



การผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะพลาสติกภายในมหาวิทยาลัย

Production of Refuse Derived Fuel from Plastic Waste within University

ธรรพร บุศย์น้ำเพชร และ นิพนธ์ ตันไพบุณกุล*

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม 44150

Tharaporn Budnumpetch and Nipon Tanpaiboonkul*

Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Maha Sarakham 44150

*Corresponding author: nipon.t@msu.ac.th

Received: 20 November 2023/ Revised: 10 January 2024/ Accepted: 19 January 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำเชื้อเพลิงอัดก้อนจากมูลฝอยพลาสติกที่ได้จากโรงคัดแยกขยะภายในมหาวิทยาลัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของขยะ สภาวะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนที่ขึ้นรูปเป็นก้อนแข็ง จากการศึกษาองค์ประกอบเบื้องต้นของขยะที่ผ่านกระบวนการเชิงกลชีวภาพภายในโรงคัดแยกมีพลาสติกมากถึง 47.50 เปอร์เซ็นต์ จึงนำมาทำเป็นก้อนเชื้อเพลิงขยะขึ้นรูปในแบบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 เซนติเมตร และยาว 10 เซนติเมตร ใช้แรงดัน 10, 30, 50 และ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ควบคุมอุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากการศึกษาพบว่าการใช้แรงขึ้นรูปที่ 10, 30 และ 50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ร่วมกับอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ก้อนเชื้อเพลิงขยะมีลักษณะสมบูรณ์ ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.80 ถึง 0.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความต้านทานแรงกดตามแนวยาวสูงสุดอยู่ระหว่าง 224.43 ± 7.52 ถึง 273.27 ± 8.14 นิวตันต่อมิลลิเมตร มีค่าความร้อน 41.57 ± 0.29 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และทนทานต่อการขัดสีและการแตกร่วนตามเกณฑ์ที่กำหนดของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ดังนั้นที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ร่วมกับแรงดันที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมทำให้ได้ก้อนเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีตรงตามข้อกำหนดมาตรฐานของประเทศยุโรปและนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อลดปริมาณขยะพลาสติก ซึ่งเป็นแนวทางการจัดการที่อยู่ในเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืนทางด้านสิ่งแวดล้อมตามแนวทางขององค์การสหประชาชาติ

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงขยะอัดก้อน เชื้อเพลิงขยะมูลฝอย ขยะพลาสติก

Abstract

This research aims to study the production of densified fuel (RDF-5) obtained from plastic waste generated within the university's waste separation facility. The objectives are to investigate the composition of the waste, the suitable conditions for forming the plastic waste, and the properties of these compressed densified fuels. A preliminary examination of the waste components that underwent Mechanical and Biological Waste Treatment within the waste separation facility revealed that plastic accounted for up to



47.50% of the composition. This plastic waste was then molded into RDF-5 using cylindrical molds with a diameter of 4 centimeters and a length of 10 centimeters. The shaping process involved applying pressures of 10, 30, 50 and 70 kilograms per square centimeter while maintaining a temperature of 100 and 120 degrees Celsius for duration of 5 minutes. The study found that using a pressure of 10, 30 and 50 kilograms per square centimeter, combined with a temperature of 120 degrees Celsius for 5 minutes to produce RDF-5 with desirable characteristics. These densified fuels had a bulk density ranging from 0.80 to 0.90 g/cm³, a maximum longitudinal crushing strength between 224.43±7.52 and 273.27±8.14 N/mm, a calorific value of 41.57±0.29 MJ/kg, and exhibited resistance to abrasion and impact, meeting the standards set for fuel briquettes. Therefore, the conditions of 120 degrees Celsius and a pressure of 10 kilograms per square centimeter for 5 minutes are suitable for producing high-quality densified fuel that meets European standards. These densified fuels can be used as a renewable energy source to reduce the volume of plastic waste, aligning with the sustainable development goals (SDG) related to environmental conservation, as outlined by the United Nations.

Keywords: Densified fuel, Refuse Derive Fuel, Plastic waste

บทนำ

การจัดการขยะมูลฝอยในปัจจุบันพบปัญหาการดำเนินการที่ไม่ถูกต้องตามแนวทางการจัดการมูลฝอยชุมชน ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาตามมา ส่งผลทำให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและนำมาซึ่งความเดือดร้อน ราคากาและการร้องเรียน จากข้อมูลสถานการณ์ปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนที่เกิดขึ้นในประเทศไทยปี พ.ศ.2563 มีปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนเกิดขึ้นประมาณ 25.37 ล้านตัน หรือประมาณ 69,322 ตันต่อวัน โดยมีอัตราการเกิดขยะมูลฝอยชุมชนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.05 กิโลกรัม/คน/วัน ถึงแม้ว่ากระทรวงมหาดไทยโดยกรมส่งเสริมการปกครองส่วนท้องถิ่นส่งเสริมการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแต่ก็ยังพบการจัดการมูลฝอยชุมชนที่ไม่ถูกต้องมากถึง 31 เปอร์เซ็นต์ หรือ 7.88 ล้านตัน [1] ดังนั้นจึงต้องเพิ่มประสิทธิภาพและให้เกิดการบูรณาการของการจัดการขยะมูลฝอยควรมุ่งเน้นให้มีการนำขยะมูลฝอยที่มีศักยภาพกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ได้แก่ การเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมหรือเทคโนโลยีที่เป็นทางเลือกมาตรฐานในการสร้างระบบกำจัดขยะมูลฝอยเน้นการแปรรูปขยะมูลฝอยที่ติดไฟได้ให้กลายเป็นพลังงาน การส่งเสริมธุรกิจรีไซเคิลหรือการแปรรูปใช้ใหม่ รวมถึงการสร้างจิตสำนึกในการคัดแยกขยะมูลฝอยโดยเป็นแนวทางการจัดการขยะมูลฝอย [2] ขยะมูลฝอยจำนวนมาก ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้งของขยะประเภทพลาสติก เช่น ขวดน้ำพลาสติก โฟม ถุงพลาสติก พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งมาจากพฤติกรรมผู้บริโภคในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งในจังหวัดมหาสารคาม การจัดการขยะมูลฝอยของมหาวิทยาลัยดำเนินงานโดยเริ่มจากแยกขยะมูลฝอยออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 ขยะที่ไม่ย่อยสลาย เช่น ขวดพลาสติก ขวดแก้ว เศษเหล็ก และอื่น ๆ ซึ่งจะถูกคัดแยกโดยคนงานผ่านสายพานลำเลียง ส่วนที่ 2 สารอินทรีย์ที่เป็นเศษอาหาร เช่น เศษพืชผักและผลไม้ที่แยกนำไปเลี้ยงไส้เดือนที่โรงหมักปุ๋ยมูลไส้เดือน และส่วนที่ 3 เป็นขยะส่วนที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ถุงขนม คุกกี้ หรือขยะที่อาจปะปนทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่จัดการโดยนำเข้าระบบการบำบัดขยะมูลฝอยเชิงกลชีวภาพ (MBT, Mechanical and Biological Waste Treatment) เป็นระบบที่ดำเนินการปรับสภาพขยะโดยวิธีการทางชีวภาพ ซึ่งระบบทำหน้าที่ผสมและเติมอากาศทำให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงใช้ระยะเวลาการย่อยสลายเร็ว ทั้งนี้ใช้ระยะเวลาประมาณ 1 เดือน ภายหลังการหมักสิ้นสุดลงขยะมีกลิ่นน้อยลงและมีส่วนประกอบสำคัญคือ 1) อินทรีย์สารที่เป็นผงละเอียด (ปุ๋ยอินทรีย์) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นวัสดุปรับปรุงดิน 2) อินทรีย์สารที่มีส่วนผสมพลาสติกรวมถึงพลาสติกที่ไม่ถูกย่อยสลาย ขยะมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการบำบัดนี้จะมีน้ำหนักลดลงประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้นเฉลี่ยที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่เหลือเป็นขยะมูลฝอยจำพวกพลาสติกประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ [3] เมื่อพิจารณาถึง

สัดส่วนที่เกิดขึ้นมีความเป็นไปได้ต่อการนำพลาสติกหลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการหมักเชิงกลชีวภาพดังกล่าวมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (Densified fuel) สำหรับใช้ในเตาเผาเพื่อนำพลังงานกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยการผลิตเชื้อเพลิงจากขยะ (Refuse Derived Fuel, RDF) หมายถึงการปรับปรุงและแปลงสภาพของขยะมูลฝอยให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณสมบัติในด้านความร้อน ความชื้น ขนาดและความหนาแน่นให้เหมาะสมต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผา [4]

เชื้อเพลิงขยะมีการจำแนกออกเป็น 7 ประเภท ตามลักษณะของเชื้อเพลิงและกระบวนการที่ใช้ผลิตตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) ตั้งแต่ RDF-1 ถึง RDF-7 โดย RDF-5 เป็นการนำขยะมูลฝอยที่แยกส่วนเผาไหม้ไม่ได้เช่น โลหะ แก้ว หรืออื่น ๆ สับหรือบดให้มีขนาดเล็กมาผ่านกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นให้เป็นเม็ดเป็นก้อนหรือแท่ง โดยเรียกว่า Densified RDF เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานและการขนส่ง การนำขยะมูลฝอยที่เผาไหม้ได้นี้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปก่อนนำไปใช้ในเตาเผาแบบปิดนั้นควบคุมง่ายกว่าการเผาทั้งกลางแจ้งแบบเปิด เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีภายหลังการเผาไหม้อาจก่อให้เกิดมลพิษ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้เชื้อเพลิงขยะอัดก้อนยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จากการผ่านกระบวนการความร้อนในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น การเผาไหม้แบบใช้อากาศ (Incineration) การเผาแบบไม่ใช้อากาศ (Pyrolysis) และการเผาแบบใช้อากาศบางส่วน (Gasification) ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้ประโยชน์จากการเผาไหม้ในรูปแบบใด [5]

ประเทศไทยและประเทศในทวีปเอเชียยังคงไม่มีข้อกำหนดถึงคุณลักษณะของขยะเชื้อเพลิง RDF ไว้เป็นมาตรฐาน แต่ประเทศในแถบยุโรป เช่น ฟินแลนด์ อิตาลี และสหราชอาณาจักร ได้มีการกำหนดคุณลักษณะไว้เป็นการเฉพาะ เช่น สหราชอาณาจักรกำหนดค่าความร้อนไม่ต่ำกว่า 18 MJ/Kg ปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 7 - 28 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าไม่เกิน 12 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณกำมะถันอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.5 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณคลอรีนอยู่ระหว่าง 0.3 -1.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น [6] โดยมีงานวิจัยที่นำขยะมูลฝอยชุมชนมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแข็งในรูป RDF-5 ได้ก่อนเชื้อเพลิงขยะที่มีสมบัติด้านความร้อนสูงสุดที่ 26.35 MJ/Kg [7] และจากการศึกษาการนำเชื้อเพลิงขยะนำกลับไปเป็นพลังงานความร้อน กรณีศึกษาของเมืองเดป็อกประเทศอินโดนีเซีย เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน ผลปรากฏว่าค่าความร้อนของเสียอยู่ที่ 35.04 MJ/kg ซึ่งค่าความร้อนทั้งหมดที่ได้รับเทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้า 6,635.2 GWh/ปี [8] นอกจากนี้การศึกษาศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงขยะที่นำมาคัดแยกก่อนผลิตเชื้อเพลิง RDF ได้ 32.24 เปอร์เซ็นต์ โดยเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนเฉลี่ยที่ 4,010.6 Kcal/kg แต่เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนการผลิตและการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิง RDF นั้นควรผลิตใช้ในระบบเตาเผาและมีโรงไฟฟ้าตั้งอยู่ใกล้เคียงกับโรงงานคัดแยกจึงจะทำให้คุ้มค่าต่อการลงทุน [9] ซึ่งขยะเชื้อเพลิงนั้นนับมีบทบาทสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่สามารถนำขยะที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่กลับมาใช้ประโยชน์ได้และยังสามารถช่วยลดปริมาณ CO₂ ได้ถึง 2155.3106 Kt CO₂/ปี รวมถึงนำกลับความร้อนได้ 2-5.5 GCal/t [10] การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะสามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบการผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าและ/หรือความร้อนโดยที่อาจจะมีการนำไปใช้ประโยชน์ในสถานที่ผลิตเชื้อเพลิงขยะเองหรือขนส่งไปใช้ในที่อื่นได้

ดังนั้น การศึกษาวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (RDF-5) โดยใช้วัตถุดิบจากวัสดุที่เป็นพลาสติกส่วนที่ได้รับจากโรงคัดแยกขยะภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเชิงกล-ชีวภาพ และศึกษาองค์ประกอบเบื้องต้นรวมถึงออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป ได้แก่ แรงดันขึ้นรูป (1-10 MPa) และอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งอุณหภูมิที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของพลาสติกส่วนใหญ่ที่มีในมูลฝอยได้แก่ HDPE (120 - 130 องศาเซลเซียส) [11] เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกจากขยะเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ และเป็นการใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกตามแนวทางของระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ต่อไป



วิธีดำเนินการวิจัย

1. การจัดเตรียมวัสดุ

นำขยะพลาสติกที่อยู่ในระบบบำบัดเชิงกลชีวภาพ (MBT) ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัย ทำการศึกษารวบรวม (ภาพที่ 1) ก่อนนำไปสับด้วยเครื่องสับละเอียดขนาด 10 แรงม้า ที่มีกำลังการผลิต 100 - 140 กิโลกรัมต่อชั่วโมง นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 หรือขนาดช่อง 2.36 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ให้แห้งหรืออบจนมีน้ำหนักที่ ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมต่อการทำเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน [12]

เตรียมบล็อกขึ้นรูปทรงกระบอก 2 ขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร และ 25 เซนติเมตร พร้อมฮีตเตอร์ทรงกระบอก 2 ขนาด ได้แก่ ขนาดความสูง 3 และ 10 เซนติเมตร เพื่อควบคุมอุณหภูมิของบล็อกขึ้นรูป



ภาพที่ 1 การคัดแยกองค์ประกอบขยะ

2. การศึกษารวบรวมขยะพลาสติก

ศึกษารวบรวมเบื้องต้นของขยะมูลฝอยส่วนที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบเชิงกลชีวภาพ (MBT) โดยการสุ่มตัวอย่างเศษขยะที่อยู่ในกองระบบบำบัดเชิงกลชีวภาพจากจุดต่าง ๆ แบบสุ่มจุดละ 2 กิโลกรัม ทั้งหมด 6 จุด ก่อนนำมาผสมรวมกัน จากนั้นแบ่งออกเป็น 4 ส่วนให้เท่ากัน เลือกขยะส่วนที่อยู่ตรงข้ามกัน 2 กอง นำมาชั่งน้ำหนักก่อนนำมาแยกองค์ประกอบพลาสติกแต่ละประเภทและบันทึกน้ำหนัก [13]

3. การขึ้นรูปตัวอย่างก้อนเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก

เติมขยะพลาสติกปริมาณ 10 กรัม ในบล็อกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ประกอบฮีตเตอร์ขนาดสูง 3 เซนติเมตร เพื่ออัดขึ้นรูปก้อนตัวอย่างด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก รุ่น GA7500001 ขนาด 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อทดสอบความหนาแน่น (Density) การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) [11] วิเคราะห์องค์ประกอบของขยะ (Proximate Analysis) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3172-13 [14] และค่าความร้อน (Heating Value) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5865M-19 [15] ใช้บล็อกรูปทรงกระบอกขนาดสูง 25 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ฮีตเตอร์ขนาดสูง 10 เซนติเมตร เติมขยะพลาสติก 100 กรัม อัดขึ้นรูปเพื่อทดสอบ ค่าดัชนีการขัดสี (Tumbling resistance test) ดัชนีการแตกกรว่น (Drop shatter test) ตามมาตรฐาน ASTM D3038-93 [16] และความต้านทานแรงกด (Compression test) [11] ตามแนวยาวของเชื้อเพลิงแสดงดังภาพที่ 2 และภาพที่ 3 ออกแบบการทดลองโดยกำหนดตัวแปรต้นที่ใช้ ได้แก่ อุณหภูมิขึ้นรูป (อุณหภูมิห้อง 100 องศาเซลเซียส และ 120 องศาเซลเซียส) แรงดันขึ้นรูป (10, 30, 50 และ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ที่ระยะเวลา 5 นาที



ภาพที่ 2 บล็อกทรงกระบอกพร้อมฮีตเตอร์ความยาว 10 เซนติเมตร



ภาพที่ 3 ก้อนตัวอย่างขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แรงขึ้นรูป 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ระยะเวลา 5 นาที

4. วิธีการทดสอบ

4.1 การทดสอบความหนาแน่น (Density)

เพื่อทราบน้ำหนักต่อปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยการหาความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง คำนวณจากสมการที่ 1

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวลก้อนตัวอย่าง (กรัม)}}{\text{ปริมาตรก้อนตัวอย่าง (ลบ.ซม.)}} \quad (1)$$

4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

ทดสอบความคงตัวของก้อนตัวอย่างเมื่อได้รับความชื้นโดยทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่ก้อนตัวอย่าง ในถังน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดใช้กระดาษทิชชูซับก้อนตัวอย่างให้แห้งก่อนนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง คำนวณปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่างโดยใช้สมการที่ 2

$$W_u(\%) = \frac{W_t - W_i}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_u = เปอร์เซนต์น้ำในตัวอย่าง, W_i = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนแช่น้ำ และ W_t = น้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง



4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบขยะ (Proximate Analysis)

ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ของความชื้น ถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3172-13 โดยใช้ตัวอย่าง 1 กรัม ดังนี้

- เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%) โดยการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คำนวณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นโดยสมการที่ 3

$$W_M(\%) = \frac{W_t - W_d}{W_i} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_M = เปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่าง (%), W_t = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ (g), W_i = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (g) และ W_d = น้ำหนัก (g) ของตัวอย่างหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

- เปอร์เซ็นต์สารระเหย (%) เพื่อหาการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างหลังจากการเผาไหม้ในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยโดยการปิดด้วยฝาครอบตัวอย่างเพื่อหลีกเลี่ยงการได้รับออกซิเจนเผาที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที คำนวณเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างจากสมการที่ 4

$$W_L(\%) = \frac{W_t - W_h}{W_i} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ W_L = เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่าง (%), W_t = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา (g) W_i = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (g) และ W_h = น้ำหนัก (g) ของตัวอย่างหลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส

คำนวณเปอร์เซ็นต์สารระเหยจากสมการที่ 5

$$W_V(\%) = W_L - W_M \quad (5)$$

เมื่อ W_V = เปอร์เซ็นต์สารระเหยในตัวอย่าง (%), W_L = เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่าง (%) และ W_M = เปอร์เซ็นต์ความชื้นในของตัวอย่าง (%)

- เปอร์เซ็นต์เถ้า (%) เพื่อนำไปวิเคราะห์สารตกค้างที่คงเหลือหลังจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงคำนวณเปอร์เซ็นต์ของเถ้าจากสมการที่ 6

$$W_A(\%) = \frac{W_t - W_b}{W_i} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ W_A = เปอร์เซ็นต์เถ้าของตัวอย่าง (%), W_t = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา (g), W_i = น้ำหนักเดิมของตัวอย่างที่ใช้ (g) และ W_b = น้ำหนัก (g) ของเถ้าหลังจากการเผาตัวอย่าง

- เปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัว (%) คำนวณเปอร์เซ็นต์ค่าคาร์บอนคงตัวจากสมการที่ 7

$$F_C(\%) = 100 - (W_M + W_A + W_V) \quad (7)$$

เมื่อ F_C = เปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวของตัวอย่าง (%), W_M = เปอร์เซ็นต์ความชื้นในของตัวอย่าง (%), W_A = เปอร์เซ็นต์เถ้าของตัวอย่าง (%) และ W_V = เปอร์เซ็นต์สารระเหยในตัวอย่าง

4.4 การทดสอบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสียหลังการขัดสี (Tumbling resistance test)

ใช้ตัวอย่าง 300 - 500 กรัม นำไปใส่ในถังหมุนที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำส่วนของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนที่แตกไปชั่งน้ำหนัก คำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสียจากสมการที่ 8

$$W_1(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (8)$$



เมื่อ W_i = เปอร์เซ็นต์สูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่าง (%), W_1 = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนทดสอบ (g) และ W_2 = น้ำหนักของตัวอย่างหลังทดสอบ (g)

4.5 การทดสอบค่าดัชนีการแตกร่วน (Drop Shatter test)

ทดสอบโดยนำก้อนเชื้อเพลิงซึ่งน้ำหนักใส่ถุงพลาสติกประมาณ 300 กรัม จากนั้นปล่อยจากที่สูง 2 เมตร ลงสู่พื้นซีเมนต์ซ้ำ ๆ กัน 3 ครั้ง นำตัวอย่างไปร่อนด้วยตะแกรงขนาดช่อง 20 มิลลิเมตร นำส่วนของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่เหลือไปชั่งน้ำหนัก คำนวณหาดัชนีการแตกร่วนหรือดัชนีการแตกละเอียดได้จากสมการที่ 9

$$R = \frac{W_f}{W_i} \quad (9)$$

เมื่อ R = ดัชนีการแตกร่วน W_f = น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่เหลือหลังทดสอบ (g) และ W_i = น้ำหนักของเชื้อเพลิงก่อนทดสอบ (g)

4.6 การทดสอบความต้านทานแรงกดตามแนวยาว (Compressive Strength)

การทดสอบการต้านทานแรงกดหรือความแข็งแรงของก้อนตัวอย่าง โดยเครื่องทดสอบแรงกด รุ่น KD-3D ขนาด 300 กิโลนิวตัน วางก้อนตัวอย่างไว้ระหว่างแท่นอัดและใช้แรงอัดในทิศทางตั้งฉากจนกว่าก้อนตัวอย่างเกิดรอยแตกหรือแยกออกจากกันอ่านค่ากำลังอัดสูงสุดเพื่อระบุความแข็งแรงของก้อนตัวอย่าง คำนวณแรงอัดสูงสุดกับความยาวของก้อนตัวอย่างจากสมการที่ 10

$$\sigma_c = \frac{P_m}{L} \quad (10)$$

เมื่อ σ_c = การต้านทานแรงกดตามแนวความยาวก้อนตัวอย่าง (N/mm), P_m = แรงอัดสูงสุด (N) และ L = ความยาวก้อนตัวอย่าง (mm)

4.7 การทดสอบค่าความร้อน (Heating Value)

การทดสอบหาค่าความร้อนได้จากเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ รุ่น 2k e2k Combustion Calorimeter ทดสอบตัวอย่าง 3 ก้อนของแต่ละชุดการทดลอง

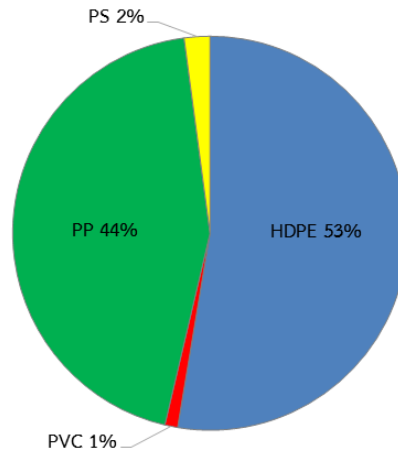
4.8 การวิเคราะห์ข้อมูล

บันทึกค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; SD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ จากการแปลผลของโปรแกรม SPSS

ผลการวิจัย

1. องค์ประกอบเบื้องต้นของขยะมูลฝอย

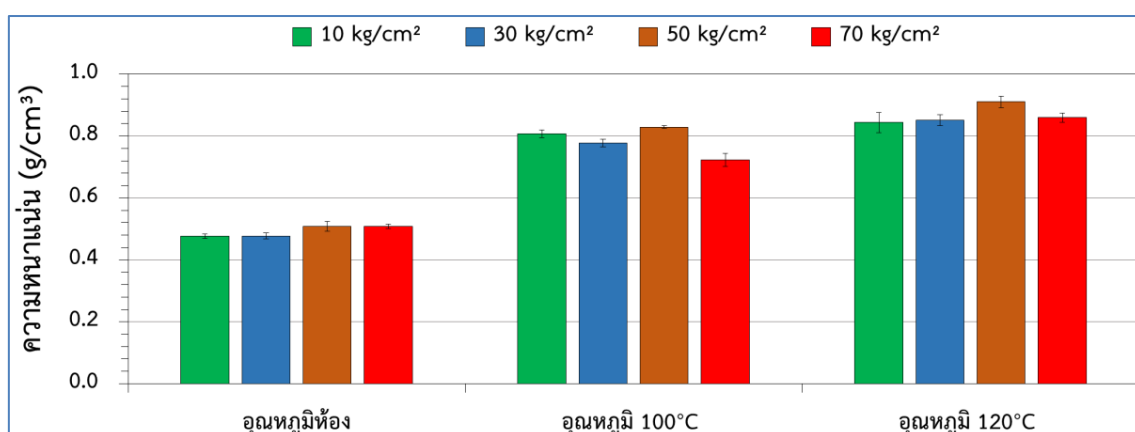
จากการสำรวจและคัดแยกองค์ประกอบเบื้องต้นของวัสดุเหลือทิ้งภายในโรงคัดแยกขยะที่ผ่านกระบวนการการคัดแยกเบื้องต้นนั้นประกอบด้วย พลาสติก เศษอาหาร และสารอินทรีย์ ซึ่งยังพบองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น เศษกระดาษ เศษยาง เป็นต้น จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นทำให้ทราบถึงวัสดุที่พบมากที่สุดคือ พลาสติก ปริมาณ 47 เปอร์เซนต์ รองลงมาคือ เศษอาหารและสารอินทรีย์ รวมกันได้ปริมาณ 44 เปอร์เซนต์ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าวัสดุที่เป็นพลาสติกนั้นมีปริมาณมากกว่าเศษอาหารและสารอินทรีย์ เมื่อนำส่วนที่เป็นพลาสติกมาแยกองค์ประกอบโดยละเอียดเทียบกับปริมาณพลาสติกที่พบทั้งหมดพบพลาสติกชนิด HDPE มากถึง 53 เปอร์เซนต์ พลาสติกชนิด PP 44 เปอร์เซนต์ และโพลีเอทิลีน PS 2 เปอร์เซนต์ ดังแสดงในภาพที่ 4 ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำขยะพลาสติกที่ปะปนอยู่ในระบบบำบัดเชิงกลชีวภาพ (MBT) มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน หรือ RDF-5 โดยคัดแยกพลาสติกชนิด PVC ออกไป เนื่องจากมีองค์ประกอบของคลอรีนหากเผาไหม้สามารถทำให้เกิดก๊าซที่เป็นกรดสารพิษไดออกซินและสารออกาโนคลอรีนอื่น ๆ ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ



ภาพที่ 4 องค์ประกอบของวัสดุที่เป็นพลาสติก

2. ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนจากขยะ

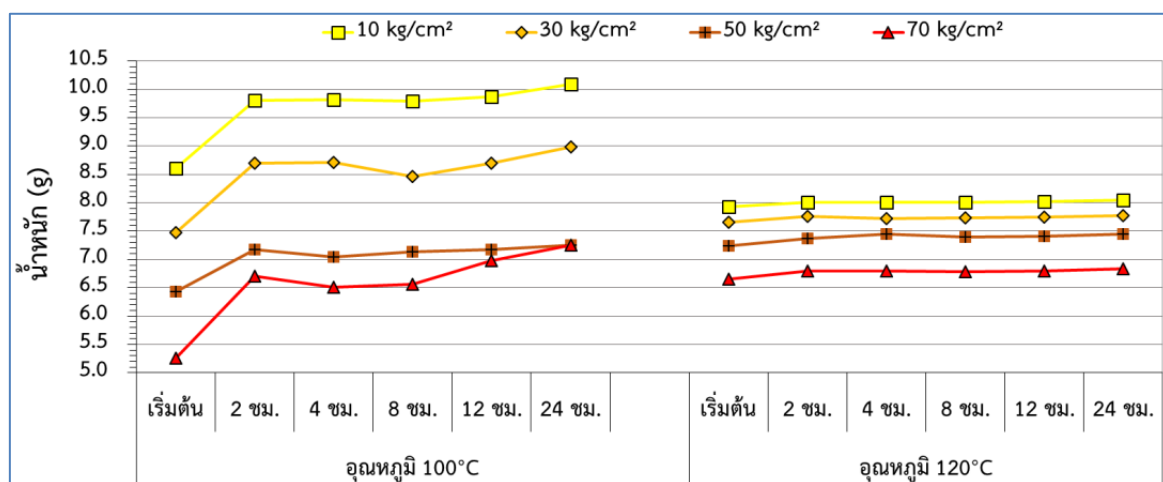
จากการขึ้นรูปในสภาวะที่ต่างกันความหนาแน่นของก้อนเชื้อเพลิงแสดงดังภาพที่ 5 จากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างในแต่ละช่วงอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่อเพิ่มแรงดันถึง 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทำให้มีค่าความหนาแน่นลดลง เนื่องจากการใช้แรงขึ้นรูปสูงร่วมกับอุณหภูมิการขึ้นรูปสูงนั้นมีส่วนทำให้พลาสติกในแบบมีความอ่อนตัวและมีบางส่วนละลายไหลล้นออกทางด้านบนและด้านล่างของแบบขึ้นรูปทำให้น้ำหนักของก้อนตัวอย่างลดลง เชื้อเพลิงขยะอัดก้อนที่มีความหนาแน่นสูงมีข้อดีคือ สามารถขนย้ายสะดวกและลดค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บได้มาก นอกจากนี้ทำให้การเผาไหม้มีความสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพมากขึ้น [18] จากงานวิจัยพบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนที่ผลิตได้นั้นผ่านข้อกำหนด RDF5 (Densified RDF) ทั้ง 2 อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 100 และ 120 องศาเซลเซียส และใช้แรงขึ้นรูปตั้งแต่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นต้นไป ทั้งนี้เนื่องจากข้อกำหนดของก้อนเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (RDF-5) ต้องมีความหนาแน่นมากกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [19] ดังนั้นจากการศึกษาจึงทำให้ทราบถึงแนวทางการออกแบบการใช้แรงดันขึ้นรูปให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่กำหนดได้



ภาพที่ 5 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างในสภาวะที่อุณหภูมิและแรงขึ้นรูปที่ต่างกันเป็นระยะเวลา 5 นาที

3. การดูดซึมน้ำ

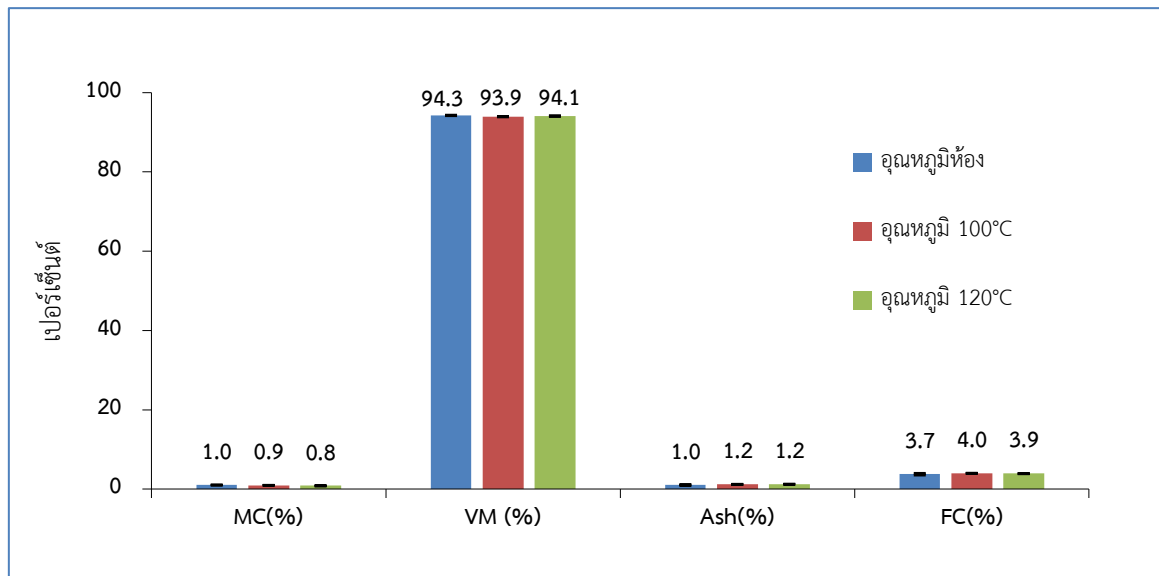
จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของก้อนเชื้อเพลิงขยะด้วยการแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แสดงในภาพที่ 6 จากการทดลองพบว่า ชุดการทดลองขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง ก้อนตัวอย่างทั้งหมดเกิดการเปื่อยยุ่ยเสียรูปไม่สามารถทนต่อสภาวะที่มีน้ำและความชื้นสูงได้ ส่วนชุดการทดลองที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าก้อนตัวอย่างมีการพองตัวน้อยมาก และชุดการทดลองที่ใช้อุณหภูมิการขึ้นรูป 100 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำหนักของก้อนตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 2 ชั่วโมงแรก และคงที่จนครบ 24 ชั่วโมง เนื่องจากผิวด้านนอกของก้อนตัวอย่างยังไม่สามารถประสานเชื่อมต่อกันได้ทั้งหมด ยังคงมีช่องว่างภายในก้อนตัวอย่างที่น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ ส่วนชุดการทดลองอุณหภูมิการขึ้นรูป 120 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลยเนื่องจากที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ทำให้บริเวณผิวก้อนตัวอย่างเกิดการหลอมประสานเป็นเนื้อเดียวกันทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านไปได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ GuG และคณะ (2015) [11] เมื่อใช้อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปก้อนตัวอย่างสูงชันสามารถลดการดูดซึมน้ำได้เป็นอย่างดี การใช้แรงดันขึ้นรูปที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10 - 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีน้ำซึมผ่านมากกว่าการใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงช่วยลดการซึมผ่านของก้อนตัวอย่างเพราะพลาสติกที่อยู่บริเวณผิวด้านนอกมีการประสานเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าทำให้เกิดจากการหลอมของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนซึ่งพลาสติกที่นำมาใช้ทำเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนนี้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกชนิด HDPE ที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ระหว่าง 120 - 130 องศาเซลเซียส [11]



ภาพที่ 6 น้ำหนักของก้อนตัวอย่างในชุดอัดขึ้นรูปด้วยแรง 10 30 50 และ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส เมื่อแช่น้ำครบ 24 ชั่วโมง

4. การวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (Proximate Analysis) เป็นการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิง โดยการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวของก้อนตัวอย่างในชุดการอัดขึ้นรูปทั้ง 3 อุณหภูมิ โดยใช้แรงขึ้นรูปที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นแรงที่ต่ำที่สุดในชุดการทดลองเนื่องจากการศึกษาี้ การใช้แรงขึ้นรูปที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นั้นเพียงพอที่จะทำให้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดแสดงดังภาพที่ 7 จากการทดสอบพบว่าปริมาณสารระเหยระหว่าง 93.9 ± 0.10 ถึง 94.3 ± 0.15 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณคาร์บอนคงตัวระหว่าง 3.7 ± 0.41 ถึง 4.0 ± 0.08 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณเถ้าระหว่าง 1.0 ± 0.29 ถึง 1.2 ± 0.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งทั้งสารระเหยและคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง สารระเหยที่มีปริมาณสูงจะทำให้เกิดควันในปริมาณมากในระหว่างการเผาไหม้ในเตาเผาหากมีค่าคาร์บอนคงตัวสูงจะทำให้มีช่วงเวลาการลุกไหม้นานขึ้น ส่วนปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลงตามการใช้อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปสูงขึ้นซึ่งมีค่าไม่เกิน 1.0 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 7 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (Proximate Analysis) ของก้อนตัวอย่างในชุดการอัดขึ้นรูปทั้ง 3 อุดหมู่มือด้วยแรง 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เนื่องจากความชื้นถูกระเหยออกไประหว่างการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนเทียบกับข้อมูลงานวิจัยการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากชีวมวล [20] และเชื้อเพลิงถ่านหิน [21] (ตารางที่ 1) นั้นพบว่ามีปริมาณความชื้นน้อยกว่าเชื้อเพลิงทั้ง 2 รูปแบบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ GuG และคณะ (2015) [11] ซึ่งกล่าวว่าปริมาณความชื้นต่ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลดีสามารถทำให้ก้อนเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงขึ้น

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (Proximate Analysis) เทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหิน

ตัวอย่าง		ปริมาณความชื้น (%) (Moisture Content)	ปริมาณสารระเหย (%) (Volatile Matter)	ปริมาณเถ้า (%) (Ash)	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%) (Fixed Carbon)	การอ้างอิง
อุดหมู่มือการอัดขึ้นรูป	อุดหมู่มือห้อง	1.0 ^a ±0.04	94.3 ^a ±0.15	1.0 ^a ±0.29	3.7±0.41	จากการทดลอง
	อุดหมู่มือ 100°C	0.9 ^a ±0.02	93.9 ^b ±0.10	1.2 ^a ±0.09	4.0±0.08	
	อุดหมู่มือ 120°C	0.8 ^a ±0.17	94.1 ^{ab} ±0.22	1.2 ^a ±0.08	3.9±0.09	
ชีวมวล	เปลือกปศุตาเซีย	8.75	82.50	1.30	7.45	Garcia,et.al (2013)
	เปลือกข้าวสาลี	10.30	80	2.80	6.90	
	เศษไม้	7.96	82	1.30	8.74	
ถ่านหิน	แอนทราไซต์	0.40	6.20	6.10	87.40	Donahue,et.al (2009)
	บิทูมินัส	1.40	38.50	7.70	52.40	
	ลิกไนต์	7.60	36.80	7.90	47.70	

ที่มา : Garcia,et.al.(2013) [20], Donahue and Rais (2009) [21]

นำเสนอข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรเหมือนกันในแนวสดมภ์ (แนวดิ่ง) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

5. การขัดสีและดัชนีการแตกร่วน

จากการศึกษาน้ำหนักสูญเสียจากการขัดสีและค่าดัชนีการแตกร่วน พบว่าน้ำหนักสูญเสียหลังการขัดสีจะมีค่าลดลงเมื่อใช้แรงดันและอุณหภูมิในการขึ้นรูปมากขึ้น โดยเฉพาะการใช้แรงดันขึ้นรูป 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส มีค่าเปอร์เซ็นต์สูญเสียน้ำหนักที่ 5.276 ± 0.024 และ 0.011 ± 0.007 ในขณะที่แรงดันขึ้นรูป 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร มีค่าเท่ากับ 2.433 ± 0.016 และ 0.013 ± 0.008 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการอัดขึ้นรูปของอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ก้อนตัวอย่างยังไม่สามารถหลอมละลายเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน เมื่อเกิดการหมุนกระแทกทำให้เกิดการแตกมีเศษหลุดร่วงออกทางด้านบนและล่างของก้อนตัวอย่าง ส่วนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส สามารถทนทานต่อการหมุนหรือกระแทกได้ดีกว่า เมื่อนำผลทดสอบไปวิเคราะห์ดัชนีการแตกร่วน พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าดัชนีการแตกร่วนอยู่ระหว่าง 0.50 - 1.00 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและต้นทุนสามารถใช้สภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และแรงเป็น 10 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเพียงพอต่อคุณสมบัติที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนในการนำไปใช้งานดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ดัชนีการขัดสีของก้อนตัวอย่างในชุดอัดขึ้นรูปอุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป (°C)	แรงดันขึ้นรูป (kg/cm ²)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสีย หลังการขัดสี (%)	ดัชนีการแตกร่วน
อุณหภูมิ 100°C	10	$5.276^a \pm 0.024$	$0.993^a \pm 0.02$
	30	$4.576^b \pm 0.018$	$0.992^b \pm 0.001$
	50	$2.433^c \pm 0.016$	$0.997^c \pm 0.003$
	70	$0.290^d \pm 0.009$	$0.998^d \pm 0.002$
อุณหภูมิ 120°C	10	$0.011^e \pm 0.007$	$0.999^e \pm 0.001$
	30	$0.007^e \pm 0.003$	$0.999^e \pm 0.001$
	50	$0.013^e \pm 0.008$	$0.999^e \pm 0.001$
	70	nd	nd

nd : ก้อนเชื้อเพลิงไหลออกจากแบบขึ้นรูปและมีรูปทรงไม่สมบูรณ์

นำเสนอข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรเหมือนกันในแนวสทมภ์ (แนวตั้ง) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

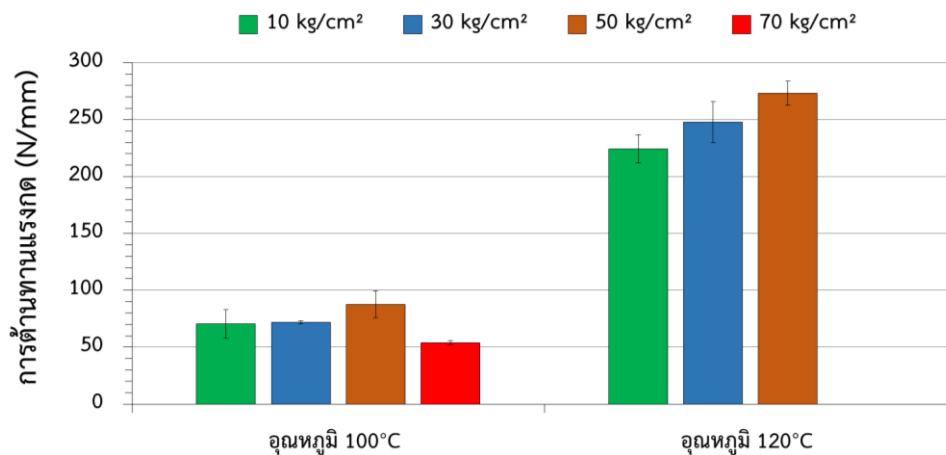
6. การต้านทานแรงกดตามแนวความยาวของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน

จากการทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวความยาวของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนในสภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 8 พบว่าชุดการอัดขึ้นรูปอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าการต้านทานแรงกดน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสูงสุดที่ 87.64 ± 5.32 นิวตันต่อมิลลิเมตร ที่แรงดันขึ้นรูป 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ส่วนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดที่ 273.27 ± 8.14 นิวตันต่อมิลลิเมตร ที่แรงดันเดียวกัน ซึ่งการใช้อุณหภูมิและแรงดันที่เหมาะสมสามารถทำให้มีการต้านทานแรงกดของก้อนตัวอย่างสูง มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีสะดวกต่อการจัดเก็บและขนย้าย ง่ายต่อการจัดการและการเก็บรักษาได้เป็นอย่างดี [11] ถ้าหากต้องการนำไปใช้งานจริงผู้ใช้งานสามารถพิจารณาถึงปัจจัยเรื่องการประหยัดพลังงานเพื่อลดต้นทุนร่วมด้วย ซึ่งจากการศึกษานี้เห็นได้ชัดเจนว่าสามารถใช้แรงกดขึ้นรูปต่ำสุดที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเมตร อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นั้นเพียงพอต่อการขึ้นรูปและนำไปใช้งานได้

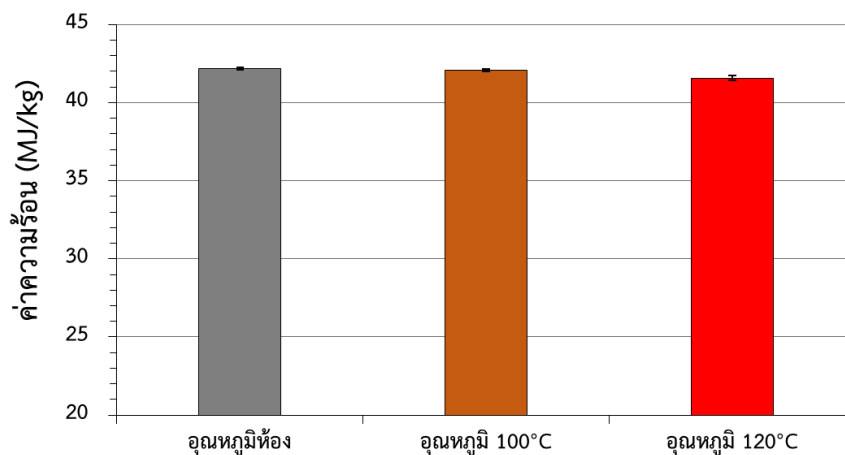


7. ค่าความร้อน

จากการทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน ที่สภาวะแรงดันขึ้นรูปที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปทั้ง 3 สภาวะ ดังแสดงในภาพที่ 9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอัดขึ้นรูปแตกต่างกัน เชื้อเพลิงขยะอัดก้อนมีค่าความร้อนระหว่าง 41.57 ± 0.29 ถึง 42.18 ± 0.10 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อนจากงานวิจัยอื่นตามข้อมูลอ้างอิงพบว่ามีค่าความร้อนใกล้เคียงกับกลุ่มพลาสติกและปิโตรเลียมที่ 41.4-48.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [22] รวมถึงก๊าซธรรมชาติที่ 46.50 - 51.20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม



ภาพที่ 8 การต้านทานแรงกดตามแนวยาว (N/mm) ที่แรงดันขึ้นรูปที่แตกต่างกัน อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที



ภาพที่ 9 ค่าความร้อน (MJ/kg) ของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน ในชุดการอัดขึ้นรูปทั้ง 3 อุณหภูมิ ที่แรงดันขึ้นรูป 10 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เป็นเวลา 5 นาที

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำเชื้อเพลิงอัดก้อนขยะพลาสติกที่ได้จากระบบบำบัดเชิงกลชีวภาพ (MBT) ขยะส่วนใหญ่ที่นำมาขึ้นรูปเป็นก้อนเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบเป็นพลาสติกมากถึง 47.50 เปอร์เซ็นต์ จากองค์ประกอบขยะทั้งหมด เมื่อนำพลาสติกมาแยกองค์ประกอบพบพลาสติกชนิด HDPE 52.63 เปอร์เซ็นต์ พลาสติกชนิด PP 44.21 เปอร์เซ็นต์ และพลาสติก PS (โฟม) 2.11 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน RDF ประเภทที่ 5

หรือ RDF-5 ที่ถูกจำแนกไว้ในมาตรฐาน ASTM เพื่อสะดวกต่อการนำไปรีไซเคิลเป็นพลังงาน [23] และจากการศึกษากระบวนการขึ้นรูปเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนนั้นสามารถขึ้นรูปโดยใช้แรงอัดที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที นั้นเพียงพอที่จะทำให้ได้ก้อนเชื้อเพลิงที่มีรูปทรงสมบูรณ์มีการดูดซึมน้ำต่ำ เนื่องจากความร้อนที่ใช้สามารถทำให้พลาสติกหลอมละลายเชื่อมติดกันส่งผลให้ก้อนเชื้อเพลิงมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อเทียบจากผลการศึกษาแรงกดตามแนวยาวของก้อนตัวอย่างมีค่าเฉลี่ยสูงถึง 220 นิวตันต่อมิลลิเมตร โดยผลการศึกษาที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Gug และคณะ (2015) [11] ที่มีผลการศึกษาการทำเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนจากพลาสติกประเภทต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเหมาะสมจะช่วยลดการดูดซึมน้ำของก้อนเชื้อเพลิงทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานในพื้นที่กลางแจ้งหรือบริเวณที่มีความชื้นสูง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากผลการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าความร้อน ค่าดัชนีการแตกร่วนนั้น พบว่าก้อนเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติที่มีความหนาแน่นเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน RDF-5 ที่ความหนาแน่นไม่น้อยกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ดังผลการศึกษาที่แสดงในภาพที่ 5) ส่วนค่าดัชนีการแตกร่วนของก้อนเชื้อเพลิง พบว่ามีค่าอยู่ 0.999 แสดงถึงก้อนเชื้อเพลิงมีความทนทานต่อการกระแทกได้ดีเหมาะแก่การขนส่งทางไกลหรือได้รับการกระทบกระเทือนในระหว่างการขนส่ง ค่าความร้อนของก้อนเชื้อเพลิงจากขยะมีค่าสูงกว่า 41 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากองค์ประกอบของพลาสติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน [22] การที่เชื้อเพลิงขยะอัดก้อนจากขยะพลาสติกมีค่าความร้อนสูงจึงมีความเหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็นพลังงานเพื่อประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณขยะพลาสติกได้เป็นอย่างดี ตอบสนองนโยบายระดับประเทศเป็นหนึ่งในรูปแบบเศรษฐกิจ BCG (BCG Model) ได้แก่ เศรษฐกิจชีวภาพ (Bio economy) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) เพราะการนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ถือว่าตอบโจทย์ระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ในการขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงจากพลาสติกหากมีการใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ไม่จำเป็นต้องใช้แรงกดขึ้นรูปมากถึง 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากจะทำให้ตัวอย่างไหลล้นออกมาจากแบบหล่อระหว่างทำการขึ้นรูปทำให้มีรูปทรงไม่สมบูรณ์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยประเภทบุคลากรสายวิชาการจากงบประมาณรายได้ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565

เอกสารอ้างอิง

1. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. รายงานสถานการณ์สถานที่กำจัดมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2563. กรุงเทพฯ: ธนสิริปริ้นติ้ง จำกัด; 2564.
2. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. การจัดการขยะมูลฝอยชุมชนอย่างครบวงจร คู่มือสำหรับผู้บริหารองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น. [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 3 พ.ย. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://reo02.mnre.go.th/attachment/iu/download.php?WP=qUlcNktjpQlgZKqCGWOghJstqTgcWat2pQAgAaplGQAgG2rDqYyc4Uux>



3. ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. ระบบบำบัดขยะด้วยวิธีเชิงกลและชีวภาพ MBT เทคโนโลยีการจัดการขยะแบบครบวงจร. [อินเทอร์เน็ต]. 2560 [เข้าถึงเมื่อ 20 ก.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <http://biomass.sut.ac.th/biomass/?page=WebInfoMenu/webInfoShow&id=18>
4. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. ขยะเชื้อเพลิง หมายเหตุมลพิษ. [อินเทอร์เน็ต]. 2554 [เข้าถึงเมื่อ 20 ก.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2020/05/pcdnew-2020-05-31_06-13-42_030952.pdf
5. Chavando JAM, Silva VB, Tarelho L, Cardoso JS, Eusébio D. Snapshot review of refuse-derived fuels. Utilities Policy 2022;74(1):101316.
6. Nithikul J. Potential of Refuse Derived Fuel Production from Bangkok Municipal Solid Waste. MSc. Thesis, Asian Institute of Technology. Thailand; 2007.
7. วสันต์ ปินะเต, ดวงกมล ดังโพนทอง. การผลิตเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะชุมชน: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง 2559;9(1):72-86.
8. Sarwono A, Septiariva IY, Qonitan FD, Zahra NL, Sari MM, Fauziah EN, et al. Refuse Derived Fuel for Energy Recovery by Thermal Processes. A Case Study in Depok City, Indonesia. J Adv Res Fluid Mech Therm Sci 2021;88(1):12-23.
9. รัตติกร เจริญพจน์. ศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงขยะ. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33 วันที่ 2 - 5 กรกฎาคม 2562. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. อุตรธานี; 2562. หน้า 701-6.
10. Shehata N, Obaideen K, Sayed ET, Abdelkareem MA, Mahmoud MS, Salamony AH, Mahmoud H, et al. Role of refuse-derived fuel in circular economy and sustainable development goals. Process Saf. Environ. Prot. 2022;163:558-73.
11. Gug J, Cacciola D, Sobkowicz M. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. Waste Management 2015;35:283-92.
12. อุกฤต สมัครสมาน. การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของเสียและกากตะกอนของกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติกรีไซเคิล. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ [อินเทอร์เน็ต]. 2561 [เข้าถึงเมื่อ 4 ม.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/bitstream/123456789/3061/1/Fulltext.pdf>
13. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. คู่มือการคัดแยกองค์ประกอบขยะมูลฝอย ณ สถานที่กำจัดขยะมูลฝอย. [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 7 พ.ย. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.pcd.go.th/publication/26771>
14. American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. [Internet]. 2002 [cited 2023 Dec 12]. Available from: https://www.kelid1.ir/FilesUp/ASTM_STANDARS_971222/D3172.pdf
15. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. [Internet]. 2003 [cited 2023 Dec 12]. Available from: https://www.kelid1.ir/FilesUp/ASTM_STANDARS_971222/D5865.pdf
16. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Drop Shatter Test for Coke. [Internet]. 1999 [cited 2023 Dec 12] Available from: www.kelid1.ir/FilesUp/ASTM_STANDARS_971222/D3038.pdf



17. วลัยพร มุขสุวรรณ. พลาสติกในชีวิตประจำวัน : ตอนที่ 2 โพลีไวนิลคลอไรด์ ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี. [อินเทอร์เน็ต]. 2551 [เข้าถึงเมื่อ 20 ก.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=12>
18. Krizan P, Matuš M, Šooš L, Peetsalu P, Kask Ü, Menind A. Briquetting of municipal solid waste by different technologies in order to evaluate its quality and properties. *Agron Res* 2011;9(Special Issue I):115-23.
19. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. พลังงานขยะ คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 6. [อินเทอร์เน็ต]. 2554 [เข้าถึงเมื่อ 20 ก.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/พลังงาน%20ขยะ.pdf>
20. García R, Pizarro C, Lavín G, Bueno L. Biomass proximate analysis using Thermogravimetry. *Bioresour Technol* 2013;139:1–4.
21. Donahue J, Rais A. Proximate analysis of coal. *J Chem Educ* 2009;86(2):222-4.
22. Subramanian P. Plastics recycling and waste management in the US. *Resour Conserv Recycl* 2000;28(3-4):253–63.
23. วีรชัย ออาจหาญ. การศึกษาแนวทางบริหารจัดการขยะชุมชนเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนแบบครบวงจร (ระดับชุมชน). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 3 พ.ย. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/รายงานฉบับสมบูรณ์%20การศึกษาแนวทางบริหารจัดการขยะชุมชน.pdf>