เชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดจากผลพลอยได้โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลโดยไม่ใช้ตัวประสาน

นราธร มหรรทัศนพงศ์[1] และ ยุวรัตน์ เงินเย็น[2*]
มหาวิทยาลัยขอนแก่น ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

** Corresponding Author: nyuvarat@kku.ac.th*
[1] นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

ประวัติบทความ :
รับเพื่อพิจารณา : 20 พฤศจิกายน 2561
แก้ไข : 17 มีนาคม 2563
ตอบรับ : 16 เมษายน 2563

คำสำคัญ :
เชื้อเพลิงแข็ง / โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล / กากหม้อกรองโคลน / ทอริแฟคชั่น / ค่าความร้อน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการอัดเม็ดกากหม้อกรองโคลน ซึ่งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลให้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง โดยศึกษาผลของความดันในการอัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ด และอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชั่น พบว่า การอัดเม็ดทำให้ได้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงกว่าตอนที่ไม่ได้อัดเม็ด โดยเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร ต้องใช้ความดันในการอัดต่ำที่สุดเท่ากับ 30 บาร์ จึงจะได้ลักษณะของเม็ดที่แน่น ไม่แตกหัก ส่วนเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ความสูงของเม็ดเท่ากัน ต้องใช้ความดันในการอัดต่ำที่สุด 40 บาร์ หากพิจารณาเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเท่ากัน เมื่อเพิ่มความดันในการอัดจะได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น ค่าความชื้น และปริมาณเถ้าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อนำตัวอย่างอัดเม็ดไปทำการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 ถึง 120 นาที พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการทอริแฟคชั่นมีค่าความร้อนสูงขึ้น (21,689–22,642 kJ/kg) กว่าตอนที่ไม่ได้ทำทอริแฟคชั่น (13,954 kJ/kg) โดยมีค่าความหนาแน่นของเม็ดลดต่ำลงจาก 0.72 g/cm^3 มาเป็น 0.48–0.89 g/cm^3 การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชั่น ทำให้ค่าความร้อนของเม็ดตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าความหนาแน่นของเม็ดมีค่าลดต่ำลง

Binderless Solid Fuel Pellets from By–Product of Sugar Industry

Narathorn Mahantadsanapong[1] and Yuvarat Ngernyen[2*]
Khon Kaen University, Mittraphap Road., Nai-Mung, Muang, Khon Kaen 40002

* *Corresponding Author: nyuvarat@kku.ac.th*
[1] *Graduate Student, Chemical Engineering Program, Faculty of Engineering.*
[1] *Assistant Professor, Chemical Engineering Program, Faculty of Engineering.*

Article Info

Article History:
Received: November 20, 2018
Revised: March 17, 2020
Accepted: April 16, 2020

Keywords:
Solid Fuel / Sugar Industry / Sugar Cane Filter Cake / Torrefaction / Heating Value

Abstract

This research studied the compression of filter cake, which is a by-product from the sugar industry, into pellet form of solid fuel. The effects of compression pressure, pellet diameter as well as temperature and time of torrefaction were investigated. The results showed that solid fuel in the pellet form had higher heating value than the original form. The minimum pressure for forming pellets with the diameter and height of 1 cm was 30 bar, whereas the pellets with a larger diameter (1.5 cm) with the same height needed a higher pressure (40 bar). At the same pellet diameter, increasing the compression pressure resulted in the solid fuel pellets with higher heating value, pellet density, moisture and ash contents. Torrefaction at 250 and 300°C for 0.5–2 h yielded the samples with higher heating values (21,689–22,642 kJ/kg) when compared with the values belonging to the original sample (13,954 kJ/kg). On the contrary, density of the pellets decreased from 0.72 g/cm^3 to 0.48–0.89 g/cm^3. Increased torrefaction temperature and time increased the heating value but decreased the pellet density.

1. บทนำ

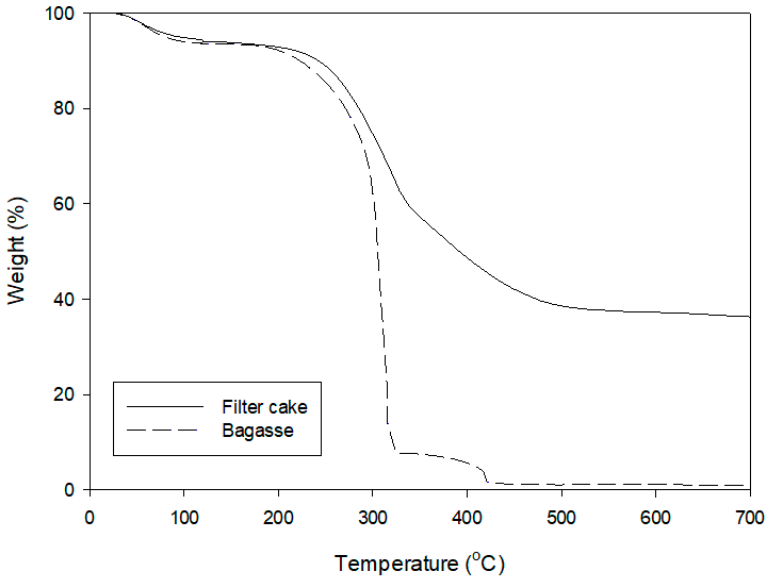
ในปัจจุบัน มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากมาย เนื่องจากโลกประสบปัญหาวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงานและราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้แล้วหมดไป ไม่สามารถสร้างขึ้นทดแทนได้ และด้วยการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นภาคอุตสาหกรรม ภาคการขนส่ง ภาคการท่องเที่ยวและการบริการ ส่งผลต่อการบริโภคที่มีเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

สำหรับสถานการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทยนั้น กระทรวงพลังงานมีนโยบายที่จะพัฒนาพลังงานทดแทนให้เป็นแหล่งพลังงานหลักของประเทศ ด้วยการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551–2565) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนเป็นพลังงานหลักของประเทศแทนการนำเข้าน้ำมัน ซึ่งนับวันจะมีปริมาณลดน้อยลงและราคาสูงขึ้น

แนวทางหนึ่งของการจัดหาแหล่งพลังงานทดแทน คือ การใช้ของเสียไม่ว่าจากเกษตรกรรม อุตสาหกรรม หรือ จากกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวัน ซึ่งประเทศไทยมีอุตสาหกรรมหลายอย่าง โดยอุตสาหกรรมหนึ่งที่สำคัญ คือ อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมเกษตร (agro industry) ที่สำคัญของประเทศ โดยประเทศไทยผลิตน้ำตาลและส่งออกเป็นอันดับ 3 หรือ 4 ของโลก ซึ่งในปี 2559/2560 มีโรงงานน้ำตาล 54 โรงงาน ส่งออกน้ำตาลถึง 7.38 ล้านตัน ก่อให้เกิดเงินหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจของประเทศหลายแสนล้านบาท ดังนั้น อุตสาหกรรมนี้จึงมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ และเกี่ยวเนื่องกับเกษตรกรประมาณ 2 แสนราย ซึ่งพื้นที่ปลูกอ้อยทั่วประเทศมากกว่า 5 ล้านไร่ ในกระบวนการผลิตน้ำตาลนั้น จะมีวัสดุพลอยได้ (by–product) หลายชนิด เช่น ชานอ้อย (bagasse) กากน้ำตาล (molasses) และกากหม้อกรองโคลน (filter cake) เป็นต้น [1]

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล นั่นคือ กากหม้อกรองโคลน มาศึกษา โดยนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ด กากหม้อกรองโคลนเป็นกากตะกอนที่แยกจากน้ำอ้อยในขั้นตอนการทำน้ำอ้อยให้สะอาด มีส่วนผสมของชานอ้อย ปูนขาว ดิน โคลน และน้ำตาล ซึ่งในปัจจุบันกากหม้อกรองโคลนนำไปใช้เป็นปุ๋ยเท่านั้น หากสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดได้ ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่า และเป็นแนวทางในการลดการใช้พลังงานฟอสซิล

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติทางเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดได้ ซึ่งไม่ใช้ตัวประสานในการเตรียม เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุน นอกจากนั้น ยังทำการทอริแฟคชั่น (torrefaction) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนกับตัวอย่างที่อุณหภูมิปานกลาง เพื่อเพิ่มค่าความร้อนให้กับตัวอย่าง ซึ่งเหตุผลที่นำมาอัดเม็ดนั้นเนื่องจากการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ มาใช้ประโยชน์ โดยส่วนใหญ่ผู้ใช้จะนำวัสดุเหล่านั้นมาใช้ทันทีโดยไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการใช้งานหลายประการ เช่น เศษวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ส่วนมากจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ต้องเปลืองพื้นที่สำหรับการจัดเก็บ รวมถึงเกิดปัญหาในการขนส่งเคลื่อนย้ายเศษวัสดุจากแหล่งผลิตไปสู่พื้นที่จัดเก็บ เพราะหากเศษวัสดุมีขนาดใหญ่ น้ำหนักจะมากตามไปด้วย รวมทั้งรูปร่างของเศษวัสดุอาจมีความยาวและความโตแตกต่างกัน ทำให้การขนย้ายทำได้น้อย ส่งผลให้สิ้นเปลืองเวลาการขนส่งเป็นอย่างมาก และปัญหาการออกแบบห้องเผาไหม้ เนื่องจากถ้าเศษวัสดุมีขนาดใหญ่ ขนาดของห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงจึงจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่ตามด้วย ทำให้การออกแบบต้องรองรับปริมาณเชื้อเพลิงที่มาก หากต้องการความร้อนที่เพียงพอซึ่งจากปัญหาของการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแก้ปัญหาได้โดยการนำเศษวัสดุมาอัด (densification) ซึ่งการอัดเป็นการแปรรูปเศษวัสดุโดยการใช้แรงกดอนุภาคเล็กๆ ทำให้เกิดการอัดแน่นพอเหมาะที่จะรวมกันเป็นก้อนได้ โดยการอัดเม็ดจะทำได้โดยนำเศษวัสดุที่ผ่านการลดขนาดจนเป็นผงละเอียดมาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ด โดยการอัดเม็ดนี้จะช่วยลดปริมาตรชีวมวลให้เล็กลงได้ทำให้ช่วยลดพื้นที่ของการจัดเก็บเชื้อเพลิงและจำนวนเที่ยวของการขนส่งเคลื่อนย้ายอีกด้วย [2]



รูปที่ 1 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของกากหม้อกรองโคลนและชานอ้อย

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมกากหม้อกรองโคลน

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือ กากหม้อกรองโคลนจากโรงงานผลิตน้ำตาลแห่งหนึ่ง นำวัตถุดิบมาทำให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน (oven) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh (ขนาดตะแกรง 850 ไมโครเมตร) วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนโดยใช้เครื่อง Thermal Gravimetric Analyzer (TGA-50, SHIMADZA) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มากำหนดอุณหภูมิในการทำทอริแฟคชั่น

2.2 การอัดเม็ดและการทอริแฟคชั่น

การอัดเม็ดกากหม้อกรองโคลนทำโดยนำตัวอย่างมาป้อนใส่บล็อกที่ใช้ในการอัดเม็ด โดยบล็อกอัดเม็ดที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 และ 1.5 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร หลังจากนั้นทำการอัดด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกที่ความดัน 20 30 40 และ 50 บาร์ สังเกตลักษณะของเม็ดด้วยตาเปล่า ส่วนการทอริแฟคชั่นทำโดยชั่งตัวอย่างอัดเม็ด 30 กรัม จากนั้นนำไปบรรจุภายในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed–bed reactor) ที่ทำจากเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ให้ความร้อนด้วยเตาเผาไฟฟ้าแนวตั้ง อัตราการให้ความร้อนที่ 30°C/min เพื่อทำการทอริแฟคชั่นภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทอริ-แฟคชั่นจะได้จากข้อมูลการสลายตัวทางความร้อนของวัตถุดิบดังที่กล่าวไปข้างต้น โดยใช้เวลา 0.5 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง

2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกลและสมบัติทางเชื้อเพลิงของกากหม้อกรองโคลนอัดเม็ด

หาค่าความร้อน (heating value) ด้วยเครื่อง Bomb calorimeter (GALLENKAMP) ทำการวิเคราะห์ค่าความชื้นของตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการทำให้แห้ง โดยใช้วิธีมาตรฐาน EN 14774–1: 2009 Solid biofuels – Methods for determination of moisture content – Oven dry ทำโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำน้ำหนักของตัวอย่างก่อนและหลังอบมาคำนวณหาค่าความชื้น และทำการหาปริมาณเถ้าของตัวอย่างทำตามมาตรฐาน EN 14775: 2009 Solid biofuels – Methods for determination of ash content ทำโดยชั่ง

น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น จากนั้นนำตัวอย่างไปเผาด้วยเตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเถ้าที่เหลือสุดท้ายและทำการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเม็ดโดยนำตัวอย่างอัดเม็ดไปชั่งน้ำหนัก วัดเส้นผ่านศูนย์กลางและวัดความยาวของตัวอย่างด้วยเวอร์เนียดิจิตอล เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาตรของเม็ด จากนั้นคำนวณหาความหนาแน่นจริงของตัวอย่างอัดเม็ดจากการนำน้ำหนักของเม็ดหารด้วยปริมาตรของเม็ด

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

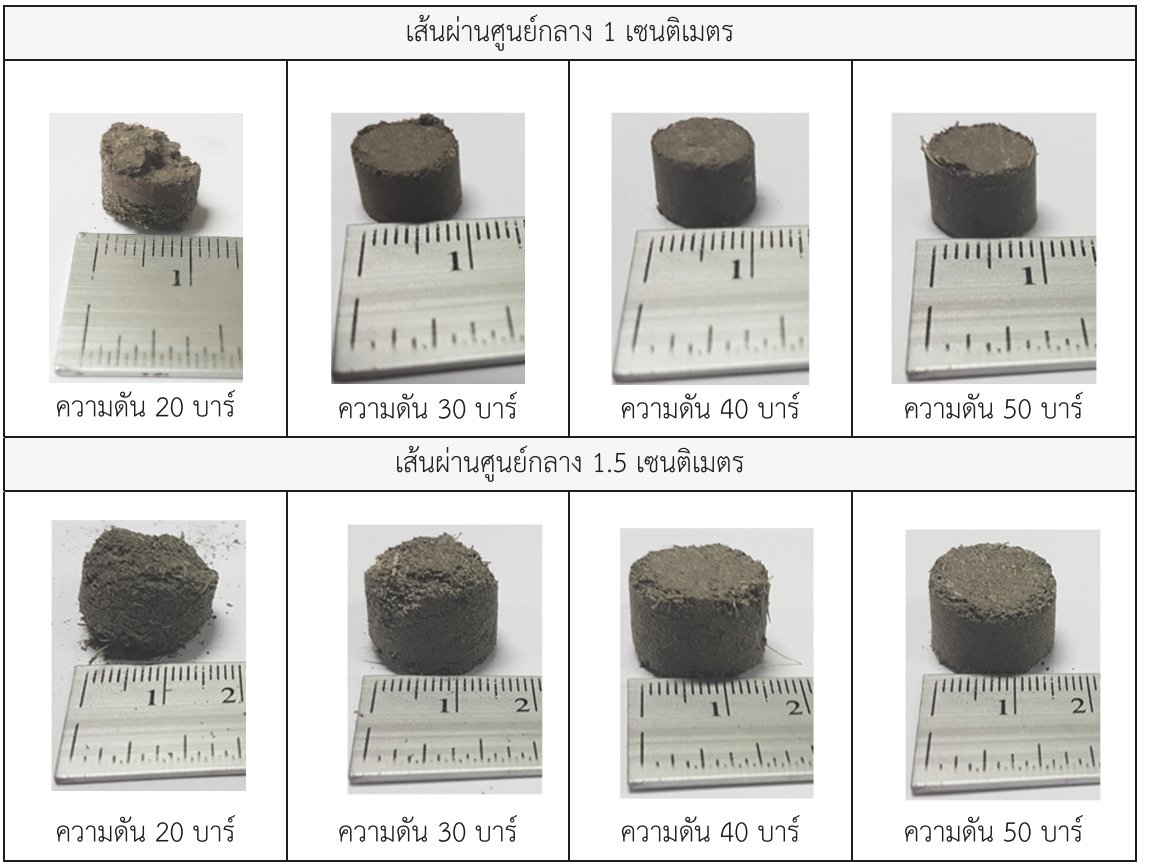
3.1 สมบัติของวัตถุดิบ

รูปที่ 1 แสดงกราฟการสลายตัวทางความร้อนของกากหม้อกรองโคลน (filter cake) พบว่า กากหม้อกรองโคลนสลายตัวเป็นอย่างมากในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 500°C ดังนั้นช่วงอุณภูมินี้จึงเป็นช่วงอุณภูมิที่เหมาะสมในการทำทอริแฟคชั่น โดยกากหม้อกรองโคลนมีค่าความร้อน 11,197 kJ/kg ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนกับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ ที่นำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง พบว่า กากหม้อกรองโคลนมีค่าความร้อนมากกว่า เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (6,192 kJ/kg) เหง้ามันสำปะหลัง (6,820 kJ/kg) ทางปาล์มน้ำมันและใบ (7,698 kJ/kg) ปลายไม้กระถินยักษ์ (9,498 kJ/kg) และปีกไม้ยางพารา (10,376 kJ/kg) [3] ดังนั้น กากหม้อกรองโคลนจึงเป็นวัสดุที่มีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่า กากหม้อกรองโคลนมีองค์ประกอบหลายอย่าง (ชานอ้อย ปูนขาว ดิน โคลน และน้ำตาล) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชานอ้อยที่มีค่าความร้อนประมาณ 9,500 kJ/kg [4] แสดงว่าส่วนผสมอื่นๆ ในกากหม้อกรองโคลนที่ไม่ใช่ชานอ้อย มีส่วนทำให้ค่าความร้อนของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยทั้งปูนขาว ดิน โคลน และน้ำตาล ต่างก็มีค่าความร้อน นอกจากนั้น กราฟการสลายตัวทางความร้อนดังแสดงในรูปที่ 1 ยังแสดงให้เห็นว่ากากหม้อกรองโคลนมีองค์ประกอบไม่เหมือนกับชานอ้อย (bagasse)

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความชื้นและปริมาณเถ้าของกากหม้อกรองโคลนโดยวิธีมาตรฐาน พบว่า กากหม้อกรองโคลนมีค่าความชื้นร้อยละ 3.45 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าน้อยกว่าวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ ที่นำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง เช่น ปีกไม้ยางพารา (ร้อยละ 43.4 โดยน้ำหนัก) ปลายไม้กระถินยักษ์ (ร้อยละ 48.0 โดยน้ำหนัก) ทางปาล์มน้ำมันและใบ (ร้อยละ 56.6 โดยน้ำหนัก) เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (ร้อยละ 60.4 โดยน้ำหนัก) หรือ เหง้ามันสำปะหลัง (ร้อยละ 60.7 โดยน้ำหนัก) [3] สำหรับปริมาณเถ้า กากหม้อกรองโคลนมีอยู่ร้อยละ 37.15 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม Prariya [5] ได้รายงานไว้ว่า สมบัติของเชื้อเพลิงที่ดี ต้องมีค่าความชื้นน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ และเถ้าต้องมีปริมาณไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น กากหม้อกรองโคลนจึงมีค่าความชื้นและปริมาณเถ้าที่สามารถเป็นเชื้อเพลิงที่ดีได้

3.2 ผลของความดันต่อลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ด

การศึกษาผลของความดันต่อลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงแข็งอัดเม็ดจากกากหม้อกรองโคลนแสดงดังรูปที่ 2 โดยใช้ความดันในการอัดเม็ด 20 30 40 และ 50 บาร์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ด 1 และ 1.5 เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่า เมื่อความดันในการอัดเม็ดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ลักษณะของตัวอย่างเมื่อพิจารณาด้วยตาเปล่ามีความเป็นเม็ด ไม่แตกหัก โดยสำหรับตัวอย่างที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ไม่สามารถใช้ความดัน 20 บาร์ ในการอัดเม็ดได้ โดยเมื่อใช้ความดันตั้งแต่ 30 บาร์ ขึ้นไป จึงจะได้เชื้อเพลิงที่ลักษณะของเม็ดแน่น ไม่แตก ไม่เป็นรูปร่าง ส่วนตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ไม่สามารถใช้ความดัน 20 และ 30 บาร์ ในการอัดเม็ดได้ โดยลักษณะของเม็ดจะแน่น ไม่แตกหัก เมื่อใช้ความดันตั้งแต่ 40 บาร์ ขึ้นไป



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของกากหม้อกรองโคลนอัดเม็ดที่ความดันต่างๆ

ตามร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด [2] กำหนดไว้ว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทั้งเกรดธรรมดาและเกรดคุณภาพสูง มีค่าไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร หรือ 0.6 เซนติเมตร และไม่เกินกว่า 12 มิลลิเมตร หรือ 1.2 เซนติเมตร ซึ่งงานวิจัยนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเชื้อเพลิง 1 และ 1.5 เซนติเมตร ส่วนความยาวของเม็ด ร่างมาตรฐานได้กำหนดไว้ว่าไม่น้อยกว่า 3.15 มิลลิเมตร หรือ 0.315 เซนติเมตร และไม่เกินกว่า 40 มิลลิเมตร หรือ 4 เซนติเมตร ทั้งเกรดธรรมดาและเกรดคุณภาพสูง โดยงานวิจัยนี้มีความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง 1.25 เซนติเมตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางเชื้อเพลิงและสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้นที่ยังไม่อัดเม็ด โดยทำการวิเคราะห์เฉพาะเม็ดเชื้อเพลิงที่แน่น คงรูป และไม่แตกหักเท่านั้น ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการอัดเม็ดตัวอย่าง จะได้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเดียวกัน เมื่อเพิ่มความดันในการอัดเม็ดจะได้ค่าความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจะทำให้อนุภาคของวัตถุดิบที่อยู่ในบล็อกอัดเม็ดอยู่ชิดกันมากขึ้น จึงสามารถเพิ่มปริมาณวัตถุดิบลงไปในบล็อกอัดเม็ดได้เพิ่มขึ้นเพื่อให้ความสูงของเม็ดมีค่าเท่าเดิม ดังนั้น เมื่อปริมาณวัตถุดิบมีมากขึ้น ค่าความร้อนจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และที่ความดันเดียวกัน เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดมีค่าเพิ่มขึ้น จะสามารถใส่วัตถุดิบลงไปในบล็อกอัดเม็ดได้เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองโคลนมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 13,954–18,995 kJ/kg ซึ่งตามร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด [2] กำหนดไว้ว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเกรดธรรมดามีค่าไม่น้อยกว่า 14,600 kJ/kg

ส่วนเกรดคุณภาพสูงมีค่าไม่น้อยกว่า 16,700 kJ/kg ดังนั้น กากหม้อกรองโคลนอัดเม็ดจึงมีค่าความร้อนเป็นไปตามมาตรฐาน

ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเดียวกัน แต่ความดันในการอัดสูงขึ้น และที่ความดันในการอัดเดียวกัน แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดสูงขึ้น ค่าความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อปริมาณวัตถุดิบที่ใส่ลงไปในบล็อกอัดเม็ดเพิ่มขึ้น ความชื้นที่อยู่ในวัตถุดิบที่ใส่เพิ่มเข้าไปในบล็อกจึงทำให้ความชื้นโดยรวมของเม็ดมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเหตุผลนี้สามารถอธิบายการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าเมื่อเพิ่มความดันและเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดได้เช่นกัน โดยกากหม้อกรองโคลนอัดเม็ดมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 3.45–4.51 โดยน้ำหนัก โดยตามร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด [2] กำหนดไว้ว่า ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทั้งเกรดธรรมดาและเกรดคุณภาพสูง มีค่าไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนัก ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าความชื้นต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด อย่างไรก็ตาม เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีปริมาณเถ้าค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจะได้หาแนวทางการนำเถ้าที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ในงานวิจัยต่อไปในอนาคต เช่น นำไปใช้เป็นปุ๋ยบำรุงดิน ใช้เป็นตัวดูดซับ หรือ นำไปใช้ผสมในจีโอพอลิเมอร์ โดยในเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์สมบัติรูพรุนของเถ้าด้วยการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ–196°C พบว่า เถ้าที่เกิดจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดนี้ไม่มีรูพรุน ดังนั้น ก่อนจะนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับ ต้องปรับปรุงสมบัติ เช่น การใช้กรดหรือใช้เบส เป็นต้น

สำหรับค่าความหนาแน่นของเม็ด ที่ขนาดของเม็ดเท่ากัน การเพิ่มความดันทำให้ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความหนาแน่นของเม็ดคำนวณได้จากการนำมวลของเม็ดมาหารด้วยปริมาตรของเม็ด ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า การเพิ่มความดันสามารถเพิ่มปริมาณวัตถุดิบลงไปในบล็อกอัดเม็ดได้เพิ่มขึ้น มวลจึงมากขึ้น แต่ปริมาตรยังเท่าเดิมเนื่องจากขนาดของเม็ดเท่าเดิม ดังนั้น ความหนาแน่นจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนที่ความดันเดียวกัน เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นของเม็ดมีค่าลดลง เนื่องจากไม่เพียงแต่ปริมาณของวัตถุดิบที่ใส่ลงไปในบล็อกอัดเม็ดเพิ่มขึ้น ปริมาตรของเม็ดก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากหม้อกรองโคลนมีค่าความหนาแน่นของเม็ดอยู่ระหว่าง 0.48–0.89 g/cm^3

ตารางที่ 1 สมบัติทางเชื้อเพลิงและสมบัติทางกายภาพของกากหม้อกรองโคลนอัดเม็ด

ตัวอย่าง (g/cm^3)	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ความชื้น (wt%)	เถ้า (wt%)	ความหนาแน่นของเม็ด (g/cm^3)
ไม่ได้อัดเม็ด	11,197	3.45	37.15	–
เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร				
30 บาร์	13,954	3.45	40.08	0.72
40 บาร์	14,149	3.47	40.10	0.77
50 บาร์	14,468	3.64	40.16	0.89
เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร				
40 บาร์	18,763	4.43	41.32	0.48
50 บาร์	18,995	4.51	42.92	0.52

3.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชั่น

เมื่อนำตัวอย่างอัดเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ความดัน 30 บาร์ มาทำการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C เป็นเวลา 0.5 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วทำการสังเกตตัวอย่างที่ได้ด้วยตาเปล่าภายหลังการทอริแฟคชั่น พบว่า ตัวอย่างมีสีเข้มขึ้น และยังคงรูปร่าง แน่น ไม่แตกหัก โดยตารางที่ 2 แสดงค่าความร้อนและความหนาแน่นของเม็ดตัวอย่างที่ผ่านการทอริแฟคชั่นเทียบกับก่อนทำทอริแฟคชั่น พบว่า การทำทอริแฟคชั่นทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าความร้อนสูงขึ้นมาก โดยที่อุณหภูมิในการทอริแฟคชั่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มเวลาในการทอริแฟคชั่น จะได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่อาจเพิ่มสูงขึ้นไม่มาก และที่เวลาในการทอริแฟคชั่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทอริแฟคชั่นก็จะได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของกากหม้อกรองอัดเม็ดทอริไฟด์ (21,689–22,642 kJ/kg) กับเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอริไฟด์จากงานวิจัยอื่นๆ พบว่า มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอริไฟด์จากฟางข้าวสาลี (18,800 kJ/kg) [6] โดยมีค่าความร้อนเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงอัดเม็ดทอริไฟด์จากไม้สนเหลือง (21,380–27,100 kJ/kg) [7] ขี้เลื่อยผสมระหว่างไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน (20,180–25,540 kJ/kg) [7] ไม้สน (19,870–23,170 kJ/kg) [8] ไม้การบูร (18,900–22,350 kJ/kg) [8] และไม้สน Scots (20,420–24,340 kJ/kg) [9] ดังนั้น กากหม้อกรองซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม จึงมีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง

ส่วนค่าความหนาแน่นของเม็ด พบว่า เมื่อทำทอริแฟคชั่นทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นลดลง โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (เวลาเดียวกัน) และเพิ่มเวลา (อุณหภูมิเดียวกัน) ความหนาแน่นของเม็ดจะมีค่าลดลง ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มเวลาในการทำทอริแฟคชั่น ทำให้น้ำหนักของตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียสารที่สามารถระเหยได้ในช่วงอุณหภูมินี้ (ดังแสดงในกราฟการสลายตัวทางความร้อนรูปที่ 1) ซึ่งจากสมการการหาค่าความหนาแน่นของเม็ดที่นำมวลของเม็ดมาหารด้วยปริมาตรของเม็ด เมื่อการทอริแฟคชั่นไม่ได้ทำให้ปริมาตรของเม็ดเปลี่ยนแปลง หรือ ขนาดของเม็ดยังคงเท่าเดิม ไม่มีการหดตัวของตัวอย่างที่อุณภูมิที่ใช้ในการทอริแฟคชั่น ดังนั้น เมื่อน้ำหนักของตัวอย่างมีค่าลดลง ค่าความหนาแน่นจึงมีค่าลดลง

ตารางที่ 2 สมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ความหนาแน่นของเม็ด (g/cm^3)
ไม่ได้ทำทอริแฟคชั่น		13,954	0.72
250	0.5	21,689	0.71
	1	22,110	0.69
	1.5	22,246	0.69
	2	22,583	0.67
300	0.5	22,338	0.52
	1	22,351	0.51
	1.5	22,421	0.51
	2	22,642	0.44

4. สรุปผล

เมื่อนำกากหม้อกรองโคลนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล มาทำการอัดเม็ดเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มีค่าความร้อนสูงกว่าตอนที่ไม่ได้อัดเม็ด เมื่อเพิ่มความดันในการอัดเม็ด จะได้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน ค่าความหนาแน่นของเม็ด ความชื้น และปริมาณเถ้า เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปทำการทอริแฟคชั่นที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C เป็นเวลา 0.5 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้หลังการทอริแฟคชั่นมีค่าความร้อนสูงขึ้นจากเม็ดเชื้อเพลิงก่อนการทำทอริแฟคชั่น โดยลักษณะทางกายภาพของเม็ดยังเหมือนเดิม เพียงแค่มีสีเข้มขึ้นเท่านั้น ซึ่งอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชั่นมีผลต่อค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้เพียงเล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอริแฟคชั่น ทำให้ค่าความร้อนของตัวอย่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น การใช้อุณหภูมิต่ำ (250°C) และเวลาในการทอริแฟคชั่นน้อย (0.5 ชั่วโมง) จึงมีความเหมาะสม เพราะทำให้ประหยัดพลังงาน กากหม้อกรองโคลนจึงมีเหมาะสมที่จะนำมาเป็นแหล่งพลังงาน ทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้จากโรงงาน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปีงบประมาณ 2562

6. เอกสารอ้างอิง

1. Office of the Cane and Sugar Board, 2016, Annual Report 2016, Office of the Cane and Sugar Board, Bangkok. (In Thai)

2. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2017, Energy Situation January - December 2017, Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Bangkok. (In Thai)

3. Borrisut, C., 2015, Technology Status Pellet Of Thailand [Online], Available: http://www.jgsee.kmutt.ac.th/v2/uploads/images/files/pellet.pdf. (In Thai)

4. Sudhakar, J. and Vijay, P., 2013, "Control of Moisture Content in Bagasse by Using Bagasse Dryer," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4 (5), pp. 1331-1333. (In Thai)

5. Prariya, R., 2003, A Feasibility Study of Inorganic Industrial Wastewater Sludge being Utilized for the Production of Heating Fuel Briquettes, KMUTNB Textbook Publishing Center, pp. 4–31. (In Thai)

6. Azócar, L., Hermosilla, N., Gay, A., Rocha, S., Díaz, J. and Paulina, J., 2019, "Brown Pellet Production using Wheat Straw from Southern Cities in Chile," *Fuel*, 237, pp. 823-832.

7. Manouchehrinejad, M. and Mani, S., 2018, "Torrefaction after Palletization (TAP): Analysis of Torrefied Pellet Quality and Co-products," *Biomass and Bioenergy*, 118, pp. 93-104.

8. Cao, L., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Jiang, L., Huang, B., Xiao, Z., Chen, X., Wang, H. and Zeng, G., 2015, "Complementary Effects of Torrefaction and Co-pelletization: Energy Consumption and Characteristics of Pellets," *Bioresource Technology*, 185, pp. 254-262.

9. Shang, L., Nielsen, N.P.K., Dahl, J., Stelte, W., Ahrenfeldt, J., Holm, J.K., Thomsen, T. and Henriksen, U.B., 2012, "Quality Effects Caused by Torrefaction of Pellets Made from Scots Pine," *Fuel Processing Technology*, 101, pp. 23-28.