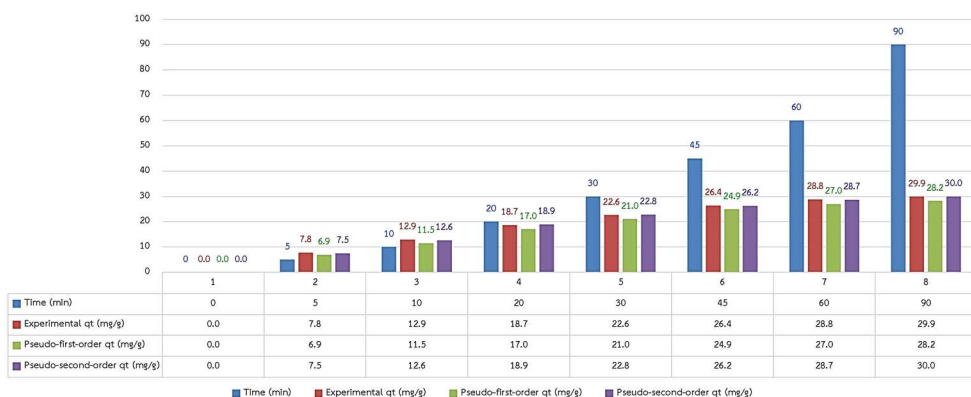


**Figure 4** Adsorption kinetics of coconut-shell activated carbon fitted with pseudo-first order and pseudo second-order models.

6. การประเมินเชิงเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม (Economic and environmental evaluation) การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและการใช้ถ่านกัมมันต์ในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนดำเนินการตามหลักการ Life Cycle Cost Analysis (LCCA) และ Benefit-Cost Ratio (BCR) เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่ากับระบบบำบัดเชิงพาณิชย์ทั่วไป โดยกำหนดองค์ประกอบต้นทุนเป็น 4 ส่วน ได้แก่

- 1) ต้นทุนเริ่มต้นของระบบ เช่น ค่าเสาเข็ม ค่าท่อคอลัมน์ และค่าอุปกรณ์
- 2) ต้นทุนดำเนินงาน เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่ากรดฟอสฟอริก ค่าน้ำ และพลังงาน
- 3) ต้นทุนบำรุงรักษา
- 4) ต้นทุนทดแทนหรือฟื้นฟูวัสดุดูดซับ

ค่าต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตคำนวณจากสมการ:

$$LCCA = C_i + C_o + C_m + C_r \quad (2)$$

เมื่อ  $C_i$  คือค่าใช้จ่ายเริ่มต้น,  $C_o$  คือค่าใช้จ่ายดำเนินงาน,  $C_m$  คือค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา และ  $C_r$  คือค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนทดแทนหรือฟื้นฟูระบบ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนคำนวณจากสมการ

$$BCR = \frac{\text{Present Value of Benefits}}{\text{Present Value of Costs}} \quad (3)$$

โดยผลประโยชน์ที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วยการลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับระบบเชิงพาณิชย์ การเพิ่มมูลค่าของเสียชีวมวล และการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม หากค่า  $BCR > 1$

แสดงว่าระบบมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและมีศักยภาพต่อการนำไปใช้จริงในระดับชุมชน นอกจากนี้ยังประเมินศักยภาพการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ( $\text{CO}_2\text{-eq}$ ) จากการนำของเสียชีวมวลมาใช้แทนการเผาทำลาย เพื่อเชื่อมโยงกับเป้าหมาย Net Zero Emission 2050 ตามแนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจสีเขียวของประเทศไทย

**Table 1** Economic evaluation of the community-scale coconut-shell activated carbon wastewater treatment system.

| Item                                    | Value  |          |
|-----------------------------------------|--------|----------|
| Initial cost ( $C_i$ )                  | 45,000 | THB      |
| Operating cost ( $C_o$ )                | 25,200 | THB/year |
| Maintenance cost ( $C_m$ )              | 5,500  | THB/year |
| Replacement/regeneration cost ( $C_r$ ) | 6,800  | THB/year |
| Total life cycle cost (LCCA)            | 82,500 | THB      |
| Direct benefits                         | 74,500 | THB/year |
| Indirect benefits                       | 17,000 | THB/year |
| Total benefits                          | 91,500 | THB/year |
| Benefit–cost ratio (BCR)                | 1.11   |          |

**Remark** LCCA and BCR values represent preliminary economic estimates based on assumed operational conditions and cost parameters. Further analysis incorporating long term operation, discount rates, and uncertainty assessment is recommended.

จากตารางที่ 1 (Table 1) ผลการประเมินเชิงเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมแสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวมีศักยภาพในการนำไปใช้จริงในระดับชุมชน โดยมีต้นทุนรวมตลอดวัฏจักรชีวิตเท่ากับ 82,500 บาท และมีผลประโยชน์รวมเท่ากับ 91,500 บาทต่อปี ส่งผลให้ค่า BCR เท่ากับ 1.11 ซึ่งมากกว่า 1 แสดงว่าระบบมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจเบื้องต้น นอกจากนี้ ผลลัพธ์ดังกล่าวยังสะท้อนให้เห็นว่าการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในท้องถิ่นสามารถช่วยลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียและเพิ่มมูลค่าของเสียชีวมวลได้อย่างเป็นรูปธรรม

7. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) ข้อมูลเชิงปริมาณถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับภายใต้สภาวะต่าง ๆ ด้วยสถิติ One-way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ  $p < 0.05$  พร้อมวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของแบบจำลองการดูดซับ เพื่อยืนยันความสอดคล้องของข้อมูลกับแบบจำลองทางทฤษฎี (Saleem et al., 2024) ผลการวิเคราะห์ถูกนำเสนอในรูปแบบตาราง กราฟสมการไอโซเทอม เส้นจลน์ และแผนภาพเปรียบเทียบค่าการดูดซับ เพื่ออธิบายกลไกทางฟิสิกส์เคมีของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวต่อการบำบัดน้ำเสียจริง

## ผลการวิจัย

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวที่ผลิตด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมีมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระดับชุมชน โดยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบแบบแบตช์ (Batch adsorption test) และระบบคอลัมน์แบบฟิกซ์เบด (Fixed-bed column test) ผลการทดลอง พบว่าวัสดุสามารถลดความเข้มข้นของสารมลพิษหลัก ได้แก่ แอมโมเนียไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) ไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ฟอสฟอรัสรวม (TP) และสารแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ได้อย่างมีนัยสำคัญ

1. สมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าว ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีดำ และมีโครงสร้างรูพรุนกระจายทั่วพื้นผิว (Gainma et al., 2024; Saleem et al., 2024) โดยผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุแสดงดังตารางที่ 2 (Table 2)

**Table 2** Physical and chemical properties of phosphoric acid-activated carbon derived from coconut shell.

| Parameter        | Measured value                 | Reference standard                        | Reference source       |
|------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|------------------------|
| Moisture content | 5.27%                          | $\leq 10\%$                               | ASTM D2867             |
| Volatile matter  | 14.35%                         | $\leq 15\%$                               | ASTM D3838             |
| Ash content      | 4.12%                          | $\leq 6\%$                                | ASTM D2866             |
| Iodine number    | $982.33 \pm 4.93 \text{ mg/g}$ | $\geq 800 \text{ mg/g}$<br>(TIS 900-2547) | (Ahmedna et al., 2000) |
| BET surface area | $920 \text{ m}^2/\text{g}$     | $\geq 900 \text{ m}^2/\text{g}$           | (Ahmedna et al., 2000) |

ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงกว่ามาตรฐานบ่งชี้ถึงสมรรถนะการดูดซับที่ดีเยี่ยมของถ่านกัมมันต์ และสอดคล้องกับรายงานของ (Gratuito et al., 2008) ซึ่งพบว่าการกระตุ้นด้วยกรดช่วยเพิ่มโครงสร้างไมโครพอร์และประสิทธิภาพการดูดซับมากกว่า 40% เมื่อเทียบกับถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น สอดคล้องกับงานของ Wunsri et al. 2021 และ Chuaythong et al. 2014 ที่รายงานว่ากลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนบนพื้นผิวถ่านช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวไฟฟ้าสถิตและการแลกเปลี่ยนไอออนกับ  $\text{NH}_4^+$  ในสารละลาย

โดยสรุป ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวที่ผ่านการกระตุ้นด้วย  $\text{H}_3\text{PO}_4$  มีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียระดับชุมชน และตอบโจทย์แนวทาง “วัสดุดูดซับสีเขียว (Green adsorbent)” ในระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนของประเทศไทย

2. คุณภาพน้ำก่อนการบำบัด การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในชุมชนตำบลบัวบาน อำเภอยางตลาด จังหวัดกาฬสินธุ์ ดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อเลี้ยง 3 จุดหลัก ได้แก่ 1) บริเวณขาออกของระบบระบายน้ำ 2) พื้นที่กลางบ่อ และ 3) บริเวณขาเข้าสู่ระบบบำบัด

ทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์และเคมีตามมาตรฐาน APHA (2023) ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นแสดงในตารางที่ 3 (Table 3) พบว่า ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษหลักหลายรายการเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดโดย (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2025) ดังตารางที่ 3 (Table 3) สะท้อนถึงปัญหาคุณภาพน้ำเสียในระบบเพาะเลี้ยงกุ้งเชิงพาณิชย์ที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพ

**Table 3** Initial Water Quality Parameters of Wastewater from Giant Freshwater Prawn Ponds Before Treatment.

| Parameter          | Initial Concentration (mg/L) | Effluent Standard<br>(PCD, Thailand, 2025) | Status                  |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| NH <sub>3</sub> -N | 5.25 ± 0.18                  | ≤ 2.0                                      | Exceeds standard limits |
| TKN                | 9.12 ± 0.27                  | ≤ 4.0                                      | Exceeds standard limits |
| TP                 | 2.35 ± 0.11                  | ≤ 1.0                                      | Exceeds standard limits |
| COD                | 173.2 ± 4.5                  | ≤ 120                                      | Exceeds standard limits |
| TSS                | 120.5 ± 6.2                  | ≤ 80                                       | Exceeds standard limits |

คุณภาพน้ำดังกล่าวบ่งชี้ว่าน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งในพื้นที่ศึกษาเป็นแหล่งสะสมของสารอาหารส่วนเกินที่ต้องได้รับการบำบัดก่อนระบายสู่สิ่งแวดล้อม

3. ประสิทธิภาพการดูดซับในระบบแบตช์ (Batch adsorption test) การทดสอบแบบแบตช์ใช้ถ่านกัมมันต์ 5 กรัม ในน้ำเสีย 500 มิลลิลิตร ที่ค่า pH 7–8 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4 (Table 4) ถ่านกัมมันต์สามารถลดค่ามลพิษในน้ำเสียได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะ TKN และ NH<sub>3</sub>-N ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญของคุณภาพน้ำเพาะเลี้ยง ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามเวลาสัมผัสและปริมาณถ่าน แต่เข้าสู่สมดุลหลัง 60 นาที ซึ่งเป็นลักษณะของกระบวนการดูดซับทางฟิสิกส์

**Table 4** Pollutant removal efficiency in batch adsorption system.

| Parameter          | Before (mg/L) | After (mg/L) | Removal (%) |
|--------------------|---------------|--------------|-------------|
| NH <sub>3</sub> -N | 5.25          | 3.45         | 34.21       |
| TKN                | 9.12          | 5.17         | 43.35       |
| TSS                | 120.5         | 78.5         | 34.85       |
| COD                | 173.2         | 125.7        | 27.42       |
| TP                 | 2.35          | 1.52         | 31.50       |

4. ประสิทธิภาพการดูดซับในระบบคอลัมน์ (Fixed-bed column test) ระบบคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร ใช้ความเร็วการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการบำบัดแสดงดังตารางที่ 5 (Table 5) ระบบคอลัมน์นี้ให้ผลการบำบัดดีกว่าแบบแบตช์ โดยลดสารอาหาร

(N, P) ได้มากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Ahmedna et al. (2000) ที่เสนอว่าถ่านกัมมันต์จากชีวมวลสามารถใช้เป็นชั้นกรองสุดท้ายในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ down-flow filter ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลดังกล่าวยังสอดคล้องกับ Bampi et al. (2024) ที่รายงานว่าระบบ fixed-bed column ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนสูงกว่าแบบแบดซ์ เนื่องจากการสัมผัสระหว่างสารละลายกับวัสดุดูดซับอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับอื่น เช่น ซีโอไลต์และชานอ้อย พบว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวให้ประสิทธิภาพการกำจัด  $\text{NH}_3\text{-N}$  และ TKN สูงกว่าร้อยละ 20–30 เนื่องจากมีโครงสร้างไมโครพอร์และหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนมากกว่า (Siripanee et al., 2019)

**Table 5** Pollutant removal efficiency in fixed-bed column system.

| Parameter              | Before (mg/L) | After (mg/L) | Removal (%) |
|------------------------|---------------|--------------|-------------|
| $\text{NH}_3\text{-N}$ | 5.25          | 2.86         | 45.52       |
| TKN                    | 9.12          | 4.38         | 51.97       |
| TP                     | 2.35          | 0.97         | 58.72       |
| COD                    | 173.2         | 110.4        | 36.24       |
| TSS                    | 120.5         | 73.1         | 39.32       |

5. แบบจำลองไอโซเทอมและจลนพลศาสตร์ (Isotherm and kinetic models) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับพบว่า แบบจำลอง Langmuir isotherm ให้ค่าความสัมพันธ์สูงสุด ( $R^2 = 0.986$ ) แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบโมโนเลเยอร์ (Monolayer adsorption) บนพื้นผิวที่มีพลังงานสม่ำเสมอ ขณะที่แบบจำลองจลนพลศาสตร์ pseudo-second-order ให้ค่าความสัมพันธ์ ( $R^2 = 0.981$ ) สูงกว่าแบบ pseudo-first-order เล็กน้อย บ่งชี้ว่ากระบวนการถูกควบคุมโดยการแลกเปลี่ยนไอออนและแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิตระหว่างผิวถ่านกับสารมลพิษ ผลนี้สอดคล้องกับงานของ Wang et al. (2022) ที่ศึกษาการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ซึ่งให้ผลการพยากรณ์พฤติกรรมดูดซับที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังสอดคล้องกับ Moreno-Piraján et al. (2011) ที่รายงานว่าแบบจำลอง Langmuir และ pseudo-second-order สามารถอธิบายพฤติกรรมดูดซับของมลพิษบนถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวได้ดี โดยสะท้อนถึงบทบาทของทั้งพื้นผิวรูพรุนและปฏิสัมพันธ์เชิงเคมีบนผิววัสดุ พฤติกรรมสมดุลการดูดซับของถ่านกัมมันต์สามารถอธิบายได้จากกราฟ adsorption isotherm ดังแสดงในภาพที่ 5 (Figure 5) ขณะเดียวกัน จลนพลศาสตร์การดูดซับของวัสดุสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง pseudo-second-order ดังแสดงในภาพที่ 6 (Figure 6)

นอกจากนี้ การใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวยังช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาทำลายชีวมวลมากกว่า 1.2 ตัน  $\text{CO}_2\text{-eq}$  ต่อปีต่อชุมชน ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมาย Net Zero 2050 ของประเทศไทย ผลลัพธ์นี้ตอกย้ำว่า “วัสดุดูดซับสีเขียวจากทรัพยากรท้องถิ่น” เป็นแนวทาง Waste-to-Value Innovation ที่ตอบโจทย์ทั้งสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม

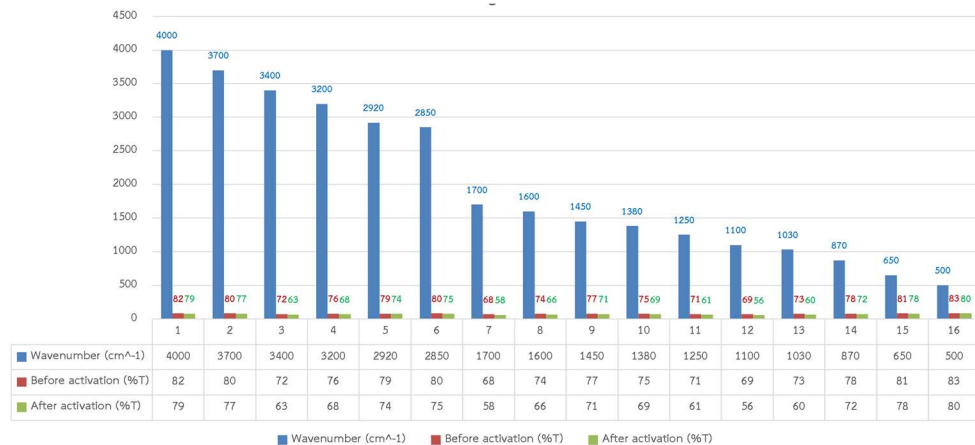


**Figure 5** FTIR spectra of coconut-shell activated carbon before and after phosphoric acid activation.



**Figure 6** Pseudo-second-order kinetic model of coconut-shell activated carbon for wastewater treatment.

## อภิปรายผล

ผลการวิจัยยืนยันว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกมีศักยภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระดับชุมชน โดยประสิทธิภาพดังกล่าวสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่ผลิตได้ ค่าการดูดซับไอโอดีนเฉลี่ย  $982.33 \pm 4.93$  มิลลิกรัมต่อกรัม และพื้นที่ผิวมากกว่า 900 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ตาม มอก. 900-2547 (Khongsai, 2020) สะท้อนว่าการกระตุ้นด้วย  $H_3PO_4$  สามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย การมีพื้นที่ผิวสูงจึงไม่เพียงเพิ่มจำนวนตำแหน่งดูดซับ แต่ยังช่วยให้โมเลกุลของสารมลพิษแพร่เข้าสู่โครงสร้าง

ภายในวัสดุได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาผลการบำบัดในสองระบบ พบว่าระบบคอลัมน์ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแบตซ์อย่างชัดเจน โดยเฉพาะการกำจัด  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TKN และ TP ซึ่งมีค่าเกินร้อยละ 45 และบางพารามิเตอร์สูงกว่าร้อยละ 50 แนวโน้มดังกล่าวบ่งชี้ว่าการไหลผ่านอย่างต่อเนื่องในระบบ fixed-bed column ช่วยให้เกิดการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับพื้นผิวถ่านอย่างสม่ำเสมอและยาวนานกว่าแบบแบตซ์ ส่งผลให้การถ่ายเทมวลและการยึดเกาะของสารมลพิษมีประสิทธิภาพมากขึ้น ข้อค้นพบนี้มีความสำคัญในเชิงประยุกต์ เพราะสะท้อนว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวไม่ได้เหมาะเพียงต่อการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ แต่ยังมีศักยภาพต่อการพัฒนาเป็นระบบกรองต่อเนื่องสำหรับชุมชนได้จริง

ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Langmuir isotherm ที่ให้ค่า  $R^2$  สูงสุด (0.986) ชี้ว่าการดูดซับมีลักษณะเป็นแบบโมโนเลเยอร์บนพื้นผิวที่มีพลังงานค่อนข้างสม่ำเสมอ ขณะที่แบบจำลอง pseudo-second-order ให้ค่า  $R^2$  สูงกว่า pseudo-first-order เล็กน้อย (0.981) บ่งชี้ว่ากลไกการดูดซับมีองค์ประกอบของการแลกเปลี่ยนไอออนและปฏิสัมพันธ์เชิงเคมีอ่อนร่วมอยู่ด้วย ไม่ได้เกิดจากการแพร่เข้าสู่รูพรุนเพียงอย่างเดียว ผลดังกล่าวสอดคล้องกับสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่มีทั้งโครงสร้างพรุนละเอียดและหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนบนพื้นผิว จึงสนับสนุนข้อสันนิษฐานว่าวัสดุในงานวิจัยนี้ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวดูดซับเชิงกายภาพและเชิงเคมีในเวลาเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับทางเลือกอื่น เช่น ซีโอไลต์ ฆานอ้อย หรือวัสดุชีวมวลบางชนิด ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวมีข้อได้เปรียบในด้านโครงสร้างไมโครพอร์ พื้นที่ผิวสูง และความแข็งแรงของโครงสร้างคาร์บอน ซึ่งช่วยให้เหมาะต่อการใช้งานทั้งในระบบแบตซ์และระบบคอลัมน์มากกว่า นอกจากนี้ ยังพบว่ามีแนวโน้มให้ประสิทธิภาพในการกำจัด  $\text{NH}_3\text{-N}$  และ TKN สูงกว่าวัสดุบางชนิดร้อยละ 20-30 ขณะเดียวกันต้นทุนการผลิตยังต่ำกว่าถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ประมาณร้อยละ 60 แต่ยังคงให้สมรรถนะการดูดซับในระดับใกล้เคียงกัน จึงถือเป็นวัสดุดูดซับที่มีความเหมาะสมทั้งในมิติทางวิศวกรรมและมูลค่าทางเศรษฐกิจสำหรับวิสาหกิจชุมชนและเกษตรกรรายย่อยในเชิงประยุกต์ งานวิจัยนี้มีความสำคัญต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมระดับชุมชน เนื่องจากเป็นการบูรณาการปัญหาของเสียชีวมวลจากการแปรรูปมะพร้าวเข้ากับปัญหาน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในพื้นที่เดียวกัน ทำให้เกิดแนวทาง “waste-to-value” อย่างเป็นรูปธรรม กล่าวคือของเสียทางการเกษตรถูกยกระดับเป็นวัสดุดูดซับที่มีมูลค่าและสามารถใช้แก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมได้จริง อีกทั้งการลดการเผาทำลายเปลือกมะพร้าวยังช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 1.2 ตัน  $\text{CO}_2\text{-eq}$  ต่อปีต่อชุมชน ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียนและเป้าหมายการลดคาร์บอนของประเทศไทยภายใต้ BCG Economy Model (Phimpha et al., 2022)

โดยสรุป ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวไม่ได้เป็นเพียงวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมเท่านั้น แต่ยังเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจและเชิงสังคมสำหรับชุมชนเกษตรกร เนื่องจากสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบท้องถิ่น ต้นทุนต่ำ ใช้งานได้จริง และสนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าตามแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืน

## สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาและประเมินศักยภาพของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระดับชุมชน โดยวัสดุที่พัฒนาขึ้นมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมต่อการดูดซับ โดยเฉพาะโครงสร้างรูพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะที่เอื้อต่อการกำจัดสารมลพิษในน้ำเสีย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์สามารถลดความเข้มข้นของสารมลพิษสำคัญได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบแบบคอลัมน์ให้ผลการบำบัดที่ดีกว่าระบบแบบแบตอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้ในระบบการไหลต่อเนื่องในระดับชุมชน การวิเคราะห์แบบจำลองการดูดซับและจลนพลศาสตร์บ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับเกิดขึ้นทั้งในลักษณะการยึดติดบนพื้นผิวแบบชั้นเดียวและปฏิกิริยาคีเลชันเชิงเคมี ซึ่งสนับสนุนความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบซับซ้อน

นอกจากนี้ การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าระบบมีความคุ้มค่าในระดับเบื้องต้น และมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในระดับชุมชน โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาพร้อมกับประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การลดของเสียชีวมวลและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวเป็นวัสดุดูดซับที่มีศักยภาพสูง ต้นทุนต่ำ และเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียที่ยั่งยืนในระดับชุมชน ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียนและการพัฒนาประเทศตามกรอบ Bio-Circular-Green (BCG) Economy Model

ข้อเสนอแนะ เพื่อยกระดับการประยุกต์ใช้ในอนาคต ควรดำเนินการดังนี้

1. พัฒนาและทดสอบระบบบำบัดแบบ fixed-bed column ในระดับครัวเรือนหรือกลุ่มวิสาหกิจชุมชน เพื่อประเมินประสิทธิภาพภาคสนาม
2. ศึกษาศักยภาพในการดูดซับโลหะหนัก เช่น Cd และ Pb รวมถึงการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่
3. สนับสนุนการใช้วัสดุชีวมวลในระดับชุมชนผ่านนโยบายเศรษฐกิจหมุนเวียน (BCG Economy Model) และแนวทางการจัดการของเสียคาร์บอนต่ำ (low-carbon waste management)
4. ส่งเสริมการถ่ายทอดองค์ความรู้และการมีส่วนร่วมของชุมชน เพื่อพัฒนาเป็นต้นแบบ “ชุมชนคาร์บอนต่ำ” ที่สามารถขยายผลได้ในพื้นที่อื่น

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) ภายใต้งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 ของมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่สนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการในการดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- Ahmedna M, Marshall WE, Rao RM. Production of granular activated carbons from select agricultural by-products and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties1Louisiana Agricultural Experiment Station manuscript 99-21-0066.1. *Bioresource Technology* 2000;71(2):113-123. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00070-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00070-X).
- Amornsakchai P, Ponchai N, Muangon A. Chemical activation effect on activated carbon prepared from pineapple leaves. *Rattanakosin Journal of Science and Technology* 2021;3(2):36-44.
- Arena N, Lee J, Clift R. Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells. *Journal of Cleaner Production* 2016;125:68-77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.073>.
- Basha NA, Rathinavel T, Sridharan H. Activated Carbon from coconut shell: Synthesis and Its commercial applications-A Recent Review. *Applied Science and Engineering Progress* 2023;16(2):1-20.
- Gainma L, Ekthamthat N, Kaewsririmon B, Kalawong S, Klapskul O, Tonthongkum K. and Ployloun W. Development of diverse agricultural coconut shell waste processing products of farmers in Ban Phaeo Community, Samut Sakhon Province. *Journal of MCU NakhonDhat* 2024;11(12):64-73.
- Gratuito MKB, Panyathanmaporn T, Chumnanklang RA, Sirinuntawittaya N, Dutta A. Production of activated carbon from coconut shell: Optimization using response surface methodology. *Bioresource Technology* 2008;99(11):4887-4895. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.042>.
- Gupta VK, Suhas. Application of low-cost adsorbents for dye removal-A review. *Journal of Environmental Management* 2009;90(8):2313-2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>.
- Ioannidou O, Zabaniotou A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2007;11(9):1966-2005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>.
- Islam Md A, Ahmed MJ, Khanday WA, Asif M, Hameed BH. Mesoporous activated coconut shell-derived hydrochar prepared via hydrothermal carbonization-NaOH activation for methylene blue adsorption. *Journal of Environmental Management* 2017;203:237-244. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.029>.
- Jaroensombut L. Applying the circular economy concept to community enterprises. *Journal of Social Sciences Srinakharinwirot University* 2024;24(1):145-155.
- Khongsai S. The appropriate conditions for preparation and adsorption capacity of activated carbon from Nypa Palm Cigarette Manufacturing Residues. *Wichcha Journal Nakhon Si Thammarat Rajabhat University* 2020;39(1):46-57.
- Kunapongkiti P, Thummikaphong S, Phummara P. Nitrogen removal from swine wastewater using immobilized-cell of *Chlorella vulgaris*. *Science and Technology Research Journal Nakhon Ratchasima Rajabhat University* 2024;9(2):19-25.

- Li W, Yang K, Peng J, Zhang L, Guo S, Xia H. Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. *Industrial Crops and Products* 2008;28(2):190–198. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.02.012>.
- Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. Thailand State of Environmental Performance Index; 2025.
- Phimpha C, Ponatong PB, Nannar S. Waste reduction in khao tu production process of agriproduct processing groups. *Industrial Technology Journal* 2022;7(2):113-122.
- Phothitontimongkol T. Activated Carbon from Agricultural Residues by Chemical Activation for the Application of Pollutant Removal in Water. *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning* 2017;8(1):196-214.
- Saad FNM, Quan OC, Izhar TNT, Hwidi RS, Syafiuddin A. Evaluation of the use of activated carbon derived from coconut shells to treat car wash wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 2024. 319, 100452. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100452>.
- Saleem J, Moghal ZKB, Pradhan S, McKay G. High-performance activated carbon from coconut shells for dye removal: study of isotherm and thermodynamics Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: <https://doi.org/10.1039/d4ra06287f>. *RSC Advances* 2024;14(46):33797-33808.
- Siripanee S, Kasemsiri P, Kamwilaisak K, Saengprachatanarug K. Hight Performance Activated Carbon Produced from Black Liquor. *KKU Research Journal (Graduate Studies)* 2019;19(3):48-60.
- Sosa JE, Ribeiro Rui PPL, Matos I, Bernardo M, Fonseca IM, Mota JPB, Araújo JMM. et al. Coconut shell derived activated carbon for effective separation of greenhouse gases. *International Journal of Refrigeration* 2025;176:66-78. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.04.022>.
- Sujiono EH, Zabrian D, Zurnansyah M, Zharvan V, Samnur, Humairah NA. Fabrication and characterization of coconut shell activated carbon using variation chemical activation for wastewater treatment application. *Results in Chemistry*; 2022. 4, 100291. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100291>.
- Thippawan C, Chaichana T, Amloy S. Properties of Charcoal from Areca Catechu Linn Shells. The 24th National Thaksin University Conference 2014;17(3):68-75.
- Wang X, Cheng H, Ye G, Fan J, Yao F, Wang Y, Jiao Y. et al. Key factors and primary modification methods of activated carbon and their application in adsorption of carbon-based gases: A review. *Chemosphere*, 2022. 287, 131995. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131995>.
- Wunsri S, Duagsiri W, Podkumnerd N. The production of Activated Carbons from Nipa palm stalk in Palain River Basin Community, Trang Province. *UTK Research Journal* 2021;13(1):30-41.
- Youmee P. Preparation of Activated Carbons with High Surface Area from Wood Charcoal Powder by Dry Chemical Activation. *KKU Science Journal* 2015;43(4):788-798.
- Zhi Y, Liu J. Surface modification of activated carbon for enhanced adsorption of perfluoroalkyl acids from aqueous solutions. *Chemosphere* 2016;144:1224-1232. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.097>.