

การประยุกต์ใช้เทคนิค Hybrid DEA-TOPSIS สำหรับการคัดเลือกวัสดุชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง

ณรงค์ วิชาพา^{1*} อัจฉรา ชุมพล² และ ไทยศน์ สุดสวนสี¹

บทคัดย่อ

กระบวนการตัดสินใจในการเลือกวัสดุชีวมวลที่เหมาะสมจากวัสดุทางการเกษตรเพื่อนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนยากต่อการตัดสินใจเพราะว่ามีปัจจัยหรือคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องหลายอย่างที่ต้องพิจารณาไปพร้อม ๆ กัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเทคนิค TOPSIS DEA และ hybrid DEA-TOPSIS ในการประเมินและจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด เริ่มจากการกำหนดคุณสมบัติที่สำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรนำเข้าและตัวแปรผลผลิตในเทคนิค DEA (เป็นปัจจัยหรือเกณฑ์สำหรับเทคนิค TOPSIS) ส่วนชนิดของถ่านอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตรจะถูกกำหนดให้เป็นหน่วยผลิตสำหรับเทคนิค DEA (เป็นทางเลือกสำหรับเทคนิค TOPSIS) หลังจากนั้นเทคนิค TOPSIS DEA และ hybrid DEA-TOPSIS ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการประเมินและจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด โดยในกรณีศึกษาที่ 1 มีจำนวนทางเลือก 23 ทางเลือก และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 5 ปัจจัย ได้แก่ ความชื้น เถ้า สารระเหย คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนระหว่างเทคนิค hybrid DEA-TOPSIS กับเทคนิค DEA และ TOPSIS มีค่าเท่ากับ 0.863 และ 0.932 ตามลำดับ สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 มีจำนวนทางเลือก 7 ทางเลือก และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความร้อน คาร์บอนคงตัว และความชื้น ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนระหว่างเทคนิค hybrid DEA-TOPSIS กับเทคนิค DEA และ TOPSIS มีค่าเท่ากับ 1 เท่ากัน ดังนั้นวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางในการเลือกวัสดุชีวมวลที่เหมาะสมจากวัสดุทางการเกษตรสำหรับการนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้

คำสำคัญ : พลังงานทางเลือก, วัสดุชีวมวล, การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์, DEA, TOPSIS

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

² สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และระบบอัตโนมัติ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: narong.wi@ksu.ac.th รับเมื่อ 19 กันยายน 2562 ตอบรับ 16 มีนาคม 2562

Using the Hybrid DEA-TOPSIS Technique for Selecting the Suitable Biomass Materials for Processing into Fuel Briquettes

Narong Wichapa^{1*} Atchara Choopol² and Thaitat Sudsuansee¹

Abstract

The decision-making process for selecting the suitable biomass materials from agricultural materials for processing into fuel briquettes is a complex problem, which is difficult to decide because it has several properties/factors to consider simultaneously. In this paper, the TOPSIS, DEA and hybrid DEA-TOPSIS techniques have been proposed for evaluating and ranking the suitable biomass materials from agricultural materials. Firstly, the relevant properties of biomass materials for processing into fuel briquettes were determined. The properties of each biomass material from the agricultural materials were viewed as input and output variables for DEA (as factors for TOPSIS) and the alternatives of the biomass materials from agricultural materials were viewed as decision making units for DEA (as alternatives for TOPSIS). After that, using TOPSIS, DEA and the hybrid DEA-TOPSIS techniques were used to evaluate and rank the biomass materials from agricultural materials. In the case study 1, there are 23 alternatives and 5 relevant criteria, including the moisture content, ash, volatile matters, fixed carbon and heating value. The results of the Spearman correlation coefficient test between the hybrid DEA-TOPSIS technique and DEA and TOPSIS techniques were 0.863 and 0.932, respectively. For the case study 2, there are 7 alternatives and 3 relevant criteria, including the heating value, fixed carbon and moisture content. The results of the Spearman correlation coefficient test between the hybrid DEA-TOPSIS technique and DEA and TOPSIS techniques were same value (Correlation coefficients are equal to 1). For these reasons, the proposed techniques can lead to selecting suitable biomass materials for processing into fuel briquettes by considering several relevant criteria.

Keywords : Biomass materials, Multi-criteria decision making, Data environment analysis, TOPSIS

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University.

²Department of Computer and Automation Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding author, E-mail: narong.wi@ksu.ac.th

1. บทนำ

ในปัจจุบันอัตราการใช้พลังงานของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี โดยในปี พ.ศ. 2560 มีปริมาณการใช้พลังงานรวมทั้งสิ้น 80,752 พันตัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปี 2559 ร้อยละ 1.0 คิดเป็นมูลค่า 1,072,237 ล้านบาท และมีการใช้พลังงานทดแทนเพียง 11,698 พันตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.9 จากช่วงเดียวกันของปี พ.ศ. 2560 [1] เนื่องจากสถานการณ์การใช้พลังงานโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปีหน่วยงานภาครัฐจึงมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น [2] ดังนั้นการหาแหล่งพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนพลังงานหลักจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานของประเทศ แหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงที่สามารถหาได้ง่าย คือ พลังงานทดแทนจากวัสดุทางการเกษตร [3] ดังนั้นแนวคิดในการนำวัสดุทางการเกษตรมาผลิตเป็นพลังงานชีวมวลจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานของประเทศ ยิ่งไปกว่านั้นการใช้แหล่งพลังงานชีวมวลยังเป็นการแก้ปัญหาการกำจัดของเสียจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การใช้พลังงานจากชีวมวลสามารถทำได้โดยตรงคือ กระบวนการอัดชีวมวลเป็นแท่งเชื้อเพลิงหรือถ่านอัดแท่ง เนื่องจากเทคโนโลยีไม่ซับซ้อน วิธีใช้งานไม่ยุ่งยาก และเงินลงทุนอุปกรณ์เครื่องจักรไม่สูง ซึ่งแนวทางการแปรรูปวัสดุชีวมวลเป็นแท่งเชื้อเพลิงเป็นแนวทางหนึ่งในการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนจากชีวมวลซึ่งสอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก [4] ด้วยเหตุนี้นักวิจัยกลุ่มหนึ่ง [5-7] จึงได้นำเสนอแนวทางในการแปรรูปวัสดุชีวมวลเป็น

เชื้อเพลิงอัดแท่งหรือถ่านอัดแท่ง เพื่อใช้เป็นพลังงานพลังงานทางเลือกทดแทนพลังงานแบบดั้งเดิม

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุชีวมวลต่อการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม ได้แก่: (1) ค่าความชื้น (Moisture) โดยทำการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D3173 ด้วยเครื่อง Drying Oven (2) ปริมาณเถ้า (Ash) ตามมาตรฐาน ASTM D 3174 ด้วยเครื่อง Electric muffle furnace (3) ปริมาณสารระเหย (volatile matter) จะทดลองตามมาตรฐาน ASTM D3175 ด้วยเครื่อง Electric muffle furnace (4) คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และ (5) ค่าความร้อน (Heating value) ซึ่งจะมีการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D5865 ด้วยเครื่อง Automatic Bomb Calorimeter ทั้งนี้ค่าพลังงานความร้อนไม่ควรต่ำกว่า 3,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม คาร์บอนคงตัวไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 15 ปริมาณเถ้าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 20 [7] ดังนั้นแนวทางในการนำวัสดุทางการเกษตรเหล่านี้มาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงต้องพิจารณาจากคุณสมบัติที่กล่าวไว้ในข้างต้นด้วย

การคัดเลือกวัสดุชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง จะต้องพิจารณาคุณสมบัติหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัยดังที่กล่าวในข้างต้น ปัญหาที่กล่าวนี้เป็นปัญหาการตัดสินใจแบบหลายทางเลือก (Multi-attribute decision making problem, MADM problem) ซึ่งส่วนหนึ่งของปัญหาการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-criteria decision making problem, MCDM problem) [8] โดยวิธีการแก้ปัญหา MADM มีหลายวิธีที่น่าสนใจ เช่น AHP [9] TOPSIS [10] PROMEETHREE [11] และ DEA [12] อย่างไรก็ตามเทคนิค TOPSIS และ DEA เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยม

นิยมสูงในการแก้ปัญหา MADM โดยในงานวิจัยของ Kim et al. [13] และ Shih et al. [14] ได้สรุปข้อดีหรือจุดเด่นของ TOPSIS ไว้ดังนี้: (1) ธรรมชาติในการประเมินจะคล้ายวิธีคิดของมนุษย์ (2) วิธีการนี้จะคำนึงถึงค่าของปัจจัยทั้งทางดีและด้านลบไปพร้อมๆกัน (3) วิธีการคำนวณง่าย และ (4) การประเมินทางเลือกมีความชัดเจนหรือมองเห็นภาพได้ชัดเจน ในขณะที่ DEA เป็นเครื่องมือหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิต (Decision making units, DMUs) ที่มีปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิต (Input and output variables) และหน่วยผลิตจำนวนมากได้ [15-17] ถ้าหน่วยผลิตใดมีค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1 หน่วยการผลิตนั้นจะมีประสิทธิภาพ ส่วนหน่วยการผลิตใดที่มีค่าคะแนนประสิทธิภาพต่ำกว่า 1 แสดงว่าหน่วยการผลิตนั้นไม่มีประสิทธิภาพ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้เทคนิค DEA TOPSIS และ hybrid DEA-TOPSIS สำหรับการประเมินและจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวล เริ่มจากรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติที่สำคัญของการเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อีกไปคำนวณค่าประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดโดยใช้เทคนิค TOPSIS DEA และ DEA-TOPSIS ขั้นตอนต่อมา นำผลการคำนวณการจัดลำดับความสำคัญที่ได้มาทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนเพื่อทดสอบความสัมพันธ์ของเทคนิค hybrid DEA-TOPSIS ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับเทคนิค DEA และ TOPSIS ซึ่งทั้งสองเทคนิคนี้ได้รับความนิยมอย่างสูงในการนำมาใช้ในการแก้ปัญหา MADM สุดท้ายนำผลการคำนวณลำดับความสำคัญที่ได้มาเรียงลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด

ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดหวังว่าเทคนิคที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะ เป็นประโยชน์กับงานวิจัยด้านพลังงานทางเลือกจากวัสดุชีวมวล สามารถประเมินและจัดลำดับความสำคัญหรือความเหมาะสมของวัสดุชีวมวลได้ โดยอาจมีการเพิ่มทางเลือกหรือชนิดของวัสดุชีวมวลหรือเพิ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เช่น ต้นทุน และศักยภาพของชีวมวลแต่ละชนิด เพื่อประยุกต์ใช้ในภาคปฏิบัติหรือใช้งานจริงได้ ตลอดจนสามารถนำเทคนิคเหล่านี้ไปใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ได้

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์

ปัญหา MADM เป็นปัญหาที่มีหลายปัจจัยเกี่ยวข้อง ทั้งปัจจัยนามธรรมและปัจจัยรูปธรรม (Objective and subjective factors) ด้วยเหตุนี้ปัญหา MADM จึงมีความซับซ้อนยากต่อการตัดสินใจโดยลำพัง เนื่องจากผู้ตัดสินใจอาจขาดข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการตัดสินใจ หรือมีความรู้เกี่ยวกับปัญหาที่กำลังพิจารณาไม่เพียงพอ ทฤษฎี MADM เป็นส่วนหนึ่งของทฤษฎีการตัดสินใจ (Decision making theory) หรือ วิทยาศาสตร์การตัดสินใจ (Decision science) [18] ซึ่งเป็นศาสตร์ที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการวิจัยดำเนินงานที่มีการแพร่หลายอย่างรวดเร็ว แม้ว่าจะมีเทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหา MADM หลายเทคนิค เช่น ELECTRE, SAW, PROMETHEE และ TOPSIS อย่างไรก็ตาม TOPSIS เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในวรรณกรรม [19-20] ซึ่งข้อดีของ TOPSIS สามารถสรุปได้ดังนี้: (1) ธรรมชาติในการประเมินจะคล้ายวิธีคิดของมนุษย์ (2) วิธีการนี้จะคำนึงถึงค่าของปัจจัยทั้งทางดีและ

ด้านลบไปพร้อมๆกัน (3) วิธีการคำนวณเข้าใจง่าย และ (4) การประเมินทางเลือกมีความเป็นรูปธรรมชัดเจน นอกจากนี้ TOPSIS ยังคงเป็นเทคนิคที่เข้าใจง่าย และสามารถจัดลำดับความสำคัญของทางเลือกโดยขั้นตอนการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนทำให้เหมาะกับการใช้งานในทางปฏิบัติ [13-14]

แนวคิดของ DEA ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Farrell ในปี 1957 [15] อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตที่เรียกว่า DEA ได้ถูกนำเสนอในภายหลังโดย Charnes, Cooper and Roberts [16] ซึ่งเทคนิคนี้จะเป็นการคำนวณประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ (relative efficiency) โดยการเปรียบเทียบค่าคะแนนประสิทธิภาพที่คำนวณได้ของแต่ละหน่วยผลิตกับค่าคะแนนประสิทธิภาพที่ได้จากหน่วยผลิตที่ดีที่สุด (best practice) หรือหน่วยผลิตที่อยู่ในระดับแนวหน้า (frontier) หรือหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพ (efficiency) ส่วนหน่วยผลิตอื่นๆจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า (inefficiency) โดยทั่วไป DMUs ที่มีประสิทธิภาพจะมีค่าคะแนนประสิทธิภาพ (efficiency score) เท่ากับ 1 ส่วน DMUs ที่มีค่าคะแนนประสิทธิภาพน้อยกว่า 1 จะเป็นหน่วยผลิตที่ไม่มีคุณภาพ โดยจากอดีตถึงปัจจุบัน DEA ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายสาขา [21-24] นอกจากนี้เทคนิค DEA ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ได้ [25-28] โดยทางเลือก (alternatives) ในเทคนิค MADM ทั่วไปจะถูกกำหนดให้เป็น DMUs ในมุมมองของเทคนิค DEA ส่วนปัจจัย (criteria) ในเครื่องมือ MADM จะถูกกำหนดให้เป็นปัจจัยนำเข้าหรือปัจจัยผลผลิต (inputs or outputs) ในมุมมองของเทคนิค DEA โดยเทคนิค DEA สามารถวัด

ประสิทธิภาพของหน่วยผลิตที่มีหลายหน่วยผลิต และปัจจัยที่มีหลายปัจจัยได้ [29-31] ซึ่งข้อดีของเทคนิค DEA สามารถสรุปได้ดังนี้: (1) สามารถประเมินประสิทธิภาพหน่วยผลิตที่มีปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิตหลายปัจจัยได้ (2) ไม่จำเป็นต้องมีการปรับข้อมูลให้เป็นปกติ (normalized data) ก่อนการคำนวณ และ (3) ไม่จำเป็นต้องกำหนดน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยเนื่องจาก DEA สามารถให้ค่าน้ำหนักความสำคัญเองได้ โดยในปัจจุบัน DEA ยังคงได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของหน่วยงานหรือองค์กรหลากหลายสาขา และยังคงมีการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ DEA ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เพื่อแก้ปัญหาตามความเหมาะสม หรือตามลักษณะของปัญหาที่แตกต่างกันไป

2.2 การผลิตชีวมวลอัดแท่ง

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีนักวิจัยกลุ่มหนึ่งได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการนำวัสดุทางการเกษตรหลากหลายชนิดมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งหรือถ่านอัดแท่ง โดยงานวิจัยที่น่าสนใจมีดังนี้

รุ่งโรจน์ พุทธิสกุล [32] ได้ทำการศึกษาการแปรรูปถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวและเห้งไม้สนป่าปะหลัง ผลการทดลองพบว่าคุณสมบัติทางความร้อนของถ่านอัดแท่งที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (มผช.238/2547) มีต้นทุนการผลิตเท่ากับ 5.35 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการส่งเสริมเกษตรกรให้สามารถนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ได้

นฤมล และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาการนำวัสดุทางการเกษตรและปาล์มน้ำมันมาผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ กัน เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมทั้งคุณภาพและประสิทธิภาพด้านพลังงาน

ความร้อน ผลการทดลองพบว่าถ่านอัดแท่งจากกาบปาล์มผสมกับยูคาลิปตัส กาบปาล์มผสมกับขุยมะพร้าว ใบปาล์มผสมกับขุยมะพร้าวและขานอ้อย และใบปาล์มผสมกับขังข้าวโพด มีคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงได้

วรรณพร ชันธีรัตน์ นรงค์ วิชาผา และอามิณห์ หล้าวงศ์ [34] ได้ทำการศึกษาการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งจากนั้นทำการจัดลำดับความสำคัญหรือความเหมาะสมของถ่านอัดแท่งแต่ละชนิด โดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process, AHP)

แม้ว่าจะมีงานวิจัยอีกจำนวนมาก เช่น [35] ที่ได้นำเสนอการแปรรูปวัสดุทางการเกษตรเป็นถ่านอัดแท่งอย่างไรก็ตามงานวิจัยเกือบทั้งหมดยังไม่มีการนำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพหรือการจัดลำดับความสำคัญวัสดุชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหรือถ่านอัดแท่ง เนื่องจากการจัดลำดับความสำคัญหรือความเหมาะสมของวัสดุชีวมวลจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัยพร้อม ๆ กัน กระบวนการตัดสินใจลักษณะนี้จะมีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นการหาเครื่องมือประเมินและจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงเป็นปัญหาแบบ MADM

จากการทบทวนวรรณกรรมจะบูรณาการข้อดีหรือจุดเด่นของเทคนิค TOPSIS และ DEA ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับการนิยมนำมาใช้แก้ปัญหา MADM ในวรรณกรรม โดยข้อดีของ DEA คือ สามารถวัดประสิทธิภาพของทางเลือกหรือหน่วยผลิต (decision making units, DMUs) ที่มีหลายปัจจัยทั้งปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิต (input and output variables) อย่างไรก็ตาม DEA ไม่สามารถจัดลำดับความสำคัญของ

ทางเลือกได้ทั้งหมดถ้าหน่วยการผลิตมากกว่าหนึ่ง หน่วยการผลิตมีคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1 (หน่วยการผลิตมีประสิทธิภาพมากกว่าหนึ่งหน่วยการผลิต) ส่วนข้อดีของ TOPSIS เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของทางเลือกที่มีหลายปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยสามารถประเมินทางเลือกเป็นตัวเลขได้ ด้วยเหตุนี้การนำเทคนิค TOPSIS มาบูรณาการร่วมกับ DEA จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการวัดประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหรือถ่านอัดแท่ง เพื่อหาแนวในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานของประเทศต่อไป ข้อดีของวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้คือมีความยืดหยุ่น และมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการตัดสินใจแบบ MADM โดยสามารถเพิ่มปัจจัยและทางเลือกที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยคาดหวังว่าวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการตัดสินใจที่ซับซ้อนอื่นๆ ได้

3. วิธีที่นำเสนอ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลโดยใช้เทคนิค TOPSIS DEA และ เทคนิค TOPSIS-DEA รายละเอียดของแต่ละวิธีจะแสดงในหัวข้อที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ดังต่อไปนี้

3.1 การคำนวณโดยใช้เทคนิค TOPSIS

TOPSIS เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการตัดสินใจแบบ MADM เพื่อหาทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด โดยหลักการของเทคนิค TOPSIS คือการหาทางเลือกที่มีระยะทางใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดของแต่ละเกณฑ์ และมีระยะที่ห่างไกลจากค่าที่แย่ที่สุดในแต่ละเกณฑ์ไป

พร้อมๆ กัน เทคนิค TOPSIS เป็นเครื่องมือช่วยในการจัดอันดับของทางเลือกโดยอาศัยข้อมูลการประเมินผลของแต่ละทางเลือกภายใต้มุมมองของแต่ละเกณฑ์ ดังนั้น TOPSIS จึงเหมาะสมกับเกณฑ์เชิงปริมาณที่สามารถประเมินผลทางเลือกออกมาเป็นตัวเลขได้ โดยเทคนิค TOPSIS จะพิจารณาปัจจัย 3 ประเภทได้แก่ ปัจจัยผลประโยชน์เชิงคุณภาพ (qualitative benefit attributes/criteria) ปัจจัยผลประโยชน์เชิงปริมาณ (quantitative benefit attributes/criteria) และปัจจัยด้านต้นทุน (cost attributes/criteria) โดยปัจจัยเหล่านี้จะถูกนำไปพิจารณาเพื่อจัดลำดับความสำคัญของทางเลือกดังนี้

กำหนดให้ m แทนจำนวนทางเลือกทั้งหมด และ n แทนจำนวนปัจจัยหรือเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมด ทางเลือกจะถูกประเมินผลโดยอาศัยข้อมูลการประเมินผลของแต่ละทางเลือกภายใต้มุมมองของแต่ละเกณฑ์ กำหนดให้ x_{ij} เป็นคะแนนของทางเลือกที่ i ตามมุมมองของเกณฑ์ที่ j โดยที่เมตริกซ์ $X = [x_{ij}]_{m \times n}$ มีขนาด $m \times n$ กำหนดค่า J เป็นกลุ่มของเกณฑ์เชิงผลประโยชน์ (benefit criteria) หมายความว่าถ้าค่าผลการประเมินของปัจจัยมีค่าสูงกว่าแสดงว่าทางเลือกนั้นดีกว่าภายใต้มุมมองของปัจจัยเชิงผลประโยชน์ที่พิจารณา กำหนดให้ J' เป็นกลุ่มของเกณฑ์เชิงลบ (negative criteria) หมายความว่าถ้าค่าผลการประเมินเกณฑ์เชิงลบมีค่าน้อยกว่าแสดงว่าทางเลือกนั้นดีกว่าภายใต้มุมมองของปัจจัยเชิงลบที่พิจารณา โดยขั้นตอนการคำนวณแสดงดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: สร้างเมตริกซ์การตัดสินใจ

เมตริกซ์ $D_{m \times n}$ มีขนาด $m \times n$ โดยที่สมาชิกของเมตริกซ์ x_{ij} หมายถึง คะแนนประเมินของแต่ละทางเลือก

i ตามมุมมองของแต่ละเกณฑ์ j โดยกำหนดให้ $i = 1, \dots, m$ และ $j = 1, \dots, n$ เมตริกซ์การตัดสินใจที่สร้างขึ้นแสดงในสมการที่ (1)

$$D_{m \times n} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 2: สร้างนอร์มอลไลซ์เมตริกซ์การตัดสินใจ

ทำการปรับข้อมูลของแต่ละเกณฑ์จากหน่วยที่แตกต่างกันให้เป็นหน่วยหรือมาตรฐานเดียวกัน โดยในการปรับหน่วยจะแตกต่างกันระหว่างเกณฑ์เชิงผลประโยชน์ (ยิ่งมีค่าสูงยิ่งดี) และเกณฑ์เชิงต้นทุน (ยิ่งมีค่าต่ำยิ่งดี) กำหนดให้ R เป็นนอร์มอลไลซ์เมตริกซ์หรือเมตริกซ์การปรับข้อมูลปกติ และ r_{ij} เป็นสมาชิกของเมตริกซ์ ซึ่งนอร์มอลไลซ์เมตริกซ์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$R = [r_{ij}]_{m \times n}, r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad \text{for } i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

ขั้นตอนที่ 3: สร้างเมตริกซ์การตัดสินใจถ่วงน้ำหนัก

กำหนดให้ w_j เป็นน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ j จากนั้นนำน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์คูณกับข้อมูลในแต่ละสดมภ์ ดังนั้นเมตริกซ์การตัดสินใจถ่วงน้ำหนัก (V) และสมาชิกของเมตริกซ์ (v_{ij}) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V = [v_{ij}]_{m \times n}, \quad v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (3)$$

ขั้นตอนที่ 4: กำหนดค่าอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบ

การหาค่าอุดมคติเชิงบวก (positive ideal solution, PIS or A⁺) และค่าอุดมคติเชิงลบ (negative ideal solution, NIS or A⁻) สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) \quad (4)$$

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) \quad (5)$$

เมื่อ

$$v_j^+ = \{ \max (v_{ij}) \text{ if } j \in J^+ ; \min (v_{ij}) \text{ if } j \in J^- \}$$

$$v_j^- = \{ \min (v_{ij}) \text{ if } j \in J^+ ; \max (v_{ij}) \text{ if } j \in J^- \}$$

เมื่อ J⁺ และ J⁻ เป็นเกณฑ์เชิงผลประโยชน์และเกณฑ์เชิงต้นทุน (criterion benefit and cost) ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 5: กำหนดระยะห่างจากค่าอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบของแต่ละทางเลือก

(1) ระยะห่างจากค่าอุดมคติเชิงบวก สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (6)

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^+ - v_{ij})^2}, \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (6)$$

(2) ระยะห่างจากค่าอุดมคติเชิงลบ สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (7)

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_j^- - v_{ij})^2}, \quad i=1, 2, 3, \dots, m \quad (7)$$

ขั้นตอนที่ 6: คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้ค่าอุดมคติที่สุด (Closeness Coefficient weight: ccw_i*)

คำนวณค่า ccw_i ของแต่ละทางเลือกโดยใช้สมการที่ (8)

$$ccw_i = \frac{S_i^-}{(S_i^- + S_i^+)}, \quad 0 \leq ccw_i \leq 1 \quad (8)$$

จากนั้นจัดลำดับของทางเลือกตามค่า ccw_i ทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่า ccw_i มากที่สุด หรือ ccw_i* ส่วนทางเลือกที่มีค่า ccw_i น้อยกว่าจะมีความเหมาะสมน้อยกว่า

3.2 การคำนวณโดยใช้เทคนิค DEA

Charnes, Cooper and Roberts [16] ใช้การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming, LP) ในการวัดค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิต โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์แบบไม่กำหนดรูปแบบของฟังก์ชัน (function form) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตที่มีปัจจัยผลิตและผลผลิตหลายชนิด (multiple inputs and outputs) ด้วยแบบทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะเป็นการพิจารณาด้านปัจจัยนำเข้า (input-oriented) และมีลักษณะของผลตอบแทนคงที่ (Constant Returns to Scale: CRS) ซึ่งเรียกแบบจำลองนี้ว่า DEA-CCR-I โดยรายละเอียดของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ แสดงได้ดังนี้

กำหนดให้

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

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

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

X_{ij} คือค่าประเมินปัจจัยนำเข้า *i* สำหรับหน่วยผลิต *j*

y_{rj} คือค่าประเมินปัจจัยผลผลิต *r* สำหรับหน่วยผลิต *j*

u_r คือ ตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับปัจจัยผลผลิต r

v_i คือ ตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับปัจจัยนำเข้า I

$$\text{Min} = \sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{io} \tag{9}$$

$$\sum_{r=1}^s y_{ro} \cdot u_r = 1 \tag{10}$$

$$\sum_{r=1}^s y_{rj} \cdot u_r - \sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij} \leq 0; \quad \forall j \tag{11}$$

$$v_i, u_r \geq 0; \quad \forall i, \forall r \tag{12}$$

3.3 การคำนวณโดยใช้เทคนิค hybrid TOPSIS-DEA

กำหนดให้วัสดุชีวมวลเป็นทางเลือก และปัจจัยได้แก่ ค่าคะแนนประสิทธิภาพจากเทคนิค DEA และค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้ค่าอุดมคติที่สุดจากเทคนิค TOPSIS จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้ค่าอุดมคติที่สุดใหม่โดยใช้ขั้นตอนเช่นเดียวกันกับเทคนิค TOPSIS

4. การประยุกต์ใช้

4.1 การจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง กรณีศึกษาที่ 1

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดโดยห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงาน ฝ่ายวิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ซึ่งทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุชีวมวลจำนวน 23 ชนิด และคุณสมบัติที่สำคัญของการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลโดยจำนวน 5 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความชื้น (C1) เถ้า (C2) สารระเหย (C3) คาร์บอนคงตัว (C4) และ ค่าความร้อน (C5) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุชีวมวล [36]

| Biomass | C1 (%) | C2 (%) | C3 (%) | C4 (%) | C5 (%) |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| A1 (ต้นสับ) | 9.33 | 4.77 | 67.95 | 17.95 | 4044.29 |
| A2 (ข้าวฟ่าง) | 4.31 | 8.63 | 68.83 | 18.23 | 4051.48 |
| A3 (ข้าวโพด) | 13.32 | 6.2 | 64.58 | 15.9 | 4313.90 |
| A4 (ข้าวโพด) | 4.39 | 1.03 | 80.17 | 14.41 | 4187.00 |
| A5 (กะลามะพร้าว) | 11.79 | 0.85 | 64.03 | 23.33 | 4860.48 |
| A6 (กะลาปาล์ม) | 13 | 1.3 | 64.55 | 21.05 | 5072.50 |
| A7(ฟางข้าว) | 2.86 | 11.24 | 65.64 | 20.26 | 3503.51 |
| A8 (เปลือกทุเรียน) | 9.93 | 2.71 | 74.3 | 13.06 | 4449.45 |
| A9 (กากถั่วลิสง) | 11.5 | 3.67 | 64.34 | 20.49 | 4034.20 |
| A10 (ขาน้อย) | 13.38 | 2.61 | 64.73 | 19.26 | 3972.76 |
| A11 (ใบจามจุรี) | 7.32 | 15.65 | 62.35 | 14.68 | 5078.74 |
| A12 (แกลบ) | 7.27 | 14.07 | 60.87 | 17.79 | 4009.40 |
| A13 (ลำต้นมันสำปะหลัง) | 31.54 | 6.22 | 47.73 | 14.51 | 4670.00 |
| A14 (หมักมันสำปะหลัง) | 41.98 | 3.57 | 41.86 | 12.59 | 4368.30 |
| A15 (หญ้าจระเข้) | 5.91 | 8.04 | 66.97 | 19.08 | 3939.68 |
| A16 (หญ้าคา) | 5.75 | 6.53 | 65.32 | 22.4 | 3773.11 |
| A17 (โลกกระสุน) | 8.57 | 9.88 | 65.23 | 16.32 | 4340.92 |
| A18 (ไมยราบยักษ์) | 9.25 | 4.15 | 64.38 | 22.22 | 4556.10 |
| A19 (หัดลมข้าว) | 6.47 | 10.08 | 67.07 | 15.7 | 3492.13 |
| A20 (ไม้ยางพารา) | 3.94 | 4.54 | 16 | 73.52 | 6934.02 |
| A21 (ต้นสับ) | 4.3 | 1.51 | 79.1 | 15.09 | 4436.00 |
| A22 (ข้าวฟ่าง) | 7.87 | 2.23 | 72.14 | 17.76 | 5179.00 |
| A23 (ต้นข้าวโพด) | 9.09 | 1.03 | 72.17 | 17.71 | 4309.40 |

โดยความหมายของแต่ละปัจจัยแสดงได้ดังนี้

- ปริมาณความชื้น (Moisture Content) คือ ปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่หลังจากที่ตากแห้ง หากวัสดุมีความชื้นมากจะทำให้มีการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยความชื้น ทำให้ค่าความร้อนที่ได้ต่ำลง ดังนั้นความชื้นน้อยกว่าจะมีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า

- เถ้า (Ash) คือ ส่วนของสารอนินทรีย์ที่เหลือจากการสันดาป หรือเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ดังนั้นหากถ่านอัดแท่งมีเถ้าปริมาณมาก จะเป็นปัญหาในการเผา

ใหม่ ดังนั้นปริมาณถ่านน้อยกว่าจะมีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า

- ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile Matters) คือ องค์ประกอบในของเสียที่สามารถระเหยได้ โดยสารระเหยบางชนิดอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อวัสดุหรืออุปกรณ์ที่นำวัสดุเชื้อเพลิงไปใช้งาน ดังนั้นปริมาณสารที่ระเหยได้น้อยกว่าจะมีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า

- ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) คือ ปริมาณสารประกอบคาร์บอนซึ่งระเหยได้ยาก ถ่านอัดแท่งที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจึงมีช่วงเวลาในการลุกไหม้นาน ดังนั้นถ้าปริมาณสารที่ระเหยได้มากกว่าจะมีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า

- ค่าความร้อน (Heating Value) คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น ค่าความร้อนสูงจะให้พลังงานของการเผาไหม้สูง ดังนั้นถ้าปริมาณความร้อนมีค่าสูงกว่าจะมีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า

นำข้อมูลในตารางที่ 1 คำนวณหาค่าความสำคัญของถ่านอัดแท่งแต่ละชนิดโดยใช้ DEA, TOPSIS และ combined DEA-TOPSIS ผลการทดลองดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1.1, 4.1.2 และ 4.1.3 ตามลำดับ

4.1.1 ผลการคำนวณโดยใช้ TOPSIS

นำข้อมูลในตารางที่ 1 มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้ค่าอุดมคติที่สุด หรือ ccw_i โดยใช้สมการที่ (1) ถึง (8) ผลการคำนวณ ccw_i ของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2

4.1.2 ผลการคำนวณโดยใช้ DEA

นำข้อมูลในตารางที่ 1 โดยกำหนดให้ DMUs เป็นชนิดของวัสดุชีวมวล (DMU1 ถึง DMU23) บังคับนำเข้าซึ่งเป็นปัจจัยที่ต้องการค่าน้อยสุด (ค่าน้อยกว่าแสดงว่ามีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า) ได้แก่ ความชื้น

(X1) เถ้า (X2) และสารระเหย (X3) และปัจจัยผลผลิตซึ่งเป็นปัจจัยที่ต้องการมากที่สุด (ค่ามากกว่าแสดงว่ามีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า) ได้แก่ คาร์บอนคงตัว (Y1) และค่าความร้อน (Y2) จากนั้นนำข้อมูลในตารางที่ 1 คำนวณค่าประสิทธิภาพของแต่ละหน่วยการผลิตด้วยตัวแบบ DEA-CCR-I ดังสมการที่ (9) ถึง (12) โดยใช้ซอฟต์แวร์ LINGO13 ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าประสิทธิภาพและค่า ccw_i ของหน่วยผลิต

| Biomass | Efficiency score | ccw_i |
|---------|------------------|---------|
| A1 | 0.4238 | 0.5142 |
| A2 | 0.5341 | 0.5104 |
| A3 | 0.3606 | 0.4669 |
| A4 | 1.0000 | 0.5520 |
| A5 | 1.0000 | 0.5625 |
| A6 | 0.9247 | 0.5425 |
| A7 | 0.6961 | 0.5014 |
| A8 | 0.6200 | 0.5103 |
| A9 | 0.4787 | 0.5222 |
| A10 | 0.5497 | 0.5142 |
| A11 | 0.3942 | 0.4298 |
| A12 | 0.3134 | 0.4450 |
| A13 | 0.4243 | 0.3231 |
| A14 | 0.6100 | 0.3162 |
| A15 | 0.3788 | 0.5093 |
| A16 | 0.3760 | 0.5373 |
| A17 | 0.2878 | 0.4668 |
| A18 | 0.5273 | 0.5430 |
| A19 | 0.3067 | 0.4730 |
| A20 | 1.0000 | 0.8905 |
| A21 | 0.9768 | 0.5535 |
| A22 | 0.8438 | 0.5483 |
| A23 | 0.8941 | 0.5457 |

จากตารางที่ 2 จากการประมวลผลด้วยเทคนิค DEA แสดงให้เห็นว่าหน่วยการผลิต A4 A5 และ A20 มีคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่าหน่วย

การผลิตเหล่านี้เป็นหน่วยการผลิตที่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพที่มีค่ามากกว่าจะมีความเหมาะสมมากกว่า) และจากการประมวลผลด้วยเทคนิค TOPSIS ค่า ccw_i ของทางเลือกหรือหน่วยผลิต A20 มีน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 0.8905 (ค่า ccw_i มากกว่าแสดงว่าจะมีความเหมาะสมมากกว่า)

4.1.3 ผลการคำนวณโดยใช้เทคนิค TOPSIS-DEA

ขั้นตอนแรกสร้างเมตริกซ์การตัดสินใจ โดยกำหนดให้ทางเลือกเป็นชนิดของวัสดุชีวมวลซึ่งมีจำนวน 23 ทางเลือก (A1 ถึง A23) และเกณฑ์ ได้แก่ ค่าคะแนนประสิทธิภาพจากเทคนิค DEA (C1) และค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้ค่าอุดมคติที่สุดจากเทคนิค TOPSIS (C2) ดังแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นทำการนอร์มอลไลซ์ข้อมูลในเมตริกซ์การตัดสินใจโดยใช้สมการที่ (2) ผลที่ได้ก็คือนอร์มอลไลซ์เมตริกซ์การตัดสินใจ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 นอร์มอลไลซ์ข้อมูลในเมตริกซ์การตัดสินใจ

| Biomass | C1 | C2 |
|---------|-------|-------|
| A1 | 0.135 | 0.205 |
| A2 | 0.170 | 0.204 |
| A3 | 0.115 | 0.186 |
| A4 | 0.318 | 0.220 |
| A5 | 0.318 | 0.225 |
| A6 | 0.294 | 0.217 |
| A7 | 0.222 | 0.200 |
| A8 | 0.197 | 0.204 |
| A9 | 0.152 | 0.208 |
| A10 | 0.175 | 0.205 |
| A11 | 0.126 | 0.172 |
| A12 | 0.100 | 0.178 |
| A13 | 0.135 | 0.129 |
| A14 | 0.194 | 0.126 |
| A15 | 0.121 | 0.203 |
| A16 | 0.120 | 0.214 |
| A17 | 0.092 | 0.186 |
| A18 | 0.168 | 0.217 |
| A19 | 0.098 | 0.189 |

| Biomass | C1 | C2 |
|---------|-------|-------|
| A20 | 0.318 | 0.355 |
| A21 | 0.311 | 0.221 |
| A22 | 0.269 | 0.219 |
| A23 | 0.285 | 0.218 |

นำข้อมูลในตารางที่ 3 มาสร้างเมตริกซ์การตัดสินใจถ่วงน้ำหนักโดยใช้สมการที่ (3) โดยกำหนดค่าน้ำหนักของปัจจัยที่หนึ่งและปัจจัยที่สองมีค่าเท่ากัน คือ 0.50 เมื่อได้เมตริกซ์การตัดสินใจถ่วงน้ำหนักแล้ว จากนั้นจึงทำการกำหนดค่าในอุดมคติเชิงบวก (Max) และเชิงลบ (Min) โดยใช้สมการที่ (4 ถึง 5) ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เมตริกซ์การตัดสินใจถ่วงน้ำหนัก

| | C1 | C2 |
|-----|--------------|--------------|
| A1 | 0.067 | 0.103 |
| A2 | 0.085 | 0.102 |
| A3 | 0.057 | 0.093 |
| A4 | 0.159 | 0.110 |
| A5 | 0.159 | 0.112 |
| A6 | 0.147 | 0.108 |
| A7 | 0.111 | 0.100 |
| A8 | 0.099 | 0.102 |
| A9 | 0.076 | 0.104 |
| A10 | 0.088 | 0.103 |
| A11 | 0.063 | 0.086 |
| A12 | 0.050 | 0.089 |
| A13 | 0.068 | 0.064 |
| A14 | 0.097 | 0.063 |
| A15 | 0.060 | 0.102 |
| A16 | 0.060 | 0.107 |
| A17 | 0.046 | 0.093 |
| A18 | 0.084 | 0.108 |
| A19 | 0.049 | 0.094 |
| A20 | 0.159 | 0.178 |
| A21 | 0.156 | 0.110 |
| A22 | 0.134 | 0.109 |
| A23 | 0.142 | 0.109 |
| MIN | 0.046 | 0.063 |
| MAX | 0.159 | 0.178 |

นำข้อมูลจากตารางที่ 4 มาทำการคำนวณระยะห่างจากค่าอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบของแต่ละทางเลือก

โดยใช้สมการที่ (6) ถึง (7) สุดท้ายคำนวณหาสัมประสิทธิ์ที่ใกล้ค่าอุดมคติที่สุดของแต่ละทางเลือก โดยใช้สมการที่ (8) ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์ที่ใกล้ค่าอุดมคติที่สุด

| Biomass | s_i^- | $s_i^+ + s_i^-$ | ccw_i | Ranking |
|---------|---------|-----------------|---------|---------|
| A1 | 0.045 | 0.164 | 0.2754 | 16 |
| A2 | 0.055 | 0.161 | 0.3420 | 12 |
| A3 | 0.032 | 0.165 | 0.1959 | 18 |
| A4 | 0.123 | 0.190 | 0.6451 | 3 |
| A5 | 0.124 | 0.189 | 0.6537 | 2 |
| A6 | 0.111 | 0.181 | 0.6117 | 5 |
| A7 | 0.075 | 0.166 | 0.4497 | 8 |
| A8 | 0.066 | 0.163 | 0.4032 | 9 |
| A9 | 0.051 | 0.162 | 0.3156 | 13 |
| A10 | 0.057 | 0.161 | 0.3562 | 11 |
| A11 | 0.028 | 0.162 | 0.1752 | 21 |
| A12 | 0.026 | 0.167 | 0.1559 | 22 |
| A13 | 0.022 | 0.167 | 0.1300 | 23 |
| A14 | 0.051 | 0.182 | 0.2824 | 14 |
| A15 | 0.041 | 0.166 | 0.2481 | 17 |
| A16 | 0.046 | 0.168 | 0.2754 | 15 |
| A17 | 0.030 | 0.172 | 0.1752 | 20 |
| A18 | 0.059 | 0.162 | 0.3664 | 10 |
| A19 | 0.031 | 0.170 | 0.1852 | 19 |
| A20 | 0.161 | 0.161 | 1.0000 | 1 |
| A21 | 0.119 | 0.187 | 0.6395 | 4 |
| A22 | 0.100 | 0.173 | 0.5789 | 7 |
| A23 | 0.107 | 0.178 | 0.6013 | 6 |

จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าทางเลือก A20 เป็นทางเลือกที่ดีที่สุด คือมีค่า ccw_i เท่ากับ 1 ตามด้วยทางเลือกและ A5 (ค่า ccw_i เท่ากับ 0.6537) และ A4 (ค่า ccw_i เท่ากับ 0.6451) ตามลำดับ โดยทางเลือก A13 เป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมน้อยสุด (ค่า ccw_i เท่ากับ 0.1300)

จากนั้นนำผลการคำนวณของวิธีที่นำเสนอ (DEA-TOPSIS) เปรียบเทียบความสัมพันธ์หรือความสอดคล้องกับเทคนิค DEA และ TOPSIS ซึ่งทั้งสองวิธีเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการแก้ปัญหาการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ การทดสอบความสัมพันธ์ในกรณีนี้จะใช้วิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมน ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบการจัดลำดับความสำคัญ

| Biomass | ccw_i based on TOPSIS | Ranking | Efficiency | Ranking | ccw_i based on DEA-TOPSIS | Ranking |
|---------|-------------------------|---------|------------|---------|-----------------------------|---------|
| | y | | | | | |
| A1 | 0.5142 | 12 | 0.4238 | 15 | 0.2754 | 16 |
| A2 | 0.5104 | 13 | 0.5341 | 11 | 0.3420 | 12 |
| A3 | 0.4669 | 18 | 0.3606 | 19 | 0.1959 | 18 |
| A4 | 0.5520 | 4 | 1.0000 | 1 | 0.6451 | 3 |
| A5 | 0.5625 | 2 | 1.0000 | 1 | 0.6537 | 2 |
| A6 | 0.5425 | 8 | 0.9247 | 4 | 0.6117 | 5 |
| A7 | 0.5014 | 16 | 0.6961 | 7 | 0.4497 | 8 |
| A8 | 0.5103 | 14 | 0.6200 | 8 | 0.4032 | 9 |
| A9 | 0.5222 | 10 | 0.4787 | 13 | 0.3156 | 13 |
| A10 | 0.5142 | 11 | 0.5497 | 10 | 0.3562 | 11 |
| A11 | 0.4298 | 21 | 0.3942 | 16 | 0.1752 | 21 |
| A12 | 0.4450 | 20 | 0.3134 | 20 | 0.1559 | 22 |
| A13 | 0.3231 | 22 | 0.4243 | 14 | 0.1300 | 23 |
| A14 | 0.3162 | 23 | 0.6100 | 9 | 0.2824 | 14 |
| A15 | 0.5093 | 15 | 0.3788 | 17 | 0.2481 | 17 |
| A16 | 0.5373 | 9 | 0.3760 | 18 | 0.2754 | 15 |
| A17 | 0.4668 | 19 | 0.2878 | 22 | 0.1752 | 20 |
| A18 | 0.5430 | 7 | 0.5273 | 12 | 0.3664 | 10 |
| A19 | 0.4730 | 17 | 0.3067 | 21 | 0.1852 | 19 |
| A20 | 0.8905 | 1 | 1.0000 | 1 | 1.0000 | 1 |
| A21 | 0.5535 | 3 | 0.9768 | 3 | 0.6395 | 4 |
| A22 | 0.5483 | 5 | 0.8438 | 6 | 0.5789 | 7 |

| Biomass | ccw_i based Ranking | | Efficiency based Ranking | | ccw_i based Ranking | |
|---------|-----------------------|---|--------------------------|---|-----------------------|---|
| | TOPSIS | | DEA | | DEA-TOPSIS | |
| A23 | 0.5457 | 6 | 0.8941 | 5 | 0.6013 | 6 |

ตารางที่ 7 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

| | TOPSIS | DEA | DEA-TOPSIS |
|------------------|--------|-------|------------|
| TOPSIS | 1 | 0.718 | 0.863 |
| Sig. (bilateral) | | 0.000 | 0.000 |
| DEA | 0.718 | 1 | 0.932 |
| Sig. (bilateral) | 0.000 | | 0.000 |
| DEA-TOPSIS | 0.863 | 0.932 | 1 |
| Sig. (bilateral) | 0.000 | 0.000 | |

จากตารางที่ 6 และตารางที่ 7 แสดงให้เห็นว่าวิธีการบูรณาการร่วมกันระหว่างเทคนิค DEA และ TOPSIS (hybrid DEA-TOPSIS) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนเทียบกับเทคนิค DEA และ TOPSIS ก่อนข้างสูง คือ 0.863 (Sig. = 0.00) และ 0.932 (Sig. = 0.00) ตามลำดับ ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอจึงมีความสอดคล้องกับเทคนิค DEA และ TOPSIS ผลการจัดลำดับโดยใช้เทคนิค DEA-TOPSIS พบว่าทางเลือกที่ดีที่สุดคือไม่ยางพารา โดยมีคุณสมบัติดังนี้ ค่าความชื้น 6.14% 4.54% 16% 73.52% และ 6934.02 cal/g ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับเทคนิค DEA และ TOPSIS เมื่อพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 5 ปัจจัย อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติอาจเพิ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เช่น ปัจจัยด้านต้นทุนการผลิต และ

ปริมาณของชีวมวลแต่ละชนิดภายในท้องถิ่น นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอสามารถเพิ่มทางเลือกและปัจจัยได้นอกจากนั้นยังสามารถเพิ่มจำนวนวิธีที่นำมาผสมผสานได้ ทำให้เทคนิคการผสมผสานนี้มีความยืดหยุ่นสูงในการแก้ปัญหาการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ และเป็นแนวทางหนึ่งในการนำมาประยุกต์ใช้ในศาสตร์ด้านนี้เพิ่มขึ้นในอนาคต

4.2 การจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง กรณีศึกษาที่ 2

จากผลงานวิจัยของวรรณพร ขันธีรัตน์ และคณะ [34] ได้ทำการศึกษา “การคัดเลือกพลังงานทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์” โดยในงานวิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำนวน 7 ชนิด ได้แก่ กากอ้อย (A1) กกธูปฤๅษี (A2) ผักตบชวา (A3) แกลบ (A4) กะลามะพร้าว (A5) ขี้เถ้า (A6) และไมยราบ (A7) โดยกำหนดคุณสมบัติที่สำคัญของการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความร้อน (C1) คาร์บอนคงตัว (C2) และความชื้น (C3) ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ตารางแสดงค่าปัจจัยของถ่านอัดแท่ง [34]

| Biomass | C1 | C2 | C3 |
|---------|------|------|-------|
| A1 | 3.40 | 4462 | 17.60 |
| A2 | 5.10 | 4272 | 22.80 |
| A3 | 5.00 | 4246 | 23.60 |
| A4 | 3.10 | 3886 | 17.30 |
| A5 | 3.29 | 4761 | 25.50 |
| A6 | 3.45 | 4876 | 22.40 |
| A7 | 4.20 | 4136 | 23.70 |

จากนั้นใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1 เพื่อคำนวณหาค่า ccw_i โดยใช้เทคนิค TOPSIS และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิค DEA-CCR-I สุดท้ายคำนวณหาค่า ccw_i โดยใช้เทคนิค DEA-TOPSIS ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 9 และตารางที่ 10

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบการจัดลำดับความสำคัญ

| Biomass | ccw_i based on TOPSIS | Ranking | Efficiency | Ranking | ccw_i based on DEA - TOPSIS | Ranking |
|---------|-------------------------------|---------|------------|---------|--|---------|
| A1 | 0.5401 | 3 | 0.9069 | 3 | 0.451 | 3 |
| A2 | 0.3323 | 7 | 0.5788 | 7 | 0.000 | 7 |
| A3 | 0.3726 | 6 | 0.6090 | 6 | 0.069 | 6 |
| A4 | 0.5341 | 4 | 0.8662 | 4 | 0.423 | 4 |
| A5 | 0.9194 | 1 | 1.0000 | 1 | 1.000 | 1 |
| A6 | 0.7596 | 2 | 0.9767 | 2 | 0.763 | 2 |
| A7 | 0.5279 | 5 | 0.7280 | 5 | 0.338 | 5 |

ตารางที่ 10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

| | TOPSIS | DEA | DEA-TOPSIS |
|------------------|--------|-------|------------|
| TOPSIS | 1 | 1 | 1 |
| Sig. (bilateral) | | 0.000 | 0.000 |
| DEA | 1 | 1 | 1 |
| Sig. (bilateral) | 0.000 | | 0.000 |
| DEA-TOPSIS | 1 | 1 | 1 |
| Sig. (bilateral) | 0.000 | 0.000 | |

จากตารางที่ 9 และตารางที่ 10 จะพบว่าการจัดลำดับความสำคัญของถ่านอัดแท่งแต่ละชนิดโดยใช้เทคนิค TOPSIS DEA และเทคนิค hybrid DEA-TOPSIS มีการจัดลำดับที่เหมือนกันทั้งสามวิธี โดยถ่านอัดแท่งที่เหมาะสมที่สุดจนถึงเหมาะสมน้อยสุดจะเรียงลำดับได้ดังนี้ กะลามะพร้าว (ลำดับที่ 1) ขี้เถ้า (ลำดับที่ 2) กากอ้อย (ลำดับที่ 3) แกลบ (ลำดับที่ 4) ไมยราบ (ลำดับที่ 5)

ผักตบชวา (ลำดับที่ 6) และกกหูปลา (ลำดับที่ 7) เมื่อพิจารณาปัจจัยหรือคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องเพียง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความชื้น คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติอาจใช้ค่าต้นทุน และปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆ มาพิจารณาในการตัดสินใจร่วมด้วย ซึ่งวิธีการที่น่าเสนอสามารถเพิ่มทางเลือกและปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความยืดหยุ่นสูงเหมาะกับนำมาประยุกต์ใช้ในศาสตร์ด้านนี้

5. สรุปผล

การศึกษาสมบัติของวัสดุชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อศึกษาแนวทางในการนำวัสดุชีวมวลเหล่านี้มาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหรือถ่านอัดแท่งสำหรับใช้ในครัวเรือน ขั้นตอนแรกเริ่มจากศึกษาคุณสมบัติของชีวมวลแต่ละชนิด ขั้นตอนที่สองคำนวณค่า ccw_i โดยใช้เทคนิค TOPSIS ขั้นตอนที่สามคำนวณประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิค DEA-CCR-I และขั้นตอนที่สี่คำนวณหาค่า ccw_i โดยใช้เทคนิค hybrid DEA-TOPSIS ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้เทคนิค hybrid DEA-TOPSIS ในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งมีจำนวนทางเลือก 23 ทางเลือก และมีปัจจัยที่สำคัญจำนวน 5 ปัจจัย ได้แก่ ความชื้น เถ้า สารระเหย คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนระหว่างเทคนิค hybrid DEA-TOPSIS กับเทคนิคดั้งเดิมสองเทคนิคได้แก่ DEA และ TOPSIS มีค่าเท่ากับ 0.863 และ 0.932 ตามลำดับ สำหรับผลการทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งมีจำนวนทางเลือก 7 ทางเลือก และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่สำคัญจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความร้อน คาร์บอนคงตัว และความชื้น ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนระหว่างเทคนิค

hybrid DEA-TOPSIS กับเทคนิคดั้งเดิมทั้งสองเทคนิค ซึ่งได้แก่ เทคนิค DEA และ TOPSIS มีค่าเท่ากับ 1 เท่ากัน แสดงว่าเทคนิคที่นำเสนอนี้ (hybrid DEA-TOPSIS) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพที่ดีในการวัด ประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของหน่วยการผลิต เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนที่ทดสอบอยู่ในระดับสูง (ที่นัยสำคัญ 0.05) ซึ่งหมายถึง เทคนิคที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถประเมิน ประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวล แต่ละชนิดได้อย่างสอดคล้องกัน ดังนั้นเครื่องมือที่ นำเสนอในงานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางในการนำไปใช้ ประเมินและจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลอื่น ๆ ได้ ซึ่งวิธีที่นำเสนอเหล่านี้มีความยืดหยุ่นสูงเนื่องจาก สามารถเพิ่มทางเลือกและปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้

สำหรับการวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยเสนอแนะให้เพิ่ม ชนิดของวัสดุชีวมวล และเพิ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ต้นทุนการผลิต ปริมาณวัตถุดิบที่มีในท้องถิ่น และ ศักยภาพของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด เพื่อให้ครอบคลุม ปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดสำหรับการแปรรูปเป็น เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งใช้ในครัวเรือน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ อุปกรณ์ต่างๆ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Alternative Energy Development and

Efficiency, “Energy Situation in Thailand 2017”, Available: http://www.dede.go.th/download/state_61/frontpagejan_nov60.pdf, 26 March 2018. (in Thai)

[2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, “Energy Situation in Thailand 2017”, Available:http://www.dede.go.th/download/state_61/frontpag.pdf, 26 March 2018. (in Thai)

[3] T. Tantisattayakul, S. Phongkasem, P. Phooyar and P. Taibangury, “Community-based renewable energy from biomass briquettes fuel from coconut leaf”, Thai Science and Technology Journal 23 (3), 2015, pp. 418-431. (in Thai)

[4] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, “Energy Potential of Biomass in Thailand”, Available: 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, 26 March 2018. (in Thai)

[5] K. Wongsaroj, T. Sawadsevi, N. Prathinthong and P. Wongsrivej, “Biomass Briquette Production from Jatropha”, KCU Engineering Journal 38 (1), 2011, pp. 65-72. (in Thai)

[6] A. Ussawarujikulchai, C. Semsayun, N. Prapakdee, N. Pieamsuwansiri and N. Chuchat, “Utilization of durian and mangosteen peels as briquette fuel”, Proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Science, Bangkok,

- Thailand, 2011, pp. 162-168.
- [7] B. Jolanun, A. Phutharukchat and C. Khamtui, "Community-Based Renewable Energy from Mimoso Pigra L. Charcoal Briquettes", *KKU Research Journal* 16 (1), 2011, pp. 20-31. (in Thai)
- [8] C. Kahraman, S. C. Onar and B. Oztaysi, "Fuzzy Multicriteria Decision-Making: A Literature Review", *International Journal of Computational Intelligence Systems* 8 (4), 2015, pp. 637-666.
- [9] L.A. Vidal, F. Marle and J.C. Bocquet, "Using a Delphi process and the Analytic Hierarchy Process (AHP) to evaluate the complexity of projects", *Expert Systems with Applications* 38 (5), 2011, pp. 5388-5405.
- [10] A. Bilbao-Terol, "Using TOPSIS for assessing the sustainability of government bond funds", *Omega* 49, 2014, pp. 1-17.
- [11] S. Zhaoxu and H. Min, "Multi-criteria Decision Making Based on PROMETHEE Method", *Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE)*, Wuhan, China, 2010, pp. 416-418.
- [12] J. Doyle and R. Green, "Data envelopment analysis and multiple criteria decision making", *Omega* 21(6), 1993, pp. 713 - 715.
- [13] G. Kim, C. S. Park and K. P. Yoon, "Identifying investment opportunities for advanced manufacturing systems with comparative-integrated performance measurement", *International Journal of Production Economics* 50(1), 1997, pp. 23-33.
- [14] H.S. Shih, H.J. Shyur and E.S. Lee, "An extension of TOPSIS for group decision making", *Mathematical and Computer Modelling* 45 (7), 2007, pp. 801-813.
- [15] M.J. Farrell, "The Measurement of Productive Efficiency", *Journal of the Royal Statistical Society* 120(3), 1957, pp. 253-290.
- [16] A. Charnes, W.W. Cooper and E. Rhodes, "Measuring the efficiency of decision making units", *European Journal of Operational Research* 2(6), 1978, pp. 429-444.
- [17] H., Hosseinzadeh-Bandbafha, "Application of data envelopment analysis approach for optimization of energy use and reduction of greenhouse gas emission in peanut production of Iran", *Journal of Cleaner Production* 172, 2018, pp.1327-1335.
- [18] T.C. Wang and H.D. Lee, "Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective weights and objective weights", *Expert systems with applications* 36 (5), 2009, pp. 8980-8985.
- [19] A. Beskese, "Landfill site selection using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS: a case study for Istanbul", *Environmental Earth Sciences* 73 (7), 2015, pp. 3513-3521.
- [20] H. B. Abbas and J.K. Routray, "Assessing factors affecting flood-induced public health risks in

- Kassala State of Sudan”, *Operations Research for Health Care* 3 (4), 2014, pp. 215-225.
- [21] J. Khushalani and Y.A. Ozcan, “Are hospitals producing quality care efficiently? An analysis using Dynamic Network Data Envelopment Analysis (DEA)”, *Socio-Economic Planning Sciences* 60, 2017, pp.15-23.
- [22] D. Ennen, and I. Batool, “Airport efficiency in Pakistan - A Data Envelopment Analysis with weight restrictions”, *Journal of Air Transport Management* 69, 1018, pp.205-212
- [23] A. Fazlollahi, and U. Franke, “Measuring the impact of enterprise integration on firm performance using data envelopment analysis”, *International Journal of Production Economics* 200, 2018, pp.119-129
- [24] L. Asandului, M. Roman and P. Fatulescu, “The Efficiency of Healthcare Systems in Europe: A Data Envelopment Analysis Approach”, *Procedia Economics and Finance* (10), 2014, pp. 261-268.
- [25] Z. Sinuany-Stern, A. Mehrez and Y. Hadad, “An AHP/DEA methodology for ranking decision making units”, *International Transactions in Operational Research* 7(2), 2000, pp. 109-124.
- [26] M.-I. Lin, Y.-D. Lee and T.-N. Ho, “Applying integrated DEA/AHP to evaluate the economic performance of local governments in China”, *European Journal of Operational Research* 209 (2), 2011, pp. 129-140.
- [27] J. Doyle and R. Green, “Data envelopment analysis and multiple criteria decision making”, *Omega* 21(6), 1993, pp. 713-715.
- [28] C.K. Hu, F.B. Liu and C.F. Hu, “A Hybrid Fuzzy DEA/AHP Methodology for Ranking Units in a Fuzzy Environment”, *Symmetry* 9 (11), 2017, pp. 273-282.
- [29] Y. Fan, “Study on eco-efficiency of industrial parks in China based on data envelopment analysis”, *Journal of Environmental Management* 192, 2017, pp.107-115.
- [30] Wang, C.-N., Nguyen, X.-T., and Wang, Y.-H., *Automobile Industry Strategic Alliance Partner Selection: The Application of a Hybrid DEA and Grey Theory Model*, *Sustainability*, 8.2. 173. 2016
- [31] F. Hosseinzadeh Lotfi, “Target setting in the general combined-oriented CCR model using an interactive MOLP method”, *Journal of Computational and Applied Mathematics* 234 (1), 2010, pp. 1-9.
- [32] R.R. Phutteesakul, “The Production of Charcoal Briquette by Coconut Shell and Cassava Rhizome”, *Master Thesis, M.Ed. (Industrial Education)*, Graduate School, Srinakharinwirot University, Thailand. 2010.
- [33] N. Panunumpa, C. Kuhakan, T. Boonyam, C. Suksi, B. Junjula and P. Ureerak, “Briquette Fuel Production from Agricultural and Oil Palm Waste”, Available: <http://forprod.forest.go.th/forprod/PDF>, 26 March

2018. (in Thai)

- [34] W. Khantirat, N. Wichapa and A. Lawong, “Selecting the Suitable Community-Based Alternative Energy from Biomass Briquettes Fuel from Agricultural Materials Using Analytic Hierarchy”, Proceedings of IE NETWORK 2018, Ubon Ratchathani, Thailand, 2018, pp. 323-329.
- [35] C. Chunniyom and W. Pattaraprakorn, “Study on the value added of corncob waste to produce the fuel briquettes”, Master Thesis, Graduate School, Thammasat University, Thailand. 2010.
- [36] Thailand Institute of Scientific and Technological Research, “Analysis of biomass properties”, Available:<http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/hot.php>, 18 August 2018. (in Thai)