

วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกมสำหรับการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลในการผลิตถ่านอัดแท่ง

ประสิทธิ์ ไกรลสม^{1,*} และ กัมปนาท ไชยเพชร²

¹ สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: biley2000@yahoo.com

(รับบทความ: 25 กันยายน 2566; แก้ไขบทความ: 7 ตุลาคม 2566; ตอรับบทความ: 25 ตุลาคม 2566)

บทคัดย่อ

แนวคิดในการนำวัสดุชีวมวลมาทำการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานของประเทศ และเป็นแนวคิดที่ดีในการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปให้เกิดประโยชน์สูงสุด อย่างไรก็ตามการที่จะนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งจำเป็นต้องทำการศึกษาศักยภาพของชีวมวลแต่ละชนิดเพื่อให้สามารถนำวัสดุชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด การประเมินศักยภาพของชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญในการเป็นเชื้อเพลิง เพราะว่าปัญหานี้มีปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาหลายปัจจัย ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะทำการประเมินศักยภาพในการเป็นเชื้อเพลิงของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ โดยมีขั้นตอนในการประเมินวัสดุชีวมวลดังนี้ ขั้นตอนแรกคือกำหนดคุณสมบัติที่สำคัญของความสามารถในการเป็นเชื้อเพลิงได้ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ ค่าความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน จากนั้นวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกมได้ถูกนำมาใช้ในการวัดศักยภาพของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิด โดยวิธีการที่นำเสนอได้ถูกทดสอบกับวัสดุชีวมวลจำนวน 23 ชนิด ผลการศึกษาพบว่า ไม้ยางพารา ซึ่งข้าวโพด และต้นฝ้าย เป็นวัสดุที่เหมาะสมลำดับแรกจากเหมาะสมมากที่สุดตามลำดับ นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอยังถูกทดสอบหสัมพันธ์ของสเปียร์แมนกับวิธีการอื่นที่นิยมในวรรณกรรมพบว่ามีความสัมพันธ์สูงมาก แสดงว่าเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือสูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดศักยภาพของวัสดุชีวมวลได้

คำสำคัญ: วัสดุชีวมวล ถ่านอัดแท่ง การวิเคราะห์แบบล้อมกรอบข้อมูล วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม

การอ้างอิงบทความ: ประสิทธิ์ ไกรลสม และ กัมปนาท ไชยเพชร, "วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกมสำหรับการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลในการผลิตถ่านอัดแท่ง," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 1, ฉบับที่ 5, หน้า 15-26, 2566.

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

Prasit Kailomsom^{1,*} and Kumpanat Chaiphet²

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 address 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, a 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 แหล่งพลังงานจากชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่มีความยั่งยืนและมีมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีทรัพยากรธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์ ป่าไม้ และพืชชนิดหลายชนิด ซึ่งสามารถนำชีวมวลมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งสำหรับการหุงต้มได้ ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญของโลก ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่ได้จากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย, ยอดอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ยอดใบข้าวโพด ถั่วเขียว ถั่วลิสง ใบมะพร้าว และทางมะพร้าว และมาจากของเสียจากอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ชังข้าวโพด เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง ชี้เลื่อย 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 ดังนั้นการเลือก

วิธีการที่เหมาะสมในการประเมินศักยภาพชีวมวลจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

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 ดังนั้นเพื่อแก้ไขข้อด้อยของวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ 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)

ประสิทธิภาพ โกรธสม และ กัมปนาท ไชยเพชร, วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกมสำหรับการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลในการผลิตถ่านอัดแท่ง

บทความวิจัย (Research Article)

วิธีการนี้ได้นำเอาทฤษฎีเกมมาบูรณาการร่วมกับวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ ซึ่งทำให้ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ของแต่ละหน่วยผลิตมีค่าคะแนนเพียงค่าเดียว ซึ่งทำให้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้สามารถจัดลำดับหน่วยผลิตได้อย่างสมบูรณ์ วิธีการนี้ได้รับความนิยมสูงสำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับหน่วยผลิตในสถานการณ์จริง เช่น การเลือกซัพพลายเออร์ การวัดประสิทธิภาพของพลังงาน และอื่น ๆ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอวิธีประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยใช้วิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม หรือวิธี GCE ซึ่งวิธีที่นำเสนอนี้ โดยคุณสมบัติที่สำคัญของชีวมวลแต่ละชนิดจะถูกพิจารณาเป็นลำดับแรก จากนั้นวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะถูกทดสอบความน่าเชื่อถือกับตัวอย่างการคำนวณชีวมวลจำนวน 23 ชนิด ซึ่งแสดงในงานวิจัยของ ประสิทธิ์ ไกรลมสม และนรงค์ วิชาพา [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) สามารถใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของชุดน้ำหนักของแต่ละหน่วยผลิตได้ [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 ดังนั้นเพื่อแก้ไขข้อด้อยของวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ Doyle and Green [7] เป็นคณะนักวิจัยกลุ่มแรกที่ได้นำเสนอวิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ที่เพิ่มเป้าหมายที่สอง (Secondary Goal) ลงในตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CCR ซึ่งพวกเขาได้พัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์จำนวน 2 วิธี ได้แก่ Aggressive model และ Benevolent model ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับหน่วยผลิตในหลากหลายสาขา อย่างไรก็ตามวิธีทั้งสองยังมีข้อด้อยที่สำคัญคือในบางปัญหาการจัดลำดับอาจแตกต่างกันเพราะว่าทั้งสองวิธีมีมุมมองที่แตกต่างกันตามสมการเป้าหมายแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อเอาชนะข้อด้อยของวิธีการทั้งสองนี้ Liang et al. [8] ได้นำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม (Game Cross Efficiency: GCE) เพื่อการจัดลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตได้อย่างเป็นเอกภาพ วิธีการนี้ได้นำเอาทฤษฎีเกม (Game theory) มาบูรณาการร่วมกับวิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ โดยการสร้างอัลกอริทึมในการพัฒนาคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้

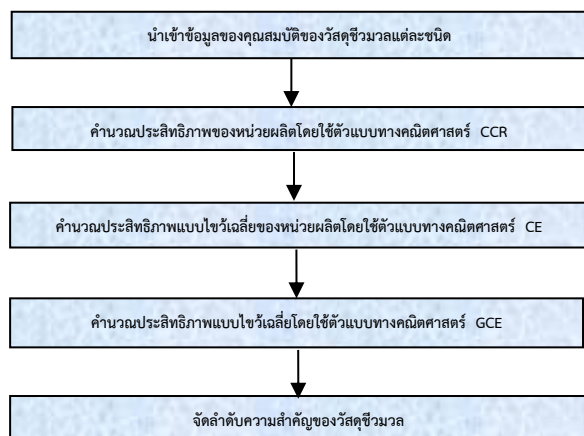
ประสิทธิภาพ ไกรลมสม และ กัมปนาท ไชยเพชร, วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกมสำหรับการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลในการผลิตถ่านอัดแท่ง

บทความวิจัย (Research Article)

เฉลี่ยของแต่ละหน่วยผลิตในแต่ละรอบของการคำนวณ จนทำให้ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยของแต่ละหน่วยผลิตบรรลุจุดดุลยภาพของแนช (Nash equilibrium) หรือกล่าวได้ว่าค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยของแต่ละหน่วยผลิตในรอบการคำนวณสุดท้ายจะมีค่าคะแนนเพียงค่าเดียว จึงเป็นผลทำให้วิธีการนี้สามารถจัดลำดับของหน่วยผลิตได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์อย่างแพร่หลายในงานวิจัยหลากหลายสาขา เช่น การคัดเลือกผู้ส่งมอบ การคัดเลือกแหล่งพลังงาน ชีวมวลที่เหมาะสมและอื่น ๆ

3. วิธีการ

รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธี GCE ในการประเมินศักยภาพของชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง



รูปที่ 1 ขั้นตอนการคำนวณของวิธี GCE ในการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง

3.1 คำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CCR

กำหนดข้อมูลของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดเป็นหน่วยผลิต (Decision Making Unit: DMU) และ

กำหนดคุณสมบัติของแต่ละวัสดุชีวมวลเป็นปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิต ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ (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} คือน้ำหนักของปัจจัยนำเข้า i และหน่วยผลิต k

$$\begin{aligned}
 E_{kk} &= \text{Max} \sum_{r=1}^S u_{rk} Y_{rk} \\
 \sum_{i=1}^m v_{ik} X_{ik} &= 1, \quad k = 1, 2, \dots, n \\
 \sum_{r=1}^S u_{rk} Y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_{ik} X_{ij} &\leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\
 v_{ik}, u_{rk} &\geq 0, \quad \forall i, \forall k, \forall r
 \end{aligned} \tag{1}$$

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 แล้วค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยของแต่ละหน่วยผลิต ดังแสดงในสมการที่ (2) และสมการที่ (3)

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

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

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

ถ้าค่าคะแนน ACE ของหน่วยผลิตสูงกว่า หมายถึงลำดับความสำคัญสูงกว่า 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

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{r=1}^s u_{rj}^d y_{rj} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^m v_{ij}^d x_{ii} - \sum_{r=1}^s u_{rj}^d y_{ri} \geq 0, \\ & \sum_{i=1}^m v_{ij}^d x_{ij} = 1, \\ & \alpha_d \sum_{i=1}^m v_{ij}^d x_{id} - \sum_{r=1}^s u_{rj}^d y_{rd} \leq 0, \\ & v_{ij}^d \geq 0, u_{rj}^d \geq 0, r = 1, 2, \dots, s, i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (4)$$

จากนั้นพยายามพัฒนาคำตอบ (α_d) โดยการคำนวณเริ่มตั้งแต่ รอบที่ 1 จนถึงรอบที่ n เพื่อให้มีค่าคะแนนประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบ โดยดำเนินการไปจนบรรลุลุดดุลยภาพของแนช (Nash equilibrium) โดยการคำนวณรอบที่ 1 จะกำหนดให้ α_d แทนค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (3) ในส่วนรอบที่ 2 เป็นต้นไป จะใช้ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยจากตัวแบบ GCE (4) จากนั้นดำเนินการต่อไปเรื่อย ๆ จนผลต่างของรอบสุดท้ายและรอบรองสุดท้ายเท่ากับ 0.001 ($\varepsilon = 0.001$) 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 ดังรูปที่ 2

จากนั้นนำเข้าข้อมูลในตารางที่ 1 ผลที่ได้คือค่าคะแนนประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ดังแสดงในตารางที่ 1 สดมภ์สุดท้าย

4.2 ผลการคำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ยจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ CE

จากนั้นสามารถที่ (2) และสมการที่ (3) สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพแบบไขว้เฉลี่ย ถูกนำมาโค้ดด้วยซอฟต์แวร์ Lingo ดังรูปที่ 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\naron\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
```

รูปที่ 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\naron\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
```

```
!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
```

รูปที่ 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) จะถูกนำมาแก้ด้วยซอฟต์แวร์ Lingo ดังรูปที่ 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\naron\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

```

รูปที่ 4 โค้ดของ Lingo สำหรับ GCE model

จากนั้นป้อนข้อมูลในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ลงในโค้ดที่สร้างขึ้น จากนั้นทำการประมวลผล ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การพัฒนาคำตอบของวิธี GCE

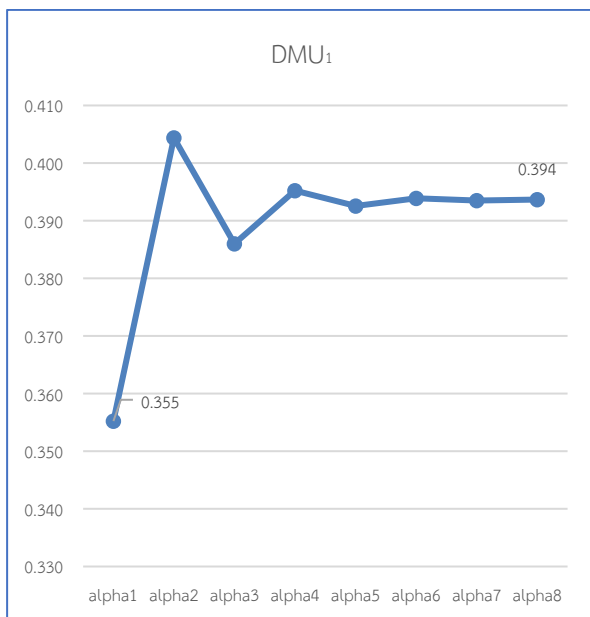
ชีวมวล	รอบที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
DMU ₁	0.355	0.404	0.386	0.395	0.393	0.394	0.394	0.394
DMU ₂	0.372	0.426	0.402	0.410	0.406	0.407	0.407	0.407
DMU ₃	0.296	0.336	0.319	0.328	0.325	0.327	0.326	0.326
DMU ₄	0.794	0.983	0.923	0.954	0.944	0.948	0.947	0.947
DMU ₅	0.703	0.855	0.778	0.816	0.807	0.812	0.810	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

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาแต่ละหน่วยผลิตพบว่าค่าคะแนน GCE จะบรรลุลดุดุลภาพของแนชที่รอบที่ 8 เมื่อกำหนดค่า ε เท่ากับ 0.001 นอกจากนี้หากพิจารณา DMU₁ จะเห็นว่าแนวโน้มการพัฒนาคำตอบจากค่าเริ่มต้นคือ ค่า GCE=0.355 จนสุดท้ายบรรลุลดุดุลภาพของแนชในรอบที่ 8 โดยค่า GCE เท่ากับ 0.394 ดังแสดงในรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าค่าคะแนนประสิทธิภาพ GCE ของ DMU₁ จะบรรลุลดุดุลภาพของแนชในรอบที่ 8 (คำตอบปรับปรุงจนมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง) ซึ่งเป็นไปตามการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์โดย [8] นอกจากนี้เมื่อทดสอบสหสัมพันธ์สเปียร์แมนของวิธีที่นำเสนอกับวิธีการอื่นในวรรณกรรมพบว่า วิธีที่นำเสนอมีความสัมพันธ์กับวิธี CE, Aggressive และ Benevolent เท่ากับ 0.979, 0.974 และ 0.976 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นวิธีที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือสูงมาก สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการคัดเลือกชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งได้ จากผลการวิจัยพบว่าไม้ยางพารา (DMU₂₀) เป็นวัสดุชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง โดยลำดับความเหมาะสมของวัสดุชีวมวลแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 4

บทความวิจัย (Research Article)

ชีวมวล	รอบที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
DMU ₉	0.374	0.438	0.409	0.423	0.420	0.422	0.421	0.421
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



รูปที่ 5 การพัฒนาค่าตอบของ DMU₁ 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 นอกจากนี้ยังเป็นการใช้

บทความวิจัย (Research Article)

ประโยชน์จากของเสียจากภาคการเกษตรมาแปรรูปให้เกิดประโยชน์และเป็นการกำจัดของเสียได้อย่างไรก็ตาม การแปรรูปวัสดุชีวมวลให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงหรือถ่านอัดแท่งจำเป็นต้องวิเคราะห์ศักยภาพของชนิดของชีวมวลแต่ละชนิดโดยใช้ปัจจัยที่สำคัญ เช่น ความชื้น ปริมาณสารเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องทำการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลมีหลายปัจจัย ซึ่งทำให้การประเมินศักยภาพวัสดุชีวมวลนั้นยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องเลือกเครื่องมือหรือวิธีการประเมินที่เหมาะสมมาประเมินศักยภาพของชีวมวล งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้วิธีการวัดประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกม (วิธี GCE) โดยขั้นตอนในการประเมินศักยภาพวัสดุชีวมวลดังนี้ ลำดับแรกจะต้องระบุปัจจัยที่สำคัญสำหรับการกำหนดความเหมาะสมของเชื้อเพลิง ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดปัจจัยที่สำคัญทั้งหมด 5 ปัจจัย ดังนี้ ค่าความร้อน ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า และ ความชื้น สำหรับใช้ในการประเมินวัสดุชีวมวลจำนวน 23 ชนิด ผลการวิจัยพบว่า ไม้ยางพารา ข้าวโพด และ ต้นฝ้าย เป็นวัสดุชีวมวล 3 อันดับแรกที่มีความเหมาะสมในการนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับวิธีการที่นิยมในวรรณกรรม ซึ่งผลการทดสอบสหสัมพันธ์ของสเปียร์แมนพบว่าวิธีที่นำเสนอมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสเปียร์แมนสูงมาก นั้นหมายความว่าวิธีการที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้ในการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลในงานวิจัยนี้ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี และมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดร ที่สนับสนุนบทความวิจัยฉบับนี้ และผู้แต่งขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่

พิจารณาบทความและให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ เพื่อให้คุณภาพของบทความวิจัยนี้ดียิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] นรงค์ วิชาพา, 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,

ประสิทธิภาพ ไกรลสม และ กัมปนาท ไชยเพชร, วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้ของเกมสำหรับการประเมินศักยภาพของวัสดุชีวมวลในการผลิตถ่านอัดแท่ง

บทความวิจัย (Research Article)

- 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](https://doi.org/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 วิชาพา, "การวัดประสิทธิภาพและจัดลำดับความสำคัญของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้วิธีประสิทธิภาพแบบไขว้เสมือน," *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](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.