วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 1 ฉบับที่ 5 กันยายน – ตุลาคม 2566
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 1 No. 5 September – October 2023

บทความวิจัย (Research Article)

วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกมสำหรับการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลในการผลิตถ่านอัดแท่ง

ประสิทธิ ไกรลมสม[1,*] และ กัมปนาท ไชยเพชร[2]

[1] สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: bileys2000@yahoo.com
(รับบทความ: 25 กันยายน 2566; แก้ไขบทความ: 7 ตุลาคม 2566; ตอบรับบทความ: 25 ตุลาคม 2566)

บทคัดย่อ

แนวคิดในการนำวัสดุชีวมวลมาทำการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานของประเทศ และเป็นแนวคิดที่ดีในการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปให้เกิดประโยชน์สูงสุด อย่างไรก็ตามการที่จะนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งจำเป็นต้องทำการประเมินศักยภาพของชีวมวลแต่ละชนิดเพื่อให้สามารถนำวัสดุชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด การประเมินศักยภาพของชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญในการเป็นเชื้อเพลิง เพราะว่าปัญหานี้มีปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาหลายปัจจัย ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะทำการประเมินศักยภาพในการเป็นเชื้อเพลิงของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ โดยมีขั้นตอนในการประเมินวัสดุชีวมวลดังนี้ ขั้นตอนแรกคือกำหนดคุณสมบัติที่สำคัญของความสามารถในการเป็นเชื้อเพลิงได้ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ ค่าความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน จากนั้นวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกมได้ถูกนำมาใช้ในการวัดศักยภาพของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด โดยวิธีการที่นำเสนอได้ถูกทดสอบวัสดุชีวมวลจำนวน 23 ชนิด ผลการศึกษาพบว่า ไม้ยางพารา ซังข้าวโพด และต้นฝ้าย เป็นวัสดุที่เหมาะสมสามลำดับแรกจากเหมาะสมมากสุดตามลำดับ นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอยังถูกทดสอบสหสัมพันธ์ของสเปียร์แมนกับวิธีการอื่นที่นิยมในวรรณกรรมพบว่ามีความสัมพันธ์สูงมาก แสดงว่าเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือสูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดศักยภาพของวัสดุชีวมวลได้

คำสำคัญ: วัสดุชีวมวล ถ่านอัดแท่ง การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม

การอ้างอิงบทความ: ประสิทธิ ไกรลมสม และ กัมปนาท ไชยเพชร, "วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกมสำหรับการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลในการผลิตถ่านอัดแท่ง", *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์,* vol. 1, no. 5, pp. 15-26, 2566.

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 1 ฉบับที่ 5 กันยายน – ตุลาคม 2566
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 1 No. 5 September – October 2023

บทความวิจัย (Research Article)

Game Cross Efficiency Method for Assessing the Potential of Biomass Materials in Briquette Production

Prasit Kailomsom[1,*] and Kumpanat Chaiphet[2]

[1] Department of Industrial Management, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University
[2] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding Author: bileys2000@yahoo.com
(Received: September 25, 2023; Revised: October 7, 2023; Accepted: October 25, 2023)

Abstract

The concept of processing biomass materials into charcoal briquettes is one way to addressing the energy shortage issue in the country. It's also a promising idea for utilizing agricultural waste effectively. However, assessing the potential of biomass materials for conversion into fuel is complex due to several critical properties that need consideration. Therefore, this research proposes a stepwise efficiency evaluation method. The initial step involves defining the key properties for the fuel potential, such as moisture content, ash content, volatile matter, fixed carbon, and calorific value. Next, game cross efficiency approach is employed to measure the potential of various biomass materials with multiple properties. The method was tested on 23 different biomass types, revealing that rubberwood, corn cob, and bamboo are the top three suitable materials for processing into the charcoal briquettes in descending order. Additionally, the proposed method was compared with well-known techniques in the literature, showing a very high correlation (Spearman rank correlation coefficient). This suggests that the proposed method is reliable and can be applied for assessing the fuel potential of different biomass materials.

Keywords: Biomass, Fuel Briquette, Data Envelopment Analysis, Cross-Efficiency Method, Game Cross-Efficiency Method

Please cite this article as: P. Kailomsom and K. Chaiphet, Game Cross Efficiency Method for Assessing the Potential of Biomass Materials in Briquette Production, "*The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*", vol. 1, no. 5, pp. 15-26, 2023

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

การใช้วัสดุชีวมวลในการผลิตถ่านอัดแท่งเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการสร้างพลังงานทดแทนและการประหยัดพลังงานสำหรับประเทศไทย แหล่งพลังงานจากชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่มีความยั่งยืนและมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีทรัพยากรธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์ ป่าไม้ และพืชชนิดหลายชนิด ซึ่งสามารถนำชีวมวลมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งสำหรับการหุงต้มได้ ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญของโลก ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่ได้จากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย, ยอดอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ยอดใบข้าวโพด ถั่วเขียว ถั่วลิสง ใบมะพร้าว และทางมะพร้าว และมาจากของเสียจากอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ซังข้าวโพด เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง ขี้เลื่อย และกะลามะพร้าว ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง และข้อดีอีกประการคือชีวมวลสามารถช่วยแก้ไขปัญหาการกำจัดของเสียจากการเกษตรของชุมชนได้ [1-3]

การนำวัสดุชีวมวลมาใช้ประโยชน์สามารถทำได้โดยตรง เช่น ถ่านอัดแท่ง ซึ่งกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งใช้เทคโนโลยีในการผลิตไม่ซับซ้อน และต้นทุนของเครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องจักรไม่สูง [5] การแปรรูปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้กลายเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งเริ่มต้นด้วยการพิจารณาคุณสมบัติหลายอย่างพร้อมกัน คุณสมบัติเหล่านี้มีค่าความชื้น (Moisture) ปริมาณเถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และค่าความร้อน (Heating Value) [4] ดังนั้นการประเมินความสำคัญของวัสดุชีวมวลสำหรับกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งจึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ เพราะว่ามีหลายเกณฑ์ (คุณสมบัติ) ที่ต้องพิจารณาไปพร้อมกัน การนำเสนอวิธีการประเมินศักยภาพของชีวมวลที่เหมาะสมจึงเป็นปัญหาที่ท้าทาย และมีความซับซ้อนและยุ่งยากต่อการตัดสินใจ ดังนั้นการเลือกวิธีการที่เหมาะสมในการประเมินศักยภาพชีวมวลจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

วิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล (Data Envelopment Analysis: DEA) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมนำมาประเมินประสิทธิภาพของทางเลือกที่มีหลายหน่วยผลิต (Decision Making Units: DMUs) และมีหลายปัจจัยทั้งปัจจัยนำเข้า (Inputs) และปัจจัยผลผลิต (Outputs)ได้ [5] อย่างไรก็ตามข้อเสียของวิธี DEA คือแต่ละหน่วยผลิตไม่สามารถจัดลำดับความสำคัญได้เพราะว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ DEA สามารถจำแนกหน่วยผลิตได้เพียง 2 ประเภท ได้แก่ หน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1) และหน่วยผลิตที่ไม่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพน้อยกว่า 1) ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาวิธี DEA ให้สามารถจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตได้ ยกตัวอย่างวิธีที่ได้รับความนิยมสูงได้แก่ วิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้(Cross-Efficiency Method) ซึ่งนำวิธีการนี้ถูกนำเสนอโดย Sexton et al. [6] อย่างไรก็ตามวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้มีข้อเสียคือในบางปัญหามีชุดคำตอบหลายค่าทำให้การประเมินค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยแตกต่างกันตามซอฟต์แวร์ที่ประมวลผล ดังนั้นเพื่อแก้ไขข้อด้อยของวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้นี้ Doyle and Green [7] เป็นคณะนักวิจัยแรกที่ได้นำเสนอวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ที่เพิ่มเป้าหมายที่สอง (Secondary Goal) ลงในตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ DEA ซึ่งวิธีที่ทั้งสองท่านได้นำเสนอและปัจจุบันเป็นที่นิยมอย่างสูงได้แก่ วิธี Aggressive Model และ Benevolent Model อย่างไรก็ตามวิธีทั้งสองยังมีข้อเสียคือในบางปัญหาการจัดลำดับอาจแตกต่างกันเพราะว่าทั้งสองวิธีมีสมการเป้าหมายแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อเอาชนะข้อด้อยของวิธีการทั้งสองนี้ Liang et al. [8] เป็นคณะวิจัยคณะแรกที่ได้นำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม (Game Cross Efficiency: GCE)

วิธีการนี้ได้นำเอาทฤษฎีเกมมาบูรณาการร่วมกับวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ ซึ่งทำให้ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ของแต่ละหน่วยผลิตมีค่าคะแนนเพียงค่าเดียว ซึ่งทำให้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้สามารถจัดลำดับหน่วยผลิตได้อย่างสมบูรณ์ วิธีการนี้ได้รับความนิยมสูงสำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับหน่วยผลิตในสถานการณ์จริง เช่น การเลือกซัพพลายเออร์ การวัดประสิทธิภาพของพลังงาน และอื่น ๆ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอวิธีประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยใช้วิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม หรือวิธี GCE ซึ่งวิธีที่นำเสนอนี้ โดยคุณสมบัติที่สำคัญของชีวมวลแต่ละชนิดจะถูกพิจารณาเป็นลำดับแรก จากนั้นวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะถูกทดสอบความน่าเชื่อถือกับตัวอย่างการคำนวณชีวมวลจำนวน 23 ชนิด ซึ่งแสดงในงานวิจัยของ ประสิทธิ ไกรลมสม และนรงค์ วิชาผา [9] ทั้งนี้วิธีการที่นำเสนอจะสามารถเป็นแนวทางหนึ่งในการประเมินศักยภาพของถ่านอัดแท่ง เพื่อให้เกิดการเลือกวัสดุชีวมวลมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด

2. การทบทวนวรรณกรรม

Charnes, Cooper and Roberts [10] ได้นำเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของวิธีการวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล เรียกว่า ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CCR ซึ่งตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยหลากหลายสาขา เช่น ด้านวิศวกรรม ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านอื่น ๆ [11, 12] การวัดประสิทธิภาพด้วยวิธี DEA (ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CCR) มีข้อดีคือ สามารถวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตจำนวนมาก โดยที่แต่ละหน่วยผลิตแต่ละหน่วยผลิตมีหลายปัจจัยได้ โดยไม่จำเป็นต้องปรับข้อมูลให้เป็นมาตรฐาน (Normalized Data) ก่อนการคำนวณ และไม่จำเป็นต้องกำหนดน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยเพราะตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ DEA (CCR) สามารถใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยที่เหมาะสมสุดของชุดน้ำหนักของแต่ละหน่วยผลิตได้ [13] อย่างไรก็ตามแม้ว่าวิธี DEA จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ของหน่วยผลิต ข้อด้อยที่สำคัญของวิธี DEA คือไม่สามารถจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตที่มี ค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์เท่ากับ 1 ได้ (มีหลายหน่วยผลิตที่มีค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์เท่ากับ 1) เพื่อเอาชนะข้อด้อยนี้ จึงมีนักวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาวิธี DEA ให้สามารถจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตได้ ยกตัวอย่างวิธีที่ได้รับความนิยมสูงได้แก่ วิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้(Cross-Efficiency Method) ซึ่งนำวิธีการนี้ถูกนำเสนอโดย Sexton et al.[6] อย่างไรก็ตามวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้มีข้อเสียคือในบางปัญหามีชุดคำตอบหลายค่าทำให้การประเมินค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยแตกต่างกันตามซอฟต์แวร์ที่ประมวลผล ดังนั้นเพื่อแก้ไขข้อด้อยของวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้นี้ Doyle and Green [7] เป็นคณะนักวิจัยกลุ่มแรกที่ได้นำเสนอวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ที่เพิ่มเป้าหมายที่สอง (Secondary Goal) ลงในตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CCR ซึ่งพวกเขาได้พัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์จำนวน 2 วิธี ได้แก่ Aggressive model และ Benevolent model ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับหน่วยผลิตในหลากหลายสาขา อย่างไรก็ตามวิธีทั้งสองยังมีข้อด้อยที่สำคัญคือในบางปัญหาการจัดลำดับอาจแตกต่างกัน เพราะว่าทั้งสองวิธีมีมุมมองที่แตกต่างกันตามสมการเป้าหมายแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อเอาชนะข้อด้อยของวิธีการทั้งสองนี้ Liang et al. [8] ได้นำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม (Game Cross Efficiency: GCE) เพื่อการจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตได้อย่างเป็นเอกภาพ วิธีการนี้ได้นำเอาทฤษฎีเกม (Game theory) มาบูรณาการร่วมกับวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ โดยการสร้างอัลกอริทึมในการพัฒนาคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้

บทความวิจัย (Research Article)

เฉลี่ยของแต่ละหน่วยผลิตในแต่ละรอบของการคำนวณ จนทำให้ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยของแต่ละหน่วยผลิตบรรลุจุดดุลยภาพของแนช (Nash equilibrium) หรือกล่าวได้ว่าค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยของแต่ละหน่วยผลิตในรอบการคำนวณสุดท้ายจะมีค่าคะแนนเพียงค่าเดียว จึงเป็นผลทำให้วิธีการนี้สามารถจัดลำดับของหน่วยผลิตได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์อย่างแพร่หลายในงานวิจัยหลากหลายสาขา เช่น การคัดเลือกผู้ส่งมอบ การคัดเลือกแหล่งพลังงานชีวมวลที่เหมาะสม และอื่น ๆ

3. วิธีการ

ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธี GCE ในการประเมินศักยภาพของชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง

ภาพที่ 1 ขั้นตอนการคำนวณของวิธี GCE ในการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง

3.1 คำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CCR

กำหนดข้อมูลของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดเป็นหน่วยผลิต (Decision Making Unit: DMU) และกำหนดคุณสมบัติของแต่ละวัสดุชีวมวลเป็นปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิต ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพันธ์ (Relative Efficiency) จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CCR [10] ดังนี้

กำหนดให้:

i เป็นดัชนีของปัจจัยนำเข้า
r เป็นดัชนีของปัจจัยผลผลิต
j เป็นดัชนีของหน่วยผลิต
k เป็นดัชนีของหน่วยผลิตที่ถูกประเมิน
X_{ij} คือ ค่าของปัจจัยนำเข้า i และหน่วยผลิต j
Y_{rj} คือ ค่าของปัจจัยผลผลิต r และหน่วยผลิต j
u_{rk} คือน้ำหนักของปัจจัยผลผลิต r และหน่วยผลิต k
v_{ik} คือน้ำหนักของปัจจัยนำเข้าi และหน่วยผลิต k

$$
\begin{aligned}
E_{kk} &= Max \sum_{r=1}^{S} u_{rk} Y_{rk} \\
\sum_{i=1}^{m} v_{ik} X_{ik} &= 1, \ k = 1,2,...,n \\
\sum_{r=1}^{S} u_{rk} Y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_{ik} X_{ij} &\le 0, \ j = 1,2,...,n \\
v_{ik}, u_{rk} &\ge 0, \ \forall i, \forall k, \forall r
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (1) สมการเป้าหมายจะเป็นการคำนวณหาน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละหน่วยผลิตโดยใช้ปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิตที่กำหนด โดยแต่ละหน่วยผลิตจะคำนวณน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยโดยอิสระทำให้เกิดการลำเอียงในการประเมินหน่วยผลิตเพราะว่าแต่ละหน่วยผลิตจะพยายามหาชุดน้ำหนักที่ดีที่สุดของตนเองโดยอิสระ ซึ่งส่งผลให้วิธีการนี้จำแนกได้เพียงหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพ (คะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์เท่ากับ 1) และหน่วยผลิตที่ไม่มีประสิทธิภาพ (คะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์น้อยกว่า 1) ด้วยเหตุนี้ Sexton et al. [6] จึงได้คำนวณค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดน้ำหนักของผลเฉลยน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดของตัวแบบ CCR ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2

3.2 คำนวณประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยโดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CE

วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้(Cross-Efficiency method: CE) เป็นการจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตโดยอาศัยการประเมินตนเอง (Self-assessment) และการประเมินโดยผู้อื่น (Peer-assessment) โดยใช้ผลเฉลยนำหนักของปัจจัยที่ได้จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CCR ดังแสดงในตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (1) กำหนดให้หน่วยผลิตที่ถูกประเมินเป็น DMU_k แล้วค่าคะแนนประสิทธิแบบไขว้เฉลี่ยของแต่ละหน่วยผลิต ดังแสดงในสมการที่ (2) และสมการที่ (3)

$$E_{kj} = \sum_{r=1}^{s} u_{rk}^{*} y_{rj} / \sum_{i=1}^{m} v_{ik}^{*} x_{ij}, k, j = 1, 2, \ldots, n \tag{2}$$

Sexton et al. [6] ได้นิยามค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ย (Average Cross-Efficiency: ACE) ของแต่ละหน่วยผลิตดังนี้

$$ACE = \bar{E}_j = (1/n)\sum_{k=1}^{n} E_{kj}, k, j = 1, 2, ..., n \tag{3}$$

ถ้าค่าคะแนน ACE ของหน่วยผลิตสูงกว่าหมายถึงลำดับความสำคัญสูงกว่า อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่สามารถจัดลำดับหน่วยผลิตได้เหมือนกันหากใช้ซอฟต์แวร์ต่างกัน (ปัญหามีผลเฉลยหลายชุดคำตอบ) ด้วยเหตุนี้วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม หรือวิธี GCE จึงถูกนำเสนอในการแก้ข้อด้อยของวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ดั้งเดิมนี้ ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3

3.3 คำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยโดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ GCE

Liang et al. [8] ได้นำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม (Game Cross Efficiency: GCE) สำหรับการจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิต โดยวิธีการนี้ได้นำเอาทฤษฎีเกม (Game theory) มาบูรณาการร่วมกับวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้เดิม โดยค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยของเกม (GCE) สามารถดำเนินการดังนี้

$$\begin{aligned}
&\max \sum_{r=1}^{s} u_{rj}^{d} y_{rj} \\
&s.t.: \sum_{i=1}^{m} v_{ij}^{d} x_{il} - \sum_{r=1}^{s} u_{rj}^{d} y_{rl} \geq 0, \\
&\sum_{i=1}^{m} v_{ij}^{d} x_{ij} = 1, \\
&\alpha_d \sum_{i=1}^{m} v_{ij}^{d} x_{id} - \sum_{r=1}^{s} u_{rj}^{d} y_{rd} \leq 0, \\
&v_{ij}^{d} \geq 0, u_{rj}^{d} \geq 0, r = 1, 2, ..., s, i = 1, 2, ..., m.
\end{aligned} \tag{4}$$

จากนั้นพยายามพัฒนาคำตอบ (α_d) โดยการคำนวณเริ่มตั้งแต่ รอบที่ 1 จนถึงรอบที่ n เพื่อให้มีค่าคะแนนประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบ โดยดำเนินการไปจนบรรลุจุดดุลยภาพของแนช (Nash equilibrium) โดยการคำนวณรอบที่ 1 จะกำหนดให้ α_d แทนค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (3) ในส่วนรอบที่ 2 เป็นต้นไปจะใช้ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยจากตัวแบบ GCE (4) จากนั้นดำเนินการต่อไปเรื่อย ๆ จนผลต่างของรอบสุดท้ายและรอบรองสุดท้ายเท่ากับ 0.001 (ε =0.001) สุดท้ายค่าคะแนนที่จุดดุลยภาพของแนชจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (4) จะเป็นค่าคะแนน GCE โดยค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ย (GCE score) ที่มีค่ามากกว่าหมายถึงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตนั้นสูงกว่า

4. ผลการวิจัย

วิธี GCE ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะถูกทดสอบกับปัญหาการคัดเลือกวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง โดยใช้ตัวอย่างการคำนวณจากข้อมูลวัสดุชีวมวลจำนวน 23 ชนิด ดังตารางที่ 1

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติสำคัญของวัสดุชีวมวล [9]

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) 2	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}) 1	3.94	4.54	16	73.52	6934.02	1.0000
ต้นฝ้าย (DMU_{21}) 3	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

จากตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของชีวมวลจำนวน 23 ชนิด 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

4.1 ผลการคำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CCR

จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (1) หรือตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CCR นำไปเขียนโค้ดโดยใช้ซอฟต์แวร์ Lingo ดังภาพที่ 2

จากนั้นนำเข้าข้อมูลในตารางที่ 1 ผลที่ได้คือค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ดังแสดงในตารางที่ 1 สดมภ์สุดท้าย

4.2 ผลการคำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CE

จากนั้นสามการที่ (2) และสมการที่ (3) สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ย ถูกนำมาโค้ดด้วยซอฟต์แวร์ Lingo ดังภาพที่ 3

บทความวิจัย (Research Article)

```
MODEL:
SETS:
        DMU/1..23/: ;
        FACTOR/1..5/;
        DXF(DMU, FACTOR): X ;
        DMUK/1..23/:ACE,CCR;
        IK(DMU,DMUK):INPUT,OUTPUT,CE;
        DF(DMUK, FACTOR):W;
        ENDSETS
DATA:
        X,NINPUTS =
@OLE('C:\Users\OneDrive\เดสก์ท็อป\Paper_EN
journal\23bio.xlsx','X','NINPUTS');
ENDDATA
MAX=@SUM(DMUK (K):CCR(K));
@FOR(DMUK(K):CCR(K)=@SUM(FACTOR(J)|J #GT#
NINPUTS:X(K, J)*W(K, J)));
@FOR(DMUK(K):@SUM(FACTOR(J)| J #LE#
NINPUTS:X(K, J)*W(K, J))=1);
@FOR(DMUK(K):@FOR(DMU(I):@SUM(FACTOR(J)| J
#GT# NINPUTS:X(I, J)*W(K, J))<=
@SUM(FACTOR(J)| J #LE# NINPUTS:X(I, J)*W(
K, J))));
@FOR(DF(K, J):W(K,J)>=0);

END
```

ภาพที่ 2 โค้ดของ Lingo สำหรับ CCR model

```
MODEL:
SETS:
        DMU/1..23/: ;
        FACTOR/1..5/;
        DXF(DMU, FACTOR): X ;
        DMUK/1..23/:ACE,CCR;
        IK(DMU,DMUK):INPUT,OUTPUT,CE;
        DF(DMUK, FACTOR):W;
        ENDSETS
DATA:
        X,NINPUTS =
@OLE('C:\Users\OneDrive\เดสก์ท็อป\Paper_EN
journal\23bio.xlsx','X','NINPUTS');
ENDDATA
MAX=@SUM(DMUK (K):CCR(K));
@FOR(DMUK(K):CCR(K)=@SUM(FACTOR(J)|J #GT#
NINPUTS:X(K, J)*W(K, J)));
@FOR(DMUK(K):@SUM(FACTOR(J)| J #LE# NINPUTS:X(K,
J)*W(K, J))=1);
@FOR(DMUK(K):@FOR(DMU(I):@SUM(FACTOR(J)| J #GT#
NINPUTS:X(I, J)*W(K, J))<=
@SUM(FACTOR(J)| J #LE# NINPUTS:X(I, J)*W(K,
J))));
@FOR(DF(K, J): W(K,J)>=0);
```

```
!Cross efficiency for each DMU;
@FOR(IK(I,K): INPUT(I,K)=@SUM(FACTOR(J)|J #LE#
NINPUTS:X(K, j)*W(I, J)));
@FOR(IK(I,K): OUTPUT(I,K)=@SUM(FACTOR(J)|J #GT#
NINPUTS:X(K, j)*W(I, J)));
@FOR(IK(I,K): CE(I,K)=OUTPUT(I,K)/INPUT(I,K));
@FOR(DMUK(K): ACE(K)=@SUM(DMU(I):CE(I,K))/@SIZE(DMU));
END
```

ภาพที่ 3 โค้ดของ Lingo สำหรับ CE model

จากนั้นทำการประมวลผลจะได้ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยของแต่ละวัสดุชีวมวลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยของวัสดุชีวมวล 23 ชนิด

วัสดุชีวมวล	ACE	วัสดุชีวมวล	ACE
DMU_1	0.3552	DMU_{13}	0.2482
DMU_2	0.3721	DMU_{14}	0.2825
DMU_3	0.2960	DMU_{15}	0.3236
DMU_4	0.7939	DMU_{16}	0.3468
DMU_5	0.7028	DMU_{17}	0.2762
DMU_6	0.6408	DMU_{18}	0.4320
DMU_7	0.3640	DMU_{19}	0.2475
DMU_8	0.4745	DMU_{20}	**1.0000**
DMU_9	0.3736	DMU_{21}	0.7760
DMU_{10}	0.3993	DMU_{22}	0.6507
DMU_{11}	0.2767	DMU_{23}	0.6341
DMU_{12}	0.2308		

จากตารางที่ 2 พบว่าค่าประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยสูงสุดคือ ไม้ยางพารา มีค่าคะแนนเท่ากับ 1.00

4.3 ผลการคำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ GCE

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (4) จะถูกนำมาโค้ดด้วยซอฟต์แวร์ Lingo ดังภาพที่ 4

```
MODEL:
        SETS:
        DMU/1..23/:GCE_SCORE ;
        FACTOR/1..5/;

        DXF(DMU, FACTOR):X
        DMUK/1..23/:alpha1,alpha2,alpha3,alpha4
,alpha5,alpha6,alpha7;
```

บทความวิจัย (Research Article)

```
        DF(DMUK, FACTOR):
        KI(DMUK, DMU):E
        IK(DMU,DMUK):INPUT,OUTPUT,CE;
        KIJ(DMUK, DMU,FACTOR):W
        ENDSETS
        DATA:
        X,NINPUTS,alpha1,alpha2,alpha3,alpha
4,alpha5,alpha6,alpha7=
        @OLE('C:\Users\OneDrive\เดสก์ท็อป\Paper_EN
journal\23bio.xlsx',
        'X','NINPUTS','alpha1','alpha2','alp
ha3','alpha4','alpha5','alpha6','alpha7');
        ENDDATA
        Max=@SUM(KI(K,I):E(K,I));
        @FOR(KI(K,I):E(K,I)=@SUM(FACTOR(J)|J #GT#
NINPUTS :W(K,I,J)*X(I, J)));
        @FOR(KI(K,I):@SUM(FACTOR(J)|J #LE#
NINPUTS :W(K,I,J)*X(I,J))=1);
        @FOR(KI(K,I):@SUM(FACTOR(J)| J #LE#
NINPUTS :alpha7(K)*W(K,I,J)*X(K, J))<=
                                @SUM(FACTOR(J)|J
#GT# NINPUTS:W(K,I,J)*X(K, J)));
        @FOR(KI(K,I):@FOR(DMU(L):@SUM(FACTOR(J)|J
#LE# NINPUTS :W(K,I,J)*X(L,J))>=
        @SUM(FACTOR(J)|J #GT# NINPUTS:
W(K,I,J)*X(L, J))));
        @FOR(KIJ(K,I,J):W(K,I,J)>=0);
        @FOR(DMU(I):GCE_SCORE(I)
=@SUM(DMUK(K):E(K,I))/@SIZE(DMUK));
END
```

ภาพที่ 4 โค้ดของ Lingo สำหรับ GCE model

จากนั้นป้อนข้อมูลในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ลงในโค้ดที่สร้างขึ้น จากนั้นทำการประมวลผล ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาแต่ละหน่วยผลิต พบว่าค่าคะแนน GCE จะบรรลุจุดดุลภาพของแนชที่รอบที่ 8 เมื่อกำหนดค่า ε เท่ากับ 0.001 นอกจากนี้หากพิจารณา DMU_1 จะเห็นว่าแนวโน้มการพัฒนาคำตอบจากค่าเริ่มต้นคือ ค่า GCE=0.355 จนสุดท้ายบรรลุจุดดุลยภาพของแนชในรอบที่ 8 โดยค่า GCE เท่ากับ 0.394 ดังแสดงในภาพที่ 5

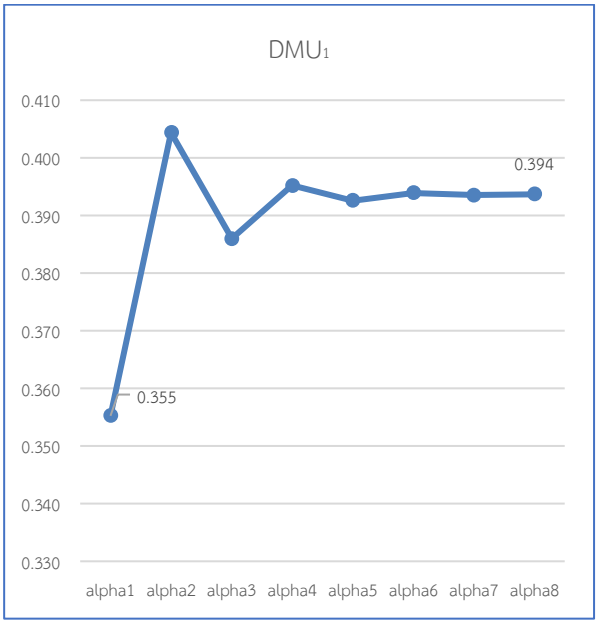
จากภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าค่าคะแนนประสิทธิภาพ GCE ของ DMU_1 จะบรรลุจุดดุลยภาพของแนชในรอบที่ 8 (คำตอบปรับปรุงจนมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง) ซึ่งเป็นไปตามการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์โดย [8] นอกจากนี้เมื่อทดสอบสหสัมพันธ์สเปียร์แมนของวิธีที่นำเสนอกับวิธีการอื่นในวรรณกรรมพบว่า วิธีที่นำเสนอมีค่าความสัมพันธ์กับวิธี CE, Aggressive และ Benevolent เท่ากับ 0.979, 0.974 และ 0.976 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นวิธีที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือสูงมาก สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการคัดเลือกชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งได้ จากผลการวิจัยพบว่าไม้ยางพารา (DMU_{20}) เป็นวัสดุชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง โดยลำดับความเหมาะสมของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 การพัฒนาคำตอบของวิธี GCE

ชีวมวล	รอบที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
DMU_1	0.355	0.404	0.386	0.395	0.393	0.394	0.394	0.394
DMU_2	0.372	0.426	0.402	0.410	0.406	0.407	0.407	0.407
DMU_3	0.296	0.336	0.319	0.328	0.325	0.327	0.326	0.326
DMU_4	0.794	0.983	0.923	0.954	0.944	0.948	0.947	0.947
DMU_5	0.703	0.855	0.778	0.816	0.807	0.812	0.810	0.811
DMU_6	0.641	0.787	0.716	0.752	0.743	0.748	0.746	0.747
DMU_7	0.364	0.440	0.413	0.422	0.417	0.419	0.418	0.418
DMU_8	0.474	0.569	0.530	0.550	0.544	0.547	0.546	0.547
DMU_9	0.374	0.438	0.409	0.423	0.420	0.422	0.421	0.421

บทความวิจัย (Research Article)

ชีวมวล	รอบที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
DMU_{10}	0.399	0.482	0.443	0.462	0.458	0.460	0.459	0.460
DMU_{11}	0.277	0.310	0.296	0.301	0.298	0.299	0.299	0.299
DMU_{12}	0.231	0.255	0.245	0.249	0.247	0.247	0.247	0.247
DMU_{13}	0.248	0.336	0.301	0.321	0.316	0.318	0.318	0.318
DMU_{14}	0.283	0.438	0.379	0.416	0.407	0.411	0.410	0.410
DMU_{15}	0.324	0.350	0.338	0.342	0.340	0.341	0.340	0.340
DMU_{16}	0.347	0.369	0.359	0.363	0.361	0.361	0.361	0.361
DMU_{17}	0.276	0.285	0.281	0.283	0.282	0.282	0.282	0.282
DMU_{18}	0.432	0.498	0.472	0.485	0.481	0.483	0.482	0.483
DMU_{19}	0.247	0.270	0.260	0.264	0.262	0.262	0.262	0.262
DMU_{20}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
DMU_{21}	0.776	0.955	0.895	0.924	0.914	0.918	0.917	0.917
DMU_{22}	0.651	0.786	0.734	0.760	0.752	0.756	0.755	0.756
DMU_{23}	0.634	0.794	0.725	0.759	0.750	0.754	0.753	0.754



ภาพที่ 5 การพัฒนาคำตอบของ DMU_1 โดยใช้วิธี GCE

ตารางที่ 4 ลำดับความเหมาะสมของวัสดุชีวมวล 23 ชนิด โดยใช้วิธี GCE

ชีวมวล	GCE	Rank	ชีวมวล	GCE	Rank
DMU_1	0.394	15	DMU_{13}	0.318	19
DMU_2	0.407	14	DMU_{14}	0.410	13
DMU_3	0.326	18	DMU_{15}	0.340	17
DMU_4	0.947	2	DMU_{16}	0.361	16
DMU_5	0.811	4	DMU_{17}	0.282	21
DMU_6	0.747	7	DMU_{18}	0.483	9
DMU_7	0.418	12	DMU_{19}	0.262	22
DMU_8	0.547	8	DMU_{20}	1.000	1
DMU_9	0.421	11	DMU_{21}	0.917	3
DMU_{10}	0.460	10	DMU_{22}	0.756	5
DMU_{11}	0.299	20	DMU_{23}	0.754	6
DMU_{12}	0.247	23			

5. สรุปผล

การผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุจากชีวมวลเป็นหนึ่งในแนวคิดที่ดีสำหรับการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานของประเทศได้ นอกจากนี้ยังเป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียจากภาคการเกษตรมาแปรรูป

ให้เกิดประโยชน์และเป็นการกำจัดของเสียได้ด้วย อย่างไรก็ตาม การแปรรูปวัสดุชีวมวลให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงหรือถ่านอัดแท่งจำเป็นต้องวิเคราะห์ศักยภาพของชนิดของชีวมวลแต่ละชนิดโดยใช้ปัจจัยที่สำคัญ เช่น ความชื้น ปริมาณสารเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องทำการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลมีหลายปัจจัย ซึ่งทำให้การประเมินศักยภาพวัสดุชีวมวลนั้นยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องเลือกเครื่องมือหรือวิธีการประเมินที่เหมาะสมมาประเมินศักยภาพของชีวมวล งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้วิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม (วิธี GCE) โดยขั้นตอนในการประเมินศักยภาพวัสดุชีวมวลดังนี้ ลำดับแรกจะต้องระบุปัจจัยที่สำคัญสำหรับการกำหนดความเหมาะสมของเชื้อเพลิง ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดปัจจัยที่สำคัญทั้งหมด 5 ปัจจัย ดังนี้ ค่าความร้อน ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และความชื้น สำหรับใช้ในการประเมินวัสดุชีวมวลจำนวน 23 ชนิด ผลการวิจัยพบว่า ไม้ยางพารา ข้าวโพด และต้นฝ้าย เป็นวัสดุชีวมวล 3อันแรกที่มีความเหมาะสมในการนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับวิธีการที่นิยมในวรรณกรรม ซึ่งผลการทดสอบสหสัมพันธ์ของสเปียร์แมนพบว่าวิธีที่นำเสนอมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสเปียร์แมนสูงมาก นั่นหมายความว่าวิธีการที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้ในการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลในงานวิจัยนี้ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี และมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่สนับสนุนบทความวิจัยฉบับนี้ และผู้แต่งขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่พิจารณาบทความและให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ เพื่อให้คุณภาพของบทความวิจัยนี้ดียิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] นรงค์ วิชาผา, อัจฉรา ชุมพล และ ไทยทัศน์ สุดสวนสี, "การประยุกต์ใช้เทคนิค Hybrid DEA-TOPSIS สำหรับการคัดเลือกวัสดุ ชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูป เป็น ถ่านอัดแท่ง," วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, หน้า 63-80, 2019.

[2] N. Wichapa and S. Sodsoon, "A Novel Multiobjective Game IDEA Cross-Efficiency Method Based on Boolean Possibility Degree for Ranking Biomass Materials With Interval Data," *IEEE Access,* vol. 10, pp. 96626-96642, 2022.

[3] K. Promdee *et al.*, "Characterization of carbon materials and differences from activated carbon particle (ACP) and coal briquettes product (CBP) derived from coconut shell via rotary kiln," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 75, pp. 1175-1186, 2017.

[4] 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,* vol. 10, no. 1, pp. 79-92, 2021.

[5] 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,* vol. 192,

pp. 107-115, 2017/05/01/ 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.048.

[6] T. R. Sexton, R. H. Silkman, and A. J. Hogan, "Data envelopment analysis: Critique and extensions," *New Directions for Program Evaluation,* vol. 1986, no. 32, pp. 73-105, 1986, doi: https://doi.org/10.1002/ev.1441.

[7] J. Doyle and R. Green, "Efficiency and Cross-Efficiency in DEA: Derivations, Meanings and Uses," *The Journal of the Operational Research Society,* vol. 45, no. 5, pp. 567-578, 1994, doi: 10.2307/2584392.

[8] L. Liang, J. Wu, W. D. Cook, and J. Zhu, "The DEA Game Cross-Efficiency Model and Its Nash Equilibrium," *Operations Research,* vol. 56, no. 5, pp. 1278-1288, 2008.

[9] ประสิทธิ์ ไกรลมสม และ นรงค์ วิชาผา, "การวัดประสิทธิภาพและจัดลำดับความ สำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ ทางการเกษตรโดยใช้วิธีประสิทธิภาพแบบ ไขว้เสมือน," วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 230-246, 2022.

[10] A. Charnes, W. W. Cooper, and E. Rhodes, "Measuring the efficiency of decision making units," *European Journal of Operational Research,* vol. 2, no. 6, pp. 429-444, 1978/11/01/ 1978, doi: https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8.

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

[12] J. Sun, J. Wu, and D. Guo, "Performance ranking of units considering ideal and anti-ideal DMU with common weights," *Applied Mathematical Modelling,* vol. 37, no. 9, pp. 6301-6310, 2013.

[13] C.-N. Wang, X.-T. Nguyen, and Y.-H. Wang, "Automobile industry strategic alliance partner selection: The application of a hybrid DEA and grey theory model," *Sustainability,* vol. 8, no. 2, p. 173, 2016.