

การผลิตและทดสอบทางกายภาพของถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จังหวัดสุราษฎร์ธานี

นรนนท์ ขำฉวี^{1*} อินธิรา อาวุธ² และเกียรติยศ รูปสวัสดิ์²

¹สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี อำเภอเมืองสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี อำเภอเมืองสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

*Corresponding author: e-mail naranun.kma@sru.ac.th

(Received: August 10, 2025; Revised: September 15, 2025; Accepted: September 18, 2025)

บทคัดย่อ

ถ่านชีวภาพ (Biochar) เป็นวัสดุคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัดหรือไม่มีออกซิเจน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพจนได้วัสดุที่มีรูพรุนและค่าคาร์บอนคงตัวสูง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพจากวัสดุชีวมวล ได้แก่ ต้นกล้วย เปลือกโกโก้ ช้างข้าวโพด เปลือกทุเรียน เปลือกมังคุดและเปลือกสับปะรด ซึ่งถึงแม้ว่าผ่านกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 215–300 องศาเซลเซียสที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิยังสามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีคุณสมบัติของรูพรุนที่ดี ผลการศึกษาทางกายภาพของถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนมีค่าดีที่สุด พบค่าความร้อนสูง ค่าคาร์บอนคงตัว ความชื้น ค่าเถ้าและค่าสารระเหยเท่ากับ 7107.63 Cal/g , 73.17%, 2.84%, 23.18% และ 1.38% ตามลำดับ รองลงมาคือถ่านชีวภาพจากช้างข้าวโพดมีค่าความร้อน ค่าคาร์บอนคงตัว ความชื้น ค่าเถ้าและค่าสารระเหย เท่ากับ 6011.18 ± 16.91 Cal/g 76.95%, 2.64%, 19.07%, และ 1.51% ตามลำดับ การวิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนพบว่าถ่านช้างข้าวโพดมีค่าปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวมากที่สุดเท่ากับ 0.1028 cm³/g และ 147.00 m²/g ตามลำดับ โครงสร้างอณูพื้นฐานของถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นท่อคล้ายคานาไลจาก การตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) กำลังขยาย 200 เท่าและ 500 เท่า แสดงให้เห็นว่า ช้างข้าวโพด มีลักษณะรูพรุนชัดเจนที่สุด รองลงมาคือถ่านกล้วย ทุเรียน โกโก้ มังคุดและสับปะรด ตามลำดับ

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ; วัสดุเหลือทิ้ง; คุณสมบัติทางกายภาพ; ไพโรไลซิส; ค่าความร้อน

Production and Physical characteristics of Biochar from Agricultural Waste Materials in Suratthani Province

Naranun Khammanee^{1*}, Ainthira Arwut² and Kiattiyout Thupsawat²

¹Department of Natural Resources and Environment, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Mueang Suratthani District, Surat Thani Province 84100, Thailand

²Department of Environmental Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Mueang Suratthani District, Surat Thani Province 84100, Thailand.

*Corresponding author: e-mail naranun.kma@sru.ac.th

(Received: August 10, 2025; Revised: September 15, 2025; Accepted: September 18, 2025)

Abstract

Biochar is a carbon-rich material produced through pyrolysis, a thermal decomposition process of agricultural residues under limited or no oxygen conditions. This process alters the physical structure of the material, resulting in a porous structure with a high fixed carbon content. The objective of this study was to produce and evaluate the physical properties of biochar derived from various biomass feedstocks, including hemp stalks, cocoa shells, corncobs, durian peels, mangosteen peels, and pineapple peels. Although pyrolysis was carried out at temperatures ranging between 215 to 300 °C without temperature control, the produced biochar demonstrated desirable porosity characteristics. Among the tested samples, durian biochar exhibited the highest quality in terms of physical properties, showing a calorific value, fixed carbon, moisture content, ash content, and volatile matter of 7,107.63 Cal/g, 73.17%, 2.84%, 23.18%, and 1.38%, respectively. The second-best performance was observed in corncob biochar, with corresponding values of $6,011.18 \pm 16.91$ Cal/g, 76.95%, 2.64%, 19.07%, and 1.51%, respectively. Pore structure analysis revealed that corncob biochar had the highest pore volume and specific surface area, measured at 0.1028 cm³/g and 147.00 m²/g, respectively. The morphology of the biochar, observed using a Scanning Electron Microscope (SEM) at 200× and 500× magnification, demonstrated a capillary tube-like porous structure. Corncob biochar exhibited the most distinct porosity, followed by hemp, durian, cocoa, mangosteen, and pineapple biochar, respectively.

Keywords: Biochar, Waste materials, Physical properties, Pyrolysis, Calorific value



บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการผลิตพืชผลทางการเกษตรจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในปริมาณสูง วัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาจากพืชเศรษฐกิจสำคัญ เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด และปาล์มน้ำมัน โดยจากการศึกษาล่าสุดพบว่า ประเทศไทยมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรรวมมากกว่า 174 ล้านตันต่อปี ซึ่งประกอบด้วยวัสดุจาก ข้าวประมาณ 60.9 ล้านตัน อ้อยประมาณ 64.7 ล้านตัน มันสำปะหลังประมาณ 33.7 ล้านตัน และปาล์มน้ำมันประมาณ 14.8 ล้านตัน (Sawangphol et al., 2021) นอกจากนี้ รายงานจากสหประชาชาติ (The United Nation) ยังชี้ให้เห็นว่าวัสดุเหล่านี้ส่วนใหญ่ยังไม่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างเต็มศักยภาพ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 80 ของของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละปี (United Nations University, 2002) การจัดการวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ส่วนใหญ่มักใช้วิธีเผาในที่โล่ง ซึ่งแม้จะไม่มีค่าใช้จ่ายโดยตรงสูง แต่กลับก่อให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง โดยเฉพาะมลพิษทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) และก๊าซเรือนกระจก ซึ่งส่งผลเสียต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อมโดยรวม ขณะที่การกำจัดด้วยวิธีอื่น เช่น การฝังกลบ หรือการใช้เป็นวัสดุคลุมดิน ก็มักไม่คุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจหรือมีข้อจำกัดในด้านพื้นที่และกระบวนการจัดการ (Khawkomol et al., 2021) เพื่อตอบสนองต่อปัญหาดังกล่าว แนวทางการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็น “ถ่านชีวภาพ” (Biochar) ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งมาเพิ่มมูลค่าได้อย่างยั่งยืน โดยถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติในการปรับปรุงโครงสร้างดิน เพิ่มการอุ้มน้ำ และช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านชีวภาพจึงมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมดินปลูกคุณภาพสูง ซึ่งมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง จากความต้องการใช้ดินปลูกในภาคเกษตรอินทรีย์และการทำสวนเมือง แนวโน้มตลาดดินปลูกในประเทศไทยมีการเติบโตต่อเนื่อง โดยมีการพัฒนาดินปลูกผสมถ่านชีวภาพ เพื่อใช้ในภาคการเกษตรและภาคอุตสาหกรรมการปลูกพืชเฉพาะทางมากขึ้น (Tarasawatpipat et al., 2014) ตลาดนี้ได้รับแรงสนับสนุนจากกระแสตื่นตัวในเรื่องสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า แนวทางนี้ยังสอดคล้องกับ แผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ด้านการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และ แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 ที่มุ่งส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) โดยเน้นการนำทรัพยากรกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Takolpuckdee, 2014) อีกทั้งยังตอบสนองต่อเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของสหประชาชาติ (SDGs) ได้แก่ ส่งเสริมการเกษตรยั่งยืน (SDG 2) การรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (SDG 13) และการใช้ประโยชน์จากระบบนิเวศบนบกอย่างยั่งยืน (SDG 15) ดังนั้น การพัฒนาและส่งเสริมการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจึงเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศสู่การเติบโตอย่างยั่งยืน ทั้งในมิติของสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคมในระยะยาว (Wijitkosum and Sriburi, 2021) ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเพิ่มมูลค่าในการผลิตถ่านชีวภาพ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการผลิตและทดสอบทางกายภาพของถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจังหวัดสุราษฎร์ธานี

อุปกรณ์และวิธีการ

กระบวนการผลิตถ่านชีวภาพด้วยเตาเผาต้นแบบชุมชน

ถังเหล็กขนาด 200 ลิตร (Figure 1) ที่มีการเจาะรูบริเวณรอบถัง จำนวน 5 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูประมาณ 3 เซนติเมตร เจาะพื้นที่ส่วนด้านล่างเพื่อเป็นพื้นที่ในการรองรับเชื้อเพลิง สูงประมาณ 20 เซนติเมตร กว้าง 25 เซนติเมตร ตัวถังที่ช่องด้านล่าง โดยเชื่อมรอยต่อระหว่างถังกับข้อต่อและท่อตรงปิดฝา ถังด้านบนและใส่สลักล็อกให้เรียบร้อย เพื่อควบคุมการเผาไหม้ใช้อากาศน้อยที่สุดใส่ตะแกรงด้านในถังเพื่อรองรับไม้ให้วัตถุดิบสัมผัสกับความร้อนโดยตรง โดย 1 ชั่วโมงแรก มีอุณหภูมิ 215 องศาเซลเซียส ชั่วโมงที่ 2 อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 261 องศาเซลเซียส และชั่วโมงที่ 3 อุณหภูมิสูงถึง 300 องศาเซลเซียส ซึ่งวัตถุดิบ 6 ชนิด ได้แก่ เปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด เปลือกสับปะรด เปลือกโกโก้ กัญชา และซังข้าวโพด มาจากแปลงเกษตรอำเภอวิภาวดี จังหวัดสุราษฎร์ธานี



Figure 1. Biochar kiln

ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพ

การทดสอบที่ 1 การวิเคราะห์โครงสร้างอณูฐานวิทยาของถ่านชีวภาพทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น JSM-6010 (JEOL Ltd., Japan) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพ โดยนำตัวอย่างถ่านชีวภาพมาทำให้แห้งสนิทเพื่อป้องกันความชื้นที่อาจส่งผลต่อการสร้างสัญญาณภายในเครื่อง SEM จากนั้นบดให้ได้ขนาดที่เหมาะสมและนำมาวางบนแท่นตัวอย่าง (Specimen stub) โดยใช้กาวนำไฟฟ้าชนิดคาร์บอน (Carbon tape) ติดยึดเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของตัวอย่างระหว่างการตรวจวิเคราะห์ หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกเคลือบผิวด้วยโลหะบาง ๆ เช่น ทองคำ (Gold coating) หรือทองคำผสมพาลาเดียม (Au/Pd) ด้วยเครื่องเคลือบสputtering (Sputter coater) เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าของพื้นผิวถ่านและลดการสะสมประจุไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการส่องด้วยลำอิเล็กตรอน เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จแล้วจึงนำเข้าเครื่อง SEM และทำการสแกนด้วยลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่เหมาะสม โดยปรับค่ากำลังขยายและแรงดันไฟฟ้าเร่ง (Accelerating voltage) ตามความเหมาะสมเพื่อให้เห็นลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพได้อย่างชัดเจน

การทดสอบที่ 2 การศึกษาปริมาตรและพื้นที่ผิวของรูพรุนในถ่านชีวภาพดำเนินการเพื่อประเมินคุณสมบัติด้านกายภาพที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารมลพิษและการประยุกต์ใช้งานในด้านสิ่งแวดล้อม โดยการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ใช้หลักการตามทฤษฎีของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการหาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของวัสดุที่มีลักษณะเป็นของแข็งรูพรุน กระบวนการวิเคราะห์เริ่มจากการทำให้ตัวอย่างถ่านชีวภาพแห้งสนิทเพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำตัวอย่างไปทำการดูดซับก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน ภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิและความดัน เพื่อสร้างไอโซเทิร์มของการดูดซับและคายก๊าซ (Adsorption-desorption isotherm) ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิวของรูพรุน นอกจากนั้น ยังมีการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านชีวภาพ (Proximate analysis) เพื่อประเมินคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่าง โดยประกอบด้วย ค่าความชื้น (Moisture content) ค่าเถ้า (Ash content) ค่าสารระเหย (Volatile matter) และค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่สะท้อนถึงคุณภาพของถ่านชีวภาพ กระบวนการนี้ใช้วิธีการให้ความร้อนกับตัวอย่างในสภาวะควบคุมที่แตกต่างกันเพื่อแยกองค์ประกอบแต่ละชนิดออกจากกัน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ ค่าความร้อน (Calorific value) ของถ่านชีวภาพด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter เพื่อหาปริมาณพลังงานความร้อนที่สามารถปลดปล่อยได้เมื่อมีการเผาไหม้สมบูรณ์

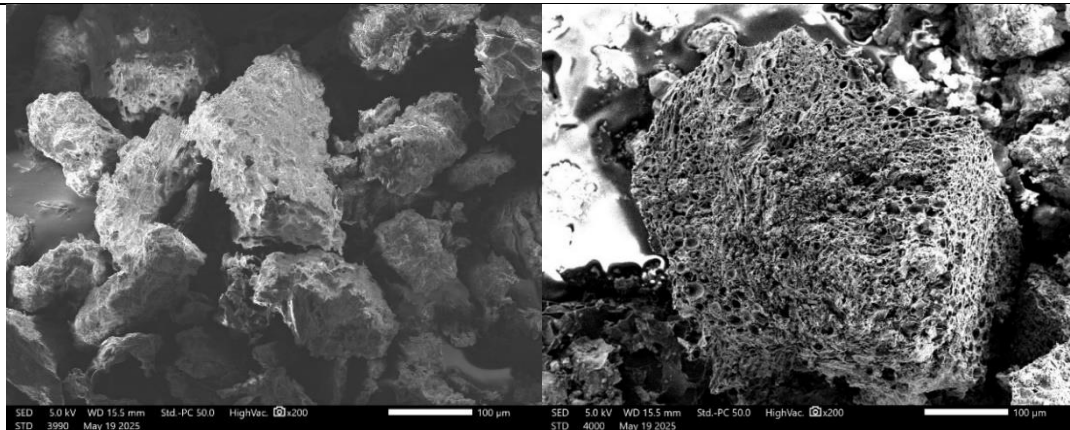
ผลและวิจารณ์

สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์โครงสร้างอณูฐานวิทยาจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน ยังแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของถ่านเปลือกทุเรียนที่ไม่เรียบ มีร่องรอยแตก และรอยร้าว ซึ่งเกิดจากการแปลงสภาพชีวมวลด้วยความร้อนเป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยเปลี่ยน

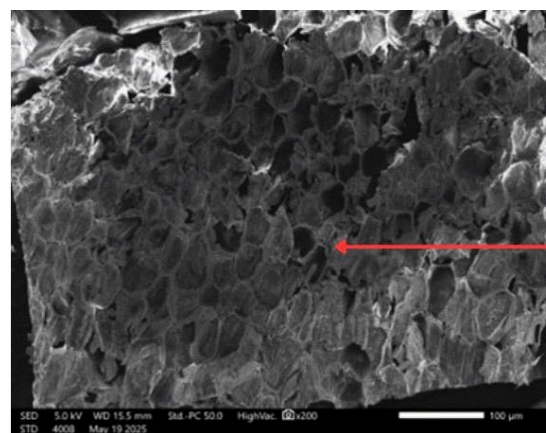
วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้มีมูลค่าเพิ่ม โดยเฉพาะการสลายตัวของพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง พอลิเมอร์เหล่านี้ จะเกิดการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์หลัก 3 ประเภท คือ ถ่านชีวภาพ (Biochar) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และก๊าซ เชื้อเพลิง (Syngas) โดยชนิดและสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของชีวมวล อุณหภูมิ และ กระบวนการที่ใช้ (Mohamad et al., 2019; Lim et al., 2021) การศึกษาของ Altikat et al. (2024) พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 400°C เป็น 600°C ส่งผลให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง ถ่านชีวภาพ ลดลงจาก 37.14% เป็น 30.25% น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ลดลงจาก 20.19% เป็น 17.89% ก๊าซเชื้อเพลิง (Syngas) เพิ่มขึ้นจาก 42.67% เป็น 51.86% ด้วยใช้เตาเผาแบบ fixed-bed reactor และการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตถ่านชีวภาพและน้ำมันชีวภาพได้อย่างมีนัยสำคัญ ในระหว่าง กระบวนการให้ความร้อนหรือคาร์บอนเซชัน (Carbonization) โดยการแปรสภาพทางความร้อนเหล่านี้ส่งผล ให้โครงสร้างพอลิเมอร์ธรรมชาติภายในเนื้อเยื่อพืชสลายตัวบางส่วน ทำให้เกิดพื้นผิวที่แตกกระจาย และเปิดรูพรุนใหม่ขึ้นจำนวนมาก โครงสร้างผิวที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งมีลักษณะคล้ายท่อคาปิลลารี (Capillary-like channels) นี้ อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านชีวภาพ เนื่องจากเพิ่มพื้นที่ผิวที่สามารถสัมผัสกับ สารละลายหรือก๊าซเป้าหมายได้มากขึ้น (Lim et al., 2021; Wang et al., 2022; Rattanasak et al., 2021) งานวิจัยของ Owkusumsirisakul et al. (2022) ได้ยืนยันว่าโครงสร้างภายในของถ่านจากเปลือกทุเรียนที่ผ่าน กระบวนการคาร์บอนเซชันจะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน และแสดงร่องรอยของโครงสร้างเซลล์ที่เสียหายและ เกิดรูพรุนจากการสลายตัวขององค์ประกอบพืช จากภาพ SEM พื้นที่ผิวที่มีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วบริเวณตัวอย่าง ถ่านชีวภาพเกิดขึ้นจากกระบวนการคาร์บอนเซชัน ซึ่งเป็นกระบวนการเผาเปลือกทุเรียนที่อุณหภูมิสูงใน สภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด ให้โครงสร้างพื้นผิวไม่เรียบ (Irregular Surface Morphology) มีลักษณะรูพรุนช่วย เพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ทำให้เหมาะสำหรับการดูดซับสารเคมีหรือนำไปใช้ในวัสดุ พลังงาน (ปานใจ และคณะ, 2563) การวิเคราะห์โครงสร้างอณูฐานวิทยาจากภาพ SEM จากเปลือกโกโก้ พื้นที่ผิวที่มีรูพรุนอย่างชัดเจน (Highly porous surface) จากภาพ SEM พบว่า ถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้ และสับปะรดมีรูพรุนจำนวนมากกระจายทั่วพื้นที่ผิว รูพรุนเหล่านี้เป็นผลมาจากกระบวนการเผาไหม้ที่ทำลาย โครงสร้างเซลล์พืชดั้งเดิม ทำให้เกิดช่องว่าง ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) เช่นกัน ซึ่ง เกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างชีวมวลภายใต้กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) รูพรุนเหล่านี้ช่วยเพิ่ม พื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการดูดซับโลหะหนัก สารอินทรีย์ (นงนุช และคณะ, 2565 ; กฤษฎา และ คณะ, 2563)

กลุ่มที่ 1 จากศึกษาโครงสร้างของถ่านชีวภาพด้วย SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า มีลักษณะของรูพรุน ที่เห็นได้ชัดว่ามีลักษณะคล้ายท่อคาปิลลารี



(a) biochar from durian peel

(b) biochar from cocoa peel



คล้ายท่อคาปิลลารี

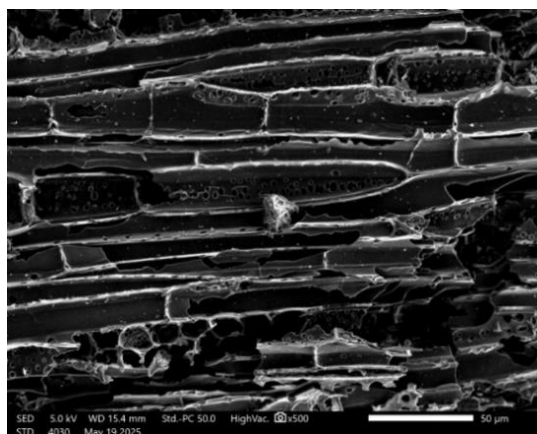
(c) biochar from pineapple husk

Figure 1(a)-(c). Morphology of biochar from durian peel, cocoa peel and pineapple husk 200x magnification

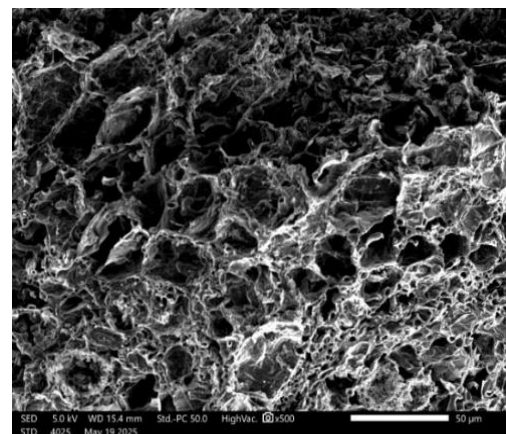
การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากภาพ SEM ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด เปลือกมันาคุด และลำต้นกล้วย จากภาพ SEM พบว่าถ่านซังข้าวโพดมีลักษณะพื้นผิวที่พรุนและมีรูขนาดต่าง ๆ กระจายอยู่ทั่วไป เมื่อวัสดุลิกโนเซลลูโลสอย่างเปลือกมันาคุดผ่านกระบวนการไพโรไลซิส องค์ประกอบชีวภาพหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะสลายตัวและปลดปล่อยองค์ประกอบระเหย ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนเพิ่มขึ้นภายในเนื้อถ่าน โดยเฉพาะลิกนินซึ่งมีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่ากลุ่มอื่น และมีบทบาทสำคัญในการก่อรูพรุนภายในถ่านชีวภาพ งานวิจัยของ Guo et al. (2009) ชี้ให้เห็นว่า ลิกนินเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลต่อการพัฒนาโครงสร้างของพอร์ลิเมอร์ในถ่านคาร์บอน รวมถึงการเพิ่มความพรุนหลังการกระตุ้นด้วยไอน้ำหรือสารเคมี ซึ่งการศึกษามีผลสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Zhang et al. (2023) พบว่า การเตรียมถ่านชีวภาพจากวัสดุที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในสัดส่วนใกล้เคียงกัน จะช่วยสร้างสมดุลในกระบวนการย่อยสลายและการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพ ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ

และความสามารถในการดูดซับสารเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างอณูฐานวิทยาจากภาพ SEM ของถ่านกัญชา ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C แม้ว่าจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญจากการวิเคราะห์ด้วย TGA (Thermogravimetric Analysis) แต่โครงสร้างของถ่านชีวภาพจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ลิกนินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับเซลลูโลสเมื่ออุณหภูมิสูงเกินระดับนี้ ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น โครงสร้างของคาร์บอนในถ่านชีวภาพจะมีการจัดเรียงที่เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมียังพบว่าถ่านชีวภาพจากลำต้นกัญชามีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพจากวัสดุอื่น ซึ่งอาจสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวที่ต่ำของวัสดุ (Ceretta et al., 2025) เมื่อดูภาพ SEM ของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดพบรูพรุนมากที่สุด รองลงมาคือ กัญชา ทุเรียน โกโก้ มังคุดและสับปะรด ตามลำดับ

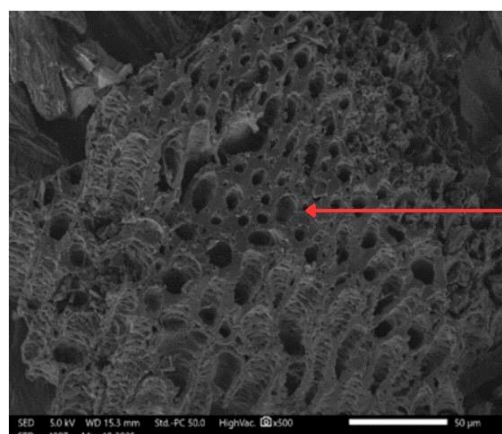
กลุ่มที่ 2 จากศึกษาโครงสร้างของถ่านชีวภาพด้วย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า มีลักษณะของรูพรุนที่เห็นได้ชัดว่ามีลักษณะคล้ายท่อคาปิลลารี



(a) biochar from cannabis charcoal



(b) biochar from mangosteen charcoal



(c) biochar from corn cob charcoal

Figure 2(a)-(c). Morphology of biochar from corn cob charcoal, mangosteen charcoal and cannabis charcoal 500x magnification

การวิเคราะห์โดยประมาณของถ่าน (proximate analysis)

การวิเคราะห์โดยประมาณของถ่าน (Proximate analysis) ประกอบด้วย ค่าความชื้น ค่าเถ้า ค่าสารระเหย คาร์บอนคงตัว และ ค่าความร้อน (Calorific value) ด้วย Bomb Calorimeter (Table 1) จากผลการวิเคราะห์พบว่า ทูเรียนมีค่าความร้อนสูงที่สุด 7,107.63 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งสูงกว่างานวิจัยของ Afrah et al. (2025) ถ่านชีวภาพเปลือกทุเรียน 6,385.32 แคลอรีต่อกรัม ผลการศึกษาถ่านชีวภาพจากทุเรียนมีค่าคาร์บอนคงตัวสูงถึงร้อยละ 73.17 ถ่านชีวภาพจากทุเรียนมีค่าความชื้นต่ำเพียงร้อยละ 2.84 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความชื้นของเปลือกมะพร้าวที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในหลายประเทศ (Al-Widyan et al., 2002) ผลการศึกษารองลงมาคือ ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด โดยมีค่าความร้อนสูงถึง 6011 แคลอรีต่อกรัม มีค่าคาร์บอนคงตัวสูงที่สุดคือร้อยละ 77.17 และมีค่าความชื้นต่ำที่สุดร้อยละ 2.6 มีค่าเถ้าต่ำเพียงร้อยละ 19.07 ซึ่งทำให้ซังข้าวโพดเหมาะสมมากสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล มีค่าความร้อนใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Zainuddin et al. (2014) ที่ระบุว่า ซังข้าวโพดมีค่าความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 6,000 แคลอรีต่อกรัม ถ่านชีวภาพจากกัญชาซึ่งแม้จะมีค่าความชื้นอยู่ในระดับปานกลางคือร้อยละ 8.24 แต่มีค่าความร้อนสูงถึง 5770 แคลอรีต่อกรัม และค่าคาร์บอนคงตัวอยู่ที่ร้อยละ 56.15 ซึ่งค่าเถ้าที่สูงถึงร้อยละ 34.54 อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของปริมาณเถ้าในเตาเผาและลดประสิทธิภาพในระยะยาว พบว่างานวิจัยของ Barta et al. (2022) พืชกัญชามีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบผลิตถ่านชีวภาพ และพลังงานชีวมวลได้ดี โดยเฉพาะจากส่วนลำต้นและแกนกลาง ซึ่งมีค่าความร้อนอยู่ในระดับ 4,565–5,090 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ถ่านชีวภาพจากมังคุดมีค่าคาร์บอนคงตัวที่สูงถึงร้อยละ 68.69 และมีค่าเถ้าต่ำเพียงร้อยละ 18.86 ซึ่งช่วยลดปริมาณของเสียหลังการเผาไหม้ อีกทั้งยังมีค่าสารระเหยสูงที่สุดเมื่อเทียบกับวัตถุดิบชนิดอื่นเท่ากับร้อยละ 1.90 ซึ่งอาจช่วยให้จุดติดไฟได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ค่าความร้อนของมังคุดอยู่ในระดับปานกลางเท่ากับ 5,100 แคลอรีต่อกรัม และค่าความชื้นค่อนข้างสูง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการใช้งานจริง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hashim et al. (2020) เปลือกผลไม้ที่มีความชื้นสูงควรผ่านกระบวนการอบแห้งก่อนจึงจะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบอื่นถ่านชีวภาพจากสับปะรดมีค่าความชื้นสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 15.99 ซึ่งส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยรวม แม้จะมีค่าคาร์บอนคงตัวในระดับปานกลางเท่ากับร้อยละ 60.84 และค่าความร้อนเท่ากับ 5,407 แคลอรีต่อกรัม แต่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการลดความชื้นก่อนการใช้งาน ข้อมูลนี้สอดคล้องกับงานของ Phonphuak and Chindapasirt (2015) ซึ่งพบว่าการลดความชื้นของชีวมวลมีผลโดยตรงต่อค่าความร้อนและความเสถียรของกระบวนการเผาไหม้ ในทางตรงกันข้ามผลการศึกษาถ่านชีวภาพจากโกโก้เป็นชีวมวลที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่ำที่สุดในการผลิตเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากมีค่าคาร์บอนคงตัวต่ำเพียงร้อยละ 47.34 และค่าความร้อนต่ำที่สุดเท่ากับ 4,834 แคลอรีต่อกรัม เห็นได้ชัดจากค่าเถ้าสูงสุดถึงร้อยละ 47.35 หากค่าเถ้าที่เกินร้อยละ 20 มักส่งผลให้เกิดปัญหาสะสมภายในหม้อไอน้ำและลดอายุการใช้งานของระบบเชื้อเพลิงและจะส่งผลเสียอย่างมากต่อประสิทธิภาพของเตาเผาและต้นทุนในการจัดการของเสีย (Mohamad et al., 2019)

Table 1. Approximate analysis and heating value of biochar biomass (Mean $\pm$ Standard Deviation)

Type of Fruit	Moisture Content (%)	Volatile Matter (%)	Ash Content (%)	Fixed Carbon (%)	Heating Value (cal/g)
Durian peel	2.84 $\pm$ 0.37	1.38 $\pm$ 0.03	23.18 $\pm$ 0.2	73.17 $\pm$ 0.5	7,107.63 $\pm$ 21.89
Cocoa peel	4.55 $\pm$ 0.47	1.62 $\pm$ 0.02	47.35 $\pm$ 0.09	47.34 $\pm$ 0.77	4,834.40 $\pm$ 3.49
Corn cob	2.64 $\pm$ 0.12	1.51 $\pm$ 0.1	19.07 $\pm$ 0.05	77.17 $\pm$ 0.2	6,011.18 $\pm$ 16.91
Pineapple peel	15.99 $\pm$ 0.12	1.48 $\pm$ 0.16	22.31 $\pm$ 0.03	60.84 $\pm$ 0.63	5,407.42 $\pm$ 2.61
Mangosteen peel	10.45 $\pm$ 0.08	1.90 $\pm$ 0.05	18.86 $\pm$ 0.04	68.69 $\pm$ 0.24	5,100.89 $\pm$ 0.89
Cannabis stem	8.24 $\pm$ 0.2	1.59 $\pm$ 0.04	34.54 $\pm$ 0.02	56.15 $\pm$ 0.5	5,770.01 $\pm$ 3.77

การศึกษาปริมาณและพื้นที่ผิวของรูพรุนของถ่านไบโอชาร์

ทดสอบถ่านไบโอชาร์เพื่อวิเคราะห์หา พื้นที่ผิวจำเพาะ (The Brunauer-Emmett-Teller, BET) (Table 2) การศึกษานี้ได้มีการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากวัสดุชีวมวล ได้แก่ ชังข้าวโพด กัญชา โกโก้ ทูเรียน มังคุด และสับปะรด พบว่าถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดเท่ากับ 147.00 m²/g และมีปริมาตรรูพรุน 0.10 cm³/g ซึ่งสูงกว่าวัสดุชีวมวลชนิดอื่น ซึ่งถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดสามารถมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 600–800 m²/g หากผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH และแสดงศักยภาพสูงในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย (Mbah et al., 2023) ถ่านชีวภาพจากต้นกัญชามีพื้นที่ผิวจำเพาะรองลงมาเท่ากับ 101.14 m²/g และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.08 cm³/g งานวิจัยของ Wang et al. (2022) ศึกษาถ่านชีวภาพจากเส้นใยกล้วยงา รายงานว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดังกล่าวอยู่ในช่วง 90–160 m²/g ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300°C, 500°C และ 700°C แสดงถึงความสอดคล้องกับผลการทดลองถ่านชีวภาพจากลำต้นกัญชามีพื้นที่ผิวเท่ากับ 101.14 m²/g ถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้และเปลือกทูเรียนมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะระดับปานกลางเท่ากับ 15.53 m²/g และ 29.82 m²/g ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวพบว่าโครงสร้างวัสดุดิบทางที่อาจไม่เหมาะสมในการสร้างรูพรุนเมื่อผ่านการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้สารกระตุ้น งานวิจัยของ Lim et al. (2021) รายงานว่าถ่านชีวภาพจากเปลือกโกโก้ที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้นมีค่าพื้นที่ผิวในช่วง 10–30 m²/g ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษา สำหรับถ่านชีวภาพจากเปลือกมังคุดและสับปะรด พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำโดยเท่ากับ 1.55 m²/g และ 2.22 m²/g ตามลำดับ ซึ่งมีข้อจำกัดของโครงสร้างชีวมวลที่อาจไม่เหมาะสมต่อการสร้างรูพรุนขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร พบว่าโครงสร้างของเปลือกมังคุดมีแนวโน้มยุบตัวและสูญเสียรูพรุนได้ง่ายเมื่อผ่านการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Rattanasak

et al., 2021) ในเชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น ชังข้าวโพด เป็นวัตถุดิบที่คุ้มค่าที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเหลือทิ้งในประเทศจำนวนมากถึงกว่า 3.32 ล้านตันต่อปี (กรมพัฒนาที่ดิน, 2567)

Table 2. Pore volume and surface area of biochar from various biomass sources

Type of Fruit	Pore Volume (cm ³ /g)	Surface Area (m ² /g)
Corn cob	0.10	147.00
Cocoa peel	0.04	15.53
Cannabis stem	0.08	101.14
Mangosteen peel	0.01	1.55
Durian peel	0.05	29.82
Pineapple peel	0.01	2.22

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาคณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ เปลือกทุเรียน ชังข้าวโพด เปลือกโกโก้ เปลือกสับปะรด เปลือกมังคุด และลำต้นกล้วย พบว่า ชังข้าวโพด เป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงที่สุดสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพและวัสดุดูดซับ เนื่องจากมีค่าคาร์บอนคงที่สูงถึงร้อยละ 77.17 และค่าความร้อนสูง 6,011 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งเหมาะสมต่อการผลิตเป็นเชื้อเพลิง อีกทั้งยังมี พื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 147 m²/g และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.10 cm³/g แสดงถึงโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสมอย่างยิ่งต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียและดูดซับสารเคมี ชังข้าวโพดเป็นตัวเลือกอันดับหนึ่งทั้งในด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม เปลือกทุเรียน แม้จะมีค่าความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 7,107.63 แคลอรีต่อกรัม และมีความชื้นต่ำร้อยละ 2.84 ทำให้สามารถเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่พื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในระดับปานกลางเท่ากับ 29.82 m²/g จึงเหมาะสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงมากกว่าการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับ ในขณะที่ลำต้นกล้วยแสดงศักยภาพของรูพรุนที่ดีเช่นกัน โดยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 101.14 m²/g และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.08 cm³/g เหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับในอนาคต ต้องผ่านกระบวนการกระตุ้น (activation) เพื่อปรับปรุงโครงสร้างในเชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นพบว่า ชังข้าวโพดเป็นวัตถุดิบที่คุ้มค่าที่สุด มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำและมีความต่อเนื่องในจัดหาของวัตถุดิบตลอดทั้งปีในการผลิตถ่านชีวภาพ อีกทั้งคุณสมบัติเด่นทั้งด้านพลังงานและพื้นที่ผิวจำเพาะยังเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ขณะที่ถ่านชีวภาพเปลือกทุเรียน แม้จะมีค่าความร้อนสูงมาก แต่ปริมาณวัตถุดิบมีข้อจำกัดเฉพาะฤดูกาล ส่งผลให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจต่ำกว่าชังข้าวโพด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ประจำปีงบประมาณ 2568 และงบประมาณสนับสนุนจากทุนวิจัยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2564

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. (2567). *แผนการใช้ที่ดินตำบลพิเทน อำเภอทุ่งยางแดง จังหวัดปัตตานี (รายงาน)*. สถานีพัฒนาที่ดินปัตตานี, สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 12, กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กฤษฎา บุญชม, จุฑามาศ เตียวสกุล และกมลวรรณ ทิพวรรณ. (2563). สมบัติทางกายภาพและอัตราการดูดซับความชื้นของถ่านผลไม้. *วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 15(2), 77–89.
- วนิดา จิตติวิสูตรณ์ และสุธิรา รัตนถาวร. (2562). กระบวนการผลิตถ่านชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร: กรณีศึกษาชาวสวนยางพาราในจังหวัดสงขลา. *วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้*, 13(2), 71–86.
- นรนนท์ ขำมณี. (2564). คู่มือการผลิตและเพิ่มมูลค่าของถ่านชีวภาพ [E-book]. FlipHTML5. <https://fliphtml5.com/dzitz/phta/basic>
- Afrah, A., Prapaiwong, P., Mahaprom, W., Manoh, M., & Muneer, S. (2025). The preliminary study of two-stage pyrolysis durian shell to biochar. *International Journal of Environmental Science*, 6(8), 523–532.
- Al-Widyan, M. I., Al-Jalil, H. F., Abu-Zreig, M. M., & Abu-Hamdeh, N. H. (2002). Physical properties of selected biomass solids. *Canadian Biosystems Engineering*, 44(3), 39–46.
- Altıkat, A., Alma, M. H., Altıkat, A., Bilgili, M. E., & Altıkat, S. (2024). A comprehensive study of biochar yield and quality concerning pyrolysis conditions: A multifaceted approach. *Sustainability*, 16(2), 937.
- Barta, Z., Sipos, L., & Takács, A. (2022). Bioenergy potential of hemp (*Cannabis sativa* L.): A review on biomass properties and thermochemical conversion techniques. *Biomass and Bioenergy*, 160, 106398.
- Ceretta, M. B., Antic Gorrazzi, S., D'Ippolito, S., Mendieta, J., Nercessian, D., & Bonanni, S. (2025). *Cannabis sativa* biochar: Characterization and preliminary application in plant growth and adsorption, and as an electrode material. *RSC Sustainability*, 3, 1932–1940.

- Daosukho, C., & Rodprasert, W. (2015). The development of soil quality using biochar amendment from agricultural waste. *Burapha Science Journal*, 20(3), 78–89.
- Ghosh, P., Basak, B., & Saha, S. (2020). A comprehensive review on the valorization of *Cannabis sativa* L. hemp-based industrial by-products for bioenergy and biochar production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109944.
- Guo, Y., & Rockstraw, D. A. (2009). Physical and chemical properties of carbons synthesized from xylan, cellulose, and Kraft lignin by H₃PO₄ activation. *Bioresource Technology*, 100(21), 4867–4873.
- Hashim, R., Nadhari, W. N. A. W., Sulaiman, O., Kawamura, F., Hiziroglu, S., Sato, M., & Sahari, N. (2020). Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from a mixture of rubberwood and mangosteen peel. *Industrial Crops and Products*, 150, 112394.
- Kamali, M., et al. (2022). Biochar for soil applications – sustainability aspects, challenges and future prospects. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131086.
- Khawkomol, T., Supaphol, P., & Limtrakul, J. (2021). Potential of biochar derived from agricultural residues for sustainable management. *KMUTT Research and Development Journal*, 44(4), 541–550.
- Lim, W. S., Lee, C. H., & Mah, S. K. (2021). Valorization of cocoa pod husk for production of biochar: Characterization and application. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(4), 1453–1463.
- Mbah, G. O., Obiechina, N. S., & Achi, C. G. (2023). Preparation and characterization of activated carbon from corn cob for wastewater treatment applications. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 102986.
- Mohamad, N., Ab. Rahman, N. A., Abdullah, N., & Bakar, R. A. (2019). Combustion characteristics of oil palm biomass waste and co-firing with coal: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100346.
- Nations University. (2002). Agricultural waste in Thailand: Potential for resource recovery [Unpublished report]. FAO. <https://www.fao.org/...>
- Phonphuak, N., & Chindaprasirt, P. (2015). Characterization and utilization of biomass fly ash from electric power plants. *Waste Management*, 38, 157–162.

- Qian, S., Zhou, X., Fu, Y., Song, B., Yan, H., Chen, Z., Sun, Q., Ye, H., Qin, L., & Lai, C. (2023). Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils. *Science of the Total Environment*, 870, 162871.
- Rattanasak, U., Jantarat, N., & Wongcharee, S. (2021). Utilization of mangosteen peel for biochar production and its adsorption capacity for dye removal. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123456.
- Sharma, S., Rana, V. S., Rana, N., Prasad, H., Sharma, U., & Patiyal, V. (2022). Biochar from fruit crops waste and its potential impact on fruit crops. *Scientia Horticulturae*, 299, 111058.
- Takolpuckdee, P. (2014). Transformation of agricultural market waste disposal to biochar soil amendments (Research Report). Nakhon Sawan Rajabhat University.
- Tarasawatpipat, T., Promraksa, A., Pimsamarn, M., & Srichandr, P. (2014). Biochar production from agricultural waste in Amphawa district, Samutsongkram province Thailand. *Advanced Materials Research*, 1051, 388–391.
- Wang, Y., Zhang, J., & Chen, M. (2022). Biochar from hemp fibers: Characterization and adsorption capacity for heavy metals. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100926.
- Žiūra, K., Zvicevičius, E., Černiauskienė, Ž., Tilvikienė, V., Bakšinskaitė, A., & Pilipavičius, J. (2023). Effect of thermochemical treatment on the physicochemical properties of fiber hemp (*Cannabis sativa* L.) by-product. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135589.
- Sawangphol, N., Sirisomboonchai, S., Laowameea, J., & Suttibut, C. (2021). The availability and assessment of potential agricultural residues for the regional development of second-generation bioethanol in Thailand. *Energy Reports*, 7, 1414–1422.
- Lim, W. S., Lee, C. H., & Mah, S. K. (2021). Valorization of cocoa pod husk for production of biochar: Characterization and application. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(4), 1453–1463.
- Altıkat, A., Bilgili, M. E., & Altıkat, S. (2024). A comprehensive study of biochar yield and quality concerning pyrolysis conditions: A multifaceted approach. *Sustainability*, 16(2), 937.