

การผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากใบสับปะรด ด้วยเตาเผาเมลพิซต่ำ ขนาด 200 ลิตร และการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิต

ศศิธร สรรพอคำ^{1*,3} วุฒิชัย ยิ่งสว่าง^{2,3}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
วิทยาเขตอุเทนถวาย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

²สาขาวิชาเทคโนโลยีโลจิสติกส์และการจัดการระบบขนส่ง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

³ศูนย์นวัตกรรมก่อสร้างและเทคโนโลยีวัสดุอุเทนถวาย คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : sasithorn_su@rmutto.ac.th

รับต้นฉบับ : 19 เมษายน 2566; รับบทความฉบับแก้ไข : 28 กรกฎาคม 2566; ตอรับบทความ : 16 กันยายน 2566
เผยแพร่ออนไลน์ : 27 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเตาเผาจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร สำหรับผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากใบสับปะรด ในพื้นที่ตำบลเขาคนทรง อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยทำการทดลองเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ต่อการผลิตถ่านชีวภาพ จากการทดลองพบว่าผลได้ของแข็งสูงสุด คือ ร้อยละ 33.02 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และมีค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 23.25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม จากนั้นทำการพัฒนาเตาเผาที่ประกอบด้วย เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ ชุดต่อควบแน่นเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้ และเตาเผาใหม่เพื่อให้ความร้อนแก่เตาเผาส่วนแรก จากการทดลองพบว่าเตาเผาที่พัฒนาขึ้น สามารถผลิตถ่านชีวภาพจากใบสับปะรดและน้ำส้มควันไม้ได้ โดยใบสับปะรด 20 กิโลกรัม สามารถผลิตถ่านชีวภาพได้ประมาณ 2 กิโลกรัม และน้ำส้มควันไม้ประมาณ 10 กิโลกรัม จากการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพพบว่าคาร์บอนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 70.49 มีค่าความร้อนสูงสุด 25.97 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในขณะที่น้ำส้มควันไม้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นฟีนอล (Phenol) และอนุพันธ์ของฟีนอล (Phenol Derivatives) ซึ่งรวมถึงไกวาคอล (Guaiacol) ที่มีฤทธิ์เป็นสารต้านเชื้อราและสารต้านเชื้อแบคทีเรีย สามารถนำไปใช้ในด้านการเกษตรเพื่อกำจัดโรครากเน่าและกำจัดเชื้อราในพืช รวมถึงฉีดพ่นเพื่อฆ่าเชื้อโรคและศัตรูพืชบางชนิดได้ เมื่อวิเคราะห์ต้นทุนรวมถึงความเป็นไปได้ในการสร้างผลิตภัณฑ์และการนำไปใช้ พบว่าจำนวนครั้งในการดำเนินการเพื่อคืนทุนคือ 16 ครั้ง และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มหลากหลายรูปแบบ

คำสำคัญ : วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ถ่านชีวภาพ เตาเผาเมลพิซต่ำ ใบสับปะรด น้ำส้มควันไม้



Biochar and Wood Vinegar Production from Pineapple Leaves Using Low-emission 200-liter Kiln and the Feasibility Study of Production

Sasithorn Sunphorka^{1*,3} Wuttichai Yangsawang^{2,3}

^{1*}*Chemical Engineering Program, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology
Tawan-ok, Uthen Thawai Campus, Bangkok, Thailand*

²*Logistics Management Program, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology
Tawan-ok, Uthen Thawai Campus, Bangkok, Thailand*

³*Uthen Thawai Construction Innovation and Material Center, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthen Thawai Campus, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: sasithorn_su@rmutto.ac.th

Received: 19 April 2023; Revised: 28 July 2023; Accepted: 16 September 2023

Published online: 27 December 2023

Abstract

This research aimed to develop a 200-liter iron kiln to produce biochar and wood vinegar from pineapple leaves provided from Khao Khan Song sub-district, Sriracha district, Chon Buri province. The preliminary experiments were conducted in the laboratory scale to determine the optimum operating temperature and time for biochar production. The experimental results showed that the highest solid yield was 33.02 wt.%, obtained at 400 °C and for 1 h, with the highest heating value as 23.25 MJ/kg. The 200-liter iron kiln was then developed consisting of 3 parts: biochar production kiln, condensation apparatus for storing wood vinegar and combustion kiln for heat production. It was found that the developed 200-liter iron kiln could produce biochar and wood vinegar from pineapple leaves. The 20 kg of pineapple leaves can produce approximately 2 kg of biochar and 10 kg of wood vinegar. The analysis of biochar revealed that biochar had 70.49 wt.% of Carbon content with the highest heating value of 25.97 MJ/kg. The generated wood vinegar is mainly composed of Phenols and Phenol derivatives, including Guaiacol which has antifungal and antibacterial properties. The wood vinegar could be used in agricultural areas to eliminate root rot disease and plant fungi. It could also be sprayed in order to inhibit germs growth and some pests as well. The analysis of costs, the possibility of product creation and implementation presented that the number of payback operations was 16 and resulted in a wide variety of value-added products.

Keywords: Agricultural waste, Biochar, Low-emission kiln, Pineapple leaves, Wood vinegar

1) บทนำ

จากการสำรวจปริมาณสับประรดโรงงานในปี พ.ศ. 2561 โดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร [1] ประเทศไทยมีผลผลิตสับประรด 2,350,887 ตัน ในจังหวัดชลบุรีคิดเป็น 132,534 ตัน ซึ่งพันธุ์ที่ปลูกอย่างแพร่หลายคือสับประรดศรีราชาหรือสับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย หลังจากแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แล้วเกิดวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ใบ จุก ตัน ก้านผล และหน่อ เป็นต้น สับประรดหนึ่งผลเมื่อเข้าแปรรูปในโรงงาน จะมีเศษเหลือใช้ 1,228.1 กรัมต่อผล จากน้ำหนักผล 1,754.4 กรัมต่อผล เมื่อคิดเป็นปริมาณเปลือกเฉลี่ยต่อไร่จะเท่ากับ 2,700 กิโลกรัม [2] ซึ่งเป็นปริมาณมากและก่อให้เกิดปัญหาและค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการกำจัด ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งในการเพิ่มต้นทุนการผลิตด้วย การแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้จึงมีความน่าสนใจโดยเฉพาะการแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำกลับมาใช้เพิ่มผลผลิตทางการเกษตร หรือผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มอื่น ๆ เพื่อสร้างรายได้และอาชีพใหม่ การแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นถ่านชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจเนื่องจากวิธีการไม่ซับซ้อนมากและได้ประโยชน์หลากหลาย เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวดูดซับของเสียในน้ำ/อากาศ/ดิน ใช้เป็นปุ๋ย นำมาผสมอาหารและผลิตภัณฑ์เสริมความงาม รวมถึงการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อให้ได้น้ำส้มควันไม้เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ซึ่งมีฤทธิ์ป้องกันราและแมลงศัตรูพืช สามารถนำมาใช้ในพื้นที่เพาะปลูกเพื่อลดการใช้จ่ายฆ่าแมลงได้ เป็นต้น [3]–[6] นอกจากนี้การสร้างและใช้งานเตาเผาที่มีความไม่ยุ่งยากสามารถทำได้เองในระดับชุมชน

หลายปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาเตาเผาถ่านชีวภาพที่สามารถผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้ได้ในระดับภาคสนามหรือสำหรับใช้ในชุมชน [3], [7]–[11] Moonsri and Hutem [3] ศึกษาการผลิตน้ำส้มควันไม้จากไม้มะขาม ไม้สะเดา ไม้กระถิน ไม้ไผ่ และไม้ยูคาลิปตัส ทำการออกแบบและสร้างชุดเตาเผาถ่านที่สร้างจากถังน้ำมัน 200 ลิตร และท่อตันน้ำส้มควันไม้ จากการทดลองพบว่าน้ำส้มควันไม้ที่ได้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 2.5–3.4 และค่าความร้อนของถ่านประมาณ 13–18 เมกะจูลต่อกิโลกรัม Sataklang *et al.* [7] ทำการปรับปรุงเตาเผาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาถ่านแบบไร้ควันต้นแบบซึ่งสร้างจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร แบ่งส่วนประกอบเป็น 3 ส่วน คือ (1) เตาเชื้อเพลิง (2) เตาเผาถ่าน และ (3) ท่อนำแก๊ส ที่มีหน้าที่นำแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) เข้าสู่เตาเชื้อเพลิงเพื่อเป็นเชื้อเพลิงเสริมในการผลิตถ่านส่วนแก๊สกลุ่มที่

เป็นพิษจะถูกกำจัดด้วยการเผาในบริเวณเตาเชื้อเพลิง คณะผู้วิจัยยังได้เสนอการพัฒนาเตาเพื่อแก้ไขปัญหาการลุกลามของเปลวไฟออกบริเวณด้านข้างของเตา โดยติดตั้งผนังเตาด้านนอกเพื่อควบคุมเปลวไฟ และติดตั้งครีบนำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในเตา ผลที่ได้คือเตาแบบใหม่สามารถประหยัดพลังงานและทำให้อุณหภูมิในเตาเผาสูงขึ้น Ketsripongsa *et al.* [8] พัฒนารูปแบบเตาเผาถ่านประสิทธิภาพสูงที่เหมาะสมของชุมชนรอบป่าโคกกลาง โดยใช้ถังเหล็กเจาะรูวางแบบแนวตั้งสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก จากการทดลองพบว่า มีปริมาณควันจากปากปล่องด้านบนน้อยลงเนื่องจากเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ระยะเวลาที่ใช้ให้ความร้อนหน้าเตาเผาถ่านจนปิดเตาเผาถ่าน 120 นาที สามารถเผาถ่านไม้ได้ 3 ครั้งต่อวัน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นว่าเตาเผาที่พัฒนาจากถังเหล็ก 200 ลิตร สามารถใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพในชุมชนได้และสามารถต่อเติมนำแก๊สเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะที่ต่างกัันแล้วแต่ลักษณะของวัสดุที่ใช้ จากการสำรวจความต้องการเบื้องต้นโดยสอบถามจากผู้นำเกษตรกรในพื้นที่ ตำบลเขาคันทรง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี พบว่าเกษตรกรมีความต้องการในการนำวัสดุเหลือทิ้ง โดยเฉพาะใบสับประรด ซึ่งเป็นส่วนเหลือทิ้งที่มีปริมาณมากที่สุดในพื้นที่เพาะปลูก โดยปกติแล้วในพื้นที่ปลูกสับประรดจะมีใบสับประรดเหลือทิ้งปริมาณสูงกว่า 4,000 กิโลกรัมต่อไร่ [12] มาแปรรูปหรือสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม หรือกำจัดออกจากพื้นที่ และให้ความสนใจในการนำมาผลิตถ่านชีวภาพ รวมถึงการพัฒนาเตาเผาเพื่อให้สามารถแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอื่น ๆ ได้ด้วย คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำไปสับประรดมาแปรรูปเป็นถ่านชีวภาพ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ เป็นการนำไปสับประรดแห้งมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ในเตาเผาแบบ Muffle Furnace โดยออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) และวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละผลได้และสมบัติของถ่านชีวภาพ (2) สร้างและพัฒนาเตาเผาผลิตถ่านขนาด 200 ลิตร เพื่อผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากใบสับประรดในระดับภาคสนาม โดยผู้วิจัยมุ่งหวังให้สามารถนำผลการศึกษาที่ได้เป็นพื้นฐานของการศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอื่น ๆ เป็นต้นแบบในการพัฒนาเตาเผาผลิตถ่านที่สามารถนำมาใช้ในชุมชนเป้าหมายได้โดยส่งผล

กระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงและการพัฒนาผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ต่อไป

2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสร้างเตาเผาผลิขิตำสำหรับใช้ในชุมชน
2. เพื่อผลิตถ่านชีวภาพจากใบสับประดศรียราช
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและต้นทุนของเตาเผาผลิขิตำสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพและผลิตภัณฑ์พลอยได้จากใบสับประดศรียราช

3) วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1) วัตถุประสงค์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ใบสับประดศรียราชจากพื้นที่ตำบลเขาคันทรง อำเภอศรียราช จังหวัดชลบุรี และเครื่องเตาเผาแบบ Muffle Furnace รุ่น Nabertherm

3.2) การผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

วิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การผลิตถ่านชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ และการพัฒนาเตาเผาผลิขิตำเพื่อผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนาม สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการนั้นทำการออกแบบการทดลองโดยวิธี CCD [13] ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์การทดลองที่มีความหลากหลายของปัจจัยต่าง ๆ พร้อมกัน โดยมีเป้าหมายคือการคัดกรองปัจจัยที่มีความสำคัญต่อผลการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านชีวภาพ โดยมีการออกแบบการทดลองดังตารางที่ 1 สภาวะการทดลองที่กำหนดในการทดลองแสดงให้เห็นถึงช่วงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลอง มีการแบ่งระดับการศึกษาเป็น 5 ระดับ คือ ที่ระดับลบแอลฟา ($-\alpha = -1.414$) ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) ระดับสูง (+1) และระดับบวกแอลฟา ($+\alpha = +1.414$) โดยที่ระดับต่ำของอุณหภูมิและเวลาคือ 400 องศาเซลเซียส และ 1 ชั่วโมง ระดับกลางของอุณหภูมิและเวลาคือ 500 องศาเซลเซียส และ 1.5 ชั่วโมง และระดับสูงของอุณหภูมิและเวลาคือ 600 องศาเซลเซียส และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นจะนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และสร้างสมการถดถอย (Regression Model) สำหรับทำนายร้อยละผลได้ของแข็งและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้

ตารางที่ 1 : ภาวะที่ใช้ในการทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบ CCD

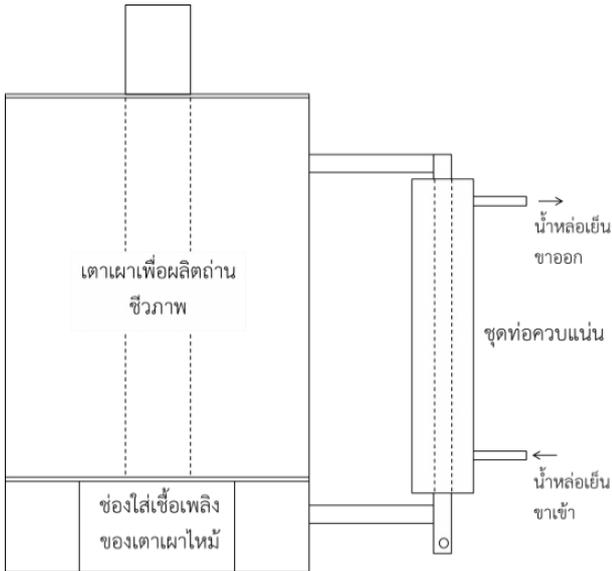
การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), ระดับ	เวลา (ชั่วโมง), ระดับ
1	379.29, -1.414	1.50, 0
2	400.00, -1	1.00, -1
3	400.00, -1	2.00, 1
4	450.00, 0	0.79, -1.414
5	450.00, 0	1.50, 0
6	450.00, 0	2.21, +1.414
7	500.00, 1	1.00, -1
8	500.00, 1	2.00, 1
9	520.71, +1.414	1.50, 0

วิธีการทดลองสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการคือ นำวัตถุดิบน้ำหนักประมาณ 4 กรัม มาใส่ในครุชเชิล ซึ่งน้ำหนักครุชเชิล (W_c) และน้ำหนักที่แน่นอนของวัตถุดิบที่ใช้ (W_1) ปิดฝาครุชเชิลและนำไปเข้าเตาเผา ตั้งเวลาและอุณหภูมิที่ต้องการสำหรับเตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้มีอัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำออกจากเตาเผา เปิดฝา และชั่งน้ำหนัก (W_2) เก็บถ่านชีวภาพที่ได้ไว้ในตู้ดูดความชื้นจนกว่าจะมีการใช้งาน เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองจนได้ภาวะที่เหมาะสมแล้วจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากส่วนที่สองคือการพัฒนาเตาเผาผลิขิตำในระดับภาคสนาม

3.3) การผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนาม

เตาเผาผลิขิตำในระดับภาคสนามจะพัฒนาจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร โดยมีภาพร่างแสดงดังรูปที่ 1 เตาเผาที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง และชุดท่อควบคุม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเตาเผาผลิขิตำนี้นี้จึงประกอบด้วยถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ โดยเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงจะมีช่องเปิดให้อากาศสามารถผ่านเข้าไปได้ เชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปจะถูกเผาไหม้ด้วยอากาศที่มากเกินพอผ่านกระบวนการเผาไหม้ (combustion) และคายพลังงานความร้อนอย่างเต็มที่และส่งพลังงานความร้อนต่อไปยังเตาเผาด้านบน ในขณะที่เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพจะทำหน้าที่บรรจุวัสดุที่เราต้องการนำมาผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งเตาส่วนนี้จะไม่ให้แก๊สอากาศสามารถเข้าไปได้ เมื่อเตาส่วนนี้ได้รับพลังงานความร้อนจากเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงจะเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนในทันทีแก๊สอากาศหรือกระบวนการไพโรไลซิส จากนั้นไอน้ำ สารระเหย และน้ำมันาร์ จะแยกตัวออกมาจากวัตถุดิบ และระบายทางท่อด้าน

ข้างซึ่งมีการต่อชุดท่อควบแน่น ลักษณะเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนแบบท่อสองชั้นเพื่อควบแน่นและผลิตน้ำส้มควันไม้ แก๊สที่เหลือจากการควบแน่นจะถูกป้อนเข้าเตาเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ด้วยวิธีการนี้จะทำให้แก๊สหรือควันที่เกิดขึ้น จากกระบวนการมีกลิ่นฉุนแสบจมน้อย ช่วยลดการปลดปล่อย แก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพโดยการนำมา ใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมได้อีกด้วย



รูปที่ 1 : แบบจำลองแสดงหลักการของเตาเผาผลิตถ่าน

การผลิตถ่านชีวภาพจากใบสับปะรดด้วยเตาเผาผลิตถ่านนี้ ทำได้โดยการชั่งน้ำหนักใบสับปะรด (W_3) นำใบสับปะรดใส่ในเตาเผาด้านบน จนเต็มส่วนของเตาเผาที่ผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งน้ำหนัก รวมของใบสับปะรดที่ได้มีค่าประมาณ 20 กิโลกรัม จากนั้นปิดปากเตาเผา นำดินเหนียวอุดบริเวณฝาเตาเผาและท่อระบายควัน นำเชื้อเพลิงใส่ที่เตาเผาไหม้ด้านล่าง จุดไฟและเปิดน้ำหล่อเย็น ใส่เชื้อเพลิงเข้าไปและปล่อยให้เกิดการเผาไหม้ โดยทำการวัด อุณหภูมิบริเวณด้านล่างของปล่องระบายควันซึ่งเป็นส่วนที่ติดกับ ฝาเตาเผา อุณหภูมิที่วัดได้ควรอยู่ระหว่าง 350–400 องศาเซลเซียส จากนั้นประมาณ 30 นาที น้ำส้มควันไม้จะเริ่มหยดออกมา สังเกต ไฟในเตาเผาไหม้และเติมเชื้อเพลิงจนกว่าน้ำส้มควันไม้จะหยุดไหล จากนั้นเผาต่อไปอีก 1 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เตาเย็นลง เมื่อเตาเผา เย็นลงถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงเปิดฝา ชั่งน้ำหนักถ่านชีวภาพที่ได้ (W_4) และเก็บถ่านชีวภาพใส่ภาชนะที่เหมาะสมเพื่อนำไปวิเคราะห์ ต่อไป

3.4) การวิเคราะห์สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

3.4.1) การวิเคราะห์องค์ประกอบของใบสับปะรด การวิเคราะห์ องค์ประกอบแบบแยกธาตุและการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง Elemental Analyzer-CHNS/O LECO 628 Series และเครื่อง XRF (WDXRF) BRUKER S8 TIGER ตามลำดับ

3.4.2) การคำนวณค่าร้อยละผลได้ของแข็ง (%Solid)

คำนวณหาร้อยละผลได้ของแข็งได้ดังนี้

$$\text{ระดับห้องปฏิบัติการ} \quad \%Solid = \frac{W_2 - W_c}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ระดับภาคสนาม} \quad \%Solid = \frac{W_4}{W_3} \times 100 \quad (2)$$

โดย %Solid คือ ผลได้ของของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

W_c คือ น้ำหนักครุชิวเบิล (กรัม)

W_1 คือ น้ำหนักใบสับปะรดก่อนทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักถ่านชีวภาพและครุชิวเบิลหลังทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (กรัม)

W_3 คือ น้ำหนักใบสับปะรดก่อนทำการทดลองระดับภาคสนาม (กรัม)

W_4 คือ น้ำหนักถ่านชีวภาพหลังทำการทดลองระดับภาคสนาม (กรัม)

3.4.3) การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชีวภาพและน้ำส้ม

ควันไม้ การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยธาตุ (Ultimate Analysis) ของใบสับปะรดและถ่านชีวภาพวิเคราะห์ด้วยเครื่อง THERMO FLASH 2000 CHNS/O ANALYZERS และนำองค์ประกอบโดยธาตุที่ได้ไปคำนวณค่าความร้อนสูงสุดของถ่านชีวภาพจากสมการต่อไป [14]:

$$H.C.V. = 0.3856 (C + H) - 1.6938 \text{ MJ/kg} \quad (3)$$

โดย H.C.V. คือ ค่าความร้อนสูงสุด (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

C คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอนเฉลี่ย

H คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุไฮโดรเจนเฉลี่ย

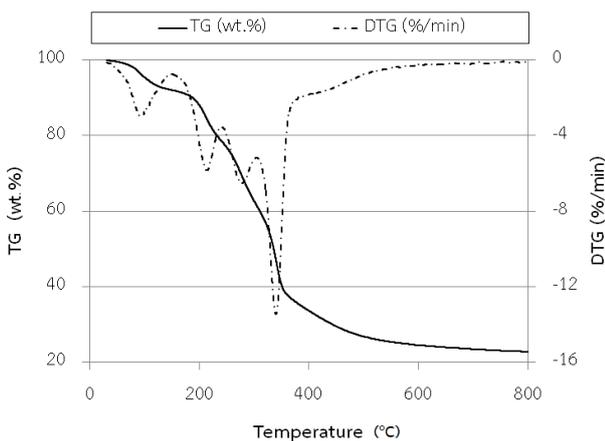
การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph–Mass Spectrometer (GC-MS /MS TQ) รุ่น AGILENT 7890 GC/7000C GC/MS TRIPLE QUAD โดยใช้ คอลัมน์ CP-Wax เตรียมตัวอย่างโดยการนำน้ำส้มควันไม้ 5 มล. ผสมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Q RēC™ AMMONIA SOLUTION 28%) 1.5 มล. เพื่อปรับให้ pH มีค่าประมาณ 5 จากนั้นเติมไดคลอโรมีเทน (Fisher Chemical™ Dichloromethane) หรือ เอทิลอะซิเตท (RCI Labscan™ Ethyl Acetate 99.8%) 3 มล. จากนั้น

จึงนำไปกรองและเตรียมพร้อมสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบต่อไป [15]

4) ผลการวิจัย

4.1) สมบัติของไบสัปประรด

ผลการวิเคราะห์ร้อยละคาร์บอน ร้อยละไฮโดรเจน ร้อยละไนโตรเจน และร้อยละออกซิเจนของไบสัปประรดพบว่ามีความเท่ากับ 45.88 ± 0.70 , 6.60 ± 0.12 , 1.15 ± 0.28 และ 46.37 ± 0.76 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุในเถ้าของไบสัปประรดพบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ดังนี้ โพแทสเซียม ร้อยละ 26.60 คลอรีน ร้อยละ 7.64 แคลเซียม ร้อยละ 2.89 ฟอสฟอรัส ร้อยละ 2.79 แมกนีเซียม ร้อยละ 2.35 ซิลิคอน ร้อยละ 1.44 และพบธาตุที่มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 1 ได้แก่ ซัลเฟอร์ แมงกานีส โซเดียม รูบิเดียม และอื่น ๆ



รูปที่ 2 : การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

รูปที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไบสัปประรดด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) พบว่าไบสัปประรดมีการสูญเสียความชื้นตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึงประมาณ 200 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำหนักลดลงประมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นจึงเป็นการสลายตัวขององค์ประกอบหลักต่าง ๆ ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส รวมถึงเซลลูโลส และลิกนินบางส่วน ซึ่งทำให้น้ำหนักของชีวมวลลดลงอีกประมาณร้อยละ 50 และมีการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส [16] เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส ไบสัปประรดยังมีการสลายตัวอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสลายตัวของลิกนิน

และเซลลูโลสที่เหลืออยู่ จนกระทั่งน้ำหนักของไบสัปประรดลดลงเหลือประมาณร้อยละ 25 ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าน้ำหนักที่เหลืออยู่นั้นเป็นน้ำหนักของคาร์บอนคงตัวและเถ้า

จากการศึกษาการสลายตัวของไบสัปประรดนี้ทำให้คณะผู้วิจัยได้เลือกช่วงอุณหภูมิในการศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากไบสัปประรดที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สารระเหยมีการสลายตัวไปเป็นจำนวนมากและมีโอกาสที่จะได้ถ่านชีวภาพที่มีค่าความร้อนและความเป็นรูพรุนสูง

4.2) การผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

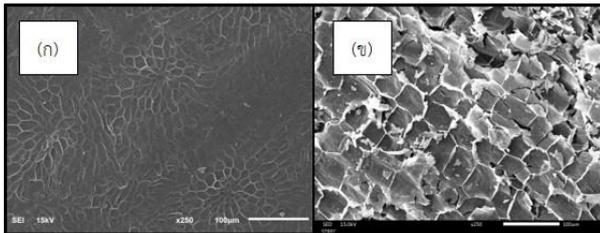
จากการผลิตถ่านชีวภาพโดยการออกแบบการทดลองแบบ CCD ดังรายละเอียดในตารางที่ 2 สำหรับร้อยละผลได้ของแข็ง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และค่าความร้อนสูงสุด (เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ของถ่านชีวภาพ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลได้ของแข็งสูงสุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสและเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าร้อยละผลได้ของแข็งเท่ากับร้อยละ 33.02 สำหรับค่าความร้อนสูงสุดของถ่านชีวภาพจากไบสัปประรดผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีค่าประมาณ 20-23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม โดยที่ภาวะที่ทำให้ถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนสูงสุดคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสและเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 23.25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมากกว่าค่าความร้อนของไบสัปประรดแห้ง คือ 18.54 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 2 : ร้อยละผลได้ของแข็ง อัตราส่วน C/H และค่าความร้อนสูงสุดของถ่านชีวภาพ

Temperature (°C)	Time (h)	% Solid yield (wt.%)	C/H ratio	HHV (MJ/kg)
379.29	1.50	29.26±0.45	18.46±1.66	20.89
400.00	1.00	33.02±0.44	19.73±0.91	23.25
400.00	2.00	22.57±0.00	19.10±0.10	22.57
450.00	0.79	27.50±0.71	22.27±1.85	22.18
450.00	1.50	20.98±0.00	25.41±3.32	22.64
450.00	2.21	20.64±0.90	27.19±0.36	21.13
500.00	1.00	18.88±0.53	30.08±0.93	22.39
500.00	2.00	18.93±0.40	28.34±1.71	20.82
520.71	1.50	15.07±0.08	32.95±1.92	20.83
450.00	2.21	20.64±0.90	27.19±0.36	21.13
500.00	1.00	18.88±0.53	30.08±0.93	22.39
500.00	2.00	18.93±0.40	28.34±1.71	20.82
520.71	1.50	15.07±0.08	32.95±1.92	20.83



รูปที่ 3 : ถ่านชีวภาพจากใบสับปะรดระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4 : (ก) ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 250 เท่า ของใบสับปะรดก่อนการเผา และ (ข) ใบสับปะรด หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ลักษณะของถ่านชีวภาพจากใบสับปะรดที่ผลิตในระดับห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งพบว่ามีผิวดำเงาและยังมีรูปร่างคล้ายกับใบสับปะรดแห้งก่อนเผา โดยมีความกว้างของใบสูงสุดประมาณ 3 เซนติเมตร เมื่อนำใบสับปะรดและถ่านชีวภาพไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 250 เท่า พบว่าผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4 จากรูปที่ 4(ก) พบว่าลักษณะพื้นผิวของใบสับปะรดก่อนเผาค่อนข้างเรียบ เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถสังเกตเห็นความขรุขระและรูพรุนเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4(ข) เนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบหลักบางส่วนและกลายเป็นสารระเหย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามรูพรุนที่เกิดขึ้นยังคงมีลักษณะไม่ชัดเจนเนื่องจากยังเกิดการสลายตัวทางความร้อนไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ยังคงมีสารระเหยอยู่บนผิวของถ่านชีวภาพ [17]

ตารางที่ 3 : การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของอุณหภูมิและเวลา
(ก) ต่อร้อยละผลได้ของแข็ง

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	264.04	4	66.01	128.5	0.0002
A	179.06	1	179.06	348.57	< 0.0001*
B	50.51	1	50.51	98.33	0.0006*
AB	27.56	1	27.56	53.66	0.0018*
B ²	6.91	1	6.91	13.46	0.0214*
Residual	2.05	4	0.5137		
Total	266.09	8			

(ข) ต่ออัตราส่วน C/H

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	203.45	2	101.73	42.85	0.0003
A-อุณหภูมิ	200.82	1	200.82	84.59	< 0.0001*
B-เวลา	2.63	1	2.63	1.11	0.3330
Residual	14.24	6	2.37		
Total	217.70	8			

โดยที่ A คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

B คือ เวลา (ชั่วโมง)

* p -value < 0.05 แสดงว่ามีผลที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อนำผลการทดลองที่มีการออกแบบการทดลองโดยวิธี CCD ดังแสดงในตารางที่ 2 ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน จะได้ผลการ

วิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3 โดยตารางที่ 3(ก) แสดงการวิเคราะห์ผลของปัจจัยการทดลองต่อผลได้ของแข็ง และตารางที่ 3(ข) แสดงการวิเคราะห์ผลของปัจจัยการทดลองต่ออัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจน จากการพิจารณาค่า p -value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่า p -value ของทั้งอุณหภูมิและเวลา ในตารางที่ 3(ก) และเฉพาะอุณหภูมิในตารางที่ 3(ข) มีค่าน้อย

กว่า 0.05 แสดงว่าอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็ง ในขณะที่มีเพียงอุณหภูมิเท่านั้นที่มีผลต่ออัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจน นอกจากนี้อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลายังมีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็งอีกด้วย จากนั้นเมื่อนำผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาสร้างสมการถดถอยสำหรับร้อยละผลได้ของแข็งและอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4 และ 5

สมการถดถอยสำหรับร้อยละผลได้ของแข็ง

$$\% \text{Solid yield} = 21.93 - 4.73A - 2.51B + 2.63AB + 1.19B^2 \quad (4)$$

สมการถดถอยสำหรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน

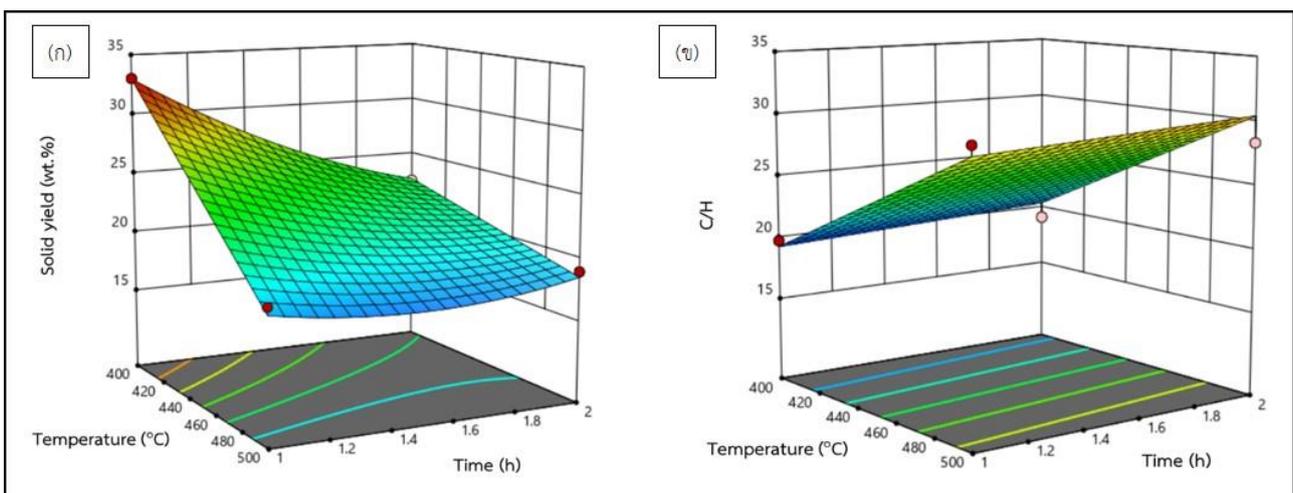
$$C/H \text{ ratio} = 24.84 + 5.01A + 0.57B \quad (5)$$

เมื่อ A คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และ B คือ เวลา (ชั่วโมง) โดยที่ค่า R² ของสมการที่ (4) และ (5) มีค่าเท่ากับ 0.99 และ 0.93 ตามลำดับ และมีพื้นผิวตอบสนองสำหรับร้อยละผลได้ของแข็งและอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนแสดงดังรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ

จากสมการถดถอยจะเห็นว่าสัมประสิทธิ์หน้า A และ B สำหรับร้อยละผลได้ของแข็งมีค่าเป็นลบ แสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาทำให้ร้อยละผลได้ของแข็งลดลง ในขณะที่สัมประสิทธิ์หน้า A สำหรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนมีค่าเป็นบวก แสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการทดลองในตารางที่ 2 จะเห็นว่ามีความสอดคล้องกัน นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น ทำ

ให้ร้อยละผลได้ของแข็งลดลง เนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน (thermal cracking) ของไบสัปเปอร์และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลสและลิกนินกลายเป็นของเหลวโมเลกุลต่ำและแก๊ส [18] ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนและสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนมากหรืออีกนัยหนึ่งคือมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่ำระเหยออกไปจากโครงสร้าง และคงเหลือไว้แต่องค์ประกอบที่มีความซับซ้อนและมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง

จากพื้นผิวตอบสนองที่แสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าพื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของแข็งมีความโค้งเล็กน้อย อันเนื่องมาจากผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลา อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าอุณหภูมิและเวลาที่มีผลอย่างมากต่อร้อยละผลได้ของแข็งจนทำให้ลักษณะพื้นผิวตอบสนองมีความใกล้เคียงเชิงเส้น ซึ่งคล้ายผลการทดลองกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [19] ในขณะที่พื้นผิวตอบสนองของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนมีลักษณะเชิงเส้น เนื่องจากไม่มีผลของอันตรกิริยาและปัจจัยที่ไม่อยู่ในลักษณะเชิงเส้น (quadratic effects) คือ A² และ B² จากพฤติกรรมดังกล่าวจะเห็นว่าภาวะที่ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของแข็งและอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งริมพื้นผิวตอบสนอง กล่าวคือที่อุณหภูมิหรือเวลาที่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดนั่นเอง



รูปที่ 5 : (ก) พื้นผิวตอบสนองสำหรับร้อยละผลได้ของแข็ง และ (ข) อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจน

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถกล่าวได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ได้ปริมาณถ่านชีวภาพลดลงแต่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูงสุดของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ชีวมวลเกิดการคาร์บอนไฮโดรเจนได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น สารระเหยซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่ำกว่าจะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของถ่านชีวภาพ ทำให้ถ่านชีวภาพมีองค์ประกอบคาร์บอนสูงขึ้น นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนยังแสดงให้เห็นว่าอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลา มีผลต่อร้อยละผลได้ของแข็ง แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพส่งผลกระทบต่อแนวโน้มที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้น การควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ถ่านชีวภาพตามที่ต้องการนั้น จำเป็นต้องควบคุมเวลาที่ใช้ไปควบคู่กัน การเพิ่มอุณหภูมิอาจไม่ทำให้ร้อยละผลได้ของแข็งลดลงเสมอไปหากใช้เวลาไม่มาก ดังแสดงในผลการทดลองจากตารางที่ 2 ยกตัวอย่างเช่น การผลิตถ่านชีวภาพที่ 379.29 องศาเซลเซียส เวลา 1.50 ชั่วโมง ให้ร้อยละผลได้ของแข็งเท่ากับ 29.26 ซึ่งน้อยกว่าการผลิตถ่านชีวภาพที่ 400 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ที่ให้ร้อยละผลได้ของแข็งเท่ากับ 33.03 หรือ การผลิตถ่านชีวภาพที่ 400 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ให้ร้อยละผลได้ของแข็งเท่ากับ 22.57 ซึ่งน้อยกว่าการผลิตถ่านชีวภาพที่ 450 องศาเซลเซียส เวลา 0.79 ชั่วโมง ที่ให้ร้อยละผลได้ของแข็งเท่ากับ 27.50 เป็นต้น

4.3) การผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ด้วยเตาเผา 200 ลิตร

การสร้างเตาเผาขนาด 200 ลิตรเพื่อใช้ผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากใบสับปะรดนั้นเมื่อประกอบเสร็จแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 เมื่อนำมาติดตั้งระบบน้ำวนสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นแล้ว จึงนำไปทดสอบกับใบสับปะรดที่รับมาจากพื้นที่เป้าหมาย (ตำบลเขาคันทรง) จากการทดสอบพบว่าเตาเผาจากถัง 200 ลิตรสามารถผลิตชีวภาพจากใบสับปะรดได้โดยที่ลักษณะของถ่านที่เกิดขึ้นมีรูปร่างคล้ายใบสับปะรดสดที่ใส่ลงไปตอนต้นและคล้ายกับลักษณะที่สังเกตได้จากถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ในระดับห้องปฏิบัติการ เมื่อจับหรือขยี้มีความกรอบสามารถบดให้มีขนาดเล็กกลงได้โดยยังไม่ต้องใช้เครื่องในขั้นตอนแรก แม้ว่าสีตาของผงถ่านชีวภาพจะติดมือแต่สามารถล้างออกง่ายเพียงใช้น้ำสะอาดชะ แตกต่างจากถ่านปกติที่สีตาติดมือแล้วล้างออกค่อนข้างยาก โดยการเผาใบสับปะรดสด

20 กิโลกรัม จะให้น้ำส้มควันไม้และถ่านชีวภาพประมาณ 10 และ 2-4 กิโลกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 6 : ภาพเตาเผาขนาด 200 ลิตร

ตารางที่ 4 แสดงสมบัติของถ่านชีวภาพและใบสับปะรดแห้งพบว่าถ่านชีวภาพที่ได้มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 70.49 มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนเท่ากับ 55.94 คิดเป็นค่าความร้อนสูงสุด 25.97 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมากกว่าร้อยละคาร์บอน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนและค่าความร้อนสูงสุดของใบสับปะรดแห้ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 45.88 6.95 และ 18.54 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของถ่านชีวภาพจากห้องปฏิบัติการซึ่งไม่มีการเก็บน้ำส้มควันไม้ดังที่แสดงในตารางที่ 2 พบว่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนและค่าความร้อนสูงสุดของถ่านชีวภาพจากเตาเผาขนาด 200 ลิตรมีค่ามากกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการนั้นไม่มีการแยกแก๊สเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้ ดังนั้นสารระเหยที่สลายตัวออกมาบางส่วนจึงสามารถเกิดการรวมตัวหรือเกิดกระบวนการรีโพลิเมอไรเซชัน (Repolymerization) และเกาะอยู่บนผิวของถ่านชีวภาพในขณะที่เย็นตัวลงได้ [20] ซึ่งสารระเหยดังกล่าวมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนรวมจึงลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามร้อยละผลได้ของแข็งของถ่านชีวภาพที่ผลิตด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตรนั้นน้อยกว่าการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการเนื่องจากสารระเหยที่สลายตัวออกมาจากวัตถุดิบตั้งต้นถูกแยกออกมาควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้และแก๊สที่เหลือถูกนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเตาเผาไหม้แล้ว ดังที่กล่าวถึงข้างต้น ดังนั้นการพิจารณาการใช้เตาเผาขนาด 200 ลิตรนี้ในการผลิตผลิตภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ จึงต้องระบุ

วัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ โดยคำนึงถึงวัตถุดิบตั้งต้น ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยนี้ใช้ใบสับประรดซึ่งมีความชื้นสูงทำให้ได้น้ำส้มควันไม้ปริมาณมาก ในขณะที่ถ่านชีวภาพมีปริมาณน้อย หากต้องการให้ถ่านชีวภาพมีปริมาณมากขึ้น จำเป็นต้องตากใบสับประรดให้แห้งซึ่งต้องมีพื้นที่รองรับที่สามารถวางใบสับประรดได้นานประมาณ 2-3 สัปดาห์

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้ โดยการสกัดด้วยไดคลอโรมีเทนหรือเอทิลอะซิเตท จากนั้นนำส่วนที่สกัดไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC/MS ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบหลักของน้ำส้มควันไม้ที่ถูกสกัดด้วยได-

คลอโรมีเทนหรือเอทิลอะซิเตทนั้นไม่ต่างกันมากนัก องค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำส้มควันไม้ คือ Furfural, Phenol, p-Cresol, 2-Methoxy-phenol (หรือ Guaiacol) และอนุพันธ์ของ Phenol อื่น ๆ ซึ่งสารประกอบประเภท furfural ที่พบในน้ำส้มควันไม้เกิดจากการสลายตัวของ Xylan ในเฮมิเซลลูโลส [21] ในขณะที่สารประกอบประเภทไกลโคคอล รวมถึงฟีนอล และอนุพันธ์ของฟีนอลอื่น ๆ นั้นได้มาจากการสลายตัวของลิกนิน มีฤทธิ์เป็นสารต้านเชื้อราและสารต้านเชื้อแบคทีเรีย [22] ทำให้มีการใช้น้ำส้มควันไม้ในการเตรียมดินปลูกเพื่อช่วยกำจัดโรครากเน่าและกำจัดเชื้อราในพืช รวมถึงฉีดพ่นเพื่อฆ่าเชื้อโรคและกำจัดศัตรูพืชบางชนิด

ตารางที่ 4 : คุณสมบัติของใบสับประรดและถ่านชีวภาพจากใบสับประรดที่ผลิตจากเตาเผาขนาด 200 ลิตร

Material	HHV (MJ/kg)	Ultimate analysis (wt.%)				C/H ratio
		C	H	N	O	
Pineapple leaves	18.54	45.88±0.70	6.60±0.12	1.15±0.28	46.37±6.03	6.95±6.34
Biochar	25.97	70.49±0.81	1.26±0.10	1.38±0.25	26.87±0.82	55.9±4.49

ตารางที่ 5 : องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้จากใบสับประรด

No.	Compound name	Dichloromethane			Ethyl acetate		
		OC	RT	Area %	OC	RT	Area %
1	2-Cyclopenten-1-one		11.647	1.89		11.644	0.31
2	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-		12.146	2.2		12.135	1.03
3	Furfural		16.346	8.03		16.335	3.16
4	Ethanone, 1-(2-furyl)-		18.023	3.66		18.016	2.01
5	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-		18.193	2.23		18.186	0.68
6	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-		19.141	2.16		19.134	1.1
7	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-		20.996	4.39		20.988	2.2
8	Acetophenone		24.116	1.8		24.112	1.24
9	3-Furanmethanol		25.048	2.1		25.048	2.11
10	Acetamide	*	*	*		29.517	20.32
11	Phenol, 2-methoxy-		33.192	4.74		33.199	4.09
12	2-Methoxy-5-methylphenol		37.018	1.14	*	*	*
13	Phenol		39.092	10.78		39.08	14.39
14	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-		39.9	2.94		39.892	2.3
15	p-Cresol		42.004	5.42		41.996	5.07
16	Phenol, 4-ethyl-		45.415	8.44		45.418	7.4
17	Phenol, 3-(1-methylethyl)-		47.05	1.76		47.05	1.75
18	Phenol, 2,6-dimethoxy-		48.504	4.29		48.504	2.79
19	Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	*	*	*		50.585	1.15
20	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-		83.379	3.23		57.652	0.09

หมายเหตุ : OC (Compound Occurrence) หมายถึงสารประกอบที่พบในน้ำส้มควันไม้ที่สกัดด้วยไดคลอโรมีเทนและเอทิลอะซิเตท โดยที่แถบสีแสดงสารประกอบที่พบ และเครื่องหมายดอกจันแสดงสารประกอบที่ไม่พบ

ตารางที่ 6 : การประมาณราคาต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากใบสับปะรด 20 กิโลกรัม

รายการ	ราคาต่อหน่วย	หน่วย	จำนวนที่ใช้	หน่วย	ราคารวม (บาท)
เตาเผา	5,000	บาทต่อเครื่อง	1	เครื่อง	5,000
เครื่องบดอัดถ่าน	5,000	บาทต่อเครื่อง	1	เครื่อง	5,000
รวมงบลงทุน					10,000
วัตถุดิบใบสับปะรด	0	บาทต่อกิโลกรัม	20	กิโลกรัม	-
ค่าเชื้อเพลิง	0	บาทต่อกิโลกรัม	20	กิโลกรัม	-
น้ำ	0.02	บาทต่อกิโลกรัม	200	กิโลกรัม	4
ไฟฟ้า	4	บาทต่อหน่วย	90	หน่วย	360
ค่าแบริ่งมัน	25	บาทต่อกิโลกรัม	0.2	กิโลกรัม	5
ค่าบรรจุภัณฑ์ถ่าน	2	บาทต่อกิโลกรัม	2	กิโลกรัม	4
ค่าบรรจุภัณฑ์น้ำส้มควันไม้	5	บาทต่อลิตร	10	ลิตร	50
รวมค่าดำเนินการต่อครั้ง					393
ขายถ่านอัดแท่ง	20	บาทต่อกิโลกรัม	2	กิโลกรัม	40
ขายน้ำส้มควันไม้	100	บาทต่อลิตร	10	ลิตร	1,000
รวมรายรับต่อครั้ง					1,040
จำนวนครั้งที่เผาเพื่อคืนทุน					$= \frac{10,000}{(1,040 - 393)}$ = 15.46

หมายเหตุ : 1) ค่าใช้จ่ายอยู่ในพื้นฐานของการนำวัตถุดิบเหลือทิ้งในพื้นที่มาใช้ค่าใบสับปะรด ค่าเชื้อเพลิง และค่าขนส่งจึงไม่มี หากมีการใช้วัตถุดิบจากแหล่งอื่นอาจมีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้เพิ่มเติม 2) ปริมาณผลิตภัณฑ์คือถ่านชีวภาพ 2 กิโลกรัม และน้ำส้มควันไม้ 10 ลิตร ต่อการใช้ใบสับปะรด 20 กิโลกรัม



รูปที่ 7 : ผลิตภัณฑ์จากใบสับปะรด ได้แก่ (ก) ถ่านผลไม้ (ข) น้ำส้มควันไม้ (ค) ผงถ่านชีวภาพ และ (ง) ถ่านอัดแท่งหรือถ่านอัดก้อน

4.4) วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและเสนอแนวทางการนำไปใช้

ตารางที่ 6 แสดงการประมาณราคาต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ ด้วยเตาเผาหมอลพิษตาขนาด 200 ลิตร จากการทดลองด้วยการใช้ใบสับปะรดสด 20 กิโลกรัม สามารถผลิตถ่านชีวภาพได้ 2 กิโลกรัมและน้ำส้มควันไม้ 10 ลิตร เมื่อคำนวณต้นทุนพบว่างบลงทุน ได้แก่ ค่าเตาเผาและเครื่องบดอัดถ่าน คิดเป็น 10,000 บาท ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิตหนึ่งครั้งคิดเป็น 393 บาท รายได้จากการจำหน่ายถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ต่อการผลิตหนึ่งครั้งคิดเป็น 1,040 บาท เมื่อนำมาคำนวณหาจำนวนครั้งในการเผาเพื่อคืนทุน พบว่าจะต้องเผาประมาณ 16 ครั้ง ซึ่งจากการทดสอบภาคสนามพบว่าการเผาหนึ่งครั้งใช้เวลาครึ่งวันและทิ้งไว้ให้เย็นแบบข้ามคืนจึงจะสามารถเก็บถ่านชีวภาพออก

จากเตาและดำเนินการเผาครั้งต่อไปได้ ซึ่งคิดเป็นการเผาหนึ่งครั้ง ใช้ระยะเวลา 1 วัน แสดงให้เห็นว่าชุมชนสามารถดำเนินการเพื่อคืนทุนได้โดยใช้ระยะเวลาภายในหนึ่งเดือน

นอกจากนี้ จากการพัฒนาเตาเผาขนาด 200 ลิตร และทำการผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากใบสับปะรดนั้น พบว่ายังสามารถต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ได้แก่ รูปที่ 7(ก) ถ่านผลไม้ รูปที่ 7(ค) ผงถ่านชีวภาพ และรูปที่ 7(ง) ถ่านอัดแท่งหรือถ่านอัดก้อน เป็นต้น แสดงให้เห็นว่าชุมชนยังมีทางเลือกในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์อื่นได้ เช่น การนำผลสับปะรดที่ไม่สมบูรณ์มาเผาด้วยเตาเผาดังกล่าว จะได้ถ่านชีวภาพในรูปถ่านผลไม้ ที่สามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์ตุ๊กตากลิ่นในครัวเรือน หรือ การนำผงถ่านชีวภาพไปผสมแป้งเปียกแล้วขึ้นรูปเป็นก้อนตามรูปร่าง

ที่ต้องการ จากนั้นตากให้แห้ง สามารถใช้เป็นถ่านดูดกลิ่นได้เช่นเดียวกัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีราคาสูงกว่าการขายถ่านอัดแท่งเพียงอย่างเดียว รวมถึงการนำผงถ่านชีวภาพมาผสมกับดินปลูกเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน ได้แก่ ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ความเป็นกรด-ด่างของดิน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และปริมาณโพแทสเซียม เป็นต้น [23] อย่างไรก็ตาม ปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงดินเพื่อการเกษตรนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากประสิทธิภาพของการปรับปรุงดินนั้นขึ้นกับองค์ประกอบของถ่านชีวภาพ และสภาพของดินด้วย [24] นอกจากนี้จากการใช้ถ่านชีวภาพในด้านการปรับปรุงคุณภาพของดินนั้น อาจมีการนำถ่านชีวภาพไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่มีมูลค่ามากขึ้น เช่น การนำไปกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ หรือการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับซึ่งเป็นการดำเนินงานในขั้นตอนต่อไป

อย่างไรก็ตามการนำไปสับปรดมาใช้เป็นวัตถุดิบนั้น หากนำไปสับปรดตัดสดมาใช้พบว่าจะใช้เวลานานในการผลิต และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเนื่องจากใบสับปรดมีน้ำเป็นองค์ประกอบสูง ดังนั้นชุมชนจำเป็นต้องมีพื้นที่สำหรับนำไปสับปรดมาเก็บไว้เพื่อให้ใบสับปรดมีปริมาณน้ำน้อยลง ซึ่งอาจเป็นประเด็นที่ควรคำนึงถึงและมีการเตรียมความพร้อมก่อนทำการผลิต

5) สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากใบสับปรดศรีราชามีการดำเนินการในสองส่วนหลัก ได้แก่ การศึกษาเบื้องต้นในระดับห้องปฏิบัติการ และการพัฒนาเตาเผาผลิยต์ขนาด 200 ลิตร ในระดับภาคสนาม สำหรับการศึกษาเบื้องต้นพบว่าถ่านชีวภาพจากการเผาที่ 400 องศาเซลเซียสและเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 23.25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และมีร้อยละผลได้ของแข็งเท่ากับ 33.02 จากนั้นได้พัฒนาเตาเผาจากถังน้ำมันขนาด 200 ลิตร ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง และชุดท่อควบแน่น โดยที่ด้านข้างของเตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพมีการต่อท่อ นำแก๊สเพื่อให้อุ่นน้ำ สารระเหย และน้ำมันาร์ ไหลออกมาเข้าสู่ชุดท่อควบแน่น จากนั้นแก๊สที่เหลือจากการควบแน่นจะไหลเข้าเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงอีกทางหนึ่ง ทำให้แก๊สที่ปล่อยออกมาไม่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่ำกว่าเตาเผาแบบอื่น ถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผานี้มีค่าความร้อนสูงสุด 25.97 เมกะจูลต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ยังได้นำสัมน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่ามี ไกวเอคอลล (Guaiacol) ฟีนอล (Phenol) และอนุพันธ์ของฟีนอล

(Phenol Derivatives) อื่น ๆ ซึ่งมีฤทธิ์เป็นสารต้านเชื้อราและสารต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยผลิตภัณฑ์พลอยได้นี้ตรงกับความต้องการของเกษตรกรในพื้นที่เป้าหมายเช่นเดียวกับถ่านชีวภาพ เนื่องจากมีเกษตรกรบางส่วนซื้อน้ำสัมน้ำมันเพื่อใช้ในพื้นที่เพาะปลูก จึงมีแนวคิดในการนำใบสับปรดที่เหลือทิ้งมาผลิตเป็นน้ำสัมน้ำมันซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิตลงส่วนหนึ่ง จากนั้น เมื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในสร้างผลิตภัณฑ์จากเตาเผาขนาด 200 ลิตร พบว่า นอกจากถ่านชีวภาพและน้ำสัมน้ำมันแล้ว ยังสามารถผลิตเป็นผงถ่านชีวภาพและถ่านผลไม้ได้ด้วย จึงเป็นทางเลือกในการสร้างผลิตภัณฑ์สำหรับชุมชน รวมถึงเตาเผานี้มีการเผาแก๊สส่วนที่เหลือจากการผลิตถ่านชีวภาพซ้ำ ลักษณะไม่ซับซ้อน ต้นทุนไม่สูงมาก ชุมชนสามารถนำไปเป็นต้นแบบหรือพัฒนาต่อยอดต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ประสานงานจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก และผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้คำแนะนำในการดำเนินโครงการ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่อุเทนถวายที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยระดับห้องปฏิบัติการ รวมถึงบุคลากรสายสนับสนุนที่กรุณาช่วยเหลือด้านเอกสาร ขอขอบคุณคุณปิยะ โกสินทรจิตต์ ประธานกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกสับปรดชลบุรี สำหรับความอนุเคราะห์วัตถุดิบ ขอขอบคุณ คุณณัฐธินันท์ นิลโนรี และครอบครัวในการอนุเคราะห์สถานที่บ้านสวนหอมสาคร สำหรับทดสอบการใช้งานเตาเผาระดับภาคสนาม ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

REFERENCES

- [1] Office of Agricultural Economics. "Pineapple industry: Plantation area (rai), harvested area (rai), yield (ton) and yield per rai (kg) in 2018 by district." (in Thai), OAE.go.th. <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/pineapple%20dit%2061.pdf> (accessed Sep. 12, 2023)
- [2] B. Chomsawan, P. Yodsoontorn, and P. Srisom, "Utilization of Phulae pineapple waste for cattle feed," (in Thai), *J. Graduate Stud. Bansomdejchaopraya Rajabhat Univ.*, vol. 6, no. 2, pp. 10–16, 2021.

- [3] P. Moonsri and A. Hudem, "Development of wood vinegar production from local wisdom in Phetchabun province for organic agriculture utilization," (in Thai), *J. Sci. Technol. Phetchabun Rajabhat Univ.*, vol. 3, no. 1, pp. 13–31, 2018.
- [4] W. Kalasee, "A wood vinegar machine for sawdust and wood dust," (in Thai), *SDU Res. J. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 45–54, 2008.
- [5] S. Robb and S. Joseph, "A report on the value of biochar and wood vinegar: Practical experience of users in Australia and New Zealand Version 1.2 – April 2020," Australia New Zealand Biochar Industry Group (ANZBIG), Tyagarah, Australia, Accessed: Jun. 1, 2022. [Online]. Available: <https://anzbig.org/wp-content/uploads/2020/07/ANZBI-2020-A-Report-on-the-Value-of-Biochar-and-Wood-Vinegar-v-1.2.pdf>
- [6] M. Hagner, O.-P. Penttinen, K. Tilikkala, and H. Setälä, "The effects of biochar, wood vinegar and plants on glyphosate leaching and degradation," *Eur. J. Soil Biol.*, vol. 58, pp. 1–7, 2013.
- [7] T. Sataklang, P. Khongkrapan, and A. Intaniwet, "The study of fumeless charcoal retort with rectangular fin installation for thermal efficiency and energy saving optimization," (in Thai), in *Proc. 12th Conf. Energy Netw. Thailand (E-NETT)*, Phitsanulok, Thailand, Jun. 8–10, 2016, pp. 632–637.
- [8] U. Ketsripongsa, J. Makaew, S. Painjud, T. Yutthasarnsenee, and P. Moonwundee, "High efficiency charcoal kiln models of community in Khok Klang sub-district, Lam Plai Mat district, Buriram province," (in Thai), in *Proc. Innov. Technol. Conf. (ITC2017)*, Surin, Thailand, Dec. 25–26, 2017, pp. 1–11.
- [9] M. F. Mail, M. H. A. Rahman, N. A. Baharom, M. S. Shahrin, and M. R. M. Daud, "Development and performance of Pyrolyzer for production of biochar and wood vinegar from domestic agriculture farm waste," *Adv. Agricultural Food Res. J.*, vol. 2, 2021, Art. no. a0000212.
- [10] T. Poowadin, P. Khantikamol, and M. Polsongkram, "Producing wood vinegar from neem wood by closed circulation gas pyrolysis kiln," (in Thai), *Srinakharinwirot Univ. (J. Sci. Technol.)*, vol. 10, no. 19, pp. 50–59, 2018.
- [11] S. Kaewluan, P. Sriromreun, S. N. Jansri, P. Asadamongkon, and S. Chuichulcherm, "Charcoal and wood vinegar products from hedge bamboo by using 200 liters community charcoal kiln working with gasified biomass burner," (in Thai), *Rajabhat Chiang Mai Res. J.*, vol. 22, no. 2, pp. 229–245, 2021.
- [12] T. Amornsakchai and N. Kengkhetkit, "Pineapple leaf: Source of natural fiber that should not be ignored," (in Thai), *Srinakharinwirot Sci. J.*, vol. 30 no. 2, 2014, Art. no. 4821.
- [13] J. Sabseree. "DOE: Central composite design," (in Thai), *For Quality*, vol. 16, no. 145, pp. 72–74, Nov. 2009.
- [14] A. Demirbas and A. H. Demirbas, "Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels," *Energy Explor. Exploit.*, vol. 22, pp. 135–143, 2004.
- [15] A. Pimenta, M. Fasciotti, T. Monteiro, and K. Lima, "Chemical composition of Pyrolygneous acid obtained from Eucalyptus GG100 Clone," *Molecules*, vol. 23, no. 2, p. 426, Feb. 2018, doi: 10.3390/molecules23020426.
- [16] J. Escalante *et al.*, "Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 169, 2022, Art. no 112914.
- [17] D. Angin, "Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake," *Bioresour. Technol.*, vol. 128, pp. 593–597, Jan. 2013.
- [18] A. Tomczyk, Z. Sokołowska, and P. Boguta, "Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 19, pp. 191–215, 2020.
- [19] S. Pap *et al.*, "Optimising production of a biochar made from conifer brush and investigation of its potential for phosphate and ammonia removal," *Ind. Crops. Prod.*, vol. 185, Oct. 2022, Art no. 115165.
- [20] R. T. Kapoor and M. P. Shah, *Designer Biochar Assisted Bioremediation of Industrial Effluents, A Low-Cost Sustainable Green Technology*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2023.
- [21] E. de Souza Araujo *et al.*, "Antibacterial and antifungal activities of pyrolygneous acid from wood of *Eucalyptus urograndis* and *Mimosa tenuiflora*," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 124, no. 1, pp. 85–96, 2017.
- [22] H. A. Oramahi, T. Yoshimura, F. Diba, D. Setyawati, and Nurhaida, "Antifungal and Antitermitic activities of wood vinegar from oil palm trunk," *J. Wood Sci.*, vol. 64, pp. 311–317, 2018.
- [23] S. Udpuay, C. Kueanoon, P. Chouwanapong, and P. Wawatwittaya, "Effects of biochar from cassava root on chemical properties of clayey soil under greenhouse condition," (in Thai), in *Proc. 54th Kasetsart Univ. Annu. Conf.*, Bangkok, Thailand, Feb., 2016, pp. 328–335.
- [24] S. Butnan and P. Vityakon, "Amazing biochar and its bipolar effects," (in Thai), *Khon Kaen Agr. J.*, vol. 46, no. 6, pp. 1167–1176, 2018.