



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของกากหม้อกรองในกระบวนการผลิตน้ำตาล สำหรับขึ้นรูปเป็นชีวมวลอัดเม็ด

The Investigation of Primary Physical Characteristics of Filter Cake in Sugar Processing Regarding to Biomass Pellets Conversion

ผกามาต น้อยสุวรรณ¹⁾ กันตพงษ์ แซ่โล^{1, 2)} พีรณัฐ อันสุรีย์⁴⁾ และ กิตติพงษ์ ลาลูน^{1, 2, 3)*}Phakamat Noisuwan¹⁾ Kantapong Khaeso^{1, 2)} Peeranat Ansuree⁴⁾ and Kittipong Laloon^{1, 2, 3)*}¹⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น²⁾ ศูนย์วิจัยเครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น³⁾ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กทม.⁴⁾ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา¹⁾ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering Khonkaen University²⁾ Agricultural Machinery and Postharvest Technology Center, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand³⁾ Postharvest Technology Innovation Center, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation,
Bangkok, Thailand.⁴⁾ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Isan

Received: 12 May 2021

Revised: 21 June 2021

Accepted: 29 June 2021

Available Online: 24 December 2021

บทคัดย่อ

กากหม้อกรองเป็นของเสียในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาล พบว่ามีค่าความร้อนใกล้เคียงกับ
ขาน้อยที่ให้เป็นเชื้อเพลิงทั่วไปในโรงไฟฟ้าชีวมวลและสามารถอัดขึ้นรูปได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ

ศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น มุมกอง และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และศึกษาการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองด้วยชุดทดสอบแบบลูกกลิ้งกดอัดบนแผ่นจานอัด ทำการทดสอบที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) โดยมีปัจจัยทดสอบคือ อัตราการป้อน 3 ระดับ ได้แก่ 40 45 และ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วรอบแผ่นอัด 4 ระดับ ได้แก่ 180 190 200 และ 210 รอบต่อนาที จากผลการศึกษาพบว่ากากหม้อกรองที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ทำการขึ้นรูปที่อัตราการป้อน 45 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วรอบแผ่นอัด 210 รอบต่อนาที ได้กากหม้อกรองอัดเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.66 ± 0.04 มิลลิเมตร ขนาดความยาวเฉลี่ย 31.53 ± 0.37 มิลลิเมตร ร้อยละเศษผงเฉลี่ย 1.31 ± 0.01 ความทนทานเฉลี่ย 98.26 ± 0.05 เปอร์เซ็นต์ และความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 691.32 ± 5.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความร้อนโดยประมาณ 11,928 จูลต่อกรัม ซึ่งสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงเสริมในการผลิตพลังงานไฟฟ้าชีวมวลได้

คำสำคัญ: สมบัติทางกายภาพ กากหม้อกรอง ชีวมวลอัดเม็ด กระบวนการอัด

Abstract

Filter cake is a waste product which has a calorific value comparable to bagasse and can be used as a general fuel and can be extruded in biomass power plants, in the sugar production phase of the sugar factory. The objective of this research was to investigate the physical properties of filter cake, specifically moisture content, bulk density, angle of repose, and coefficient of friction. This includes investigating the formation of pellets from filter cake using a roller molding test set on a flat die. The analysis was carried out using a standardized moisture content of 30.26 percent wet basis together with the test factor including three ranges of feed rates: 40, 45, and 50 kg/h, as well as four levels of compression die speeds: 180, 190, 200, and 210 rpm. According to the study results, the filter cake with a wet basis moisture content at 30.26 percent, shaped at a feed rate of 45 kg/h, and the compression die at 210 rpm, is the most appropriate. Being in harmony with the standard range that the suitable pellets should have the following dimensions: average diameter 5.66 ± 0.04 mm, average length 31.53 ± 0.37 mm, average fines 1.31 ± 0.01 , average durability 98.26 ± 0.05 percent, and average bulk density 691.32 ± 5.00 kg / m³. It has an estimated calorific value of 11,928 J / g, specially designed for use as a supplemental fuel in the biomass electric power generation.

Keywords: Physical property: Filter cake: Biomass pellets: Pelletizing

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยพบว่า ปี 2017, 2018 และ 2019 มีการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 185,130.89 187,388.54 และ 193,439.15 ล้านกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ [1] ทำให้มีความต้องการเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น อันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติและเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำนวนมาก เป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน ทั้งยังเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป ทำให้ทั่วโลกเกิดการตระหนักถึงปัญหาและหันมาเลือกใช้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังเชื้อเพลิงจากชีวมวลอัดเม็ด

ความต้องการใช้พลังงานชีวมวลอัดเม็ดได้ถูกพูดถึงและถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มความต้องการที่สูงขึ้น [2] โดยในต่างประเทศ ได้มีการผลิตเชื้อเพลิงไม้อัดเม็ดที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมไม้แปรรูป มีปริมาณการผลิตไม้อัดเม็ด 2.5 16 และ 28 ล้านตัน ในปี 2000 2005 2010 และ 2015 ตามลำดับ [3] โดยสหภาพยุโรปถูกจัดเป็นผู้ผลิตไม้อัดเม็ดรายใหญ่ที่สุดในโลก [4] และในประเทศไทย มีการทำเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรเป็นหลัก ทำให้มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น ฟางข้าว ได้จากการเก็บเกี่ยวข้าว แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ เศษยูคาลิปตัส จากอุตสาหกรรม

กระดาษ รวมไปถึงใบอ้อยและชานอ้อย ที่ได้จากไร่ อ้อยและกระบวนการผลิตน้ำตาลของอุตสาหกรรมโรงงานน้ำตาล ซึ่งใบอ้อยและชานอ้อยนี้ จะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้า โดยในปี 2021 มีโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย 223 แห่ง และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ความต้องการพลังงานชีวมวลจากอุตสาหกรรมเกษตรก็มีมากขึ้นเช่นกัน [5]

อุตสาหกรรมน้ำตาล มีขั้นตอนการผลิตน้ำตาลทราย เริ่มจากการสกัดน้ำอ้อยโดยลำเลียงอ้อยเข้าสู่ใบมีดเพื่อสับลดขนาดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนผ่านเข้าลูกหีบ น้ำอ้อยที่ได้จากการสกัดจะนำเข้าสู่กระบวนการทำใส เพื่อแยกสิ่งเจือปนออกโดยการให้ความร้อนและผสมปูนขาว ทำให้น้ำอ้อยที่สะอาดนำมาต้มเพื่อระเหยเอาน้ำออกจะได้เป็นน้ำเชื่อม จากนั้นนำไปเคี่ยวในหม้อสุญญากาศจนเกิดเป็นผลึกน้ำตาล และนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลในหม้อปั่น ได้ผลผลิตหลักคือน้ำตาลทรายดิบออกมา นอกจากนี้ยังมีผลผลิตพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการทั้งหมด ที่กล่าวมาข้างต้นคือ กากน้ำตาล (molasses) ที่ได้จากการปั่นแยกผลึกน้ำตาล ซึ่งถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตเอทานอล ชานอ้อย (bagasse) ได้จากกระบวนการหีบสกัด ถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าและต้มหม้อไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำตาล และกากหม้อกรอง (filter cake) ได้จากการกรองตะกอนในระบบสุญญากาศของการทำใส่น้ำอ้อย ซึ่งมีศักยภาพในการใช้บำรุงและเพิ่มธาตุอาหารในดินได้ดี ส่วนมากจึงนำไปใช้ประโยชน์ในเรื่องของการปรับปรุงดินและปุ๋ย [6]

จากข้อมูลพื้นที่เก็บเกี่ยวและปริมาณอ้อยส่งโรงงาน ปีการผลิต 2019/2020 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย พบว่า มีปริมาณอ้อยเข้าหีบ 75.97 ล้านตัน [7] ได้กากหม้อกรองจากกระบวนการผลิตน้ำตาลคิดเป็น 3 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักอ้อยเข้าหีบ [8] ดังนั้น จึงมีกากหม้อกรองที่เหลือจากการผลิตน้ำตาล ปีละประมาณ 2.28 ล้านตัน โดยทั่วไปกากหม้อกรอง มีลักษณะเป็นตะกอน สีน้ำตาลเข้มและมีความชื้นสูง การจัดการกากหม้อกรองนั้น จะทำการกองรวมกันไว้ จึงอาจเกิดการสะสมของจุลินทรีย์จนเน่าเสียและส่งกลิ่นเหม็น อีกทั้งทุกโรงงานจะมีปริมาณของเสียนี้อยู่มาก ไม่สามารถจัดการให้หมดไปได้ จึงควรหาวิธีการแก้ไขปัญหานี้

ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของอุตสาหกรรมน้ำตาลได้ใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงหลัก แต่เนื่องจากในฤดูเปิดหีบอ้อย มีแค่ช่วงเดือนพฤศจิกายนจนถึงเมษายนของทุกปี [9] ทำให้ปริมาณขานอ้อยที่ได้รับไม่เพียงพอต่อการเป็นเชื้อเพลิงตลอดทั้งปี ต้องทำการรับซื้อเชื้อเพลิงเสริมเพื่อรองรับความต้องการใช้พลังงานในช่วงนอกฤดูเก็บเกี่ยวอ้อย อันได้แก่ ใบอ้อย แกลบ ไม้สับ หญ้า ชังข้าวโพด และฟางข้าว [10] จากการนำกากหม้อกรองไปหาค่าความร้อน พบว่า มีค่าความร้อนความใกล้เคียงกับขานอ้อยที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงงานน้ำตาล จึงเกิดแนวคิดใช้หลักการเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน (waste to energy) ด้วยการนำกากหม้อกรองที่เป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลมาผลิตเป็นชีวมวลอัดเม็ด เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริม ทำให้มีเชื้อเพลิงที่ใช้ได้ต่อเนื่องมากขึ้น เพียงพอต่อความต้องการใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลและผลิตไฟฟ้า

เพื่อจำหน่าย ลดปริมาณการซื้อเชื้อเพลิงเสริม และถือเป็นการจัดการของเสียจากโรงงานให้หมดไป

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า กากหม้อกรองสามารถอัดขึ้นรูปได้แต่ยังมีความหนาแน่นต่ำและความทนทานไม่ได้มาตรฐาน ทั้งนี้คุณภาพของชีวมวลอัดเม็ดจะขึ้นอยู่กับประเภทของชีวมวลและกระบวนการอัด [11] ซึ่งชีวมวลแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะ จำเป็นต้องมีการศึกษาเงื่อนไขกระบวนการอัดที่เหมาะสมกับชีวมวลนั้น ๆ [12] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสม สำหรับการอัดเม็ดขึ้นรูปกากหม้อกรอง ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาหาอัตราการบด และความเร็วรอบของเครื่องอัดแบบจานหมุนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้กากหม้อกรองอัดเม็ดที่มีคุณภาพ และคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานชีวมวลอัดเม็ด

2. วิธีการวิจัย

กากหม้อกรองที่นำมาศึกษาเป็นวัสดุเหลือทิ้งในกระบวนการผลิตน้ำตาล ที่ออกจากหม้อกรองในกระบวนการทำใส่น้ำอ้อยของโรงงานน้ำตาลเป็นตะกอนและมีสีดำค่อนข้างน้ำตาล มีค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 65.29 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) จากนั้นนำมาตากลดความชื้นแล้วทดสอบอัดเบื้องต้น โดยทำการตากแดดและทำการเก็บค่าความชื้น และทำการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพ

2.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพบางประการของกากหม้อกรอง ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น มุมกอง สัมประสิทธิ์

ความเสียหาย เพื่อให้ได้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุชีวมวลนำไปประกอบการตัดสินใจในการผลิตเชื้อเพลิง ซึ่งมีวิธีดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติบางประการของกากหม้อกรอง ดังนี้

1) ความชื้น (moisture content) ความชื้นของวัสดุมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ซึ่งมีผลต่อการเก็บรักษา การขนถ่าย และกระบวนการผลิต [13] การหาค่าความชื้นของหม้อกรอง ทำการชั่งน้ำหนักก่อนอบ (ตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาค่าความชื้นต้องมีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 25 กรัม) จากนั้นนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักหลังอบ [14] ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสามารถหาได้จากสมการที่ 1 ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ

$$MC\% = \frac{\text{Weight before drying} - \text{Weight after drying}}{\text{Weight before drying}} \times 100 \quad (1)$$

2) ความหนาแน่นรวม (bulk density) ค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความหนาแน่นเนื้อ รูปร่าง ขนาดลักษณะผิว สิ่งปะปน ความชื้น และวิธีการบรรจุ [13] การหาความหนาแน่นรวม วัดโดยชั่งน้ำหนักของกากตะกอนหม้อกรองต่อปริมาตรบรรจุ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร [15] ทำโดยปล่อยวัสดุลงในภาชนะบรรจุอย่างอิสระ ทำการปาดโดยใช้วัสดุผิวเรียบที่มีความยาวเกินของภาชนะบรรจุ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักวัสดุที่อยู่ในกล่อง โดยทำการทดสอบ 10 ซ้ำ คำนวณจากสมการที่ 2

$$\rho_b = \frac{m}{V} \quad (2)$$

เมื่อ ρ_b = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

m = น้ำหนักของกากตะกอนหม้อกรองที่อยู่ในกล่อง (กิโลกรัม)

V = ปริมาตรของภาชนะ (ลูกบาศก์เมตร)

3) มุมกอง (angle of repose) จะสัมพันธ์กับชนิดของวัสดุและสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ สามารถนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบขนถ่ายวัสดุที่อยู่ในอุปกรณ์ขนถ่ายและในถังเก็บวัสดุและยังใช้คำนวณหารูปทรงของถังเก็บวัสดุที่เหมาะสมและแรงที่กระทำกับถังเก็บวัสดุได้ [13] การหาค่ามุมกองของกากตะกอนหม้อกรอง โดยใช้อุปกรณ์ Filling Hopper มีฐานเป็นวงกลมที่ทราบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยปล่อยวัสดุลงอย่างอิสระ จากนั้นทำการวัดความสูงจากฐานถึงปลายของกองวัสดุ [16] โดยทำการทดสอบ 10 ซ้ำ และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่ามุมกองตามสมการ 3

$$\text{Angle of repose} = \tan^{-1}\left(\frac{2H}{D}\right) \quad (3)$$

เมื่อ H = ความสูงของกองวัสดุ (เซนติเมตร)

D = ความยาวของฐานกองวัสดุ (เซนติเมตร)

4) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (coefficient of friction) มีบทบาทและความสำคัญในการออกแบบถังบรรจุ ถังเก็บ คำนวณออกแบบอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุและอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น การตัด การหั่น หรือการอัดผลิตภัณฑ์ [13] การหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของกากตะกอนหม้อกรอง ใช้เครื่องมือวัดมุมเสียดทาน ทดสอบกับพื้นสแตนเลส พื้นสังกะสี พื้นเหล็ก และพื้นยาง โดยการสุมตัวอย่าง นำวัสดุวางที่แท่นของเครื่องมือวัดมุมเสียดทาน จากนั้นยกพื้นแท่นขึ้นจนวัสดุเริ่มไหล อ่านค่ามุมที่ได้ [17] ทำการทดสอบ

10 ข้า หาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผงดำนจาก
สมการที่ 4

$$\mu = \tan \theta \quad (4)$$

เมื่อ μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

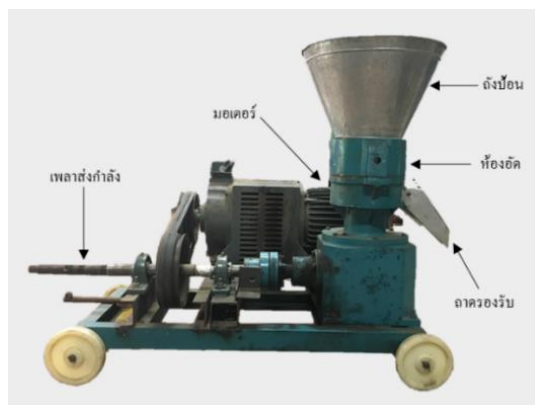
θ = มุมเสียดทานของกาคตะกอนหม้อกรอง

2.2 การศึกษาการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวล อัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

หลังจากที่ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของกาก
หม้อกรองที่แต่ละความชื้นแล้วทดสอบอัดเบื้องต้น
พบว่าที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก
สามารถอัดขึ้นรูปได้ จึงมาศึกษาการอัดขึ้นรูปเพื่อหา
คุณภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

โดยการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดด้วย
เครื่องอัดแบบจานหมุน ดังแสดงในรูปที่ 1 ใช้มอเตอร์
ต้นกำลังขนาด 7.5 แรงม้า ภายในห้องอัด
ประกอบด้วยลูกกลิ้งเหล็ก 2 ลูก ที่มีลักษณะคล้าย
เฟือง ทำหน้าที่บิดและบีบอัดกากหม้อกรองผ่านรูอัด
บนจานอัดที่มีลักษณะทรงกรวยขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปเริ่มจาก
การเดินเครื่องและปรับความเร็วรอบให้แผ่นจานอัด
หมุนโดยถูกกดด้วยลูกกลิ้ง 2 ชุด เกิดความร้อนบน
แผ่นอัด วัดอุณหภูมิห้องอัดด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ
แบบอินฟราเรด ให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 100 – 120
องศาเซลเซียส จึงทำการป้อนกากหม้อกรองผ่านถัง
ป้อนในอัตราการป้อนที่กำหนด ชุดอัดจะทำการอัด
กากหม้อกรองให้ลงไปในรูของแผ่นอัด โดยแผ่นอัดจะ
หมุนวนไปเรื่อย ๆ จนกากหม้อกรองลงไปช่องรูของ
แผ่นจานขนาด 6 มิลลิเมตร เมื่อถึงความยาวที่กำหนด
ใบมีดที่อยู่ใต้แผ่นอัดเม็ดจะทำหน้าที่ตัดและกากหม้อ
กรองอัดเม็ดตกลงมาสู่ถาดรองรับ จากนั้นนำไปตาก

ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ความร้อนระเหยออก และเพื่อให้
ตัวเม็ดเชื้อเพลิงเกิดการแข็งตัว ทำการตากทิ้งไว้จน
เม็ดเชื้อเพลิงมีค่าความชื้นที่ลดลงถึงค่ามาตรฐาน โดย
ชีวมวลอัดเม็ดที่กำหนด ต้องมีค่าความชื้นต่ำกว่า 10
เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) จึงเหมาะสำหรับการ
จัดเก็บและนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ในการทดสอบนี้ได้
ศึกษาปัจจัยด้านความเร็วรอบแผ่นอัด 4 ระดับ คือ
180 190 200 และ 210 รอบต่อนาที ควบคุมความเร็ว
รอบแผ่นอัดด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Inverter) หรือ
คิดเป็นความเร็วเชิงเส้น 1.12 1.27 1.33 และ 1.40
เมตรต่อวินาที และอัตราการป้อนวัสดุ 3 ระดับ ได้แก่
40 45 และ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ควบคุมอัตราการ
ป้อนด้วยสายพานลำเลียง โดยทำการปรับความเร็ว
ของสายพานลำเลียงจนได้อัตราการป้อนที่กำหนด มี
ค่าชี้ผลคือ 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2) ความยาว
3) ร้อยละเศษผง 4) ดัชนีความทนทาน และ 5) ความ
หนาแน่นรวม ของชีวมวลอัดเม็ดที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 1 เครื่องอัดเม็ดแบบจานหมุน

2.3 การศึกษาค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ด กากหม้อกรอง

ประเทศไทยใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชีวมวลอัดเม็ดในการนำเข้าหรือส่งออก อ้างอิงตามมาตรฐานของมาตรฐานยุโรป (EN 14961 และ ENplus) และมาตรฐานอเมริกา (pellet fuels institute, PFI) [18] ดังนั้น ชีวมวลอัดเม็ดที่ได้จำเป็นต้องผลิตให้ได้ตามมาตรฐานรวมไปถึงวิธีการทดสอบด้วย

การหาค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ด กระทำหลังจากทดสอบในแต่ละปัจจัยศึกษา ตัวอย่างที่ได้จะถูกนำไปตากแดดเพื่อลดความชื้น จนกระทั่งชีวมวลอัดเม็ดมีค่าความชื้นลดลงเหลือต่ำกว่า 10 มาตรฐานเปียก ทำการหาค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง ประกอบไปด้วย

1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) สำหรับการหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชีวมวลอัดเม็ดจะหาค่าตามที่มาตรฐานชีวมวลอัดเม็ดของอเมริกา (Pellet Fuels Institute, PFI) ได้กำหนดไว้ดังนี้ ทำการสุ่มตัวอย่างกากตะกอนหม้อกรองอัดเม็ด 5 ตัวอย่าง และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ ที่ความละเอียด 0.001 นิ้ว

2) ความยาว (length) สำหรับการหาค่าความยาวของชีวมวลอัดเม็ดจะหาค่าตามที่มาตรฐานชีวมวลอัดเม็ดของอเมริกา (Pellet Fuels Institute, PFI) โดยชั่งตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบหาค่าความยาว (IW) ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.1 กรัม วัดความยาวด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ บันทึกค่าความละเอียดที่ 0.001 นิ้ว ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดที่มีความยาวมากกว่า 1.5 นิ้ว แยกไว้ต่างหากและชั่งน้ำหนัก (LW) บันทึกผลการทดลอง และคำนวณหา

ค่าความยาวดังสมการที่ 5 ซึ่งจะแสดงเป็นค่าร้อยละของมวลของชีวมวลอัดเม็ดที่มีความยาวมากกว่า 1.5 นิ้ว จากตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดที่นำมาทดสอบ ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ

$$\text{ความยาว (เปอร์เซ็นต์} > 1.5 \text{ นิ้ว)} = \left(\frac{LW}{IW} \right) \times 100 \quad (5)$$

3) ร้อยละของเศษผง (fines) รายละเอียดการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานอเมริกา (Pellet Fuels Institute, PFI) โดยชั่งน้ำหนักภาชนะ (BW) ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.1 กรัม นำตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดใส่ลงในภาชนะและชั่งน้ำหนัก (IW) ร่อนด้วยตะแกรงร่อนที่มีขนาดรูตะแกรง 1/8 นิ้ว นำภาชนะรองรับได้ตะแกรงร่อนที่มีเศษผงตกลงมาไปยังน้ำหนัก (CFW) และชั่งน้ำหนักภาชนะรองรับ (CW) บันทึกผลและคำนวณหาค่าร้อยละของเศษผง ดังสมการที่ 6 ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

$$\% \text{ Fines} = \left(\frac{CFW - CW}{IW - BW} \right) \times 100 \quad (6)$$

4) ดัชนีความทนทาน (durability) รายละเอียดการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานอเมริกา (PFI) ได้กำหนดไว้ คือชั่งตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด 1100 กรัม ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 0.1 กรัม ร่อนด้วยตะแกรงร่อนที่มีขนาดรูตะแกรง 1/8 นิ้ว เก็บชีวมวลอัดเม็ดที่ค้างตะแกรงมาชั่ง 500 ± 2 กรัม (IW) นำไปเข้าเครื่องทดสอบความทนทาน หมุนด้วยความเร็ว 50 ± 2 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำไปร่อนอีกครั้งเพื่อแยกส่วนที่แตกหักออกและชั่งน้ำหนักส่วนที่เหลือ (WPW) บันทึกผลการทดลอง และคำนวณหาค่าความทนทานดังสมการที่ 7 ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

$$PDI = \left(\frac{WPW}{IW} \right) \times 100 \quad (7)$$

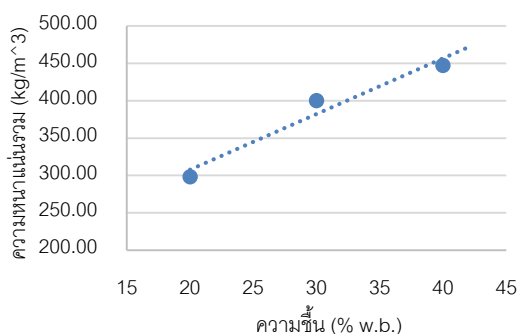
5) ความหนาแน่นรวม (bulk density) ตามมาตรฐาน ASTM E 873 [19] ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ สำหรับการหาค่าความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ทดสอบเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 2.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง

6) ค่าความร้อน (heating value) การวิเคราะห์หาค่าความร้อนเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D240 [20] เป็นการตัวอย่างที่ต้องการทราบค่าความร้อน โดยใช้เครื่อง IKA C 5000 Automated Bomb calorimeter ทำการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง พบว่า ความชื้นของกากหม้อกรองที่ทดสอบ 3 ระดับ มีความชื้นเฉลี่ย 20.40 30.26 และ 40.47 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)



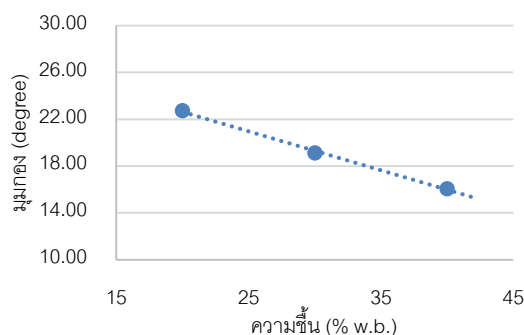
รูปที่ 2 ผลของความชื้นที่มีผลต่อ

ความหนาแน่นรวมของกากหม้อกรอง

ผลการศึกษาความหนาแน่นรวมของกากหม้อกรอง พบว่าความหนาแน่นรวมแปรผันตรงกับ

ความชื้น สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าความหนาแน่นของหญ้าเนเปียร์ [21] กล่าวคือ ค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีความหนาแน่นรวมกากหม้อกรองเฉลี่ย 298.30 ± 11.92 400.47 ± 8.78 และ 447.41 ± 2.14 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ความชื้น 20.40 30.26 และ 40 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ตามลำดับ

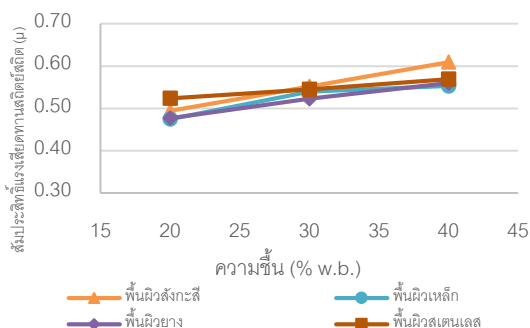
ผลการศึกษาค่ามูมกองของกากหม้อกรองพบว่า ค่ามูมกองแปรผกผันกับความชื้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาค่ามูมกองของหญ้าเนเปียร์ [21] กล่าวคือ ค่ามูมกองจะลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมามีค่ามูมกองของกากหม้อกรองเฉลี่ย 22.74 ± 1.63 19.12 ± 1.43 และ 16.06 ± 0.41 องศา ที่ความชื้น 20.40 30.26 และ 40.47 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ตามลำดับ



รูปที่ 3 ผลของความชื้นที่มีผลต่อมูมกองของกากหม้อกรอง

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของกากหม้อกรอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแปรผันตรงกับความชื้นซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของหญ้าเนเปียร์ [21] กล่าวคือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะ

เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยพื้นผิวสังกะสี มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ยสูงสุดที่ 0.61 ± 0.94 รองลงมาคือ พื้นผิวสแตนเลสมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ย 0.55 ± 0.84



รูปที่ 4 ผลของความชื้นที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียหายของกากหม้อกรอง

3.2 ผลการศึกษาการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

จากการทดสอบการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง ด้วยชุดทดสอบแบบลูกกลิ้งกดอัดบนแผ่นจานอัด (flat die pellet mill) จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรอง ที่ความชื้นเฉลี่ย 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) จากนั้นนำกากหม้อกรองที่ความชื้นดังกล่าวมาทำการทดสอบอัดเม็ดกากหม้อกรอง โดยมีปัจจัยทดสอบได้แก่ อัตราการบ้อน 4 ระดับ คือ 40 45 และ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วรอบแผ่นอัด 4 ระดับ คือ 180 190 200 และ 210 รอบต่อนาที

ผลการศึกษาพบว่า ทุกปัจจัยที่ศึกษาสามารถอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกากหม้อกรองอัดเม็ดที่ได้มีสีดำเข้ม มีลักษณะผิวมันวาว เมื่อ

สัมผัสมีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีความหนาแน่นและแข็งแรง และมีความทนทานต่อการแตกหักระหว่างขนย้าย



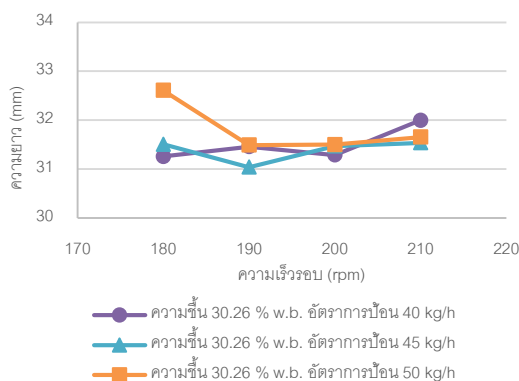
รูปที่ 5 ลักษณะเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)

3.3 ผลการศึกษาค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

3.3.1 ความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

ตามมาตรฐานการทดสอบความยาว ซึ่งจะแสดงเป็นค่าร้อยละของมวลของชีวมวลอัดเม็ดที่มีความยาวมากกว่า 1.5 นิ้ว (38.1 มิลลิเมตร) จากตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดที่นำมาทดสอบ ตามมาตรฐานอเมริกา (PFI) พบว่า เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง มีความยาวไม่เกิน 38.1 มิลลิเมตรทุกเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้นทุกปัจจัยการศึกษาผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ได้กากหม้อกรองอัดเม็ดมีความยาวเฉลี่ยสูงสุด 32.61 ± 0.41 มิลลิเมตร เนื่องจากกากหม้อกรองที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)

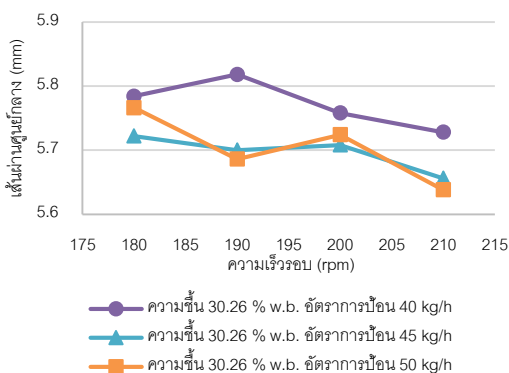
เมื่อนำมาทดสอบอัดเม็ดจะเกิดความร้อนระหว่างกระบวนการอัดและลิกนินเกิดการละลาย อนุภาคของกากหม้อกรองที่ประกอบด้วยความชื้น ความร้อน และลิกนิน จึงเกิดความเหนียวและเกิดการจับตัวกันของอนุภาคที่มีโครงสร้างแข็งแรง ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงเกิดการขึ้นรูปและยาวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ความยาวของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

3.3.2 เส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

จากการทดสอบการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากกากหม้อกรองด้วยแผ่นอัดที่มีรูขนาด 6 มิลลิเมตร พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ที่ 5.82 ± 0.07 มิลลิเมตร และมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 5.64 ± 0.05 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7

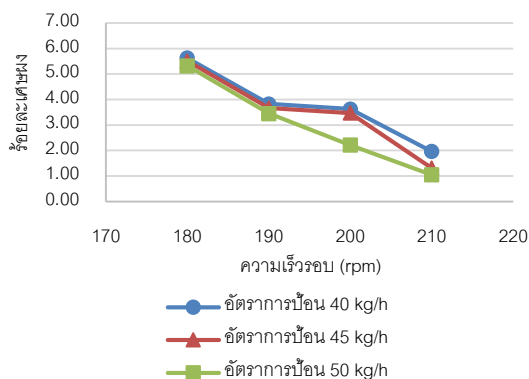


รูปที่ 7 เส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

ที่อัตราการป้อนต่างกันจะเห็นได้ว่า ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของกากหม้อกรองอัดเม็ดเล็กกว่าขนาดของรูอัด เนื่องจากว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่ออกมาจากกระบวนการอัดในช่วงแรกยังมีความชื้นหรือโมเลกุลของน้ำแทรกตัวอยู่ในเม็ด เมื่อนำมาตากให้มีความชื้นที่ต่ำลง น้ำที่แทรกอยู่จะเริ่มระเหยออก ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงเกิดการหดตัวและเล็กกว่าเดิม เมื่อความเร็วรอบของแผ่นอัดเร็วขึ้นทำให้ความหนาแน่นที่คลายตัวสุดท้ายของเชื้อเพลิงอัดเม็ดลดลง และขนาดเม็ดที่เล็กลงเล็กน้อยหลังจากนำออกจากแม่พิมพ์ เนื่องจากระยะเวลาการอัด (holding times) ที่กากหม้อกรองถูกอัดอยู่ในรูอัดของแผ่นอัดมีเวลาน้อยลงทำให้มีอัตราการคืนตัวสูง เมื่อชีวมวลอัดแท่งแข็งเกิดการหดตัวและมีความหนาแน่นต่ำไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yadong Li และ Henry Liu [22]

3.3.3 ร้อยละเศษผงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

จากการทดสอบร้อยละเศษผง ปริมาณร้อยละเศษผงมักเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากการบดอัดขึ้นรูป หากมีกระบวนการอัดที่เหมาะสมกับชีวมวลนั้น ๆ ส่งผลให้การอัดเม็ดมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพิ่มร้อยละการขึ้นรูป มีเศษผงน้อยและลดขั้นตอนการดักเก็บฝุ่นซึ่งในกระบวนการร่อนเม็ดเชื้อเพลิงซึ่งเป็นขั้นตอนหลังจากกระบวนการอัดตามมาตรฐานอเมริกา (PFI) กำหนดให้ร้อยละของเศษผงไม่ควรเกิน 1.0 % (PFI standard และ PFI utility)



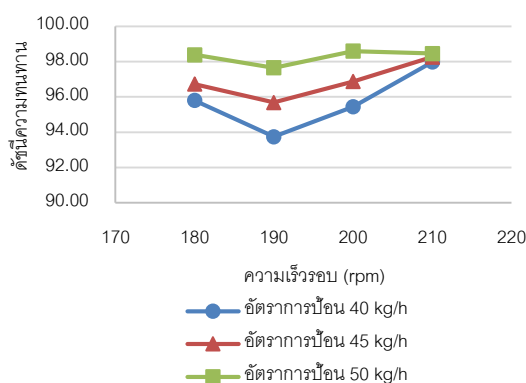
รูปที่ 8 ร้อยละเศษผงของเชื้อเพลิงอัดเม็ด
กากหม้อกรอง

ผลการศึกษาร้อยละเศษผงในการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง พบว่าค่าร้อยละเศษผงแปรผันตรงกับอัตราการป้อน และความเร็วรอบแผ่นอัด (รูปที่ 8) กล่าวคือ ร้อยละเศษผงมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนและความเร็วรอบแผ่นอัด เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของลูกกลิ้งกับแผ่นอัด ทำให้สารลิกนินในกากหม้อกรองละลายและประสานอนุภาคของกากหม้อกรองได้ดี เกิดการขึ้นรูปและจับตัวกันของอนุภาคได้ดีขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเศษฟุ้งน้อยลง

3.3.4 ดัชนีความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

จากผลการศึกษาดัชนีความทนทานของกากหม้อกรองอัดเม็ด พบว่าดัชนีความทนทานแปรผันตรงกับอัตราการป้อนและความเร็วรอบแผ่นอัด กล่าวคือ ดัชนีความทนทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อน และเพิ่มความเร็วยรอบแผ่นอัด ที่ความขึ้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) อัตราการป้อน 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วรอบแผ่นอัด 200 รอบต่อนาที มีค่าดัชนีความทนทานเฉลี่ยสูงสุดคือ

98.59±0.07 ดังแสดงในรูปที่ 9 เนื่องจากการเกิด Starch gelatinization [23] จากช่วงอุณหภูมิของการเกิด Starch gelatinization เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น เม็ดแป้งจะพองตัวเพิ่มขึ้นและมีความหนืดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [24] คือเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนและความเร็วรอบ ทำให้เกิดความร้อน ทำให้สารลิกนินละลายประสานอนุภาคของกากหม้อกรองได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าเศษผงลดลง ความทนทานเพิ่มขึ้น แต่หากเม็ดแป้งถึงจุดที่เม็ดแป้งเกิดการพองตัวสูงสุดและให้ความหนืดสูงสุด จากนั้นเม็ดแป้งจะแตกถึงจุดสูงสุด ซึ่งไม่สามารถคืนสภาพได้ทำให้ความทนทานลดลง ตามมาตรฐานอเมริกา (PFI) กำหนดให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีดัชนีความทนทานมากกว่าหรือเท่ากับ 95.0 เปอร์เซ็นต์

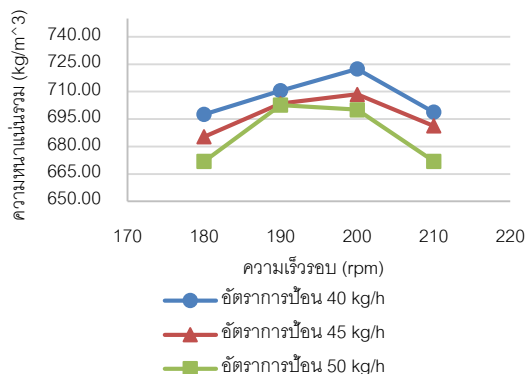


รูปที่ 9 ดัชนีความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดกากหม้อกรองความขึ้น 30.26 เปอร์เซ็นต์
(มาตรฐานเปียก)

3.3.5 ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

ผลการศึกษา พบว่าอัตราการป้อน แปรผกผันกับความหนาแน่นรวมดังแสดงในรูปที่ 10 กล่าวคือ ความ

หนาแน่นรวมลดลงเมื่ออัตราการบ้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบแผ่นอัดจาก 180 190 และ 200 รอบต่อนาที ความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบแผ่นอัด เพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 210 รอบต่อนาที เนื่องจากปรากฏการณ์ของน้ำและแป้ง (Starch คือ แป้ง เป็นโพลิเมอร์คาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช) เมื่อได้รับความร้อนเม็ดแป้งจะคลายตัวและรวมกับน้ำที่ล้อมรอบ [24] ช่วงที่เพิ่มความเร็วรอบเป็น 210 รอบต่อนาที เป็นช่วงที่แป้งรวมตัวกับน้ำได้สูงสุดเมื่อกากหม้อกรองอัดเม็ดเย็นตัวลง น้ำที่มีอยู่จะหายไปทำให้เกิดช่องว่างภายในเม็ดเชื้อเพลิง ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมมีค่าลดลง



รูปที่ 10 ความหนาแน่นรวมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหม้อกรองความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก)

3.3.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรอง

เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองมีค่าความร้อนโดยประมาณ 11,928 จูลต่อกรัม เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับขาน้อยที่เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็น

เชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลแล้ว พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ หรืออาจใช้เป็นเชื้อเพลิงเสริมในโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

4. สรุป

การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการอัดเม็ดชีวมวลจากกากหม้อกรองของโรงงานน้ำตาล เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีคุณภาพตรงตามมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวล โดยมีการอัดเม็ดขึ้นรูปจากหม้อกรองที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) มีปัจจัยศึกษา คือ อัตราการบ้อน 3 ระดับ คือ 40 45 และ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ ความเร็วรอบแผ่นอัด 4 ระดับ คือ 180 190 200 และ 210 รอบต่อนาที คุณสมบัติทางกายภาพจากหม้อกรองที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) มีค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 400.47 kg / m³ ค่ามุมกอง 19.12 องศา และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตสูงสุดที่พื้นผิวสังกะสี และพื้นผิวสเตนเลส คือ 0.55 ต่ำสุดที่พื้นผิวยางคือ 0.52 การขึ้นรูปอัดเม็ดจากหม้อกรองที่ความชื้น 30.26 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานเปียก) ทุกปัจจัยที่ศึกษาสามารถอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ดี มีความเหมาะสมในการนำไปอัดเม็ดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลทำ ที่อัตราการบ้อน 45 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ ความเร็วรอบแผ่นอัด 210 รอบต่อนาที ได้กากหม้อกรองอัดเม็ดที่เหมาะสมมีความยาวเฉลี่ย 31.53±0.37 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.66±0.04 มิลลิเมตร ร้อยละเศษผงเฉลี่ย 1.31±0.01 ความทนทานเฉลี่ย 98.26±0.05 เปอร์เซ็นต์ และความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 691.32±5.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์

เมตร มีค่าความร้อนโดยประมาณ 11,928 จูลต่อกรัม เนื่องจากลักษณะของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหมักกรอง มีค่าคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานกำหนด และมีค่าความร้อนซึ่งเหมาะแก่การนำมาเป็นเชื้อเพลิงเสริมในกระบวนการผลิตน้ำตาลและการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กทม. และขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องจักรกลเกษตรและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนสถานที่รวมถึงสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า. (สืบออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 7 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก : https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&layout=edit&id=79&Itemid=200.
- [2] Laschi A, Marchi E, Gonzalez-Garcia S. Environmental performance of wood pellets' production through life cycle analysis. *Energy*. 2016; (130): 469-80.
- [3] Fiona MM. Global wood pellet market outlook [Internet]. 2015 [cited 2021 March 7]. Available from: <https://www.pellet.org/images/2015/FionaMcDermottHawkinsWright.pdf>.
- [4] Calderón C, Gauthier G, Jossart JM. AEBIOM statistical report 2015 [Internet]. 2015 [cited 2021 March 14]. Available from: <http://www.propellets.at/wpcontent/uploads/2015-aebiomstatisticalreportzusammenfassung.pdf>.
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. ข้อมูลโรงไฟฟ้าชีวมวล. (สืบออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 14 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.dede.go.th/ewtnews.php?nid=41810>.
- [6] Goes T, Marra R, Silva GS. Setor sucroalcooleiro no Brasil situac,ao atual e perspectivas revista Política Agrícola. *Revista de politica Agricola*. 2008; 17(2): 39-51.
- [7] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. รายงานสถานการณ์การปลูกอ้อยปีการผลิต 2562/63. (สืบออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 14 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/923-1854.pdf>.
- [8] นวนรงค์ ชลคุป ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยงค์ และ สุปงกช ไตโพนบูลย์. The Asian Biomass Handbook: A Guide for Biomass Production and Utilization. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ; 2551.

- [9] นิตยสารกานต์ กันตร์พีเกสร. สถานภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 30 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก : <http://webk.c.dede.go.th/testmax/no de/2151>.
- [10] มิตรผล. ภาพรวมธุรกิจไฟฟ้าชีวมวล. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 14 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก : https://www.mitrphol.com/page_detail.php?p=2&topic=5.
- [11] Samuelsson R, Thyrel M, Sjöström M, Lestander TA. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel Processing Technology*. 2009; 90(9): 1129–34.
- [12] Maraver1 AG, Carpio M. Biomass pelletization process. *WIT transactions on state of the art in science and engineering*. 2015; 85: 53-66.
- [13] สมโภชน์ สุดาจันทร์. สมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุเกษตรและผลิตภัณฑ์. ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2558.
- [14] ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม และ วิลักษณ์นาม ผลเจริญ. การพัฒนาเครื่องคั่วเมล็ดทานตะวันกึ่งอัตโนมัติ. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*. 2559; 2(1): 23-32.
- [15] Kurlak A. The vertical screw conveyor powder properties and Screw conveyor design [Internet] 2005 [cited 2020 Mar 17]. Available from: <http://www.chemeng.lth.se/exjobb/047.pdf>.
- [16] ASTM International. ASTM C 1444 standard test method for measuring the angle of repose of free-flowing mold powders. PA: American society for testing and materials; 2005.
- [17] The standard specific interest group for this test method TAPPI. T 815 om-01 coefficient of static friction (slide angle) of packaging and packaging materials. n.p.; 2016.
- [18] คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปกร. โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับอนาคต. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 17 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก: <http://e-lib.dede.go.th/>.
- [19] ASTM international. Standard test method for bulk density of densified particulate biomass fuels; 2013.

- [20] ASTM D240-17. Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calori meter. ASTM International. West Conshohocken. PA: American society for testing and materials; 2017.
- [21] ก่อ ทวีเงิน ชัยยันต์ จันทศิริ และ กิตติพงษ์ ลาอุณ. คุณสมบัติทางกายภาพบางประการของหญ้าเนเปียร์ก่อนสับ และหลังสับเพื่อผลิตเป็นชีวมวลอัดเม็ด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ระดับชาติครั้งที่ 2, 11-12 กันยายน 2558, จังหวัดขอนแก่น; 2558.
- [22] Li Y, Liu H. High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass bioenergy 2000; 19: 177–86.
- [23] Oduntan OB, Koya OA. Effect of speed, die sizes and moisture contents on durability of cassava pellet in pelletizer. Journal of research in agricultural engineering. 2015; 61(1): 35-9.
- [24] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนปนนท์. การเจลาตินไนซ์. (สื่อออนไลน์) [เข้าถึงเมื่อ วันที่ 30 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com>.