

ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อน
ของเชื้อเพลิงแท่งจากกากปาล์มสาคุที่มีกลีเซอรินเป็นตัวเชื่อมประสาน
The effect of carbonized temperature and glycerin content
on physical and thermal properties of briquette fuel
from sago palm residue

พัชรี อินธนู^{1*}, สิริญา ไสเอ้ย² และพิชญพร กลับลาย³

Patcharee Intanoo^{1*}, Sirinya Saieay² and Pitchayapon Klabbklay³

^{1,2,3}สาขาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 50290 โทร 08 9555 2731

E-mail: tle_turn@hotmail.com

^{1,2,3}Department of Industrial Chemistry and Textile Technology, Faculty of Science, Maejo University,
Chiang Mai 50290, Thailand. Tel. +66(8) 9555 2731 E-mail: tle_turn@hotmail.com

วันที่รับบทความ 9 กรกฎาคม 2562
Received: Jul. 9, 2019

วันที่รับแก้ไขบทความ 9 กันยายน 2562
Revised: Sep. 9, 2019

วันที่ตอบรับบทความ 17 ธันวาคม 2562
Accepted: Dec. 17, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ในช่วง 300 - 500 องศาเซลเซียส (°C) และปริมาณกลีเซอรินในอัตราส่วนระหว่างร้อยละ 0 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงแท่งจากกากปาล์มสาคุ จากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงแท่งในรูปของดัชนีการแตกร่วน และความทนทานดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนซ์และปริมาณกลีเซอรินสูงขึ้น อีกทั้งอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์และปริมาณกลีเซอรินยังมีการแปรผันแบบโดยตรงต่อปริมาณคาร์บอนของเชื้อเพลิงแท่งอีกด้วย และปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงแท่งในรูปของค่าความร้อน โดยปริมาณคาร์บอนมากขึ้นทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแท่งสูงขึ้น เนื่องจากคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้และให้พลังงานออกมาได้ ดังนั้นอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนกากปาล์มสาคุเป็นเชื้อเพลิงแท่ง คือ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ที่ 400 องศาเซลเซียส ในขณะที่ปริมาณกลีเซอรินที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงแท่งให้มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนสูงสุด คือ ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ: คุณสมบัติทางกายภาพ, คุณสมบัติทางความร้อน, อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์, เชื้อเพลิงแท่ง, กากปาล์มสาคุ, กลีเซอริน

Abstract

The aim of this research was to investigate the effect of carbonized temperature, ranging from 300 to 500°C, and glycerin content, in ratios of 0, 20, 40, and 60% of weight, on the physical and thermal properties of briquette fuel made from sago palm residue. It was found that the physical properties, in terms of shatter index and durability, were enhanced when both the carbonized temperature

and glycerin content increased. Moreover, the carbonized temperature and glycerin content directly affected the carbon content of the briquette fuel. Improvement of the thermal property, in relation to the heating value, resulted from increased carbon content. The heating value increased as the carbon content increased due to its combustible component giving energy during the combustion process. It was found that the optimum carbonized temperature for converting sago palm residue to briquette fuel was at 400°C, whilst the optimum glycerin content for briquette fuel producing the best physical and thermal properties was at 60% weight.

Keywords: physical property, thermal property, briquette fuel, carbonized temperature, sago palm residue, glycerin

1. บทนำ

ในปัจจุบันมนุษย์มีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกปีซึ่งตรงข้ามกับแหล่งพลังงานที่มีไม่เพียงพอต่ออัตราการใช้ จากอัตราการใช้ที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้มีการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยแหล่งพลังงานทดแทนจากสารชีวมวลถือเป็นแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นแหล่งพลังงานที่ตอบสนองต่อความต้องการของมนุษย์ได้ยาวนาน เนื่องจากพลังงานจากสารชีวมวลเป็นพลังงานที่เกิดมาจากเศษวัสดุเหลือทิ้งต่าง ๆ ที่ได้หลังฤดูกาลเก็บเกี่ยวโดยจะถูกกำจัดด้วยการเผาไหม้หรือการฝังกลบ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงทำให้มีการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าหรือเทียบเท่าพลังงานฟอสซิล

การนำเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Asavatesanupap, C., et al., 2010) รวมไปถึงวัสดุเหลือทิ้งในครัวเรือน เช่น เศษอาหาร (Yunbo, Z., et al., 2018) มาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้านพลังงานด้วยการเปลี่ยนให้เป็นเชื้อเพลิงแท่งจะเห็นว่าการผลิตเชื้อเพลิงแท่งจากเศษอาหารโดยมีกากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสานจะให้เชื้อเพลิงแท่งที่มีคุณสมบัติเชิงกลด้านการต้านทานแรงอัด (Compressive resistance) และความต้านทานการกระแทก (Impact resistance) เพิ่มขึ้น รวมไปถึงความหนาแน่นของเชื้อเพลิงแท่งที่ได้ยังสูงขึ้นอีกด้วย มากไปกว่านั้นเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากเปลือกทุเรียนและชานอ้อยโดยมีกลีเซอรินเป็นตัวเชื่อมประสาน จะให้คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ไม่มีกลีเซอรินคิดเป็นร้อยละมากกว่า 75 (Asavatesanupap, C., et al., 2010) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงให้ความสนใจในการนำกลีเซอรินจากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับผลิตเชื้อเพลิงแท่งจากกากปาล์มสาคุ เนื่องจากกลีเซอรินนี้มีค่าความร้อนสูงกว่างานวิจัยก่อนหน้าคิดเป็นร้อยละ 17.39 (Asavatesanupap, C., et al., 2010)

ปาล์มสาคุจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในภูมิภาคทางตอนใต้ของประเทศไทยที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ลำต้นเนื่องจากในลำต้นของปาล์มสาคุมีองค์ประกอบของแป้งสูงเมื่อทำการแยกแป้งออกจากลำต้นแล้ว จะเหลือกากและเปลือกนอกอยู่เป็นจำนวนมาก กากและเปลือกนอกของปาล์มสาคุถือเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมด้านการส่งกลิ่นเหม็นและเป็นแหล่งเพาะเชื้อโรค เนื่องจากกากปาล์มสาคุมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

จึงทำให้นักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสนใจในการนำกากปาล์มสาकुมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านอาหารสัตว์ และด้านพลังงาน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการนำกากปาล์มสาकुมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานมักนำไปเผาไหม้โดยตรงซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม คือ มีการปล่อยแก๊สพิษ เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดปรากฏการณ์การเกิดฝนกรด และปรากฏการณ์ภาวะโลกร้อนในบรรยากาศ ตามลำดับ รวมไปถึงเป็นสาเหตุของปัญหาหมอกควัน จึงทำให้นักวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์กากปาล์มสาकुเหลือทิ้งด้านพลังงานในรูปของเชื้อเพลิงแท่งโดยการนำกากปาล์มสาकुมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ก่อน จากนั้นอัดขึ้นรูปให้อยู่ในลักษณะแท่งทรงกระบอก

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 กากปาล์มสาकुที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในสายพันธุ์ Metroxy lonsagus Rottb (ยอดสีแดง) จากสวนยายอุย ตำบลควนขนุน อำเภอควนขนุน จังหวัดพัทลุง
- 2.2 ตัวเชื่อมประสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ กลีเซอริน จากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- 2.3 อัตราส่วนของกลีเซอรินที่ศึกษา คือ ร้อยละ 0 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมกากปาล์มสาकु

กากปาล์มสาकुที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากสวนยายอุย ตำบลควนขนุน อำเภอควนขนุน จังหวัดพัทลุง นำกากปาล์มสาकुที่ได้ตากภายใต้แสงแดดเพื่อกำจัดความชื้นและน้ำเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำกากปาล์มสาकुแห้งมาลดขนาดด้วยเครื่องบด จากนั้นนำไปคัดขนาดด้วยตะแกรงคัดขนาด 60 เมช จะได้ผงกากปาล์มสาकु และนำไปเก็บในโถสุญญากาศความชื้นก่อนนำไปใช้งาน

3.2 การเปลี่ยนกากปาล์มสาकुเป็นเชื้อเพลิง

การเปลี่ยนกากปาล์มสาकुเป็นเชื้อเพลิงนั้นเป็นการนำผงกากปาล์มสาकुที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงคัดขนาด 60 เมช เมาภายใต้สภาวะจำกัดอากาศ ณ อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง เรียกว่า กระบวนการคาร์บอนไนซ์ จะได้ผงเชื้อเพลิงของกากปาล์มสาकुที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลแดงจนถึงสีดำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ จากนั้นนำผงเชื้อเพลิงของกากปาล์มสาकुที่ได้ไปทดสอบหาองค์ประกอบแบบปริมาตร (Proximate analysis) ตามมาตรฐานของประเทศจีนในการวิเคราะห์แบบปริมาตรของเชื้อเพลิงแข็ง (GB/T28731-2012) ตามขั้นตอนที่ระบุในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Yunbo, A., et al., 2018)

3.3 การผลิตเชื้อเพลิงแท่ง

การผลิตเชื้อเพลิงแท่งเป็นการนำผงเชื้อเพลิงของกากปาล์มสาकुที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส ผสมกับกลีเซอรินในอัตราส่วนระหว่างร้อยละ 0 - 60 โดยน้ำหนัก เมื่อเตรียมส่วนผสมระหว่างผงเชื้อเพลิงกับกลีเซอรินครบทุกอัตราส่วนแล้วจะนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ณ แรงดัน 20 เมกะปาสคาล ให้อยู่ในลักษณะแท่งทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร (mm) และมีความหนา 9 มิลลิเมตร (ภาพที่ 1)

3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของเชื้อเพลิงแท่ง

คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของเชื้อเพลิงแท่งเป็นการนำเชื้อเพลิงแท่งที่เตรียมได้มาทดสอบการแตกร่วน (Shatter capability) ความทนทาน (Durability, D_r) ความแน่นของเชื้อเพลิงแท่ง (Densification) และอัตราส่วนผลได้น้ำหนักของเชื้อเพลิงแท่ง (Mass yield ratio, η_m) ตามวิธีมาตรฐานการทดสอบเชื้อเพลิงแข็งที่ได้ระบุไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า (Gendek, A., et al., 2018; Qian, W., et al., 2017; Yunbo, Z., et al., 2018) ส่วนคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของเชื้อเพลิงแท่งนั้นจะทดสอบค่าความร้อน (Heating value) ด้วยเครื่องทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (IKA[®] Calorimeter System C5000 control, Germany) อัตราส่วนผลได้พลังงานของเชื้อเพลิงแท่ง (Energy yield ratio, η_E) และความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) ตามวิธีมาตรฐานการทดสอบเชื้อเพลิงแข็งที่ได้ระบุไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า (Qian, W., et al., 2017; Yunbo, Z., et al., 2018) ในการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของเชื้อเพลิงแท่งนั้นจะใช้เชื้อเพลิงแท่งทั้งหมด 5 แท่งต่อ 1 การทดสอบ ต่อ 1 อุณหภูมิคาร์บอน และต่อ 1 อัตราส่วนของกลีเซอริน โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของเชื้อเพลิงแท่งเป็นสภาวะมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 - 65 ในงานวิจัยนี้หาความคลาดเคลื่อนของข้อมูลด้วยวิธีความคลาดเคลื่อนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ภาพที่ 1 (ก) แท่งกากปาล์สาคูก่อนกระบวนการคาร์บอน และเชื้อเพลิงแท่งที่เตรียมได้จากกระบวนการคาร์บอน ณ อุณหภูมิ (ข) 300 องศาเซลเซียส (ค) 400 องศาเซลเซียส และ (ง) 500 องศาเซลเซียส

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงแท่ง

1) การแตกร่วนและความทนทาน

สมบัติเชิงกลของเชื้อเพลิงแท่งจะแสดงในรูปดัชนีการแตกร่วน (Shatter index) และความทนทาน โดยดัชนีการแตกร่วนและความทนทานจะเป็นตัวแปรที่บอกถึงความคงตัวของเชื้อเพลิงแท่งขณะทำการขนส่งรวมถึงความทนต่อแรงกระแทกที่เกิดจากการขนย้ายเพื่อการจัดเก็บ (Yunbo, Z., Et al., 2018) ดัชนีการแตกร่วนและความทนทานของเชื้อเพลิงแท่งที่เตรียมในงานวิจัยนี้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนเพิ่มขึ้น

สำหรับดัชนีการแตกร่วนและความทนทานของเชื้อเพลิงแท่งที่มีการเติมกลีเซอรินนั้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกับอุณหภูมิคาร์บอน คือดัชนีการแตกร่วนและความทนทานของเชื้อเพลิง

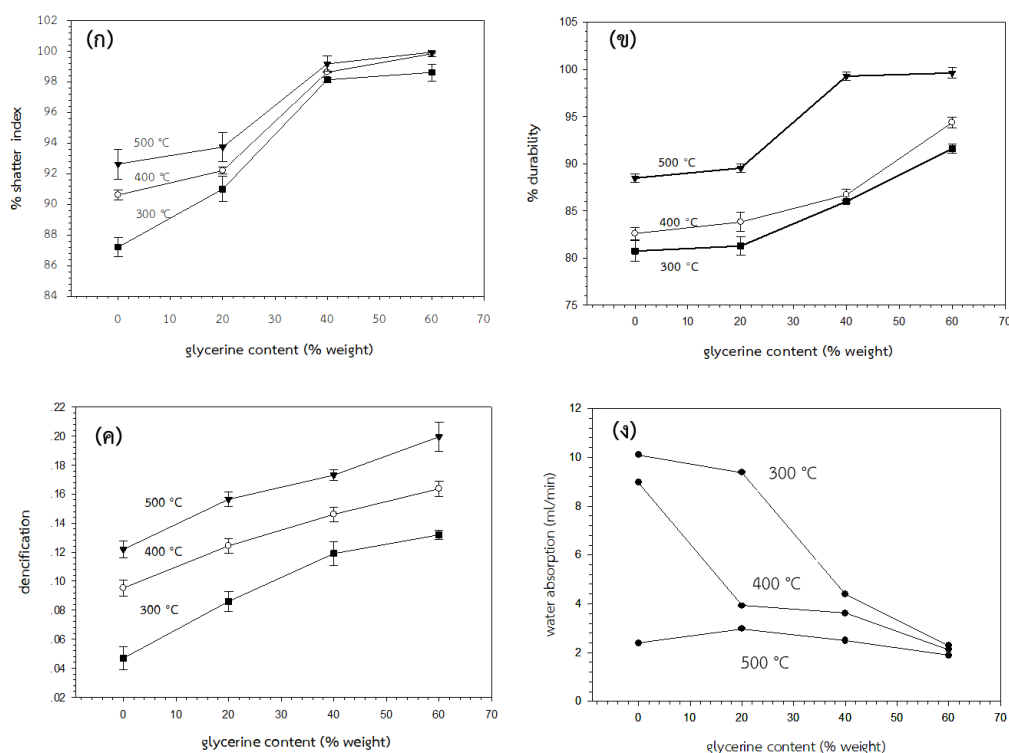
เชื้อเพลิงแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรินเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนกลีเซอรินที่มากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จะได้เชื้อเพลิงแห้งที่มีดัชนีการแตก่วนและความทนทานมากกว่าร้อยละ 98 (ภาพที่ 2 (ก) และ (ข)) ซึ่งเป็นร้อยละที่ยอมรับได้เนื่องจากมีค่ามากกว่าดัชนีการแตก่วน และความทนทานของถ่านอัดแท่งที่ขายตามท้องตลาด (ดัชนีการแตก่วน และความทนทานของถ่านอัดแท่งที่ขายตามท้องตลาด คือ ร้อยละ 90 และ 80 ตามลำดับ (Antwi-Boasiako, C., & Acheampong, B.B., 2016)) ส่วนเชื้อเพลิงแห้งกลุ่มที่มีการเติม และไม่เติมกลีเซอรินพบว่าเชื้อเพลิงแห้งที่ไม่มีการเติมกลีเซอรินจะมีดัชนีการแตก่วนต่ำแสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงแห้งมีความแข็งแรงต่ำ คือมีลักษณะร่วนและแตกกระจายเมื่อถูกปล่อยในแนวตั้งที่ระยะทาง 1 เมตร บนพื้นคอนกรีต และ 1.5 เมตร บนพื้นโลหะ แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงแห้งมีความแข็งแรงต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมกลีเซอรินในอัตราส่วนต่าง ๆ จะเห็นว่าเชื้อเพลิงแห้งมีความแข็งแรงและมีความคงรูปมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของดัชนีการแตก่วนและความทนทาน (ภาพที่ 2 (ก) และ (ข)) การนำกลีเซอรินมาเป็นตัวเชื่อมประสานในเชื้อเพลิงแห้งทำให้การจัดเก็บ และการเคลื่อนย้ายเชื้อเพลิงแห้งในสภาวะที่ต้องสัมผัสกับแสงแดดเป็นไปด้วยความสะดวกโดยไม่เกิดความเสียหาย เนื่องจากกลีเซอรินเป็นสสารที่มีจุดเดือดและความหนืดมากกว่าน้ำ (Satpathy, P., et al., 2014) จึงไม่เกิดการระเหยระหว่างการจัดเก็บและการขนส่ง อีกทั้งยังคงคุณสมบัติของการเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดี ด้วยการทำให้อนุภาคคาร์บอนของเชื้อเพลิงแห้งยึดติดกันได้ดีและมีความแน่นขึ้น

2) ความแน่น

ความแน่นของเชื้อเพลิงแห้งเป็นคุณสมบัติที่มีความสอดคล้องโดยตรงกับดัชนีการแตก่วนและความทนทาน คือเชื้อเพลิงแห้งที่มีดัชนีการแตก่วนและความทนทานสูงจะให้ค่าความแน่นสูง (ภาพที่ 2 (ค)) อีกทั้งความแน่นของเชื้อเพลิงแห้งส่งผลต่อความสม่ำเสมอของการเผาไหม้เมื่อนำไปใช้งาน โดยเชื้อเพลิงแห้งที่มีความแน่นต่ำหรือมีความหนาแน่นต่ำจะมีอัตราการให้ความร้อนคงที่และให้พลังงานความร้อนสูงเนื่องจากเชื้อเพลิงแห้งที่มีความแน่นต่ำจะมีขนาดช่องว่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนใหญ่ส่งผลให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างทั่วถึงเนื่องจากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแทรกเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนได้มาก จึงทำให้เชื้อเพลิงแห้งเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ คือหลังการให้ความร้อนกับแท่งเชื้อเพลิงเพื่อต้มน้ำให้เดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วจะไม่มีผงคาร์บอนเหลืออยู่ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณเถ้าสูงสังเกตจากสีของเถ้าหลังจากการเผาไหม้แท่งเชื้อเพลิงขณะที่นำไปทดสอบประสิทธิภาพการให้ความร้อนที่อ่อนลงจากสีดำเป็นสีเทา (ภาพที่ 3 (ข)) (Qian, W., et al., 2017) แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการให้ความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำจะสั้นกว่าสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำ (ตารางที่ 1) มากไปกว่านั้นเชื้อเพลิงแห้งที่ผลิตได้ยังมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 600 - 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเป็นค่าที่มากกว่าเชื้อเพลิงแห้งที่ผลิตจากไม้ยางพาราโดยมีกากไขมันและกากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสานคิดเป็นร้อยละประมาณ 8.11 - 33.33 ซึ่งความหนาแน่นจะส่งผลต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแห้งในการต้มน้ำให้เดือดมากกว่าซึ่งจะอธิบายในต่อไป

การทดสอบการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงแห้งจากการพิจารณาสีของเชื้อเพลิงแห้ง (ภาพที่ 3 (ก)) กับสีของเถ้าหลังจากการทดสอบประสิทธิภาพการให้ความร้อน (ภาพที่ 3 (ข)) และสีของเถ้าหลังกระบวนการวิเคราะห์แบบปริมาณ (ภาพที่ 3 (ค)) พบว่าสีเถ้าของเชื้อเพลิงแห้ง

ที่มีความแน่นต่ำมีสีใกล้เคียงกัน คือ สีเทาอ่อนอาจแสดงถึงการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงที่เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามสีของผงถ่านจากเชื้อเพลิงแท่งที่มีความแน่นสูงจะมีสีเทาเข้มกว่าผงถ่านหลังการวิเคราะห์แบบปริมาณ ซึ่งหมายถึงหลังการให้ความร้อนแท่งเชื้อเพลิงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการให้ความร้อนแล้วยังมีอนุภาคคาร์บอนบางส่วนไม่ถูกเผาไหม้ จึงทำให้ผงถ่านมีสีเข้มนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเชื้อเพลิงแท่งที่มีความแน่นต่ำจะมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าแท่งเชื้อเพลิงที่มีความแน่นสูง

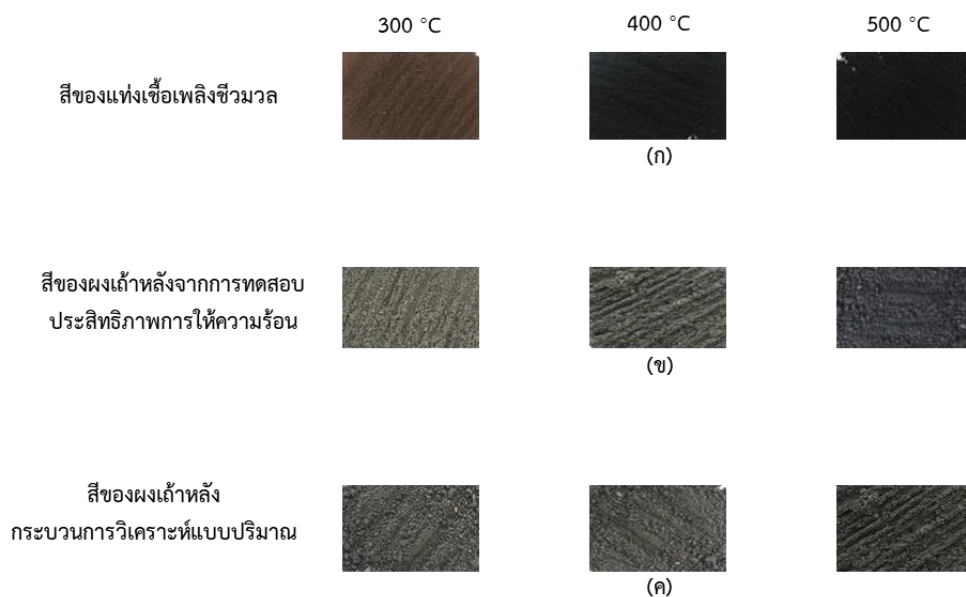


ภาพที่ 2 (ก) ค่าดัชนีการแตกร่วน (ข) ความทนทาน (ค) ความแน่น และ (ง) อัตราการซึมผ่านน้ำของเชื้อเพลิงแท่งจากกากปาล์มสาคุที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 300 - 500 องศาเซลเซียส โดยมีกลีเซอรินเป็นตัวเชื่อมประสาน

3) อัตราส่วนผลได้น้ำหนัก

อัตราส่วนผลได้น้ำหนักของผงเชื้อเพลิงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3) เนื่องจากกากปาล์มสาคุเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบพื้นฐาน คือเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน เมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เพื่อเปลี่ยนกากปาล์มสาคุเป็นผงเชื้อเพลิงแตกต่างกันส่งผลให้อัตราการสลายตัวด้วยความร้อนของแต่ละองค์ประกอบในกากปาล์มสาคุเพื่อเปลี่ยนเป็นธาตุคาร์บอนมีความแตกต่างกันด้วย (Qian, W., et al., 2017) เนื่องจากช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวของแต่ละองค์ประกอบมีความแตกต่างกัน (Liu, Z., et al., 2018) ดังนั้น ณ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ต่ำ คือ 300 องศาเซลเซียส อัตราการสลายตัวทางความร้อนของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินในกากปาล์มสาคุต่ำส่งผลให้เชื้อเพลิงแท่งที่ได้มีสีน้ำตาลแดง (ภาพที่ 1) แสดงให้เห็นว่า ณ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ต่ำยังมีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินบางส่วนที่เกิด

การสลายตัวไม่สมบูรณ์และหลงเหลืออยู่ จึงเป็นสาเหตุทำให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวและร้อยละของธาตุคาร์บอนต่ำ (ตารางที่ 1) ซึ่งแตกต่างจากเชื้อเพลิงแท่งที่ผลิต ณ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์สูง คือ เชื้อเพลิงแท่งที่ได้มีสีที่เข้มขึ้นจากสีน้ำตาลเข้มจนถึงสีดำเนื่องจากอัตราการสลายตัวทางความร้อนของแต่ละองค์ประกอบในกากปาล์มสาคุสูง จึงทำให้เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินในกากปาล์มสาคุสลายตัวได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และทำให้ทุกองค์ประกอบถูกเปลี่ยนเป็นธาตุคาร์บอนได้อย่างสมบูรณ์ สัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 1)

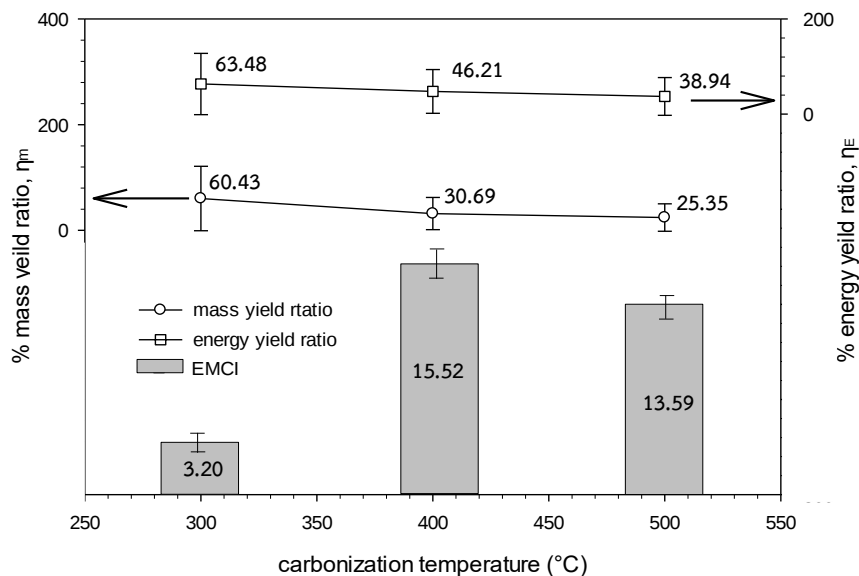


ภาพที่ 3 สีของ (ก) เชื้อเพลิงแท่ง (ข) ผงเถ้าหลังจากการทดสอบประสิทธิภาพการให้ความร้อน และ (ค) ผงเถ้าหลังกระบวนการวิเคราะห์แบบปริมาณ ที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 300 - 500 องศาเซลเซียส

5) อัตราส่วนผลได้ของพลังงาน

อัตราส่วนผลได้พลังงานเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิงหลังกระบวนการคาร์บอนไนซ์กับค่าความร้อนของแท่งกากปาล์มสาคุก่อนกระบวนการคาร์บอนไนซ์ อัตราส่วนผลได้พลังงานของเชื้อเพลิงแท่งมีแนวโน้มเหมือนกับอัตราส่วนผลได้น้ำหนัก คือ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4) ส่วนผลต่างระหว่างอัตราส่วนผลได้พลังงานกับอัตราส่วนผลได้น้ำหนักนั้นเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงสถานะที่เหมาะสมในการพัฒนากากปาล์มสาคุเป็นเชื้อเพลิงแท่ง ด้วยกระบวนการคาร์บอนไนซ์ซึ่งนิยามด้วยค่า EMCI (energy-mass co-benefit index) (Ke-Miao, L., et al., 2012) ค่า EMCI มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้นจาก 300 เป็น 400 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์มากกว่า 400 องศาเซลเซียส ค่า EMCI มีค่าลดลง ค่า EMCI ที่มากที่สุดพบที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 400 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4) แสดงให้เห็นว่าสถานะที่เหมาะสมต่อการพัฒนากากปาล์มสาคุให้เป็นเชื้อเพลิงแท่ง คือ สถานะ ณ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 400

องศาเซลเซียส และ ณ สภาวะที่เหมาะสมนี้จะได้เชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณสมบัติทางกายภาพดีที่สุด สำหรับคุณสมบัติทางความร้อนนั้นจะทำการศึกษาต่อไป



ภาพที่ 4 อัตราส่วนผลได้ของน้ำหนั อัตราส่วนผลได้ของพลังงาน และ ค่า EMCI ของเชื้อเพลิงแข็ง จากกากปาล์มสาकुที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 300 - 500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 องค์ประกอบแบบปริมาณ และองค์ประกอบแบบละเอียดยของกลีเซอรินเชื้อเพลิงแข็งจาก กากปาล์มสาकुกลุ่มที่มีการเติมกลีเซอรินและไม่มีการเติมกลีเซอริน

carbonized temperature (°C)	glycerine content (%weight)	proximate analysis				ultimate analysis					Heating value (MJ/kg)
		% MC	% VM	% ASH	% FC	% C	% O	% H	% N	% S	
300	—*	3.24	87.07	3.85	5.84	37.49	55.77	6.49	0.190	0.061	13.15
	—**	11.47	85.17	3.36	N/A	46.39	38.48	9.60	< 0.01	< 0.01	21.87
	0	4.66	76.24	5.86	13.24	47.79	32.85	4.14	0.566	0.104	16.06
400	0	2.17	37.14	10.37	50.32	58.48	40.77	3.89	0.704	0.156	18.63
500	0	2.27	29.80	12.97	54.96	54.52	23.35	2.71	0.621	0.129	18.94
300	60	11.46	83.82	3.48	1.24	41.92	40.92	6.65	0.210	< 0.01	17.13
400	60	3.18	62.14	8.44	26.24	56.39	23.93	5.05	0.390	< 0.01	22.15
500	60	3.98	79.91	11.04	5.07	53.89	23.39	4.72	0.390	0.07	21.00

หมายเหตุ

* กากปาล์มสาकुก่อนผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์

** กลีเซอริน

%MC คือ ร้อยละความชื้น

%C คือ ร้อยละธาตุคาร์บอน

%VM คือ ร้อยละสารอินทรีย์ระเหยง่าย

%H คือ ร้อยละธาตุไฮโดรเจน

%ASH คือ ร้อยละเถ้า

%O คือ ร้อยละธาตุออกซิเจน

%FC คือ ร้อยละคาร์บอนคงตัว

%N คือ ร้อยละธาตุไนโตรเจน

%S คือ ร้อยละธาตุซัลเฟอร์

4.2 คุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงแท่ง

ในการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงแท่งนั้นจะนำเชื้อเพลิงแท่งที่มีปริมาณกลีเซอรินในอัตราส่วนสูงสุด คือ ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักเป็นกลุ่มตัวอย่างหลักเนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงแท่งที่ให้คุณสมบัติทางกายภาพดีที่สุด ดังนั้นในการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนจึงเป็นการทดสอบระหว่างเชื้อเพลิงแท่งที่มีการเติมกลีเซอรินในปริมาณร้อยละ 60 โดยน้ำหนักและไม่เติมกลีเซอรินเท่านั้น โดยให้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแท่งที่เติมและไม่เติมกลีเซอริน ณ สภาวะอุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์เดียวกันแท่งเชื้อเพลิงที่มีการเติมกลีเซอรินจะให้ค่าความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงแท่งที่ไม่มีการเติมกลีเซอริน เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงที่มีการเติมกลีเซอรินจะมีองค์ประกอบของเถ้าลดลงซึ่งเถ้าเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ให้พลังงานเมื่อใช้งานด้วยการนำแท่งเชื้อเพลิงไปเผาไหม้ (ตารางที่ 1) ในขณะที่กลีเซอรินมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ระเหยได้สูงจึงถือได้ว่ากลีเซอรินเป็นองค์ประกอบที่ให้พลังงาน (Asavatesanupap, C. and Malee, S., 2010) ดังนั้นเชื้อเพลิงแท่งที่มีองค์ประกอบของกลีเซอริน จะให้ค่าความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงแท่งที่ไม่มีการเติมกลีเซอรินมากไปกว่านั้น เชื้อเพลิงแท่งที่มีการเติมกลีเซอรินจะมีความสามารถในการจุดติดไฟสูงหรือมีความสามารถในการจุดติดไฟได้ง่ายสัมพันธ์กับปริมาณขององค์ประกอบแบบปริมาณชนิดสารอินทรีย์ระเหยได้สูง (ตารางที่ 1) ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยได้ คือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเบาที่อยู่ในเชื้อเพลิงแท่งและทำหน้าที่เป็นตัวกลางทำให้เชื้อเพลิงแท่งติดไฟก่อนเกิดการเผาไหม้คาร์บอนที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิง โดยสารอินทรีย์ระเหยได้นั้นประกอบด้วย มีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน เป็นต้น มีคุณสมบัติเป็นแก๊สเชื้อเพลิง

สำหรับเชื้อเพลิงแท่งที่มีการเติมกลีเซอรินในปริมาณที่เท่ากัน จะเห็นว่า ณ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 300 เป็น 400 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแท่งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุคาร์บอนและคาร์บอนคงตัว ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุคาร์บอนส่งผลให้แท่งเชื้อเพลิงมีระยะเวลาในการจุดติดไฟยาวนาน หลังจากกระบวนการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์เสร็จสิ้นแสดงให้เห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงสามารถเก็บสะสมความร้อนไว้ในตัวเองได้นานขึ้นสอดคล้องกับความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 23.28 (ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงแท่ง ณ อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์ 300 องศาเซลเซียส คือ 10,421 MJ/m³) (Bo-Jhih, Lin., et al., 2017) อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิคาร์บอนไนซ์สูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแท่งมีค่าลดลงเนื่องจากมีองค์ประกอบของส่วนที่ไม่ให้พลังงานเพิ่มมากขึ้น

จากการทดสอบการใช้งานเชื้อเพลิงแท่งด้วยการต้มน้ำปริมาตร 10 มิลลิลิตร ให้เดือด ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิห้องขณะทำการศึกษาคือ 30 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณเชื้อเพลิงแท่งที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือดแตกต่างกัน กล่าวคือ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแท่งที่ผลิต ณ อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 400 องศาเซลเซียส น้อยที่สุด คือ 8.48 กรัม ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณเชื้อเพลิงแท่งที่ผลิต ณ อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 500 องศาเซลเซียส ในขณะที่ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงแท่งที่ผลิต ณ อุณหภูมิการคาร์บอนไนซ์ 300 องศาเซลเซียส มีมากกว่า คือ 12.83 กรัม แสดงให้เห็นว่าการใช้เชื้อเพลิงแท่งในปริมาณน้อยสำหรับการทำให้น้ำปริมาตร 10 มิลลิลิตร เดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส บ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บสะสมความร้อนไว้ในตัวเองภายหลัง

กระบวนการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์เสร็จสิ้น ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นของพลังงานและค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแห้งที่เพิ่มสูงขึ้น (Tantisattayakul, T., et al., 2015) จากความสามารถในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงแห้งที่มีการเติมกลีเซอริน จะเห็นว่าเชื้อเพลิงแห้งมีความสามารถในการติดไฟได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารอินทรีย์ระเหยได้สูง ในขณะที่ระยะเวลาในการให้ความร้อนต่ำ ซึ่งระยะเวลาในการให้ความร้อนทดสอบได้จากการให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงแห้ง จนเกิดการเผาไหม้สังเกตสีและการลามของสะเก็ดไฟบนแท่งเชื้อเพลิงจากนั้น จับเวลาจนกระทั่งอนุภาคคาร์บอนเผาไหม้หมดจะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงแห้ง ที่มีสารอินทรีย์ระเหยได้ในปริมาณสูงหรือมีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำ คือ 11.13 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาในการให้ความร้อนสั้นกว่าเชื้อเพลิงแห้งที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงประมาณ 2.65 เท่า

5. สรุปผลการวิจัย

การผลิตเชื้อเพลิงแห้งจากกากปาล์มสาคุโดยใช้กลีเซอรินเป็นตัวเชื่อมประสานและอัดให้เป็นแท่งด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ณ แรงดัน 20 เมกะปาสกาล จากปัจจัยของอุณหภูมิคาร์บอนระหว่าง 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนสามารถสรุปได้ว่าเชื้อเพลิงแห้งที่ผลิต ณ อุณหภูมิคาร์บอนที่ 400 องศาเซลเซียส และมีปริมาณกลีเซอรินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักจะมีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนดีที่สุดแสดงในรูปของดัชนีการแตกร่วนและความทนทานสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแน่นมากที่สุด อีกทั้งยังได้เชื้อเพลิงแห้งที่มีค่าความร้อนสูง มากไปกว่านั้นสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการคาร์บอนซีในการเปลี่ยนกากปาล์มสาคุเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล คือสภาวะที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และการใช้กลีเซอรินเป็นตัวเชื่อมประสานยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงแห้งอีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ในการสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ และเครื่องมือในการตรวจวัดรวมทั้งสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณสวนยายฉุย ตำบลควนขนุน อำเภอควนขนุน จังหวัดพัทลุง ที่เอื้อเฟื้อกากปาล์มสาคุสำหรับการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Antwi-Boasiako, C., & Acheampong, B.B. (2016). Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. **Biomass and Bioenergy**, 85, 144-152.
- Asavatesanupap, C., & Malee, S. (2010). A Feasibility Study on Production of Solid Fuel from Glycerol and Agricultural Wastes. **International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies**, 1(1), 43-51.

- Bo-Jhih, Lin., Edgar, A.S., Baptiste, C., Wei-Hsin, C., Anélie, P., Patrick, R., & Mathieu, P. (2017). Prediction of higher heating values (HHVs) and energy yield during torrefaction via kinetics. **Energy Procedia**, **158**, 111-116.
- Gendek, A., Aniszewske, M., Malatak., J., & Velebil, J. (2018). Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. **Biomass and Bioenergy**, **117**, 173-179.
- Ke-Miao, L., Wen-Jhy, L., Wei-Hsin, C., Shih-Hsien, L., & Ta-Chang, L. (2012). Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. **Bioresource Technology**, **123**, 98-105.
- Liu, Z., Zhan F., Yan, S., Tian, L., Wang, H., Liu, H., Wang, H., & Hu, J. (2018). Effects of temperature and low-concentration oxygen on pine wood sawdust briquettes pyrolysis: Gas yields and biochar briquettes physical properties. **Fuel Processing Technology**, **177**, 228-236.
- Qian, W., Kuihua, H., Jie, G., Hui, L., & Chunmei, L. (2017). The pyrolysis of biomass briquettes: Effect of pyrolysis temperature and phosphorus additives on the quality and combustion of bio-char briquettes. **Fuel**, vol. **199**, 488-496.
- Satpathy, P., Thosar A., & Rajan, A.P. (2014). Green technology for Glycerol waste from Biodiesel plant. **International journal of current microbiology and applied sciences**, **3(1)**, 730-739.
- Tantisattayakul, T., Phongkasem, S., Phooya, P., & Taibangury, P. (2015). Community-Based Renewable Energy from Biomass Briquettes Fuel from Coconut Leaf. **Journal of Science and Technology**, **23(3)**, 418-431. (in Thai)
- Yunbo, Z., Tengfei, W., Yun, Z., Chuan, P., Bei, W., Xue, L., Caiting, L., & Guangming, Z. (2018). Production of fuel pellets via hydrothermal carbonization of food waste using molasses as a binder. **Waste Management**, **77**, 5-194.