

การแปรรูปส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวเป็นถ่านกัมมันต์อย่างยั่งยืนโดย ใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

ไชยยันต์ ไชยยะ^{1*} และ เอกตินัย จันทร์ศรี²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

* ผู้ประพันธ์บทความ

ที่อยู่อีเมล: chaiyan_c@rmutt.ac.th

Received: April 10, 2026 Revised: May 31, 2026 Accepted: June 15, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาศักยภาพของส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าว 5 ชนิด ได้แก่ โคนก้าน จั่น เปลือกชั้นนอก กาบหุ้มช่อ และระแง้ สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ซึ่งเป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและลดการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิต ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุพบว่าวัตถุดิบทั้งหมดมีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 36.44-43.28 โดยกาบหุ้มช่อมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด ขณะที่ผลการวิเคราะห์แบบ proximate analysis แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบมีสารระเหยเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในช่วงร้อยละ 69.41-72.74 และมีคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 15.33-21.34 สะท้อนถึงลักษณะเฉพาะของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่เหมาะสมต่อการแปรรูปเป็นวัสดุคาร์บอน เมื่อผ่านกระบวนการ carbonization ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าได้ถ่านที่มีผลได้อยู่ในช่วงร้อยละ 24.81-33.01 มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 67.30-330.18 m²/g และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.5-1.7 nm โดยเปลือกชั้นนอกให้พื้นที่ผิวสูงที่สุดในขั้นตอนนี้ จากนั้นนำถ่านที่ได้ไปกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 °C พบว่าอุณหภูมิการกระตุ้นที่สูงขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ขณะที่ผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลงตามอุณหภูมิการกระตุ้น ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับคาร์บอนและการพัฒนาโครงสร้างรูพรุน ที่อุณหภูมิ 700 °C ถ่านกัมมันต์จากกาบหุ้มช่อให้พื้นที่ผิวสูงที่สุดเท่ากับ 778.64 m²/g รองลงมาคือ ระแง้ เปลือกชั้นนอก จั่น และโคนก้าน ตามลำดับ นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นยังทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากระดับไมโครพอร์ไปสู่ช่วงรอยต่อของไมโครพอร์และเมโซพอร์ โดยที่อุณหภูมิ 700 °C ขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.9-2.2 nm ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ากาบหุ้มช่อ ระแง้ และเปลือกชั้นนอกเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และเป็นแนวทางที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ชีวมวลเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์ ต้นมะพร้าว การกระตุ้นด้วยไอน้ำ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร วัสดุคาร์บอน

Sustainable conversion of coconut tree residues into activated carbon using steam activation

Chaiyan Chaiya^{1*} and Ektinai Jansri²

¹ Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Department of Polymer Materials Technology, Faculty of Agricultural Product Technology and Innovation, Srinakharinwirot University.

* Corresponding author.

Email address: chaiyan_c@rmutt.ac.th

Received: April 10, 2026 Revised: May 31, 2026 Accepted: June 15, 2026

Abstract

This study investigated the potential of five types of coconut tree residues, namely petiole base, spadix, exocarp, spathe, and rachilla, as precursors for activated carbon production through steam activation. This approach provides a sustainable pathway for valorizing agricultural residues while reducing the use of chemical activating agents in the production process. Elemental analysis revealed that the raw materials contained carbon in the range of 36.44-43.28 %, with spathe showing the highest carbon content. Proximate analysis further indicated that the raw materials were mainly composed of volatile matter, ranging from 69.41 to 72.74 %, while the fixed carbon content ranged from 15.33 to 21.34 %, reflecting the typical characteristics of lignocellulosic biomass suitable for conversion into carbon materials. After carbonization at 500 °C for 2 h, the resulting chars exhibited yields of 24.81-33.01 %, specific surface areas of 67.30-330.18 m²/g, and average pore diameters of 1.5-1.7 nm, with the exocarp-derived char showing the highest surface area at this stage. The chars were subsequently activated with steam at 500, 600, and 700 °C. The results showed that increasing the activation temperature markedly enhanced the specific surface area of the activated carbons, while the product yield decreased with increasing temperature. This trend was associated with the reaction between steam and carbon and the progressive development of porous structures. At 700 °C, the spathe-derived activated carbon exhibited the highest surface area of 778.64 m²/g, followed by rachilla, exocarp, spadix, and petiole base. In addition, increasing the activation temperature promoted pore widening, with the average pore diameter at 700 °C increasing to 1.9-2.2 nm, indicating a transition from microporous structures toward the boundary between micropores and mesopores. These findings demonstrate that spathe, rachilla, and exocarp are promising coconut tree residues for activated carbon production using steam activation and represent a sustainable route for the utilization of lignocellulosic biomass wastes.

Keywords: Activated carbon, Coconut tree residues, Steam activation, Agricultural waste, Porous carbon

1. บทนำ

มะพร้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยสามารถนำผลมะพร้าวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เช่น น้ำมันมะพร้าว กะทิ น้ำมันมะพร้าว และผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ นอกจากนี้ ส่วนประกอบอื่นของต้นมะพร้าวยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในระดับครัวเรือนและชุมชนได้ เช่น การใช้ทางมะพร้าวทำไม้กวาด การใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง หรือการแปรรูปกะลาเป็นถ่านและถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการปลูก การดูแลรักษา และการแปรรูปมะพร้าวยังคงเกิดส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวในปริมาณมาก เช่น โคนก้าน จั่น เปลือกชั้นนอก กาบหุ้มข้อ ระแงะ ก้าน ใบ ลำต้น และราก เป็นต้น วัสดุเหล่านี้ส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบพื้นฐาน แต่ยังมีอีกจำนวนมากที่ถูกทิ้งให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ เผาทิ้ง หรือยังไม่ได้รับการจัดการเพื่อเพิ่มมูลค่าอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้เกิดความจำเป็นในการพัฒนาแนวทางการใช้ประโยชน์ชีวมวลเหลือทิ้งจากสวนมะพร้าวให้มีมูลค่าสูงขึ้นและสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

ในบริบทของพื้นที่เกษตรกรรม แนวคิดของงานวิจัยนี้มีที่มาจากปัญหาและความต้องการของเกษตรกรชาวสวนมะพร้าวในอำเภออัมพวา จังหวัดสมุทรสงคราม ซึ่งมีส่วนเหลือทิ้งจากการดูแลและจัดการสวนมะพร้าวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เกษตรกรจึงมีความต้องการแนวทางที่สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าได้จริง งานวิจัยนี้จึงมุ่งพิจารณาความเป็นไปได้ในการแปรรูปส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวเป็นวัสดุคาร์บอน โดยเฉพาะถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง มีโครงสร้างรูพรุน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการดูดซับ การบำบัดน้ำเสีย การกำจัดสารปนเปื้อน และงานด้านสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ได้

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุคาร์บอนรูพรุนที่สามารถผลิตได้จากวัสดุชีวภาพหลายชนิด โดยคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า สารระเหย โครงสร้างตามธรรมชาติของชีวมวล และสถานะของกระบวนการคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้น ในกรณีของมะพร้าว งานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบหลัก เนื่องจากกะลา มีปริมาณคาร์บอนค่อนข้างสูง มีโครงสร้างแข็งแรง และหาได้ง่าย ตัวอย่างเช่น Zhu และ Kolar [1] ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเพื่อกำจัด

p-cresol ในน้ำเสีย และรายงานค่าความสามารถในการดูดซับตามแบบจำลอง Langmuir เท่ากับ 30.23 mg/g ที่อุณหภูมิ 293 K ขณะที่ Raj และ Joy [2] ได้พัฒนาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กสำหรับการดูดซับคราบไขมัน โดยอาศัยการเพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวของวัสดุคาร์บอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมัน งานวิจัยเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าชีวมวลจากมะพร้าวสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ได้

อย่างไรก็ตาม แม้ว่ากะลามะพร้าวจะได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง แต่ส่วนเหลือทิ้งอื่น ๆ จากต้นมะพร้าว เช่น โคนก้าน จั่น เปลือกชั้นนอก กาบหุ้มข้อ และระแงะ ยังมีข้อมูลการศึกษาอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะการเปรียบเทียบศักยภาพของวัตถุดิบแต่ละชนิดภายใต้สภาวะการผลิตเดียวกัน ทั้งในด้านการองค์ประกอบธาตุ proximate analysis ผลได้จากการกระบวนการคาร์บอนในเซชัน สมบัติรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และการตอบสนองต่อกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ช่องว่างดังกล่าวมีความสำคัญเนื่องจากวัตถุดิบแต่ละส่วนของต้นมะพร้าวมีลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบภายในแตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลโดยตรงต่อการสลายตัวทางความร้อน การเกิดถ่าน การพัฒนาโครงสร้างรูพรุน และคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้

สิ่งใหม่ของงานวิจัยนี้จึงอยู่ที่การประเมินศักยภาพของส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวหลายชนิดอย่างเป็นระบบ ภายใต้เงื่อนไขการคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ควบคุมในลักษณะเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบว่าส่วนใดของต้นมะพร้าวมีความเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์มากที่สุด อีกทั้งยังมุ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบพื้นฐานของวัตถุดิบ ค่าคาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า ผลได้ของผลิตภัณฑ์ และการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ผลการศึกษานี้จึงไม่ได้เป็นเพียงการรายงานค่าพื้นที่ผิวหรือผลได้ของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคัดเลือกวัตถุดิบชีวมวลเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุคาร์บอนมูลค่าเพิ่ม

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำเนื่องจากเป็นกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพที่สามารถช่วยเปิดรูพรุนเดิมและพัฒนารูพรุนใหม่ภายในโครงสร้างคาร์บอน โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับคาร์บอนในระหว่างการให้ความร้อน ข้อดีของการกระตุ้นด้วยไอน้ำคือช่วยลดการใช้สารเคมีกระตุ้น ลดขั้นตอนการล้างสารเคมี ลดความเสี่ยงจากสาร

ตกค้าง และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเหมาะสมต่อการพัฒนาต่อยอดในงานด้านสิ่งแวดล้อมและการดูดซับเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีบางชนิดที่อาจก่อให้เกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการล้างและมีต้นทุนในการจัดการสารตกค้างเพิ่มเติม [3]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแปรรูปส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าว 5 ชนิด ได้แก่ โคนก้าน จั่น เปลือกชั้นนอก กาบหุ้มช่อ และระแง้ ให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและ proximate analysis ของวัตถุดิบ การผลิตถ่านด้วยกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 500 °C และการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 °C จากนั้นจึงเปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์ พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่ได้ ผลการวิจัยคาดว่าจะจะเป็นข้อมูลสนับสนุนการใช้ประโยชน์ของเสียจากสวนมะพร้าวในระดับชุมชน และเป็นแนวทางในการพัฒนาชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีมูลค่าเพิ่มอย่างยั่งยืน

2. การทดลอง

2.1 วัตถุดิบ

วัสดุเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวถูกนำมาแยกส่วนและคัดขนาดประมาณ 2x2 เซนติเมตร โดยประมาณ ซึ่งทำให้ได้วัตถุดิบสำหรับงานวิจัยนี้จำนวน 5 ชนิด ได้แก่ โคนก้าน (*petiole base*) จั่น (*spadix*) เปลือกชั้นนอก (*exocarp*) กาบหุ้มช่อ (*spathe*) และระแง้ (*rachilla*)



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นส่วนต่างๆของวัตถุดิบ (A) โคนก้าน (B) จั่น (C) เปลือกชั้นนอก (D) กาบหุ้มช่อ (E) ระแง้

2.2 ขั้นตอนการทำให้เป็นถ่าน

(Carbonization)

ก่อนการดำเนินการ วัตถุดิบทั้ง 5 ชนิดได้นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุพื้นฐานของวัตถุดิบโดยใช้เครื่อง Elemental Analysis เพื่อทราบและเข้าใจถึงโครงสร้างเบื้องต้นของชิ้นส่วนต่างๆ ของต้นมะพร้าว จากนั้นจึงได้นำวัตถุดิบทั้ง 5 ชนิด มาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักวัตถุดิบ 100 g ใส่ในถ้วยทนความร้อนแล้วปิดฝาครอบให้สนิทพนักด้วยอลูมิเนียมฟรอยด์ โดยกระบวนการทำให้เป็นถ่านหรือ carbonization จะดำเนินการในเตาเผาแบบตู้ (Chamber Furnaces) ในสภาวะที่มีการป้อนแก๊ส N₂ ที่อัตราการไหล 100 ml/min ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่ 20 °C/min เพื่อให้แน่ใจว่าวัสดุทั้งหมดกลายเป็นคาร์บอน หลังครบเวลา carbonization เตาเผาถูกปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ก่อนนำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักและเก็บรักษาไว้ในภาชนะปิดสนิท การทดลองในแต่ละสภาวะดำเนินการซ้ำ 2 ครั้ง และรายงานผลได้ของผลิตภัณฑ์ในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.3 ขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam activation)

ถ่านที่เตรียมได้จากข้อ 2.2 จะถูกนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยชุดการกระตุ้นด้วยไอน้ำแสดงดังรูปที่ 2

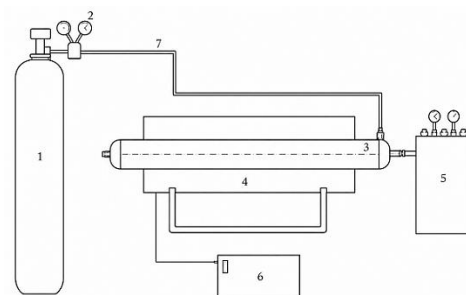


Figure 1. Schematic diagram of the steam activation apparatus. (1) N₂ gas cylinder; (2) pressure regulator; (3) stainless column; (4) tube furnace; (5) boiler; (6) heater; (7) stainless tube 1/4 inch.

รูปที่ 2 ชุดการกระตุ้นด้วยไอน้ำ: (1) ถังแก๊ส N₂, (2) ตัวควบคุมความดัน, (3) ท่อ/คอลัมน์สแตนเลส, (4) เตาเผาแบบท่อ, (5) หม้อต้มไอน้ำ, (6) ชุดให้ความร้อน และ (7) ท่อสแตนเลสขนาด 1/4 นิ้ว

ถ่านที่ผ่าน carbonization ถูกนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยนำตัวอย่างจากข้อ 2.2 ปริมาณ 10 g ใส่ลงถ้วยเผาแล้วใส่เข้าไปในท่อเผา ปรับอุณหภูมิการกระตุ้นในช่วง 500-700 °C ที่เวลาการกระตุ้นคงที่ 1 ชั่วโมง อัตราการป้อนน้ำเข้าสู่หม้อต้มเท่ากับ 120 ml/min ในระหว่างกระบวนการกระตุ้น แก๊ส N₂ จะถูกป้อนด้วยอัตราการไหล 100 ml/min เข้าไปด้วยเพื่อช่วยส่งเสริมการกระจายตัวของไอน้ำในท่อเผา หลังจากนั้นตัวอย่างที่เตรียมได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์ผลได้ของผลิตภัณฑ์ และสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดซับด้วยแก๊ส N₂ (N₂ sorption analyzer) และวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 7800F

3. ผลการวิจัย

3.1 องค์ประกอบธาตุของวัตถุดิบ (Ultimate and proximate analysis)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของวัตถุดิบจากส่วนเหลือทิ้งของต้นมะพร้าว 5 ชนิด ได้แก่ โคนก้าน จั่น เปลือกชั้นนอก กาบหุ้มช่อ และระแง้ แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยพบว่าวัตถุดิบทั้งหมดประกอบด้วยธาตุหลัก ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ปริมาณคาร์บอนของวัตถุดิบทั้ง 5 ชนิดอยู่ในช่วง 36.44-43.28 % w/w โดยกาบหุ้มช่อมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุดเท่ากับ 43.28 % w/w รองลงมา ได้แก่ ระแง้ เปลือกชั้นนอก โคนก้าน และจั่น ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ของตัวอย่างทั้งหมดมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.17-0.61 % w/w และซัลเฟอร์อยู่ในช่วง 0.01-0.08 % w/w ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวมีปริมาณคาร์บอนในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตวัสดุคาร์บอน

ตารางที่ 3.1 Ultimate analysis ของวัตถุดิบ

ตัวอย่าง	ค่า Ultimate Analysis %w/w			
	C	H	N	S
โคนก้าน	39.45	6.21	0.17	0.02
จั่น	36.44	6.99	0.23	0.01
เปลือกชั้นนอก	40.25	6.55	0.31	0.02
กาบหุ้มช่อ	43.28	6.38	0.30	0.02
ระแง้	40.45	6.42	0.61	0.08
เปลือกยูคาลิปตัส [4]	42.92	5.60	0.22	0.14
เปลือกสับปะรด [4]	39.20	6.70	0.65	0.06
เปลือกมะละกอ [4]	38.79	6.27	3.16	

เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลของชีวมวลชนิดอื่นที่รายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า [4] ได้แก่ เปลือกยูคาลิปตัส เปลือกสับปะรด และเปลือกมะละกอ พบว่าปริมาณคาร์บอนของวัตถุดิบจากต้นมะพร้าวในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะกาบหุ้มช่อและระแง้ที่มีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกับเปลือกยูคาลิปตัส ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวสามารถเป็นแหล่งชีวมวลทางเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านและถ่านกัมมันต์ได้

ตารางที่ 3.2 Proximate analysis ของวัตถุดิบ

ตัวอย่าง	Fixed carbon (%)	Volatile matter (%)	Moisture (%)	Ash (%)
โคนก้าน	18.04	72.11	5.77	4.08
จั่น	16.12	71.24	6.21	6.43
เปลือกชั้นนอก	15.33	72.74	5.86	6.07
กาบหุ้มช่อ	21.34	69.41	5.69	3.56
ระแง้	18.13	71.31	6.48	4.08

ผลการวิเคราะห์ proximate analysis ของวัตถุดิบ แสดงดังตารางที่ 3.2 พบว่าวัตถุดิบทั้งหมดมีสารระเหยเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 69.41-72.74 % ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในปริมาณสูง สารระเหยดังกล่าวมีบทบาทสำคัญต่อการสูญเสียมวลระหว่างกระบวนการคาร์บอนเซชันและอาจส่งผลต่อการเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเริ่มต้นภายในโครงสร้างถ่านหลังการให้ความร้อน

เมื่อพิจารณาปริมาณคาร์บอนคงตัว พบว่ากาบหุ้มช่อมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 21.34 % รองลงมาคือ ระแง้ โคนก้าน จั่น และเปลือกชั้นนอก ตามลำดับ โดยคาร์บอนคงตัวเป็นตัวแปรสำคัญที่สะท้อน

ความสามารถของวัตถุดิบในการคงเหลือโครงสร้างคาร์บอนภายหลังการคาร์บอนไนเซชัน วัตถุดิบที่มีคาร์บอนคงตัวสูงจึงมีแนวโน้มเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นถ่านและถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ ปริมาณเถ้าของวัตถุดิบอยู่ในช่วง 3.56-6.43 % โดยจำแนกปริมาณเถ้าสูงที่สุด ขณะที่กาบหุ้มช่อมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด ซึ่งปริมาณเถ้าที่ต่ำเป็นปัจจัยที่เอื้อต่อคุณภาพของถ่าน เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ตกค้างในรูปเถ้าอาจลดสัดส่วนคาร์บอนที่ใช้งานได้ และอาจส่งผลกระทบต่อพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้น

โดยรวม ผลการวิเคราะห์ทั้ง Ultimate and proximate analysis แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบจากส่วนเหลือทิ้งของต้นมะพร้าวทุกชนิดมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตวัสดุคาร์บอน โดยเฉพาะกาบหุ้มช่อซึ่งมีปริมาณคาร์บอนจากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุสูงที่สุด มีคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด และมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด จึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ อย่างไรก็ตาม ความเหมาะสมของวัตถุดิบไม่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีเพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับโครงสร้างภายในของชีวมวล พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน และการตอบสนองต่อกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ซึ่งจะพิจารณาพร้อมกับผลได้ พื้นที่ผิว และโครงสร้างรูพรุนของถ่านและถ่านกัมมันต์ในหัวข้อถัดไป

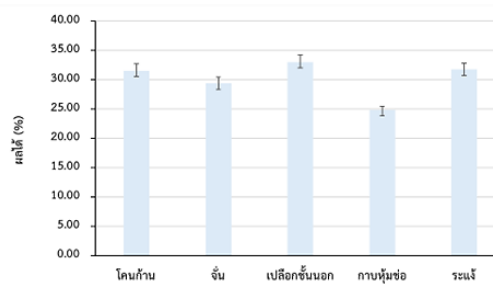
3.2 การทำให้เป็นถ่าน (Carbonization)

ผลการทำให้เป็นถ่านของวัตถุดิบจากส่วนเหลือทิ้งของต้นมะพร้าวทั้ง 5 ชนิด ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.3 พบว่าผลได้ของถ่านมีค่าอยู่ในช่วง 24.81-33.01 % โดยเปลือกชั้นนอกให้ผลได้สูงที่สุดเท่ากับ 33.01 % รองลงมาคือ กระจ่าง 31.73 % โคนก้าน 31.52 % จั่น 29.37 % และกาบหุ้มช่อ 24.81 % ตามลำดับ ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบแต่ละชนิดมีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนแตกต่างกัน แม้จะผ่านกระบวนการ carbonization ภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยวัตถุดิบที่ให้ผลได้สูงมีแนวโน้มคงเหลือโครงสร้างคาร์บอนแข็งได้มากกว่า ขณะที่วัตถุดิบที่ให้ผลได้ต่ำอาจเกิดการสลายตัวขององค์ประกอบที่ระเหยได้และการสูญเสียมวลระหว่างการให้ความร้อนมากกว่า [3]

เมื่อพิจารณาพร้อมกับผล proximate analysis ของวัตถุดิบในตารางที่ 3.2 พบว่าวัตถุดิบทั้งหมดมีสารระเหยเป็นองค์ประกอบหลักในระดับสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียมวลอย่างชัดเจนระหว่างกระบวนการ carbonization อย่างไรก็ตาม ผลได้ของ

ถ่านไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารระเหยเพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และโครงสร้างภายในของชีวมวลแต่ละชนิด ตัวอย่างเช่น กาบหุ้มช่อแม้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวของวัตถุดิบสูงที่สุด แต่ให้ผลได้หลัง carbonization ต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าวัสดุชนิดนี้อาจมีโครงสร้างที่เกิดการสลายตัวและเปิดรูพรุนได้มากในระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งอาจเป็นปัจจัยสนับสนุนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในขั้นตอนถัดไป สมบัติทางกายภาพของถ่านที่ได้จากกระบวนการ carbonization แสดงในตารางที่ 3.3 พบว่าถ่านจากเปลือกชั้นนอกมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ 330.18 m²/g รองลงมาคือกาบหุ้มช่อ 301.35 m²/g โคนก้าน 210.82 m²/g จั่น 205.42 m²/g และกระจ่าง 67.30 m²/g ตามลำดับ ขณะที่ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านอยู่ในช่วง 1.5–1.7 nm ซึ่งต่ำกว่า 2.0 nm แสดงให้เห็นว่าถ่านที่ได้มีลักษณะเด่นเป็นรูพรุนขนาดเล็กหรือไมโครพอร์ โครงสร้างดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการพัฒนารูพรุนเพิ่มเติมในขั้นตอนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

ผลการวิเคราะห์ proximate analysis ของถ่านหลัง carbonization แสดงดังตารางที่ 3.4 พบว่าถ่านทุกชนิดมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 58.77-72.24 % ขณะที่สารระเหยลดลงเหลือ 21.19-33.24 % แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ carbonization สามารถกำจัดองค์ประกอบที่ระเหยได้ออกจากชีวมวล และเพิ่มสัดส่วนของโครงสร้างคาร์บอนในของแข็งที่เหลือได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในบรรดาถ่านที่ศึกษาถ่านจากกาบหุ้มช่อมีคาร์บอนคงตัวสูงที่สุดเท่ากับ 72.24 % และมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุดเท่ากับ 3.22 % ซึ่งบ่งชี้ถึงคุณภาพของถ่านที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.1 ผลได้จากกระบวนการ carbonization วัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 500 °C

ตารางที่ 3.3 โครงสร้างทางกายภาพของถ่าน

ตัวอย่าง	BET Surface area (m ² /g)	Average diameter (nm)	Yield (%)	S.D.
โคนก้าน	210.82	1.7	31.52	1.19
จั่น	205.42	1.7	29.37	1.12
เปลือก	330.18	1.5	33.01	1.19
ชั้นนอก				
กาบหุ้มข้อ	301.35	1.7	24.81	0.58
ระแนง	67.30	1.7	31.73	1.09

ตารางที่ 3.4 Proximate analysis ของถ่าน

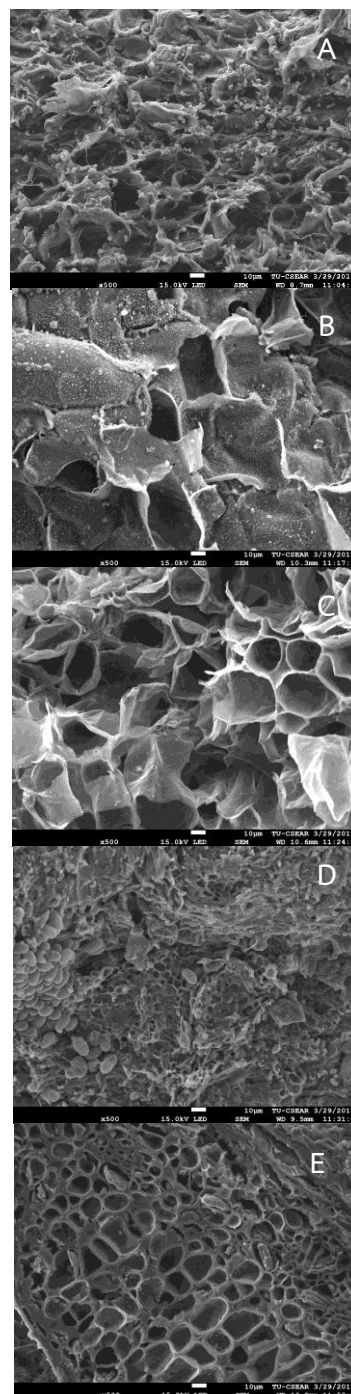
ตัวอย่าง	Fixed carbon (%)	Volatile matter (%)	Moisture (%)	Ash (%)
โคนก้าน	62.14	29.57	3.24	5.05
จั่น	58.77	33.24	2.87	5.12
เปลือก	68.08	23.86	3.19	4.87
ชั้นนอก				
กาบหุ้มข้อ	72.24	21.19	3.35	3.22
ระแนง	65.19	26.30	3.88	4.63

3.3 โครงสร้างทางกายภาพของถ่านจากกระบวนการ carbonization

ภาพ SEM ในรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าถ่านทุกตัวอย่างเริ่มปรากฏช่องว่างและโครงสร้างรูพรุนภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งเกิดจากการระเหยออกของความชื้นและสารระเหยระหว่างกระบวนการ carbonization อย่างไรก็ตาม ลักษณะการเปิดของโครงสร้างมีความแตกต่างกัน โดยถ่านจากเปลือกชั้นนอกและกาบหุ้มข้อแสดงพื้นผิวที่มีความขรุขระและมีช่องว่างภายในค่อนข้างเด่นชัด ขณะที่ถ่านจากโคนก้านและจั่นมีโครงสร้างรูพรุนเกิดขึ้นเช่นกัน แต่การเปิดของช่องว่างมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ส่วนถ่านจากระแนงแม้จะเห็นลักษณะช่องว่างจำนวนมากในภาพ SEM แต่โครงสร้างบางส่วนมีลักษณะเป็นผนังหรือโครงข่ายที่ค่อนข้างหนาแน่น ซึ่งอาจจำกัดการเข้าถึงพื้นที่ผิวภายในของแก๊สไนโตรเจนระหว่างการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะสอดคล้องกับความแตกต่างของสัณฐานวิทยาที่สังเกตได้ โดยถ่านจากเปลือกชั้นนอกให้พื้นที่ผิวสูงที่สุดเท่ากับ 330.18 m²/g รองลงมาคือ กาบหุ้มข้อ 301.35 m²/g โคนก้าน 210.82 m²/g จั่น 205.42 m²/g และระแนง 67.30 m²/g ตามลำดับ ขณะที่ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านทุกชนิดอยู่ในช่วง 1.5-1.7 nm ซึ่งต่ำกว่า 2.0 nm แสดงว่าถ่านที่ได้มีโครงสร้างรูพรุนหลักอยู่ในกลุ่มไมโครพอร์

ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า carbonization ไม่ได้เพียงเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นโครงสร้างคาร์บอนเท่านั้น แต่ยังมีบทบาทในการสร้างรูพรุนเริ่มต้นให้กับวัสดุ โดยความแตกต่างของพื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุนสัมพันธ์กับองค์ประกอบของวัตถุดิบ ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว เถ้า และโครงสร้างทางกายภาพเดิมของชีวมวลแต่ละส่วน [4]



รูปที่ 3.2 ภาพ SEM ของถ่านที่กำลังขยาย 500 เท่า (A) โคนก้าน (B) จั่น (C) เปลือกชั้นนอก (D) กาบหุ้มข้อ (E) ระแนง

3.4 โครงสร้างกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam Activation)

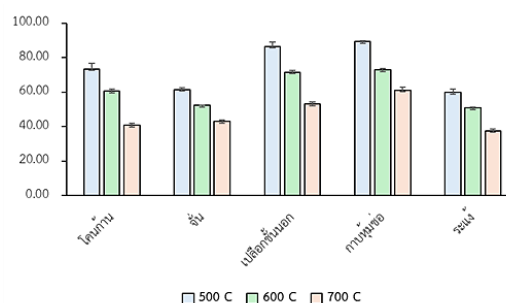
ผลของอุณหภูมิการกระตุ้นด้วยไอน้ำต่อสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์จากส่วนเหลือทิ้งของต้นมะพร้าวทั้ง 5 ชนิด แสดงดังในรูป 3.3 และตารางที่ 3.5 พบว่า เมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจาก 500 เป็น 600 และ 700 °C ผลได้ของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกตัวอย่าง โดยคอนก้านมีผลได้ลดลงจาก 73.46 ± 3.13 เป็น 60.48 ± 1.20 และ 40.74 ± 1.32 % จั่นลดลงจาก 61.41 ± 1.04 เป็น 52.35 ± 0.02 และ 43.04 ± 0.89 % เปลือกชั้นนอกลดลงจาก 86.54 ± 2.54 เป็น 71.51 ± 1.19 และ 53.07 ± 1.32 % กาบหุ้มลดลงจาก 89.26 ± 0.58 เป็น 72.74 ± 1.05 และ 61.06 ± 1.80 % และระแนงลดลงจาก 59.73 ± 1.97 เป็น 50.78 ± 0.63 และ 37.52 ± 1.15 % ตามลำดับ แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าอุณหภูมิการกระตุ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสูญเสียมวลของวัสดุคาร์บอนในระหว่างกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

ตารางที่ 3.5 โครงสร้างทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	Activation Temp (°C)	BET Surface Area (m ² /g)	Average diameter (nm)	Yield (%)	S.D.
คอนก้าน	500	322.60	1.5	73.46	3.13
	600	378.22	1.7	60.48	1.20
	700	390.87	2.1	40.74	1.32
จั่น	500	352.91	1.7	61.41	1.04
	600	366.09	1.7	52.35	0.02
	700	512.43	2.2	43.04	0.89
เปลือกชั้นนอก	500	350.76	1.7	86.54	2.54
	600	649.34	1.9	71.51	1.19
	700	721.32	2.2	53.07	1.32
กาบหุ้มข้อ	500	553.48	1.7	89.26	0.58
	600	615.39	1.5	72.74	1.05
	700	778.64	1.9	61.06	1.80
ระแนง	500	636.57	1.7	59.73	1.97
	600	723.88	2.0	50.78	0.63
	700	750.22	2.2	37.52	1.15

การลดลงของผลได้สามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำ หรือ steam gasification ตามสมการ $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ ซึ่งทำให้คาร์บอนบางส่วนในโครงสร้างถ่านถูกเปลี่ยนเป็นแก๊ส ส่งผลให้มวลของแข็งลดลง [5] ขณะเดียวกันปฏิกิริยา

ดังกล่าวช่วยกำจัดสารตกค้าง น้ำมันดิน และองค์ประกอบที่อุดตันอยู่ภายในโครงสร้างเดิม ทำให้เกิดการเปิดรูพรุนเดิมและการพัฒนารูพรุนใหม่ภายในวัสดุได้มากขึ้น นอกจากนี้ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ทำปฏิกิริยากับไอน้ำต่อเนื่องตามสมการ $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ ซึ่งทำให้เกิดแก๊ส CO_2 โดยมีการรายงานว่าสามารถช่วยเพิ่มความพรุนของโครงสร้างคาร์บอนได้ [6] ดังนั้นหากวัตถุดิบเริ่มต้นมีปริมาณ C มากก็มีแนวโน้มที่จะช่วยส่งเสริมให้ปฏิกิริยานี้เกิดได้มากขึ้น สอดคล้องกับผลจากตารางที่ 3.1 และ 3.2 ที่แสดงให้เห็นว่ากาบหุ้มข้อมีองค์ประกอบของ C และ Fixed carbon สูงที่สุด และแสดงค่าพื้นที่ผิวได้สูงที่สุดหลังจากผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำแล้ว (ตารางที่ 3.5)

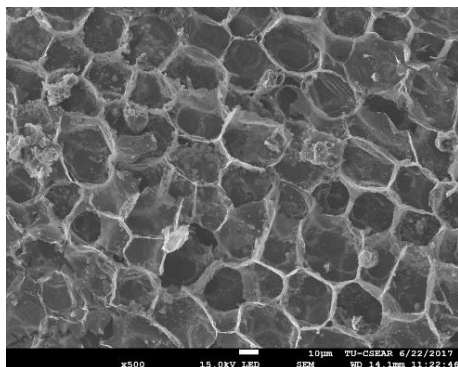


รูปที่ 3.3 ผลได้ของถ่านกัมมันต์

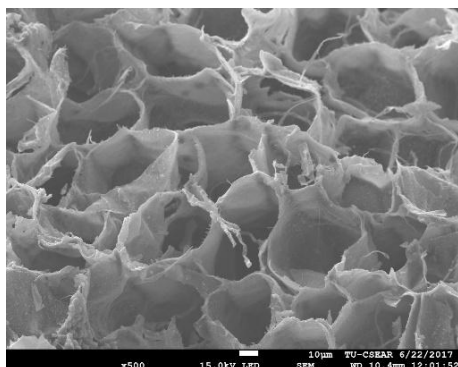
ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี BET แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการกระตุ้นที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อย่างชัดเจนในทุกตัวอย่าง โดยค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มจากช่วง 322.60-636.57 m²/g ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็น 366.09-723.88 m²/g ที่ 600 °C และเพิ่มเป็น 390.87-778.64 m²/g ที่ 700 °C ในบรรดาตัวอย่างทั้งหมด ถ่านกัมมันต์จากกาบหุ้มข้อให้พื้นที่ผิวสูงที่สุดเท่ากับ 778.64 m²/g ที่อุณหภูมิ 700 °C รองลงมาคือ ระแนง 750.22 m²/g เปลือกชั้นนอก 721.32 m²/g จั่น 512.43 m²/g และคอนก้าน 390.87 m²/g ตามลำดับ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ากาบหุ้มข้อและระแนงเป็นวัตถุดิบที่ตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยไอน้ำได้ดี โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง

เมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนเฉลี่ย พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นมีแนวโน้มทำให้รูพรุนกว้างขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 500 °C ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง 1.5-1.7 nm และเพิ่มเป็น 1.9-2.2 nm ที่อุณหภูมิ 700 °C แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำไม่เพียงเพิ่มพื้นที่ผิวเท่านั้น แต่ยังช่วยขยายรูพรุนจาก

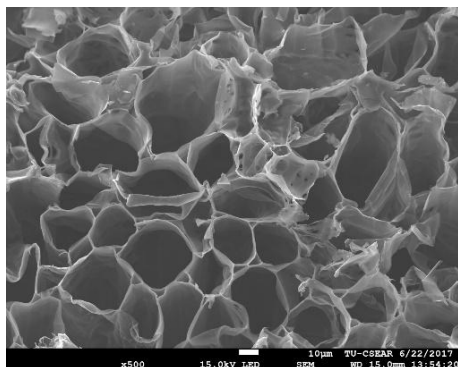
ระดับไมโครพอร์ไปสู่ช่วงรอยต่อระหว่างไมโครพอร์และเมโซพอร์ [7] โดยเฉพาะตัวอย่างโคนก้าน จัน เปลือกชั้นนอก และระแ่ง ซึ่งมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยมากกว่า 2.0 nm เมื่อกระตุ้นที่ 700 °C



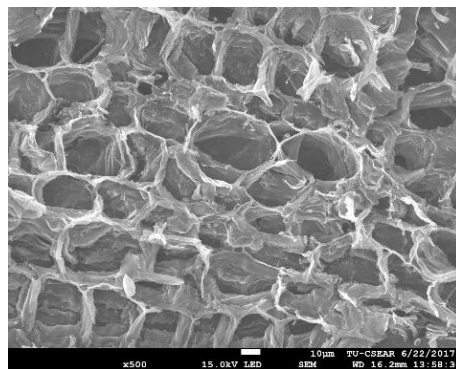
รูปที่ 3.4 ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์จากโคนก้านที่ 700 °C



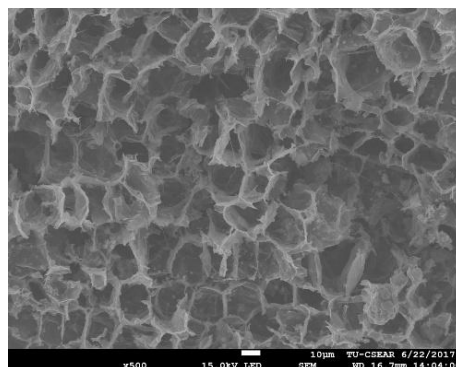
รูปที่ 3.5 ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์จากจันที่ 700 °C



รูปที่ 3.6 ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกชั้นนอก ที่ 700 °C



รูปที่ 3.7 ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์จากกาบหุ้มข้อที่ 700 °C



รูปที่ 3.8 ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์จากระแ่งที่ 700 °C

ภาพ SEM ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 700 °C แสดงดังรูปที่ 3.4-3.8 พบว่าตัวอย่างทุกชนิดมีโครงสร้างรูพรุนที่เปิดชัดเจนและมีช่องว่างภายในต่อเนื่องมากกว่าถ่านก่อนการกระตุ้น โดยถ่านกัมมันต์จากโคนก้านแสดงลักษณะโพรงค่อนข้างสม่ำเสมอและมีผนังรูพรุนเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย ถ่านกัมมันต์จากจันและเปลือกชั้นนอกมีโพรงขนาดใหญ่และผนังรูพรุนค่อนข้างบาง ขณะที่ถ่านกัมมันต์จากกาบหุ้มข้อและระแ่งแสดงโครงสร้างรูพรุนที่เปิดและซับซ้อน ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่อยู่ในระดับสูง โดยเฉพาะกาบหุ้มข้อที่ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุดในการศึกษานี้

โดยรวม ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นถึงลักษณะ trade-off ระหว่างผลได้ของผลิตภัณฑ์กับการพัฒนาโครงสร้างรูพรุน กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นช่วยให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงขึ้นและรูพรุนเปิดกว้างขึ้น แต่ในขณะเดียวกันทำให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลงจากการสูญเสียมวลของคาร์บอนในระหว่างปฏิกิริยา

steam gasification [8] เมื่อพิจารณาทั้งพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และผลได้ของผลิตภัณฑ์ ถ่านกัมมันต์จาก กาบหุ้มช่อที่กระตุ้นที่ 700 °C แสดงศักยภาพเด่นที่สุด เนื่องจากให้พื้นที่ผิวสูงสุด 778.64 m²/g มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.9 nm และยังคงให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ 61.06 ± 1.80 % ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างอื่นส่วนใหญ่ภายใต้สภาวะเดียวกัน จึงเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ จากชีวมวลเหลือทิ้งของต้นมะพร้าว

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพของส่วนเหลือทิ้ง จากต้นมะพร้าว 5 ชนิด ได้แก่ โคนก้าน จั่น เปลือก ขั้นนอก กาบหุ้มช่อ และระแง้ สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยมีแนวคิด เพื่อเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและ สนับสนุนการใช้ประโยชน์ชีวมวลอย่างยั่งยืน ผลการ วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุพบว่าวัตถุดิบทั้งหมดมี ปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 36.44-43.28 % w/w โดย กาบหุ้มช่อมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด ขณะที่ผลการ วิเคราะห์ proximate analysis พบว่าวัตถุดิบมีสาร ระเหยเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในช่วง 69.41-72.74 % และมีคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 15.33-21.34 % ซึ่ง สะท้อนลักษณะของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่เหมาะสม ต่อการแปรรูปเป็นวัสดุคาร์บอน

ภายหลังการทำให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วัตถุดิบทั้ง 5 ชนิดสามารถ เปลี่ยนเป็นถ่านที่มีโครงสร้างรูพรุนเบื้องต้นได้ โดยให้ ผลได้อยู่ในช่วง 24.81-33.01 % และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ อยู่ในช่วง 67.30-330.18 m²/g โดยถ่านจากเปลือก ขั้นนอกให้พื้นที่ผิวสูงที่สุดในขั้นตอน carbonization ขณะที่ผล proximate analysis ของถ่านพบว่าปริมาณ คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเป็น 58.77-72.24 % และ ปริมาณสารระเหยลดลงเหลือ 21.19-33.24 % แสดง ให้เห็นว่ากระบวนการ carbonization สามารถเพิ่ม สัดส่วนโครงสร้างคาร์บอนในของแข็งที่เหลือได้อย่าง ชัดเจน ในบรรดาถ่านที่ศึกษา ถ่านจากกาบหุ้มช่อมี คาร์บอนคงตัวสูงที่สุดและมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด จึงเป็น วัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงสำหรับการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์

เมื่อถ่านถูกนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 °C พบว่าอุณหภูมิการกระตุ้นมีผล โดยตรงต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง ขณะที่ผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลง

อย่างต่อเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา steam gasification ระหว่างไอน้ำกับคาร์บอน ผลการวิเคราะห์ BET แสดง ให้เห็นว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์เพิ่มจากช่วง 322.60-636.57 m²/g ที่ 500 °C เป็น 390.87- 778.64 m²/g ที่ 700 °C ขณะที่ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพิ่ม จากช่วง 1.5-1.7 nm เป็น 1.9-2.2 nm แสดงถึงการ ขยายตัวของรูพรุนจากลักษณะไมโครพอร์ไปสู่ช่วง รอยต่อระหว่างไมโครพอร์และเมโซพอร์ ผลจากภาพ SEM ที่อุณหภูมิ 700 °C ยังสนับสนุนแนวโน้มดังกล่าว โดยแสดงให้เห็นโครงสร้างรูพรุนที่เปิดชัดเจน ผันรูพรุน บางลง และช่องว่างภายในมีความต่อเนื่องมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบวัตถุดิบทั้งหมด พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกาบหุ้มช่อที่กระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 700 °C แสดงศักยภาพเด่นที่สุด โดยให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด เท่ากับ 778.64 m²/g มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.9 nm และ ยังคงให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ 61.06 ± 1.80% ซึ่งสูงกว่า ตัวอย่างอื่นส่วนใหญ่ภายใต้สภาวะเดียวกัน รองลงมา คือถ่านกัมมันต์จากระแง้และเปลือกขั้นนอกที่ให้พื้นที่ ผิวสูงเท่ากับ 750.22 และ 721.32 m²/g ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากาบหุ้มช่อ ระแง้ และเปลือก ขั้นนอกเป็นส่วนเหลือทิ้งจากต้นมะพร้าวที่มีศักยภาพ สูงสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

โดยสรุป การศึกษานี้ยืนยันได้ว่าส่วนเหลือทิ้ง จากต้นมะพร้าวไม่ใช่เพียงของเสียทางการเกษตร แต่สามารถพัฒนาเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีมูลค่าเพิ่มได้ โดยเฉพาะการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นด้วย ไอน้ำซึ่งช่วยลดความเสี่ยงการใช้สารเคมีกระตุ้น ลดความ เสี่ยงจากสารตกค้าง และสอดคล้องกับแนวคิดการใช้ ประโยชน์ชีวมวลอย่างยั่งยืน ทิศทางการศึกษาต่อไป ควรมุ่งทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานจริงของถ่าน กัมมันต์ที่ได้ เช่น การดูดซับสี สารอินทรีย์ หรือโลหะหนักในน้ำเสีย การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอร์ม การดูดซับ ตลอดจนการประเมินความคุ้มค่าทาง เศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้ในการผลิตระดับ ชุมชน เพื่อให้สามารถต่อยอดสู่การใช้ประโยชน์จริง สำหรับเกษตรกรและชุมชนสวนมะพร้าวได้อย่างยั่งยืน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชชมงคลกรุงเทพ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยสนับสนุนเงินทุน เครื่องมือ และ สถานที่ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhu Y, Kolar P. Adsorptive removal of p-cresol using coconut shell-activated char. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2014;2(4):2050-8.
- [2] Raj KG, Joy PA. Coconut shell based activated carbon-iron oxide magnetic nanocomposite for fast and efficient removal of oil spills. *Journal of environmental chemical engineering*. 2015;3(3):2068-75.
- [3] Li W, Peng J, Zhang L, Yang K, Xia H, Zhang S, Guo S. Preparation of activated carbon from coconut shell chars in pilot-scale microwave heating equipment at 60 kW. *Waste management*. 2009;29(2):756-60.
- [4] Nuwaboot P, Jamradloedluk J, Lertsatitthanakorn C. Charcoal and wood vinegar from carbonization of barks and fruit peels. *J Sci Technol MSU*. 2016;35(5):519-24.
- [5] Fu J, Zhang J, Jin C, Wang Z, Wang T, Cheng X, Ma C. Effects of temperature, oxygen and steam on pore structure characteristics of coconut husk activated carbon powders prepared by one-step rapid pyrolysis activation process. *Bioresource technology*. 2020;310:123413.
- [6] Alaya M, Girgis B, Mourad W. Activated carbon from some agricultural wastes under action of one-step steam pyrolysis. *Journal of Porous Materials*. 2000;7(4):509-17.
- [7] Zhang L, Zuo S. The significance of lignocellulosic raw materials on the pore structure of activated carbons prepared by steam activation. *Molecules*. 2024;29(13):3197.
- [8] Pallarés J, González-Cencerrado A, Arauzo I. Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. *Biomass Bioenergy*. 2018;115:64-73.