



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากตะกอนน้ำเสียและชีวมวลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน

Properties analysis of pellets fuel from sewage sludge and biomass for renewable energy

กฤติเดช ดวงใจบุญ¹ เมตยา กิติวรรณ² พรางค์ทิพย์ ฤทธิโชติ แก้วเพ็งกรอ^{1*}

¹ วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ (RCSEE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 หมู่ 3 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

² คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนเจริญกรุง แขวง/เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพฯ 10520

Krittidej Duangjaiboon¹ Mettaya Kittivan² Prangthip Rittichote Kaewpengkrow^{1*}

¹ Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment (RCSEE), Rajamangala University of Technology Rattanakosin, 96 Moo 3 Phutthamonthon Sai 5 Rd., Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170

² Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Chalongkrung Rd. Ladkrabang District Bangkok 10520

* Corresponding author.

E-mail: prangtip.kae@rmutr.ac.th; Telephone: 0 89053 8894

วันที่รับบทความ 27 ตุลาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 2 มีนาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 26 เมษายน 2565

วันที่ตอบรับบทความ 2 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

นโยบายพลังงานหมุนเวียนได้ขับเคลื่อนการใช้งานเชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงชีวภาพทั่วโลกในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ดังนั้นการทำให้ของเสียจากอุตสาหกรรมและของเสียจากการเกษตรอยู่ในรูปของเม็ดเชื้อเพลิงจึงเป็นประโยชน์ต่อการจัดเก็บ การขนส่ง และการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน ความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิง องค์ประกอบก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เม็ดเชื้อเพลิง และผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ของการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงจากตะกอนน้ำเสียและชีวมวล (ฟางข้าวและขี้เลื่อย) ผลการศึกษาพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่อัดขึ้นรูปจากกากตะกอนน้ำเสียมีส่วนของน้ำเป็นหลัก จึงมีค่าความร้อน (12.56 MJ/kg) และค่าความแข็งแรงทนทานต่ำกว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 2 ชนิด (89.0%) แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงและสามารถจัดเก็บรักษาเพื่อใช้งานในระยะยาวได้ เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซไอเสียหลังการทดสอบการเผาไหม้ พบว่าองค์ประกอบก๊าซไอเสียของเม็ดเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียมีค่าใกล้เคียงกับเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 2 ชนิดและอยู่ในค่ามาตรฐาน แต่มีค่า SO₂ สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อย เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าการใช้เม็ดเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียจะมีความคุ้มค่ามากที่สุด โดยจะมีผลประโยชน์ค่าใช้จ่ายรวมสูงสุด 15,657.80 บาท/ปี คิดเป็น 59.58%, NPV 48,328.03 บาท, IRR 31.19%, B/C 144.64% และมีระยะเวลาคืนทุน 3.00 ปี ดังนั้นการใช้กากตะกอนน้ำเสียในรูปของการเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงานจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการจัดการของเสียนี้ เพราะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดและยังใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

คำสำคัญ

การเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน กากตะกอนน้ำเสีย เม็ดเชื้อเพลิง พลังงานทดแทน มลพิษ

Abstract

Renewable energy policies have driven the wood pellet and biofuel market over the last decades worldwide. Therefore, the pelletization of industrial waste and agricultural waste is beneficial for storage, logistics, and also for application as biofuel. The objective is to study the thermal properties, fuel pellet durability, exhaust gas composition

from the combustion of fuel pellets, and the economic return of fuel pellet usage from sewage sludge and biomass (rice straw and sawdust). The results showed that the fuel pellets extruded from wastewater sludge consisted mainly of water. Therefore, they have a calorific value (12.56 MJ/kg) and durability lower than the two biomass pellets (89.0%). However, it is still in the range of fuel properties that can use as fuel and can store for the long term. Moreover, the flue gas composition from the pellet combustion was analyzed. The result indicated that the gas composition of the pellets fuel from wastewater sludge was similar to that of the two biomass pellets fuel and was within the standard value. Still, the SO_2 value was slightly higher than the benchmark. In considering the economic cost, it was found that the use of pellets from wastewater sludge was the most cost-effective, with a total cost savings of 15,657.80 baht/year, a total cost savings rate of 59.58%, NPV 48,328.03 baht, IRR 31.19%, B/C 144.64% and a payback period of 3.00 years. Therefore, utilizing sewage sludge for waste to energy is an excellent process to manage this waste because it can reduce waste disposal costs and also use as an environmentally friendly alternative fuel.

Keywords

waste to energy; sewage sludge; fuel pellet; renewable energy; pollution

1. บทนำ

กากตะกอนน้ำเสียในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง เป็นของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยแยกเอาของแข็งออกจากน้ำเสียเฉลี่ยประมาณ 5,129,000 m^3 /ปี ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของเสียที่มีความจำเป็นต้องจัดการให้เป็นไปตามกฎหมายเนื่องจากกากตะกอนน้ำเสียนี้ถือเป็นของเสียอุตสาหกรรมอันตรายซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมหากมีการจัดการที่ไม่เหมาะสม ส่วนใหญ่แล้วการจัดการหรือการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียจะใช้วิธีฝังกลบเป็นหลัก ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียที่สำคัญคือต้องใช้พื้นที่ฝังกลบค่อนข้างมากและอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของดินและน้ำใต้ดินในระยะยาวได้ ดังนั้นการนำกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งมาใช้งานในรูปแบบอื่น ถือเป็นการช่วยชะลอการสูญเสียพื้นที่ในการฝังกลบ อีกทั้งยังลดโอกาสในการเสื่อมคุณภาพของทรัพยากรน้ำและดินได้อีกทางหนึ่ง

สำหรับวิธีการนำกากตะกอนน้ำเสียมาใช้งานนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบด้วยกัน หนึ่งในนั้นคือการนำกากตะกอนน้ำเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูปแบบของการเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน (Waste to Energy : WTE) ซึ่งจะเกิดประโยชน์ทั้งในเรื่องของการลดพื้นที่ฝังกลบกากตะกอนน้ำเสีย ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนกากตะกอนน้ำเสียให้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนกับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หม้อไอน้ำ ทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเดิมได้อีกทาง ซึ่งที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับ

คุณสมบัติและการนำกากตะกอนน้ำเสียมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

Ersel Yilmaz และคณะ [1] ได้ดำเนินการศึกษาการผลิตและคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงผสมจากกากตะกอนน้ำเสียและของเสียทางการเกษตรอื่นได้แก่เศษซากสัตว์และผลมะกอก ผลการศึกษาพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงผสมจากกากตะกอนน้ำเสียและของเสียทางการเกษตรสามารถนำไปใช้ได้ แต่จะให้ผลดียิ่งขึ้นเมื่อนำไปใช้ร่วมกับถ่านหิน และเนื่องจากเม็ดเชื้อเพลิงผสมอยู่ในลักษณะที่ง่ายต่อการขนส่งและเก็บรักษา จึงเหมาะต่อการนำมาใช้ในกระบวนการทางความร้อน

Longbo Jiang และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงระหว่างกากตะกอนน้ำเสียและชีวมวล ผลการศึกษาพบว่ามีความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นโดยจะแปรผันตามตัวแปรดังนี้คือ อัตราส่วนการผสมกากตะกอน ความดันและอุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป ซึ่งตรงกันข้ามกับความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงที่จะมีค่ามากที่สุดเมื่อขนาดเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก การศึกษาครั้งนี้ยังพบว่าโปรตีนและลิพิดที่อยู่ในเม็ดเชื้อเพลิงจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างกากตะกอนน้ำเสียและชีวมวล โดยมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงคือ 10–15% นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนน้ำเสียในเม็ดเชื้อเพลิงและทำให้ความหนาแน่นและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแต่จะส่งผลให้มีความชื้นและปริมาณสารระเหยมากขึ้นจนทำให้การระเหยเกิดขึ้นช้าลง

Hui Li และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากการนำชีวมวลและกากตะกอนน้ำเสียมาอัดขึ้นรูป โดยผลจากการศึกษาพบว่าการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียและชีวมวลที่มีความดันในการอัด 55 MPa อุณหภูมิการขึ้นรูป 90 °C และอัตราส่วนของน้ำ 10–15% ขึ้นรูปได้ง่ายและมีความทนทานเหมาะสมสำหรับการอัดเม็ดเชื้อเพลิงผสมมากที่สุด

Lu Sun และคณะ [4] ศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของการเปลี่ยนขยะให้เป็นพลังงานของกรุงโตเกียว ในเรื่องการวิเคราะห์เชิงปริมาณทั้งในเรื่องของต้นทุน ผลตอบแทน รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากขยะ ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากขยะได้จำแนกแนวทางการศึกษาไว้ 4 วิธีด้วยกัน จากการศึกษาพบว่า วิธีการเผาร่วมกับการใช้ระบบ Cogeneration เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากขยะสูงที่สุดและยังให้ผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ที่ดีที่สุด เหมาะสมจะเป็นแนวทางที่ดีในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานจากขยะสำหรับเมืองใหญ่ต่อไป

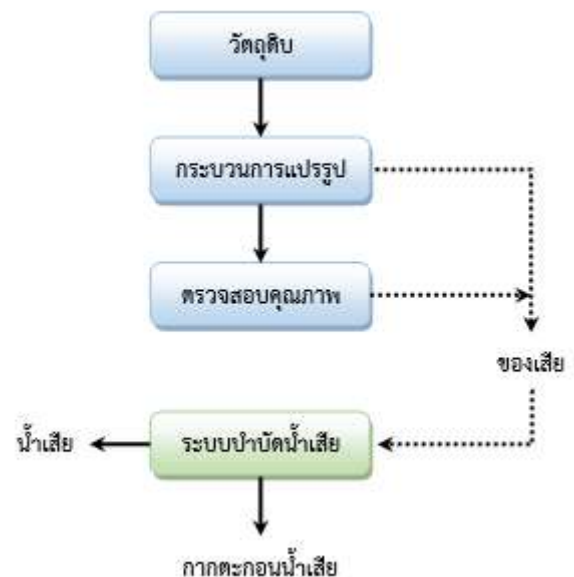
Anna Grobelak และคณะ [5] ได้ประเมินการทำงานของโรงบำบัดกากตะกอนและน้ำเสีย รวมทั้งผลประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้กากตะกอนน้ำเสียในด้านพลังงานและการผลิตปุ๋ย โดยนำมาให้ความร้อนในกระบวนการผลิตปุ๋ย ส่วนเก๊าที่เหลือจากการเผาไหม้สามารถนำไปใช้ปรับปรุงสภาพของดิน ซึ่งระบบนี้จะเป็นต้นแบบสำหรับการปรับปรุงโรงบำบัดน้ำเสียในอนาคตต่อไป

จากเหตุผลดังที่ได้กล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้งานระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียและเม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตจากชีวมวลได้แก่ฟางข้าวและขี้เลื่อย ทั้งในด้านองค์ประกอบพื้นฐานของเม็ดเชื้อเพลิง ความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิง องค์ประกอบไอเสียเมื่อเผาไหม้เม็ดเชื้อเพลิง และผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์จากการใช้เม็ดเชื้อเพลิงแต่ละประเภท เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาและตัดสินใจสำหรับการเลือกใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงนี้ในอนาคตต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของเสียจากกระบวนการผลิตปลาทุ่นำบรรจุกระป๋อง

ของเสียจากกระบวนการผลิตปลาทุ่นำบรรจุกระป๋อง ดังรูปที่ 1 แบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ ของเสียที่เป็นของแข็งประกอบด้วยเศษชิ้นส่วนของปลาทุ่นำจากการแปรรูปกับของเสียที่เป็นของเหลวได้แก่ น้ำเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตและการล้างทำความสะอาดพื้นที่การแปรรูป ซึ่งของเสียทั้งหมดนี้จะไหลรวมกันลงในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน เพื่อปรับสภาพของเสียให้มีคุณภาพดีขึ้น ด้วยการแยกของแข็งในรูปของกากตะกอนออกจากของเสียผ่านกระบวนการทางชีววิทยาและนำส่งออกไปกำจัดยังภายนอกโรงงาน ส่วนของเสียที่เหลือจะอยู่ในรูปของเหลว (น้ำเสีย) จะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติต่อไป [6]



รูปที่ 1 ของเสียจากกระบวนการผลิตปลาทุ่นำบรรจุกระป๋อง

2.2 การเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน (Waste to Energy : WTE)

กากตะกอนน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสีย มีความจำเป็นจะต้องส่งไปกำจัดภายนอกโรงงานตามที่กฎหมายกำหนด ซึ่งการกำจัดต้องอาศัยหน่วยงานที่รับกำจัดโดยเฉพาะ ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียจึงถือเป็นภาระต้นทุนค่าใช้จ่ายให้กับโรงงาน ดังนั้นการนำกากตะกอนน้ำเสียมาผลิตเป็นพลังงานจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการกำจัดของเสีย เพราะนอกจากจะสามารถกำจัดของเสียที่เป็นภาระค่าใช้จ่าย

ได้แล้ว ยังได้รับผลประโยชน์จากการนำกากตะกอนน้ำเสียมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง โดยรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับของเสียประเภทนี้ คือการนำมาผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิงด้วยการขึ้นรูปเป็นแท่งให้มีความหนาแน่นสูง ซึ่งจะทำให้สะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น [7]

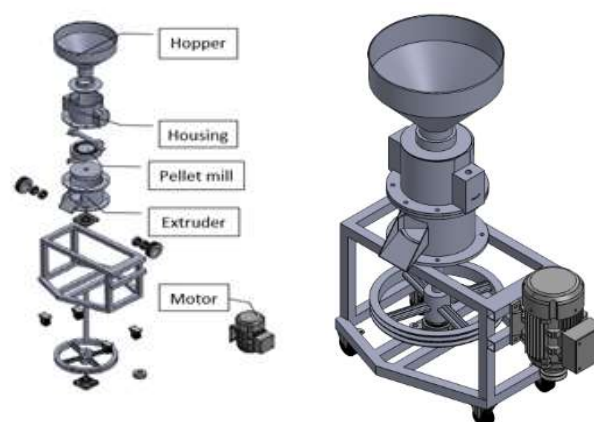
อย่างไรก็ตามการใช้กากตะกอนน้ำเสียมาผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิง เป็นการนำของเสียในรูปแบบหนึ่งมาผลิตเป็นพลังงาน จึงควรมีการศึกษาของเสียประเภทอื่นที่ยังไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์เท่าที่ควร ได้แก่ ฟางข้าวและขี้เลื่อย [8], [9] ซึ่งเป็นของเสียทางการเกษตรมาศึกษาเปรียบเทียบร่วมกัน เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับชีวมวลจากของเสียทางการเกษตรให้มีประโยชน์มากขึ้นต่อไป

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิง จะมีรายละเอียดและขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิง

การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิง ในขั้นตอนแรกของการศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิง จะทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเย้นด้วยแรงอัดสูงแบบคงที่ เพื่อให้โมเลกุลของวัตถุดิบเกิดการอัดตัวแน่นจนจับตัวเป็นก้อน และไม่มีน้ำจำเป็นที่จะต้องบดวัตถุดิบก่อนเข้าอัดหากวัตถุดิบดังกล่าวไม่ได้มีขนาดใหญ่จนเกินไปนัก โดยก่อนจะทำการอัดขึ้นรูปจะต้องเตรียมวัตถุดิบให้มีความชื้นเหมาะสม (ค่าไม่เกิน 35%) จากนั้นจึงอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขนาดห้องปฏิบัติการ กำลังการผลิต 1 kg/ชั่วโมง ดังรูปที่ 2 ด้วยการกรอกวัตถุดิบที่ต้องการขึ้นรูปใน Hopper ครึ่งละประมาณ 500 g จากนั้น Extruder ในเครื่องอัดฯ จะเริ่มอัดเม็ดเชื้อเพลิงออกมาเองโดยอัตโนมัติสำหรับเม็ดเชื้อเพลิงที่จะขึ้นรูปประกอบด้วยวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ เม็ดเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสีย เม็ดเชื้อเพลิงจากชีวมวล (ฟางข้าวและขี้เลื่อย) โดยเม็ดเชื้อเพลิงจากชีวมวลจะมีการผสมน้ำแฉะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวประสานในอัตราส่วน 20% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2 เครื่องอัดขนาดห้องปฏิบัติการ

3.2 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีกายภาพ

1) การวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) ประกอบไปด้วย ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ความชื้น (Moisture) ปริมาณเถ้า (Ash) และปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) ด้วยเครื่องชั่งสำหรับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Balances) ตามมาตรฐาน ASTM E871, ASTM E872 และ ASTM D1102 [3]

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Ultimate Analysis) การวิเคราะห์องค์ประกอบนี้จะเป็นการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงด้วยเครื่อง Elemental Analyzer (CHNS Analyzer) ตามมาตรฐาน ASTM D 5373 และ ASTM D 4239 [1]

3) การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) เพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงของเม็ดเชื้อเพลิงแต่ละชนิดตามมาตรฐาน ASTM D 5865 [10]

3.3 การวิเคราะห์ค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์นี้จะใช้การประเมินร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ความทนทาน ให้เป็นไปตามมาตรฐานทดสอบ DIN EN 15210-1 [11] ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) นำเม็ดเชื้อเพลิงจำนวน 0.5 kg ลงในกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาด (0.3 X 0.3 X 0.125) m. ด้านในมีใบกวนทดสอบการหมุนที่ความเร็วรอบ 50 rpm. เป็นเวลา 10 min. ดังรูปที่ 3

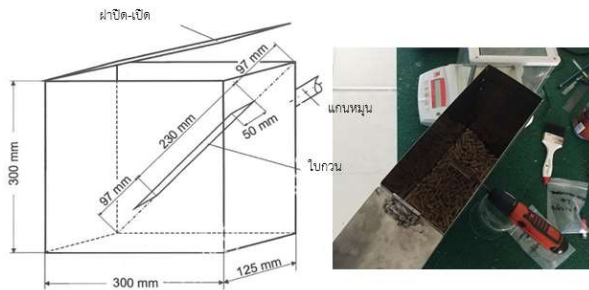
2) นำมาร้อนด้วยตะแกรงขนาด 3.15 mm. และซึ่งน้ำหนักเม็ดเชื้อเพลิงเพื่อคำนวณอัตราส่วนหรือเปอร์เซ็นต์การแตกหักจากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{WF}{WI} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

WF คือ มวลของเม็ดเชื้อเพลิงหลังการทดสอบ (g)

WI คือ มวลเม็ดเชื้อเพลิงก่อนการทดสอบเริ่มต้น (g)



รูปที่ 3 เครื่องทดสอบความทนทานเม็ดเชื้อเพลิง

3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซไอเสียของเม็ดเชื้อเพลิง

ศึกษาองค์ประกอบก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ของเม็ดเชื้อเพลิง ด้วยเตาเผา (furnace) ระดับปฏิบัติการที่ช่วงอุณหภูมิ 350 °C โดยทำการตรวจวัดแก๊สไอเสียได้แก่ CO_2 , NO_x , NO_2 , SO_2 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สรุ่น testo 350 โดยจะควบคุมสภาวะในการเผาไหม้ให้มีค่าคงที่และใกล้เคียงกับเตาเผาหรือหม้อไอน้ำที่ใช้ในโรงงานตัวอย่าง โดยจะทำการทดสอบการเผาไหม้จากตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงครั้งละ 30 นาที [5]

3.5 การศึกษาผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ของการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิง

การศึกษาคำนวณผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ของการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิง จะทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าจากการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงแต่ละอัตราส่วนเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินในหม้อไอน้ำ ซึ่งผลตอบแทนที่จะได้รับจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท คือเชื้อเพลิงถ่านหินที่ประหยัดได้และค่ากำจัดกากของเสียกรณีที่มีเม็ดเชื้อเพลิงที่วัตถุดิบเป็นกากตะกอนน้ำเสีย โดยค่ากำจัดจะ

มีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 0.80 บาท/kg จากนั้นจึงทำการศึกษาผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยดัชนีชี้วัดดังนี้ [12]

1) มูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดอายุของโครงการ หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{Benefit - Cost}{(1+i)^t} \quad (2)$$

2) อัตราผลตอบแทนภายใน หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{Benefit}{(1+i)^t} - \frac{Cost}{(1+i)^t} \quad (3)$$

3) การคำนวณอัตราส่วนผลตอบแทนต่อเงินลงทุน หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$B/C = \sum_{t=0}^n \frac{\frac{Benefit}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{Cost}{(1+i)^t}} \quad (4)$$

โดยที่ NPV คือมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิตลอดอายุของโครงการ (บาท) IRR คือ อัตราผลตอบแทนภายใน (%) B/C คือ อัตราส่วนผลตอบแทนต่อเงินลงทุน (%) Benefit คือ มูลค่าผลตอบแทนในปีที่ t (บาท) Cost คือ มูลค่าของต้นทุนในปีที่ t (บาท) i คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 7.75% t คือ ปีของโครงการ n คือ อายุของโครงการ (ปี)

4) การคำนวณระยะเวลาคืนทุน หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุน}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี}} \quad (5)$$

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิง

หลังจากเตรียมวัตถุดิบของกากตะกอนน้ำเสียและชีวมวลให้มีคุณภาพเหมาะสมต่อการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจากเครื่องอัดขนาด

ห้องปฏิบัติการด้วยการอัดเย็น ซึ่งหลังจากการอัดขึ้นรูปแล้ว เสรีจะได้เม็ดเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm. และมีความยาวประมาณ 30-35 mm. ในทุกวัตถุดิบดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานของเม็ดเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์	เม็ดเชื้อเพลิง จากฟางข้าว	เม็ดเชื้อเพลิง จากกากตะกอนน้ำเสีย	เม็ดเชื้อเพลิง จากขี้เลื่อย	ถ่านหินแอนทราไซต์ (Yilmaz, 2018)
Proximate analysis (wt.%)				
Moisture	5.50 (± 1.75)	47.91 (± 1.64)	3.55 (± 1.24)	5.00-10.00
Voltaire Matter	86.02 (± 1.65)	37.38 (± 1.59)	87.65 (± 1.72)	25.00-40.00
Ash	8.34 (± 1.24)	8.34 (± 1.62)	7.63 (± 1.67)	8.50-11.30
Fix Carbon	0.14 (± 1.17)	7.22 (± 1.77)	1.17 (± 1.38)	38.70-61.50
Ultimate analysis (wt.%)				
C	40.55 (± 0.93)	39.71 (± 0.05)	45.92 (± 0.54)	76.0-87.0
H	7.01 (± 0.31)	6.94 (± 0.02)	7.23 (± 0.18)	3.50-5.00
N	0.00 (± 0.00)	5.58 (± 1.82)	0.00 (± 0.00)	0.80-1.50
S	0.00 (± 0.00)	1.01 (± 0.04)	0.00 (± 0.00)	0.50-3.10
Calorific value (MJ/kg)				
HHV	17.19 (± 0.21)	12.56 (± 0.35)	17.39 (± 0.33)	26.00-28.30

4.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบพื้นฐาน

จากตารางที่ 1 เป็นผลการวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานของเม็ดเชื้อเพลิงในแต่ละชนิด โดยผลจากการวิเคราะห์ภาพรวมของเม็ดเชื้อเพลิงทั้งหมด พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของฟางข้าวและขี้เลื่อยจะมีองค์ประกอบของ Voltaire Matter เป็นส่วนใหญ่ และมีปริมาณ C ค่อนข้างมาก ส่งผลต่อค่าความร้อนที่มีค่าสูงตามไปด้วย แต่ขี้เลื่อยจะมีข้อได้เปรียบกว่าฟางข้าว เพราะเมื่อนำไปเผาแล้วจะมีปริมาณเถ้าต่ำซึ่งจัดการได้ง่ายกว่า เมื่อพิจารณาในส่วนเม็ดเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของกากตะกอนน้ำเสียเป็นหลัก จะพบว่ากากตะกอนน้ำเสียมีองค์ประกอบเป็น Voltaire Matter เช่นเดียวกับฟางข้าวและขี้เลื่อยแต่จะมีความชื้นสูงมากกว่า รวมทั้งเมื่อพิจารณาถึงปริมาณ C จะมีค่าต่ำกว่าฟางข้าวและขี้เลื่อย

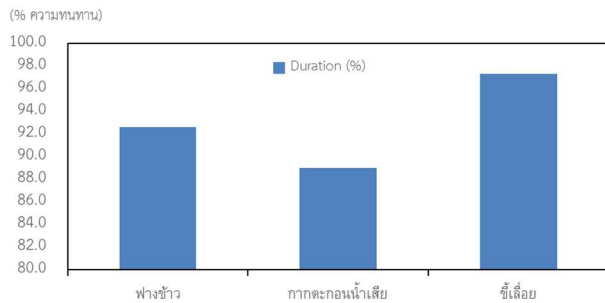
จากสาเหตุทั้ง 2 ประการนี้จึงส่งผลต่อค่าความร้อนที่ต่ำ อีกทั้งเมื่อนำไปเผาแล้วพบว่ามีปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นค่อนข้างมาก ซึ่งต้องอาศัยการจัดการที่ดี อย่างไรก็ตามกากตะกอนน้ำเสียยัง

มีข้อดีในแง่ของปริมาณ S ที่ต่ำมาก ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัย [2] เมื่อนำไปเผาแล้วจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศมากนัก

4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 5 เป็นผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด โดยผลจากการวิเคราะห์พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของกากตะกอนน้ำเสีย จะมีค่าความหนาแน่นต่ำสุดอยู่ที่ค่า 89.0% แต่สำหรับเม็ดเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของฟางข้าวและขี้เลื่อย จะมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 92.6% และ 97.3% ซึ่งสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของกากตะกอนน้ำเสีย และยังมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานการทดสอบ DIN EN 15210-1 ที่กำหนดความหนาแน่นไม่น้อยกว่า 97.5% ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก lignin ที่อยู่ในชีวมวลจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดติดเส้นใยของ cellulose ให้อยู่ด้วยกัน ดังนั้นหากมีปริมาณ lignin ในเม็ด

เชื้อเพลิงมากจะส่งผลต่อความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงให้สูงขึ้น ส่งผลต่อความแข็งแรงและทนทานต่อการเสียหายได้ดี



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์หาค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิง

4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซไอเสียของเม็ดเชื้อเพลิง

จากตารางที่ 2 เป็นผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซไอเสียของเม็ดเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ โดยการเผาไหม้จะเป็นแบบเปิดที่ไม่มีการควบคุมความดันในเตาและกระทำภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ ซึ่งจะเปรียบเทียบค่าที่ได้จากตรวจวัดกับค่ามาตรฐานของมลสารสำคัญที่ยินยอมให้ระบายออกจากปล่องตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2549 [13] ได้แก่ NO_x , NO_2 และ SO_2 ซึ่งจะอ้างอิงกับเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นหลัก

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซไอเสียของเม็ดเชื้อเพลิง

Parameter	เม็ดเชื้อเพลิง		
	ฟางข้าว	กากตะกอนน้ำเสีย	ชีเลื้อย
NO_x (ppm)	0	1.3	0
NO_2 (ppm)	0	1.3	0
CO_2 (%)	6.47	5.05	3.78
SO_2 (ppm)	0	67	0

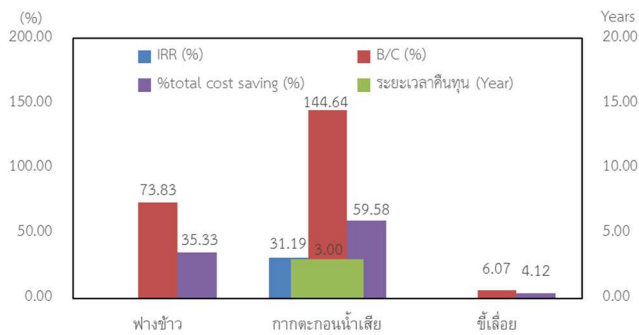
โดยผลจากการตรวจวัดก๊าซ NO_x และ NO_2 พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงทุกชนิดมีค่าต่ำและอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐาน (NO_x , $\text{NO}_2 < 200$ ppm) ซึ่งมีสาเหตุมาจากเม็ดเชื้อเพลิงทุกชนิดมีปริมาณ N ต่ำ ประกอบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้จะอยู่ระหว่าง $250\text{--}350^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมก๊าซ NO_x และ NO_2 สุดท้ายจะเป็นผลการตรวจวัดก๊าซ SO_2 ซึ่งผลจากการตรวจวัดพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงทุกชนิดจะมีค่า SO_2 ต่ำและอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐาน ($\text{SO}_2 < 60$ ppm) ยกเว้นเม็ดเชื้อเพลิงที่ขึ้นรูปจากกากตะกอนน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของ S ดังนั้นเมื่อนำมาเผาไหม้จึงมีโอกาที่จะก่อให้เกิดก๊าซ SO_2 ขึ้นได้

4.5 ผลการศึกษาผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ของการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิง

จากตารางที่ 3 และรูปที่ 6 เป็นการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสียจะให้ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ดีที่สุด โดยจะมีผลประหยัดค่าใช้จ่ายรวมสูงสุด 15,657.80 บาท/ปี คิดเป็น 59.58% มีค่า NPV 48,328.03 บาท, IRR 31.19%, B/C 144.64% และมีระยะเวลาคืนทุน 3.00 ปี ซึ่งผลตอบแทนจากเม็ดเชื้อเพลิงนี้ เป็นผลรวมระหว่างผลประหยัดจากการลดการใช้ถ่านหินและผลประหยัดจากการลดค่ากำจัดกากตะกอนน้ำเสีย ดังนั้นเมื่อใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกากตะกอนน้ำเสีย ก็จะได้รับค่ากำจัดกากตะกอนน้ำเสียซึ่งถือว่าเป็นผลประโยชน์ส่วนเพิ่มอีกทาง แต่ในกรณีเม็ดเชื้อเพลิงจากฟางข้าวและชีเลื้อย พบว่าไม่มีคําค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ มีสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัยหลักคือกรณีใช้ฟางข้าวหรือชีเลื้อยเป็นส่วนผสมหลักเพียงอย่างเดียวจะมีต้นทุนการผลิตที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ได้รับ อีกทั้งเม็ดเชื้อเพลิงดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของกากตะกอนน้ำเสีย จึงไม่ได้รับประโยชน์จากการลดค่ากำจัดกากของเสียนี้

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์เม็ดเงินเชื้อเพลิง

Parameter	เม็ดเงินเชื้อเพลิง				Unit
	ฟางข้าว	กากตะกอนน้ำเสีย	ขี้เลื่อย	ถ่านหิน (บิทูมินัส)	
Manufacture Capacity	8,760.00	8,760.00	8,760.00	8,760.00	kg/Yrs.
Investment Costs	20,650.00	20,650.00	20,650.00	-	Baht
Material Costs	0.20	0.00	0.80	3.00	Baht/kg
Operating Costs	1.00	1.00	1.00	0.00	Baht/kg
Net Heating Value	17.19	12.56	17.39	27.79	MJ/kg
Specific Energy Cost	0.07	0.08	0.10	0.11	Baht/MJ
Energy Saving	0.04	0.03	0.00	-	Baht/MJ
Energy Saving Cost/Unit	1.06	0.79	0.12	-	Baht/kg
Disposal Cost/Unit	0.00	1.00	0.00	-	Baht/kg
Total Saving Cost/Unit	1.06	1.79	0.12	-	Baht/kg
Total Saving Cost	9,285.91	15,657.80	1,082.03	-	Baht/Yrs.
%Total Saving	35.33	59.58	4.12	-	%



รูปที่ 6 ผลตอบแทนทางด้านการเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเงินเชื้อเพลิง

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของเม็ดเงินเชื้อเพลิงแต่ละชนิด พบว่าการใช้งานเม็ดเงินเชื้อเพลิงจากชีวมวลทั้งในส่วนของฟางข้าวและขี้เลื่อย จะมีข้อดีในเรื่องของค่าความร้อนมากกว่าเม็ดเงินเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสีย แต่ก็มีข้อเสียคือเม็ดเงินเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีต้นทุนค่าวัตถุดิบซึ่งต่างกับเม็ดเงินเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสีย (ไม่มีค่าใช้จ่าย) อีกทั้งการใช้เม็ดเงินเชื้อเพลิงจากชีวมวลจะไม่ได้รับผลประโยชน์ส่วนเพิ่มจากการลดค่ากำจัดกากของเสีย ส่งผลต่อความคุ้มค่าทางด้านการเศรษฐศาสตร์ที่ลดลงอย่างชัดเจน ดังนั้นจากผลการวิจัยที่

ผ่านมาจึงสรุปได้ว่าเม็ดเงินเชื้อเพลิงจากการตะกอนน้ำเสียเหมาะสมในการใช้เป็นเชื้อเพลิงมากกว่าการใช้เม็ดเงินเชื้อเพลิงจากชีวมวล

อย่างไรก็ตาม การใช้เม็ดเงินเชื้อเพลิงจากชีวมวลยังมีข้อดีในแง่ของการเพิ่มคุณสมบัติทางความร้อนให้เม็ดเงินเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสีย เนื่องจากมีค่าความร้อนและค่าความหนาทันที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดเงินเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสีย ดังนั้นการเพิ่มสัดส่วนชีวมวลร่วมกับกากตะกอนน้ำเสียในเม็ดเงินเชื้อเพลิง คาดว่าจะเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการปรับปรุงค่าความร้อน ความแข็งแรงทนทานเพื่อง่ายต่อการจัดเก็บรักษา รวมทั้งยังมีความคุ้มค่าทางด้านการเศรษฐศาสตร์ในระดับที่น่าสนใจ ในงานวิจัยต่อไปจึงควรขยายผลการทดลองด้วยการปรับอัตราส่วนผสมระหว่างชีวมวลและกากตะกอนน้ำเสียในเม็ดเงินเชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเม็ดเงินเชื้อเพลิงจากกระบวนการผลิตปลาทุ่นาบรรจุกระป๋องต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนการดำเนินงานโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ร่วมกับโครงการวิจัยมูลฐาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชชมงคลรัตนโกสินทร์ สัญญาเลขที่ FRB660025/0170 โครงการวิจัย เรื่อง การพัฒนาเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมจากของเสียอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนปีงบประมาณ 2566 ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวิจัยที่เกี่ยวข้องและอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัยมาเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ersel Y, Małgorzata W, Selin A. Co-pelletization of sewage sludge and agricultural wastes. *Journal of Environmental Management*. 2018; 216:169-175.
- [2] Jiang L, Liang J, Yuan X, Li H, Li C, Xiao Z, et al. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The density and hardness of pellet. *Bioresource Technology*. 2014; 166:435-443.
- [3] Li H, Jiang LB, Li CZ, Liang J, Yuan XZ, Xiao ZH, et al. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: the energy input and properties of pellets. *Fuel Processing Technology*. 2015; 132:55-61.
- [4] Suna L, Fujii M, Tasaki T, Dong H, Ohnishi S. Improving waste to energy rate by promoting an integrated municipal solid-waste management system. *Resources, Conservation & Recycling*. 2018; 136: 289-296.
- [5] Grobelak A, Grosser A, Kacprzak M, Kamizela T. Sewage sludge processing and management in small and medium-sized municipal wastewater treatment plant-new technical solution. *Journal of Environmental Management*. 2019; 234:90-96
- [6] วิภารัตน์ ชัยเพชร. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทะเลกระป๋องโดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนในถังสร้างกรดแบบไร้อากาศและถึงปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี. [วิทยานิพนธ์]. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2551
- [7] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. คู่มือการจัดการกากอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม; 2558.
- [8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานฉบับสมบูรณ์ การศึกษาการใช้ชีวมวลฟางข้าว ใบ และยอดอ้อย และลำต้นข้าวโพด เพื่อผลิตพลังงานทดแทน. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน; 2559.
- [9] พงษ์เดช รัตนานุกูล. รายงานวิจัย โครงการศึกษาศักยภาพการใช้ประโยชน์เศษวัสดุเหลือทิ้งในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้; 2560.
- [10] Krittidej D, Mettaya K, Prangthip RK. Co-pelletization of Industrial Sewage Sludge and Rice Straw: Characteristics and Economic Analysis. *International Journal of Renewable Energy Development*. 2021;10(3):653-662.
- [11] ศิริชัย ต่อสกุล, จงกล สุภารัตน์, นทีชัย ผัสดี. การออกแบบและสร้างเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยระบบดาเยนอัด. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 ประจำปี 2558, 4-6 พฤศจิกายน 2558. ปทุมธานี: 2558. หน้า 91-94.
- [12] กฤติเดช ดวงใจบุญ. การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์แบบผสมผสานสำหรับอาคารประเภทโรงแรม. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์. 2561;13(1):65-78.
- [13] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน. กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม; 2555.