วารสารแก่นเกษตร THAIJO

Content List Available at ThaiJo

Khon Kaen Agriculture Journal

Journal Home Page : https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj



คุณลักษณะทางกายภาพเคมีและศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนของถ่านชีวภาพจากวัสดุชีวมวลทางการเกษตรที่หลากหลาย ในพื้นที่ วนเกษตรของจังหวัดอุตรดิตถ์

Physicochemical characteristics and carbon sequestration potential of biochar derived from agricultural biomass residues in agroforestry areas of Uttaradit Province

จันทร์เพ็ญ ชุมแสง[1]* และ พิชัย ถิ่นสันติสุข[2]

Chanphen Chumsang[1]* and Phichai Tinsuntisook[2]

[1] หลักสูตรวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
[1] Bachelor of Science Program in Environment, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University 53000
[2] บริษัทซีโรเวชท์ จำกัด, ประธานกิตติมศักดิ์ กลุ่มอุตสาหกรรมพลังงานหมุนเวียน สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย
[2] Zero Waste Co., Ltd., Honorary Chairman of the Renewable Energy Industry Club, The Federation of Thai Industries (FTI)

บทคัดย่อ: การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพเคมีของถ่านชีวภาพจากชีวมวลเหลือทิ้ง 8 ชนิด ในจังหวัดอุตรดิตถ์ ได้แก่ เปลือกทุเรียน กิ่งไม้รวม เหง้ามันสำปะหลัง ไม้มะขาม เปลือกมะม่วงหิมพานต์ เปลือกแมคคาเดเมีย ข้อไม้ไผ่ และแกนข้าวโพด ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (300-600 °C) ด้วยเตาเผาระบบถังซ้อนถัง เพื่อประเมินศักยภาพการกักเก็บคาร์บอนและปรับปรุงดินกรดจัดในพื้นที่วนเกษตร ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณพบว่าถ่านทุกชนิดมีปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) สูงร้อยละ 70-90 โดยเปลือกแมคคาเดเมียสูงสุด (90±0.53%) ตามด้วยข้อไม้ไผ่ (85±0.42%) ด้านประสิทธิภาพการดูดซับน้ำ แกนข้าวโพดให้ค่าสูงสุดร้อยละ 70 รองลงมาคือเปลือกทุเรียนร้อยละ 65 ผลการศึกษาทางเคมีพบว่าถ่านชีวภาพส่วนใหญ่เป็นด่างจัด (pH 6.56±0.76–10.42±0.98) ถ่านจากเปลือกทุเรียนมีศักยภาพโดดเด่นด้านการปรับปรุงดิน โดยมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) สูงสุด (86.50±0.34 cmol/kg) และอุดมด้วยธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน (2.24±0.28%) ฟอสฟอรัส (0.30±0.02%) และโพแทสเซียม (8.47±0.85%) ขณะที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) แปรผันกว้างตั้งแต่ 27.57±0.19 (เปลือกทุเรียน) ถึง 275.28±2.45 (เปลือกแมคคาเดเมีย) สรุปผลการศึกษาจำแนกถ่านชีวภาพได้เป็น 3 กลุ่ม 1) แหล่งธาตุอาหาร (เปลือกทุเรียน เหง้ามันสำปะหลัง) 2) ศักยภาพเฉพาะด้าน เช่น แกนข้าวโพดที่โดดเด่นด้านสังกะสี (250.82±0.34 mg/kg) และ 3) การกักเก็บคาร์บอนระยะยาว (เปลือกแมคคาเดเมีย กลุ่มเนื้อไม้) ข้อมูลนี้เป็นแนวทางสำคัญในการฟื้นฟูดินกรดจัด (pH 3.5–5.0) และปรับปรุงสมบัติของดินหินดินดานผุพังที่ขาดความสามารถในการรักษาความชื้นและธาตุอาหาร เพื่อสนับสนุนเกษตรกรรมคาร์บอนต่ำในพื้นที่ลาดชันอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ; การกักเก็บคาร์บอน; การปรับปรุงดิน; วนเกษตร; คาร์บอนคงตัว

ABSTRACT: This study analyzed and compared the physicochemical properties of biochar derived from eight agricultural biomass types in Uttaradit Province: durian husk, fruit tree branches, cassava root, tamarind wood, cashew nut shell, macadamia husk, bamboo node, and corncob. Biochar was produced via slow pyrolysis (300–600 °C) using a retort furnace to evaluate its carbon sequestration and soil amendment potential for acidic upland agroforestry areas. Proximate analysis indicated high fixed carbon (FC) content (70–90%) across all types, with macadamia husk achieving the highest (90±0.53%), followed by bamboo nodes (85±0.42%). Corncob biochar

* Corresponding author: 1chumsang@gmail.com

Received: date; April 27, 2026 Revised: date; May 14, 2026

Accepted: date; May 14, 2026 Published: date; August 24, 2026

exhibited the highest water adsorption efficiency at 70%, followed by durian husk (65%). Chemical characterization revealed predominantly alkaline properties (pH 6.56±0.76–10.42±0.98). Durian husk biochar emerged as a superior soil amendment, with the highest cation exchange capacity (CEC) of 86.50±0.34 cmol/kg and a rich nutrient profile: nitrogen (2.24±0.28%), phosphorus (0.30±0.02%), and potassium (8.47±0.85%). The C/N ratio varied from 27.57±0.45 (cassava root) to 275.28±2.45 (macadamia husk). The study categorized the biochars into three functional groups: 1) Nutrient-rich/microbial stimulants (durian husk/cassava root), 2) Specific potential sources: such as corncob, notable for zinc content (250.82±0.34 mg/kg), and 3) Long-term carbon sequestration agents (macadamia husk/woody biomass). These findings provide a scientific basis for mitigating strongly acidic soils (pH 3.5–5.0) and ameliorating the properties of weathered shale soils that lack water and nutrient retention capacities, ultimately supporting sustainable low-carbon agriculture in sloping terrains.
Keywords: biochar; carbon sequestration; soil amendment; agroforestry; fixed carbon

บทนำ

จังหวัดอุตรดิตถ์เป็นแหล่งเกษตรกรรมที่สำคัญของภาคเหนือ โดยมีชื่อเสียงในฐานะแหล่งปลูกไม้ผลที่เป็นสินค้าอัตลักษณ์ซึ่งได้รับการขึ้นทะเบียนสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) เช่น สับปะรดห้วยมุ่น ทุเรียนหลงลับแล และทุเรียนหลินลับแล แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันวิถีการเพาะปลูกแบบวนเกษตรดั้งเดิมกำลังเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพืชเดี่ยว (Monoculture) มากขึ้น เพื่อตอบสนองต่อมูลค่าทางเศรษฐกิจที่สูงถึงหลักพันล้านบาทต่อปี การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะเหลือทิ้งทางการเกษตรปริมาณมหาศาลในพื้นที่ สำนักงานเกษตรจังหวัดอุตรดิตถ์ได้ให้ข้อมูลว่าจังหวัดอุตรดิตถ์มีพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ประมาณ 143,555 ไร่ และพื้นที่ไม้ผล-ไม้ยืนต้น 153,646 ไร่ ของพื้นที่ทางการเกษตร และจากการสำรวจพบว่าปริมาณเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งไม่ต่ำกว่าวันละ 4-10 ตันต่อวันในช่วงฤดูกาลทุเรียน การบริโภคทุเรียน 1 ตัน จะมีเปลือกทิ้งประมาณ 585 กิโลกรัม และปริมาณวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (ตอซัง ใบ เปลือก และซัง) มีปริมาณเฉลี่ยประมาณ 1-1.5 ตัน/ไร่/ฤดูการผลิต เป็นที่ทราบกันดีว่าการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยทั่วไป คือการเผา ทิ้งในเขตป่าและที่รกร้างว่างเปล่าปล่อยให้ย่อยสลายเองตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นการทำลายอินทรียวัตถุและสูญเสียธาตุอาหารที่ควรจะหมุนเวียนกลับสู่ดิน ผนวกกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อพื้นที่ทางการเกษตรจำนวนมาก ทั่วโลกกำลังเผชิญปัญหาดินเสื่อมโทรจากการทำเคมีเกษตร และประสิทธิภาพการผลิตลดลงแต่ต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น พื้นที่เพาะปลูกไม้ผลในจังหวัดอุตรดิตถ์มีความลาดชันส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 35 ลักษณะกายภาพและข้อจำกัดของดินพื้นที่เพาะปลูกเป็นพื้นที่บริเวณเชิงเขาซึ่งมีลักษณะเป็น หินดินดานผุพัง ส่งผลให้โครงสร้างดินมีความเสี่ยงสูงต่อการชะล้างพังทลาย การอุ้มน้ำต่ำและความสามารถในการดูดยึดธาตุอาหาร (CEC) อยู่ในเกณฑ์ต่ำ เนื่องจากการสลายตัวของชั้นหินอย่างรวดเร็วท่ามกลางสภาพอากาศที่มีความผันผวน ส่งผลให้ดินสูญเสียความชื้นได้ง่ายและขาดความอุดมสมบูรณ์ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช และผลการวิเคราะห์เบื้องต้นในงานวิจัยนี้ยังพบว่าดินในพื้นที่ของเกษตรกรทั้ง 32 ราย มีสภาพเป็นกรดจัด (pH 3.50 -5.00) จะเกิดการ "ตรึง" ธาตุอาหารหลัก โดยเฉพาะฟอสฟอรัส จนพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ในขณะที่ธาตุโลหะอย่างเช่น อะลูมิเนียมและเหล็ก จะละลายออกมาในปริมาณที่สูงเกินไปจนเป็นพิษได้ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของระบบราก เมื่อเปรียบเทียบเชิงสถิติ พบว่าผลผลิตรวมของอุตรดิตถ์ยังมีความเสียเปรียบพื้นที่ภาคตะวันออก อันเนื่องมาจากปัจจัยแวดล้อมเชิงพื้นที่ที่ไม่เอื้ออำนวย ทั้งในด้านความลาดชันที่ยากต่อการบริหารจัดการน้ำ และสภาวะความเป็นกรดของดินที่ส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช

การเปลี่ยนชีวมวลเหลือทิ้งเหล่านี้ให้เป็น ถ่านชีวภาพ (Biochar) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) หรือการแยกสลายด้วยความร้อนภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด จึงเป็นนวัตกรรมที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อเกษตรกรในการปรับปรุงบำรุงดิน ถ่านชีวภาพมีความแตกต่างจากถ่านทั่วไปตรงที่มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยกระบวนการผลิตสามารถกักเก็บคาร์บอนไว้ในรูปที่เสถียรได้ถึงร้อยละ 50 ของคาร์บอนที่มีอยู่ในชีวมวลเริ่มต้น ซึ่งมากกว่าการปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติที่เหลือคาร์บอนเพียงไม่ถึง ร้อยละ 20 การใส่ถ่านชีวภาพลงในดินจึงเป็นกลไกสำคัญในการกักเก็บคาร์บอน (Carbon Sequestration) ลงสู่ใต้ดินแทนการแพร่กระจายสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดปัญหาโลกร้อน สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติโดดเด่นด้านความพรุนสูงและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก ทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำและรักษาความชื้นในดินได้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบพบว่าถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งในพื้นที่ เช่น แกนข้าวโพดและเปลือกทุเรียน มีประสิทธิภาพการดูด

ซับน้ำได้สูงถึงร้อยละ 50-71 คุณสมบัตินี้ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มศักยภาพการอุ้มน้ำในดินบนพื้นที่ลาดชันที่แห้งแล้งง่าย แต่ยังช่วยปรับปรุงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และเพิ่มค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ซึ่งช่วยให้ดินสามารถจับยึดธาตุอาหารพืชไม่ให้ถูกชะล้างไปกับน้ำฝน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพจากชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผลิตผ่านกระบวนการเผาแบบไพโรไลซีส รวมถึงประเมินศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนจากปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และประสิทธิภาพการดูดซับน้ำของถ่านชีวภาพแต่ละชนิด ข้อมูลที่ได้รับจะถูกใช้เป็นพื้นฐานในการคัดเลือกวัสดุปรับปรุงดินที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ลาดชัน เพื่อบูรณาการร่วมกับภูมิปัญญาท้องถิ่นในการฟื้นฟูระบบนิเวศดินและยกระดับคุณภาพชีวิตของเกษตรกรในจังหวัดอุตรดิตถ์อย่างยั่งยืน

วิธีการศึกษา

(1) แหล่งที่มาของวัตถุดิบและพื้นที่ศึกษา วัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งทางการเกษตรจากพื้นที่เกษตรไม้ผลและพืชไร่ ในพื้นที่จังหวัดอุตรดิตถ์ ประกอบด้วยเปลือกทุเรียน แกนข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง ไม้รวมในระบบวนเกษตรไม้ผลทุเรียน ไม้มะขาม ข้อไม้ไผ่ เปลือกมะม่วงหิมพานต์ และเปลือกแมคคาเดเมีย ที่เกษตรกรต้นแบบ 32 รายใช้ในการเผาถ่านชีวภาพของการเข้าร่วมโครงการวิจัยการปรับปรุงบำรุงดินด้วยถ่านชีวภาพร่วมกับสารชีวภัณฑ์ ในพื้นที่วนเกษตรไม้ผลและพืชไร่ จังหวัดอุตรดิตถ์ ด้วยกระบวนการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม

(2) ชุดนวัตกรรมเตาเผาถ่านชีวภาพต้นแบบเพื่อชุมชน ในการศึกษานี้ใช้ชุดนวัตกรรมเตาเผาถ่านแบบถัง 200 ลิตร **(Figure 1)** เพื่อแปรรูปวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นวัสดุปรับปรุงดินคุณภาพสูง โดยเน้นการออกแบบโครงสร้างแบบ "ถังซ้อนถัง" (Retort Design) เพื่อควบคุมสภาวะแวดล้อมให้มีออกซิเจนจำกัด ซึ่งเป็นกลไกสำคัญของกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ชุดนวัตกรรมประกอบด้วย ถังภายนอก (ขนาด 200 ลิตร) ทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้และฉนวนควบคุมความร้อน และ ถังภายใน (ขนาด 100 ลิตร) ทำหน้าที่เป็นห้องแยกสลายด้วยความร้อน (Retort) สำหรับบรรจุชีวมวล (น้ำหนักแห้งน้ำหนักเฉลี่ย 20-40 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต) นอกจากนี้ยังติดตั้งถังขนาด 30 ลิตร เป็นชุดปล่องควันร่วมกับตะแกรงเหล็กเพื่อควบคุมทิศทางลมและการไหลเวียนความร้อน, โดยมีการเจาะรูระบายอากาศขนาด 6 เซนติเมตรที่ถังภายนอก และ 3 เซนติเมตรที่ถังภายในรอบตัวถังตามตำแหน่งที่คำนวณไว้เพื่อให้ระบบกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ

เหตุผลสำคัญที่เลือกใช้ระบบ 'ถังซ้อนถัง' เนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 300-600 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยรักษาโครงสร้างรูพรุนและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่พื้นผิว (เช่น -COOH และ -OH) ได้ดีกว่าการเผาในที่โล่งทั่วไป สภาวะนี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของถ่านชีวภาพ ทำให้มีปริมาณ คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) สูงถึงร้อยละ 70-90 และมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ที่สูง ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการดูดยึดธาตุอาหารและฟื้นฟูดินกรดจัดในพื้นที่ลาดชันของจังหวัดอุตรดิตถ์ นวัตกรรมนี้จึงเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยเปลี่ยนวิธีจัดการขยะจากการเผาทิ้งมาเป็นการกักเก็บคาร์บอน (Carbon Sequestration) ในดินเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างยั่งยืน

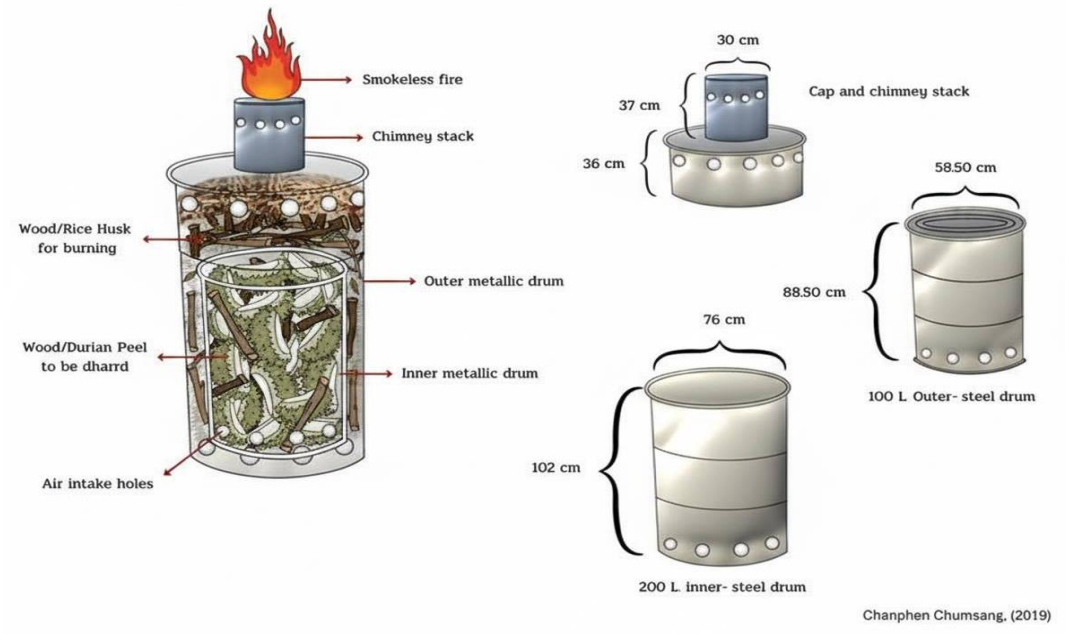


Figure 1 Community-Scale Biochar Retort Prototype (Retort Design)

(3) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ (Physical Characterization)

การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis): ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D 3172 เพื่อหาปริมาณความชื้น (Moisture Content), ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) และปริมาณเถ้า (Ash Content) สำหรับปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) คำนวณได้จากสมการ Fixed Carbon = 100– (Moisture + Volatile + Ash) ซึ่งค่าคาร์บอนคงตัวนี้เป็นตัวบ่งชี้สำคัญถึงศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอน (Carbon Sequestration) และความเสถียรของวัสดุเมื่อนำไปใส่ลงในดิน และวัดประสิทธิภาพการดูดซับน้ำ (Water Adsorption Efficiency) โดยการนำถ่านชีวภาพแช่น้ำและตรวจวัดค่าการดูดซับที่ระยะเวลา 1, 3 และ 7 วัน เพื่อประเมินความสามารถในการรักษาความชื้นและความพรุน (Porosity) ของถ่านชีวภาพแต่ละชนิด ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการฟื้นฟูดินในพื้นที่ลาดชันที่ขาดแคลนน้ำ

(4) การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี (Chemical Characterization)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC) วิเคราะห์โดยการเตรียมสารละลายถ่านชีวภาพต่อน้ำกลั่น (Deionized water) ในอัตราส่วน 1:10 (w/v) โดยทำการเขย่าให้เข้ากันและทิ้งไว้ให้เสถียรก่อนตรวจวัดด้วยเครื่อง pH Meter และ EC Meter ตามลำดับ

ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC) และไนโตรเจนรวม (Total Bound Nitrogen: TNb) วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงด้วยเครื่อง Total Organic Carbon Analyzer รุ่น Multi N/C 2100S (Analytik Jena, Germany) ร่วมกับชุดวิเคราะห์ Total bound Nitrogen Analyzer เพื่อให้ได้ค่าคาร์บอนและไนโตรเจนที่แม่นยำกว่าวิธีทางเคมีแบบดั้งเดิม จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) เพื่อประเมินความคงทนและการสลายตัวในดิน

ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC) วิเคราะห์ด้วยวิธี Ammonium acetate saturation ที่ pH 7.0 โดยการแลกเปลี่ยนประจุด้วยแอมโมเนียมไอออนและนำไปผ่านกระบวนการกลั่น (Distillation) เพื่อวัดปริมาณแอมโมเนียมที่ถูกดูดยึดไว้ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของถ่านชีวภาพในการกักเก็บธาตุอาหารพืช

การวิเคราะห์ธาตุอาหารพืชในรูปปริมาณทั้งหมด (Total P,S, K, Ca, Mg, B, Zn)

โดยนำถ่านชีวภาพมาย่อยสลายแบบเปียก (Wet Digestion) โดยใช้ส่วนผสม HNO_3:$HClO_4$ อัตรา 2:1 (v/v) ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Tessier et al. (1979) เพื่อสลายโครงสร้างคาร์บอนและดึงธาตุอาหารออกมาทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P) และ ปริมาณกำมะถันทั้งหมด (Total S) จากสารละลายที่ย่อยแล้วด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometry และการวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) โบรอน (B) และสังกะสี ในรูปปริมาณทั้งหมด ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS)

วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (α = 0.05) โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ

ผลการศึกษาและวิจารณ์

สมบัติของชีวมวลจากการวิเคราะห์แบบ Proximate Analysis

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) ชี้ให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากวัสดุชีวมวลทั้ง 8 ชนิด มีปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) สูงอยู่ในช่วงร้อยละ 70–90 **(Table 1)** โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ตามชนิดของวัสดุชีวมวล โดยถ่านจากเปลือกแมคคาเดเมียมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด (ร้อยละ 90) ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ และข้อไม้ไผ่ แกนข้าวโพด ไม้รวมในระบบวนเกษตร เหง้ามันสำปะหลัง และไม้มะขามที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงกว่า 80% จะเห็นได้ว่าความแปรผันของค่าดังกล่าวสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) ดังจะเห็นได้ว่าเปลือกทุเรียนและเปลือกมะม่วงหิมพานต์ ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ต่ำกว่าชีวมวลอื่นๆ แต่ชีวมวลทั้ง 2 ชนิดที่มีปริมาณสารระเหย 15-19% **(Table 1)** ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าชีวมวลอื่น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวต่ำกว่าชีวมวลอื่นๆ เปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของพืชเป็นปัจจัยสำคัญ รวมถึงสภาพแวดล้อมของการเผาที่ต้องมีการควบคุมปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิที่เหมาะสม (Maraseni, 2010; Roberts et al., 2010) การเปลี่ยนคาร์บอนให้เป็นโครงสร้างที่เสถียรของกระบวนการเผาแบบไพโรไลซิสเป็นกลไกสำคัญทำให้คาร์บอนคงตัวที่สูงได้ และการใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงบำรุงดินจะเป็นแนวทางการช่วยกักเก็บคาร์บอนได้ในระยะยาวและลดการสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ โดยเปลี่ยนรูปแบบจากชีวมวลที่เน่าเปื่อยง่ายมาเป็นคาร์บอนที่เสถียรและกักเก็บได้ประมาณ 50% ของคาร์บอนเริ่มต้น (Lehmann et al., 2006) กล่าวได้ว่าแนวทางการใส่ถ่านชีวภาพลงในดินจึงมีศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนได้ดีกว่าการใส่ชีวมวลสด เช่น ซากพืชหรือปุ๋ยหมัก (Kwapinski et al., 2010) เนื่องจากชีวมวลสดมักเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็วในสภาพภูมิอากาศเขตร้อนชื้น และปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในอัตราที่สูง (Steiner, 2007) นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนวิธีจัดการวัสดุเหลือทิ้งจากการเผากลางแจ้งมาเป็นการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส จะช่วยลดการสูญเสียคาร์บอนได้มากกว่า 12% (Maraseni, 2010; Roberts et al., 2010) จุดเริ่มต้นของการปรับเปลี่ยนแนวทางการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่วนเกษตรจังหวัดอุตรดิตถ์ให้เป็นถ่านชีวภาพ เป็นกลไกสำคัญที่ช่วยลดภาวะโลกร้อนและสนับสนุนการสร้างสังคมคาร์บอนต่ำ

Table 1 Proximate Analysis of Biochar from 8 Agricultural Residues in Uttaradit Province (N=3)

ถ่านชีวภาพ	Proximate Analysis (%)			
	Moisture	Volatile	Ash	Fixed Carbon
Durian husk	5±0.45 a	15±0.71 b	5±0.37 b	75±0.13 d
Fruit tree agroforestry	3±0.32 c	10±0.62 e	3±0.41 d	84±0.24 b
Root of cassava	4±0.12 b	12±0.42 cd	4±0.52 c	80±0.32 c
Tamarind	3±0.26 c	13±0.54 c	2±0.54 e	82±0.37 c
Cashew nut shell	5±0.12 a	19±0.32 a	6±0.33 a	70±0.42 e
Macadamia husk	3±0.65 c	5±0.54 f	2±0.24 e	90±0.53 a
Bamboo node	2±0.42 d	11±0.42 d	2±0.31 e	85±0.42 b
Corncob	2±0.38 d	12±0.12 cd	3±0.62 d	83±0.33 ab

ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำและความสำคัญต่อการฟื้นฟูดินในพื้นที่ลาดชัน

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับน้ำ **(Figure 2)** พบว่าถ่านชีวภาพทุกชนิดมีแนวโน้มการดูดซับน้ำเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลา โดยในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 3 มีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่สุด และยังคงเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงวันที่ 7 ผลการศึกษาจำแนกศักยภาพของถ่านชีวภาพออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่กลุ่มที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ ถ่านชีวภาพจากแกนข้าวโพด ซึ่งให้ค่าการดูดซับน้ำสูงที่สุดถึงประมาณ ร้อยละ 70 ที่ระยะเวลา 7 วัน รองลงมาคือเปลือกทุเรียน (ร้อยละ 65) และเหง้ามันสำปะหลัง (ร้อยละ 62) ตามลำดับ กลุ่มที่มีประสิทธิภาพปานกลาง ได้แก่ ถ่านจากไม้รวมในระบบวนเกษตร ไม้มะขาม และข้อไม้ไผ่ ซึ่งมีค่าการดูดซับน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 49 ถึง 56 และกลุ่มที่มีประสิทธิภาพต่ำ ได้แก่ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (ร้อยละ 35) และ เปลือกแมคคาเดเมีย ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 15 ตลอดช่วงการทดสอบจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าผลเชิงลักษณะทางกายภาพจะเห็นได้ว่าสาเหตุสำคัญที่ทำให้ถ่านจากเปลือกแมคคาเดเมียและเปลือกมะม่วงหิมพานต์มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น เนื่องมาจากลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบที่เป็นพืชให้น้ำมัน ซึ่งคาดว่าในสภาวะการแยกสลายด้วยความร้อนจะยังคงมี น้ำมันดิน (Tar) ตกค้างและอุดตันอยู่ในช่องว่างของรูพรุน ส่งผลให้การแทรกซึมของน้ำเข้าไปในโครงสร้างของถ่านทำได้น้อย เมื่อพิจารณาในเชิงปฐพีวิทยาข้อมูลประสิทธิภาพการดูดซับน้ำนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการจัดการเกษตรในพื้นที่จังหวัดอุตรดิตถ์ ซึ่งมีสภาพภูมิประเทศเป็นพื้นที่ลาดชันมากกว่าร้อยละ 35 และต้องเผชิญกับความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ ที่วิกฤตสลับขั้วระหว่าง ภัยแล้งรุนแรง และฝนตกชุกจนดินสไลด์ ส่งผลกระทบต่อพื้นที่เกษตรกรรมโดยเฉพาะพื้นที่ปลูกทุเรียน การนำถ่านชีวภาพที่มีความพรุนสูง (High Porosity) อย่างแกนข้าวโพดหรือเปลือกทุเรียนไปใช้จะทำหน้าที่เสมือน "ฟองน้ำ" ในชั้นดินที่ช่วยเพิ่ม ศักยภาพในการอุ้มน้ำ (Water Holding Capacity) และอัตราการแทรกซึมน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพเหล่านี้จะช่วยดูดซับน้ำไว้แทนที่จะปล่อยให้ไหลบ่า (Runoff) ไปตามผิวหน้าดินอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการลดแรงปะทะและการชะล้างพังทลายของหน้าดิน (Soil Erosion) ในพื้นที่สูงชันที่มีชั้นดินตื้นหรือเป็นดินปนกรวด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Glaser et al. (2002) ที่ระบุว่าถ่านชีวภาพเป็นวัสดุที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน โดยช่วยลดความหนาแน่นรวม (Bulk density) และเพิ่มขีดความสามารถในการเก็บรักษาความชื้นไว้ในชั้นดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอย่างยั่งยืน



Figure 1 Water Adsorption Efficiency of Biochar from 8 Agricultural Residues in Uttaradit Province (N=3)

สมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารพืชของถ่านชีวภาพจากวัสดุชีวมวล

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างถ่านชีวภาพ พบว่าถ่านชีวภาพส่วนใหญ่มีคุณสมบัติเป็นด่างจัด โดยมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.56 ถึง 10.42 วัสดุที่ให้ค่า pH สูงสุดคือเหง้ามันสำปะหลัง (10.42) และแกนข้าวโพด (10.36) รองลงมาคือเปลือกทุเรียน (9.86) และข้อไม้ไผ่ (9.30) ในขณะที่ถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมียมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำที่สุด คือ 6.56 ซึ่งมีสภาพเป็นกรดเล็กน้อยถึงเกือบเป็นกลาง จะเห็นได้ว่าปัจจัยการผลิตและวัตถุดิบมีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ของถ่านชีวภาพโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 4–12 ขึ้นอยู่กับชนิดวัตถุดิบและสภาวะการเผาโดยเฉพาะอุณหภูมิในการเผาไพโรไลซิส หากใช้อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น (Bagreev et al., 2001; Lehmann et al., 2006) ตามกระบวนการสลายตัวของสารอินทรีย์และการสะสมของแร่ธาตุที่เป็นด่างในเถ้า การที่ถ่านชีวภาพส่วนใหญ่ในการศึกษานี้มีค่าเป็นด่างสูง เป็นผลมาจากการสะสมของธาตุประจุบวกที่เป็นด่าง เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ในแง่ของบทบาทในการแก้ปัญหาดินกรดในพื้นที่อุตรดิตถ์ สภาพดินในสวนผลไม้จังหวัดอุตรดิตถ์ (อำเภอลับแล อำเภอเมือง อำเภอท่าปลา อำเภอฟากท่า) ประสบปัญหาสภาพดินเป็นกรดจัด (pH 3.5–5.0) เนื่องจากอิทธิพลของหินต้นกำเนิดและการชะล้างในพื้นที่ลาดชัน การใช้ถ่านชีวภาพที่มีค่า pH เป็นด่างสูงจึงมีบทบาทสำคัญในการเป็นวัสดุชีวภาพที่ช่วยสะเทินกรดและลดความรุนแรงของสภาพดินกรด ที่จะช่วยลดความเป็นพิษของเหล็กและอะลูมินัม และช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสที่มักถูกตรึงไว้ในดินกรด แม้ถ่านชีวภาพจะมีค่า pH สูง แต่การใส่ในปริมาณน้อยอาจไม่เปลี่ยนค่า pH ของดินในทันที เนื่องจากดินมีความจุบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity) ที่คอยต้านทานการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ควรใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับวัสดุปรับปรุงดินชนิดอื่น เช่น โดโลไมท์ หรือยิปซัม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับสภาพความอุดมสมบูรณ์ของดินในระยะยาว นอกจากนี้ ค่าความ

เป็นด่างของถ่านยังช่วยควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน ช่วยให้จุลินทรีย์สามารถทำงานและหายใจได้ดีขึ้น ส่งผลต่อวัฏจักรธาตุอาหารที่สมบูรณ์

2) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC)

จากการวัดค่าการนำไฟฟ้าและการสะสมแร่ธาตุในรูพรุน ในส่วนของคุณลักษณะทางกายภาพที่สัมพันธ์กับความสามารถในการปรับปรุงดิน พบว่ามีความเชื่อมโยงกับสมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพ เนื่องจากค่า EC เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณแร่ธาตุที่ไม่ระเหย และเกลือที่ละลายได้ เช่น K, Ca และ Mg ที่สะสมอยู่ในโครงสร้างและรูพรุนของถ่านชีวภาพหลังผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน โดยเฉพาะในถ่านเปลือกทุเรียนที่มีค่า EC สูงที่สุด (5.46 dS/cm) ซึ่งสะท้อนถึงการเป็นแหล่งกักเก็บแร่ธาตุประจุบวกที่เป็นด่าง พร้อมที่จะปลดปล่อยออกมาเพื่อสะเทินความเป็นกรดของดินในพื้นที่ศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC)

จากผลการทดลองพบว่าถ่านชีวภาพทั้ง 8 ชนิด มีค่า CEC แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 11.97 ถึง 86.50 cmol/kg จากผลการวิเคราะห์สามารถแบ่งกลุ่มที่มีค่า CEC สูงสุด ได้แก่ ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน (86.50 cmol/kg) รองลงมาคือ แกนข้าวโพด (64.00 cmol/kg) ข้อไม้ไผ่ (56.50 cmol/kg) ปลือกมะม่วงหิมพานต์ (50.00 cmol/kg) และกลุ่มที่มีค่า CEC ปานกลาง ได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง (30.00 cmol/kg) ไม้รวมในระบบวนเกษตร (26.49 cmol/kg) และไม้มะขาม (20.00 cmol/kg) และที่มีค่า CEC ต่ำสุด คือเปลือกแมคคาเดเมีย (11.97 cmol/kg) เมื่อพิจารณาในบทบาทต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินและกลไกทางเคมี ค่า CEC ถือเป็นดัชนีชี้วัดความอุดมสมบูรณ์ของดินและศักยภาพในการดูดซับธาตุอาหารพืช รวมถึงโลหะหนัก (Alloway, 1990) การที่ถ่านเปลือกทุเรียนและแกนข้าวโพดมีค่า CEC สูง สะท้อนถึงพื้นผิวที่มีประจุลบจำนวนมาก ซึ่งเกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิไม่เกิน 500-600 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chan et al. (2007), Lehmann et al., (2006) และ Mukherjee et al., (2014) ระบุว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตภายใต้อุณหภูมิต่ำจะมีค่า CEC สูง ในขณะที่อุณหภูมิที่สูงเกิน 600 องศาเซลเซียสจะทำให้ค่า CEC ที่ทำหน้าที่ดูดยึดธาตุอาหารลดลง

การแก้ปัญหาสภาพดินในสวนผลไม้อุตรดิตถ์ส่วนใหญ่เป็นดินกรดจัด (pH 3.5-5.0) และมีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นดินปนหินทรายแป้งหรือดินศิลาแลง ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่งผลให้ดินเดิมมีความสามารถในการดูดยึดธาตุอาหาร (CEC) ต่ำมาก การใส่ถ่านชีวภาพที่มีค่า CEC สูงเข้าไป จึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการเพิ่มพื้นที่ผิวประจุลบให้กับดิน ช่วยให้ดินสามารถกักเก็บธาตุอาหารที่เป็นประจุบวก เช่น โพแทสเซียม (K^+) แคลเซียม ($Ca^{2+)}$ และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ไม่ให้ถูกชะล้างไปกับน้ำฝนในพื้นที่ลาดชัน และถ่านชีวภาพยังมีบทบาทสำคัญของการเพิ่มประจุและการจับตัวของเม็ดดิน กลไกการเพิ่ม CEC ในดินเกิดจากการที่ถ่านชีวภาพใหม่เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำในดินจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งช่วยเพิ่มประจุลบสุทธิ (Joseph et al., 2009) ในระยะยาวถ่านชีวภาพซึ่งมีประจุลบจะช่วยกระตุ้นให้เกิดการจับตัวกันของเม็ดดินทำให้โครงสร้างดินดีขึ้นและเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารต่อพืชได้อย่างยั่งยืน (Liang et al., 2006; Major et al., 2010)

4) อัตราส่วนระหว่างปริมาณคาร์บอนต่อปริมาณไนโตรเจน

พบว่าถ่านชีวภาพทั้ง 8 ชนิด มีอัตราส่วน C/N Ratio อยู่ในช่วงระหว่าง 27.57 ถึง 275.28 **(Table 2)** โดยกลุ่มที่มีอัตราส่วน C/N กว้างที่สุด คือ เปลือกแมคคาเดเมีย (275.28) รองลงมาคือ ไม้มะขาม (219.55) ข้อไม้ไผ่ (172.43) และไม้รวมในระบบวนเกษตรและ (159.67) ตามลำดับ และกลุ่มที่มีอัตราส่วน C/N แคบที่สุด คือ เหง้ามันสำปะหลัง (38.56) แกนข้าวโพด (33.93) เปลือกมะม่วงหิมพานต์ (32.72) และเปลือกทุเรียน (27.57) ซึ่งเป็นระดับที่ใกล้เคียงกับเกณฑ์ความต้องการของจุลินทรีย์ดินมากกว่าวัสดุชนิดอื่น ความเสถียรทางชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอนในระยะยาว อัตราส่วน C/N เป็นดัชนีสำคัญที่บ่งชี้ถึงความยากง่ายในการย่อยสลายของอินทรียวัตถุ ผลการศึกษาที่พบว่าถ่านชีวภาพส่วนใหญ่มีค่า C/N ratio กว้างกว่า 30:1 (โดยเฉพาะกลุ่มเปลือกไม้และเนื้อไม้) สะท้อนถึงความเสถียรทางชีวภาพสูงและความทนทานต่อการย่อยสลาย (Schmidt and Noack, 2000; Lehmann et al., 2006; Glaser et al., 2002) ซึ่งถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง (70-90%) ทำให้มีศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนในดินได้นานนับร้อยปี (Preston and Schmidt, 2006; Gul et al., 2015) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใส่ซากพืชสดหรือปุ๋ยหมักทั่วไปที่จะย่อยสลายหมดไปภายในเวลาไม่กี่ปี และส่งผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินและการหมุนเวียนธาตุอาหาร โดยทั่วไป อัตราส่วน

C/N ratio ที่เหมาะสมที่สุดต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินคือ 20:1 ถึง 30:1 เนื่องจากเป็นระดับที่เพียงพอต่อการใช้เป็นแหล่งพลังงานและสร้างโปรตีนในเซลล์ ได้แก่เปลือกทุเรียน ที่มีค่าอยู่ในเกณฑ์นี้จึงอาจถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าชนิดอื่น อย่างไรก็ตาม แม้ถ่านชนิดอื่นจะมีค่า C/N สูงกว่า 30:1 ได้แก่เหง้ามันสำปะหลัง แกนข้าวโพด และเปลืองมะม่วงหิมพานต์ ควรมีการหมักร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์หรือการชาร์ทกับปุ๋ยเคมีและหรือปุ๋ยน้ำชีวภาพที่มีไนโตรเจนก่อนนำไปใช้ ทั้งนี้โครงสร้างคาร์บอนในถ่านชีวภาพมีความเสถียรค่อนข้างสูง อาจส่งผลเบื้องต้นในการรแย่งชิงไนโตรเจนจากพืช (Nitrogen Immobilization) เหมือนกับการใส่เศษพืชสดที่มี C/N ratio สูงลงในดิน ซึ่งมักทำให้พืชแสดงอาการใบเหลืองจากการขาดธาตุอาหารชั่วคราว และความเหมาะสมในการปรับปรุงดินวนเกษตรจังหวัดอุตรดิตถ์ การที่ถ่านชีวภาพเหล่านี้มีค่า C/N ratio กว้าง ประกอบกับโครงสร้างที่มีรูพรุนสูง ทำให้มันทำหน้าที่เป็น "แหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ดินและสะสมธาตุอาหาร" เพราะด้วยสภาพดินสวนผลไม้อุตรดิตถ์ที่ประสบปัญหาการชะล้างพังทลายสูงและเป็นกรดจัด การใช้ถ่านชีวภาพที่มีความเสถียรสูง (C/N กว้าง) จะช่วยรักษาโครงสร้างดินและคงสภาพความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหาร เช่น โพแทสเซียม และแมกนีเซียม ไว้ในบริเวณรากพืชได้ยาวนานกว่าวัสดุอินทรีย์ชนิดอื่น

5) ปริมาณธาตุอาหารพืชของถ่านชีวภาพจากวัสดุชีวมวล

จากการวิเคราะห์ **(Table 2)** พบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TNb) ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน มีปริมาณไนโตรเจนสูงที่สุดคือ 2.24% รองลงมาคือ เปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ (2.05%) แกนข้าวโพด (1.87%) และ เหง้ามันสำปะหลัง (1.75%) และวัสดุที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำที่สุดคือ เปลือกแมคคาเดเมีย (0.35%) ในขณะที่ปริมาณโพแทสเซียมพบปริมาณสูงมากอย่างมีนัยสำคัญในถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน (8.47%) ลำดับถัดมาคือ แกนข้าวโพด (4.72%) และเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ (3.73%) และต่ำที่สุดในถ่านชีวภาพจากเปลือกเม็ดคาเดเมีย (0.12%) ในขณะที่ภาพรวมของในภาพรวมปริมาณฟอสฟอรัสมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับธาตุอาหารอื่นๆ แต่ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนยังคงมีปริมาณสูงสุด 0.30% และผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารรองและธาตุอาหารเสริม (Ca, Mg, S, B, Zn) พบว่าแคลเซียมและแมกนีเซียม (Ca, Mg) ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนมีปริมาณแคลเซียม (1.97%) และแมกนีเซียม (0.88%) สูงที่สุด ในขณะถ่านชีวภาพจากข้อไม้ไผ่ ไม้มะขาม และไม้รวมจากระบบวนเกษตรไม้ผล มีปริมาณแคลเซียมที่ค่อนข้างสูงและมีศักยภาพของการเป็นแหล่งแคลเซียมจากพืช ในขณะที่มีปริมาณโบรอนค่อนข้างสูงในถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน (87.93 mg/kg) และข้อไม้ไผ่ (62.24 mg/kg) และพบว่าถ่านชีวภาพจากแกนข้าวโพด เปลือกทุเรียน และข้อไม้ไผ่ มีปริมาณสังกะสีทั้งหมดสูงถึง 250.82 – 167.16 mg/kg ส่วนปริมาณซัลเฟอร์ในถ่านชีวภาพทั้งหมด 8 ชนิดมีปริมาณต่ำ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.02-0.18% พบมากสุดในถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน และต่ำสุดในถ่านชีวภาพจากแกนข้าวโพด

อิทธิพลของชนิดวัตถุดิบต่อปริมาณธาตุอาหารหลัก จากการศึกษาพบว่าปริมาณธาตุอาหารหลัก (N, P, K) ในถ่านชีวภาพมีความผันแปรตามชนิดของวัตถุดิบเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนแสดงศักยภาพสูงสุดในการ มีปริมาณธาตุอาหาร โดยมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TNb) สูงถึง 2.24% และฟอสฟอรัสทั้งหมด 0.30% ซึ่งสูงกว่าวัสดุชนิดอื่นอย่างโดดเด่น ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yuan et al. (2011) ที่ระบุว่าวัสดุเหลือทิ้งประเภทใบหรือของเสียจากการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรมักมีความเข้มข้นของธาตุอาหารสูงกว่าวัสดุประเภทเนื้อไม้ เช่นเดียวกับในส่วนของโพแทสเซียม (Total K) พบปริมาณสูงมากในเปลือกทุเรียน (8.47%) และแกนข้าวโพด (4.72%) ปริมาณที่สูงนี้เกินกว่าค่าเฉลี่ยที่พบในวัสดุอินทรีย์ทั่วไป (0.8-4.0%) และสูงกว่ามูลสัตว์บางชนิด สมบัตินี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการปรับปรุงดินกรดจัดในพื้นที่จังหวัดอุตรดิตถ์ เนื่องจากโพแทสเซียมทำหน้าที่เป็นแคตไอออนที่เป็นด่าง ช่วยสะเทินความเป็นกรดของดินและเพิ่มค่า pH ให้เหมาะสมต่อการละลายของธาตุอาหารชนิดอื่นๆ

ความเป็นกรดของดินและเพิ่มค่า pH ให้เหมาะสมต่อการละลายธาตุอาหารชนิดอื่นๆ ได้ ในขณะที่ปริมาณแคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) พบปริมาณสูงสุดในถ่านเปลือกทุเรียน (1.97% และ 0.88% ตามลำดับ) ธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญของคลอโรฟิลล์และผนังเซลล์พืช การใช้ถ่านชีวภาพในพื้นที่สวนผลไม้บนภูเขาซึ่งประสบปัญหาหน้าดินถูกชะล้างสูง จึงถือเป็นการเติมธาตุอาหารรองที่มักสูญเสียไปได้ง่าย จุดเด่นเชิงลึกที่พบคือ ธาตุอาหารในถ่านชีวภาพเหล่านี้จะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้าๆ (Slow-release) เนื่องจากธาตุอาหารบางส่วนจับตัวอยู่ในรูปของคีเลต (Chelate) หรือเป็นส่วนหนึ่งของสารประกอบอินทรีย์ที่เสถียร กลไกนี้ช่วยลดการสูญเสียจากการชะล้าง (Leaching) ได้ดีกว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ที่พบสูงที่สุดในเปลือกทุเรียน (86.50 cmol/kg) ค่า CEC ที่สูงช่วยให้ถ่านชีวภาพสามารถดูดยึดธาตุอาหารประจุบวกไว้บนพื้นผิว

ที่มีรูพรุนและปลดปล่อยแลกเปลี่ยนธาตุอาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ให้พืชอย่างเป็นระบบ (Ding et al., 2010) อย่างไรก็ตามวัสดุกลุ่มเนื้อไม้เนื้อแข็ง เช่น กิ่งมะขาม และไม้รวมจากระบบวนเกษตรไม้ผล แม้จะมีปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (TOC) สูง (87-96%) แต่กลับมีธาตุอาหารหลักต่ำซึ่งสะท้อนว่าวัสดุกลุ่มนี้เหมาะสำหรับการกักเก็บคาร์บอน (Carbon Sequestration) มากกว่าการเป็นแหล่งอาหารพืชโดยตรง และหรือเกษตรกรสามารถใช้ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนและแกนข้าวโพดรวมกับถ่านชีวภาพจากชีวมวลเนื้อไม้อื่นๆ

Table 2 Chemical properties and plant nutrient content of biochar from agricultural biomass materials in Uttaradit Province (N=3)

Chemical Properties	Biochar from fruit trees and field crops biomass in Uttaradit Province							
	Corncob	Durian husk	Bamboo node	Root of cassava	Fruit tree agroforestry	Tamarind	Macadamia husk	Cashew nut shell
pH (1:10)	10.36±0.12a	9.86±0.82b	9.30±0.87b	10.42±0.98a	8.74±0.78c	8.96±0.86bc	6.56±0.76	8.10±1.02d
EC (1:10; dS cm^{-1})	1.59±0.11b	5.46±0.76a	1.59±0.43b	1.34±0.12bc	1.23±0.07c	0.49±0.06d	0.08±0.03e	0.48±0.02d
CEC (cmol/kg)	64.00±0.21b	86.50±0.34a	56.50±0.96bc	30.00±0.23d	26.49±0.12de	20.00±0.12e	11.97±0.04f	50.00±1.03c
TOC (%)	63.44±0.32d	61.76±0.21e	63.80±1.21d	67.48±0.31c	87.82±0.23b	87.82±0.11b	96.35±0.25a	67.02±1.45c
TNb (%)	1.87±0.24b	2.24±0.28a	0.37±0.05d	1.75±0.12b	0.55±0.02c	0.40±0.02cd	0.35±0.04d	2.05±0.65a
C/N Ratio	33.93±0.45f	27.57±0.19h	172.43±0.21c	38.56±0.45e	159.67±2.34d	219.55±2.34b	275.28±2.45a	32.72±0.98g
Total K (%)	4.72±0.67b	8.47±0.85a	3.47±0.43c	2.80±0.09d	0.68±07.02e	0.20±0.02f	0.12±0.04f	3.73±0.34ab
Total Ca (%)	0.06±0.82d	1.97±0.62a	1.49±0.09b	0.87±0.01c	1.35±0.04bc	1.74±0.05ab	0.01±0.00d	0.12±0.04d
Total Mg (%)	0.17±0.65e	0.88±0.31a	0.55±0.01b	0.14±0.06e	0.21±0.01d	0.15±-0.01e	0.19±0.01d	0.38±0.00c
Total P (%)	0.03±0.77cd	0.30±0.02a	0.04±0.02c	0.12±0.02b	0.02±0.01de	0.01±0.00e	0.02±0.00de	0.03±0.00cd
Total S (%)	0.02±0.63d	0.18±0.87a	0.08±0.12c	0.08±0.82c	0.05±0.85cd	0.13±0.75b	0.08±0.05c	0.04±0.04d
Total B (mg/kg)	9.58±0.12e	87.93±0.88a	62.24±0.93b	6.85±0.75f	18.45±1.22c	8.96±0.94e	6.45±0.98f	14.53±0.86d
Total Zn (mg/kg)	250.82±0.34a	220.46±1.23b	167.16±1.67c	94.32±1.32d	67.67±1.32e	64.43±1.06e	35.67±1.35g	50.51±1.17f

ความเข้าใจเชิงลึกในผลกระทบสองขั้วและการจัดการถ่านชีวภาพอย่างเหมาะสมตามลักษณะเฉพาะของชีวมวล

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเผาถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าจะมีสามขั้นตอนหลักๆ ที่ใช้ความร้อนในการสลายองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวลที่อุณหภูมิ 300-600 องศาเซลเซียสในสภาวะที่จำกัดออกซิเจน จะทำให้ถ่านชีวภาพมีคาร์บอนที่เสถียร (Lee et al., 2017) ซึ่งในกระบวนเผาทำให้เกิดการระเหยและการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (Ding et al., 2010) ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพโดยเฉพาะค่า CEC ค่า C/N Ratio และค่า pH ที่จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของการของการนำไปใช้ปรับปรุงบำรุงดินและการกักเก็บคาร์บอนในดิน (Asadullah et al., 2007; Chen et al., 2008; Agegnehu et al., 2017; Maga and Narayan, 2023; Jindo et al., 2014) ถ่านชีวภาพมีผลกระทบสองขั้วต่อความสมดุลธาตุอาหารที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ดังจะเห็นได้ว่าถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนมีศักยภาพของการเป็นแหล่งธาตุอาหารและการต้านทานประจุ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าปริมาณโพแทสเซียมที่สูงมาก (8.47%) และค่า CEC ที่สูงที่สุด (86.50 cmol/kg) ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวประจุลบในการดูดยึดธาตุอาหารไม่ให้ถูกชะล้างพังทลายได้ ในขณะเดียวกันปริมาณโพแทสเซียมที่สูงเกินไปอาจขัดขวางการดูดใช้แคลเซียมและแมกนีเซียมของพืชได้ และการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่าถ่านชีวภาพทั้ง 8 ชนิดมีปริมาณคาร์บอนคงที่ระหว่าง 70-90% เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Fixed Carbon กับค่า C/N ratio และค่า CEC จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณ Fixed Carbon สูงจะส่งให้ค่า C/N ratio สูงขึ้น ที่บ่งชี้ถึงความเสถียรต่อการย่อยสลายในดินและแปรผกผันกับค่า CEC ที่มีปริมาณลดลง ที่สอดคล้องกับการศึกษาของ Lehmann and Joseph (2009) ที่กล่าวไว้ว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตภายใต้สภาพอุณหภูมิต่ำจะมีค่า CEC สูงในขณะที่ถ่านชีวภาพที่ผลิตที่สภาพอุณหภูมิสูง (>600 ºC) จะมีค่า CEC ต่ำหรือไม่มีเลย ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาที่สูงกว่า 500 ºC จะส่งผลให้ลิกนินและสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะแข็งแรงสลายตัวและการเป็นคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้น (Lee et al., 2017) นอกจากนั้นอุณหภูมิในการเผาของกระบวนการไพโรไลซิสมีความสัมพันธ์อย่างมากกับโครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพแต่ละชนิด เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงขึ้นค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า CEC และธาตุอาหารพืชบางชนิดบนพื้นผิวลดลง (Asadullah et al., 2007)

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าถ่านชีวภาพทั้ง 8 ชนิดที่เป็นตัวแทนของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่มีความแปรผันตามลักษณะของชีวมวล และชีวมวลที่เป็นกลุ่มไม้เนื้อแข็งจะส่งให้ Fixed Carbon และค่า C/N Ratio ที่กว้างมาก เมื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงบำรุงดินต้องคำนึงถึงค่าความเสถียรของคาร์บอนและผลต่อจุลินทรีย์ (Carbon Stability and N-immobilization) ดังจะเห็นได้ว่าถ่านจากเปลือกแมคคาเดเมีย ไม้รวมในระบบวนเกษตร และไม้มะขาม มีอัตราส่วน C/N Ratio กว้างที่สุด (159-275) และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสะท้อนถึงศักยภาพในการกักเก็บคาร์บอนได้นานนับร้อยปี แต่จะมีความเสี่ยงที่จุลินทรีย์ดินเกิดการดึงไนโตรเจนจากดินไปใช้ในการย่อยสลาย (N-Immobilization) จะส่งผลทำให้พืชขาดไนโตรเจนชั่วคราวแม้จะมีความเสถียรของคาร์บอนสูงก็ตาม ดังนั้นการเลือกใช้ถ่านชีวภาพไปใช้ประโยชน์เพื่อการปรับปรุงบำรุงดินในการเพิ่มศักยภาพในการดูดซับความชื้นและการใช้เป็นผู้ให้และกักเก็บธาตุอาหารของการทำหน้าที่แลกเปลี่ยนประจุบวกลบกับธาตุอาหารในดิน จำเป็นต้องเลือกชีวมวลที่ไม่ใช้ไม้เนื้อแข็ง เช่น เปลือกทุเรียน เหง้ามันสำปะหลัง และแกนข้าวโพด จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิเพราะถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 500 องศาเซลเซียส จะส่งผลต่อคุณภาพของถ่านชีวภาพของการนำไปใช้ประโยชน์ การหาจุดยุติที่เหมาะสมของอุณหภูมิในการเผาและปริมาณออกซิเจนสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพแบบไพโรไลซีสเป็นจุดสำคัญของการกำหนดสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพที่สามารถสรุปความสัมพันธ์ดัง **Table 3**

Table 3 Analysis Results of 8 Biochar Types (Slow Pyrolysis)

Variable	Trend at High Temperatures (>500 °C)	Impact on Biochar Quality
Fixed Carbon	Increases (90% for Macadamia)	High stability and resistance to degradation; carbon concentration increases as temperature rises, but biochar yield decreases.
C/N Ratio	Higher	Carbon becomes more concentrated, but high-temperature pyrolysis may reduce the quantity and availability of nitrogen
CEC	Decreases	Reduced ability to hold nutrient ions because functional groups are destroyed.
Volatile Matter	Decreases (inversely related to Fixed Carbon)	Harder to ignite but provides consistent heat

ในขณะที่ค่าความสัมพันธ์กับปริมาณเถ้า (Ash) ค่า pH และ ค่า EC โดยเฉพาะในถ่านเปลือกทุเรียนที่มีค่า pH และ ค่า EC สูง ซึ่งสะท้อนถึงการสะสมแร่ธาตุประจุบวกที่เป็นด่าง เช่น K, Ca และ Mg สูงกว่าถ่านชีวภาพอื่นๆ ในขณะที่ถ่านชีวภาพจากเปลือกแมคคาเดเมียและข้อไม้ไผ่ เป็นดัชนีชี้วัดถึงประสิทธิภาพของการกักเก็บคาร์บอนไว้ในดิน สามารถพิจารณาได้จากค่าปริมาณเถ้าส่งผลต่อค่า pH และ ค่า EC ที่บ่งชี้ถึงความเข้มข้นของปริมาณแร่ธาตุที่ไม่ระเหยและถูกเก็บไว้ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยเฉพาะปริมาณโพแทสเซียมและแคลเซียม โดยเฉพาะถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนที่มีปริมาณ pH (9.86) และ EC (5.46 dS/cm) นับว่าเป็นปริมาณที่สูงมาก ที่บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ที่สอดคล้องของปริมาณโพแทสเซียม (8.47%) แคลเซียม (1.97%) และแมกนีเซียม (0.88%) ซึ่งค่า EC ที่สูงนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณเกลือละลายได้ที่พร้อมปลดปล่อยออกมาเพื่อปรับสภาพดินกรด

สรุป

จากผลการศึกษาสามารถแบ่งกลุ่มถ่านชีวภาพตามศักยภาพในการเป็นแหล่งอาหารของพืชและจุลินทรีย์ดินได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้กลุ่มที่ 1 ศักยภาพสูงมากในการเป็นแหล่งอาหารและกิจกรรมของจุลินทรีย์ (High Nutrient & Microbial Activity) ได้แก่ถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนและเหง้ามันสำปะหลัง เพราะมีธาตุอาหารหลัก (N-P-K) และธาตุอาหารรองสูงที่สุด นอกจากนี้ยังมีอัตราส่วน C/N แคบที่สุด (17.42 - 19.05) ซึ่งเป็นระดับที่จุลินทรีย์ดินสามารถย่อยสลายและนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ช่วยกระตุ้นกิจกรรมของจุลินทรีย์และการหมุนเวียนธาตุอาหารในดิน และกลุ่มที่ 2 ศักยภาพเฉพาะด้าน ได้แก่ถ่านชีวภาพจากแกนข้าวโพด โดยเฉพาะแกนข้าวโพดโดดเด่นด้านโพแทสเซียม กำมะถัน และสังกะสี โดยมีค่า C/N ratio อยู่ในระดับปานกลาง (32-33) ซึ่งให้ความสมดุลระหว่างการปลดปล่อยธาตุอาหารและความเสถียรของคาร์บอน และกลุ่มที่ 3 ศักยภาพด้านการปรับปรุงโครงสร้างและความเสถียร ได้แก่ถ่านชีวภาพจากไม้มะขาม และไม้รวมจากระบบวนเกษตรไม้ผล และเปลือกเม็ดคาดีเมีย ที่มีปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (TOC) สูงมาก (87-96%) แต่มีธาตุอาหารหลักต่ำ และมีอัตราส่วน C/N กว้างมาก (220-275) กลุ่มนี้ไม่เน้นการเป็นแหล่งอาหารโดยตรง แต่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกักเก็บคาร์บอนในดินระยะยาวและช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินและการพังทะลายของดิน (Diacono and Montemurro, 2010; Sadeghi et al., 2016) และคุณสมบัติทาง

กายภาพของถ่านชีวภาพที่มีจุดเด่นของค่าความพรุนสูงและมีประสิทธิภาพการดูดซับน้ำได้สูงถึง 65-70% พื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพและโครงสร้างความพรุนจะเป็นการเพิ่มศักยภาพการอุ้มน้ำและการปรับปรุงโครงสร้างดินป้องกันการพังทะลายของดิน

ผลจากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่มีความพรุนสูง (โดยเฉพาะจากแกนข้าวโพดและเปลือกทุเรียนที่มีประสิทธิภาพการดูดซับน้ำสูงถึง 65–70%) สามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุดูดซับน้ำและรักษาความชื้นในดินที่เหมาะสมอย่างยิ่งกับสภาพธรณีวิทยาของจังหวัดอุตรดิตถ์ ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่มีความลาดชันสูงกว่า 35% และเผชิญกับปัญหาดินกรดจัด (pH 3.5–5.0) จากหินผาผุ ดินดาน (หิน โครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพจะช่วยลดแรงปะทะของน้ำฝน เพิ่มการกักเก็บความชื้น และสะเทินความเป็นกรดของดินแทนที่จะปล่อยให้ธาตุอาหารไหลบ่าไปตามผิวหน้าดิน และในเชิงนโยบายและแนวปฏิบัติ ผลการศึกษานี้เปรียบเสมือนฐานข้อมูลวิทยาศาสตร์อัตลักษณ์ท้องถิ่น ที่เปลี่ยนผ่านวิถีการจัดการขยะชีวมวลจากการเผาทิ้งในที่โล่ง มาสู่โมเดลเกษตรกรรมคาร์บอนต่ำ การเลือกใช้ชนิดและอัตราส่วนของถ่านชีวภาพให้สอดคล้องกับสภาพปัญหาดินเฉพาะถิ่น ไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนการใช้ปุ๋ยเคมีและเพิ่มความทนทานต่อภัยแล้ง แต่ยังเป็นการเปลี่ยนข้อจำกัดทางสภาพภูมิประเทศให้เป็นโอกาสในการสร้างระบบนิเวศการเกษตรที่ยั่งยืนและยกระดับคุณภาพชีวิตของเกษตรกรในพื้นที่วนเกษตรอย่างแท้จริง

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2567. รายงานสถานการณ์การผลิตไม้ผล ปี 2568: กรณีศึกษาจังหวัดอุตรดิตถ์. แหล่งข้อมูล: oae.go.th. ค้นเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2568.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรที่ 2 (สศท.2). 2568. การประมาณการเนื้อที่ให้ผลและผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ ไม้ผลเศรษฐกิจจังหวัดอุตรดิตถ์. พิษณุโลก: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานเกษตรจังหวัดอุตรดิตถ์. 2567. ฐานข้อมูลเกษตรกรและพื้นที่ปลูกไม้ผล GI จังหวัดอุตรดิตถ์ ปีการผลิต 2567/68. อุตรดิตถ์: กรมส่งเสริมการเกษตร.

สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2567. รายงานสรุปข้อมูลพื้นฐานด้านการเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดอุตรดิตถ์. แหล่งข้อมูล: opsmoac.go.th. ค้นเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2568.

Alloway, B. J. 1990. Heavy Metals in Soils. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Asadullah, M., M. A. Rahman, M. M. Ali, M.S. Rahman, M. A. Motin, M. B. Sultan, and M. R. Alam. 2007. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. Fuel. 86: 2514–2520.

Agegnehu, G., A. K. Srivastava, and M. I. Bird. 2017. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review. Applied Soil Ecology. 119: 156–170.

Bagreev, A., T. J. Bandosz, and D. C. Locke. 2001. Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage sludge-derived fertilizer. Carbon. 39: 1971–1979.

Chan, K. Y., L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2007. Agronomic values of Greenwaste biochar as a soil amendment. Australian Journal of Soil Research. 45: 629-634.

Chan, K.Y., L. Van Zwieten, and I. Meszaros, A. Downie and S. Joseph. 2007. Agronomic values of Greenwaste biochar as a soil amendment. Australian Journal of Soil Research. 45: 629-634.

Diacono, M., and F. Montemurro. 2010. Longterm effects of organic amendments on soil fertility: A review. Agronomy for Sustainable Development. 30: 401422.

Ding, Y., X. Y. Liu, W. X. Wu, D. Z. Shi, M. Yang, and Z. K. Zhong. 2010. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. Water Air and Soil Pollution. 213: 47-55.

Glaser, B., J. Lehmann, and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of Highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. Biology and Fertility of Soils. 35: 219-230.

Gul, S., J. K. Whalen, B. W. Thomas, V. Sachdeva, and H. Y. Deng. 2015. Physico-chemical properties and microbial responses in biocharamended soils: Mechanisms and future directions. Agriculture, Ecosystems and Environment. 206: 46–59.

Joseph, S., C. Peacocke, J. Lehmann, and P. Munroe. 2009. Developing a biochar classification and test methods. pp. 107-126. In J. Lehmann and S. Joseph (eds). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan, United Kingdom.

Jindo, K., H. Mizumoto, Y. Sawada, M. A. Sanchez-Monedero, and T. Sonoki. 2014. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. Biogeosciences. 11: 6613–6621.

Kwapinski, W., C. M. P. Byrne, E. Kryachko, P. Wolfram, C. Adley, J. J. Leahy, E. H. Novotny, and M. H. B Hayes. 2010. Biochar from biomass and waste. Waste Biomass Valor. 1: 177–189.

Lehmann, J., J. Gaunt, and M. Rondon. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: a review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 11: 403–427.

Lehmann, J., and S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann, J., Joseph S (eds) Biochar for environmental management: science and technology. Earthscan, London.

Lee, J., J. H. Jeon, J. Shin, H. M. Jang, S. Kim, M. S. Song, and Y. M. Kim. 2017. Quantitative and qualitative changes in antibiotic resistance genes after passing through treatment processes in municipal wastewater treatment plants. Science of the Total Environment. 605: 906- 914.

Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman, and B. O'Neill. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. Soil Science Society of America Journal. 70: 1719-1730.

Mukherjee, R. Lal, and A. R. Zimmerman. 2014. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. Science of the Total Environment. 487: 26-36.

Major, J., J. Lehmann, M. Rondon, and C. Goodale. 2010. Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration. Global Change Biology. 16: 1366–1379.

Mukherjee, A., and R. Lal. 2014. The Biochar Dilemma. Australian Journal of Soil Research. 52: 217-230.

Maga, R. P., and L. P. Narayan. 2023. Biochar from agricultural crop residues: Environmental, production, and life cycle assessment overview. Resources, Conservation and Recycling Advances. 19: 200173.

Maraseni, T. N. 2010. Biochar: maximising the benefits. International Journal of Environmental Studies. 67: 319–327.

Preston, C. M., and M. W. I. Schmidt. 2006. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special considera tion of boreal regions. Biogeosciences. 3: 397–420.

Roberts, K. G., B. A. Gloy, S. Joseph, N. R. Scott, and J. Lehmann. 2010. Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential. Environmental Science and Technology. 44: 827–833.

Steiner, C. 2007. Slash and char as alternative to slash and burn- Soil charcoal amendment maintain soil fertility and establish a carbon sink. Universitty of Bayreuth, Germany Steiner, 2007).

Schmidt, M. W. I., and A. G. Noack. 2000. Black carbon in soils and sed iments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. Global Biogeochemical Cycles. 14: 777–793.

Sadeghi, S. H., Z. Hazbavi, and M. K. Harchegani. 2016. Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar. Science of The Total Environment. 541: 483–490.

Tessier, A., P. G. C. Campbell, and M. Bisso. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry. 51: 844-851.