http://journal.rmutp.ac.th/

ผลของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟต่อสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

จุฑาภรณ์ ชนะถาวร[1]* และ กนกวรรณ ภูมิวณิชกิจ[2]

[1] วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

[2] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

[1] 63 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

[2] 99 หมู่ 8 ตำบลโคกเคียน อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส 96000

รับบทความ 15 พฤษภาคม 2561 แก้ไขบทความ 22 สิงหาคม 2561 ตอบรับบทความ 29 สิงหาคม 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ โดยทำการศึกษาหาปริมาณแป้งที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในการขึ้นรูปเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ทำการคัดเลือกสภาวะการทดลองที่ดีที่สุด จากนั้นทำการศึกษาสัดส่วนของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟที่มีผลต่อสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด สัดส่วนที่ศึกษา 5 สัดส่วน (100 : 0, 75 : 25, 50 : 50, 25 : 75 และ 0 : 100) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบและสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดการทดลองพบว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวเชื่อมประสานที่ร้อยละ 20 กับกากกาแฟ ในสัดส่วน 100 : 0 จะมีผลต่อสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ดีที่สุด ชีวมวลอัดเม็ดที่ผลิตจากกากกาแฟมีคุณภาพสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟเพียงอย่างเดียว ซึ่งการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟมีค่าสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงสูงสุด คือ มีค่าความหนาแน่น 0.9699 ± 0.0045 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าดัชนีการแตกร่วนร้อยละ 92.6510 ± 0.2102 ค่าสมบัติทางความร้อน 17.2772 ± 0.0319 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และประสิทธิภาพการใช้งานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดร้อยละ 16.59 ± 0.02 ตามลำดับ ส่วนผลการศึกษาการผสมระหว่างเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟที่ใช้วัตถุดิบตั้งต้นทั้ง 2 ชนิด พบว่าสัดส่วนการผสมที่ดีที่สุดคือ 25 : 75 ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ ทำให้เชื้อเพลิงมีคุณภาพสูงสุด คือให้ค่าสมบัติทางความร้อนและประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน 17.1544 ± 0.017 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และร้อยละ 16.48 ± 0.01 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความชื้น พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานชีวมวลที่กำหนด สรุปได้ว่าเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟมีสมบัติทางกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน สามารถนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ ถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของเชื้อเพลิงทางเลือกให้กับประเทศได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : เชื้อเพลิงอัดเม็ด; เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ; กากกาแฟ; แป้งมันสำปะหลัง

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร.: +669 9748 5459, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: winchana.jc@gmail.com*

http://journal.rmutp.ac.th/

Effect of Coffee Silverskin and Spent Coffee Ground on Properties of Biomass Pellet Fuel

Jutaporn Chanathaworn[1]* and Kanokwan Phumivanichakit[2]

[1] School of Renewable Energy, Maejo University

[2] Faculty of Science and Technology, Princess of Naradhiwas University

[1] 63 Nong Han, Sansai, ChiangMai, 50290

[2] 99 Moo 8, Khok Kian, Mueang, Narathiwat, 96000

Received 15 May 2018 ; Revised 22 August 2018; Accepted 29 August 2018

Abstract

The objective is to produce the biomass pellet fuel from coffee silverskin and spent of coffee grounds. To study the percentage of cassava powder as binder was mixed at 5, 10, 15 and 20% by weight and the best condition was chosen. Then, to study the ratio of coffee silverskin and spent of coffee grounds was 5 ratios (100 : 0, 75 : 25, 50 : 50, 25 : 75 and 0 : 100) on propertied of biomass pellet fuel. Characteristics and properties of raw materials and biomass pellet fuel were analyzed. The results found that the highest property of the biomass pellet fuel was 20% of cassava powder as binder. The biomass pellet from spent coffee grounds as main component was higher quality than coffee silverskin. The biomass pellet from spent coffee grounds was the maximum fuel property. The bulk density was 0.9699 ± 0.0045 g/ cubic cm, shatter index was 92.6510 ± 0.2102%, heating value was 17.2772 ± 0.0319 MJ/kg and heat utilization efficiency was 16.59 ± 0.02%. The results from the part of coffee silverskin and spent of coffee grounds ratio showed that the best ratio from 2 raw materials was 25 : 75 that gave the highest quality. The heating value was 17.1544 ± 0.017 MJ/kg and heat utilization efficiency was 16.48 ± 0.01%. In addition, the study also discovered that the biomass pellet had moisture contents in the levels acceptable under biomass standards. Thus, in summary, the coffee silverskin and spent coffee grounds had physical property and fuel property according to the standardization to be made into biomass pellet fuel. It considered to be one of alternative fuels in country permanently.

Keywords : Biomass Pellet Fuel; Coffee Silverskin; Spent Coffee Grounds; Cassava Powder

** Corresponding Author. Tel.: +669 8748 5459, E-mail Address: winchana.jc@gmail.com*

1. บทนำ

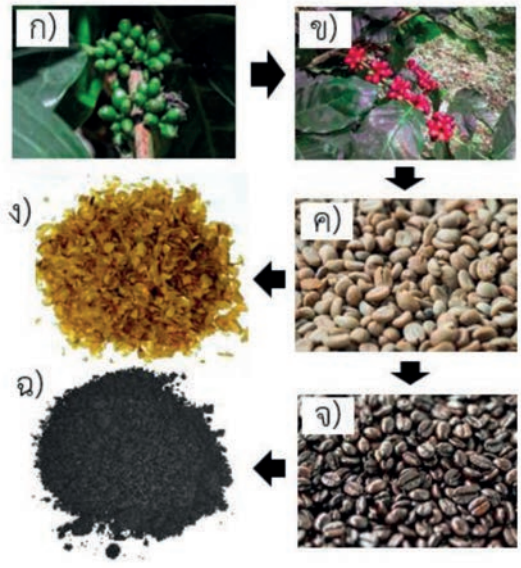
การประกอบธุรกิจกาแฟสดในประเทศไทยมีแนวโน้มการเติบโตสูงขึ้น เนื่องจากการพัฒนากรรมวิธีการคั่วกาแฟ (Coffee Roast) ที่ส่งผลต่อคุณภาพและรสชาติของกาแฟ ทำให้รสชาติของกาแฟสดมีความหลากหลาย และมีกลิ่นหอมของกาแฟ ทำให้คนไทยส่วนใหญ่หันมาบริโภคกาแฟสดกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น พื้นที่ปลูกกาแฟส่วนใหญ่อยู่ทางภาคเหนือ เนื่องจากสภาพภูมิประเทศเหมาะสมในการเจริญเติบโตของกาแฟสายพันธุ์อะราบิกา (Arabica) ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมนำมาแปรรูปเป็นกาแฟสด ถือเป็นหนึ่งในสายพันธุ์ที่สำคัญจากสายพันธุ์กาแฟทั้งหมดประมาณ 60 สายพันธุ์ สำหรับกระบวนการผลิตกาแฟในแต่ละครั้งนั้น ส่วนที่เหลือทิ้งจัดเป็นวัสดุจำพวกชีวมวล ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกะลากาแฟหรือเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟที่เกิดจากการนำผลกาแฟที่สุกเต็มที่ผ่านการแยกเปลือกและเมล็ด นำเมล็ดมาผ่านกระบวนการสีเพื่อแยกเปลือกหุ้มออก รวมไปถึงกากของกาแฟเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากการนำเมล็ดที่ผ่านการคั่วมาเข้าสู่กระบวนการบดเป็นผงและคั้นน้ำในกระบวนการชงกาแฟสด แสดงดังรูปที่ 1 กากกาแฟมี โพลิแซกคาไรด์ โปรตีน กรดไขมัน เป็นองค์ประกอบหลัก และมีคาเฟอีน สารประกอบฟีนอล และแร่ธาตุต่างๆ เป็นองค์ประกอบย่อย ซึ่งในปัจจุบันใช้วิธีการทำลายด้วยวิธีการนำไปฝังกลบ เมื่อมีการผลิตกาแฟเพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณกะลากาแฟและกากกาแฟมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งหากไม่ผ่านวิธีการบำบัดของเหลือทิ้งเหล่านี้จะทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในกาแฟที่มีอยู่จำนวนมาก [1]

มีหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษาการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกาแฟมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า และเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดปริมาณของเสียเหลือทิ้ง อาทิเช่น การนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลโดยผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Tranesterification) ซึ่งจะต้องผ่านขั้นตอนการสกัดทางเคมีเพื่อแยกน้ำมันออกจากกากกาแฟ [2]-[5] นอกจากนี้ก็ยังมีการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกาแฟ [6], [7] เป็นต้น ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ จะต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment) เพื่อทำลายพันธะของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง และทำลายโครงสร้างลิกนินเพื่อง่ายต่อกระบวนการย่อยสลายในระบบไร้อากาศด้วยจุลินทรีย์ [6] การนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกาแฟมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลและแก๊สชีวภาพนั้นในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบค่อนข้างซับซ้อนและสิ้นเปลืองสารเคมี ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการต่อยอดโดยการนำเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงาน ด้วยวิธีการแปรรูปให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงอัดเม็ดซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบได้โดยไม่ต้องผ่านการสกัดหรือปรับสภาพเบื้องต้น โดยวิธีการนำมาอัดแท่งเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง ช่วยลดปริมาณขยะเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตกาแฟที่มีปริมาณมากตลอดทั้งปี สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด ลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและเพื่อบรรเทาปัญหาการขาดแคลนพลังงาน อีกทั้งการนำเชื้อเพลิงอัดแท่งมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟืนและถ่านไม้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม ทำให้ประเทศไทยมีแนวทางในการใช้ประโยชน์จากชีวมวลเหลือทิ้งมาเป็นพลังงานทดแทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนของประเทศต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมวัตถุดิบเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ

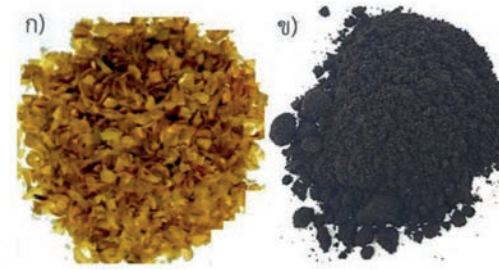
วัตถุดิบเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟสายพันธุ์อะราบิกา ส่วนของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟที่ใช้ในการทดลองได้จากการผ่านการสีกะเทาะเอาส่วนของ



รูปที่ 1 ก) ผลกาแฟดิบ ข) ผลกาแฟสุก ค) เมล็ดกาแฟ ง) เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ จ) เมล็ดกาแฟคั่ว ฉ) กากกาแฟ

เปลือกหุ้มออกจากเมล็ด ลักษณะของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟมีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ แห้งและแข็งมีสีเหลืองปนน้ำตาลอ่อน แสดงดังรูปที่ 2ก) นำไปตากแดดเพื่อลดความชื้น จากนั้นนำมาบดละเอียดด้วยเครื่องบดชีวมวลร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ส่วนของกากกาแฟที่ผ่านการชงคั้นน้ำ กากกาแฟมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเข้มค่อนไปทางดำ เปียกชื้น เนื้อละเอียด แสดงดังรูปที่ 2ข) นำไปตากแดด และนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงหรือจนแห้ง [8] นำกากกาแฟมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16

หลังจากนั้นบรรจุเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟใส่ถุงซิปล็อกเพื่อป้องกันความชื้นเพื่อรอสำหรับใช้งาน ทำการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่อน้ำหนักโดยใช้วิธีการอบในตู้อบไฟฟ้า ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของลิกนิน (Lignin) เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ด้วยวิธีการย่อยสลายเส้นใยด้วยความร้อน โดยการหาองค์ประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก [9], [10] ส่วนแป้งมันสำปะหลัง ลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ผิวสัมผัสให้ความรู้สึกเนียนและมีความลื่น ได้มาจากการนำมันสำปะหลังมาสับและโม่ และผ่านขั้นตอนการสกัดโปรตีนออก นำมาใช้สำหรับเป็นตัวประสานในการขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด



รูปที่ 2 ก) เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ ข) กากกาแฟ

2.2 การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

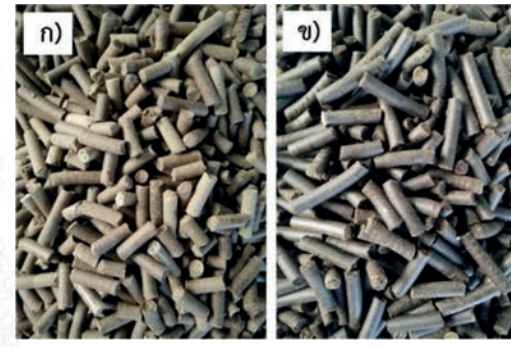
การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวเชื่อมประสาน เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานที่มีค่าความร้อนสูงและสามารถยึดเกาะวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวและเพิ่มสมบัติทางกายภาพได้ดี [11] ทำการศึกษาปริมาณตัวเชื่อมประสานปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก และศึกษาผลสัดส่วนระหว่างเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟที่มีต่อสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดในช่วง 100 : 0, 50 : 50, 75 : 25, 25 : 75 และ 0 : 100 ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวเชื่อมประสาน โดยคัดเลือกจากการทดลองข้างต้นที่ให้ผลของสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ดีที่สุด จากนั้นทำการผสมน้ำกับชีวมวลที่จะนำมาอัดเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดตามความแห้งของชีวมวล นำวัตถุดิบที่เตรียมได้เข้าสู่กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องอัดเม็ดชีวมวล แสดงดังรูปที่ 3

นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้ไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง [8] เมื่อครบเวลานำมาผึ่งเย็นให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดคาย

รูปที่ 3 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบอัดเม็ด

ความร้อนออกมาจนหมด เพื่อให้แท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งขึ้นและไม่แตกหักง่าย โดยการวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำการบรรจุในถุงซิปล็อค เพื่อป้องกันความชื้น ตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ที่ได้จากการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.601 ± 0.001 เซนติเมตร

จากรูปจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟมีสีน้ำตาลอ่อน ส่วนเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟมีสีน้ำตาลเข้ม นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อทดสอบสมบัติตามมาตรฐานวิธีการทดสอบสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เช่น การหาค่าปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis, %wb) (ASTM D 3173) การหาปริมาณสารระเหย (Volatile Solid) (ASTM D 3175) ปริมาณเถ้า (Ash) (ASTM D 3174) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fix Carbon) (ASTM D 3176) รวมถึงการทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ค่าดัชนีการแตกร่วน (Shatter Index) (ASTM D 3038) ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เช่น ค่าความร้อน (Heating Value) และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Heat Utilization Efficiency) โดยวิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยตรงด้วยเตาประสิทธิภาพสูงเพื่อต้มน้ำให้เดือด ตามมาตรฐานการทดสอบของสำนักงานพลังงานแห่งชาติ คำนวณหาประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลจากปริมาณความร้อนทั้งหมดที่น้ำได้รับต่อปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในหน่วยร้อยละ



รูปที่ 4 ก) เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ
ข) เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงอัดเม็ด

3.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบ

จากการวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟด้วยวิธีการย่อยสลายเส้นใยด้วยความร้อน แสดงดังตารางที่ 1 พบว่ากากกาแฟมีค่าองค์ประกอบของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสสูงกว่าเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ และพบว่าในองค์ประกอบของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟมีปริมาณองค์ประกอบของลิกนินที่สูง [4] ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 19.93 ± 0.14 และผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นของเปลือกเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ พบว่าเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟมีค่าความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 4.12 ± 0.04 และ 5.48 ± 0.13 ตามลำดับ

3.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ และกาก

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสและความชื้นของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ

Composition (%)	Coffee silverskin	Spent coffee grounds
Lignin	19.93 ± 0.14	13.41 ± 0.02
Cellulose	21.41 ± 0.09	25.31 ± 0.90
Hemicellulose	15.54 ± 0.11	23.11 ± 0.93
Moisture (wb)	4.12 ± 0.04	5.48 ± 0.13

กาแฟ ที่ปริมาณตัวประสานที่แตกต่างกัน และการผสมระหว่างเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ ที่ปริมาณตัวประสานร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟมีปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้าสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ ซึ่งปริมาณสารระเหยและปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง [12] และจากการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า พบว่าทุกการทดลองมีปริมาณที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากมีปริมาณน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ [12] และจากการวิเคราะห์หาค่าความชื้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานชีวมวลที่กำหนด

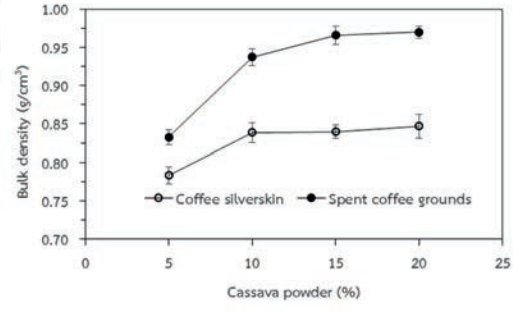
3.2 ผลการศึกษาปริมาณตัวเชื่อมประสานที่มีผลต่อสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การทดลองการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟโดยใช้ปริมาณของแป้งเป็นตัวเชื่อมประสาน ปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ที่มีผลต่อสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ให้ผลการทดลองดังนี้

3.2.1 ค่าความหนาแน่นที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน

จากการทดลองหาปริมาณของแป้งซึ่งเป็นตัวเชื่อมประสานในขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ แสดงดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของตัวเชื่อมประสาน จะส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และจะเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันหลังการใช้ตัวเชื่อมประสานที่มากกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก จากการเปรียบเทียบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด การใช้กากกาแฟเป็นวัตถุดิบ ให้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟเป็นวัตถุดิบ ซึ่งค่าความหนาแน่นสูงสุดที่สภาวะที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 0.9699 ± 0.0080 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร รองลงมาคือ ตัวเชื่อมประสานที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 0.9660 ± 0.0120 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานเมื่อผสมกับของเหลวจะได้ของเหลวที่มีลักษณะเหนียวหนืดช่วยในการยึดเกาะ ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเชื้อเพลิงอัดเม็ด [13] ผลการทดลองปริมาณการใช้ตัวเชื่อมประสานที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

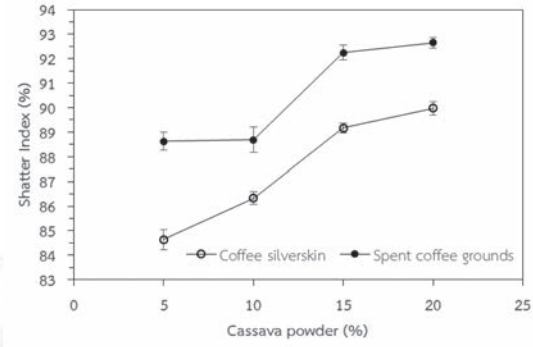
จากการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟเป็นวัตถุดิบ ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยต่ำสุด คือ 0.7833 ± 0.0110 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 0.8326 ± 0.0099 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 5 ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน

3.2.2 ค่าดัชนีการแตกร่วนที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่แตกต่างกันของการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟเป็นวัตถุดิบ แสดงดังรูปที่ 6 จากการทดลองพบว่าปริมาณตัวเชื่อมประสานที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากการใช้กากกาแฟเป็นวัตถุดิบให้ค่าดัชนีการแตกร่วนสูงสุด หมายความว่าให้ค่าความแข็งแรงสูง [14] รองลงมาคือ ที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีค่าดัชนีการแตกร่วน 92.6510 ± 0.2102 และ 92.2479 ± 0.3141% ตามลำดับ ส่วนผลของค่าดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟให้ผลในทำนองเดียวกันคือ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณตัวเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าดัชนีการแตกร่วนที่สูงขึ้น ค่าดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟที่ปริมาณของตัวเชื่อมประสานร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ให้ค่าดัชนีการแตกร่วนร้อยละ 89.9782 ± 0.2681 และ 89.1667 ± 0.1913 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าการใช้ตัวเชื่อมประสานส่งผลต่อความสามารถในการเกาะตัวกันของอนุภาคสูงขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีการแตกร่วนสูงขึ้นตามไปด้วย และค่าดัชนีการแตกร่วนเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อถึงจุดที่มีการเติมตัวเชื่อมประสาน ที่เหมาะสม เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานช่วยในการยึดเกาะของอนุภาคทำให้อนุภาคยึดเกาะดีขึ้น ยังคงมีลักษณะเป็นก้อนเมื่อถูกปล่อยตามแนวดิ่ง สอดคล้องกับค่าดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าสูงขึ้น [13] ซึ่งค่าดัชนีการแตกร่วนแสดงถึงสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการใช้งาน ซึ่งถ้ามีค่าดัชนีการแตกร่วนมากส่งผลให้เชื้อเพลิงมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากมีการอัดแน่นที่สูง และหากเชื้อเพลิงมีค่าดัชนีการแตกร่วนน้อย หมายถึง เชื้อเพลิงมีการแตกง่าย ร่วนซุย และไม่แข็งแรง ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง [15]



รูปที่ 6 ค่าดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน

3.2.3 ค่าสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงทางความร้อนที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน

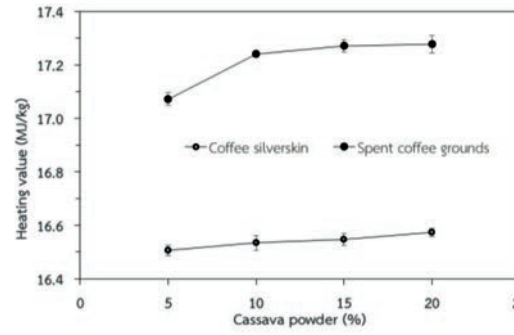
ผลของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งจะบ่งบอกถึงปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงชีวมวล 1 หน่วยน้ำหนัก [1] แสดงดังรูปที่ 7 จากผลการทดลองพบว่าการเติมตัวเชื่อมประสานที่ปริมาณแตกต่างกันส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าต่างกัน ซึ่งการเติมตัวประสานปริมาณที่มากขึ้นส่งผลต่อค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่เติมตัวประสานในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด พบว่าการเติมตัวประสานให้ค่าความร้อนสูงกว่าการไม่เติมตัวประสานในทุกการทดลอง แสดงว่าปริมาณตัวเชื่อมประสานมีผลทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวประสานนั้นมีองค์ประกอบที่สามารถติดไฟได้เช่นกัน [14] ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟจากการใช้ตัวเชื่อมประสานปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ให้ค่าอยู่ในช่วง 17.0717-17.2772 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟให้ค่าอยู่ในช่วง 16.5061-16.5740 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งหมดที่ได้จากการศึกษาอยู่ในเกณฑ์การเป็นก้อนเชื้อเพลิงที่ดี [13], [14]

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

Coffee silverskin			
Cassava powder (%)	Volatile (%)	Ash (%)	Fix carbon (%)
5	72.4040	1.3304	12.0365
10	72.4438	1.3192	12.5012
15	72.5400	1.2862	12.8958
20	72.6089	1.2426	13.9585
Spent coffee grounds			
Cassava powder (%)	Volatile (%)	Ash (%)	Fix carbon (%)
5	73.0039	1.6704	15.4219
10	73.5941	1.5698	15.8474
15	73.7862	1.4739	16.1902
20	74.1123	1.4629	16.8949
Coffee silverskin : Spent coffee grounds			
Ratio	Volatile (%)	Ash (%)	Fix carbon (%)
100 : 0	72.6089	1.2426	13.9585
75 : 25	73.2832	1.2998	14.4218
50 : 50	73.7688	1.3328	15.3177
25 : 75	73.8661	1.3715	16.0027
0 : 100	74.1123	1.4629	16.8949

3.2.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8 จากการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนจากการเติมตัวประสานที่ปริมาณแตกต่างกัน พบว่าตัวเชื่อมประสานปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ให้ค่าประสิทธิภาพการใช้งาน



รูปที่ 7 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน

ที่แตกต่างกัน โดยประสิทธิภาพการใช้งานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟ จากการเติมตัวเชื่อมประสานมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 16.59-16.40 และประสิทธิภาพการใช้งานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 16.38-16.21 และกล่าวได้ว่ามีค่าสูง และอยู่ในเกณฑ์การเป็นเชื้อเพลิงที่ดี [12]-[14]

3.3 ผลการศึกษาสัดส่วนของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟต่อสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การทดลองการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟที่สัดส่วนแตกต่างกัน ในช่วง 100 : 0, 50 : 50, 75 : 25, 25 : 75 และ 0 : 100 ที่มีผลต่อสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ให้ผลการทดลองดังนี้

3.3.1 ค่าความหนาแน่นที่สัดส่วนต่าง ๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟ กากกาแฟ และสัดส่วนระหว่างเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟที่ปริมาณของแป้งที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานร้อยละ 20 โดยคัดเลือกจากผลการทดลองที่ให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงทางความร้อนของชีวมวล

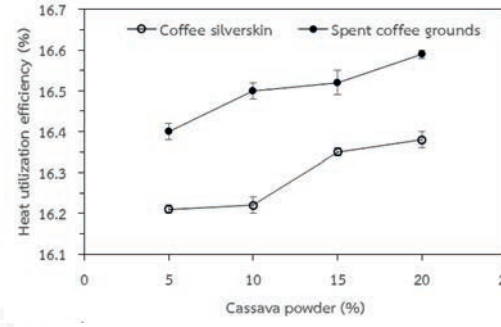
อัดเม็ดที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ผ่านมา ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟแสดงดังรูปที่ 9 จากรูปเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟให้ค่าความหนาแน่นต่ำสุด คือ 0.8468 ± 0.016 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องมาจากมีการเกาะกันของอนุภาคน้อยแต่เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของกากกาแฟเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้น เนื่องจากกากกาแฟมีอนุภาคขนาดเล็กทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคได้ดีกว่าส่งผลให้ค่าความหนาแน่นสูง [16]

3.3.2 ค่าดัชนีการแตกร่วนที่สัดส่วนต่างๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ

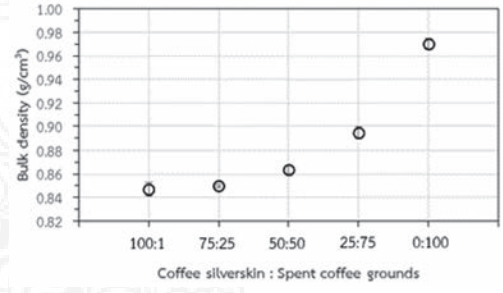
จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟแสดงดังรูปที่ 10 จากผลการทดลองการเพิ่มขึ้นในสัดส่วนปริมาณของกากกาแฟทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความแข็งแรงมากขึ้น มีการแตกร่วนน้อย ส่งผลให้ค่าดัชนีการแตกร่วนสูงขึ้นเช่นกัน

3.3.3 ค่าสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงทางความร้อนที่สัดส่วนต่างๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ

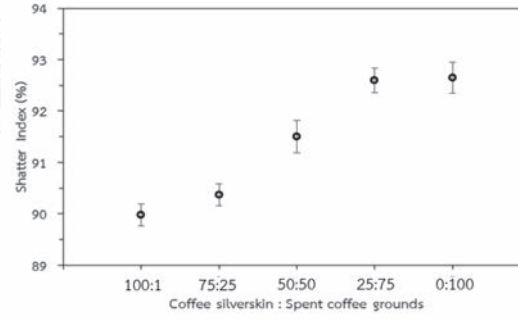
จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนที่สัดส่วนต่างๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ แสดงดังรูปที่ 11 จากผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงอัดเม็ดแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของปริมาณกากกาแฟในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงมีคุณภาพสูงขึ้น โดยมีค่าความร้อนและปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นจากการเพิ่มปริมาณของกากกาแฟในส่วนผสม และมีปริมาณสารระเหยค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการติดไฟที่ง่ายขึ้น [12], [14] ผลการทดลองการใช้เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดพบว่าให้ค่าความร้อนที่ต่ำที่สุด คือ 16.574 ± 0.0154 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และค่าความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของกากกาแฟ



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ปริมาณตัวเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน

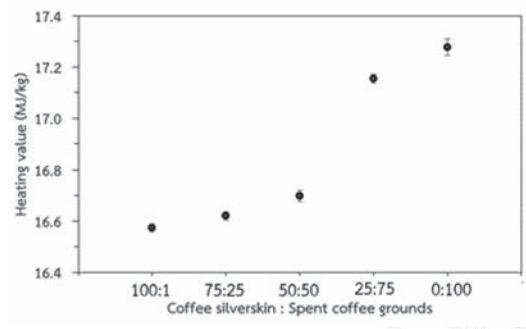


รูปที่ 9 ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ



รูปที่ 10 ค่าดัชนีการแตกร่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ

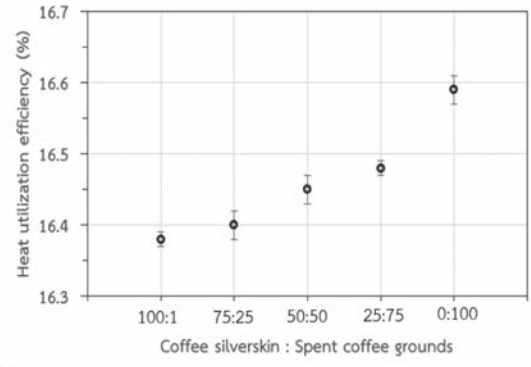
สัดส่วนระหว่างเปลือกเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ ที่สัดส่วน 25 : 75 ให้ค่าความร้อนสูงสุด คือ 17.1544 ± 0.0170 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม รองลงมาคือที่สัดส่วน 50 : 50 และ 75 : 25 ให้ค่าความร้อน 16.6982 ± 0.0214 และ 16.6199 ± 0.0167 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งหมดที่ได้จากการศึกษาอยู่ในเกณฑ์การเป็นเชื้อเพลิงที่ดี [12], [16]



รูปที่ 11 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ

3.3.4 ค่าประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนที่สัดส่วนต่าง ๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ

จากการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยตรงด้วยเตาประสิทธิภาพสูงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากสัดส่วนต่าง ๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟแสดงดังรูปที่ 12 ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนจากการผสมเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ให้ค่าประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนแตกต่างกัน โดยประสิทธิภาพการใช้งานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟให้ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณสายระเหยง่ายที่สูง [10], [12] มีความสามารถในการจุดติดไฟได้ง่าย ดังนั้นเมื่อมีการผสมกากกาแฟกับเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงขึ้นตามมา



รูปที่ 12 ประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่สัดส่วนต่างๆ ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ

4. สรุป

จากการศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ผลิตจากเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ พบว่าการใช้ตัวเชื่อมประสานที่ร้อยละ 20 มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงทางความร้อนของชีวมวลอัดเม็ดที่ดีที่สุด และสัดส่วนของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟต่อสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด สรุปว่า การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากกาแฟเพียงอย่างเดียวส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.9699 ± 0.0045 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าดัชนีการแตกร่วนร้อยละ 92.6510 ± 0.2102 ค่าสมบัติทางความร้อนเท่ากับ 17.2772 ± 0.0319 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดร้อยละ 16.59 ± 0.02 ซึ่งความสัมพันธ์ของปริมาณกากกาแฟในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงมีคุณภาพสูงขึ้น สัดส่วนสำหรับการผสมที่ดีที่สุดคือ 25 : 75 ของเปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟ ทำให้เชื้อเพลิงมีคุณภาพสูงสุดคือ ให้ค่าความร้อนดีที่สุด 17.1544 ± 0.017 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม จากผลการ

ทดลองสรุปได้ว่า เปลือกหุ้มเมล็ดกาแฟและกากกาแฟสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด และมีสมบัติทางกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ห้องปฏิบัติการเพื่อทำการทดลองพร้อมอุปกรณ์การทดลอง อีกทั้งขอขอบคุณร้านกาแฟสดเทพเสด็จและร้านกาแฟสดดอยแม่ลายในการอนุเคราะห์รูปภาพกาแฟเพื่อใช้ประกอบบทความ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] F. Boudrahem, A. Soualah and F. Aissani-Benissad, "Pb(II) and Cd(II) removal from aqueous solutions using activated carbon developed from coffee residue activated with phosphoric acid and zinc chloride," *Journal of Chemical and Engineering*, vol. 56, pp. 1946-1955, 2011.

[2] A. Delligiannis, A. Papazafeiropoulou, G. Anastopoulos and F. Zanikos, "Waste coffee ground as an energy feedstock," in *Proceeding of the 3rd International Cempee and Secotox Conference*, 2011, pp. 978-960.

[3] M. Haile, "Integrated volarization of spent coffee grounds to bio fuels," *Biofuel Research Journal*, vol. 2, pp. 65-69, May. 2014.

[4] N. Caetano, S. Caetano and T. M. Mata, "Volarization of coffee grounds for biodiesel production," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 26, pp. 267-272, 2012.

[5] M. Misra, N. Kondamudi, S. K. Mohapatra and S. E. John, "High quality biodiesel from spent coffee grounds," *Clean Technology*, vol. 2, pp. 39-42, 2008.

[6] F. Battista, D. Fino and G. Mancini, "Optimization of biogas production from coffee production waste," *Bioresource Technology*, vol. 200, pp. 884-890, Jan. 2016.

[7] J. Kim, H. Kim, G. Baek and C. Lee, "Anaerobic co-digestion of spent coffee grounds with different waste feedstocks for biogas production," *Waste Management*, vol. 60, pp. 322-328, Feb. 2017.

[8] W. Wattana, S. Phetklung, W. Jakaew, S. Chumuthai, P. Sriam and N. Chanurai, "Characterization of mix biomass pellet made from oil palm and para-rubber tree residues" *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 1128-1133, May 2017.

[9] P. J. Van Soest and R.H. Wine, "Determination of lignin and cellulose in acid-detergent fiber with permanganate," *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, vol. 51, pp. 780-785, 1968.

[10] P. J. Van Soest, J. B. Robertson and B. A. Lewis, "Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition," *Journal of Dairy Science*, vol. 74, pp. 3583-3593, 1991.

[11] G. Toscano, G. Riva, E. F. Pedretti, F. Corinaldesi, C. Mengarelli and D. Duca, "Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements" *Biomass and Bioenergy*, vol. 56, pp. 317-322, Sep. 2013.

[12] M. V. Gil, P. Oulego, C. Pevida, J. J. Pis, and F. Rubiera, "Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends," *Biomass Technology*, vol. 101, no. 22, pp. 8859-8867, 2010.

[13] N. Tanpaiboonkul and T. Budnumpetch, "Molding and binding method on properties of fuel from water hyacinth," *Science and Technology Silpakorn University Bangkok*, pp. 2408-1248, 2016.

[14] S. Warajanont and N. Soponpongpipat, "Effect of particle size and moisture content on cassava root pellet fuel's qualities follow the acceptance of pellet fuel standard," *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 2, pp. 74-79, 2013.

[15] H. Yumak, T. Ucar and N. Seyidbekiroglu, "Briquetting soda weed (Salsolatragus) to be used as a rural fuel source," *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, pp. 630-636, 2010.

[16] S. B. Kang, H. Young, J. J. Kim and K. S. Choi, "Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW)," *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 1208-1214, 2017.