

บทความวิจัย (Research Article)

การเพิ่มมูลค่าเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปมะพร้าวด้วยการผลิตถ่านกัมมันต์ตามแนวทาง
BCG Model เพื่อจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

Waste Valorization of Coconut Shell Residues into Activated Carbon within
the BCG Economy Model for Sustainable Environmental Management

อนงค์นาถ โรจนกร วังคำหาญ¹, อนุชา ศรีบุรีรัมย์², ปณัตตา โพธินาม¹ และ ธนัชพงษ์ วังคำหาญ^{1*}

Anongnart Rotjanakorn Wangchamhan¹, Anucha Sriburum², Panatda Phothinam¹

and Tanachapong Wangkhamhan^{1*}

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

¹Faculty of Science and Health Technology, Kalasin University

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

²Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

*Corresponding author tanachapong.wa@ksu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)

30 ตุลาคม 2568

วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)

1 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)

11 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

ปัญหาการจัดการเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปมะพร้าวในชุมชนเกษตรถือเป็นความท้าทายสำคัญด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจท้องถิ่น งานวิจัยนี้มุ่งเพิ่มมูลค่าเศษเปลือกมะพร้าวด้วยการผลิต ถ่านกัมมันต์ ภายใต้แนวคิด BCG Model (Bio-Circular-Green Economy) เพื่อสร้างสมดุลระหว่างการจัดการของเสีย การพัฒนาเศรษฐกิจฐานราก และการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม วัสดุเปลือกมะพร้าวจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชน จังหวัดกาฬสินธุ์ ถูกนำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ (700 องศาเซลเซียส, °C) และ กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ก่อนทดสอบสมบัติและประสิทธิภาพการดูดซับในระบบบำบัดน้ำเสีย ผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มี ค่าไอโอดีน (Iodine number) 58.7 ± 5.2 mg/g, ความชื้น (Moisture) ต่ำกว่า 5%, และปริมาณเถ้า (Ash content) $4.60 \pm 0.20\%$ ผลการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวในระบบ batch adsorption ($n = 3$) พบว่าสามารถลดค่ามลพิษหลักได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าแอมโมเนีย - ไนโตรเจน (NH_3-N), สารแขวนลอย (Suspended Solid: SS) และ TKN ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen: TKN) ลดลงคิดเป็น 34.20%, 34.85% และ 43.35% ตามลำดับ ขณะที่ค่า pH มีการปรับตัวคิดเป็น 19.67% สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวในการลดภาระมลพิษของน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การประเมินทางเศรษฐศาสตร์พบว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถ ลดต้นทุนการจัดการขยะมะพร้าวได้ร้อยละ 35 งานวิจัยนี้สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้ แนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพ-หมุนเวียน-สีเขียว ในการพัฒนาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมเชิงพื้นที่ที่สามารถขยายผลสู่การใช้ประโยชน์เชิงนโยบายและอุตสาหกรรมได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์, เปลือกมะพร้าว, BCG Model, เศรษฐกิจหมุนเวียน

Abstract

The management of coconut processing residues in agricultural communities poses significant environmental and socioeconomic challenges. This study aims to enhance the value of coconut shell waste by producing activated carbon (AC) within the Bio-Circular-Green Economy (BCG) framework, thereby balancing waste management, local economic development, and environmental conservation. Coconut shells obtained from community enterprises in Kalasin Province were subjected to carbonization at 700 °C and chemical activation using phosphoric acid (H_3PO_4), followed by an evaluation of their physicochemical properties and adsorption performance in wastewater treatment systems. The resulting activated carbon exhibited an iodine number of 958.7 ± 5.2 mg/g, moisture content below 5%, and ash content of $4.60 \pm 0.20\%$. Batch adsorption experiments ($n = 3$) demonstrated significant reductions in major pollutants, including ammonia-nitrogen (NH_3-N), suspended solids (SS), and Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), which decreased by 34.20%, 34.85%, and 43.35%, respectively. The pH adjustment (19.67%) further reflected the capability of the activated carbon to improve wastewater quality effectively. In addition, economic assessment indicated that the proposed process could reduce coconut waste management costs by 35%. These findings highlight the potential of coconut-shell-based activated carbon as an effective environmental technology, while demonstrating the practical applicability of the BCG model in promoting waste valorization, reducing environmental impacts, and strengthening local circular economies in a sustainable manner.

Keywords: Activated carbon, coconut shell, BCG model, circular economy

บทนำ

การเพิ่มมูลค่าของเสียทางการเกษตรเป็นแนวทางสำคัญในการส่งเสริมการพัฒนาเศรษฐกิจหมุนเวียนและการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในชุมชนที่มีการแปรรูปมะพร้าวเป็นหลัก วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการดังกล่าว เช่น เปลือกมะพร้าวและกะลามะพร้าว มักถูกทิ้งโดยไม่มีการใช้ประโยชน์ ส่งผลให้เกิดปัญหาการจัดการขยะและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับชุมชน [1, 2] การนำเศษเหลือทิ้งเหล่านี้มาผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปให้เกิดผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ตอบโจทย์ทั้งเชิงเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม [3, 4] ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล (Biomass-based activated carbon) เป็นวัสดุดูดซับที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ มีความพรุนสูง และมีความสามารถในการกำจัดสารมลพิษได้หลากหลายชนิด ทั้งโลหะหนัก สารอินทรีย์ และแอมโมเนียในน้ำเสีย [5, 6] วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เปลือกมะพร้าว กะลาปาล์ม ชี้เลี้ยง หรือเปลือกข้าวโพด เป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์เนื่องจากมีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงและสามารถหาได้ในท้องถิ่น [7, 8]

แม้ว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวจะได้รับการศึกษามากมายอย่างต่อเนื่อง แต่ส่วนใหญ่เน้นเพียงสมบัติทางฟิสิกส์-เคมีของวัสดุ มากกว่าการวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมแบบองค์รวม [9, 10] ขณะเดียวกัน แนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืนในระดับชุมชนของประเทศไทยกำลังมุ่งเน้นไปสู่การประยุกต์ใช้แนวคิด BCG Model (Bio-Circular-Green Economy) ซึ่งเป็นกรอบนโยบายหลักของรัฐบาลในการยกระดับเศรษฐกิจฐานชีวภาพและการจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ [11, 12] บูรณาการแนวคิดดังกล่าวกับเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม เช่น การผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ จึงเป็น

แนวทางใหม่ที่มีศักยภาพสูงต่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนในระดับพื้นที่ [13, 14] จากบริบทดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มมูลค่าเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปมะพร้าว โดยการผลิตถ่านกัมมันต์ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) รวมถึงการประเมินสมบัติทางกายภาพ-เคมีของผลิตภัณฑ์ และการทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งและน้ำชุมชน พร้อมทั้งวิเคราะห์ศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตในบริบทของแนวคิด BCG Model เพื่อสร้างกรอบแนวทางการจัดการทรัพยากรเหลือทิ้งในระดับชุมชนที่ยั่งยืน

การศึกษารั้งนี้ใช้แนวคิด BCG สร้างความเชื่อมโยงระหว่าง เศรษฐกิจชีวภาพ (Bio) การหมุนเวียนทรัพยากร (Circular) การรักษาสอดคล้องสิ่งแวดล้อม (Green) และส่งเสริมให้เกิด โมเดลเศรษฐกิจฐานชุมชนที่ลดของเสีย เพิ่มมูลค่า และสร้างรายได้ใหม่ ให้กับท้องถิ่นในระยะยาว [1, 3, 15] เพื่อให้การศึกษานี้มีความชัดเจนและเป็นระบบ งานวิจัยจึงนำเสนอเนื้อหาครอบคลุมตั้งแต่บริบทและความสำคัญของปัญหา การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนกระบวนการทดลองที่ใช้ในการผลิตและประเมินคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าว จากนั้นจึงเสนอผลการวิจัยพร้อมการอภิปรายเชิงลึกเกี่ยวกับสมบัติของวัสดุและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย สุดท้ายสรุปข้อค้นพบ พร้อมข้อเสนอแนะและแนวทางการประยุกต์ใช้แนวคิด BCG Model ในระดับชุมชนเพื่อเพิ่มศักยภาพการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าว โดยใช้เทคนิคการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นทางเคมี เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพและเคมีตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM)
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งก้ามกรามและชุมชน โดยเปรียบเทียบค่ามลพิษก่อนและหลังการบำบัดในเชิงสถิติ
3. เพื่อประเมินศักยภาพทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมของการนำกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ในชุมชน ภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพ-หมุนเวียน-สีเขียว (BCG Model) เพื่อสร้างต้นแบบการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา และการเก็บตัวอย่าง การวิจัยนี้ดำเนินการในพื้นที่ ตำบลบัวบาน อำเภอยางตลาด จังหวัดกาฬสินธุ์ ซึ่งเป็นแหล่งเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามและมีเศษเปลือกมะพร้าวจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนจำนวนมาก วัตถุดิบเปลือกมะพร้าว ถูกรวบรวมจากโรงงานแปรรูปภายในพื้นที่ โดยทำความสะอาดและตากแดดให้แห้ง 7 วันก่อนนำไปใช้ น้ำเสียถูกเก็บตัวอย่างจากบ่อเลี้ยงจำนวน 3 บ่อ ($n = 3$) โดยเก็บที่ระดับผิวน้ำ กลางบ่อ และก้นบ่อ ตามมาตรฐานของ APHA [16] เพื่อให้ได้ตัวแทนของสภาพน้ำที่แท้จริง ตัวอย่างน้ำทุกชุดถูกเก็บในขวดพลาสติกขนาด 5 ลิตร และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4^\circ C$ จนกว่าจะทำการวิเคราะห์ภายใน 24 ชั่วโมง [1]

2. วัสดุและอุปกรณ์ วัตถุดิบหลักคือ เปลือกมะพร้าวแห้ง (ภาพที่ 1) ที่ได้จากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ศึกษา วัตถุดิบถูกทำความสะอาด ตากแดดให้แห้ง 7 วัน แล้วนำมาบดผ่านตะแกรงขนาด 2-5 มิลลิเมตร, mL เพื่อให้มีขนาดสม่ำเสมอ เครื่องมือที่ใช้ได้แก่ เตาเผา, เครื่องเขย่า batch adsorption ซึ่งทั้งหมดผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐาน ASTM D2854-09 และ ASTM D2867-09 [5, 7]



ภาพที่ 1 ลักษณะของเปลือกมะพร้าว ที่ผ่านการตากแห้งก่อนนำไปกระบวนการเผาไหม้แบบคาร์บอนไนซ์

3. การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าว การผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก คือ

(1) การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) เปลือกมะพร้าวที่เตรียมไว้ถูกนำเข้าเตาเผา (ภาพที่ 2) ในสภาวะจำกัดออกซิเจน (สภาวะที่มีออกซิเจนในระดับน้อยมาก (ต่ำกว่าระดับที่ทำให้เกิดการเผาไหม้) ทำให้วัสดุไม่ลุกไหม้แต่เกิดกระบวนการสลายด้วยความร้อน (thermal decomposition) แทน) ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพ (biochar) เบื้องต้น โดยช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเพื่อสร้างโครงสร้างคาร์บอนที่มีความพรุนสูง [2, 3, 17]



ภาพที่ 2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกมะพร้าว

(2) การกระตุ้น (Activation) ถ่านชีวภาพที่ได้ถูกนำไปแช่ในสารละลาย กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ความเข้มข้น 30% โดยมีอัตราส่วน ถ่านชีวภาพ: สารละลาย = 1:3 (weight/volume, w/v) และทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เพื่อกำจัดความชื้น ก่อนจะเผาในเตาอีกครั้งที่ 600 °C นาน 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดโครงสร้างพรุนที่สมบูรณ์ การเลือกใช้ H_3PO_4 มีข้อดีคือสามารถสร้างรูพรุนระดับไมโครและเมโซได้พร้อมกัน [6, 9]

4. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ สมบัติพื้นฐานของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D2854-09 และ ASTM D2867-09 ได้แก่

- ค่าความชื้น (Moisture Content)

- ปริมาณเถ้า (Ash Content)
- ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) เพื่อประเมินพื้นที่ผิวและสมรรถนะการดูดซับเบื้องต้น [4, 10]

5. ทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย การทดสอบใช้ระบบ batch adsorption โดยนำน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้ง และน้ำเสียจากชุมชนดังภาพที่ 3 มาเป็นตัวอย่างทดลอง ปริมาตร 500 mL และใช้ถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน 2 กรัม (g) ต่อ น้ำ 100 mL ทำการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกรองและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ $\text{NH}_3\text{-N}$, SS, TKN และ pH ตามมาตรฐาน APHA (2017)

ค่าประสิทธิภาพการกำจัดคำนวณตามสมการ:

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

โดยที่ C_0 และ C_t คือความเข้มข้นของสารก่อนและหลังการบำบัดตามลำดับ [18]



ภาพที่ 3 การเก็บตัวอย่างน้ำและการวิเคราะห์ผล

6. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม ต้นทุนการผลิตและผลตอบแทนทางเศรษฐกิจคำนวณจากข้อมูล วัตถุดิบ ค่าเชื้อเพลิง และต้นทุนแรงงานภายในชุมชน โดยใช้แนวทาง Cost-Benefit Analysis (CBA) เพื่อประเมินความคุ้มค่า [13] ผลลัพธ์ทั้งหมดถูกวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ค่าเฉลี่ย (Mean), ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และ การทดสอบ t-test เพื่อ ตรวจสอบความแตกต่างของประสิทธิภาพก่อนและหลังการบำบัด โดยใช้โปรแกรม SPSS

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. สมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวแสดง ใน ตารางที่ 1 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์และกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่อุณหภูมิ 600 °C มีความชื้นต่ำ (<5%) ปริมาณเถ้าเพียง 4.6% และมีค่าไอโอดีน (Iodine Number) เฉลี่ย 958.7 ± 5.2 มิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g) ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานของถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง (900–1100 มิลลิกรัมต่อกรัม, mg/g) ตามรายงานของ Gratiuto [3] และ Ahmedna [5]

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกมะพร้าว

Parameter	Mean $\pm$ SD	Standard (ASTM)
Moisture (%)	4.82 $\pm$ 0.12	$\leq$ 8
Ash content (%)	4.60 $\pm$ 0.20	$\leq$ 10
Iodine number (mg/g)	958.70 $\pm$ 5.20	900-1100

ผลดังกล่าวสะท้อนว่ากระบวนการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 600 °C ส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ [6, 9]

เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลอื่น เช่น กะลาปาล์ม (Iodine Number $\approx$ 820 mg/g) และเปลือกข้าวโพด ($\approx$ 700 mg/g) พบว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวมีประสิทธิภาพสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Ioannidou et al. [2] ที่ระบุว่าเนื้อเยื่อแข็งของมะพร้าวมีลิกนินสูง ส่งผลให้เกิดโครงสร้างคาร์บอนที่มีความเสถียรและรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก

2. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ผลการทดสอบการดูดซับในระบบ batch adsorption แสดงใน ตารางที่ 2 โดยค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดรายงานในรูปแบบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n = 3$) พบว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวสามารถลดค่ามลพิษหลัก ได้แก่ NH_3-N มีประสิทธิภาพการบำบัด 34.20% SS มีประสิทธิภาพการบำบัด 34.85% และ TKN มีประสิทธิภาพการบำบัด 43.35% และ pH ประสิทธิภาพการบำบัด 19.67%

ตารางที่ 2 ผลการบำบัดน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกมะพร้าว

Parameter	Before Treatment (mg/L)	After Treatment (mg/L)	Reduction (%)	Discharge Standard	t-value (df = 2)	p-Value
NH_3-N	5.20 $\pm$ 0.11	3.40 $\pm$ 0.08	34.21	$\leq$ 5	48.01	< 0.001
SS	120.00 $\pm$ 3.60	78.20 $\pm$ 2.80	34.85	$\leq$ 80	20.39	< 0.001
TKN	9.00 $\pm$ 0.25	5.10 $\pm$ 0.14	43.35	$\leq$ 8	43.33	< 0.001
pH	6.10 $\pm$ 0.05	7.30 $\pm$ 0.07	19.67	6-9	1.72	0.12 (ns)

ผลการวิเคราะห์ด้วย paired t-test พบว่าค่าพารามิเตอร์ NH_3-N , SS และ TKN ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ ขณะที่ค่า pH แม้จะเพิ่มขึ้นหลังการบำบัด แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเทียบกับก่อนบำบัด แสดงถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Natalia [6] และ Rattanapan [9] การรายงานว่ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลมีประสิทธิภาพสูงในการลดค่ามลพิษในระบบน้ำแบบ Batch Adsorption กราฟใน ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานของ Asadullah [7] ที่พบว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีประสิทธิภาพในการดูดซับ NH_3-N ได้ถึง 30-40% ในระบบน้ำเสียจากการเกษตร ทั้งนี้ประสิทธิภาพยังอาจขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุน ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย และระยะเวลาการสัมผัส [18]

3. การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์พบว่า

- ผลการวิเคราะห์ต้นทุนด้านการจัดการขยะพบว่า การนำเปลือกมะพร้าวเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้เฉลี่ย ร้อยละ 35.6 เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการจัดการขยะเดิม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการลดค่าใช้จ่ายด้านการเก็บรวบรวมและขนส่ง รวมถึงการลดปริมาณของเสียที่ต้องนำไป

กำจัด โดยต้นทุนการกำจัดขยะเดิมอยู่ที่ 1,120 บาทต่อหนึ่งตัน ขณะที่ต้นทุนหลังการนำเปลือกมะพร้าวมาผลิต ถ่านกัมมันต์ลดลงเหลือเพียง 721 บาทต่อหนึ่งตัน

- การจำหน่ายถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงในราคาประมาณ 100 บาทต่อกิโลกรัม สามารถสร้างรายได้เสริมเฉลี่ย ให้แก่ชุมชนได้ประมาณ 25,000 บาทต่อปี โดยคำนวณจากกำลังการผลิตเฉลี่ยของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้ประมาณ 250 กิโลกรัมต่อปี เมื่อพิจารณาจากราคาจำหน่าย 100 บาทต่อกิโลกรัม

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Sulaiman [13] ที่ระบุว่า การผลิตถ่านกัมมันต์จากมะพร้าวสามารถลดต้นทุน การกำจัดของเสียและสร้างรายได้จากผลิตภัณฑ์คาร์บอนในระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การลด ปริมาณเปลือกมะพร้าวที่ถูกเผาทำลายยังช่วยลดการปล่อย CO₂ ประมาณ 0.42 ตันต่อปีต่อชุมชน ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมาย ของ Green Economy ภายใต้แนวคิด BCG [11]

4. การอภิปรายผลเชิงสรุป ผลการศึกษครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวภายใต้แนวคิด BCG Model สามารถตอบโจทย์ทั้งมิติทางเทคนิค เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อมได้อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะในระดับชุมชน เกษตรกรรมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย สมรรถนะการดูดซับที่ได้อยู่ในระดับใกล้เคียงกับงานวิจัยใน ต่างประเทศ เช่น Gratioto [3] และ Budianto [6] ที่รายงานค่าการลด NH₃-N ประมาณ 35-40% ซึ่งยืนยันถึงความ เหมาะสมของการใช้เปลือกมะพร้าวเป็นวัตถุดิบหลัก นอกจากนี้ ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นถึง ศักยภาพของเศรษฐกิจหมุนเวียนใน ระดับชุมชน ที่สามารถสร้างรายได้และลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมพร้อมกัน ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืนของ ประเทศไทยตามกรอบ Bio-Circular-Green Economy (BCG) ที่มุ่งให้การจัดการของเสียกลายเป็นทรัพยากรใหม่ [1, 12]

กล่าวโดยสรุป ผลการวิจัยนี้ตอกย้ำแนวคิด “จากของเสียสู่ทรัพยากร (Waste-to-Value Resource)” และชี้ให้เห็น ว่าการบูรณาการเทคโนโลยีการผลิตถ่านกัมมันต์เข้ากับโมเดล BCG สามารถเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนการจัดการ สิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนในระดับชุมชนไทยได้จริง

สรุปผลการทดลอง

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวภายใต้แนวคิด BCG Model เป็นแนวทางที่มี ศักยภาพสูงในการจัดการของเสียทางการเกษตรให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทั้งในมิติ เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตที่ใช้การคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 700 °C และการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) ส่งผลให้ได้ถ่านกัม มันต์คุณภาพสูง โดยมีค่า ไอโอดีนเฉลี่ย 958.7 ± 5.2 mg/g, ความชื้นต่ำกว่า 5%, และพื้นที่ผิวมากกว่า 900 m²/g ซึ่งอยู่ใน เกณฑ์มาตรฐานของถ่านกัมมันต์เกรดอุตสาหกรรม

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้งก้ามกราม โดยการทดลองการดูดซับด้วยระบบ batch adsorption (n = 3) พบว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวสามารถลดค่ามลพิษหลักในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย NH₃-N ลดลง 34.20%, SS ลดลง 34.85%, และ TKN ลดลง 43.35% ขณะที่ค่า pH มีการปรับเปลี่ยนคิดเป็น 19.67% แสดง ให้เห็นถึงศักยภาพของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะพร้าวในการบำบัดน้ำเสียได้ในระดับที่น่าพึงพอใจ ซึ่งผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับงานของ Budianto [6] และ Asadullah [7] ที่รายงานว่าถ่านกัมมันต์จากมะพร้าวมีประสิทธิภาพสูงต่อการดูด ซับสารอินทรีย์และสารประกอบไนโตรเจนในระบบน้ำเสียแบบแบตช์ (Batch Adsorption System)

ในด้านเศรษฐศาสตร์การผลิต พบว่าการดำเนินงานสามารถลดต้นทุนการจัดการเศษเปลือกมะพร้าวได้ประมาณ ร้อยละ 35 และสร้างรายได้เฉลี่ยต่อชุมชนประมาณ 25,000 บาทต่อปี จากการจำหน่ายถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึง การประยุกต์ใช้แนวคิด เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ในระดับชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม ทั้งนี้แนวทางดังกล่าว

สอดคล้องกับเป้าหมายของ Bio-Circular-Green Economy (BCG Model) ที่มุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าทรัพยากรชีวภาพ ควบคู่กับการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

โดยสรุป งานวิจัยนี้ยืนยันว่า การบูรณาการเทคโนโลยีการผลิตถ่านกัมมันต์กับแนวคิด BCG Model สามารถพัฒนาเป็นต้นแบบ (Prototype Model) ของการจัดการทรัพยากรเหลือทิ้งในระดับชุมชนเกษตรกรรมได้อย่างยั่งยืน ทั้งในเชิงเทคนิค เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม ผลลัพธ์ที่ได้สามารถต่อยอดสู่ การพัฒนาเชิงพาณิชย์ (Commercialization) และขยายผลในระดับจังหวัดหรือระดับนโยบายของประเทศ เพื่อเสริมสร้างเศรษฐกิจฐานรากควบคู่กับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอย่างเป็นรูปธรรม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) ภายใต้งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 ของ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการในการดำเนินการวิจัยเรื่อง “การเพิ่มมูลค่าขยะเปลือกมะพร้าวด้วยการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสารมลพิษในน้ำเสียป้องกันภัยพิบัติ จังหวัดกาฬสินธุ์” จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. ลินดา เกณฑ์มา และคณะ. การพัฒนาผลิตภัณฑ์การแปรรูปขยะจากเปลือกมะพร้าวทางการเกษตรที่หลากหลายของเกษตรกรชุมชนบ้านแพ้ว จังหวัดสมุทรสาคร. วารสารมหาจุฬานาครทรรศน์, 11(12), 64–73.
<https://so03.tci-thaijo.org/index.php/JMND/article/view/281476>
2. Ioannidou O. and Zabaniotou A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2007, 11(9), 1966–2005, doi: 10.1016/j.rser.2006.03.013
3. Gratuito M.K.B. and Panyathanmaporn T.; Chumnanklang R.-A.; Sirinuntawittaya N.; Dutta A. Production of activated carbon from coconut shell: Optimization using response surface methodology. Bioresource Technology 2007, 99(11), 4887–4895, doi: 10.1016/j.biortech.2007.09.042.
4. Gupta V.K. and Suhas. Application of low-cost adsorbents for dye removal. Journal of Environmental Management 2009, 90(8), 2313–2342, doi: 10.1016/j.jenvman.2008.11.017.
5. Ahmedna M. and Marshall W.E.; Rao R.M. Production of granular activated carbons from select agricultural by-products and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. Bioresource Technology 2000, 71(2), 113–123, doi: 10.1016/S0960-8524(99)00070-X.
6. Natalia Z. and Beata D. Biomass derived activated carbons in wastewater treatment-The aim of metallurgical industry. Desalination and Water Treatment 2024, 318, 100320, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100320.

- 7 Nilufer A.B. and et al. Activated Carbon from Coconut Shell: Synthesis and Its Commercial Applications-A Recent Review. *Applied Science and Engineering Progress* 2023, 16, 6152, doi: 10.14416/j.asep.2022.07.001.
- 8 อนุสรณ์ สีนสะอาด. การพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว. วารสารวิชาการ วิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมประยุกต์ 2560, 10(2), 95–108. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/lttech/article/view/107095>
- 9 Rattanapan C. and Chantara S.; Leenakul W. Fabrication and characterization of coconut shell activated carbon using variation chemical activation for wastewater treatment application. *Results in Chemistry* 2022, 4(5), 100256, doi: 10.1016/j.rechem.2022.100291.
- 10 Saleem, J., et al. Environmental Impacts and Adsorption Isotherms of Coconut Shell Activated Carbon: Effect of Acid Activation, *Journal of Carbon Research* 2025, 11 (1),1-18. doi:10.3390/c11010022
- 11 จิตติกร หมาข่ม และคณะ. โมเดลเศรษฐกิจ BCG เพื่อการพัฒนาที่สมดุลและยั่งยืน. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย, 13(2), 14-27. <https://so01.tci-thaijo.org/index.php/EAUHSocSci/article/view/265111>
- 12 กิตตินันท์ สดใส และคณะ. การศึกษาแนวทางการบริหารจัดการวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าวน้ำหอมของประเทศไทย: กรณีศึกษาจังหวัดราชบุรีและสมุทรสงคราม. วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน, 21(1), 60–77. <https://doi.org/10.14456/jesm.2025.4>
- 13 Sulaiman M.A., et al. Life cycle assessment of coconut shell activated carbon for water treatment applications. *Cleaner Materials* 2021, 5, 100092.
- 14 เกษศิณี รัตนพันธ์, ปิยะพงษ์ อังโธสง. การสร้างคุณค่าร่วมด้วย BCG Economy Model ของรัฐบาลไทย. วารสารนวัตกรรมสื่อและการสื่อสาร, 2(1), 60–74. doi: 10.60101/jimc2023.706
- 15 ชิน เมย์ ทัน, สร้อยดาว วินิจนทร์รัตน์. การประเมินการปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากกิจกรรมของฟาร์มกุ้งแบบหนาแน่นชายฝั่งแห่งหนึ่งในจังหวัดฉะเชิงเทรา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2564, 40(6), 404–414, <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/252624>
- 16 APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd ed.; American Public Health Association: Washington, DC, 2017. <https://yabesh.ir/wp-content/uploads/2018/02/Standard-Methods-23rd-Perv.pdf>
- 17 น้ำอ้อย ปัญญา, นภาพัสส์ คุ่มกลาง. การผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ (กากโหระพา) ในอุตสาหกรรมเครื่องหอม. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2568, 44(2), 172–180. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/261803>
- 18 Bansal R., Goyal M. Activated Carbon Adsorption 2025. Doi: 10.1201/9781420028812.
- 19 ปณณทัต ลือโสภา, วิจิตรา สิงห์หิรัญสุวรรณ. การผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นแหล่งผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2564, 42(4), 127–137. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/252133>