

การพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านในรูปแบบเกลียวอัดเย็นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล จากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชน และการหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง

Development of a Cold Production Biomass Charcoal Briquette Machine to use Waste from Coffee Bean Processing

พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น^{1*}

^{1*} คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง เลขที่ 119 ตำบลชมพู เมืองลำปาง จังหวัดลำปาง 52100
โทรศัพท์ 054-237352 โทรสาร 054-241079 E-mail: y_pongsak@lpru.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาประสิทธิภาพระบบอัดแท่งถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบอัดเกลียวเย็น และทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวมวลอัดแท่งสำหรับชุมชน

จากกระบวนการสร้างและพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบเกลียวอัดเย็นมีส่วนประกอบ ดังนี้ ส่วนต้นกำลัง ส่วนสกรูอัด พูล์ สายพาน เรือนสกรู และช่องสำหรับใส่ชีวมวล ควบคุมการทำงานด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป ซึ่งประกอบด้วย เปลือก เนื้อ และผลกาแฟเสีย มีอยู่เป็นปริมาณรวม 96 ตันต่อปีกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง จากนั้นทดสอบการอัดแท่งถ่านด้วยอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ระหว่าง ผงถ่าน เปลือกกาแฟ ใช้เตาเผาถ่านชีวมวลถึง 200 ลิตร) ตัวประสาน (แป้งมันสำปะหลัง) และน้ำ พบว่าผลิตภัณฑ์อัดถ่านเมื่อผสมองค์ประกอบต่าง ๆ ตามอัตราส่วนที่ได้กำหนดไว้ คือ ผงถ่าน แป้งมันสำปะหลัง และน้ำ (2: 1 : 0.50) มีลักษณะทางกายภาพที่มีรูปทรงที่ต้องการ เกาะตัวกันแน่น และไม่มีรอยร้าว ทำให้ความสามารถในการทำงานของเครื่องอัดถ่านชีวมวลที่ผลิตขึ้นทำงานสูงสุดเฉลี่ย 32 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากนั้นลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (2 วัน) ทดสอบ ระยะเวลาการจุดติดไฟ ระยะเวลาการมอดดับ และปริมาณขี้เถ้า จากนั้นส่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์เข้าทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานของ ASTM ดังนี้ ความชื้นร้อยละ 10.33 เถ้าร้อยละ 22.02 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 33.71 กำมะถันร้อยละ 3.52 ค่าความจุความร้อน 4,178 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และสารระเหยร้อยละ 33.94 ซึ่งผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงอัดแท่งจากงานวิจัยครั้งนี้ สามารถนำมาใช้ในการผลิต เพื่อจำหน่าย และใช้ประโยชน์ในครัวเรือนต่อไปได้

คำสำคัญ : ถ่านอัดแท่ง, เครื่องอัดแท่ง, เกลียวอัดเย็น, วัสดุเหลือทิ้ง, เปลือกกาแฟ

Abstract

This research aims to develop an efficient machine for compressing charcoal briquettes in cold-type production and then to test the thermal efficiency of these briquettes.

The briquette machine comprises a screw compressor, a flywheel, a belt, housing screws and an inlet feeder for the biomass. The machine was controlled by an

electronic circuit. The feeder was designed to accept organic waste from coffee bean processing (shells, rotten beans, etc.) as this produces 96 tons of wastes per year. Cold production of biomass briquettes was later evaluated using a variety of ratios of coffee charcoal (produced in a 200-liter biomass incinerator), bond (tapioca flour) and water. The tests showed that briquettes with a 2:1:0.50 ratio of coffee charcoal, tapioca and water showed the greatest compressive strength. The briquette machine was able to produce briquettes at an average rate of 32 kg/hr. The briquettes were dried for 24 hours and tested for burning time, extinguishing time and amount of ash produced. The briquettes were also tested for their properties as fuel according to the ASTM standards. The tests showed that the briquettes were 10.33% moisture, 22.02% ash, 33.71% fixed carbon, 3.52% sulphur with a heating value of 4,178 Kcal/kg, and 33.94% of volatile matter. The biomass briquette charcoal products investigated in this research can be sold and used in domestic households.

Keywords : Biomass energy, charcoal, thermal efficiency, coffee bean waste

1. บทนำ

ปัจจุบันประชากรในประเทศไทยมีการดื่มกาแฟกันมากขึ้นไม่ว่าจะเป็นกาแฟสำเร็จรูป หรือ กาแฟสด โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกาแฟในรูปแบบต่าง ๆ จำนวนมากปลูกในประเทศไทย (กฤษฎา กันจุ, 2551) ซึ่งมีจำนวน 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์อาราบิก้า (Arabica) ปลูกทางภาคเหนือ และพันธุ์ โรบัสต้า (Robusta) ปลูกทางใต้ของประเทศ ซึ่งในกระบวนการผลิตหลังการเก็บเกี่ยวของเกษตรกร ผู้ปลูกกาแฟ มีเปลือกของเมล็ดกาแฟที่เกิดจากกระบวนการไม่ และเมล็ดกาแฟเสียที่เกิดจากการ คัดแยกของเกษตรกรที่ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งขั้นตอนในการผลิตถ่านอัดแท่งชีวมวล โดยนำวัตถุดิบมาเผาให้เป็นถ่านวัตถุดิบความชื้นไม่เกินร้อยละ 20 จากนั้นลดขนาด ด้วยการบด ผสมผงถ่านกับตัวประสานและน้ำ อัดให้ถ่านเป็นแท่งตาก และบรรจุจำหน่าย (Bhattacharya S.C. และ Shreatha R.M., 1990) อัดแท่งถ่านด้วยกระบวนการ 3 แบบ คือ ลูกสูบเกลียว และลูกกลิ้ง ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ทำให้ถ่านจับตัวเป็นก้อน และส่งผลกับความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง ที่เพิ่มขึ้น (Chai O.C, Siddiqui K.M., 2000) และในกระบวนการผลิตถ่านชีวมวลอัดแท่งมี 2 รูปแบบ ดังนี้ รูปแบบการอัดแล้วนำไปเผา (Briquetting-Carbonization (B-C) option) ซึ่งเป็นกระบวนการ ที่ง่าย แต่ต้องใช้พลังงานในกระบวนการอัดสูง และเกิดการสึกหรอในเครื่องอัดมาก โดยมี 2 วิธี คือ วิธีการอัดร้อนความดันสูง (Hot and High pressure densification) เหมาะสำหรับวัสดุที่ต้อง ผ่านการบดและมีความชื้นระหว่างร้อยละ 7 - 12 หากสูงหรือต่ำกว่านี้จะทำให้อัดไม่ได้ผล ใช้แรงดัน อัดสูงประมาณ 75.84 - 117.21 Mpa และวิธีการอัดเย็นความดันต่ำ (Cold and High pressure densification) สามารถอัดได้ทั้งชีวมวลสดหรือแห้ง ซึ่งวัสดุต้องผ่านการตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยไม่ จำเป็นต้องลดความชื้นหรือให้ความชื้นอยู่ที่จุดพอดี แต่ข้อเสียคือความชื้น และความหนาแน่น ของการอัดเกาะของชีวมวลหลังการอัดที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีตัวประสานจากภายนอกมาช่วย ในการอัดให้แน่นขึ้นและรูปแบบการเผาแล้วนำไปอัด (Carbonization-Briquetting (B-C) option) ซึ่งใช้

พลังงานต่ำกว่าแต่เป็นกระบวนการที่ยุงยาก และมีฝุ่นฟุ้งกระจายมาก (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2547) โดยทั่วไปจะใช้วิธีการอัดเย็นความดันต่ำ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมาผลิตถ่านชีวมวลอย่างแพร่หลาย และผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องผ่านการทดสอบคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิง ตามมาตรฐาน ASTM เสียก่อน เช่น ถ่านชีวมวลที่ได้จากลำตันไมยราบยักษ์ที่ให้ค่าพลังงานความร้อนในช่วง 3.9 - 5.5 กิโลแคลอรีต่อกรัม (บุญจรัตน์ โจธานันท์ และคณะ, 2554) ถ่านชีวมวลที่ได้จากเหง้ามันสำปะหลัง กะลามะพร้าว และเศษถ่านไม้รวม มีค่าพลังงานความร้อน 4,000 6,190, และ 4,680 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (กิตติพงษ์ ลาลุน และคณะ, 2555) ถ่านชีวมวลจากเปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด มีค่าความร้อนในช่วง 3,400-4,340 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (อัจฉรา อัครจุฑิกลชัย และคณะ, 2554) เป็นต้น โดยทั่วไปมาตรฐานผลิตภัณฑ์ของถ่านอัดแท่งที่ดีควรมีค่าวัดผลอยู่ในเกณฑ์ ที่กำหนด เช่น ค่าความร้อนไม่ควรต่ำกว่า 3,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ค่าคาร์บอนคงตัวไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 15 ถ้าไม่ควรเกินร้อยละ 20 ค่ากำมะถันรวมไม่ควรเกินร้อยละ 2 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555) และควรมีระยะเวลาเผาไหม้อยู่ในช่วง 60-90 นาทีต่อกิโลกรัม (สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, 2543)

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเกิดแนวความคิดในการนำวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตหลังการเก็บเกี่ยวของเมล็ดกาแฟที่ประกอบด้วย เปลือก และเมล็ดกาแฟเสีย นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวมวลอัดแท่ง ซึ่งเนื่องจากลักษณะของวัสดุเหลือใช้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ร่วน และไม่จับตัวเป็นก้อน จึงต้องใช้กระบวนการอัดแบบเย็นร่วมกับการใช้ตัวประสานในการผสมกับวัตถุดิบ เพื่อให้จับตัวเป็นก้อนได้ดีขึ้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555) ด้วยเหตุนี้จึงพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบอัดเกลียวเย็นสำหรับใช้ในกระบวนการวิจัย และทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อสร้าง และพัฒนาประสิทธิภาพเครื่องอัดแท่งถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบอัดเกลียวเย็น

2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์กับถ่านชีวมวลอัดแท่งชนิดอื่น ๆ

3. เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์

1) การออกแบบและสร้างเครื่องอัดถ่านชีวมวล โดยกำหนดหลักเกณฑ์ ดังนี้ ต้องมีกลไกการทำงานไม่ซับซ้อน และใช้งานง่าย มีขนาดเล็กกระทัดรัดสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก อีกทั้งยังต้องซ่อมแซมบำรุงรักษาง่าย และมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน

1.1) การคำนวณอัตราทด และความเร็วยรอบ ได้ใช้ข้อมูลเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยขนาด 3 แรงม้า ซึ่งมีความเร็วยรอบของต้นกำลังเท่ากับ 1,475 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุดที่ 14.48 นิวตัน-เมตร โดยนำค่านี้นำมาใช้ในการคำนวณ และพิจารณาหาความเร็วยรอบของเพลาลูกเบี้ยว และขนาดของล้อสายพานต่าง ๆ ดังภาพที่ 1 (ก) ซึ่งลักษณะของการติดตั้ง และมุมของล้อสายพาน

ที่กระทำกับแนวระดับมีผลต่อการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดในเพลลา การคำนวณอัตราทด (i) และความเร็วยรอบจะใช้สมการที่ 1 (วสันต์ ศรีเมือง และรัชชัย ประมวลรัมย์, 2551)

$$i = \frac{D_2}{D_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

เมื่อ

- D_1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อสายพานตาม (เมตร)
- D_2 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อสายพานขับ (เมตร)
- n_1 = ความเร็วยรอบของล้อสายพานตาม (รอบต่อนาที)
- n_2 = ความเร็วยรอบของล้อสายพานขับ (รอบต่อนาที)

1.2) การคำนวณหาขนาดเพลลาใช้การออกแบบเพลลาตามรหัสของสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society Mechanical Engineers, ASME) วิธีดังกล่าวใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ซึ่งเป็นการออกแบบโดยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Design Method) เพลลาส่วนมากจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่เป็นวัฏจักร โดยใช้วัสดุเพลลาทำจากโลหะเหนียว (St 42) ตามมาตรฐาน ISO/R 775-1969 เนื่องจากการง่ายต่อการคำนวณ และยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุในการทำเพลลาด้วย เนื่องจากการให้แรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลลาอัดเกลียวมาก วิธีการคำนวณขนาดของเพลลา (d) จะใช้สมการดังนี้

$$d^3 = \frac{16}{\pi \cdot \tau_d} [(C_t \cdot T)^2 + (C_m \cdot M)^2]^{1/2} \quad (2)$$

เมื่อ

- C_m = ตัวประกอบความล่าเนื่องจากการดัด (ลักษณะเป็นเพลลาหมุน แรงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ค่าเท่ากับ 1.5)
- C_t = ตัวประกอบความล่าเนื่องจากการบิด (ลักษณะเป็นเพลลาหมุนแรงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ค่าเท่ากับ 1.0)
- T = แรงบิดที่เกิดขึ้นกับเพลลา (นิวตัน-เมตร)
- M = โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับเพลลา (นิวตัน-เมตร)
- τ_d = ค่าความเค้นเฉือนในการออกแบบ (กรณีที่เพลลาไม่มีร่องลิ่มเท่ากับ 55 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

1.3) การคำนวณหา กำลังงานที่เพลลา เมื่อทราบความเร็วยรอบ และแรงบิดของเพลลา สามารถคำนวณหา กำลังงานที่เกิดขึ้นในเพลลา (P) ได้ ดังนี้

$$P = \frac{2\pi \cdot T \cdot n}{(60)(746)} \quad (3)$$

เมื่อ

- P = กำลังงาน (แรงมา)
- T = แรงบิด (นิวตัน-เมตร)
- n = ความเร็วยรอบของเพลลา (รอบต่อนาที)

1.4) การคำนวณหาโมเมนต์ดัดสูงสุด ที่เกิดขึ้นในเพลลา เมื่อทำการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเพลลาโดยทำการพิจารณาจากแรงต่าง ๆ ที่กระทำกับเพลลา โดยทำการแบ่งการพิจารณาเป็นสองระนาบ คือ แนวนอน และแนวตั้ง จากนั้นทำการคำนวณหาโมเมนต์สูงสุดได้จากสมการ

$$M = \sqrt{(M_H)^2 + (M_V)^2} \quad (4)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} M &= \text{โมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นกับเพลลา (นิวตัน-เมตร)} \\ M_H &= \text{โมเมนต์ดัดสูงสุดในแนวนอน (นิวตัน-เมตร)} \\ M_V &= \text{โมเมนต์ดัดสูงสุดในแนวตั้ง (นิวตัน-เมตร)} \end{aligned}$$

2) การทดสอบและประเมินผลการทดสอบ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง และผลิตภัณฑ์ที่ได้ ดังนี้

2.1) การทดสอบเพื่อหาค่าความเร็วเกลียววัดที่เหมาะสม ซึ่งใช้วงจรปรับความเร็วรอบมอเตอร์ โดยการปรับความเร็วเกลียววัดภายในระดับที่แตกต่างกัน และทดลองใช้ใช้เครื่องมือ Digital tachometer รุ่น DT-2236A วัดความเร็วรอบที่แกนเกลียววัด ซึ่งตัวอย่างของวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ อัตราส่วน 1 : 1 : 0.2 โดยน้ำหนัก (ผงถ่านวัตถุดิบ : แป้งเปียก : น้ำ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมทั้งในด้านการผสม และการยึดติดของผงถ่าน (สังเวทย์ เสวกวิหारी, 2555)

2.2) การทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนตัวประสานที่เหมาะสม ซึ่งดำเนินการอัดถ่านโดยใช้เครื่องอัดถ่านชีวมวล วัตถุหลักคือ เปลือก เนื้อ และผลกาแฟเสีย ตัวประสาน ดังนี้ แป้งเปียก และน้ำ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการอัดด้วยเครื่องอัดถ่านที่สร้างขึ้นด้วยความเร็วเกลียววัดจากการทดสอบข้อที่ 1 และทดลองซ้ำ

3) ขั้นตอนการผลิตถ่านอัดแท่ง

3.1) นำเปลือกเมล็ดกาแฟสดตากแดดให้แห้ง จากนั้นเผาจนเป็นถ่านโดยใช้ถังน้ำมัน 200 ลิตร (Drum kiln) เนื่องจากเป็นรูปแบบที่เหมาะสม กับการเผาต่อครั้งที่มีปริมาณน้อยและใช้เทคโนโลยีอย่างง่าย ราคาถูก

3.2) นำถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟที่ได้บดให้มีความละเอียดประมาณ 2-5 มิลลิเมตร

3.3) นำผงถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟผสมกับแป้งเปียก และน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ

3.4) ชั่งน้ำหนักของส่วนผสม เริ่มต้นที่ 1 กิโลกรัม แล้วอัดขึ้นรูป บันทึกเวลาในการทำงานตั้งแต่การเริ่มจนสิ้นสุดกระบวนการ

3.5) ลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งบนพื้นคอนกรีตด้วยวิธีตากแดด

3.6) ทดสอบการจุดติดไฟ และหาประสิทธิภาพการใช้งานด้านความร้อน โดยการต้มน้ำร้อนภายใต้อุณหภูมิห้อง ไม่ควบคุมความชื้นบรรยากาศ ไม่มีลมพัด และใช้หม้ออะลูมิเนียม จากนั้นวัดอุณหภูมิของน้ำสูงสุด

3.7) ส่งตัวอย่างถ่านอัดแท่งในห้องปฏิบัติการเพื่อหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการคำนวณการออกแบบเครื่องอัดแท่งถ่านชีวมวล

การคำนวณเริ่มต้นจากการกำหนดค่าแรงบิด (ได้จากข้อมูลสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้า) มีค่าเท่ากับ 14.48 นิวตัน-เมตร ที่ความเร็วรอบ 1,475 รอบต่อนาที จากนั้นกำหนดให้อัตราส่วนความตึงของสายพานเป็น $\frac{F_1}{F_2} = 3$ และเลือกขนาดล้อสายพานขับเคลื่อน 100 มิลลิเมตร จะได้เป็น

$$T_{motor} = (F_1 - F_2)(D_{motor} / 2)$$

$$T_{motor} = (2F_2)(D_{motor} / 2)$$

$$14.48 \text{ N.m} = (2F_2)(0.1 \text{ m} / 2)$$

$$F_2 = 144.8 \text{ N} \quad \text{และ} \quad F_1 = (3F_2) = 434.4 \text{ N}$$

เมื่อทราบค่าแรงตึงบนสายพานแล้ว นำค่าไปคำนวณหาค่าแรงบิดที่ล้อสายพานตาม D_{Belt} โดยมีขนาดเป็น 280 มิลลิเมตร ได้เป็น

$$D_{Belt} = (434.4 - 144.8) \text{ N} (0.28 \text{ m} / 2) = 40.544 \text{ N.m}$$

จากนั้นนำค่าแรงบิดที่ได้คำนวณหาค่ากำลังงาน โดยใช้สมการที่ (3) ดังนี้

$$P_{motor} = \frac{(2\pi \cdot T \cdot n)}{(60)(746)} = \frac{2\pi(40.544)(526)}{(60)(746)} = 2.99 \text{ HP} \quad (\text{เลือกมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า})$$

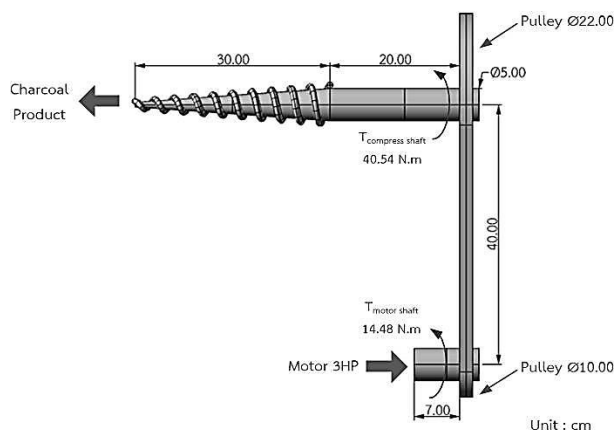
หาขนาดเพลาลูกเบี้ยว โดยใช้สมการที่ (4) ได้เป็น

$$d^3 = \frac{16}{\pi \cdot (0.055)} \sqrt{((1) \cdot (40.544))^2 + ((1.5) \cdot (16.218))^2}$$

$$d = 15.58 \text{ mm}$$

เนื่องจากการออกแบบเพลาลูกเบี้ยว ได้เลือกใช้เหล็กเหนียว (St 42) เป็นวัสดุในการทำ และแรงที่กระทำเป็นแรงในทิศทางเดียวหรือแรงกระแทกเล็กน้อย ดังนั้นจึงเลือกค่าความปลอดภัยในการใช้งาน คือ $N = 3$ จากการออกแบบเพลาลูกเบี้ยว ดังนั้นขนาดของเพลาลูกเบี้ยว คือ

$$d = (15.58) \cdot (3) = 46.74 \text{ mm} \quad (\text{เลือกเพลาลูกเบี้ยวขนาด 50 มิลลิเมตร})$$

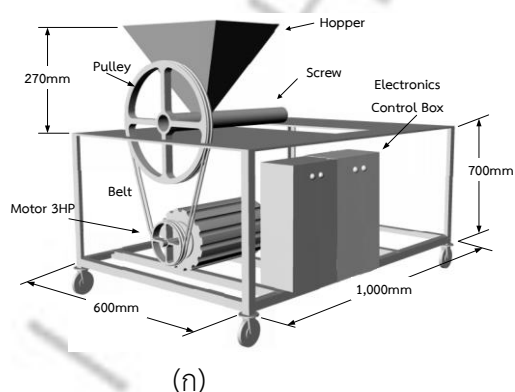


ภาพที่ 1 ลักษณะความสัมพันธ์ของสมการและแรงกระทำที่เพลลาและเกลียวอัดเย็นที่คำนวณได้

4.2 ผลการสร้าง และพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านชีวมวล

จากผลการคำนวณการออกแบบข้างต้น และลักษณะของความสัมพันธ์ของแรงกระทำต่างๆที่บริเวณเกลียวอัดเย็นได้ดังภาพที่ 2 ดังนั้นผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้าง และพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบเกลียวอัดเย็น ซึ่งเป็นเครื่องมือช่วยในการผลิตถ่านชีวมวลจากเปลือกกาแฟเหลือทิ้ง โดยมีส่วนประกอบดังนี้

- 1) ส่วนต้นกำลัง (Motor) ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ขนาด 3 แรงม้า รอบการทำงานสูงสุด 1,475 รอบต่อนาที ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการควบคุมความเร็ว
- 2) ส่วนสกรูอัด (Screw press) มีขนาดรัศมีเพลากลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดรัศมีเกลียวป้อน 70 มิลลิเมตร และขนาดระยะพิทช์เกลียวป้อน 30 มิลลิเมตร ทำให้ได้ขนาดผลิตภัณฑ์ถ่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร มีครีบบนสำหรับเพิ่มพื้นที่การเผาไหม้
- 3) ล้อสายพานและสายพาน (Pulley and belt) ระบบทดกำลังใช้ล้อสายพานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และ 280 มิลลิเมตร และสายพานเบอร์ 61 ร่อง B เป็นตัวส่งถ่ายกำลังตามสมการที่ (1) คิดเป็นอัตราทด 0.357
- 4) ช่องสำหรับใส่ชีวมวล (Hopper) สามารถใส่วัตถุดิบได้ครั้งละ 2 กิโลกรัม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 เครื่องอัดแท่งถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบเกลียวอัดเย็น (ก) การออกแบบเครื่องอัดแท่งถ่านชีวมวลเกลียวอัดเย็น (ข) เครื่องอัดแท่งถ่านชีวมวลเกลียวอัดเย็นที่สร้างขึ้น

4.3 ผลการดำเนินงาน

ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปกาแฟใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลองจากพื้นที่ ดังภาพที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยเปลือก และเมล็ดกาแฟเสีย ลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดด เป็นเวลา 2 วัน จากนั้นใช้เตาเผาถ่านชีวมวลถึง 200 ลิตร ให้กลายเป็นถ่านและบดเป็นผงถ่านให้มีขนาดไม่เกิน 2 - 5 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการทดสอบ ดังต่อไปนี้



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3 กระบวนการเตรียมวัสดุ (ก) การเก็บรวบรวมวัตถุดิบในพื้นที่ (ข) ลดความชื้นวัตถุดิบด้วยการตากแดด (ค) วิธีการผลิตถ่านด้วยเตาเผาถ่านชีวมวลถึง 200 ลิตร

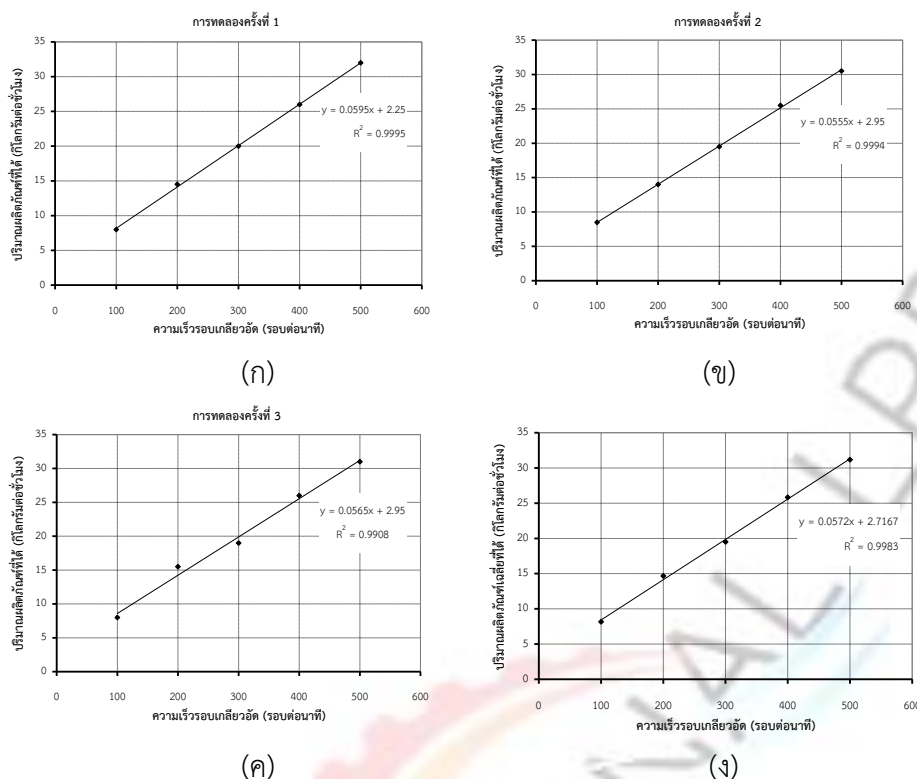
1) การทดสอบความเร็วเกลียวอัดที่เหมาะสม

ทำการปรับเปลี่ยนความเร็วเกลียวอัดระดับที่แตกต่างกันตั้งแต่ 100 – 500 รอบต่อนาที โดยนำตัวอย่างวัตถุดิบที่ผสมด้วยตัวประสานตามรูปแบบใช้ในการทดสอบเริ่มต้น คือ อัตราส่วน 1 : 1 : 0.2 โดยน้ำหนัก (ผงถ่านวัตถุดิบ : แป้งเปียก : น้ำ) (สังเวท เสวกวิหรี, 2555) และทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อสังเกตดูลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความเร็วเกลียวอัดที่เหมาะสมกับวัตถุดิบตัวอย่าง

ความเร็วเกลียวอัด (รอบต่อนาที)	ลักษณะกายภาพของผลิตภัณฑ์
100	อัดตัวเป็นก้อนในกระบอกเกลียวอัดแน่นมาก
200	อัดตัวเป็นก้อนแน่นมาก รูปทรงได้ตามที่ต้องการ
300	อัดตัวเป็นก้อนแน่นมาก รูปทรงได้ตามที่ต้องการ
400	อัดตัวเป็นก้อนแน่น รูปทรงได้ตามที่ต้องการ
500	อัดตัวเป็นก้อนแน่น รูปทรงได้ตามที่ต้องการ

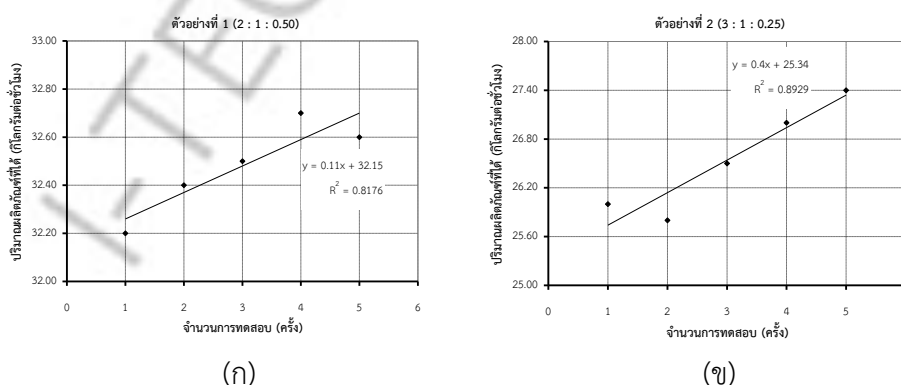
จากการทดสอบการอัดแท่งผลิตภัณฑ์ที่ความเร็วเกลียวอัดต่าง ๆ จำนวน 3 ครั้ง พบว่าเครื่องอัดแท่งถ่านชีวมวลมีความสามารถในการอัดแท่งถ่านได้ทุกความเร็วของเกลียวอัด แต่ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ซึ่งความเร็วรอบเกลียวอัดเป็น 500 รอบต่อนาที จะได้ผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งสูงสุดเฉลี่ย 32 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ยังอยู่ในเกณฑ์การพิจารณา ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเลือกความเร็วรอบดังกล่าวสำหรับการทดสอบในขั้นตอนต่อไป จากนั้นนำผลทดสอบความเร็วเกลียวอัดเฉลี่ยวิเคราะห์สมการถดถอย (regression analysis: R^2) ดังภาพที่ 4

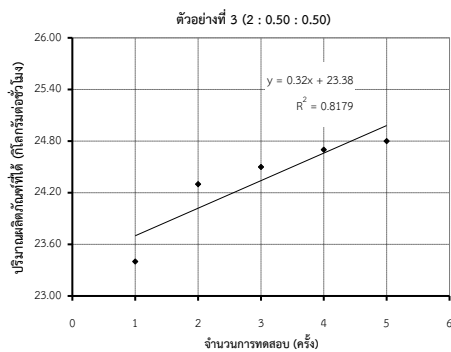


ภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์การถดถอยการทดสอบอัตราส่วนที่ความเร็วกว้างต่างกัน

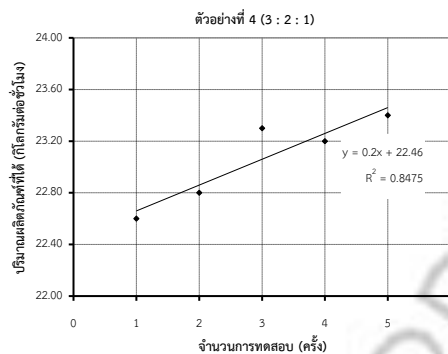
2) การทดสอบอัตราส่วนที่เหมาะสม

การทดสอบหาอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบ และตัวประสานที่เหมาะสม โดยวัตถุดิบหลักคือ เปลือกและเมล็ดกาแฟเสีย ตัวประสาน ได้แก่ ผงถ่าน แป้งเปียก และน้ำ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นทำการอัดด้วยความเร็วที่ 500 รอบต่อนาที โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง จากนั้นนำมาวิเคราะห์การถดถอยของทดสอบการอัดที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 5 ซึ่งการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ได้ตั้งตารางที่ 2 พบว่า ผลิตภัณฑ์อัดที่จำนวน 2 อัตราส่วน คือ 2 : 1 : 0.50 และ 3 : 1 : 0.25 (ผงถ่าน : แป้งเปียก : น้ำ) ที่มีอัตราการผลิตเฉลี่ยประมาณ 26 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ คือ เนื้อประสานกันดี และไม่มีรอยร้าว ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับทดสอบ และการใช้งานแสดงดังภาพที่ 6

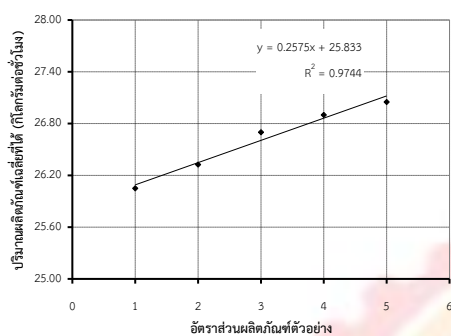




(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของทดสอบการอัดแท่งผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการอัดถ่าน และการสังเกตลักษณะทางกายภาพ

อัตราส่วนผสม	ลักษณะทางกายภาพของถ่าน
2 : 1 : 0.50	ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อประสานกันดี ไม่มีรอยร้าว
3 : 1 : 0.25	ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อประสานกันดี มีรอยร้าวเล็กน้อย
2 : 0.50 : 0.50	ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อประสานกันไม่ดี มีรอยร้าวมาก
3 : 2 : 1	ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อประสานกันไม่ดี มีรอยร้าวมาก จนทำให้ไม่เป็นแท่ง
2 : 2 : 1	เนื่องจากมีน้ำเป็นส่วนผสมมากเกินไป ทำให้ถ่านเหลวไม่จับตัวเป็นก้อน ไม่สามารถอัดแท่งได้
4 : 1 : 0.25	เนื่องจากมีการอัดตัวของวัตถุดิบในกระบอกอัดเกลียวจนแน่น ทำให้ไม่สามารถอัดแท่งได้

หมายเหตุ : อัตราส่วนผสม คือ ผงถ่านวัตถุดิบ : แป้งเปียก : น้ำ (หน่วย : กิโลกรัม) ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 6 ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวมวลจากเปลือกกาแฟ (ก) อัตราส่วน 2 : 1 : 0.50 (ข) อัตราส่วน 3 : 1 : 0.25 (ค) อัตราส่วน 2 : 0.50 : 0.50

4.3 ผลการทดสอบการจุดติดไฟ และสภาพของผลิตภัณฑ์ทางกายภาพ

เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งดังภาพที่ 6 (ก-ค) แล้ว ลดความชื้นด้วยวิธีการนำไปตากแดดเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นทดสอบการจุดติดไฟของผลิตภัณฑ์ โดยใช้เชื้อเพลิงจากไม้จุดแท่งถ่านจำนวนตัวอย่างละ 3 แท่ง ในเตาอังโล่ และต้มน้ำร้อนโดยใช้หม้ออะลูมิเนียม จำนวน 1 กิโลกรัม ภายใต้อุณหภูมิห้อง ไม่ควบคุมความชื้นบรรยากาศ ไม่มีลมพัด จากนั้นวัดอุณหภูมิของน้ำสูงสุดด้วยเทอร์โมมิเตอร์จับเวลาการจุดติด และเวลาการมอดดับ ดังภาพที่ 7



(ก)



(ข)

ภาพที่ 7 การทดสอบการจุดติดไฟของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวมวลอัดแท่ง

จากการทดสอบการจุดติดไฟ จำนวน 5 ครั้งต่อ 1 ผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง พบว่า ผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งที่อัตราส่วนผสม 2 : 1 : 0.50 และ 3 : 1 : 0.25 (ผงถ่านวัตถุดิบ : แป้งเปียก : น้ำ) มีระยะเวลาในการจุดติดไฟ และระยะเวลาในการมอดดับเฉลี่ยใกล้เคียงกันประมาณ 2 นาที และ 130 นาที ตามลำดับ และทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงเป็น 82.4 และ 78.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยมีการจุดติดไฟได้ง่าย ไม่มีการแตกประทุ เปลวไฟมีสีส้มอ่อน มีควันไฟมีสีเทาเล็กน้อย และอมชี้เฝ้า ซึ่งแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งที่อัตราส่วนผสม 2 : 0.50 : 0.50 และ 3 : 2 : 1 ที่มีระยะเวลาการจุดติดไฟที่นานกว่า และระยะเวลาในการมอดดับที่เร็วกว่า โดยจะมีลักษณะของการอมชี้เฝ้ามากกว่า 2 ผลิตภัณฑ์ข้างต้น ส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำมีค่าต่ำกว่าเฉลี่ยเป็น 74.1 และ 71.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และจากผลการทดสอบดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้นำผลิตภัณฑ์ถ่านชีวมวลอัดแท่ง 2 อัตราส่วนผสมแรก ส่งห้องปฏิบัติการทดสอบหาคุณสมบัติแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลตามมาตรฐาน ASTM ต่อไป

4.4 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์

จากผลการวิเคราะห์และทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงชีวมวลของผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งจำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM ทดสอบโดยสำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ดังตารางที่ 3 พบว่า ผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งในอัตราส่วน 2 : 1 : 0.5 มีคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์การพิจารณาที่ดี ซึ่งมีค่าความชื้นน้อย มีก๊าซซัลเฟอร์ และสารระเหยที่จัดว่าเป็นก๊าซที่ส่งผลเสียกับผู้ใช้งานน้อย แต่มีค่าความจุความร้อนที่น้อยกว่าไม่มาก อาจเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งนี้มีปริมาณของผงถ่านวัตถุดิบที่น้อยกว่าอัตราส่วนผสม 3 : 1 : 0.25

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงชีวมวลของตัวอย่างถ่านชีวมวลอัดแท่ง

ที่	รายการ	มาตรฐานวิเคราะห์	หน่วย	อัตราส่วนผสม	
				2 : 1 : 0.50	3 : 1 : 0.25
1	ค่าความชื้น (Moisture)	ASTM D 3173	%	10.33	10.52
2	เถ้า (Ash)	ASTM D 3174	%	22.02	16.74
3	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	ASTM D 5142	%	33.71	35.79
4	กำมะถัน (Sulfur)	ASTM D 3177	%	3.52	14.11
5	ค่าความจุความร้อน (Heating value)	ASTM D 5865	Kcal/Kg	4,178.00	4,399.00
6	สารระเหยได้ (Volatile matter)	ASTM D 3175	%	33.94	36.95

หมายเหตุ : ตามผลการทดสอบที่ ศธ 5810/58337 วันที่ 30 เมษายน 2558

4.5 ผลการเปรียบเทียบตัวอย่างคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงชีวมวลกับชนิดอื่น ๆ

เมื่อได้ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงแล้ว ผู้วิจัยได้ศึกษาเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางเชื้อเพลิงชีวมวลจากวัสดุชนิดอื่น ๆ ดังตารางที่ 4 พบว่า ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษวัสดุจากแป้นคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุอื่น ๆ และอยู่ในช่วงของเกณฑ์การใช้ประโยชน์ได้ พิจารณาจากค่าพลังงานความร้อนไม่ควรต่ำกว่า 3,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ค่าคาร์บอนคงตัวไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 15 เถ้าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 20 และกำมะถันรวมไม่เกินกว่าร้อยละ 2 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555) ซึ่งมีข้อดีน้อยกว่าเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากวัสดุชนิดอื่น และไม่เป็นไปตามเกณฑ์การใช้ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ทางเชื้อเพลิงชีวมวล คือ ค่ากำมะถันรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสูงกว่าร้อยละ 2 ซึ่งถ้าหากมีการนำผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งจากเปลือกและเมล็ดกาแฟเสียนี้ ควรมีกระบวนการลดค่ากำมะถันให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเสียก่อน

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงที่นิยมนำมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง

ชนิดวัสดุเหลือใช้	สารระเหย (ร้อยละ)	คาร์บอนคงตัว (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	กำมะถันรวม (ร้อยละ)	ค่าความร้อน (ร้อยละ)
ขี้เลื่อย*	75.4	22.4	2.0	0.20	4,500
กากอ้อย*	73.9	17.6	8.5	0.30	4,400
แกลบ*	62.7	17.4	20.0	0.14	3,600
ฟางข้าว*	74.4	18.3	7.3	-	4,000
ซังข้าวโพด*	76.1	21.8	2.1	-	4,400
ขุยมะพร้าว*	63.3	29.4	7.1	0.06	4,800
ต้นถั่วเหลือง*	72.5	19.1	8.4	-	4,500
ต้นมันสำปะหลัง*	76.2	19.1	4.7	1.3	4,000
เห้งน้ำมัน สำปะหลัง*	75.0	17.0	8.0	0.28	4,500
เศษหอย*	70.5	23.7	5.7	-	4,800
ไมยราบยักษ์*	71.2	25.1	3.7	-	4,600
ผักตบชวา*	58.9	15.3	25.8	1.19	3,100
กะลามะพร้าว**	73.7	25.5	0.7	0.03	4,830
ถ่าน	15.2	82.4	2.4	-	7,760
กะลามะพร้าว**					
เส้นใยปาล์ม**	71.5	23.1	5.4	-	4,820
ไม้อย่างพารา**	74.9	23.0	2.1	-	4,560
ขานอ้อย**	71.8	23.4	4.8	-	4,510
ขี้กบ**	72.4	25.1	2.5	-	4,990
เปลือกกาแฟ***	33.94	33.71	22.02	3.25	4,178

(ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555 และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย)

หมายเหตุ : * ข้อมูลจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

** ข้อมูลจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

*** ข้อมูลผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการของงานวิจัยนี้

5. สรุปผลและอภิปรายผล

เครื่องอัดแท่งถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบเกลียวอัดเย็น ประกอบด้วย ส่วนต้นกำลัง (Motor) ส่วนสกรูอัด (Screw press) พูล์และสายพาน (Pulley and belt) และช่องสำหรับใส่ชีวมวล (Hopper) อัดแท่งถ่านที่ความเร็วรอบแกนเกลียวอัดที่ 500 รอบต่อนาที ซึ่งอัตราส่วนระหว่างผงถ่านที่ติดกับตัวประสานที่อัตราส่วน 2 : 1 : 0.50 ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะทางกายภาพดีเหมาะสมสำหรับทดสอบ และการใช้งาน โดยคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM ของผลิตภัณฑ์ มีค่าความชื้นร้อยละ 10.33 เถ้าร้อยละ 22.02 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 33.71

กำหนดรวมร้อยละ 3.25 ค่าความจุความร้อน 4.18 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม สารละลายร้อยละ 33.94 โดยอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ยกเว้นกรณีค่ากำหนดที่ยังสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของการใช้ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์แห่งเชื้อเพลิงชีวมวลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 2 ดังนั้นทำให้สามารถใช้เชื้อเพลิงกากกาแฟ และเมล็ดกาแฟเสียที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตหลังการเก็บเกี่ยวของเกษตรกรเป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการผลิตถ่านชีวมวลอัดแท่งอีกหนึ่งชนิด แต่ต้องมีกระบวนการลดค่ากำหนดให้ผ่านเกณฑ์เสียก่อน จึงสามารถนำมาใช้ในการผลิต เพื่อจำหน่ายและใช้ประโยชน์ในครัวเรือนต่อไปได้

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ควรทำ crib ตัวแม่พิมพ์ให้มีความลึกมากขึ้น เพื่อเพิ่มพื้นที่การเผาไหม้ ทำให้ได้อุณหภูมิที่สูงมากขึ้น

6.2 นำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นแล้ว ใส่ถุงพลาสติกแล้วปิดผนึก เพื่อป้องกันการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์

6.3 ถ่านอัดแท่งยังไม่เป็นที่รู้จักของชุมชน จึงต้องมีการประชาสัมพันธ์ให้ชุมชนให้ได้รับข้อมูล และประโยชน์ของการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผลิตถ่านอัดแท่งใช้งาน

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอบคุณผู้ใหญ่นานาใหม่พัฒนาที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านข้อมูล และการเดินทางลงพื้นที่ในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2555). **คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสีย เพื่อการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน**. หน้า 19-25.
- กฤษฎา กันจุ. (2551). ขั้นตอนการเตรียมกาแฟ. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://student.nu.ac.th/phung/coffee6.html> เข้าดูเมื่อวันที่ 21/9/2558.
- กิตติพงษ์ ลาลุน, สมโภชน์ สุตาจันทร์ และชัยยันต์ จันทรศิริ. (2555). อิทธิพลของชนิดผงถ่านและความเร็วเกลียวอัดที่มีผลต่อสมรรถนะของชุดเกลียวอัดและคุณภาพของถ่านอัดแท่ง, **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13**.
- บัญญัติร์ โฉมรัตน์, อาทิตย์ พุทธิรักษาติ และจันสุตา คำด้อย. (2554). พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์. **วารสารวิจัย มช. 16 (1): มกราคม 2554**. หน้า 20-31.
- ฝ่ายวิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม. **คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร**. ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. วสันต์ ศรีเมือง และธวัชชัย ประมวลรัมย์. (2551). การพัฒนาเครื่องอัดเม็ดระบบเพลเลทมิลล์ให้ทำงานร่วมกับเครื่องผสมแบบเพลลอนโดยใช้เครื่องตนกำลังรวมกัน. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต**, หน้า 339-342.

- วีรชัย อางหาญ, ธราวุฒิ ไก่แก้ว, ศรัลย์ ปานศรีพงษ์ และเจนวิทย์ วรรณพีระ (2547). **การพัฒนาเครื่องอัดแท่งชีวมวลสำหรับใช้ผลิตถ่านชีวภาพ**, รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พฤศจิกายน 2547, หน้า 13-14.
- สังเวย เสวกวิหารี (2555). **ศักยภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกมังคุด**. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. กรุงเทพฯ.
- สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (2543). **วารสารนโยบายพลังงาน. 50 (ตุลาคม-ธันวาคม 2543)**. กรุงเทพฯ.
- อัจฉรา อัครจุฑิกลชัย, ชลันดา เสมสายัณห์, นัฐพร ประภักดี, ณัฐธิดา เปี่ยมสุวรรณศิริ และนิภาวรรณ ชูชาติ (2554). **การนำเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดมาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49 หน้า 162-168**. กรุงเทพฯ.
- Bhattacharya S.C., Shreatha R.M. (1990). **Biocoal Technology and Economics**. RERIC. Bangkok: Asian Institute of Technology.
- Chai O.C, Siddiqui K.M. (2000). **Characteristics of some biomass briquette prepared under modest die pressures**. Biomass and Bioenergy; 18: 223-228.