บทความวิจัย (Research article)

ปริมาณผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็ก โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า

Product Yield and Characterization of Biochar from Senna Siamea via Slow Pyrolysis Process

ณภัทร อาวะแสง[1] พีรพัฒน์ คำชูราษฎร์[1] จุฑามาศ พะโนราช[1] สายัญ พันธ์สมบูรณ์[1],
ปิยะฉัตร วิริยะอำไพวงศ์[1] อัดชา เหมันต์[2] ภัคคิป ไกรโสดา[2] หอมหวน ตาสาโรจน์[2] และ โกศล เรืองแสน[2*]
Napat Arwasang[1], Peeraphat Khamchoorat[1], Jutamas Panorah[1], Sayun Phansomboon[1],
Piyachat Wiriyaampaiwong[1], Adcha Heman[2], Pakkip Kraisoda[2], Homhuan Tasarod[2] and Koson Rueangsan[2*]

[1]คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[1]Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University
[2]Faculty of Engineering and Industrial, Kalasin University
*Corresponding author; email: ruangsan_19@hotmail.com

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
24 มีนาคม 2569	21 สิงหาคม 2569	24 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาด 200 ลิตร ภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจน และควบคุมอุณหภูมิการไพโรไลซีสอยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพ แก๊ส และน้ำส้มควันไม้ มีค่าเท่ากับร้อยละ 46.15, 52.54 และ 1.31 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพ พบว่า ค่าความชื้นร้อยละ 2.47 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 14.11 ปริมาณเถ้าร้อยละ 4.63 คาร์บอนคงที่ร้อยละ 78.79 โดยน้ำหนัก และค่าความร้อนสูง 26.48 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 657/2547) นอกจากนั้นยังพบว่าอัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ โดยอัตราการให้ความร้อนในระดับต่ำถึงปานกลางช่วยเพิ่มปริมาณถ่านชีวภาพและลดการสูญเสียคาร์บอน และถ่านชีวภาพที่ได้มีคุณภาพเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินและเชื้อเพลิง

คำสำคัญ: ชีวมวล, ถ่านชีวภาพ, ไม้ขี้เหล็ก, ไพโรไลซีแบบช้า, ค่าความร้อนสูง

Abstract

This study focused on examining the yield and characteristics of biochar derived from Siamese cassia wood via a slow pyrolysis method in a 200 L reactor under oxygen-restricted conditions at a pyrolysis temperature of 500 °C. The findings showed that the yields of biochar, gas, and wood vinegar were 46.15, 52.54, and 1.31% by weight, respectively. The analysis of the generated biochar indicated that the moisture level, volatile matter, ash percentage, fixed carbon, and higher heating value were recorded at 2.47, 14.11, 4.63, 78.79% by weight, and 26.48 MJ/kg, respectively. These characteristics met the Thai Community Product Standard for cooking charcoal (TCPS 657/2547), demonstrating the superior quality of the produced biochar. Moreover, the pyrolysis temperature and heating rate were recognized as crucial elements affecting product yield. Heating rates that are low to moderate increased biochar production while reducing carbon loss throughout the pyrolysis process. The results indicate that biochar obtained from Siamese cassia wood shows significant promise for use as a soil amendment and a substitute solid fuel for community-level purposes.

Keyword: Biomass, Biochar, Senna siamea, Slow pyrolysis, Higher heating value

บทนำ

พลังงานชีวมวลเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา เช่น ประเทศไทย ซึ่งมีทรัพยากรชีวมวลจากภาคเกษตรและป่าไม้เป็นจำนวนมาก การนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานไม่เพียงช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและป่าไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1, 2] ไม้ขี้เหล็ก (Senna siamea) เป็นไม้เนื้อแข็งที่พบกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือ และภาคกลาง มีการใช้ประโยชน์ทั้งในด้านไม้แปรรูป เชื้อเพลิง และไม้ให้ร่มเงา ส่งผลให้เกิดเศษไม้จากการตัดแต่งและการแปรรูปเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพได้อย่างต่อเนื่อง [3] ไม้ขี้เหล็กมีองค์ประกอบทางเคมีเฉลี่ยประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณร้อยละ 43–47 เฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 22–26 และลิกนินประมาณร้อยละ 28–32 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งลิกนินในสัดส่วนค่อนข้างสูงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มผลได้ของถ่านชีวภาพและปริมาณคาร์บอนคงที่หลังผ่านกระบวนการไพโรไลซีส [4, 5] กระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า (slow pyrolysis) เป็นกระบวนการแปรสภาพชีวมวลด้วยความร้อนภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจน โดยใช้อัตราการให้ความร้อนต่ำและเวลาพำนักนาน ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นถ่านชีวภาพในปริมาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไพโรไลซีสแบบเร็ว [6] ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสประกอบด้วยถ่านชีวภาพ น้ำมันชีวภาพหรือน้ำส้มควันไม้ และแก๊สเชื้อเพลิง โดยสัดส่วนของผลผลิตขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาพำนัก [7]

จากการศึกษางานวิจัยในช่วง 3 ปีที่ผ่านมา (2022–2025) พบว่า มีการศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลประเภทไม้หลายชนิดด้วยกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า โดยมีรายงานการศึกษาชีวมวลจากไม้เนื้อแข็งและการพัฒนาการผลิตถ่านชีวภาพ [8] รวมถึงการผลิตถ่านชีวภาพจากไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus spp.) [9] ขณะที่การศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซีสต่อผลได้และสมบัติทางกายภาพเคมีของถ่านชีวภาพจากชีวมวลประเภทไม้รายงานว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์และคุณภาพของถ่านชีวภาพ [10] นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาความก้าวหน้าของกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าสำหรับชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเพื่อการผลิตถ่านชีวภาพอย่างยั่งยืน [11] ผลการศึกษาที่ผ่านมาสะท้อนให้เห็นว่า ชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ตลอดจนอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และระยะเวลาพำนัก

เป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิการไพโรไลซีสทำให้ผลได้ของถ่านชีวภาพลดลง ขณะที่ผลได้ของแก๊สและของเหลวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแตกตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินมีความสมบูรณ์มากขึ้น [7, 10] ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมามีการผลิตถ่านชีวภาพจากไม้หลายชนิด แต่ข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กในเครื่องปฏิกรณ์ระดับกึ่งอุตสาหกรรมขนาด 200 ลิตร ยังมีจำกัด โดยเฉพาะข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายผลผลิตและสมบัติทางเชื้อเพลิงของถ่านชีวภาพ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตในระดับชุมชนและอุตสาหกรรม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญ (Research significance) เนื่องจากเป็นการศึกษาปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพ แก๊ส และน้ำส้มควันไม้จากไม้ขี้เหล็กภายใต้กระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร พร้อมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของถ่านชีวภาพ เพื่อสร้างฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตถ่านชีวภาพ การใช้ประโยชน์เศษไม้ในระดับชุมชน และการสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพและเศรษฐกิจหมุนเวียน (BCG Economy) ของประเทศไทย

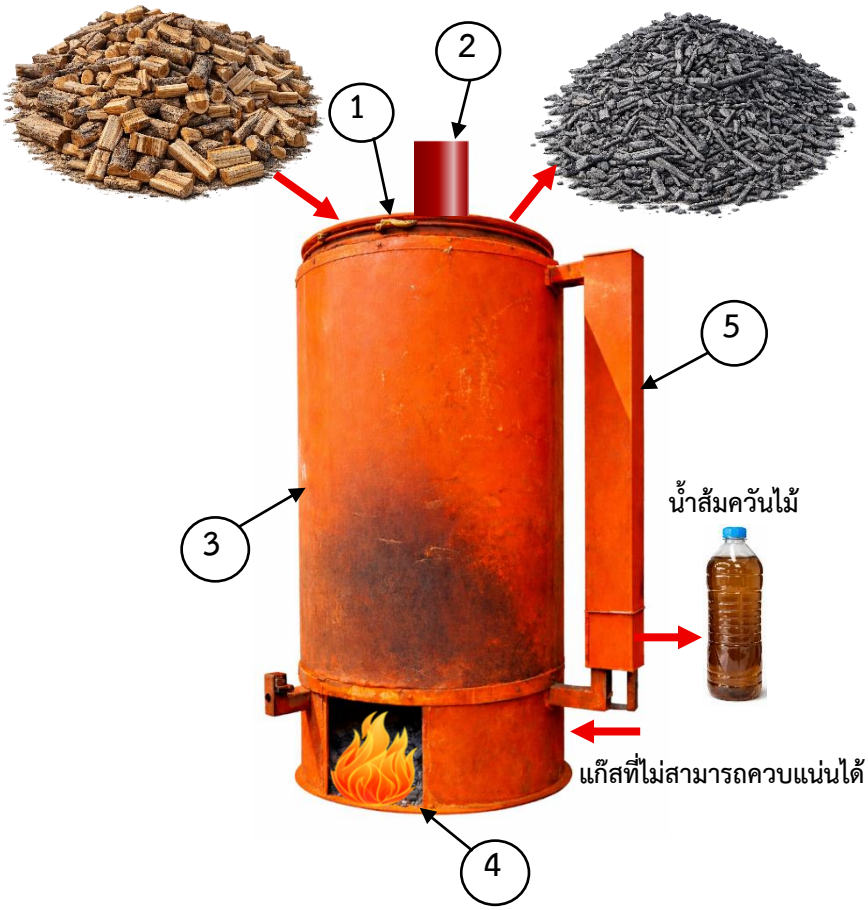
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าของไม้ขี้เหล็ก
2. เพื่อศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าของไม้ขี้เหล็ก

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การวิเคราะห์สมบัติของไม้ขี้เหล็ก ในงานวิจัยนี้ใช้ไม้ขี้เหล็กในพื้นที่มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ (16°26'48.4"N 103°32'06.7"E) โดยคัดเลือกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8-12 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ซึ่งไม้ขี้เหล็กที่ใช้ในการทดลองไพโรไลซีสจำนวน 260 กิโลกรัม จากนั้นนำตัวอย่างของไม้ขี้เหล็กทำการบดละเอียดให้มีขนาด 0.2-0.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า คาร์บอนคงที่ และค่าความร้อนสูง (HHV) ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 1

2. ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสแบบช้า ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสแบบช้าที่สร้างขึ้นที่มีขนาดความจุ 200 ลิตร ประกอบด้วย หมายเลข 1 ชุดฝาปิดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสแบบช้า มีหน้าที่ปิด-เปิดเพื่อนำถ่านไม้ฟืนเข้าและนำถ่านชีวภาพออก และป้องกันไม่ให้อากาศรั่วเข้าไปได้ในขณะเวลาเกิดการไพโรไลซีส หมายเลข 2 ท่อนำความร้อน เพื่อให้ความร้อนเกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอภายในห้องไพโรไลซีส หมายเลข 3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสเป็นห้องสำหรับให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยเคมีความร้อนของไม้ขี้เหล็กให้กลายเป็นถ่านชีวภาพ หมายเลข 4 ช่องใส่เชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีส หมายเลข 5 ชุดควบแน่นน้ำส้มควันไม้ เป็นชุดควบแน่นด้วยน้ำลักษณะท่อสองชั้น เพื่อควบแน่นแก๊สให้เป็นน้ำส้มควันไม้ ส่วนแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะถูกวนกลับไปเผาไหม้อีกครั้งในห้องเผาไหม้ รายละเอียดดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซีสแบบช้า

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นการวิเคราะห์ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์และสมบัติของถ่านชีวภาพ ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณถ่านชีวภาพ น้ำส้มควันไม้ และแก๊ส สามารถคำนวณได้ดังสมการ 1-3 [12] ดังนี้

$$Y_{biochar} = \left[\frac{\sum W_{biochar}}{W_{biomass}}\right] \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_{Wood\ Vinegar} = \left[\frac{\sum W_{Wood\ Vinegar}}{W_{biomass}}\right] \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_{gas} = 100 - Y_{biochar} - Y_{Wood\ Vinegar} \quad (3)$$

กำหนดให้

$Y_{biochar}$ = ปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

$Y_{Wood\ Vinegar}$ = ปริมาณผลได้ของน้ำส้มควันไม้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Y_{gas} = ปริมาณผลได้ของแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
$W_{biochar}$ = น้ำหนักถ่านชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลกรัม)
$W_{Wood\ Vinegar}$ = น้ำหนักของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการควบแน่น (กิโลกรัม)
$W_{biomass}$ = น้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ไป (กิโลกรัม)

3.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวลและถ่านชีวภาพ

1. ปริมาณความชื้น (Moisture content) การวเคราะห์ความชื้นดำเนินการ ตามมาตรฐาน ASTM D 3173 [13] ด้วยการใช้ตัวอย่างจำนวน 1 กรัม อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักก่อนและหลังอบ จากนั้นคำนวณหาร้อยละของความชื้น

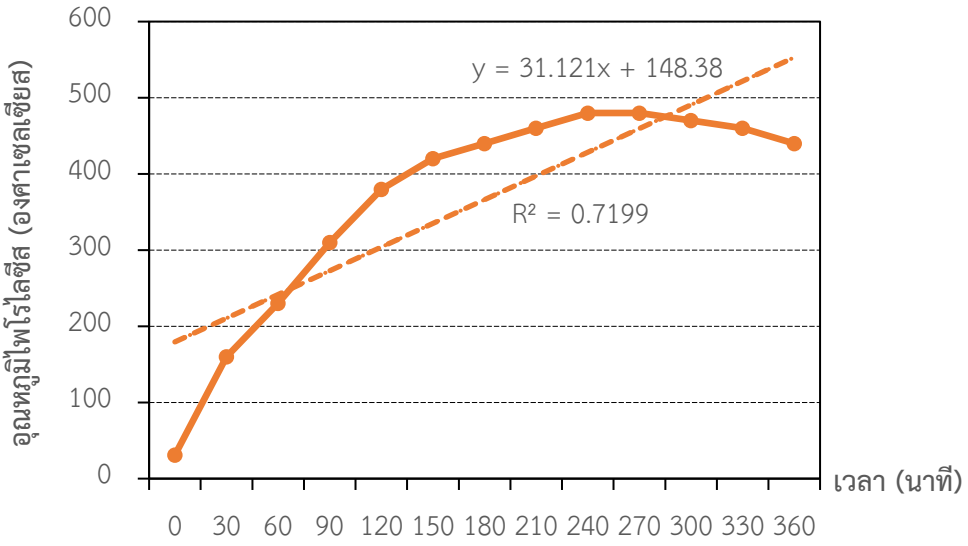
2. ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย ตามมาตรฐาน ASTM D 3175 [14] ด้วยการเผาตัวอย่างจำนวน 1 กรัม เผาในเตาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นคำนวณหาร้อยละของสารระเหย

3. ปริมาณเถ้า (Ash) การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามมาตรฐาน ASTM D 3174 [15] ด้วยการใช้ตัวอย่างจำนวน 1 กรัม เผาในเตาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณหาร้อยละของเถ้า

4. ค่าความร้อนสูง (High calorific value) การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง ตามมาตรฐาน ASTM D 5865 [16] ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์รุ่น Art.2060/2070 bomb calorimeter บริษัท Essom Co., Ltd. ประเทศไทย

ผลการวิเคราะห์การทดลอง

1. ผลการวิเคราะห์อัตราการให้ความร้อนพบว่า ในการทดลองครั้งนี้ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ โดยกำหนดอุณหภูมิสูงสุดของกระบวนการไพโรไลซีสไว้ที่ 500 องศาเซลเซียส จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา พบว่า ในช่วง 0–120 นาที อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการกำจัดความชื้นและเริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบที่ระเหยได้ของชีวมวล [6] ในช่วง 120–240 นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิลดลงอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง พร้อมกับการปลดปล่อยสารระเหยและแก๊สที่สามารถติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง โดยสภาวะการให้ความร้อนอย่างช้าและสม่ำเสมอเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอไนเซชันและการคงเหลือของคาร์บอนในรูปถ่านชีวภาพ [18] เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซีสเพิ่มขึ้น ผลได้ของถ่านมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์และปฏิกิริยาการแตกตัวทุติยภูมิ ส่งผลให้คาร์บอนบางส่วนเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สและสารระเหยมากขึ้น [17] Demirbas รายงานว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อผลได้ของถ่านจากการไพโรไลซีสของชีวมวล โดยการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ผลได้ของถ่านลดลง [17] ขณะที่ Tripathi และคณะ รายงานว่าอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาพำนักเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่กำหนดทั้งผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพ [18] นอกจากนี้ การเพิ่มความรุนแรงของสภาวะไพโรไลซีสยังส่งผลให้ถ่านมีสัดส่วนคาร์บอนคงที่และความเป็นอะโรมาติกสูงขึ้น เนื่องจากการกำจัดสารระเหยและองค์ประกอบที่มีออกซิเจนออกจากโครงสร้างของชีวมวล [6] นอกจากนั้นยังพบว่า อัตราการให้ความร้อนมีความแปรปรวนของข้อมูลอยู่ที่ร้อยละ 71.99 แสดงได้ว่าอัตราการให้ความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซีสอย่างมีนัยสำคัญ สรุปโดยรวมแล้วกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร ควรใช้อัตราการให้ความร้อนในระดับต่ำถึงปานกลาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดการสูญเสียพลังงาน และได้ถ่านชีวภาพที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานเป็นพลังงานและการปรับปรุงดิน รายละเอียดดังภาพที่ 2

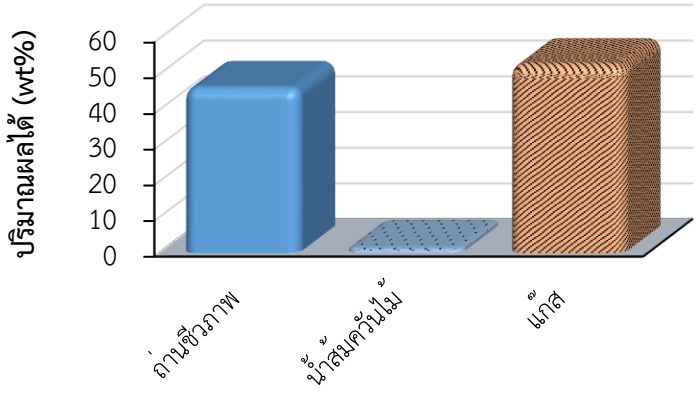


ภาพที่ 2 อัตราการให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า

2. ผลการวิเคราะห์ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

การไพโรไลซีสแบบช้าของไม้ขี้เหล็ก ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์หลัก 3 ส่วน ได้แก่ ถ่านชีวภาพ น้ำส้มควันไม้ และแก๊ส ดังภาพที่ 3 จากการทดลอง พบว่า ถ่านชีวภาพมีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 46.15 โดยน้ำหนัก ส่วนของน้ำส้มควันไม้คิดเป็นร้อยละ 1.31 โดยน้ำหนัก และส่วนที่เหลือเป็นแก๊สคิดเป็นร้อยละ 52.54 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าที่ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะเป็นของแข็งประมาณร้อยละ 40–60 โดยน้ำหนัก [6, 7] อาจเป็นผลมาจากไม้ขี้เหล็กมีปริมาณลิกนินค่อนข้างสูงและโครงสร้างของเซลลูโลสมีความคงที่ ซึ่งลิกนินมีความทนทานต่อการสลายตัวทางความร้อนมากกว่าเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสหลังเกิดการไพโรไลซีส [5] นอกจากนั้นยังพบว่า การไพโรไลซีสแบบช้าของไม้เนื้อแข็งที่มีอัตราการให้ความร้อนต่ำสม่ำเสมอและทำให้เนื้อไม้มีเวลาพักตัวที่นาน ส่งผลให้ในกระบวนการไพโรไลซีสลดการแตกตัวกลายเป็นแก๊สและทำให้ปริมาณคาร์บอนในรูปของถ่านชีวภาพมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณถ่านชีวภาพของการไพโรไลซีสแบบช้าสูงกว่าการไพโรไลซีสแบบเร็ว ซึ่งถ่านชีวภาพที่ได้เหมาะสำหรับการดูดซับมลพิษ การกักเก็บคาร์บอน การกักเก็บพลังงาน และการปรับปรุงดิน โดยช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน เพิ่มการอุ้มน้ำ และการเกิดจุลินทรีย์ [7, 21]

ส่วนน้ำส้มควันไม้ที่ได้มีปริมาณค่อนข้างต่ำคิดเป็นร้อยละ 1.31 อาจเป็นผลมาจากอัตราการควบแน่นต่ำ อุณหภูมิที่ใช้สูงเกินไปในบางช่วง และการสูญเสียสารระเหยไปกับแก๊ส จึงทำให้ประสิทธิภาพของการควบแน่นลดลง ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 400–500 องศาเซลเซียส จะควบแน่นได้ปริมาณของเหลวสูงสุด [6] ส่วนแก๊สที่มีปริมาณค่อนข้างสูงคิดเป็นร้อยละ 52.54 โดยน้ำหนัก อาจเป็นผลมาจากการแตกตัวของสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้เกิดการแตกสลายเป็นแก๊สมากเกินไป ซึ่งแก๊สส่วนนี้ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และ ไฮโดรเจน [6, 19] โดยรวมแล้วกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าผลผลิตส่วนใหญ่จะเป็นถ่านชีวภาพมากกว่าผลิตภัณฑ์อื่น ซึ่งถ่านชีวภาพที่ได้มีคุณภาพดีเหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและวัสดุปรับปรุงดิน



ภาพที่ 3 ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพ การวิเคราะห์ผลการทดลองของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็ก ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า ปริมาณคาร์บอนคงที่ ค่าความหนาแน่น และค่าความร้อนสูง รายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของไม้ขี้เหล็กและถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์สมบัติ	**ไม้ขี้เหล็ก**	**ถ่านชีวภาพไม้ขี้เหล็ก**	**มาตรฐาน (มผช.657/2547)** [20]
ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15.48±0.2	2.47±0.1	ไม่เกินร้อยละ 10
ปริมาณสาระเหย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	52.51±0.1	14.11±0.4	ไม่เกินร้อยละ 25
ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	10.68±0.4	4.63±0.1	ไม่เกินร้อยละ 8
ปริมาณคาร์บอนคงที่* (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	21.33	78.79	-
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	342±0.4	428±0.1	-
ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	11.97	26.48	ไม่น้อยกว่า 25.12

*คำนวณจากค่าความแตกต่าง

ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กพบว่า มีปริมาณความชื้นร้อยละ 2.47 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนประเภทถ่านไม้หุงต้ม (มผช. 657/2547) ที่กำหนดให้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก [20] และอยู่ในช่วงร้อยละ 1–15 ที่รายงานโดย Verheijen และคณะ [21] ปริมาณความชื้นที่ต่ำสะท้อนถึงประสิทธิภาพของกระบวนการไพโรไลซีสในการกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างของชีวมวล และเป็นคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากช่วยลดพลังงานที่สูญเสียไปกับการระเหยของน้ำในระหว่างการเผาไหม้

ปริมาณสารระเหยของถ่านชีวภาพมีค่าเท่ากับร้อยละ 14.11 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ มผช. 657/2547 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 25 [20] และอยู่ภายในช่วงร้อยละ 0–40 ที่รายงานโดย Verheijen และคณะ [21] การลดลงของสารระเหยเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบไม้ขี้เหล็กแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ถูกกำจัดออกในระหว่างกระบวนการไพโรไลซีส ส่งผลให้สัดส่วนของคาร์บอนคงที่ในผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของถ่านชีวภาพที่มีความเสถียรทางความร้อนและเหมาะสมต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง

ปริมาณเถ้าของถ่านชีวภาพมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.63 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มผช. 657/2547 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 8 [20] และใกล้เคียงกับช่วงร้อยละ 0.5–5 ที่รายงานโดย Verheijen และคณะ [21] ปริมาณเถ้าที่ค่อนข้างต่ำเป็นคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน เนื่องจากช่วยลดปริมาณสารอนินทรีย์ตกค้างภายหลังการเผาไหม้ และลดปัญหาที่อาจเกิดจากการสะสมของเถ้าในระบบการใช้เชื้อเพลิง

ปริมาณคาร์บอนคงที่ พบว่า มีค่าสูงถึงร้อยละ 78.79 โดยน้ำหนัก และอยู่ในช่วงร้อยละ 50–90 ที่รายงานโดย Verheijen และคณะ [21] คาร์บอนคงที่ในระดับสูงแสดงถึงการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนภายหลังการกำจัดความชื้นและสารระเหยออกจากชีวมวลในระหว่างการไพโรไลซีส ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความเสถียรของถ่านชีวภาพและสมบัติด้านพลังงาน นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กมีความหนาแน่นเท่ากับ 428 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value; HHV) เท่ากับ 26.48 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนประเภทถ่านไม้หุงต้มที่กำหนดค่าความร้อนไว้ไม่น้อยกว่า 25.12 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [20] ค่าความร้อนสูงดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนคงที่ที่สูงและปริมาณความชื้นที่ต่ำของถ่านชีวภาพ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าภายใต้สภาวะที่ศึกษาสามารถยกระดับสมบัติด้านเชื้อเพลิงของไม้ขี้เหล็กได้อย่างชัดเจน

โดยภาพรวม ถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กที่ผลิตด้วยกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้ามีค่าความชื้น สารระเหย เถ้า และค่าความร้อนเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน มผช. 657/2547 [20] ขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงที่สูงถึงร้อยละ 78.79 แสดงถึงระดับการคาร์บอไนเซชันที่ดี ผลการศึกษาจึงสนับสนุนศักยภาพของไม้ขี้เหล็กในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านชีวภาพที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง

สรุปผล

การศึกษาปริมาณผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กด้วยกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร ภายใต้สภาวะจำกัดออกซิเจนและอุณหภูมิการไพโรไลซีส 500 องศาเซลเซียส พบว่า กระบวนการดังกล่าวให้ผลิตภัณฑ์ 3 ส่วน ได้แก่ ถ่านชีวภาพ แก๊ส และน้ำส้มควันไม้ โดยมีผลได้ร้อยละ 46.15, 52.54 และ 1.31 โดยน้ำหนักตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสภาวะการไพโรไลซีสที่ใช้สามารถเปลี่ยนไม้ขี้เหล็กให้เป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนแข็งได้ในสัดส่วนค่อนข้างสูง ขณะที่สัดส่วนของน้ำส้มควันไม้ที่ต่ำสะท้อนถึงข้อจำกัดด้านการควบแน่นของสารระเหยภายใต้ระบบที่ทำการศึกษา ส่วนอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แสดงให้เห็นว่าอัตราการให้ความร้อนมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล โดยช่วงต้นของกระบวนการเกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ซึ่งสัมพันธ์กับการกำจัดความชื้นและการปลดปล่อยสารระเหย ขณะที่ช่วงถัดมามีอัตราการให้ความร้อนต่ำถึงปานกลางและเกิดการคายแก๊สอย่างต่อเนื่อง สภาวะดังกล่าวเอื้อต่อการคงเหลือของคาร์บอนในรูปถ่านชีวภาพ ทั้งนี้ ผลการศึกษาสนับสนุนว่าอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ควรควบคุมในการดำเนินกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้า เพื่อให้ได้ผลผลิตถ่านชีวภาพในระดับที่เหมาะสม

ด้านสมบัติของผลิตภัณฑ์ ถ่านชีวภาพจากไม้ขี้เหล็กมีความชื้นร้อยละ 2.47 สารระเหยร้อยละ 14.11 เถ้าร้อยละ 4.63 และคาร์บอนคงที่ร้อยละ 78.79 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่น 428 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความร้อนสูง 26.48 เมกะจูลต่อกิโลกรัม โดยค่าความชื้น สารระเหย เถ้า และค่าความร้อนเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนประเภทถ่านไม้หุงต้ม (มผช. 657/2547) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าสามารถเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนคงที่ ลดความชื้นและสารระเหย และยกระดับสมบัติด้านพลังงานของไม้ขี้เหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยสรุป ไม้ขี้เหล็กมีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซีสแบบช้าในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร โดยผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้มีสมบัติด้านเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและมีศักยภาพสำหรับการ

ใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง การศึกษานี้จึงสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพระบบไพโรไลซีสในระดับชุมชนและการขยายขนาดการผลิตในอนาคตได้

กิตติกรรมประกาศ

ทีมวิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (MHESI), กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (NSRF), สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (TSRI), สำนักงานเร่งรัดการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันและการพัฒนาพื้นที่ (องค์การมหาชน) (RCAD) และหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนาพื้นที่ (PMU A) สำหรับการสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ยังขอขอบคุณมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ที่ได้จัดเตรียมสถานที่และสนับสนุนกิจกรรมการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2025. Paris: IEA; 2025. https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2923e0f-89de-468b-9e05-8f682839240b/WorldEnergyOutlook2025.pdf
2. REN21. Renewables 2024 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat; 2024. https://www.ren21.net/gsr-2024/
3. กรมป่าไม้. รายงานสถานการณ์ทรัพยากรป่าไม้ประเทศไทย พ.ศ. 2567. กรุงเทพฯ: กรมป่าไม้; 2567. https://forestinfo.forest.go.th/Content/file/stat2567/Royal%20Forest%20Department%20statistics%202024.pdf
4. Rowell RM, editor. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 1st Edition. Boca Raton: CRC Press; 2005. DOI: https://doi.org/10.1201/9780203492437
5. Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel. 2007; 86 :1781-1788. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013
6. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. 4th ed. Academic Press; 2018. https://shop.elsevier.com/books/biomass-gasification-pyrolysis-and-torrefaction/basu/978-0-443-13784-6
7. Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management. 3rd ed. Routledge; 2024. DOI: https://doi.org/10.4324/9781003297673
8. Wang K, Remón J, Jiang Z, Ding W. Recent advances in the preparation and application of biochar derived from lignocellulosic biomass: A mini review. Polymers. 2024; 16(6): 851. DOI: https://doi.org/10.3390/polym16060851
9. Savrinda C, Said M, Bahrin D, Maheshwari S, Siswanto S. Production, characterization, and application of biochar derived from Eucalyptus pellita bark waste for soil quality improvement. Ecological Engineering & Environmental Technology. 2026; 27(1): 425-441. DOI:https://doi.org/10.12912/27197050/215919

10. Sun J, He F, Pan Y, Zhang Z. Effects of pyrolysis temperature and residence time on physicochemical properties of different biochar types. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science. 2017; 67(1): 12-22. DOI:https://doi.org/10.1080/09064710.2016.1214745
11. Tan H, Lee CT, Ong PY, Wong KY, Bong CP, Li C, Gao Y. A review on the comparison between slow pyrolysis and fast pyrolysis on the quality of lignocellulosic and lignin-based biochar. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021 Feb 1 (Vol. 1051, No. 1, p. 012075). IOP Publishing. DOI:https://doi.org/10.1088/1757-899X/1051/1/012075
12. Rueangsan K, Kraisoda P, Heman A, Tasarod H, Wangkulangkool M, Trisupakitti S, Morris J. Bio-oil and char obtained from cassava rhizomes with soil conditioners by fast pyrolysis. Heliyon. 2021; 7(11). e08291. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08291
13. ASTM D 3173. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM International. 100 Barr Harbor Drive. PO Box C700. West Conshohocken. United States. 2026; PA 19428-2959. https://store.astm.org/d3173-11.html
14. ASTM D 3175. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM International. 100 Barr Harbor Drive. PO Box C700. West Conshohocken. United States. 2026; PA 19428-2959. https://store.astm.org/d3175-20.html
15. ASTM D 3174. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. ASTM International. 100 Barr Harbor Drive. PO Box C700. West Conshohocken. United States. 2026; PA 19428-2959. https://store.astm.org/d3174-12r18e01.html
16. ASTM D 5865. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM International. 100 Barr Harbor Drive. PO Box C700. West Conshohocken. United States. 2019; PA 19428-2959. https://store.astm.org/d5865_d5865m-19.html
17. Demirbas A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. Journal of analytical and applied pyrolysis. 2004; 72(2): 243-248. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003
18. Tripathi M, Sahu JN, Ganesan P. Effect of process parameters on biochar production from biomass: A review. Renew Sustain Energy Rev. 2016; 55: 467-481. DOI:https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122
19. Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass Bioenergy. 2012; 38: 68-94. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411000638
20. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านไม้หุงต้ม (มผช. 657/2547). กรุงเทพมหานคร; 2547. https://www.tisi.go.th/website/about/mpc
21. Verheijen FGA, Jeffery S, Bastos AC, van der Velde M, Diafas I. Biochar Application to Soils: A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. Luxembourg: European Commission; 2010. DOI: https://dx.doi.org/10.2788/472