วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

บทความวิจัย

การวัดประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน

ประสิทธิ์ ไกรลมสม[1*] และ นรงค์ วิชาผา[2]

[1] สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: bileys2000@yahoo.com

วันที่รับบทความ: 7 เมษายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 26 กรกฎาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 26 กรกฎาคม 2565
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ: การวัดประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญวัสดุชีวมวลสำหรับใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งเป็นแนวคิดที่ดีในการใช้ทรัพยากรทางการเกษตรให้เกิดประโยชน์สูงสุดสำหรับการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานของประเทศ อย่างไรก็ตามการวัดประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละชนิดจะต้องพิจารณาปัจจัยหรือเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องหลายอย่างพร้อมกัน ซึ่งปัญหานี้เป็นส่วนหนึ่งของปัญหาการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ที่มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการประเมิน งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล และวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือนในการวัดประสิทธิภาพและการจัดลำดับความสำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละชนิดตามลำดับ ลำดับแรกคุณสมบัติที่สำคัญหรือเกณฑ์ในการประเมินเชื้อเพลิงอัดแท่งจำเป็นต้องถูกกำหนด เช่น ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า ค่าความชื้น และปริมาณสารระเหย จากนั้นเทคนิคการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลถูกใช้ในการวัดประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละชนิด สุดท้ายวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือนถูกมาประยุกต์ใช้สำหรับการจัดลำดับความสำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละชนิด วิธีการที่นำเสนอได้ถูกทดสอบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 2 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีในการจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนระหว่างวิธีที่นำเสนอกับวิธีการจัดอันดับความสำคัญอื่นๆ พบว่าวิธีที่นำเสนอนั้นมีค่าระดับความสอดคล้องสูงมาก (ค่า $r > 0.95$) ดังนั้นวิธีที่นำเสนอสามารถใช้เป็นแนวทางในการวัดประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละชนิดที่มีปัจจัยหลายอย่างพร้อมกันได้

คำสำคัญ: วัสดุชีวมวล; การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล; เชื้อเพลิงอัดแท่ง; ประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน; การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

บทความวิจัย

Evaluating and Ranking the Fuel Briquettes from Agricultural Residues Using the Virtual Cross–Efficiency Method

Prasit Kailomsom[1*] and Narong Wichapa[2]

[1] Department of Industrial Management, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University

[2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

[*] Corresponding author, E-mail: bileys2000@yahoo.com

Received: 7 April 2022; Revised: 26 July 2022; Accepted: 26 July 2022
Online Published: 19 August 2022

Abstract: Evaluating and ranking the biomass materials for fuel briquettes is a good idea to optimize agricultural resources to address the nation's energy shortage problem. However, in measuring the efficiency of each fuel briquette, several relevant factors or criteria must be considered at the same time. This problem is one of the multi-criteria decision-making problems that are complex and difficult to assess. This research presents the data envelopment analysis and the virtual cross-efficiency method to measure the efficiency and ranking of each fuel briquette, respectively. First, the important properties or criteria for evaluating fuel briquettes must be determined, such as calorific value, ash content, moisture content and volatile matter. The data envelopment analysis was then used to measure the efficiency of each fuel briquette. Finally, the virtual cross-efficiency method was utilized to rank each fuel briquette. The proposed method was tested with two related studies. The results showed that the proposed method was highly effective in ranking biomass materials for processing into fuel briquettes. By testing Spearman's correlation between the proposed method and the other ranking methods, it was found that the proposed method has a very high level of conformity (r value > 0.95). Therefore, it can be used as a guide to measure the efficiency and ranking each fuel briquette with multiple factors at the same time.

Keywords: Biomass; Data Envelopment Analysis; Fuel Briquette; Virtual Cross-Efficiency Method; Multi-Criteria Decision Making

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

บทความวิจัย

1. บทนำ

จากสถานการณ์แนวโน้มการใช้พลังงานของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี หน่วยงานภาครัฐจึงมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น พลังงานทดแทน หมายถึง พลังงานที่สามารถนำมาใช้เพื่อทดแทนพลังงานจากฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีแนวโน้มจะหมดไปในอนาคต เป็นที่ทราบกันดีว่าพลังงานจากฟอสซิลจะปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก ซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก และปัญหาโลกร้อน ตัวอย่างพลังงานทดแทนที่นิยมถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานชีวมวล ซึ่งพลังงานทดแทนเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง สามารถนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานหลัก และช่วยลดปัญหามลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ชีวมวล (Biomass) หมายถึงสารอินทรีย์ที่ได้จากพืชและสัตว์ ซึ่งสามารถนำไปแปรรูปเป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ได้ ชีวมวลจึงเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy: RE) ที่สำคัญอย่างหนึ่ง โดยมีแหล่งที่มาสองแหล่งได้แก่ (1) เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และ (2) ของเสียจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย ยอดอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ยอดใบข้าวโพด ถั่วเขียว ถั่วลิสง ใบมะพร้าว และทางมะพร้าว ในส่วนของเสียจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ซังข้าวโพด เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง ขี้เลื่อย และกะลามะพร้าว ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศเกษตรกรรม ยิ่งไปกว่านั้นชีวมวลที่มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรยังเป็นการแก้ปัญหาการกำจัดของเสียจากทางการเกษตรของชุมชนได้ [1-2] การนำวัสดุชีวมวลมาใช้ประโยชน์สามารถทำได้โดยตรง เช่น ถ่านอัดแท่ง ซึ่งกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งใช้เทคโนโลยีในการผลิตไม่ซับซ้อน และต้นทุนของเครื่องมือ อุปกรณ์และเครื่องจักรไม่สูง ซึ่งการใช้พลังงานทดแทนจากชีวมวลทางการเกษตร เป็นแนวทางที่สอดคล้องกับนโยบายของภาครัฐ เช่น แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก [3-4] จากนโยบายภาครัฐที่มีการส่งเสริมและสนับสนุนการนำวัสดุชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานทดแทน การแปรรูปชีวมวลให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงอัดแท่ง หรือถ่านอัดแท่งเป็นวิธีการที่นิยม ซึ่งนักวิจัยจำนวนมาก [5-7] ได้นำเสนอวิธีการแปรรูปวัสดุชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตรหลากหลายชนิด อย่างไรก็ตามการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้เป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งจะต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างไปพร้อม ๆ กัน โดยสมบัติที่สำคัญที่ต้องพิจารณา [8] ได้แก่ ค่าความชื้น (Moisture) ปริมาณเถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และ ค่าความร้อน (Heating Value) ดังนั้นการวัดประสิทธิภาพและการจัดเรียงลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลจึงเป็นหัวข้อที่สำคัญที่สามารถนำวัสดุชีวมวลที่มีอยู่มาใช้ประโยชน์สูงสุด ซึ่งจะเกิดผลดีต่อประเทศชาติต่อไป

การวัดประสิทธิภาพและการจัดเรียงลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลจะต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างพร้อมกัน ซึ่งปัญหานี้เป็นส่วนหนึ่งของปัญหาการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

ตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making problem: MCDM Problem) [9] แม้ว่าจะมีหลายวิธี [10-12] ที่นิยมนำมาใช้ในการแก้ปัญหา MCDM อย่างไรก็ตามวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล (Data Envelopment Analysis: DEA) เป็นวิธีที่สามารถวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิต (Decision Making Unit: DMU) ที่มีหลายปัจจัยทั้งปัจจัยนำเข้า (Inputs) และปัจจัยผลผลิต (Outputs)ได้ [13-14] ผลการคำนวณจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ DEA สามารถจำแนกหน่วยผลิตหรือทางเลือกออกเป็น 2 กลุ่มตามค่าคะแนนประสิทธิภาพ ได้แก่ หน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1) และหน่วยผลิตที่ไม่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพน้อยกว่า1) ซึ่งแม้ว่าวิธี DEA เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ (Relative Efficiency) ของหน่วยผลิต อย่างไรก็ตาม วิธี DEA แบบดั้งเดิมไม่สามารถจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพได้ (DMUs ที่มีค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1 เหมือนกัน) เพื่อแก้ปัญหาข้อเสียนี้ นักวิจัยจำนวนมากได้นำเสนอวิธีการจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตโดยใช้หลักการทาง DEA ซึ่งมีหลายวิธีที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิต ตัวอย่างเช่น Sexton และคณะวิจัย [15] ได้นำเสนอวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ (Cross-Efficiency Method) ในการประเมินหน่วยผลิตโดยใช้ผลเฉลยน้ำหนักของหน่วยผลิตที่ถูกประเมิน และผลเฉลยน้ำหนักของหน่วยผลิตอื่นมาหาค่าเฉลี่ยคะแนนประสิทธิภาพ ทำให้วิธีการนี้สามารถจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตได้ทั้งหมด ซึ่งแนวคิดนี้เป็นแนวคิดที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวรรณกรรม อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อเสียคือผลเฉลยที่ได้จากเครื่องมือในการประมวลผลที่ต่างกันอาจให้การจัดลำดับหน่วยผลิตแตกต่างกัน (ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดอาจมีหลายคำตอบ) ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหานี้ Doyle และ Green [16] ได้เพิ่มเป้าหมายที่สอง (Secondary Goal) ลงในตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ ซึ่งวิธีที่เขานำเสนอและเป็นที่นิยมอย่างมากได้แก่ แบบจำลองก้าวร้าว (Aggressive Model) และแบบจำลองใจดี (Benevolent Model) ต่อมาแนวคิดการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ได้ถูกพัฒนาเป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์หลากหลายรูปแบบ โดยงานวิจัยที่น่าสนใจได้แก่ คณะวิจัยของ Wang [17] เป็นผู้วิจัยกลุ่มแรกที่ได้นำเสนอวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน (Cross-Efficiency Method Based on Virtual DMUs) ซึ่งผู้แต่งได้นำหลักการของวิธีเป้าหมายที่สอง และหลักการของวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution: TOPSIS) มาใช้ในการกำหนดสมการเป้าหมายในตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ซึ่งวิธีนี้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง และน่าสนใจเนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง และความชัดเจนในการประเมินตามหลักการของ TOPSIS

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละชนิดโดยใช้การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล จากนั้นใช้วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือนสำหรับการจัดเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตหรือจัดลำดับความสำคัญของถ่านอัดแท่งแต่ละชนิด ซึ่งวิธีที่นำเสนอนี้จะถูกนำมาใช้ประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบสำหรับแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยคุณสมบัติที่สำคัญของ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

ชีวมวลแต่ละชนิดจะถูกพิจารณาเป็นลำดับแรก จากนั้นวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะถูกทดสอบความน่าเชื่อถือกับปัญหาในงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องจำนวน 2 งานวิจัย ทั้งนี้การวัดประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งจะเป็นการนำเสนอวิธีการเลือกใช้วัสดุชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการแปรรูปวัสดุชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อการใช้ทรัพยากรทางการเกษตรที่มีอยู่ในประเทศให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทบทวนวรรณกรรมซึ่งจะแบ่งเป็น 3 หัวข้อย่อย ได้แก่ วิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปวัสดุชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง รายละเอียดจะแสดงในหัวข้อที่ 2.1 หัวข้อที่ 2.2 และหัวข้อที่ 2.3 ตามลำดับ

2.1 วิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล

Farrell [18] ได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิตที่มีหลายปัจจัย อย่างไรก็ตาม Charnes, Cooper และ Rhodes [13] ได้รับการยอมรับว่าเป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่นำแนวคิดของ Farrell [18] มาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเรียกว่า แบบจำลอง CCR ตามชื่อผู้แต่งทั้งสามคน ต่อมาแนวคิดของวิธีนี้ได้ถูกนำมาขยายแนวคิดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่าง ๆ เช่น Banker และคณะวิจัย [19] ได้นำเสนอจำลอง BCC ที่มีแนวคิดผลตอบแทนต่อขนาดไม่คงที่ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เป็นที่นิยมใช้ในงานหลากหลายสาขา เช่น ด้านเศรษฐศาสตร์และการเงิน โดยนับจากอดีตถึงปัจจุบันแบบจำลอง CCR ได้ถูกนำมาใช้ในการวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตอย่างแพร่หลายในวรรณกรรม [20-23] การวัดประสิทธิภาพด้วยวิธี DEA มีข้อดี คือ สามารถวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตที่มีหลายปัจจัยได้ โดยไม่จำเป็นต้องปรับข้อมูลให้เป็นปกติ (Normalized Data) ก่อนการคำนวณ และไม่จำเป็นต้องกำหนดน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยเพราะวิธี DEA ให้ผลเฉลยของน้ำหนักจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้ [24-25]

2.2 วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน

แม้ว่าวิธี DEA จะมีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับใช้ในการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิต แต่ข้อเสียของวิธี DEA คือไม่สามารถจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพได้ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์เท่ากับ 1) [26] เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาการจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพหลายหน่วยผลิต นักวิจัยกลุ่มหนึ่ง [15-17] ได้นำเสนอการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ และพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ตามแนวคิดของการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ในรูปแบบต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น Doyle และ Green [16] ได้นำเสนอวิธีเป้าหมายที่สอง (Secondary Goals) เพื่อแก้ไขปัญหาการมีผลเฉลยหลายผลเฉลยของตัวแบบประสิทธิภาพแบบไขว้ดั้งเดิม ซึ่งแบบจำลองที่เขานำเสนอทั้งสองแบบจำลองได้แก่ แบบจำลอง Aggressive และ Benevolent ทั้งสองแบบจำลองนี้เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านต่าง ๆ [27-28] ต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีต่าง ๆ ตามแนวคิดการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้แบบเป้าหมายที่สอง ตัวอย่างเช่น Wang และคณะวิจัย [17] ได้นำเสนอ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

แนวคิดที่น่าสนใจคือแนวคิดการนำหลักการของ TOPSIS มาสร้างสมการเป้าหมายใหม่แทนสมการเป้าหมายเดิมของตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการประสิทธิภาพแบบไขว้ดั้งเดิม (Aggressive และ Benevolent) ซึ่งวิธีที่นำเสนอนี้เรียกว่า วิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน (Virtual Cross-Efficiency Method or Cross-Efficiency Method Based on Virtual DMUs) ข้อดีของวิธีนี้คือมีความชัดเจนและเข้าใจง่ายตามหลักการของ TOPSIS ซึ่งวิธี TOPSIS เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหา MADM (Multi-Attribute Decision Making Problem)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปวัสดุชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านอัดแท่งจำนวนมาก อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่น่าสนใจดังนี้

Markphan และคณะวิจัย [29] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านพลังงานและประเมินมูลค่าทางด้านเศรษฐกิจของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกมังคุดและไม้ยางพาราที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนของเปลือกมังคุดต่อไม้ยางพารา 80:20 ให้ต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตน้อยสุดโดยการผลิตถ่านอัดแท่งเท่ากับ 9.22 บาทต่อกิโลกรัม

Wirunphan และคณะวิจัย [30] ได้ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษวัสดุเหลือใช้ในการผลิตข้าวหลาม ได้แก่ กะลามะพร้าวและไม้ไผ่ ผลจากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งคือปริมาณผงถ่านกะลามะพร้าว 8.55 กิโลกรัมต่อผงถ่านไม้ไผ่ 0.95 กิโลกรัม โดยมีค่าความชื้นและปริมาณเถ้าเท่ากับ 6.07 และ 10.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ5,748.83 กิโลแคลอรี่ต่อกิโลกรัม สามารถรับแรงกดอัดที่ 892.53 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

Khantirat และคณะวิจัย [31] ได้ทำการวิจัยวัสดุชีวมวลที่เหลือใช้จากการเกษตรจำนวน 7 ชนิด มาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง แล้วประเมินความเหมาะสมของถ่านอัดแท่งแต่ละชนิดด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) โดยกำหนดเกณฑ์หรือคุณสมบัติที่ใช้ประเมินความเหมาะสมของวัสดุชีวมวล จำนวน 3 เกณฑ์ ได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณคาร์บอนคงตัว และความชื้น

Khantirat และคณะวิจัย [32] ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล และวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้แบบดั้งเดิม (ในสมการข้อจำกัดไม่มีการเพิ่มเป้าหมายที่สองลงในตัวแบบทางคณิตศาสตร์) ในการวัดประสิทธิภาพเชื้อเพลิงอัดแท่ง จากวัสดุชีวมวลจำนวน 7 ชนิด โดยกำหนดเกณฑ์สำคัญในการวัดและประเมินประสิทธิภาพถ่านอัดแท่ง จำนวน 4 เกณฑ์ ได้แก่ ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน

Wichapa และคณะวิจัย [33] ได้นำเสนอวิธีผสมผสานระหว่างเทคนิค DEA และ TOPSIS ในการประเมินวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยกำหนดเกณฑ์หรือคุณสมบัติที่ใช้ประเมินความเหมาะสมของวัสดุชีวมวล จำนวน 3 เกณฑ์ ได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณคาร์บอนคงตัว และความชื้น ผลการวิจัยพบว่าเครื่องมือที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดี สามารถเป็นแนวทางหนึ่งในการประเมินวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ นอกจากนี้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

นักวิจัยยังใช้วิธีที่นำเสนอจัดลำดับความสำคัญของชีวมวลจำนวน 23 ชนิดโดยใช้ข้อมูลที่ทดสอบจากห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงาน สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย [33-34]

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตรจำนวนมาก อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกือบทั้งหมดยังขาดการนำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพ และการจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลที่ได้รับการยอมรับในวงกว้างทั้งในระดับชาติและนานาชาติ มีเพียง คณะวิจัยของ Khantirat [32] ที่นำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพของวัสดุชีวมวลโดยใช้การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูลและวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ดั้งเดิม (Traditional Cross-Efficiency Method) คือไม่มีการเพิ่มสมการเป้าหมายที่สองลงในข้อจำกัดของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ทำให้อาจมีหลายผลเฉลยที่ต่างกันสำหรับบางปัญหา เพื่อแก้ปัญหาข้อด้อยของวิธีดั้งเดิมนี้ งานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือนซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย Wang และคณะวิจัย [17] สำหรับการจัดลำดับความสำคัญของวัสดุชีวมวลแทนวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ดั้งเดิม วิธีนี้ยังคงใช้แนวคิดประสิทธิภาพแบบไขว้ดั้งเดิมแต่ได้เพิ่มหลักการของเป้าหมายที่สองและหลักการของ TOPSIS ลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดั้งเดิม ทั้งนี้เพื่อเอาชนะข้อด้อยของวิธีประสิทธิภาพดั้งเดิม โดยการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์และจัดลำดับของชีวมวลที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางหนึ่งในประเมินประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละชนิด รวมถึงเป็นแนวทางหนึ่งในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

3. วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้จะประกอบด้วยสองขั้นตอนดังนี้ (1) การวัดประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงโดยใช้การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล (ตัวแบบ CCR) แล้วหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) โดยใช้ซอฟต์แวร์ LINGO และ (2) นำข้อมูลจากผลเฉลยในขั้นตอนแรกและข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาแทนค่าในตัวแบบประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน กรอบการดำเนินงาน ดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 กรอบการดำเนินงาน

3.1 การวัดประสิทธิภาพโดยใช้วิธี DEA

Charnes และคณะวิจัย [13] นำเสนอแบบจำลอง CCR ในการวัดค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิต โดยการพิจารณามุมมองด้านปัจจัยนำเข้า (Input-Oriented) และมีลักษณะของผลตอบแทนคงที่ (Constant Returns to Scale: CRS) โดยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ แสดงได้ดังนี้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

บทความวิจัย

กำหนดให้:

i เป็นดัชนีของปัจจัยนำเข้า *i* = 1, 2,...,*m*

r เป็นดัชนีของผลผลิต *r* = 1, 2,...,*S*

j เป็นดัชนีของหน่วยผลิต *j*= 1, 2,..., *n*

k เป็นดัชนีของหน่วยผลิตที่ถูกประเมิน *j*= 1, 2,..., *n*

X_{ij} คือ ค่าของปัจจัยนำเข้า *i* และหน่วยผลิต *j*

Y_{rj} คือ ค่าของปัจจัยผลผลิต *r* และหน่วยผลิต *j*

u_{rk} คือน้ำหนักของปัจจัยผลผลิต *r* สำหรับหน่วยผลิต *k*

v_{ik} คือน้ำหนักของปัจจัยนำเข้า *i* สำหรับหน่วยผลิต *k*

ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของน้ำหนักปัจจัยนำเข้าและน้ำหนักปัจจัยผลผลิตจากสมการที่ (1) สามารถนำมาใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพแบบไขว้ของ DMU_k (E_{kj}) ดังสมการที่ (2)

เมื่อ u_{rk}^* และ v_{ik}^* เป็นผลเฉลยของน้ำหนักของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจากการคำนวณสมการที่ (1) จากนั้น คำนวณหาค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ย (Average Cross-Efficiency: ACE) ของแต่ละหน่วยผลิตดังสมการที่ (3)

$$Max\ E_{kk} = \sum_{r=1}^{S} u_{rk} Y_{rk} \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{m} v_{ik} X_{ik} = 1,\ k = 1,2,3,...,n$$

$$\sum_{r=1}^{S} u_{rk} Y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_{ik} X_{ij} \le 0,\ j = 1,2,3,...,n$$

$$v_{ik}, u_{rk} \ge 0,\ \forall i, \forall k, \forall r$$

$$E_{kj} = \frac{\sum_{r=1}^{S} u_{rk}^* \cdot Y_{rk}}{\sum_{i=1}^{m} v_{ik}^* \cdot X_{ik}},\quad k, j = 1,2,3,...,n \tag{2}$$

$$\bar{E}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} E_{kj},\quad j = 1,2,3,...,n \tag{3}$$

3.2 การจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตโดยใช้วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน

Wang และคณะวิจัย [17] ได้นำเสนอวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน โดยใช้หลักการเพิ่มเป้าหมายที่สองและหลักการของ TOPSIS ในสมการที่ (1) เพื่อแก้ปัญหาข้อด้อยในการอาจมีหลายผลเฉลยที่ต่างกันสำหรับบางปัญหาของวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ดั้งเดิม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

กำหนดให้:

$$X_i^{\min} = \min_j \{x_{ij}\},\quad \forall i = 1,2,3,...,m$$

$$X_i^{\max} = \max_j \{x_{ij}\},\quad \forall i = 1,2,3,...,m$$

$$Y_r^{\max} = \max_j \{Y_{rj}\},\quad \forall r = 1,2,3,...,S$$

$$Y_r^{\min} = \min_j \{Y_{rj}\},\quad \forall r = 1,2,3,...,S$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือนดังสมการที่ (4)

$$\begin{aligned} Max\ RC_k &= \sum_{i=1}^{m} v_{ik}(X_i^{\max} - X_{ik}) + \sum_{r=1}^{S} u_{rk}(Y_{rk} - Y_r^{\min}) \\ &\sum_{r=1}^{S} u_{rk}(Y_r^{\max} - Y_r^{\min}) + \sum_{i=1}^{m} v_{ik}(X_i^{\max} - X_i^{\min}) = 1 \\ &\sum_{r=1}^{S} u_{rk} Y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_{ik} X_{ij} \le 0,\ j = 1,2,3,...,n \\ &\sum_{r=1}^{S} u_{rk} Y_{rk} - \theta_{kk}^* \sum_{i=1}^{m} v_{ik} X_{ik} = 0 \\ &v_{ik}, u_{rk} \ge 0,\ \forall i, \forall k, \forall r \end{aligned} \tag{4}$$

เมื่อ RC_k คือสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสัมพัทธ์ (Relative Closeness Coefficient หรือ Relation Closeness Coefficient) ของหน่วยผลิตที่ *k* ถ้าค่า RC_k ของหน่วยผลิตใดสูงกว่าการจัดลำดับของหน่วยผลิตนั้นจะสูงกว่า

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

สมการเป้าหมายของวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือนในสมการที่ (4) จะเป็นการหาค่ามากสุด (Maximize) ของระยะทางที่ปัจจัยในแต่ละหน่วยผลิตห่างจากค่าปัจจัยในอุดมคติเชิงลบของหน่วยผลิต (Anti-Ideal DMU) โดยที่ค่า θ_{kk}^{*} เป็นค่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของคะแนนประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (ค่า CCR) จากสมการที่ (1)

4. การประยุกต์ใช้

วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะถูกทดสอบประสิทธิภาพกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2 งานวิจัยดังนี้

4.1 ตัวอย่างที่ 1

Wichapa และคณะวิจัย [33] ได้นำเสนอวิธีผสมผสานระหว่างเทคนิค DEA และ TOPSIS ในการประเมินวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยกำหนดเกณฑ์หรือคุณสมบัติที่ใช้ประเมินความเหมาะสมของวัสดุชีวมวล จำนวน 3 เกณฑ์ ได้แก่ ความชื้น (%) ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม) และคาร์บอนคงตัว (%) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำนวน 7 ชนิด โดยกำหนดปัจจัยนำเข้าจำนวน 1 ปัจจัย ดังนี้ X_1 หมายถึง ความชื้น ในส่วนของปัจจัยผลผลิต Y_1 และ Y_2 หมายถึง ค่าความร้อน และปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามลำดับ ส่วนหน่วยผลิต DMU_1, DMU_2, DMU_3, DMU_4, DMU_5, DMU_6 และ DMU_7 หมายถึง กากอ้อย กกธูปฤาษี ผักตบชวา แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย และไมยราบ ตามลำดับรายละเอียดของข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละชนิด

เชื้อเพลิงอัดแท่ง	X_1	Y_1	Y_2	CCR
กากอ้อย (DMU_1)	3.40	4462	17.60	**0.9069**
กกธูปฤาษี (DMU_2)	5.10	4272	22.80	**0.5788**
ผักตบชวา (DMU_3)	5.00	4246	23.60	**0.6090**
แกลบ(DMU_4)	3.10	3886	17.30	**0.8662**
กะลามะพร้าว (DMU_5)	3.29	4761	25.50	**1.0000**
ขี้เลื่อย (DMU_6)	3.45	4876	22.40	**0.9767**
ไมยราบ(DMU_7)	4.20	4136	23.70	**0.7280**

ขั้นตอนแรกจะเป็นการประเมินประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิต (ชนิดเชื้อเพลิงอัดแท่ง) โดยใช้สมการที่ (1) ตัวอย่างการประเมินประสิทธิภาพของหน่วยผลิตที่ 1 ดังนี้

$$Max\ E_{11} = 4462u_{11} + 17.60u_{21}$$

$$3.40v_{11} = 1$$

$$4462u_{11} + 17.60u_{21} - 3.40v_{11} \le 0,$$
$$4272u_{11} + 22.80u_{21} - 5.10v_{11} \le 0,$$
$$4246u_{11} + 23.60u_{21} - 5.00v_{11} \le 0,$$
$$3886u_{11} + 17.30u_{21} - 3.10v_{11} \le 0,$$
$$4761u_{11} + 25.50u_{21} - 3.29v_{11} \le 0,$$
$$4876u_{11} + 22.40u_{21} - 3.45v_{11} \le 0,$$
$$4136u_{11} + 23.70u_{21} - 4.20v_{11} \le 0$$

$$u_{11}, u_{21} \ge 0,$$
$$v_{11} \ge 0$$

ตัวแบบการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP) ของ DEA สำหรับหน่วยผลิตที่ 1 นี้สามารถหาผลเฉลยด้วยเครื่องมือประมวลผล หรือซอฟต์แวร์อื่น ๆ ได้ แต่ในงานวิจัยนี้จะประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ LINGO ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

ในการคำนวณโปรแกรมเชิงเส้น กำหนดให้ E_{11} (ค่า *CCR* ของหน่วยผลิตที่ 1) คือค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิตที่ 1 ซึ่งผลการคำนวณโดยใช้ซอฟต์แวร์ LINGO จะได้ค่า E_{11}= 0.9069 ในส่วนค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิตอื่นคำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 1 คอลัมน์ที่ 5

จากนั้นกำหนดค่าในอุดมคติเชิงบวก (Ideal DMU) และค่าอุดมคติเชิงลบ (Anti-ideal DMU) ของปัจจัยนำเข้า ตัวอย่างการกำหนดค่าในอุดมคติของปัจจัยนำเข้า X_1 ดังนี้

$$X_1^{\min} = \min_j \{3.40,5.10,5.00,3.10,3.29,3.45,4.20\} = 3.10$$

$$X_1^{\max} = \max_j \{3.40,5.10,5.00,3.10,3.29,3.45,4.20\} = 5.10$$

สำหรับการกำหนดค่าในอุดมคติเชิงบวก และ ค่าอุดมคติเชิงลบของปัจจัยผลผลิต Y_1 และ Y_2 ดังนี้

$$Y_1^{\min} = \min_j \{4462,4272,4246,3886,4761,4876,4136\} = 3886$$

$$Y_1^{\max} = \max_j \{4462, 3251,3146,3886,6761,4876,4376\} = 4876$$

$$Y_2^{\min} = \min_j \{17.60,22.80,23.60,17.30,25.50,22.40,23.70\} = 17.30$$

$$Y_2^{\max} = \max_j \{17.60,22.80,23.60,17.30,25.50,22.40,23.70\} = 25.50$$

จากนั้นนำข้อมูลในตารางที่ 1 และค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ที่ได้จากการคำนวณดังในตารางที่ 1 กำหนดให้ $E_{kk} = \theta_{kk}^*$ แทนค่าเหล่านี้ลงในตัวแบบประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือนในสมการที่ (4) จากนั้นประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ LINGO จะได้ผลเฉลยน้ำหนักของปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิตที่เหมาะสมที่สุดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลเฉลยของ u_{rk}^* และ v_{ik}^* จากตัวแบบประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน

DMU	v_{1k}^*	u_{1k}^*	u_{2k}^*
DMU1	0.2941176000	0.0002032445	0.0000000000
DMU2	0.1960784000	0.0001354963	0.0000000000
DMU3	0.2000000000	0.0000000000	0.0258039200
DMU4	0.3225806000	0.0002229133	0.0000000000
DMU5	0.3039514000	0.0000000000	0.0392156900
DMU6	0.2898551000	0.0002002989	0.0000000000
DMU7	0.2380952000	0.0000000000	0.0307189500

เมื่อได้ผลเฉลยน้ำหนักของปัจจัยจากแบบจำลองประสิทธิภาพแบบไขว้แล้ว จากนั้นนำค่าที่ได้จากตารางที่ 2 มาสร้างตารางประสิทธิภาพแบบไขว้ (Cross-Efficiency Matrix: CEM) โดยใช้สมการที่ 2 ตัวอย่างการคำนวณค่า E_{11}

$$E_{11} = \frac{(0.0002032445 \times 4462) + (0.0000000000 \times 17.60)}{0.2941176000 \times 3.40}$$

$$= 0.9069$$

ในส่วนของรายละเอียดของค่าประสิทธิภาพแบบไขว้อื่น ดังตารางที่ 3 จากนั้นนำค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ในตารางที่ 3 มาคำนวณประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ย (ACE) ของแต่ละหน่วยผลิตหรือ $\overline{E}_j$ ตัวอย่างการคำนวณค่าประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยของหน่วยผลิตที่ 1 โดยใช้สมการที่ (3) ดังนี้

ACE_1

หรือ $\overline{E}_1$ = (0.9069 + 0.9069 + 0.6679 + 0.9069 + 0.6679 + 0.9069 + 0.6679) / 7

= 0.8044

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

สุดท้ายจะเป็นการจัดลำดับความสำคัญสำคัญของชีวมวลตามค่าประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ย (ACE) ถ้าค่า ACE สูงกว่าจะมีลำดับที่ดีกว่า โดยการจัดลำดับความสำคัญจากดีสุดไปแย่สุดได้ดังนี้ กะลามะพร้าว (ACE=1.0000) ขี้เลื่อย (ACE=0.9171) กากอ้อย (ACE=0.8044) แกลบ (ACE=0.8036) ไมยราบ (ACE=0.7009) ผักตบชวา (ACE=0.5963) และกกธูปฤาษี (ACE=0.5780) ตามลำดับ โดยผลการจัดลำดับความสำคัญของแบบจำลองที่นำเสนอเทียบกับแบบจำลอง Benevolent และ Aggressive ดังแสดงในตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 พบว่า ผลการจัดลำดับความสำคัญของทุกวิธีมีค่าการจัดลำดับความสำคัญแบบเดียวกัน

ตารางที่ 3 เมทริกซ์ประสิทธิภาพแบบไขว้

DMU	DMU1	DMU2	DMU3	DMU4	DMU5	DMU6	DMU7
1	0.9069	0.5788	0.5868	0.8662	1.0000	0.9767	0.6805
2	0.9069	0.5788	0.5868	0.8662	1.0000	0.9767	0.6805
3	0.6679	0.5768	0.6090	0.7200	1.0000	0.8377	0.7280
4	0.9069	0.5788	0.5868	0.8662	1.0000	0.9767	0.6805
5	0.6679	0.5768	0.6090	0.7200	1.0000	0.8377	0.7280
6	0.9069	0.5788	0.5868	0.8662	1.0000	0.9767	0.6805
7	0.6679	0.5768	0.6090	0.7200	1.0000	0.8377	0.7280
ACE	**0.8044**	**0.5780**	**0.5963**	**0.8036**	**1.0000**	**0.9171**	**0.7009**
Rank	**3**	**7**	**6**	**4**	**1**	**2**	**5**

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีอื่น

วัสดุชีวมวล	Ben.	Rank	Agg.	Rank	Proposed	Rank
DMU1	0.8386	3	0.8044	3	0.8044	3
DMU2	0.5783	7	0.5780	7	0.5780	7
DMU3	0.5932	6	0.5963	6	0.5963	6
DMU4	0.8245	4	0.8036	4	0.8036	4
DMU5	1.0000	1	1.0000	1	1.0000	1
DMU6	0.9370	2	0.9171	2	0.9171	2
DMU_7	0.6941	5	0.7009	5	0.9171	5

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

4.2 ตัวอย่างที่ 2

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของชีวมวลจำนวน 23 ชนิด [34] ดังตารางที่ 1 จากการทดสอบคุณสมบัติของชีวมวลจำนวน 23 ชนิด ดังตารางที่ 5 โดยใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.1 สามารถกำหนดปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย ดังนี้ X_1 , X_2 และ X_3 หมายถึงความชื้น ปริมาณเถ้า และปริมาณสารระเหย ตามลำดับ ในส่วนของปัจจัยผลผลิต Y_1 และ Y_2 หมายถึง ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน ตามลำดับ

จากนั้นนำข้อมูลหน่วยผลิต ปัจจัยนำเข้า และปัจจัยผลผลิตในตารางที่ 5 มาคำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์โดยใช้สมการที่ (1) เมื่อได้ผลเฉลยจากการคำนวณโดยใช้ LINGO แล้ว ขั้นตอนต่อมานำข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดมาคำนวณค่าประสิทธิภาพแบบไขว้ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1 ในหัวข้อ 4.1 สุดท้ายจะนำผลการคำนวณค่า ACE มาจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิต ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของวัสดุทางการเกษตร [33]

วัสดุชีวมวล	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	CCR
ต้นฝ้าย (DMU_1)	9.33	4.77	67.95	17.95	4044.29	0.4238
ข้าวฟ่าง (DMU_2)	4.31	8.63	68.83	18.23	4051.48	0.5341
ต้นข้าวโพด (DMU_3)	13.32	6.2	64.58	15.9	4313.90	0.3606
ซังข้าวโพด (DMU_4)	4.39	1.03	80.17	14.41	4187.00	1.0000
กะลามะพร้าว (DMU_5)	11.79	0.85	64.03	23.33	4860.48	1.0000
กะลาปาล์ม (DMU_6)	13	1.3	64.55	21.05	5072.50	0.9247
ฟางข้าว (DMU_7)	2.86	11.24	65.64	20.26	3503.51	0.6961
เปลือกทุเรียน (DMU_8)	9.93	2.71	74.3	13.06	4449.45	0.6200
กากทานตะวัน (DMU_9)	11.5	3.67	64.34	20.49	4034.20	0.4787
ชานอ้อย (DMU_{10})	13.38	2.61	64.73	19.26	3972.76	0.5497
ใบจามจุรี (DMU_{11})	7.32	15.65	62.35	14.68	5078.74	0.3942
แกลบ (DMU_{12})	7.27	14.07	60.87	17.79	4009.40	0.3134
ลำต้นมันสำปะหลัง (DMU_{13})	31.54	6.22	47.73	14.51	4670.00	0.4243
เหง้ามันสำปะหลัง (DMU_{14})	41.98	3.57	41.86	12.59	4368.30	0.6100
หญ้าขจรจบ (DMU_{15})	5.91	8.04	66.97	19.08	3939.68	0.3788
หญ้าคา (DMU_{16})	5.75	6.53	65.32	22.4	3773.11	0.3760
โคกกระสุน (DMU_{17})	8.57	9.88	65.23	16.32	4340.92	0.2878
ไมยราบยักษ์ (DMU_{18})	9.25	4.15	64.38	22.22	4556.10	0.5273
ผักตบชวา (DMU_{19})	6.47	10.08	67.07	15.7	3492.13	0.3067
ไม้ยางพารา (DMU_{20})	3.94	4.54	16	73.52	6934.02	1.0000
ต้นฝ้าย (DMU_{21})	4.3	1.51	79.1	15.09	4436.00	0.9768
ข้าวฟ่าง (DMU_{22})	7.87	2.23	72.14	17.76	5179.00	0.8438
ต้นข้าวโพด (DMU_{23})	9.09	1.03	72.17	17.71	4309.40	0.8941

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีอื่น

วัสดุชีวมวล	Ben.	Rank	Agg.	Rank	Proposed	Rank
ต้นฝ้าย (DMU_1)	0.3579	14	0.3211	14	0.3251	14
ข้าวฟ่าง (DMU_2)	0.3688	12	0.3418	12	0.3454	11
ต้นข้าวโพด (DMU_3)	0.2994	17	0.2671	17	0.2727	18
ซังข้าวโพด (DMU_4)	0.7939	2	0.7308	2	0.7431	2
กะลามะพร้าว (DMU_5)	0.7242	4	0.6842	4	0.6883	4
กะลาปาล์ม (DMU_6)	0.6594	5	0.6049	5	0.6138	5
ฟางข้าว (DMU_7)	0.3605	13	0.3428	11	0.3447	12
เปลือกทุเรียน (DMU_8)	0.4817	8	0.4282	8	0.4374	8
กากทานตะวัน (DMU_9)	0.3796	11	0.3413	13	0.3441	13
ชานอ้อย (DMU_{10})	0.4085	10	0.3689	10	0.3721	10
ใบจามจุรี (DMU_{11})	0.2749	20	0.2539	19	0.2608	19
แกลบ (DMU_{12})	0.2294	23	0.2128	23	0.2168	23
ลำต้นมันสำปะหลัง (DMU_{13})	0.2549	21	0.2282	21	0.2372	21
เหง้ามันสำปะหลัง (DMU_{14})	0.2914	18	0.2665	18	0.2779	17
หญ้าขจรจบ (DMU_{15})	0.3218	16	0.2952	16	0.2983	16
หญ้าคา (DMU_{16})	0.3453	15	0.3168	15	0.3183	15
โคกกระสุน (DMU_{17})	0.2755	19	0.2504	20	0.2554	20
ไมยราบยักษ์ (DMU_{18})	0.4362	9	0.3920	9	0.3957	9
ผักตบชวา (DMU_{19})	0.2460	22	0.2262	22	0.2294	22
ไม้ยางพารา (DMU_{20})	1.0000	1	0.9578	1	0.9437	1
ต้นฝ้าย (DMU_{21})	0.7740	3	0.7035	3	0.7138	3
ข้าวฟ่าง (DMU_{22})	0.6587	6	0.5892	7	0.5991	7
ต้นข้าวโพด (DMU_{23})	0.6486	7	0.5990	6	0.6073	6

จากตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอเทียบกับแบบจำลอง Benevolent และ Aggressive พบว่ามีความสอดคล้องกันในระดับที่สูงมาก โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสเปียร์แมนของวิธีที่นำเสนอเทียบกับ Benevolent ค่า r = 0.998 และวิธีที่นำเสนอเทียบกับ Aggressive ค่า r = 0.996 รายละเอียดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมน ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนสำหรับตัวอย่างที่ 2

Correlatio	Benevole	Aggressiv	Propose
Benevolen	**1.000**	0.998	0.996
Aggressiv	0.998	**1.000**	0.998
Proposed	0.996	0.998	**1.000**

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

จากตารางที่ 6 และตารางที่ 7 แสดงผลการจัดลำดับความสำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละชนิดโดยใช้วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือนเทียบกับวิธี Benevolent และ Aggressive พบว่าการจัดลำดับด้วยวิธีทั้งสามมีความสัมพันธ์สูงโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนที่มีค่าสูงมาก ซึ่งค่าความสัมพันธ์หรือสอดคล้องกันสูงแสดงว่าวิธีนี้มีความน่าเชื่อถือสามารถใช้ในการวัดประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งได้เป็นอย่างดี

5. บทสรุป

การคัดเลือกวัสดุชีวมวลทางการเกษตรมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเป็นหัวข้อที่น่าสนใจเนื่องจากภาครัฐให้การส่งเสริมและสนับสนุนเชิงนโยบายให้ค้นหาและพัฒนาพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนพลังงานหลักของประเทศ แนวทางหนึ่งที่มีขั้นตอนการผลิตง่ายและต้นทุนในการผลิตต่ำ รวมถึงไม่ต้องใช้เทคโนโลยีชั้นสูงในการผลิต คือ การนำวัสดุชีวมวลทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งสำหรับใช้ในครัวเรือน อย่างไรก็ตามการคัดเลือกวัสดุชีวมวลมาใช้ผลิตถ่านอัดแท่งจะต้องพิจารณาคุณสมบัติหรือปัจจัยที่เกี่ยวหลายอย่างพร้อมกัน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด การวัดประสิทธิภาพและการจัดลำดับความสำคัญหรือความเหมาะสมของวัสดุจะเป็นแนวทางที่ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพโดยใช้การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล และใช้วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือนในการจัดลำดับความสำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละชนิด ผลการทดลองพบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหานี้ได้เป็นอย่างดี รวมถึงวิธีที่นำเสนอนี้มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมนเทียบกับวิธี Benevolent และ Aggressive มีค่าความสัมพันธ์สูงมาก ซึ่งหมายความว่าวิธีที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือสูงมาก และเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความสำคัญของชีวมวล เนื่องจากวิธี Benevolent และ Aggressive มีแนวคิดหรือมุมมองที่แตกต่างกันซึ่งอาจทำให้การจัดลำดับความสำคัญในบางปัญหาแตกต่างกัน แต่วิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นวิธีที่มีจุดเด่นคือมีความเรียบง่าย ชัดเจน แต่มีประสิทธิภาพสูงในการประเมินและจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิต เนื่องจากอาศัยหลักการของ TOPSIS ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ นอกจากนั้นวิธีที่นำเสนอนี้มีความยืดหยุ่นสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่นได้

สำหรับการวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยเสนอแนะให้นำเครื่องมือนี้ไปประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาอื่น เช่น การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต การวิเคราะห์และตัดสินใจในงานด้านวิศวกรรม และงานด้านการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการประเมิน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี และ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่สนับสนุนบทความวิจัยฉบับนี้ และผู้แต่งขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่พิจารณาบทความและให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ เพื่อให้คุณภาพของบทความวิจัยนี้ดียิ่งขึ้น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

7. เอกสารอ้างอิง

[1] R. Phutteesakul, The production of charcoal briquette by coconut shell and cassava rhizome, Thesis, Srinakharinwirot University, Thailand. 2010. (in Thai)

[2] 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, 2015, 23(3), 418-431. (in Thai)

[3] www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=54484. (Accessed on 4 April 2022)

[4] https://weben.dede.go.th/webmax/content/biomass-database-potential-thailand. (Accessed on 4 April 2022)

[5] K. Boonchom and N. Chaisompan, Study of charcoal briquette from longan wood, Naresuan Phayao Journal, 2020, 13(2), 51-56. (in Thai)

[6] W. Markphan, K. Suttara, J. Nukeaw and U. Tiprung, The attribute of the energy of fuel briquette from mangosteen peel and tubber wood, Burapha Science Journal, 2021, 26 (3), 1371-1389. (in Thai)

[7] R. Anantanukulwong, R. Chemae and N. Sareanu, Production of Charcoal from Agricultural Residues, YRU Journal of Science and Technology, 2019, 4(1), 47-53. (in Thai)

[8] H.A. Ajimotokan, A.O. Ehindero, K.S. Ajao, A.A. Adeleke, P.P.Ikubanni and Y.L.Shuaib-Babatab, Combustion characteristics of fuel briquettes made from charcoal particles and sawdust agglomerates, Scientific African, 2019, 6, e00202.

[9] N. Wichapa, P. Khokhajaikiat and K. Chaiphet, Aggregating the results of benevolent and aggressive models by the CRITIC method for ranking of decision-making units: a case study on seven biomass fuel briquettes generated from agricultural waste, Decision Science Letters, 2020, 10(1), 79-92.

[10] A. Karasana, E. Ilbahar, S. Cebi and C. Kahraman, Customer-oriented product design using an integrated neutrosophic AHP & DEMATEL & QFD methodology, Applied Soft Computing, 2022, 118 , 108445.

[11] A. Bilbao-Terol, M. Arenas-Parra, V. Cañal-Fernández and J. Antomil-Ibiasa, Using TOPSIS for assessing the sustainability of government bond funds, Omega, 2014, 49, 1-17.

[12] G. Zhu, J. Ma and J. Hu, A fuzzy rough number extended AHP and VIKOR for failure mode and effects analysis under uncertainty, Advanced Engineering Informatics, 2022, 51, 101454.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

[13] A. Charnes, W.W. Cooper and E. Rhodes, Measuring the efficiency of decision making units, European Journal of Operational Research, 1978, 2(6), 429-444.

[14] M. Afzalinejad, Evaluating radial efficiency considering environmental factors: A generalization of classical DEA, Measurement, 2021, 179, 109497.

[15] T.R. Sexton, R.H. Silkman and A.J. Hogan, Data envelopment analysis: Critique and extensions, New Directions for Evaluation, 1986, 32, 73-105.

[16] J. Doyle and R. Green, Efficiency and cross-efficiency in DEA: Derivations, meanings and uses, The Journal of the Operational Research Society, 1994, 45(5), 567-578.

[17] Y. Wang, K. Chi and Y. Lou, Cross-efficiency evaluation based on ideal and anti-ideal decision making units, Expert Systems with Applications, 2011, 38(8), 10312-10319.

[18] M.J. Farrell, The measurement of productive efficiency, Journal of the Royal Statistical Society. Series A: Statistics in Society, 1957, 120(3), 253-290.

[19] R.D. Banker, A. Charnes and W.W. Cooper, Some models for estimating technical and scale in efficiencies in data envelopment analysis, Management Science, 1984, 30(9), 1078-1092.

[20] C. Wei, L. Chen, R. Li and C. Tsai, Exploration of efficiency underestimation of CCR model: Based on medical sectors with DEA-R model, Expert Systems with Applications, 2011, 38(4), 3155-3160.

[21] J. Sun, J. Wu and D. Guo, Performance ranking of units considering ideal and anti-ideal DMU with common weights, Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(9), 6301-6310.

[22] A. Fazlollahi, and U. Franke, Measuring the impact of enterprise integration on firm performance using data envelopment analysis, International Journal of Production Economics, 2018, 200, 119-129.

[23] P. Fu, Z. Zhan and C. Wu, Efficiency Analysis of Chinese Road Systems with DEA and Order Relation Analysis Method: Externality Concerned, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 96, 1227-1238.

[24] Y. Fan, B. Bai, Q. Qiao, P. Kang, Y. Zhang and J. Guo, Study on eco-efficiency of industrial parks in China based on data envelopment analysis, Journal of Environmental Management, 2017, 192, 107-115.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2022.08.007

[25] C. Wang, X. Nguyen and Y. Wang, Automobile industry strategic alliance partner selection: the application of a hybrid DEA and grey theory model, Sustainability, 2016, 8(2), 173.

[26] H. Shi, Y. Wang and X. Zhang, A cross-efficiency evaluation method based on evaluation criteria balanced on interval weights, Symmetry, 2019, 11(12), 1503.

[27] N. Adler, L. Friedman and Z. Sinuany-Stern, Review of ranking methods in the data envelopment analysis context, European Journal of Operational Research, 2002, 140(2), 249-265.

[28] M. Davtalab-Olyaie, A secondary goal in DEA cross-efficiency evaluation: A one home run is much better than two doubles criterion, Journal of the Operational Research Society, 2019, 70(5), 807-816.

[29] W. Markphan, K. Suttara, J. Nukeaw and U. Tiprung, The attribute of the energy of fuel briquette from mangosteen peel and rubber wood, Burapha Science Journal, 2021, 26(3), 1371-1389. (in Thai)

[30] K.Wirunphan, T.Saiplean and P. Jaichompoo, Production of compressed charcoal fuel from the waste materials collected after processing Khao-Larm, RMUTL Engineering Journal, 2017, 2(1), 1-15. (in Thai)

[31] W. Khantirat, N. Wichapa and A. Lawong, Selecting the suitable community-based alternative energy from biomass briquettes fuel from agricultural materials using analytic hierarchy, Industrial Engineering Network 2018 (IE Network 2018), Proceedings, 2018, 323-329.

[32] W. Khantirat, N. Wichapa, A. Sriburum and U. Tarnpornsri, Selection of the suitable biomass fuel briquettes generated from agricultural waste using DEA-cross-efficiency, Journal of Engineering, RMUTT, 2020, 18(1), 33-43. (in Thai)

[33] N. Wichapa, A.Choompol and T. Sudsuansee, 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), 68-84. (in Thai)

[34] www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/hot.php. (Accessed on 4 April 2022)