

Received: May 16, 2025; Revised: August 6, 2025; Accepted: November 4, 2025

การเปลี่ยนวัสดุชีวมวลไม้เหลือทิ้งเป็นถ่านชีวภาพเพื่อกักเก็บคาร์บอน Conversion of waste bamboo biomass to biochar for carbon sequestration

ศิววิทย์ บัวสุวรรณ¹ และดุสิต อังธารารักษ์^{1*}
Siwawit Buasuwan¹ and Dusit Angthararuk^{1*}

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต กรุงเทพมหานคร

¹Faculty of Science and Technology, Suan Dusit University, Bangkok

*Corresponding Author E-mail Address : dusit_ang@dusit.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนวัสดุชีวมวลไม้เหลือทิ้งเป็นถ่านชีวภาพโดยกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอน โดยทำการสร้างเตาเผาไพโรไลซิสอย่างง่ายร่วมกับชุมชน พบว่า สามารถเปลี่ยนวัสดุชีวมวลเป็นถ่านชีวภาพได้ร้อยละ 30.21±2.24 ถ่านชีวภาพที่ได้มีพื้นผิวคล้ายรังผึ้งมีรูพรุนจำนวนมาก มีคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 73.65 และ 14.46 ตามลำดับ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และออกซิเจนต่อคาร์บอน มีค่าเท่ากับ 0.06 และ 0.38 ตามลำดับ ส่งผลต่อการคงอยู่ของถ่านชีวภาพมากกว่า 100 ปี นอกจากนี้ เตาเผาถ่านชีวภาพมีขนาดเล็กและสร้างได้ง่าย ไม่ก่อให้เกิดควัน มีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย ใช้เวลาในการผลิตไม่นาน และเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ วัสดุชีวมวลไม้เหลือทิ้ง กักเก็บคาร์บอน เตาเผาถ่านไพโรไลซิส

Abstract

This research aimed to convert bamboo biomass waste into biochar by the pyrolysis process as a carbon sequestration material. A simple pyrolysis kiln was collaboratively developed with the local community. It was found that the biomass could be converted into biochar with a yield of 30.21±2.24%. The resulting biochar exhibited a honeycomb-like porous surface, with carbon and oxygen as the main components at 73.65% and 14.46%, respectively. The H/C and O/C ratios were 0.06 and 0.38, respectively, indicating that the biochar could remain stable in the environment for more than 100 years. In addition, the biochar kiln is small, easy to construct, smoke-free, low-cost, user-friendly, requires minimal production time, and is environmentally friendly.

Keywords: Biochar, Bamboo biomass waste, Carbon sequestration, Pyrolysis kiln

บทนำ

ในปัจจุบัน ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อนเป็นหนึ่งในประเด็นสิ่งแวดล้อมระดับโลกที่ส่งผลกระทบต่อทุกภาคส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) และ ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) สู่ชั้นบรรยากาศ ในประเทศไทยพบว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคเกษตรกรรมเพิ่มขึ้นจาก 41.9 เมตริกตัน คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (MtCO_2eq) ในปี ค.ศ. 2000 เป็น 50.9 MtCO_2eq ในปี ค.ศ. 2013 โดยการปล่อยส่วนใหญ่มาจากการปลูกข้าว (ร้อยละ 54.72) ตามด้วยการใช้ดินทางการเกษตร (ร้อยละ 22.95) การหมักในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ (ร้อยละ 11.79) การจัดการมูลสัตว์ (ร้อยละ 6.95) และการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรในที่โล่ง (ร้อยละ 3.59) (Pradhan et al., 2019) หนึ่งในแหล่งที่มาที่สำคัญของการปลดปล่อยก๊าซเหล่านี้คือ เศษชีวมวลเหลือทิ้ง ที่ไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม ชีวมวลเหลือทิ้งหมายถึง วัสดุอินทรีย์จากการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น ฟางข้าว เปลือกไม้ ชังข้าวโพด เศษไม้ เศษใบพืช รวมถึงเศษไม้ ซึ่งมักถูกทิ้งไว้ในไร่ ทุ่งนา ถูกเผาทำลาย หรือปล่อยให้เน่าเปื่อยตามธรรมชาติ การกำจัดในลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอนในรูปของ CO_2 และ CH_4 อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะการเผาเศษชีวมวลในที่โล่งที่ยังคงเป็นพฤติกรรมที่แพร่หลายในหลายพื้นที่ของประเทศไทย

จากการสำรวจโดยการลงพื้นที่สัมภาษณ์เชิงลึกผู้นำชุมชนไทยเวียง ในพื้นที่หมู่ที่ 1 ตำบลศรีนาวา หมู่ที่ 7 และหมู่ที่ 8 ตำบลหินตั้ง อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก ประกอบกับข้อมูลจากสำมะโนการเกษตร พ.ศ. 2566 จังหวัดนครนายก พบว่า ประชากรส่วนมากประกอบอาชีพเกษตรกรรม บางส่วนทำการตัดไม้ขายเป็นลำโดยการลัดกิ่งและตัดขนาดที่ไม่ใช้ทั้งไม้ตามพื้นที่เกษตรและแหล่งท่องเที่ยวชุมชน ทำให้เกิดความเดือดร้อนและยากลำบากในการสัญจรของนักท่องเที่ยวและคนในพื้นที่เมื่อสะสมมากขึ้นอาจเป็นสาเหตุของไฟป่าได้ เกษตรกรบางส่วนนำไม้มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ทำให้เกิด เศษวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมากในชุมชน เช่น กิ่งไม้ ใบไม้ ลำต้น และข้อต้นไม้ กลายเป็นปัญหาขยะในชุมชน เกษตรกรส่วนใหญ่นิยมเผาทำลายเพื่อความสะดวกในการกำจัดทิ้ง ส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศอย่างมาก ก่อให้เกิดปัญหาฝุ่นฟุ้งกระจาย ทำให้สูญเสียทัศนวิสัยที่ดีและมีปัญหาด้านสุขภาพแก่ชุมชนรอบข้าง เช่น ปัญหาภูมิแพ้ หอบหืด ปวดศีรษะ และทำให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก ได้แก่ PM 2.5 ซึ่งเป็นฝุ่นควันที่แสดงถึงมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาในที่โล่งแจ้ง จากข้อมูลขององค์กรด้านสิ่งแวดล้อมระดับโลกพบว่า การจัดการของเสียชีวมวลแบบไม่ยั่งยืนนี้ก่อให้เกิดการปล่อยคาร์บอนในปริมาณสูง และยิ่งสูญเสียศักยภาพในการนำของเหลือทิ้งเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ในเชิงพลังงานหรือเกษตรกรรม

พบว่ามีการศึกษาการเปรียบเทียบการเผาฟางข้าวในที่โล่งกับการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน การย่อยสลายเศษฟางข้าวแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการเผาในที่โล่ง โดยการเผาในที่โล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่า 592,032.52 กิโลกรัมต่อปี ขณะที่การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียง 122.86 กิโลกรัมต่อปี (Mothe et al., 2022)

จากเป้าหมายการพัฒนาจังหวัดนครนายก 20 ปี เป็นเมืองน่าอยู่สู่จุดหมายท่องเที่ยวที่หลากหลาย และพัฒนาเป็นแหล่งเกษตรมูลค่าสูง และกำหนดทิศทางการพัฒนาจังหวัดในระยะ 5 ปี (พ.ศ. 2566-2570) ก่อให้เกิดการพัฒนาตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน ประเด็นการพัฒนาที่ 1 ส่งเสริมการผลิตสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์แปรรูปให้มีความปลอดภัยเพื่อเพิ่มมูลค่า ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาวิธีการจัดการเศษชีวมวลที่สามารถ ลดการปลดปล่อยคาร์บอน ควบคู่ไปกับการสร้างมูลค่าเพิ่ม เช่น การแปรรูปเป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถกักเก็บคาร์บอนไว้ในรูปแบบเสถียรและมีอายุยาวนานนับร้อยปี พร้อมทั้งส่งเสริมคุณภาพของดินและลดการใช้ปุ๋ยเคมี ผู้วิจัยจึงทำการศึกษารูปแบบการเปลี่ยนเศษชีวมวลไม้เหลือทิ้งเป็นถ่านชีวภาพโดยกระบวนการไพโรไลซิส จากเตาเผาชุมชนอย่างง่าย

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

เศษวัสดุจากงานหัตถกรรมไม้ไผ่ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพ ได้ถูกรวบรวมจากพื้นที่ท้องถิ่นบริเวณ ตำบลหินตั้ง อำเภอเมืองนครนายก จังหวัดนครนายก (ละติจูด $14^{\circ}15'03''\text{N}$ ลองจิจูด $101^{\circ}18'18''\text{E}$) โดยมีภารกิจจัดสิ่งสกปรก ทราบ และวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากผิวหน้าของตัวอย่างเศษไม้ไผ่ และจากนั้นจึงนำไปตากแดดให้แห้งเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ (ความชื้นร้อยละ 5-10)

การผลิตถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่เหลือทิ้ง โดยใช้เตาเผาแบบถังเหล็กขนาด 200 ลิตร หาได้ในท้องถิ่นทำให้สามารถผลิตได้ในต้นทุนต่ำและใช้งานได้ง่าย เหมาะสำหรับเกษตรกรในพื้นที่ เตาเผาแบบถังเหล็กนี้อ้างอิงการออกแบบจาก O'Toole (2013) และได้มีการปรับปรุงเพิ่มเติม โดยการเจาะช่องระบายอากาศที่ด้านล่างและบริเวณส่วนบน รวมถึงการใช้ถังเหล็กขนาด 100 ลิตรเป็นปล่องควันเพื่อเพิ่มการไหลเวียนของอากาศ

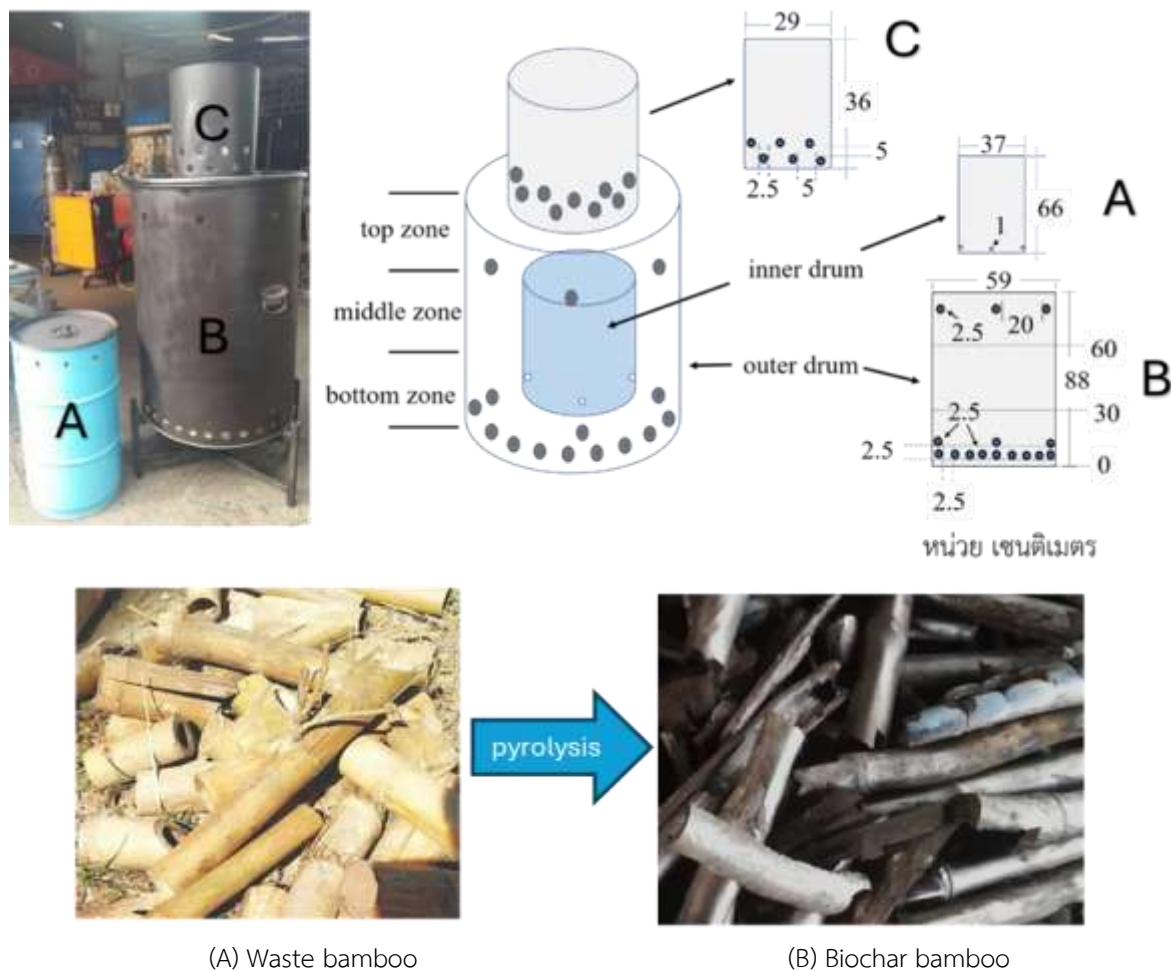


Figure 1 Simplified pyrolysis kiln for biochar production

จาก Figure 1 นำวัสดุไม้ไผ่ประมาณ 18-20 กิโลกรัม บรรจุลงในภาชนะขนาดเล็ก (A) ซึ่งมีความสูง 0.66 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.37 เมตร จากนั้นปิดฝาภาชนะให้สนิทเพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส ภาชนะขนาดเล็ก (A) นี้ถูกวางกลับหัวลงในภาชนะขนาดใหญ่ (B) ซึ่งมีความสูง 0.88 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.59 เมตร นำเศษไม้ไผ่จำนวน 20 กิโลกรัม ใส่ลงในช่องว่างระหว่างภาชนะทั้งสอง เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนแก่ภาชนะด้านในถังเหล็ก (C) ถูกนำมาครอบด้านบนเพื่อช่วยเพิ่มการไหลเวียนของอากาศในระหว่างการไพโรไลซิส อุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ตำแหน่ง 3 จุด ในแต่ละโซน 3 โซนของห้องเผาภายนอก ถูกวัดโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์อินฟราเรดแบบไม่สัมผัส (รุ่น MESTEK IR01D) ซึ่งวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลาง Bottom zone (15 เซนติเมตรจากฐาน) ตำแหน่ง Middle zone (45 เซนติเมตรจากฐาน) และตำแหน่ง Top zone (74 เซนติเมตรจากฐาน) โดยวัดห่างจากเตาเผา ระยะ 2 เมตร ผลผลิตของถ่านชีวภาพถูกคำนวณโดย (Eq.1)

$$\text{ผลผลิต (\% โดยน้ำหนัก)} = \frac{\text{น้ำหนักของถ่านชีวภาพ (kg)}}{\text{น้ำหนักของเศษวัสดุไผ่ (kg)}} \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

หลังจากที่เศษไม้ผืนในภาชนะด้านนอกเผาหมดแล้ว (ใช้เวลาประมาณ 60 นาที) จึงปล่อยให้เย็นลง จากนั้นถ่านชีวภาพที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีต่อไป

การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้น (Proximate analysis) ได้แก่ การวิเคราะห์หาปริมาณ ความชื้น (Moisture) เถ้า (Ash) สารระเหย (Volatile matter) และ คาร์บอนคงเหลือ (Fixed carbon) โดยอ้างอิงการปรับเปลี่ยนวิธีจากงานของ (Aller et al., 2017)

ความชื้นของถ่านชีวภาพ (BB) วัดจากการสูญเสียน้ำหนักหลังให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในเตาอบลมร้อน (ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี) ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน (N₂)

สารระเหย (Volatile Matter, VM) ของถ่านชีวภาพ (จากตัวอย่างเดียวกัน) โดยนำตัวอย่างใส่เข้าหลอมที่มีฝาเซรามิก ปิด และวางไว้ในกล่องสแตนเลส จากนั้นให้ความร้อนในเตาเผาชนิดมuffle (Muffle furnace รุ่น THERMCONCEPT Ht40 Al ประเทศเยอรมนี) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 950°C คงไว้ 10 นาที โดยเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 2°C ต่อนาที

ปริมาณเถ้า (Ash content) ของถ่านชีวภาพ วัดจากการสูญเสียน้ำหนักหลังให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเดียวกันในเตาเผาเดียวกัน ภายใต้บรรยากาศอากาศที่อุณหภูมิ 730°C เป็นเวลาข้ามคืน (8-10 ชั่วโมง) หลังจากการเผาเถ้า เตาจะถูกปิดแล้วปล่อยให้เย็นก่อนนำตัวอย่างไปเก็บในเครื่องดูดความชื้น (Desiccator)

ค่าของความชื้น (%Moisture) สารระเหย (%VM) และเถ้า (%Ash) คำนวณจาก (Eq.2) (Eq.3) และ (Eq.4) ตามลำดับ

$$\% \text{Moisture} = \left(\frac{w_i - w_d}{w_i} \right) \times 100 \quad (\text{Eq.2})$$

$$\% \text{VM} = \left(\frac{w_d - w_v}{w_d} \right) \times 100 \quad (\text{Eq.3})$$

$$\% \text{Ash} = \left(\frac{w_a}{w_d} \right) \times 100 \quad (\text{Eq.4})$$

โดยที่:

w_i = น้ำหนักเริ่มต้นของถ่านชีวภาพ (กรัม)

w_d = น้ำหนักหลังการอบแห้งที่ 110°C

w_v = น้ำหนักหลังการให้ความร้อนที่ 950°C

w_a = น้ำหนักของตัวอย่างหลังการเผาที่อุณหภูมิ 730°C ข้ามคืน

คาร์บอนคงเหลือ (Fixed Carbon, %FC) คือคาร์บอนที่ยังคงอยู่ในถ่านชีวภาพ หลังจากความชื้น สารระเหย และเถ้า ถูกขจัดออกไปแล้วดัง (Eq.5)

$$\% \text{FC} = 100\% - (\% \text{Moisture} - \% \text{VM} - \% \text{Ash}) \quad (\text{Eq.5})$$

การหาองค์ประกอบของธาตุ (Elemental analysis) ในการหาสัดส่วนของธาตุ C, H, N และ O จากถ่านชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ใช้เครื่อง LECO CHNS model 932 elemental analyzer (วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย) โดยค่าของออกซิเจน (O) คำนวณได้จากผลต่างร้อยละของธาตุ (by difference)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถ่านชีวภาพวัดด้วยเครื่องวัด pH แบบตั้งโต๊ะรุ่น Starter 3100 ของ Ohaus โดยนำตัวอย่าง ถ่านชีวภาพน้ำหนัก 2 กรัม ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นเขย่าส่วนผสมด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) และ กรอง หลังจากนั้นจึงนำ สารกรอง (Filtrate) ไปทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) และ เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDS) ใช้วิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่างได้อย่างเฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นวิธีการโดยตรงในการสังเกต โครงสร้างพื้นผิว และการกระจายตัวของแร่ธาตุ ในถ่านชีวภาพ โดยใช้เครื่อง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-6610 LV (ผลิตโดย JEOL Ltd., Tokyo, Japan) โดยใช้แรงดันเร่ง 20 กิโลโวลต์ (kV) ในขณะเดียวกัน

องค์ประกอบทางเคมีของธาตุบนพื้นผิว ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค การวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDS) โดยใช้เครื่อง Oxford instrument X-Max ขนาด 20 mm² (ประเทศอังกฤษ)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของชีวมวลไม้ไผ่และถ่านชีวภาพ ใช้เทคนิค ATR-FTIR (Attenuated Total Reflection - Fourier Transform Infrared Spectroscopy) โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ FTIR รุ่น IR Tracer-100 (Shimadzu) โดยใช้อุปกรณ์เสริม ATR ที่มีปริซึมทำจากซิงค์ซีลีไนต์ (ZnSe) ทำการสแกน 40 ครั้ง ใช้ช่วงความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 4,000 ถึง 500 cm⁻¹ ที่ความความละเอียด 4 cm⁻¹ โดยจะมีการเก็บข้อมูลพื้นหลังก่อนการวัดทุกครั้ง ตำแหน่งของแถบการดูดกลืนจะถูกวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ LabSolutions IR control

ผลการวิจัย

จากการสร้างเตาเผาชุมชนอย่างง่าย และทำการเผาพร้อมกับชุมชนไทยเวียง จังหวัดนครนายก โดยทำการจุดไฟจากด้านบนเตา เมื่อไฟติดจึงทำการนำปล้องสวมนบนเตาเพื่อดูดอกาศให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้ระยะเวลาทำการเผา 1 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นปล่อยให้เตาคลายความร้อนโดยยังไม่เปิดฝาด้านใน 3-4 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพ ร้อยละ 27.68-33.14 แสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณการดัง Table 1

Table 1 Estimation of biochar quality from kiln production

Properties	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Mean±SD
Raw bamboo weight (kg)	17.50	18.10	17.70	-
Biochar weight (kg)	5.80	5.40	4.90	-
Biochar yield (%)	33.14	29.83	27.68	30.21±2.24
Fixed carbon content (%)	74.10	76.60	77.70	76.13±1.84
Moisture content (%)	8.60	7.40	6.20	7.40±1.20
Ash content (%)	9.20	7.50	6.70	7.80±1.27
pH	9.20	8.70	8.10	8.67±0.55

Note : Values represent the mean±SD (n=3), Means in the column are not significantly different.

นำถ่านชีวภาพวิเคราะห์พื้นผิวลักษณะทางสัณฐานวิทยา ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ การวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์แบบกระจายพลังงาน (EDS) แสดงไว้ใน Figure 2 พบลักษณะสัณฐานของถ่านชีวภาพอย่างชัดเจน โดยมีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ รูปร่างเป็นท่อ พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ และมีขอบคม พร้อมกับช่องว่างที่มีรูพรุนประมาณ 20-40 ไมโครเมตร กระจายอยู่บนผิวของไบโอชาร์ นอกจากนี้ เมื่อขยายภาพที่กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่า มีไมโครพอร์ (Micropore) อยู่ภายในเมโซพอร์ (Mesopore) ดังแสดงใน Figure 2c ใน Figure 2a พบว่า บริเวณหน้าตัดของถ่านชีวภาพ แสดงโครงสร้างของเมโซพอร์ที่กระจายอยู่ทั่วผิวของไบโอชาร์ และลักษณะของรูพรุนที่ผิวมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb-like structure) ผลจากภาพ SEM ของถ่านชีวภาพสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนได้รับอิทธิพลจากปริมาณน้ำและธาตุอาหารที่ไบโอชาร์สามารถกักเก็บไว้ได้ (Hernández-Mena et al., 2014) การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดย EDS ดังแสดงใน Figure 2d ระบุว่าธาตุหลักที่พบในถ่านชีวภาพ คือ คาร์บอน (C) ร้อยละ 73.65 และออกซิเจน (O) ร้อยละ 14.46 นอกจากนี้ ยังตรวจพบแร่ธาตุอื่น ๆ ได้แก่ ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ คลอรีน และโพแทสเซียม ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวบ่งชี้ว่า คาร์บอนเป็นโครงสร้างหลักร่วมกับออกซิเจนในถ่านชีวภาพ ซึ่งอาจได้รับอิทธิพลจากสารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (-COOH) ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอเนต (-CO₃²⁻) ฟอสเฟต (-PO₄³⁻) หรือซัลเฟต (-SO₄²⁻)

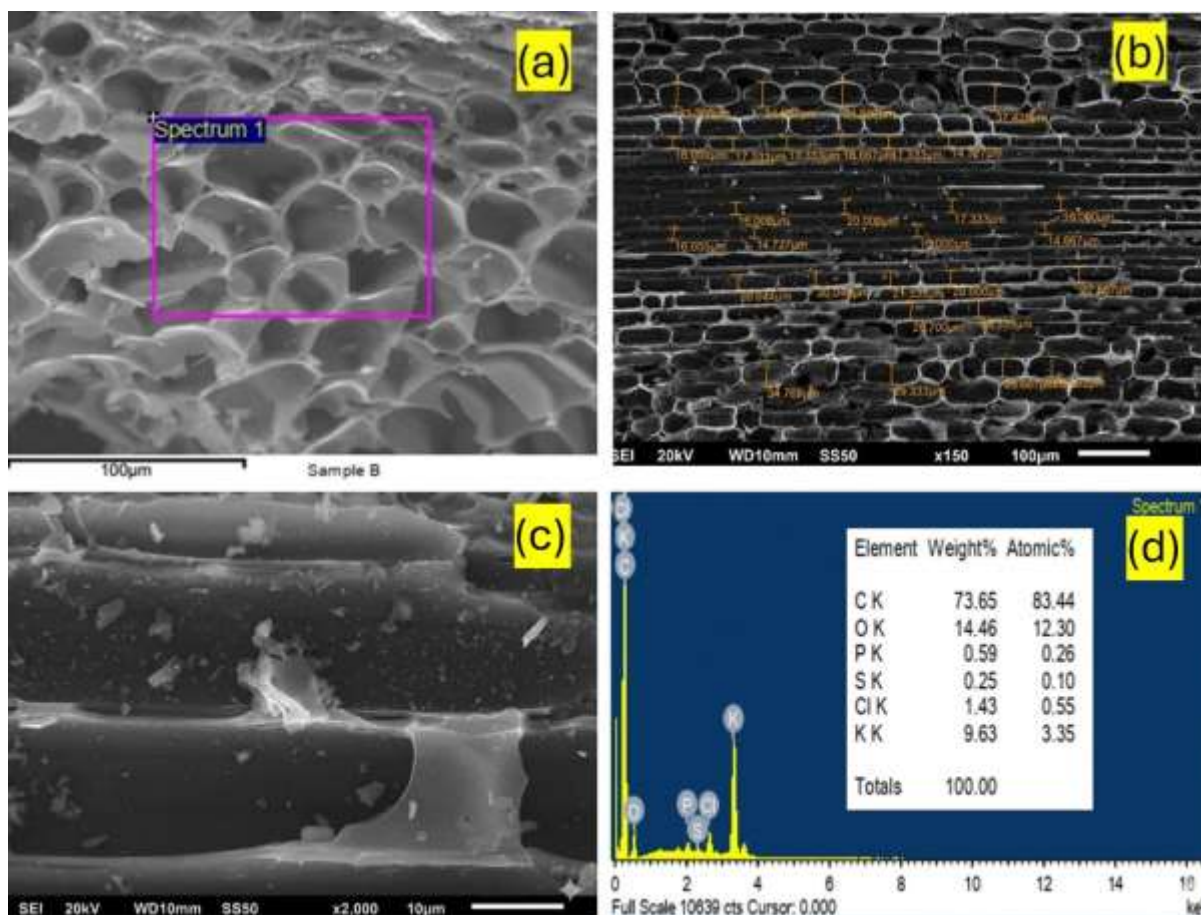


Figure 2 SEM micrographs and EDS spectra of the bamboo biochar surface and elemental composition

Table 2 Elemental composition (CHN/O) of biochar in weight percentage (wt.%)

Element	Weight percentage
Carbon (C)	68.42±3.01
Hydrogen (H)	4.37±0.12
Nitrogen (N)	0.62±0.07
Oxygen (O)	26.59
H/C	0.06
O/C	0.38

Note : Weight percentage values are the mean±SD (n=3), Means in the column are not significantly different.

Table 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ CHN/O สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ โดยอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ใช้เป็นดัชนีความเป็นอะโรมาติก (Aromaticity index) เพื่อประเมินระดับการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเคมีที่ทำให้เกิดโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกที่หลอมรวมกันในไบโอชาร์ ขณะที่อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ใช้เป็นดัชนีความชอบน้ำ (Hydrophilicity index) ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเสถียรของไบโอชาร์ ในกระบวนการไพโรไลซิส ธาตุคาร์บอนไฮโดรเจน และออกซิเจนจะถูกปล่อยออกมาในรูปของก๊าซและสารระเหยต่าง ๆ ส่งผลให้อัตราส่วน H/C และ O/C ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของความเป็นอะโรมาติกและปริมาณคาร์บอนที่สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น (Windeatt et al., 2014) อัตราส่วน H/C และ O/C ที่ต่ำกว่าจะบ่งชี้ถึงโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกที่หลอมรวมกันมากขึ้นและความเสถียรของส่วนที่เป็นคาร์บอนสูงขึ้น (Fernandes et al., 2020) ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า อัตราส่วน H/C และ O/C ของถ่านชีวภาพอยู่

ที่ 0.06 และ 0.38 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงปริมาณคาร์บอนที่สูงและความเสถียรในโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกที่มากขึ้น ซึ่งสามารถคงอยู่ในดินได้นานอย่างน้อย 100 ปี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Spokas (2010) ที่แสดงว่าอัตราส่วน O/C ในช่วง 0.2-0.6 หมายความว่าถ่านชีวภาพสามารถคงอยู่ในดินได้ระยะเวลาประมาณ 100-1000 ปี

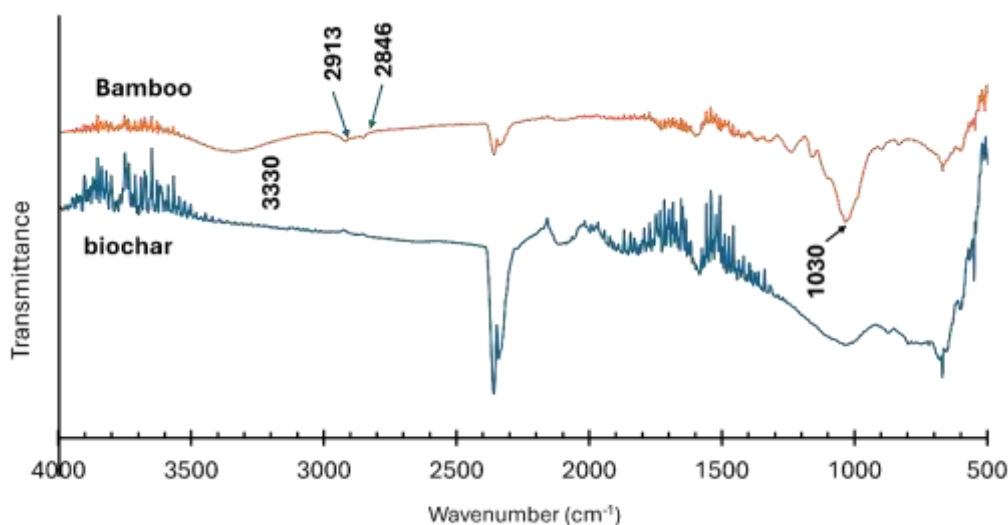


Figure 3 ATR-FTIR spectra of bamboo and biochar

สเปกตรัม ATR-FTIR ของชีวมวลและไบโอชาร์แสดงใน Figure 3 วัสดุลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic materials) ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยแสดงแถบการดูดกลืนกว้างระหว่างช่วง 3,500-3,000 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของหมู่ O-H และ N-H ของพินอลและแอมมีน รวมถึงการยึดตัวแบบสมมาตรของพันธะ C-H ที่ตำแหน่ง 2,913 และ 2,846 cm^{-1} (Qin et al., 2020) ในถ่านชีวภาพได้จากไม้ไผ่ พบว่าแถบในช่วง 3,000-3,500 cm^{-1} หายไป ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดน้ำ (Dehydration) และออกซิเจน (De-oxygenation) อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 600°C ซึ่งบ่งบอกว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วลดลง (Ramola et al., 2014) สเปกตรัมช่วง 1,600 ถึง 400 cm^{-1} แสดงถึงการสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในถ่านชีวภาพจากการสลายตัวของชีวมวลไม้ โดยจะพบพีกที่ตำแหน่ง 1,600 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับโหมดการสั่นของพันธะ C=C และ C=O ในโครงสร้างวงแหวนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน (Nair et al., 2020) พีกที่ตำแหน่ง 1,030 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นแบบยึดของพันธะ C-OH หรือ C-O-C ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (El-Sakhmed et al., 2018) พีกการหักงอของพันธะ C-H (นอกระนาบ) ในช่วง 900-675 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของรูปแบบการแทนที่ของวงแหวนอะโรมาติก พบเห็นได้ชัดในถ่านชีวภาพ พีกที่ประมาณ 1,000 cm^{-1} สามารถระบุว่าเป็นการสั่นของพันธะ C-O ของหมู่แอลกอฮอล์และเอสเทอร์ (Guizani et al., 2017)

การอภิปรายผล

จากการวิจัยการผลิตถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่เหลือทิ้ง พบว่าผู้สูงอายุในพื้นที่ที่จะทำการเผาไม้เป็นซีกขาย และกลุ่มตัดลำไม้ขาย ในการประกอบอาชีพกลับส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือการเกิดของเหลือทิ้งจำนวนมาก เป็นเศษไม้บริเวณโคนต้นไม้ เนื้อไม้หนามากผู้ประกอบการจะตัดแล้วทิ้งในพื้นที่ การย่อยสลายในธรรมชาติค่อนข้างนาน ซึ่งในพื้นที่บนเขาทางกรมอุทยานสั่งห้ามเผาไม้ทุกกรณี ทำให้เกิดการสะสมมากขึ้นเรื่อย ๆ การปล่อยทิ้งจะเกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติเกิดก๊าซส่งผลต่อโลกร้อน (Zhang et al., 2017; Al-Ghussain, 2019) ถ้าชุมชนเริ่มตระหนักถึงสิ่งที่จะเกิดขึ้น การจัดการที่อาจเป็นทางเลือกให้เกิดการเพิ่มมูลค่าเศษไม้ในรูปแบบต่าง ๆ กระบวนการที่ง่ายคือการแปรวัสดุชีวภาพเหลือทิ้งเป็นถ่านชีวภาพ ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่น นำไปปรับสภาพดินเพื่อเพิ่มผลผลิต (Kätterer et al., 2019; Song et al., 2019) การใช้ถ่านชีวภาพจากไฟในการเพิ่มผลผลิตข้าว (Hemwong, 2014) รวมถึงการนำวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มาเปลี่ยนสภาพให้เป็นถ่านชีวภาพ เพื่อใช้ในการปรับปรุงดินเป็นประโยชน์ต่อภาคการเกษตร และเป็นการกักเก็บคาร์บอนลงดิน ช่วยลดก๊าซ

เรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะโลกร้อน ซึ่งเทคโนโลยีถ่านชีวภาพเป็นเทคโนโลยีลดคาร์บอน ผลิตถ่านชีวภาพ กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนหรือเรียกว่า ไพโรไลซิส (Pyrolysis) จะได้น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ร้อยละ 60 ก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) ได้แก่ H_2 , CO และ CH_4 รวมกัน ร้อยละ 20 และเป็นถ่านชีวภาพ ร้อยละ 20 ซึ่งถ่านชีวภาพที่ได้จะมีสมบัติเป็นรูพรุน และประกอบด้วยธาตุ C, H, O, N, S และซีเล้า โครงสร้างจะเปลี่ยนไปตามประเภทของชีวมวล โดยเฉพาะธาตุคาร์บอนที่อยู่ในชีวมวลทั้งหมดจะเปลี่ยนมาอยู่รูปของถ่านชีวภาพ ร้อยละ 50 และเมื่อถ่านชีวภาพถูกนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรมหรือนำมาลงดิน คาร์บอนจะถูกกักเก็บลงดินแทนการแพร่กระจายสู่ชั้นบรรยากาศ จากการทบทวนเอกสาร พบว่า ถ่านชีวภาพมาเผาจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วเหลือคาร์บอนเพียง ร้อยละ 3 ขณะที่การย่อยสลายโดยธรรมชาติเมื่อเวลาผ่านไปแล้ว 5-10 ปี จะเหลือคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 20 (Lehmann & Rondon, 2006) การเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่านชีวภาพ เป็นกลไกที่ช่วยยืดเวลาการปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจ

การเปลี่ยนชีวมวลเหลือทิ้งไปเป็นถ่านชีวภาพ ต้องคำนึงถึงบริบทของแต่ละท้องถิ่น ที่ผู้สูงอายุสามารถที่จะทำการเผาถ่านได้เพียงลำพัง สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ถังเหล็ก 200 ลิตร ซึ่งสามารถสร้างได้ง่าย ชุมชนสามารถสร้างเตาเผาถ่านชีวภาพได้เอง เคลื่อนย้ายได้สะดวก ราคาถูก ใช้เวลาในการเผาถ่านไม่นาน ถ่านที่ได้มีคุณภาพสูง ซึ่งเป็นจุดเด่นของกระบวนการเปลี่ยนวัสดุชีวมวลไม้เหลือทิ้งเป็นถ่านชีวภาพ อีกทั้งสามารถที่ประยุกต์ใช้สำหรับเผาขยะอื่น ๆ ได้ด้วย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพคุณภาพสูง ในกระบวนการเผาอุณหภูมิในการเผาจะสูงขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ช่วงแรกจะเปิดอากาศให้ไหลเข้าไปในปริมาณมากเพื่อทำให้เกิดการจุดติดของเปลวไฟ เมื่อเปลวไฟติดในท้องเผาไหม้ด้านบนแล้วเริ่มลามลงสู่ด้านล่างของเตา จะทำการปิดการเข้าของอากาศลงกึ่งหนึ่ง กระบวนการจัดเรียงไม้เป็นเชื้อเพลิงเป็นอีกหนึ่งปัจจัย ต้องเรียงแบบเรียงขั้นขนาดใหญ่มาก่อนโดยเรียงทำมุมโดยประมาณ 80 องศา เพื่อเพิ่มการไหลเวียนของอากาศภายในเตาเผาอย่างทั่วถึง ผลที่ได้พบว่าเวลาการเผาไหม้นานขึ้น อุณหภูมิอยู่ในระดับสูง ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพร้อยละ 30.21 ± 2.24 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 73.65 จากผลการวิเคราะห์ธาตุ อัตราส่วนของ H/C และ O/C บ่งบอกถึงการกักเก็บคาร์บอนในดิน จากการทดลองถ่านชีวภาพที่ได้จะมีอายุมากกว่า 100 ปี (Fernandes et al., 2020) ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของถ่านชีวภาพจากวัสดุชีวมวลไม้เหลือทิ้ง ในอนาคตอาจก่อให้เกิดตลาดคาร์บอนเครดิตจากกระบวนการกักเก็บคาร์บอนลงดิน สร้างรายได้เสริมจากควบคู่การดูแลสิ่งแวดล้อม

บทสรุป

จากการเปลี่ยนชีวมวลไม้เหลือทิ้งเป็นถ่านชีวภาพโดยเตาเผาชุมชน ให้ร้อยละผลผลิต 30.21 ± 2.24 มีคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 73.65 และ 14.46 ตามลำดับ ลักษณะพื้นฐานพื้นผิวคล้ายรังผึ้ง อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และ ออกซิเจนต่อคาร์บอน 0.06 และ 0.38 ตามลำดับ ถ่านชีวภาพที่มีคุณสมบัติเหมาะสม (เช่น มีอัตราส่วน H/C ต่ำกว่า 0.1 และ O/C ต่ำกว่า 0.4) สามารถคงคาร์บอนไว้ในดินได้นานนับศตวรรษเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกที่ทนทานต่อการย่อยสลาย ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดคาร์บอนในบรรยากาศได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการปล่อยชีวมวลสลายแบบธรรมชาติ (ซึ่งปล่อย CO_2 และ CH_4) การผลิตถ่านชีวภาพช่วย “ดักจับ” คาร์บอนจากชีวมวลไว้ในรูปแบบของแข็ง สำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มความสามารถในการกักเก็บน้ำ ปุ๋ย และจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ ส่งผลดีต่อการเกษตรและลดความต้องการใช้ปุ๋ยเคมีและเป็นหนึ่งในกลยุทธ์ที่ได้รับการยอมรับจาก IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ในการลดโลกร้อน รองรับระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยเปลี่ยนเป็นวัสดุที่มีประโยชน์ เตาเผาถ่านไพโรไลซิสอย่างง่ายสามารถสร้างได้โดยชุมชน สะดวก ประหยัด และปลอดภัย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือในการทำงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสวนดุสิตให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณชุมชนไทยเวียงที่เอื้อเฟื้อสถานที่และร่วมช่วยพัฒนางานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Al-Ghussain, L. (2019). Global warming: review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(1), 13-21. <https://doi.org/10.1002/ep.13041>
- Aller, D., Bakshi, S., & Laird, D. A. (2017). Modified method for proximate analysis of biochars. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.01.012>
- El-Sakhawy, M., Kamel, S., Salama, A., & Tohamy, H. A. S. (2018). Preparation and infrared study of cellulose based amphiphilic materials. *Journal of Cellulose Chemistry Technology*, 52(3-4), 193-200.
- Fernandes, B. C. C., Mendes, K. F., Dias Júnior, A. F., da Silva Caldeira, V. P., da Silva Teófilo, T. M., Severo Silva, T., & Silva, V. D. (2020). Impact of pyrolysis temperature on the properties of eucalyptus wood derived biochar. *Materials*, 13(24), Article 5841. <https://doi.org/10.3390/ma13245841>
- Guizani, C., Jeguirim, M., Valin, S., Limousy, L., & Salvador, S. (2017). Biomass chars: The effects of pyrolysis conditions on their morphology, structure, chemical properties and reactivity. *Energies*, 10(6), Article 796. <https://doi.org/10.3390/en10060796>
- Hemwong, S. (2014). Effects of bamboo and rice husk biochars on yield and nitrogen use efficiency of Chainat 1 rice variety. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 16(1), 69-75. (In Thai)
- Hernandez-Mena, L. E., Pécoraa, A. A., & Beraldob, A. L. (2014). Slow pyrolysis of bamboo biomass: analysis of biochar properties. *Chemical Engineering Transactions*, 37, 115-120. <https://doi.org/10.3303/CET1437020>
- Kätterer, T., Roobroeck, D., Andrén, O., Kimutai, G., Karlton, E., Kirchmann, H., & De Nowina, K. R., (2019). Biochar addition persistently increased soil fertility and yields in maize-soybean rotations over 10 years in sub-humid regions of Kenya. *Field Crops Research*, 235, 18-26.
- Lehmann, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. In N. Uphoff (Ed.), *Biological approaches to sustainable soil systems* (pp. 517–530). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420017113.ch36>
- Mothe, S., Polisetty, V. R., Sridhar, P., Surampalli, R. Y., Zhang, T. C., Tyagi, R. D., Bhunia, P. (2022). Comparison of GHG emissions from open field burning and anaerobic digestion of rice straw. *Environmental Technology*, 1-11. <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2153749>
- Nair, R. R., Mondal, M. M., & Weichgrebe, D. (2020). Biochar from co-pyrolysis of urban organic wastes investigation of carbon sink potential using ATR-FTIR and TGA. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10(3), 1-15.
- O'Toole, A., Knott de Zaruk, K., Steffens, M., & Rasse, D. P. (2013). Characterization, stability, and plant effects of kiln-produced wheat straw biochar. *Journal of Environmental Quality*, 42(2), 429-436. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0163>

- Pradhan, B. B., Chaichaloempreecha, A. & Limmeechokchai, B. (2019). GHG mitigation in Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) sector in Thailand. *Carbon Balance Manage*, 14, Article 3 <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0119-7>
- Qin, L., Wu, Y., Hou, Z., & Jiang, E. (2020). Influence of biomass components, temperature and pressure on the pyrolysis behavior and biochar properties of pine nut shells. *Bioresource Technology*, 313, Article 123682. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123682>
- Ramola, S., Mishra, T., Rana, G., & Srivastava, R. K. (2014). Characterization and pollutant removal efficiency of biochar derived from bagasse, bamboo and tyre. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(12), 9023-9039. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4062-5>
- Song, Y., Li, Y., Cai, Y., Fu, S., Luo, Y., Wang, H., Liang, C., Lin, Z., Hu, S., Li, Y., & Chang, S. X. (2019). Biochar decreases soil N₂O emissions in Moso bamboo plantations through decreasing labile N concentrations, N-cycling enzyme activities and nitrification/denitrification rates. *Geoderma*, 348, 135–145.
- Spokas, K. A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 1(2), 289-303. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.32>
- Windeatt, J. H., Ross, A. B., Williams, P. T., Forster, P. M., Nahil, M. A., & Singh, S. (2014). Characteristics of biochars from crop residues: potential for carbon sequestration and soil amendment. *Journal of Environmental Management*, 146, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.003>
- Zhang, X., Gao, B., Zheng, Y., Hu, X., Creamer, A. E., Annabled, M. D., & Li, Y. (2017). Biochar for volatile organic compound (VOC) removal: Sorption performance and governing mechanisms. *Bioresource Technology*, 245, 606-614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.025>