

**ผลกระทบอุณหภูมิและเวลาไพโรไลซิสที่มีต่อคุณสมบัติถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้
จากทางใบปาล์ม**

**Effect of Pyrolysis Temperature and Residence Time on Properties
of Biochar and Wood Vinegar from Oil Palm Frond**

นิกราน หอมดวง^{1*}, บุญยาพร แสนพรหม¹, ประภัศร รัตนไพบูลย์¹, กิตติกร สาสุจิตต์¹ และนคร ทิพย์าวงศ์²

Nigran Homdoug^{1*}, Boonyaporn Sanprom¹, Prapatsorn Rattanapaiboon¹

Kittikorn Sasujit¹ and Nakorn Tippayawong²

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

¹School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand 50290

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangmai University, Chiang Mai, Thailand 50200

*Corresponding author: nigranghd@gmail.com

Received: July 03, 2021

Revised: July 10, 2023

Accepted: July 15, 2023

Abstract

Palm oil production produces a lot of waste materials, particularly from oil palm fronds. Converting biomass using pyrolysis technology into charcoal and wood vinegar to increase farmer income is of great interest. This research was conducted to determine the effects of pyrolysis temperature and residence time on the chemical properties of biochar and wood vinegar from oil palm frond. The slow pyrolysis was in a temperature range of 400-700°C and lasted 60-180 min. A 5 kW electric heated reactor was used. Nitrogen was used as carrier gas with a flow rate of 5 L/min. The chemical analyses included an approximate analysis, calorific values, specific gravity, and pH with according to ASTM standards were conducted. The oil palm frond shows great potential for biochar and wood vinegar production. Increasing pyrolysis temperature and residence time led to decreasing moisture and volatile matter while the fixed carbon and ash were increased. Optimum pyrolysis temperature and residence time for biochar and wood vinegar production occurred at 450°C and 120 min, respectively. The highest proportions of biochar and wood vinegar production were 32.05 and

47.76%, respectively. The calorific value of biochar was 25.53 MJ/kg, while wood vinegar obtained had specific gravity and pH of 1.075 and 1.89, respectively. Oil palm frond can be used to produce charcoal and wood vinegar and appropriate for household fuels and agricultural applications

Keywords: slow pyrolysis, biochar, oil palm frond, wood vinegar, effect of pyrolysis temperature and residence time

บทคัดย่อ

กระบวนการปลูกปาล์มน้ำมันมีวัสดุเหลือทิ้งในปริมาณสูงโดยเฉพาะทางใบปาล์ม การเปลี่ยนรูปชีวมวลทั้งสองด้วยเทคโนโลยีไพโรไลซิสเพื่อเป็นถ่านและน้ำส้มควันไม้ เป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มรายได้ให้กับกลุ่มเกษตรกร ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากทางใบปาล์มน้ำมัน กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าใช้ช่วงอุณหภูมิ 400-700 °ซ. และระยะเวลา 60-180 นาที การให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ และใช้ในโตรเจนเป็นแก๊สพาที่อัตราการป้อน 5 ลิตร/นาที การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์โดยประมาณ ค่าความร้อน ความถ่วงจำเพาะ และค่าความเป็นกรด-ด่าง ภายใต้มาตรฐาน ASTM ผลการทดลองพบว่า ทางใบปาล์มมีศักยภาพในการผลิตเป็นถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ การเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสส่งผลให้สารระเหยลดลง ในขณะที่คาร์บอนคงตัวและเถ้าเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสที่เหมาะสมสูงสุดในการผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 450°ซ. และ 120 นาที ตามลำดับ สัดส่วนสูงสุดในการผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้คิดเป็น 32.05 และ 47.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ถ่านชีวภาพให้ค่าความร้อนเฉลี่ย 25.53 เมกะจูล/กิโลกรัม ส่วนน้ำส้มควันไม้ให้ความถ่วงจำเพาะและค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 1.075 และ 1.89 ตามลำดับ ทางใบปาล์มสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านและน้ำส้มควันไม้ได้

เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนและงานในภาคเกษตร

คำสำคัญ: กระบวนการไพโรไลซิส ถ่านชีวภาพ ทางใบปาล์ม น้ำส้มควันไม้ ผลกระทบ อุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิส

คำนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยเมื่อเทียบกับข้าว อ้อย มันสำปะหลังและยางพารา ที่ผ่านมามีปัญหาของราคาปาล์มน้ำมันที่ตกต่ำส่งผลกระทบต่อรายได้ ค่าครองชีพ ความเป็นอยู่และความสุขของชุมชน โดยไม่มีแนวโน้มของราคาที่เพิ่มขึ้นได้ในช่วง 10-15 ปี เนื่องจากอุปสงค์และอุปทานของกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มไม่สมดุลกันที่เกิดจากปัจจัยภายในและภายนอกประเทศ (Saleerut *et al.*, 2020; Wangrakdiskul and Yodpijit, 2015) การปลูกและเก็บเกี่ยวปาล์มน้ำมันในแต่ละปีจะมีการตัดแต่งกิ่งเพื่อให้ผลผลิตเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉลี่ยชีวมวลที่เหลือทิ้งในกระบวนการ ได้แก่ ทางใบปาล์มและต้นปาล์มน้ำมัน โดยทางใบปาล์มจะถูกตัดแต่งออกจากต้นเฉลี่ย 14.5-20.5 เปอร์เซ็นต์ (430-720 kg/ไร่ ผลผลิตเฉลี่ยทั้งประเทศ 2,897 kg/ไร่) ของน้ำหนักผลผลิต ในขณะที่ต้นปาล์มเมื่อมีการโค่นและปลูกใหม่จะมีวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นชีวมวลเฉลี่ย 10-12 ตัน/ไร่ (Rahayu *et al.*, 2018) ซึ่งสูงกว่าชีวมวลที่ได้จากการผลิตลำไยหรือการผลิตข้าว (Thipsupawong *et al.*, 2020) สถิติข้อมูลปริมาณ

ชีวมวลทางใบปาล์มจากต้นปาล์มน้ำมันมีปริมาณ 3.64 ล้านตัน/ปี (Malithong *et al.*, 2017)

การพัฒนานำเอาทางใบปาล์มน้ำมันมาพัฒนาเป็นถ่านชีวภาพ น้ำส้มควันไม้หรือน้ำมันชีวภาพเป็นอีกประเด็นที่มีความสนใจและท้าทายต่อองค์ความรู้ด้านการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ให้สามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทดแทนการใช้เชื้อเพลิงหรือวัสดุใช้งานเพื่อการเกษตร เพื่อเพิ่มรายได้และลดค่าใช้จ่ายให้กับชุมชน กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมสำหรับการเพิ่มมูลค่าทางใบปาล์ม ที่สำคัญเทคโนโลยีนี้เกษตรกรและชุมชนส่วนใหญ่มีประสบการณ์ความคุ้นเคยและทำกันมาอย่างยาวนานหรือที่เรียกว่า การเผาถ่าน (Carbonization) ซึ่งจุดประสงค์หลัก คือ การกำจัดความชื้นและสารระเหยในชีวมวล ทำให้สัดส่วนคาร์บอนคงที่เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุให้ค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามด้วยจุดประสงค์ที่มีความคล้ายคลึงกันและต้องการให้การแปรรูปทางใบปาล์มให้เกิดประสิทธิผลสูงสุด ทั้งในส่วนถ่านและน้ำส้มควันไม้หรือน้ำมันชีวภาพที่ได้ ดังนั้นการแปรรูปชีวมวลจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับตัวแปรต่าง ๆ ประกอบด้วย อุณหภูมิ และเวลาไพโรไลซิส (Claoston *et al.*, 2014) รวมถึงผลที่ได้จากกระบวนการ ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมี ปริมาณผลผลิต ค่าความร้อน ถ่านชีวภาพ ความหนาแน่น และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำส้มควันไม้ ซึ่งผลที่ได้จะเป็นบทพิสูจน์กำหนดให้ทางใบปาล์มสามารถเป็นชีวมวลที่มีศักยภาพในการแปรรูปเพื่อการผลิตถ่านชีวภาพหรือสารชีวภาพเหลวสำหรับการเกษตร

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุที่อุณหภูมิสูงในสภาวะไร้ออกซิเจน (Absence of oxygen) ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 1,000°C. โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสมี 3 ประเภท คือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า แบบเร็ว และแบบเร็วมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ของเหลว ถ่าน และมีขี้เถ้าเป็นสารตกค้างจากกระบวนการ (Jahirul *et al.*, 2012) ไพโรไลซิสแก๊ส

มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน และกลุ่มไฮโดรคาร์บอนเบา มีค่าความร้อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8.76-17.00 MJ/m³ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ได้ (Glushkova *et al.*, 2021; Weerachanchai, 2009) ในด้านของเหลว (Liquid tar) มีส่วนประกอบหลัก คือ น้ำส้มควันไม้ น้ำมันดิน และน้ำมันชีวภาพ โดยน้ำส้มควันไม้สามารถนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์พ่นกำจัดแมลงได้ในด้านของแข็งที่ได้เป็นถ่านสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงหรือสารปรับปรุงดิน ผลผลิตของกระบวนการขึ้นอยู่กับ ชนิดวัสดุ อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ และระยะเวลาไพโรไลซิส (Tripathi *et al.*, 2016)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากทางใบปาล์มน้ำมัน ภายใต้กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ผลที่ได้เกษตรกรหรือชุมชนสามารถนำไปใช้ประกอบสำหรับการผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้ด้วยตนเอง หรือการต่อยอดพัฒนาเป็นเทคโนโลยีสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพื่อสร้างรายได้จากวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่นของตนเองอย่างยั่งยืน

อุปกรณ์และวิธีการ

คุณสมบัติทางใบปาล์มและการเตรียม

Figure 1 แสดงลักษณะทางใบปาล์มที่นำมาใช้ทดลองสายพันธุ์ลูกผสม (DxP เทเนอร่า) อายุเฉลี่ย 15 ปี มีแหล่งเพาะปลูกภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดเชียงใหม่ เมื่อตัดทางใบปาล์มลงจากต้นดำเนินการตัดแยกเอาใบย่อยออกเหลือเพียงแต่ก้าน จากนั้นตัดก้านทางใบปาล์มเป็นท่อนให้มีความยาวเฉลี่ย 50 ซม. และนำมาตากแดดทิ้งไว้ประมาณ 10-15 วัน จากความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 70-80 เปอร์เซ็นต์ ให้ความชื้นลดลงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 20-30 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำมอลดขนาดย่อยลงให้มีขนาดความยาวและกว้างเฉลี่ย 2.5 ซม. และ

นำมาตากแห้งให้ความชื้นลดลงเฉลี่ย 15-20% และนำไปทดสอบในกระบวนการไพโรไลซิส การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีทั้งการวิเคราะห์โดยประมาณ และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุใช้เครื่อง Macro Thermogravimetric Analysis (TGA) และ CHNS/O Analyzer ตามลำดับ จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตามมาตรฐาน ASTM D5865 ASTM D7582 Table 1 ค่าความร้อนเริ่มต้นทางไบโอปาล์มก่อนเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสมีค่าเฉลี่ย 16.96 MJ/kg ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับคุณสมบัติทางเคมีของทางไบโอปาล์มที่ปลูกในประเทศและต่างประเทศโดยมีค่าอยู่ในช่วง 11.19-18.72 MJ/kg (Shrivastava *et al.*, 2020)



Figure 1 Foliar characteristics and preparation

Table 1 Chemical properties of palm leaves

Chemical properties of palm leaves	Proximate analysis (Dry basis) (%)				Ultimate analysis (Dry basis) (%)				
	MC	VM	FC	Ash	C	H	O	N	S
This research	6.24	75.04	16.51	2.21	43.87	5.72	47.37	0.14	0.12
Homdoun <i>et al.</i> (2019)	8.69	70.31	12.72	8.68	45.39	6.68	41.43	1.61	0.08
Sulaiman <i>et al.</i> (2016)	7.15	73.20	13.99	5.65	37.70	5.58	55.83	0.35	0.53
Balasundram <i>et al.</i> (2017)	6.73	55.88	20.33	17.06	38.22	5.88	55.15	0.68	0.07

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสและอุปกรณ์การทดลอง

Figure 2 แสดงไดอะแกรมการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง โดยเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเป็นเครื่องที่ให้ความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าขนาด 5 kW ควบคุมและปรับตั้งอัตราการให้ความร้อนได้ตั้งแต่ 1-10 °ซ./นาที่ ส่วนประกอบเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสประกอบ

ด้วย ฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีปตัวโอ ติดตั้งฝังในผนังห้องไพโรไลซิสทั้งหมด 3 ด้าน ภายในบุด้วยเซรามิกส์ ห้องไพโรไลซิสมีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาวรวมประมาณ 80 ซม. ทำด้วยวัสดุสแตนเลส ติดตั้งชุดวัดอุณหภูมิด้านล่าง ภายในมีถ้วยสแตนเลสเพื่อใส่ตัวอย่างชีวมวล โดยใส่ครั้งละ 20 กรัม ต่อการทดลอง ระบบควบคุมไฟฟ้า

ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณการป้อนไฟฟ้าและควบคุมการปรับอุณหภูมิ ระบบระบายความร้อนประกอบด้วยปั้มน้ำขนาด 60 W สูบน้ำจากถังเพื่อใช้หล่อเย็นส่วนบนของห้องเผาไหม้และไหลกลับระบายความร้อนในถังขนาด 30 ลิตร สุดท้ายเป็นชุดป้อนไนโตรเจนเพื่อควบคุมอุณหภูมิและป้องกันการเกิดการเผาไหม้ระหว่างกระบวนการ อัตราการปรับ 5 ลิตร/นาที การวิเคราะห์ความชื้นใช้ตู้อบลมร้อน MEMMERT รุ่น UFB500 ขนาด 108 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิสูงสุดได้ 300°ซ. การวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่างของน้ำส้มควันไม้ใช้เครื่องวัด Horiba รุ่น LAQUAtwin

pH-11 มีช่วงการวัดค่า 0-14 การหาน้ำหนักชีวมวลใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลแบบ 4 ตำแหน่ง ZEPER รุ่น BGB224 การวัดค่าความร้อนชีวมวลและถ่านชีวภาพใช้เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ รุ่น ART.2060/2070 ความจุ 300 มล. ทดลองตามมาตรฐาน ASTM D2105 การทดลองศึกษาการปรับอุณหภูมิและเวลาไพโรไลซิสในช่วง 400-700°ซ. และ 60-180 นาที ตามลำดับ วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ผลผลิตกระบวนการ ค่าความร้อนถ่านชีวภาพ ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความเป็นกรด-ด่าง

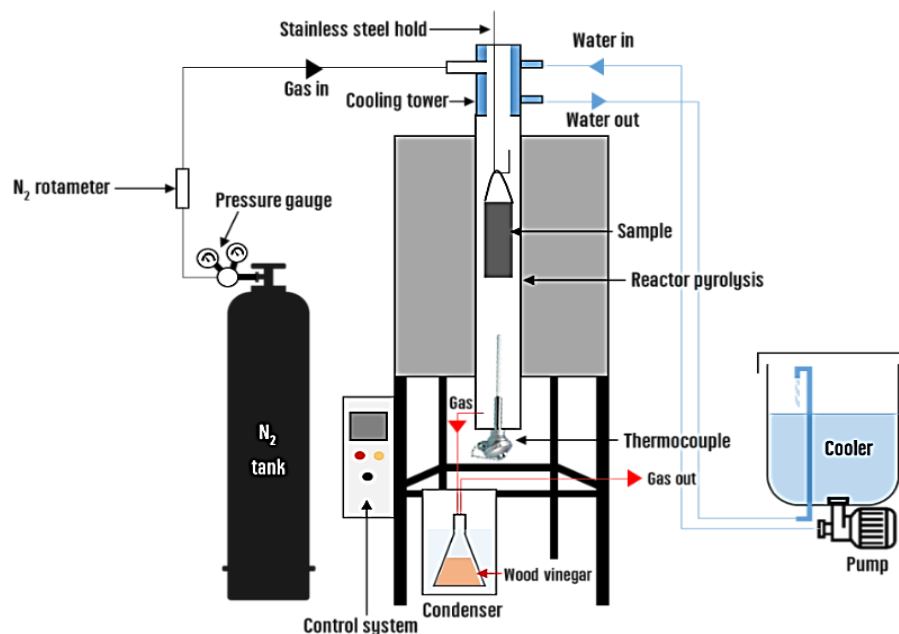


Figure 2 Biomass experimental diagram under pyrolysis process

ผลการวิจัยและวิจารณ์

ผลกระทบอุณหภูมิไพโรไลซิสที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีถ่านชีวภาพ

Figure 3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีสำคัญของถ่านชีวภาพเมื่อได้รับอุณหภูมิไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 400-700°ซ. ที่ระยะเวลาไพโรไลซิสคงที่ 120 นาที

เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางไบโอปาล์มน้ำมันเริ่มต้น ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสทำให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยของทางไบโอปาล์มลดลง ในขณะที่คาร์บอนคงตัวและปริมาณเถ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (Rahman *et al.*, 2014) สัดส่วนคาร์บอนคงตัวสูงสุดและความชื้นต่ำสุดของชีวมวลไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 700°ซ. ปริมาณคาร์บอนคงตัวและความชื้นเกิดขึ้น 77.59

และ 3.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนคงตัวและความชื้นทางใบปาล์มเริ่มต้นเท่ากับ 16.16 และ 6.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในกระบวนการไพโรไลซิส การเพิ่มอุณหภูมิทำให้โครงสร้างชีวมวล ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน สารแทรกหรือสารระเหยสลายตัวเพิ่มสูงขึ้น ปกติที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงกว่า 400°C. ปริมาณสารระเหยจะในชีวมวลจะต่ำกว่า 26 เปอร์เซ็นต์ (Palamanit *et al.*, 2019; Rahman *et al.*, 2014) ส่งผลทำให้มวลทางใบปาล์มลดลง ในขณะที่สีของทางใบปาล์มจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลเป็นสีดำและดำเข้มขึ้น (Wang and Howard, 2018) เริ่มต้นกระบวนการไพโรไลซิส ความชื้นหรือน้ำที่อยู่ในชีวมวลจะระเหยออกเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงกว่า 100°C. และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่า 100°C. จนเข้าใกล้ 200°C. สารระเหยในชีวมวลจะเริ่มถูกขับออกจากชีวมวล ในช่วงนี้มวลของชีวมวลจะลดลงและ

ลักษณะสีชีวมวลเริ่มเปลี่ยนไป และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 200°C. ขึ้นไป เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินจะสลายตัวอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ปกติทั่วไปเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสของทางใบปาล์มจะสลายตัวอยู่ในช่วง 200-400°C. ในขณะที่ลิกนินจะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-900°C. (Shrivastava *et al.*, 2021) การลดลงของความชื้นจะทำให้ค่าความร้อนถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น (Demirbas, 2002) ปกติทั่วไปค่ามาตรฐานทางเคมีของถ่านชีวภาพที่มีการซื้อขายกำหนดให้ความชื้น สารระเหย และเถ้าต้องต่ำกว่า 7, 33 และ 16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่คาร์บอนคงที่ที่ต้องมากกว่า 44 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอุณหภูมิไพโรไลซิสพบว่าช่วง 400-700°C. คุณสมบัติทางเคมีผ่านเกณฑ์มาตรฐานทางเคมีของถ่านชีวภาพ

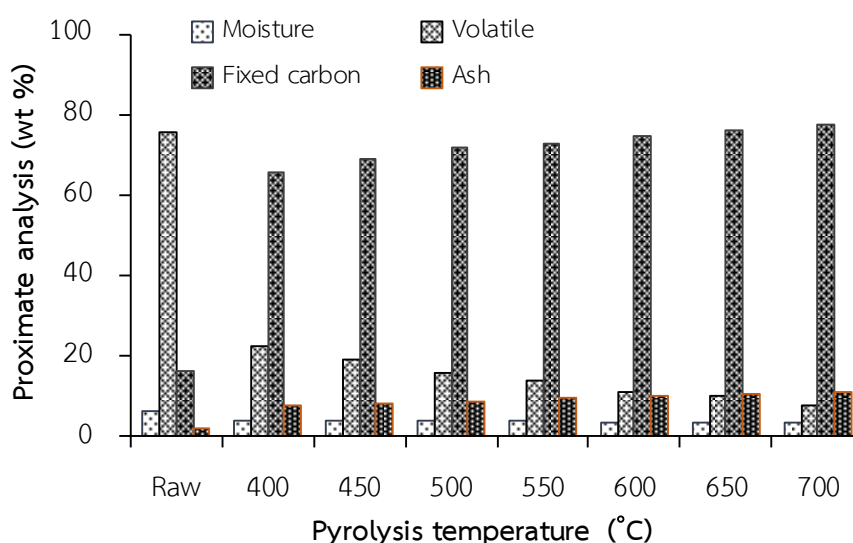


Figure 3 Effect of pyrolysis temperature on biochar properties at pyrolysis time 120 min

ผลกระทบเวลาไพโรไลซิสที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีถ่านชีวภาพ

Figure 4 แสดงผลกระทบของระยะเวลาไพโรไลซิสที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีถ่านชีวภาพทางใบปาล์มที่อุณหภูมิคงที่ 450°C. ปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า มีแนวโน้มสอดคล้องกับการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิส การเพิ่มระยะเวลาไพโรไลซิสทำให้การเปลี่ยนสภาพชีวมวลเป็นถ่านสมบูรณ์เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงการเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนคงที่และค่าความร้อนในที่สุด (Novotny *et al.*, 2015) การเพิ่มระยะเวลา

ไพโรไลซิสมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีต่ำกว่าการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิส เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิให้สัดส่วนการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนสูงกว่า ภายใต้อุณหภูมิ 450°C. การใช้เวลา 60, 120 และ 180 นาที ให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวสูงสุดเท่ากับ 63.66, 67.54 และ 70.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวแปรหลักของการเพิ่มค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Homdoun *et al.*, 2019)

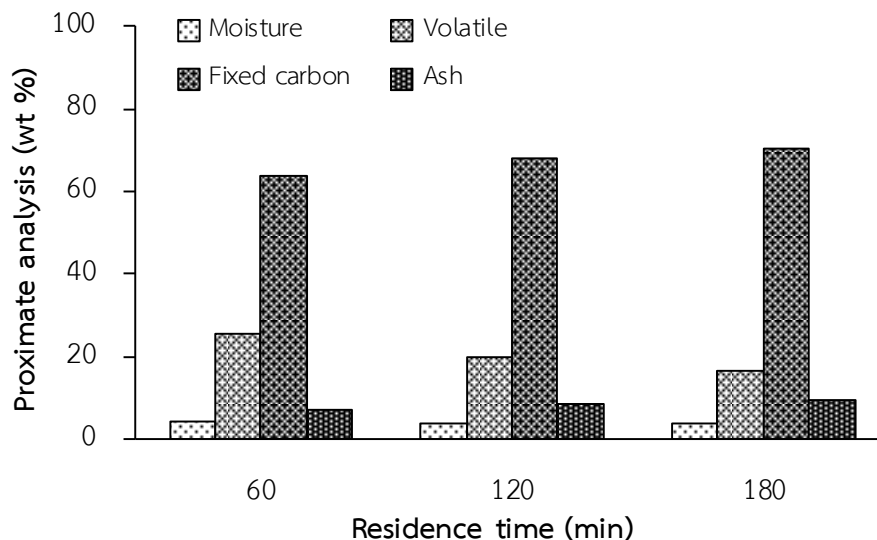


Figure 4 Effect of pyrolysis duration on biochar properties at a constant pyrolysis temperature of 450°C

ผลผลิตถ่านชีวภาพ น้ำส้มควันไม้ และไพโรไลซิสแก๊ส

ผลผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสทางใบปาล์มมีทั้งหมด 3 ส่วน ประกอบด้วย ถ่านชีวภาพ น้ำส้มควันไม้ หรือน้ำมันชีวภาพ และไพโรไลซิสแก๊ส Figure 5 การวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับความต้องการใช้และคุณสมบัติของผลผลิตที่ได้เป็นหลัก สำหรับงานวิจัยนี้เน้นในด้านการผลิตถ่านชีวภาพจากทางใบปาล์ม เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนการใช้แก๊สหุงต้มในครัวเรือนเป็นหลัก ส่วนการผลิตน้ำส้มควัน

ไม้เป็นผลผลิตกัญธรอง ดังนั้นค่าความร้อนและมวลถ่านชีวภาพจึงเป็นตัวแปรหลักในการพิจารณา ซึ่งค่าความร้อนที่นำมาอ้างอิงเป็นค่าที่อ้างอิงการซื้อขายตามมาตรฐานท้องตลาดเป็นหลัก (The Border Consortium, 2021) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้มวลของถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ลดลง ในขณะที่ไพโรไลซิสแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสทำให้โครงสร้างชีวมวล เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินถูกทำลาย องค์ประกอบที่เป็นของแข็งจะแปรสภาพเป็น

ไพโรไลซิสแก๊สและไหลออกจากห้องไพโรไลซิส การทำให้ไพโรไลซิสแก๊สกลับมาเป็นของเหลวทำได้ด้วยการทำให้แก๊สเกิดการควบแน่นกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Biswas and Mahanta, 2012) ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400°ซ. ให้สัดส่วนถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้สูงสุด ถัดมาเป็นอุณหภูมิ 450 และ 500°ซ. ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงกว่า 500°ซ. สัดส่วนไพโรไลซิสแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่น้ำส้มควันไม้ลดลง การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสทำให้อัตราการแตกตัวของโครงสร้างชีวมวลเร็วเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดสารชีวภาพที่ไม่สามารถควบแน่นได้เพิ่มสูงขึ้น (Rahman

et al., 2014) ปกติไพโรไลซิสแก๊สจากชีวมวลมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 8.00-10.66 MJ/m³ โดยมีแก๊สที่เผาไหม้หลัก คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน (Jesus *et al.*, 2018; Griessacher *et al.*, 2012) ส่วนไพโรไลซิสแก๊สจากพลาสติกมีค่าความร้อนสูงถึง 7.8-44.7 MJ/m³ (Cunliffe *et al.*, 2003) ดังนั้นไพโรไลซิสแก๊สที่ไม่ควบแน่นได้หรือที่เหลือจากกระบวนการ จะมีการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงป้อนกลับให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิส การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า หรือการให้ความร้อนในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น (Kodera *et al.*, 2021)

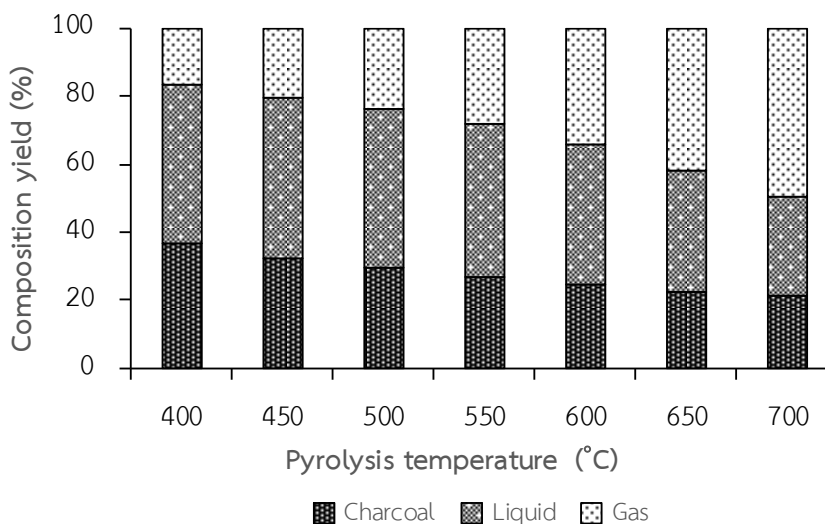


Figure 5 Biochar proportion wood vinegar and pyrolysis gas obtained from the pyrolysis process of palm leaves

ค่าความร้อนถ่านชีวภาพ

Figure 6 แสดงค่าความร้อนถ่านชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสทางไบปาล์มที่ระยะเวลาไพโรไลซิส 120 นาที โดยพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลให้ค่าความร้อนถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700°ซ. ให้ค่าความร้อนสูงสุด 27.10 MJ/kg ในขณะที่เมื่อเทียบกับชีวมวลทางไบปาล์มตั้งต้น 16.96 MJ/kg การใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 400-700°ซ. ทำให้ค่า

ความร้อนเพิ่มขึ้นจากชีวมวลตั้งต้น 42.10, 50.53, 53.95, 55.25, 57.72, 59.32 และ 59.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่อุณหภูมิสูงกว่า 450°ซ. ค่าความร้อนถ่านชีวภาพมีแนวโน้มคงที่ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านไม้หุงต้มควรมีค่าความร้อนไม่ต่ำกว่า 6,000 cal/g หรือ 25.12 MJ/kg (Wimonrat, 2007) ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านทางไบปาล์มจะอยู่ในช่วง 450-600°ซ. อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสที่สูงจะทำให้เกิด

ความสั่นเปลืองเชื้อเพลิงที่ป้อนสูงเช่นกัน ในขณะที่การใช้
อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ต่ำเกินไปจะทำให้สารระเหยตกค้าง
หรือโครงสร้างกลุ่มลิกนินไม่สลายตัว (Tomczyk *et al.*,
2020) โดยอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ทางใบปาล์มเริ่มมีการ

สลายตัวอย่างชัดเจนจะเกิดขึ้นในช่วง 200-450°C.
(อย่างไรก็ตามสำหรับสารระเหยที่ตกค้างในถ่านไม้ทั่วไป
ไม่ควรเกิน 25-33 เปอร์เซ็นต์ (The Border consortium,
2021; Wimonrat, 2007)

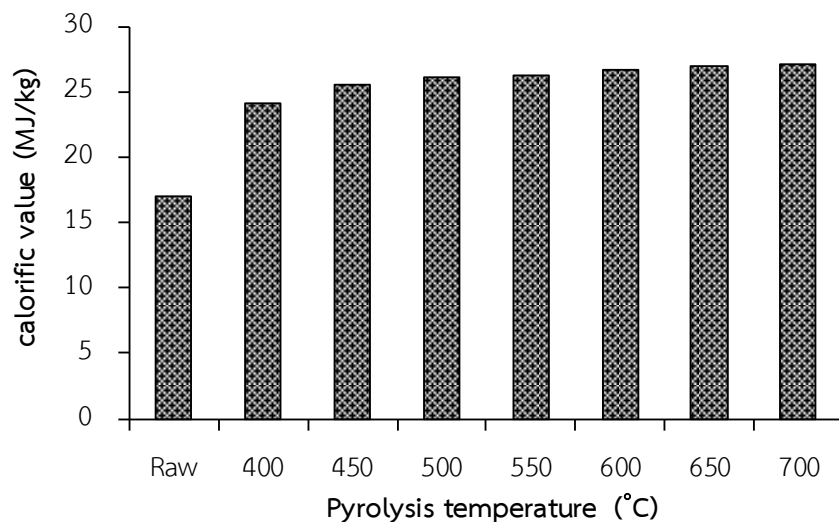


Figure 6 Heat value of biochar from palm leaves

ความถ่วงจำเพาะน้ำส้มควันไม้ (Specific gravity, SG)

Figure 7 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้ม
ควันไม้ภายใต้การปรับอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 400-700°C.
ที่ระยะเวลา 120 นาที การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผล
ให้ความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ลดต่ำลงเล็กน้อย
ที่อุณหภูมิ 400°C. ให้ค่าความถ่วงจำเพาะสูงสุด 1.090 และ
ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700°C. มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำสุด
ที่ 1.010 (Shrivastava *et al.*, 2021; Lu *et al.*, 2019)
อย่างไรก็ตามมาตรฐานค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำส้ม
ควันไม้โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 1.0-1.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของ
น้ำส้มควันไม้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับชนิดชีวมวล

อุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิส (Lu *et al.*, 2019) โดย
น้ำส้มควันไม้ที่มีความถ่วงจำเพาะสูงอยู่ในช่วง 2.15-2.98
จะให้ค่าความร้อนอยู่ในช่วง 12.19-22.32 MJ/kg (Feng
et al., 2005; Shrivastava *et al.*, 2021) ความสัมพันธ์
ความถ่วงจำเพาะของน้ำส้มควันไม้ที่เกิดจากกระบวนการ
ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิในช่วง 400-700°C. ที่ระยะเวลา
ไพโรไลซิส 120 นาที ของทางใบปาล์มในรูปสมการสมการ
เชิงเส้นแสดงดังสมการ และจากผลการทดลองเส้น
แนวโน้มความถ่วงจำเพาะน้ำส้มควันไม้มีแนวโน้มลดลง
เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิส

$$SG = -0.0003T + 1.1888 \quad (1)$$

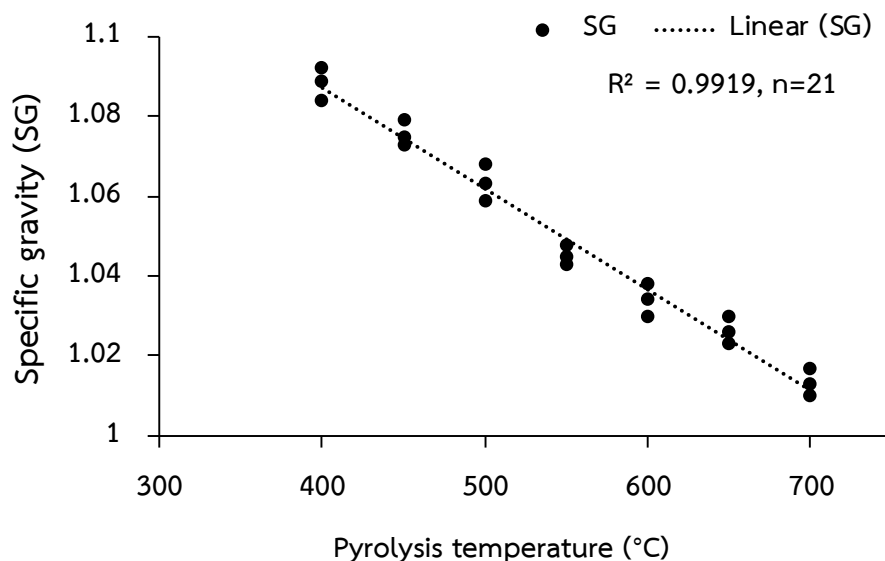


Figure 7 Effect of pyrolysis temperature adjustment on specific gravity of wood vinegar

ค่าความเป็นกรด-ด่างน้ำส้มควันไม้

การวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่างของน้ำส้มควันไม้จากกระบวนการไพโรไลซิสทางใบปาล์ม Figure 8 การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสทำให้ค่าความเป็นกรดลดลงที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400°ซ. ให้ความเป็นกรดสูงสุด 1.80 และอุณหภูมิ 700°ซ. ให้ความเป็นกรดต่ำสุด 2.30 ความเป็นกรดของน้ำส้มควันไม้เกิดจากการมีส่วนประกอบของกรดอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส เช่น กรดอะซิติก กรดโฟพานิก และกรดบิวทานิก เป็นต้น ปริมาณและสัดส่วนของความเป็นกรด-ด่างสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับประเภทของชีวมวลที่นำมาเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิส (Oramahi *et al.*, 2018) โดยปกติทั่วไปค่ามาตรฐานความเป็นกรด-ด่าง น้ำส้มควันไม้ดิบชุมชนอยู่ในช่วง 2.8-3.7 (Kwanpan and Pongsasanongkul, 2012) การลดความเป็นกรดลงสามารถดำเนินการด้วยกระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน (Esterification process)

ซึ่งกระบวนการนี้จะได้น้ำส้มควันไม้ที่มีค่าความเป็นกรดลดลงพร้อมกับน้ำเป็นผลิตภัณฑ์หลังกระบวนการ (Prasertpong and Tippayawong, 2020) อย่างไรก็ตามการนำน้ำส้มควันไม้ไปใช้งานด้านเกษตรอินทรีย์ไม่สามารถนำมาใช้ได้ทันที เนื่องจากส่วนประกอบของน้ำส้มควันไม้จะมีองค์ประกอบของน้ำ ทาร์ และน้ำมันเบาผสมอยู่ ดังนั้นถ้าต้องการนำไปใช้จะต้องใช้วิธี การกรอง การกลั่น หรือการปล่อยให้ตกตะกอน ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย ประหยัดค่าใช้จ่ายแต่ใช้ระยะเวลา (Duamkhanmanee, 2019; Theapparatt *et al.*, 2018) ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่างน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสทางใบปาล์มที่ระยะเวลาไพโรไลซิส 120 นาที ช่วงอุณหภูมิช่วง 400-700°ซ. แสดงได้ในรูปสมการสมการเชิงเส้น

$$\text{pH} = 0.0013T + 1.2889 \quad (2)$$

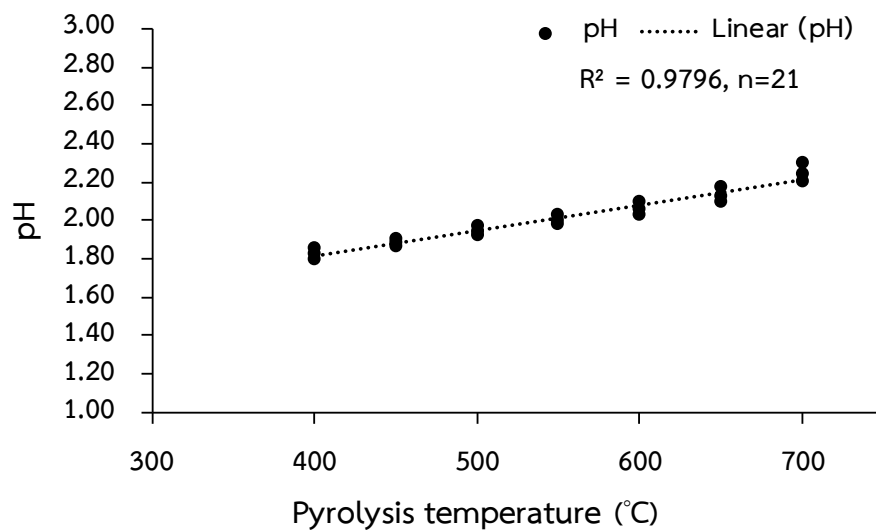


Figure 8 The effect of pyrolysis temperature adjustment on the pH of acid-base wood vinegar via palm leaf

การวิเคราะห์เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานกับชุมชน

ผลการทดสอบการผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ เพื่อเป็นเงื่อนไขต้นแบบให้กับเกษตรกรชาวสวนปาล์ม สำหรับการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตปาล์มน้ำมันมาเพิ่มมูลค่า ด้วยการนำไปใช้ในครัวเรือนหรือการเพิ่มรายได้ให้กับครัวเรือน ในด้านของอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสที่เหมาะสมสำหรับการเน้นผลิตถ่านชีวภาพอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมอยู่ที่ 450°ซ. และ 120 นาที ที่อุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสนี้คุณสมบัติด้านค่าความร้อนถ่านชีวภาพใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน และให้ปริมาณมวลสูงสุดถัดจากการใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 400°ซ. การใช้อุณหภูมิที่ต่ำและระยะเวลาที่สั้นเกินไป จะทำให้คุณภาพถ่านชีวภาพต่ำกว่ามาตรฐาน อีกทั้งการกลายสภาพเป็นคาร์บอนอาจไม่เสถียร (Angin, 2013) ในทางกลับกัน การใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสและระยะเวลายาวเกินไปจะทำให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้และที่สำคัญปริมาณของถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ลดต่ำลงในส่วนของน้ำส้มควันไม้ที่ได้ ค่าความถ่วงจำเพาะและค่า

ความเป็นกรด-ด่างภายใต้อุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสที่เหมาะสมอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐาน

สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองกระบวนการไพโรไลซิสทางใบปาล์มน้ำมันสรุปได้ว่า ทางใบปาล์มมีศักยภาพในการผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ การเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสทำให้ความชื้นสารระเหยลดลง ในขณะที่คาร์บอนคงที่และเถ้ามีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้น การใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 450°ซ. และระยะเวลาไพโรไลซิส 120 นาที มีความเหมาะสมสูงสุดในการผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ สัดส่วนความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงที่และเถ้า ที่อุณหภูมิและเวลาเหมาะสมเท่ากับ 3.87, 19.90, 67.97 และ 8.26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สัดส่วนถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้สูงสุดคิดเป็น 32.05 และ 47.76 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือเป็นไพโรไลซิสแก๊ส ถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนเฉลี่ยสูงสุด 25.53 MJ/kg ในส่วนค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำส้มควันไม้

ภายใต้อุณหภูมิและระยะเวลาไพโรไลซิสที่เหมาะสมเท่ากับ 1.075 และ 1.89 ในขณะที่ค่ามาตรฐานความถ่วงจำเพาะและความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 1.0-1.3 และ 2.8-3.7 ตามลำดับ ในภาพรวมทางไบโอปาล์มมีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นถ่านและน้ำส้มควันไม้ได้ โดยถ่านที่ผลิตได้เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนและการใช้งานในภาคเกษตรได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากถ่านจากทางไบโอปาล์มมีน้ำหนักเบากว่าถ่านไม้ทั่วไป ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมการนำเอาถ่านทางไบโอปาล์มผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งและศึกษาคุณสมบัติความเหมาะสมการใช้งานในชุมชนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน และศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและปัญหาภัยพิบัติหมอกควัน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนพื้นที่และเครื่องมือวิจัย ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาวิจัย (ม.จ.1-64-003) (มจ.1-64-003.2) ขอขอบคุณโครงการเพิ่มคุณภาพชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรโดยกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นและการอบแห้งสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และโครงการพัฒนาเชิงวิศวกรรมเตาผลิตถ่านไบโอชาร์สำหรับอุตสาหกรรมในครัวเรือน สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่สนับสนุนแนวคิด บุคลากร และหลักการพัฒนางานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Angin, D. 2013. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. **Bioresource Technology** 128(1): 593-597.
- Balasundram, V., N. Ibrahim, M. Samsudin, R. Md.Kasmani, M. Hamid, R. Isha and H. Hasbullah. 2017. Thermogravimetric studies on the catalytic pyrolysis of rice husk. **Chemical Engineering Transactions** 56: 427-432.
- Biswas, A. and P. Mahanta. 2012. Design and experimental analysis of condenser for the production of bamboo vinegar. **International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering** 2(2): 79-86.
- Claoston, N., A.W. Samsuri, M.H.A. Husni and M.S.M. Amran. 2014. Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars. **Waste Management and Research** 32(4): 331-339.
- Cunliffe, A.M., N. Jones and P.T. Williams. 2003. Pyrolysis of composite plastic waste. **Environmental Technology** 24(5): 653-663.

- Demirbas, A. 2002. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy Exploration and Exploitation** 20(1): 105-111.
- Duamkhanmanee, R. 2019. **Effect of Essential Oil and Wood Vinegar to Inhibit Phytophthora Colocasiae Causing Leaf Blight of Taro (*Colocasia esculenta* (L.) schott)**. 43 p. *In* Research Report. Bangkok: Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. [in Thai]
- Feng, F., W.Y. Liu and Y.S. Chen. 2005. Study on derivatives of gambogic acid. **Journal of China Pharmaceutical University** 36(1): 302-305.
- Glushkova, D.O., G.S. Nyashinaa, R. Anandb and P.A. Strizhak. 2021. Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass. **Process Safety and Environmental Protection** 156(1): 43-56.
- Griessacher, T., J. Antrekowitsch and S. Steinlechner. 2012. Charcoal from agricultural residues as alternative reducing agent in metal recycling. **Biomass and Bioenergy** 39(2012): 139-146.
- Homdoun, N., S. Kitikorn, J. Uttharuan, T. Wongsiriamnuay and N. Tippayawong. 2019. Influence of torrefaction temperature and time on the yields and properties of torrefied biomass. **Engineering and Applied Science Research** 46(2): 170-175.
- Jahirul I.M., M.G. Rasul, A.A. Chowdhury and A. Nanjappa. 2012. Biofuels production through biomass pyrolysis - a technological review. **Energies** 5(2012): 4952-5001.
- Jesus, M., A. Napoli, P.F. Trugilho, A.A. Abreu Júnior, C.L.M. Martinez and T.P. Freitas. 2018. Energy and mass balance in the pyrolysis process of eucalyptus wood. **CERNE** 24(3): 288-294.
- Kodera, Y., T. Yamamoto and E. Ishikawa. 2021. Energy-and economic-balance estimation of pyrolysis plant for fuel-gas production from plastic waste based on bench-scale plant operations. **Fuel Communications** 7(2021): 100016.
- Kwanpan, A. and C. Pongsasanongkul. 2012. **The Performance of Wood Vinegar from Incinerator Ash**. 78 p. *In* Research Report. Bangkok: Suan Sunandha Rajabhat University. [in Thai]
- Lu, X., J. Jiang, J. He, K. Sun and Y. Sun. 2019. Pyrolysis of *Cunninghamia lanceolata* waste to produce wood vinegar and its effect on the seeds germination and root growth of wheat. **BioResources** 14(4): 8002-8017.
- Malithong, A., C. Piputsitee, E. Sarobol and K. Sriroth. 2017. Zero waste management to increase efficiency in palm oil production and processing for food security in Thailand. **Walailak Journal of Science and Technology** 14(7): 589-596.

- Novotny, E.H., C.M. Branco de Freitas Maia, M. Thaís de Melo Carvalho and B.E. Madari. 2015. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use- a critical review. **R. Bras. Ci. Solo.** 39(1): 321-344.
- Oramahi, H.A., T. Yoshimura, F. Diba, D. Setyawati and Nurhaida. 2018. Antifungal and antitermitic activities of wood vinegar from oil palm trunk. **Journal of Wood Science** 64(1): 311-317.
- Palamanit, A., P. Khongphakdi, Y. Tirawanichakul and N. Phusunti. 2019. Investigation of yields and qualities of pyrolysis products obtained from oil palm biomass using an agitated bed pyrolysis reactor. **Biofuel Research Journal** 24(2019): 1065-1079.
- Prasertpong, P. and N. Tippayawong. 2020. Upgrading biomass pyrolysis oil model compound via esterification with ethanol over a heteropoly acid. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**. [Online]. Available <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1746867> (June 14, 2021).
- Rahayu, D.E., D. Nasarani, W. Hadi and B. Wrijodirjo. 2018. Potential of Biomass Residues from Oil Palm Agroindustry in Indonesia. pp. 1-4. **In Proceedings of the 3rd Annual Applied Science and Engineering Conference 18 April 2018**. Bundung: Universitas Pendidikan (UPI).
- Rahman, A.A., N. Abdullah and F. Sulaiman. 2014. Temperature effect on the characterization of pyrolysis products from oil palm fronds. **Advances in Energy Engineering** 2(1): 14-21.
- Saleerut, S., C. Jatuporn, V. Suvanvihok and A. Wanaset. 2020. Price adjustment of oil palm and palm oil in Thailand to the world price of the palm oil market. **Asian Journal of Agriculture and Rural Development** 10(2): 690-697.
- Shrivastava, P., A. Kumar, P. Tekasakul, S.S. Lam and A. Palamanit. 2021. Comparative investigation of yield and quality of bio-oil and biochar from pyrolysis of woody and non-woody biomasses. **Energies** 14(1092): 1-23.
- Shrivastava, P., P. Khongphakdi, A. Palamanit, A. Kumar and P. Tekasakul. 2020. Investigation of physicochemical properties of oil palm biomass for evaluating potential of biofuels production via pyrolysis processes. **Biomass Conv. Bioref.** [Online]. Available <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00596-x> (June 14, 2021).
- Sulaiman, S.A., H.S. Bamufleh, S.N.A. Tamili, M. Inayat and M.Y. Naz. 2016. Characterization of date palm fronds as a fuel for energy production. **Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia** 30(3): 465-472. DOI: 10.4314/bcse.v30i3.15

- Theapparat, Y., A. Chandumpai and D. Faroongsarng. 2018. Physicochemistry and Utilization of Wood Vinegar from Carbonization of Tropical Biomass Waste. pp. 163-183. *In* Padmini Sudarshana (Ed). **Tropical Forests-New Edition**. London: InTech Open Access Publisher.
- The Border Consortium. 2021. **Invitation to tender charcoal tender 3021-4** (additional purchase) checking charcoal quantity and quality at factory: July 2021 for Mae La Camp in Tak Province. [Online]. Available <http://www.theborderconsortium.org> (June 14, 2021).
- Thipsupawong, T., W. Wongpanyo, B. Vichanpol and K. Inai. 2020. The study of biomass potential in electricity generation in Mae Moh district, Lampang province. **The Gold Teak: Science and Technology Journal** 7(2): 1-11.
- Tomczyk, A., Z. Sokołowska and P. Boguta. 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Rev Environ Sci Biotechnol**. 19(1): 191-215.
- Tripathi, M., J.N. Sahu and P. Ganesan. 2016. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 55(2016): 467-481.
- Wang P. and B.H. Howard. 2018. Impact of thermal pretreatment temperatures on woody biomass chemical composition, physical properties and microstructure. **Energies** 11(25): 1-20.
- Wangrakdiskul, U. and N. Yodpijit. 2015. Trends analysis and future of sustainable palm oil in Thailand. **KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology** 8(1): 21-32.
- Weerachanchai, P. 2009. **Studies of Biomass Pyrolysis and Gasification for Production**. Doctoral Dissertation. Suranaree University of Technology. 402 p.
- Wimonrat, M. 2007. **The Industrial Economy of Alternative Biomass Fuels for the Industrial Sector**. 53 p. *In* Research Report. Bangkok: Office of Development and Promotion of the Department of Primary Industries and Mines.