

การคัดเลือกเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เหมาะสมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้เทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้

วรรณรพ ชันธิรัตน์¹, นรงค์ วิชาพา^{2*}, อนุชา ศรีบุญรัมย์³ และอุทัย ธารพรศรี⁴
Wanrop.kh@ksu.ac.th¹, Narong.wi@ksu.ac.th^{2*}, Anucha.sr@ksu.ac.th³, Uthai.th@ksu.ac.th⁴

¹⁻⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Received	: 2-Oct-2019
Revised	: 7-Jan-2020
Accepted	: 9-Jan-2020

บทคัดย่อ

แนวคิดในการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตามการอัดแท่งแต่ละชนิดควรถูกพิจารณาคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องหลายอย่างพร้อม ๆ กัน โดยในงานวิจัยนี้ถ่านอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตรจำนวน 7 ชนิด ได้ถูกประเมินประสิทธิภาพและเรียงลำดับความสำคัญ ลำดับแรกถ่านอัดแท่งแต่ละชนิดวัสดุจะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้า หลังจากนั้นการวิเคราะห์การล้อมกรอบข้อมูล (Data Envelopment Analysis; DEA) จะถูกใช้สำหรับคำนวณประสิทธิภาพของแต่ละวัสดุ สุดท้ายถ่านอัดแท่งแต่ละชนิดจะถูกประเมินความสำคัญโดยใช้เทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้ (DEA Cross - Efficiency) ผลการศึกษาพบว่าขี้เลื่อย และกะลามะพร้าว เป็นพลังงานทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1) โดยเรียงลำดับความสำคัญได้ดังนี้ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย กากอ้อย กากอ้อยดิบ แกลบ ไมยราบ และ ผักตบชวา ตามลำดับ

คำสำคัญ: การวิเคราะห์การล้อมกรอบข้อมูล ถ่านอัดแท่ง ประสิทธิภาพแบบไขว้ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

Selection of the Suitable Biomass Fuel Briquettes Generated from Agricultural Waste Using DEA-Cross-efficiency

Wanrop Khanthirat¹, Narong Wichapa^{2*}, Anucha Sriburum³ and Uthai Tarnpornsi⁴
wanrop.kh@ksu.ac.th¹, narong.wi@ksu.ac.th^{2*}, anucha.sr@ksu.ac.th³, Uthai.th@ksu.ac.th⁴

¹⁻⁴ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

Received	: 2-Oct-2019
Revised	: 7-Jan-2020
Accepted	: 9-Jan-2020

Abstract

The idea of using the residues of agricultural materials for processing into fuel briquettes is an interesting issue. However, each fuel briquette must be considered several properties simultaneously. In this paper, the fuel briquettes from seven agricultural materials were evaluated the efficiency score and ranking. Firstly, the fuel briquettes were tested the properties, including the heating value, fixed carbon, moisture content and ash. After that, Data Environment Analysis (DEA) was used to evaluate as the efficiency scores of each agricultural material. Finally, each fuel briquette was evaluated using DEA Cross-Efficiency. The results show that the efficiency scores of sawdust and coconut shell are efficient (Efficiency Score =1). The ranking for suitable agricultural materials were sawdust, coconut shell, bagasse, cattail, rice husk, sensitive plant and water hyacinth respectively.

Keywords: Data Environment Analysis, Fuel Briquette, DEA Cross- Efficiency, Agricultural Waste

1. บทนำ

ในปัจจุบันอัตราการใช้พลังงานของประเทศไทย เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี อย่างไรก็ตามแหล่งพลังงานในประเทศไทยกลับมีอัตราการผลิตไม่เพียงพอ กับความต้องการ ด้วยเหตุนี้ประเทศไทยจึงต้องนำเข้า พลังงานจากต่างประเทศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี ใน 2 เดือนแรกของปี 2562 ประเทศไทยมีการใช้พลังงาน ขึ้นสุดท้าย มีปริมาณ 14,820 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อน ร้อยละ 4.8 คิดเป็น มูลค่ากว่า 210,879 ล้านบาท และมีการนำเข้าพลังงาน คิดเป็นมูลค่ากว่า 172,873 ล้านบาท โดยในช่วงสอง เดือนแรกของปี 2562 ประเทศไทยมีการใช้พลังงาน ทดแทน 2,866 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือเพิ่มขึ้น ร้อยละ 28.1 จากช่วงเดียวกันของปีก่อน [1] การใช้ พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจึงเป็น แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ของประเทศได้ [2] ยิ่งไปกว่านั้นการนำวัสดุเหลือใช้ทาง การเกษตรมาทำให้เกิดประโยชน์ยังเป็นการแก้ปัญหา การกำจัดของเสียจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอีก รูปแบบหนึ่งด้วย สอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงาน ทดแทนและพลังงานทางเลือกที่สนับสนุนในการใช้ พลังงานจากชีวมวลเพิ่มขึ้น [3] นอกจากนี้พลังงานจาก ชีวมวลเป็นพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถแปรรูปวัสดุเป็นแท่งเชื้อเพลิงใช้สำหรับ ประกอบอาหารได้โดยตรง ดังนั้นพลังงานชีวมวลจาก วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจึงเป็นแหล่งพลังงานที่ เหมาะสมต่อการพัฒนาที่ยั่งยืน ด้วยเหตุนี้วัสดุเหลือใช้ ทางการเกษตรจึงถูกนำมาแปรรูปเพื่อเป็นเชื้อเพลิงชีว มวลอัดแท่ง ดังแสดงในวรรณกรรม [4], [5], [6], [7] ซึ่ง เชื้อเพลิงเหล่านี้นสามารถนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ฟืนไม้ได้เป็นอย่างดี

การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูป เป็นถ่านอัดแท่งจากวัสดุ 7 ชนิด ได้แก่ กากอ้อย กากอ้อย ฤๅษี ผักตบชวา แกลบ กะลามะพร้าว ชี้อ้อย และ ไม้ยางพารา มาทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุที่สำคัญ สำหรับการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง โดยวัสดุเหลือใช้ ทางการเกษตรเหล่านี้เป็นวัสดุที่พบในท้องถิ่นและส่วน ใหญ่จะไม่ถูกนำมาแปรรูปเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ ดังนั้น การนำวัสดุทางการเกษตรเหล่านี้มาทดลองเพื่อ ตรวจสอบคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับเป็นเชื้อเพลิง ทดแทนพลังงานความร้อนจากถ่านไม้ ซึ่งคุณสมบัติที่

สำคัญ ได้แก่ ค่าความร้อน ถ่านคงตัว ความชื้น และ ปริมาณเถ้า โดยแท่งเชื้อเพลิงหรือถ่านอัดแท่งนี้จะช่วย ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อเชื้อเพลิงจากท้องตลาด ลด ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม สามารถนำวัสดุเหลือใช้ทาง การเกษตรมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า เกิดประโยชน์ต่อ ชุมชนหรือท้องถิ่น และสิ่งสำคัญประการหนึ่งคือ เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งถือว่าเป็นพลังงานทางเลือกที่มี ความยั่งยืน

ปัญหาแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making problem, MCDM problem) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [8] ได้แก่ ปัญหาการ ตัดสินใจแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Decision Making problem, MODM) และปัญหาการ ตัดสินใจแบบหลายคุณลักษณะ (Multi-Attribute Decision Making problem, MADM) ในการพิจารณา คัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำมาแปรรูปเป็น ถ่านอัดแท่งเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนถ่านไม้ นั้น จะต้องพิจารณาคุณสมบัติหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลาย ปัจจัย ได้แก่ ค่าความร้อน ถ่านคงตัว ความชื้น และ ปริมาณเถ้า ปัญหานี้จึงเป็นปัญหาการตัดสินใจแบบ หลายคุณลักษณะ หรือ MADM เนื่องจากมีปัจจัยที่ เกี่ยวข้องหลายประการ และมีทางเลือกหลายทางเลือก ที่ต้องพิจารณาไปพร้อม ๆ กัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ หาทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด แม้ว่าจะมีวิธีในการ แก้ปัญหา MADM หลากหลายวิธี เช่น AHP [9], [10] TOPSIS [11], [12] และ DEA [13] อย่างไรก็ตาม เทคนิค DEA เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการวัด ประสิทธิภาพของหน่วยผลิต (Decision Making Units, DMUs) ที่มีหลายหน่วยผลิต โดยใช้ข้อมูลปัจจัยนำเข้า และปัจจัยผลผลิต (Inputs and outputs) ที่มีหลาย ปัจจัยได้ [13], [14], [15] โดยไม่ต้องกำหนดน้ำหนัก ให้กับปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิต ยิ่งไปกว่านั้น ข้อมูลของแต่ละปัจจัยที่มีหน่วยต่างกันไม่จำเป็นต้องทำ การนอร์มอลไลซ์ ข้อมูล ทำให้ง่ายต่อการวัด ประสิทธิภาพของหน่วยผลิตที่มีจำนวนมาก ปัจจัย ผลผลิตหลายปัจจัย และปัจจัยนำเข้าหลายปัจจัย พร้อม ๆ กันได้ อย่างไรก็ตามข้อด้อย (Drawback) ที่ สำคัญของ DEA คือไม่สามารถเรียงลำดับความสำคัญ (Ranking) ของหน่วยผลิตทั้งหมดได้หากมีหน่วยผลิตที่ มีประสิทธิภาพ (คะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1) จำนวนมากกว่าหนึ่งหน่วยผลิต ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัย จำนวนมากได้นำเสนอวิธีเรียงลำดับความสำคัญของ

หน่วยผลิตเพื่อเอาชนะข้อด้อยนี้ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าเทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้ (DEA Cross-Efficiency) เป็นหนึ่งในวิธีเรียงลำดับความสำคัญที่ได้รับความนิยมสูงและถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในหลายสาขา เช่น [16], [17], [18]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้ DEA สำหรับประเมินประสิทธิภาพของวัสดุทางการเกษตร และ DEA จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการเรียงลำดับความสำคัญของวัสดุ เพื่อประเมินและเรียงลำดับความสำคัญของวัสดุทางการเกษตรที่เหมาะสมสำหรับการนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง เริ่มจากการนำวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง จากนั้นนำถ่านอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ มาทดสอบหาคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการเป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม โดยคุณสมบัติหรือปัจจัยที่สำคัญจะต้องถูกนำมาพิจารณา ได้แก่ ค่าความร้อนคาร์บอนคงตัว ความชื้น และปริมาณเถ้า จากนั้นนำข้อมูลคุณสมบัติที่ได้เหล่านี้มาคำนวณหาค่าคะแนนประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การล้อมกรอบข้อมูล หรือ DEA ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการจัดเรียงลำดับความสำคัญของวัสดุสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง โดยใช้เทคนิค DEA Cross-Efficiency

2. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1. การวิเคราะห์การล้อมกรอบข้อมูลแบบประสิทธิภาพไขว้

แนวคิดของเทคนิค DEA ได้ถูกนำเสนอโดย Farrell ในปี 1957 [19] อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค DEA ได้ถูกนำเสนอในภายหลังโดย Charnes, Cooper and Rhodes [14] โดยเรียกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ว่า DEA ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ (Relative Efficiency) โดยการเปรียบเทียบค่าคะแนนประสิทธิภาพที่คำนวณได้ในแต่ละหน่วยผลิตกับค่าที่ได้จากหน่วยผลิตที่ดีที่สุด (Best Practice) หรืออาจกล่าวได้ว่าหน่วยผลิตนั้นเป็นหน่วยผลิตที่อยู่ในระดับแนวหน้า (Frontier) หรือหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพ (Efficiency) ส่วนหน่วยผลิตอื่นๆ จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า (Inefficiency)

โดยทั่วไปหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพจะมีค่าคะแนนประสิทธิภาพ (Efficiency Score) เท่ากับ 1 ในส่วนหน่วยผลิตที่มีค่าคะแนนประสิทธิภาพน้อยกว่า 1

จะเป็นหน่วยผลิตที่ไม่มีคุณภาพ จากอดีตจนถึงปัจจุบันเทคนิค DEA ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยหลากหลายสาขาดังแสดงในวรรณกรรม [20], [21], [22] นอกจากนี้เทคนิค DEA ยังสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจแบบหลายคุณลักษณะ หรือ MADM [23], [24] โดยทางเลือก (Alternatives) ตามมุมมองของเทคนิค MADM จะถูกมองเป็นหน่วยผลิต หรือ DMUs ในเทคนิค DEA ส่วนปัจจัย (Criteria) ในเครื่องมือ MADM จะถูกมองเป็นปัจจัยนำเข้าหรือปัจจัยผลผลิต (Inputs or outputs) ซึ่งเทคนิค DEA ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในงานวิจัยหลากหลายสาขา เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ดังนี้ [25], [26]: (1) สามารถประเมินประสิทธิภาพหน่วยผลิตที่มีปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิตหลายปัจจัยได้ (2) ไม่จำเป็นต้องมีการนอร์มอลไลซ์ข้อมูลก่อนการคำนวณ (3) ไม่จำเป็นต้องกำหนดน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยเนื่องจากเทคนิค DEA สามารถให้ค่าน้ำหนักความสำคัญเองได้ โดยในปัจจุบัน DEA ยังคงได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตหรือองค์กรหลากหลายสาขา และยังคงมีการพัฒนา DEA ในรูปแบบต่างๆ สำหรับการแก้ปัญหาตามธรรมชาติหรือตามลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากข้อด้อยของเทคนิค DEA คือไม่สามารถเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตทั้งหมด หากจำนวนหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพมีจำนวนมากกว่าหนึ่งหน่วย ดังนั้นเพื่อที่จะเอาชนะข้อด้อยนี้ นักวิจัยจำนวนหนึ่งได้นำเสนอเทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมอย่างสูง [27], [28] สำหรับเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตทั้งหมดได้

2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตร

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าม้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตรหลายชนิด เช่น

รุ่งโรจน์ พุทธิสกุล [29] ได้แปรรูปวัสดุจากกะลามะพร้าว และถ่านเห้จ้ามันสำปะหลัง เป็นถ่านอัดแท่ง ผลการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของถ่านอัดแท่งเท่ากับ 5,003 cal/g ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มผช.238/2547 โดยมีต้นทุนการผลิตถ่านอัดแท่งเท่ากับ 5.35 บาท/กิโลกรัม และกำลังการผลิต 400 กิโลกรัม/วัน ระยะเวลาการคืนทุนประมาณ 1.4 ปี

เอกลักษณ์ กิติภัทรถาวร [5] ได้ศึกษากานอัดแท่งจากชีวมวลและตะกอนเปียกอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล ผลการทดลองพบว่ากานอัดแท่งจากตะกอนเปียกผสมร่วมกับกะลามะพร้าวให้ค่าความร้อนสูงสุด รองลงมา ได้แก่เปลือกมังคุด และเปลือกทุเรียน ตามลำดับ โดยอัตราส่วนผสมของกานอัดแท่งจากตะกอนเปียกผสมร่วมกับชีวมวลในอัตราส่วน 5:5 เป็นอัตราส่วนที่กานอัดแท่งมีคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงดีที่สุด มีความคุ้มค่าในการลงทุนสูง และสามารถคืนทุนในระยะเวลาอันสั้น จากผลการวิจัยนี้สามารถนำไปส่งเสริมและพัฒนาการนำวัสดุของเสียเหลือทิ้งจากการผลิตและการบริโภคทางการเกษตรนำมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าและเป็นอีกหนึ่งทางที่ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

แม้ว่าจะมีงานวิจัยอีกจำนวนมาก เช่น นริศ ชุตสว่าง [30] และ ปัญจรัตน์ โจลานันท์ [31] ได้นำเสนอการแปรรูปวัสดุทางการเกษตรเป็นกานอัดแท่ง แต่ยังไม่มีการวิจัยใดที่นำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพของกานอัดแท่งที่ผลิตขึ้น เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณาไปพร้อม ๆ กัน ทั้งปัจจัยนำเข้า (Inputs) และปัจจัยผลผลิต (Outputs) รวมถึงวัดประสิทธิภาพของกานอัดแท่งแต่ละชนิดหรือเรียกว่าหน่วยผลิต (Decision Making Unit, DMUs) ซึ่งวิธีวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตจะมีความซับซ้อนเนื่องจากจำนวนปัจจัยผลผลิต และปัจจัยนำเข้า มีหลายปัจจัยที่ต้องใช้ในการคำนวณ ซึ่งเป็นข้อด้อยอย่างหนึ่งของงานวิจัยในด้านนี้ และเป็นอุปสรรคในการพัฒนาเพื่อต่อยอดการผลิตเชิงพาณิชย์ที่ยั่งยืนได้ การวัดประสิทธิภาพของกานอัดแท่งแต่ละชนิดจึงเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่จะนำไปสู่การปรับปรุงหรือพัฒนาการผลิตกานอัดแท่งให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และผู้บริโภคต่อไป

เนื้อหาในส่วนที่เหลือของบทความนี้จะประกอบด้วย วิธีการดำเนินการวิจัย ผลการศึกษา และสรุปผล ตามลำดับ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพของกานอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยอาศัยข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติกานอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ในการเกษตรทั้ง 7 ชนิด โดยขั้นตอนการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.1. การอัดแท่งเชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้เทคนิคการอัดแท่งเชื้อเพลิงจะใช้วิธีอัดเย็น โดยใช้แบริ่งน้ำมันสำหรับเป็นตัวประสานเนื่องจากแบริ่งน้ำมันสำหรับเป็นตัวประสานที่มีค่าความร้อนสูงและสามารถยึดเกาะวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวและเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพได้ดี ขั้นตอนการอัดแท่งเชื้อเพลิงเป็นดังต่อไปนี้

เตรียมวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่นจำนวน 7 ชนิด เพื่อเป็นส่วนผสมหลักในการผลิตกานอัดแท่ง โดยรายละเอียดของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ถูกคัดเลือกเพื่อการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ กากอ้อย กากอ้อยดิบ ผักตบชวา แกลบ กะลามะพร้าว ชี้เลื้อย และไมยราบ จากนั้นเผาชีวมวลทั้ง 7 ชนิด เพื่อเตรียมผงกานสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุหลักของกานอัดแท่ง โดยกานที่ได้จากการเผาจะถูกนำมาบดให้ละเอียดเป็นผงกานเตรียมไว้

ขั้นตอนต่อมาเป็นการเตรียมตัวประสานรายละเอียดดังนี้ เตรียมน้ำแบริ่งน้ำมันสำหรับและน้ำผสมกันในอัตราส่วนโดยปริมาตร 1:3 มาให้ความร้อนและกวนจนมีลักษณะเหนียวข้น จนได้ลักษณะของน้ำแบริ่งน้ำมันสำหรับที่สามารถเป็นตัวประสานในกระบวนการแปรรูปเย็น (Cold Press Process) ได้

จากนั้นเป็นกระบวนการแปรรูปผงกานชีวมวลเป็นกานอัดแท่งโดยจะใช้การแปรรูปเย็นโดยเครื่องอัดกานแบบเกลียวอัด ซึ่งมีส่วนผสมที่สำคัญได้แก่ วัสดุดิบ แบริ่งน้ำมันสำหรับ และน้ำ ในอัตราส่วนโดยปริมาตร 6:1:3 จากนั้นนำวัสดุผสมมาอัดเป็นกานอัดแท่งรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 52 มิลลิเมตร และตัดแท่งเชื้อเพลิงให้มีความยาวประมาณ 80 มิลลิเมตร จำนวนตัวอย่างละ 5 แท่ง จากนั้นนำกานอัดแท่งไปวางบนพื้นปูนซีเมนต์ในที่กลางแจ้ง โดยอาศัยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง ในการตากแดดจะดำเนินการในช่วงเช้าจนถึงตอนเย็น หากไม่มีแสงแดดก็นำพลาสติกคลุม เพื่อป้องกันความชื้นจากสภาพอากาศ โดยจะใช้เวลาตากแดดประมาณ 7 วัน จึงเก็บใส่ภาชนะอย่างมิดชิด เพื่อนำไปทดสอบ ค่าความร้อน (Heating Value) ความชื้น (Moisture Content) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และปริมาณเถ้า (Ash) ดังนี้

1) หาค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D 5865 โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

2) วัดความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D3173

3) หาปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน ASTM D 3172

4) หาปริมาณเถ้า ตามมาตรฐาน ASTM D 3174

3.2. การวัดประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งโดยใช้เทคนิค DEA

โดยทั่วไปการวัดประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบ (Relative efficiency, Re) ของหน่วยผลิตสามารถประเมินได้ดังนี้

$$Re = \frac{\sum_{j=1}^n u_r \cdot Y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i \cdot X_{ij}} \quad (1)$$

i เป็นดัชนีของปัจจัยนำเข้า $i = 1, 2, \dots, m$

r เป็นดัชนีของผลผลิต $r = 1, 2, \dots, R$

j เป็นดัชนีของหน่วยผลิต $j = 1, 2, \dots, n$

โดยที่ X_{ij} คือ จำนวนของปัจจัยนำเข้าที่ i ของหน่วยผลิต j

Y_{rj} คือ จำนวนของผลผลิตที่ r ของหน่วยผลิต j

u_r คือ ตัวถ่วงน้ำหนักของผลผลิต r

v_i คือ ตัวถ่วงน้ำหนักของปัจจัยนำเข้า i

Charnes, Cooper and Rhodes [14] ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming, LP) ซึ่งเทคนิคหรือวิธีการนี้ไม่ต้องการกำหนดรูปแบบของฟังก์ชัน โดยเทคนิคนี้สามารถวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตที่มีปัจจัยการผลิตและผลผลิตหลายชนิด (Multiple inputs and outputs) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขาสร้างขึ้นจะเป็นการพิจารณาทางด้านปัจจัยนำเข้า (Input-Oriented) และมีลักษณะของผลตอบแทนคงที่ (Constant Returns to Scale: CRS) ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ DEA-CCR-I ได้ดังนี้

$$Min = \sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{io} \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^s y_{ro} \cdot u_r = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^s y_{rj} \cdot u_r - \sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij} \leq 0; \quad \forall j \quad (4)$$

$$v_i, u_r \geq 0; \quad \forall i, \forall r \quad (5)$$

3.3. การเรียงลำดับความสำคัญของถ่านอัดแท่งโดยใช้เทคนิค DEA Cross-Efficiency

เนื่องจากข้อด้อยของเทคนิค DEA คือไม่สามารถเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตถ้าหน่วยผลิตมีค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1 มากกว่าหนึ่งหน่วยผลิต วิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อที่จะเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิต คือ เทคนิค DEA Cross – Efficiency ซึ่งเป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี 1986 โดย Sexton et al. และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อีกครั้งในปี 1994 โดย Doyle และ Green [32] โดยทั่วไปการคำนวณค่าประสิทธิภาพไขว้ โดยใช้เทคนิค DEA Cross – Efficiency ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

(1) คำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิค DEA ดังสมการที่ (2) ถึง (5) จะได้ค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยนำเข้า และปัจจัยผลผลิตที่เหมาะสม เช่น พิจารณา DMU_d ดังนั้น ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ของ DMU_j หน่วยดังกล่าว สามารถคำนวณได้จาก

(2) คำนวณประสิทธิภาพแบบไขว้ระหว่าง DMU_j และ DMU_d จาก

$$E_{dj} = \frac{\sum_{r=1}^R u_{rd}^* \cdot y_{rj}}{\sum_{i=1}^I v_{id}^* \cdot x_{ij}}, \quad (6)$$

$$d, j = 1, 2, 3, \dots, n; d \neq j$$

จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยตลอด DMU_j จะได้ผลลัพธ์คือค่าคะแนนประสิทธิภาพไขว้ (Cross Efficiency) สำหรับ DMU_j ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\bar{E}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n E_{dj} \quad (7)$$

จากนั้นเรียงลำดับความสำคัญโดยใช้ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ ($\bar{E}_j$) ค่าคะแนนประสิทธิภาพสูงกว่ามีลำดับความสำคัญดีกว่า

4. ผลการศึกษา

4.1. ผลการแปรรูปวัสดุเป็นถ่านอัดแท่ง

จากการพิจารณาด้วยสายตา (Visual Inspection) พบว่าลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ได้เป็น

แท่งที่มีความแน่น ความเหนียว และสามารถคงรูปอยู่ได้ สัมผัสด้วยมือไม่แตกออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



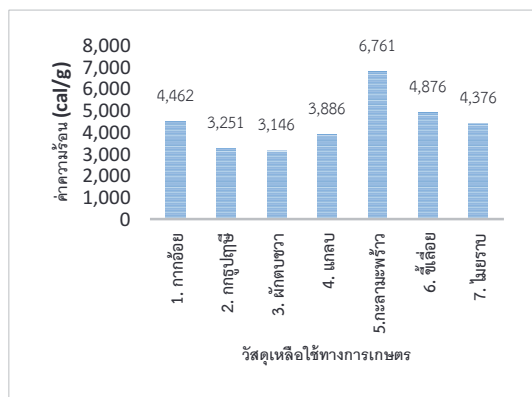
รูปที่ 1 ตัวอย่างถ่านอัดแท่ง

จากนั้นนำถ่านอัดแท่งที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้ม โดยผลการทดสอบคุณสมบัติ ดังนี้

1) ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ถ่านอัดแท่งจากวัสดุแต่ละชนิดจะถูกทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง (cal/g)

ชนิดของวัสดุ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
1. กากอ้อย	4,596	4,508	4,434	4,344	4,427	4,462
2. กากรูปฤๅษี	3,222	3,236	3,320	3,214	3,265	3,251
3. ผักตบชวา	3,188	3,147	3,157	3,118	3,122	3,146
4. แกลบ	3,996	3,812	3,908	3,782	3,931	3,886
5. กะลามะพร้าว	6,814	6,637	6,815	6,778	6,762	6,761
6. ชีเลื้อย	4,918	4,848	4,850	4,890	4,875	4,876
7. ไมยราบ	4,478	4,338	4,313	4,374	4,376	4,376



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าความร้อนของวัสดุ

จากผลการทดลองดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2 พบว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวให้ค่าความร้อนสูงสุด รองลงมาคือถ่านอัดแท่งจากชีเลื้อย ซึ่งมีค่าความร้อน 6,761 และ 4,876 Cal/g ตามลำดับ ค่าความร้อนที่ได้อยู่ในระดับที่สูงกว่าฟืนไม้ซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 3,820 Cal/g

2) ผลการวิเคราะห์คาร์บอนคงตัวพบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีค่าสูง จะทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ยาวนานขึ้น โดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2

3) ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น พบว่าชีเลื้อยให้ค่าความชื้นต่ำสุด (4.45 %) แต่ไมยราบจะให้ค่าความชื้นสูงสุด (10.2 %) ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งในงานวิจัยนี้เทียบกับ วรรณกรรมของ รุ่งโรจน์ พุทธิสกุล [29] กรมโรงงานอุตสาหกรรม – คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน [33] และผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุชีวมวลโดยห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงาน ฝ่ายวิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย[34] พบว่าค่าของปัจจัยที่ทดสอบแต่ละค่ามีความสอดคล้อง/ใกล้เคียง กับงานวิจัยนี้

4.2. ผลการคำนวณประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งโดยใช้เทคนิค DEA

การวัดประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ตามวิธีการ DEA ดังแสดงในหัวข้อวิธีดำเนินการวิจัยนั้น กำหนด DMU1 คือถ่านอัดแท่งจากกากอ้อย DMU2 คือถ่านอัดแท่งจากกากรูปฤๅษี DMU3 คือถ่านอัดแท่งจากผักตบชวา DMU4 คือถ่านอัดแท่งจากแกลบ DMU5 คือถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว DMU6 คือถ่านอัดแท่งจากชีเลื้อย DMU7 คือถ่านอัดแท่งจากไมยราบ โดยกำหนดปัจจัยนำเข้า (Inputs) ได้แก่ ความชื้น (X_{1j}) และปริมาณถ่าน (X_{2j}) สำหรับปัจจัยผลผลิต (Outputs) ได้แก่ ค่าความร้อน (Y_{1j}) และคาร์บอนคงตัว (Y_{2j}) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบในตารางที่ 4 มาคำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิค DEA ดังแสดงในสมการที่ (2) ถึง (5) โดยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ DEA ที่นำเสนอในหัวข้อวิธีดำเนินการวิจัย จะถูกนำไปประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ LINGO ซึ่งผลการคำนวณคะแนนประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยและคะแนนประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่ง

ชนิดของวัสดุ	ความชื้น (%)	เถ้า (%)	ความร้อน (Cal/g)	ถ่านคงตัว (%)	ประสิทธิภาพ
1. กากอ้อย (DMU1)	6.4	8.81	4,462	17.66	0.6463
2. กากอ้อย (DMU2)	6.15	24.61	3,251	14.50	0.4900
3. ผักตบชวา (DMU3)	6.74	25.67	3,146	14.75	0.4327
4. แกลบ (DMU4)	7.5	21.01	3,886	17.3	0.4803
5. กะลามะพร้าว (DMU5)	6.9	3.4	6,761	72.7	1.0000
6. ชี้อ้อย (DMU6)	4.45	1.45	4,876	27.4	1.0000
7. ไมยราบ (DMU7)	10.2	3.87	4,376	24.77	0.3980

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าถ่านอัดแท่งที่ทำจากกะลามะพร้าวและชี้อ้อยเป็นถ่านอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1) ส่วนวัสดุหรือหน่วยผลิตอื่นไม่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพน้อยกว่า 1) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว และถ่านอัดแท่งจากชี้อ้อย เป็นถ่านอัดแท่งที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งเมื่อพิจารณาจากปัจจัยค่าความร้อน การคงตัวของคาร์บอน ความชื้น และปริมาณเถ้า อย่างไรก็ตามเมื่อหน่วยผลิตมีค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1 มากกว่าหนึ่งหน่วยผลิต จะไม่สามารถเรียงลำดับได้ว่าหน่วยผลิตใดมีความเหมาะสมมากกว่า ในกรณีนี้ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว และถ่านอัดแท่งจากชี้อ้อยมีค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1 จึงไม่สามารถเรียงลำดับความสำคัญของถ่านอัดแท่งทั้งสองได้ ดังนั้นเทคนิค DEA Cross-efficiency จึงถูกนำมาใช้เพื่อเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตทั้งหมด โดยผลการคำนวณคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เพื่อเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิต ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

4.3. ผลการคำนวณคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ของถ่านอัดแท่งโดยใช้เทคนิค DEA Cross-Efficiency

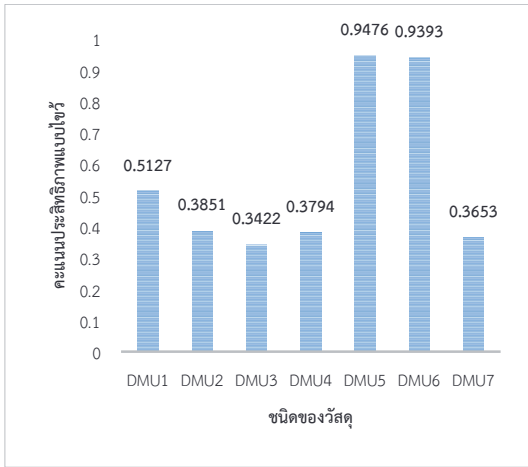
ผลการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยนำเข้า และค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยผลผลิตโดยใช้เทคนิค DEA ดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นคำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้โดยใช้เทคนิค DEA Cross-Efficiency โดยใช้สมการที่ (6) และ สมการที่ (7) ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยนำเข้าและปัจจัย

วัสดุ (DMU)	u_1	u_2	v_1	v_2
DMU1	0.15625	0.00000	0.0001105542	0.00000
DMU2	0.1626016	0.000000	0.0001150483	0.000000
DMU3	0.1483680	0.000000	0.0001049773	0.000000
DMU4	0.1333333	0.000000	0.00009433962	0.000000
DMU5	0.1449275	0.000000	0.000000	0.01375516
DMU6	0.2898551	0.000000	0.0002050861	0.000000
DMU7	0.000000	0.2583979	0.00001871179	0.01034446

ตารางที่ 4 ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ ($\bar{E}_j$)

ของแต่ละวัสดุ	DMU1	DMU2	DMU3	DMU4	DMU5	DMU6	DMU7
1	0.493	0.374	0.330	0.367	0.693	1.000	0.304
2	0.493	0.374	0.330	0.367	0.693	1.000	0.304
3	0.493	0.374	0.330	0.367	0.693	1.000	0.304
4	0.493	0.374	0.330	0.367	0.693	1.000	0.304
5	0.262	0.224	0.208	0.219	1.000	0.754	0.230
6	0.493	0.374	0.330	0.367	0.693	1.000	0.304
7	0.117	0.033	0.032	0.046	1.000	1.000	0.338
$\bar{E}_j$	0.5127	0.3851	0.3422	0.3794	0.9476	0.9393	0.3653



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพแบบไขว้ของถ่านอัดแท่ง

จากตารางที่ 4 และรูปที่ 3 แสดงค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ ($\bar{E}$) ของแต่ละวัสดุ โดยที่ค่าคะแนนประสิทธิภาพที่มีค่าสูงกว่าจะมีลำดับความสำคัญที่ดีกว่า ซึ่งสามารถเรียงลำดับความสำคัญได้ดังนี้ กะลามะพร้าว ($\bar{E} = 0.9476$) ชี้อ้อย ($\bar{E} = 0.9393$) กากอ้อย ($\bar{E} = 0.5127$) กากอ้อย (DMU2) ($\bar{E} = 0.3851$) แกลบ ($\bar{E} = 0.3794$) ไมยราบ ($\bar{E} = 0.3653$) และผักตบชวา ($\bar{E} = 0.3422$) ตามลำดับ โดยที่ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ที่สูงกว่าหมายความว่า

ว่าถ่านอัดแท่งชนิดนั้นมีความเหมาะสมในการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า

5. สรุปผล

การศึกษาสมบัติของถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งสำหรับนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการเลือกวัสดุที่มีในท้องถิ่น จากนั้นเตรียมวัสดุทั้ง 7 ชนิดโดยการเผาและบดเป็นผง ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการผสมผงถ่านและตัวประสาน (น้ำและแป้งมันสำปะหลัง) จากนั้นทำการอัดโดยการแปรรูปเย็น ผลการทดสอบประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งโดยใช้เทคนิค DEA พบว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวและซีลี้อยู่เป็นถ่านอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1) เมื่อพิจารณาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ค่าความร้อน การคงตัวของคาร์บอน ความชื้น และปริมาณเถ้า นอกจากนี้ผลการเรียงลำดับความสำคัญโดยใช้เทคนิค DEA Cross-Efficiency แสดงให้เห็น กะลามะพร้าว ($\bar{E} = 0.9476$) และ ซีลี้อยู่ ($\bar{E} = 0.9393$) มีความเหมาะสมสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง ตามลำดับ โดยที่ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ที่สูงกว่าหมายความว่าถ่านอัดแท่งชนิดนั้นมีความเหมาะสมในการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า

สำหรับการวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยเสนอแนะให้เพิ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ไม่ได้พิจารณาในงานวิจัยนี้ เช่น ต้นทุนการผลิต ปริมาณวัตถุดิบที่มีในท้องถิ่น และความหนาแน่น หรืออาจพิจารณาวัสดุอื่น ๆ มาทำการประเมินประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งที่สร้างขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงแก่ครัวเรือนต่อไป นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาการตัดสินใจแบบหลายคุณลักษณะ หรือปัญหาที่มีความซับซ้อนอื่น ๆ ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณผู้ประเมินบทความที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ให้ต้นฉบับมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้เขียนขอขอบคุณบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Energy situation in Thailand 2018 [internet]. [cited 2018 Mar 26]. Available from: http://www.dede.go.th/download/state_61/Frontpagejan_nov60. (In Thai)
- [2] Tantisattayakul T, Phongkasem S, Phooyar P, Taibangury P. Community-based renewable energy from biomass briquettes fuel from coconut leaf. Thai Science and Technology Journal. 2015; 23 (3): 418-31. (In Thai)
- [3] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. The potential of biomass materials in Thailand 2018 [internet]. [cited 2018 Mar 26]. Available from: http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=130:2010-05-07-08-10-57 & catid = 58&Itemid=68. (In Thai)
- [4] Wongsaroj K, Sawadsev T, Prathinthong N, Wongsrivej P. Biomass briquette production from Jatropa. KCU Engineering Journal. 2011; 38 (1): 65-72. (In Thai)
- [5] Kitipattaworn A, Reubroycharoen P, Uttamaprakorn W. Briquette fuel from co-production of ethanol industrial wet cake and biomass. Journal of Energy Research. 2013; 10 (3): 43-56. (In Thai)
- [6] Wattanachira L, Laapan N, Chatchavarn V, Thanyacharoen A. Development of bio briquettes from mixed rice-straw and longan waste residues. KMUTT Research and Development Journal. 2016; 39 (2): 239 – 54. (In Thai)
- [7] Punin W. Development of briquette fuel from co-production of corn cob charcoal and low-grade coal lignite rejects. Burapha Science Journal. 2018; 23 (1): 146 – 63. (In Thai)

- [8] Kumar A, Sah B, Singh AR., Denga Y, He X, Kumar P, Bansal R.C. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 69 (1): 596–609.
- [9] Liberatore MJ, Nydick RL. The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: a literature review. *European Journal of Operational Research*. 2008; 189 (1): 194–207.
- [10] Kittiyakajon M. Learning resources improvement project prioritization: an application of analytic hierarchy process method. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2019; 17 (1): 25–9. (In Thai)
- [11] Bilbao-Terol A, Arenas-Parra M, Cañal-Fernández V, Antomil-Ibias J. Using TOPSIS for assessing the sustainability of government bond funds. *Omega*. 2014; 49 (1): 1 – 17.
- [12] Wichapa N, Khokhajaikiat P. A hybrid multi-criteria analysis model for solving the facility location-allocation problem: a case study of infectious waste disposal. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2018; 50 (5): 698-718.
- [13] Wichapa N, Chumpol A, Sudsuansee T. Using the hybrid DEA-TOPSIS technique for selecting the suitable biomass materials for processing into fuel briquettes. *The Journal of Industrial Technology*. 2019; 15 (1): 63-80. (In Thai)
- [14] Charnes A, Cooper WW, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*. 1978; 2 (6): 429-44.
- [15] Karasakal E, Aker P. A multi-criteria sorting approach based on data envelopment analysis for R&D project selection problem. *Omega*. 2017; 73 (1): 79-92.
- [16] Falagario M, Sciancalepore F, Costantino N, Pietroforte R. Using a DEA-cross efficiency approach in public procurement tenders. *European Journal of Operational Research*. 2012; 218 (2): 523-29.
- [17] Lim S, Oh KW, Zhu J. Use of DEA cross-efficiency evaluation in portfolio selection: an application to Korean stock market. *European Journal of Operational Research*. 2014; 236 (1): 361-68.
- [18] Liu X, Chu J, Yin P, Sun J. DEA cross-efficiency evaluation considering undesirable output and ranking priority: a case study of eco-efficiency analysis of coal-fired power plants. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 142 (2): 877-85.
- [19] Farrell, MJ. The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1957; 120(3): 253-90.
- [20] Khushalani J, and Ozcan YA. Are hospitals producing quality care efficiently? An analysis using dynamic network data Envelopment analysis (DEA). *Socio-Economic Planning Sciences*. 2017; 60(1): 15-23.
- [21] Ennen D, Batool I. Airport efficiency in Pakistan - a data envelopment analysis with weight restrictions. *Journal of Air Transport Management*. 2018; 69 (1): 205-12.
- [22] Fazlollahi A, Franke U. Measuring the impact of enterprise integration on firm performance using data envelopment analysis. *International Journal of Production Economics*. 2018; 200 (1): 119-29.

- [23] Farahani RZ, SteadieSeifi M, Asgari N. Review article multiple criteria facility location problems: a survey. *Applied Mathematical Modelling*. 2010; 34 (1): 1689-709.
- [24] Wichapa N, Khokhajaikiat P. Selection of the best laptop for educational purposes using hybrid decision making technique. *RMTSV Research Journal*. 2018; 10 (3): 368-84.
- [25] Fan Y, Bai B, Qiao Q, Kang P, Zhang Y, Guo J. Study on eco-efficiency of industrial parks in China based on data envelopment analysis. *Journal of Environmental Management*. 2017; 192(1): 107-15.
- [26] Wang CN, Nguyen XT, Wang YH. Automobile industry strategic alliance partner selection: the application of a hybrid DEA and Grey theory model. *Sustainability*. 2016; 8 (2): 1-18.
- [27] Ang S, Chen M, Yang F. Group cross-efficiency evaluation in data envelopment analysis: an application to Taiwan hotels. *Computers & Industrial Engineering*. 2018; 125 (1): 190-99.
- [28] Wang YM, Chin KS, Lou Y. Cross-efficiency evaluation based on ideal and anti-ideal decision making units. *Expert Systems with Applications*. 2011; 38 (8): 10312-10319.
- [29] Phutteesakul RR, Suwakantakul A, Kucharrat A. The Production of charcoal briquette by coconut shell and cassava rhizome. *Journal of Industrial Education*. 2010; 4(2): 18-28. (In Thai)
- [30] Chutsawang N. Charcoal briquette from durian husk in Tombol Kwuanhuk community enterprise, Khlung, Chanthaburi [Dissertation of Master of Engineering in Engineering Management]. Chanthaburi: Rambhai Barni Rajabhat University; 2013. (In Thai)
- [31] Jolanun B, Phutharukchat A, Khamtui C. Community-based renewable energy from mimosa pigra L. charcoal briquettes. *KKU Research Journal*. 2011; 16 (1): 20-31. (In Thai)
- [32] Doyle J, Green R. Data envelopment analysis and multiple criteria decision making. *Omega*. 1993; 21(6): 713-15.
- [33] Department of Industrial Works. The manual of guidelines and criteria for processing into fuel briquettes and interlocking blocks [internet]. [cited 2019 Oct 1]. Available from: http://webintra.diw.go.th/iwmb/form/iwd040_%E0%B8%9C%E0%B8%99%E0%B8%A7%E0%B8%81%20%E0%B8%87_%E0%B8%84%E0%B8%B9%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%B3%E0%B8%A3%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87. (In Thai)
- [34] Thailand Institute of Scientific and Technological Research. Analysis of biomass properties [internet]. [cited 2019 Oct 1] Available from: <http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/hot.php>. (In Thai)

