

การเพิ่มค่าความร้อนของขยะอินทรีย์ด้วยกระบวนการรีดน้ำและ ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

สายฝน หาญชนะพล¹, กิตติศักดิ์ คู่ขวัญ², วิภาวี เดชต๊ะศักดิ์³,
จักรกฤษ แสงเพ็ง⁴, ดวงกมล เรือนงาม^{1*}.

¹วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

³ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

⁴คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

*Corresponding author email: duangkamol.rue@rmutr.ac.th

ได้รับบทความ: 23 สิงหาคม 2567

ได้รับบทความแก้ไข: 8 มกราคม 2568

ยอมรับตีพิมพ์: 13 มกราคม 2568

บทคัดย่อ

ปัจจุบันขยะอินทรีย์มีปริมาณมาก ทางเลือกหนึ่งในการนำสิ่งเหลือใช้มาสร้างมูลค่า
คือนำมาทำเชื้อเพลิงแข็งในรูปถ่านชีวภาพ ปัญหาหนึ่งในการผลิตถ่านชีวภาพคือ ขยะ
อินทรีย์มีปริมาณน้ำมาก งานวิจัยนี้มีการใช้วิธีการกำจัดน้ำทางกลร่วมด้วย โดยใช้เครื่องรีด
น้ำช่วยลดปริมาณน้ำและพลังงานในขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ ปัจจัยที่พิจารณาในงานนี้ ได้แก่
ขนาดวัตถุดิบที่ป้อนเข้าเครื่องรีดน้ำ อัตราการป้อน ที่มีผลต่อความหนาแน่น และผลได้ของ
ชีวมวล หลังจากนั้นชีวมวลจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการอบและกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ที่
อุณหภูมิ 280°C 60 minutes ตามลำดับ ได้ผลิตถ่านชีวภาพที่มีความร้อนในช่วง
5,337 - 6,627 kcal/kg เมื่อพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ เมื่อขายด้วยราคาเทียบเท่าถ่านหิน
พบว่ายังขาดทุนในระดับห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: ขยะอินทรีย์/ ค่าทางความร้อน/ การกำจัดน้ำออก/ เครื่องรีดน้ำ

Enhancing the Calorific Value of Organic Waste by Dehydration Process and Its Economic Cost-Effectiveness Valuation

Saifone Harnchanaphol¹, Kittisak Khuwaranyu², Wipawee Dejtisakdi³,
Jakkrit Saengpeng⁴, Duangkamol Ruen-ngam^{1*}.

¹Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhonpathom

²Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Silpakorn University, Nakhonpathom

³Department of Biology, Faculty of Science,
King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

⁴Faculty of technical education,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Patthum Thani

*Corresponding author email: duangkamol.rue@rmutr.ac.th

Received: 23 August 2024

Revised: 8 January 2025

Accepted: 13 January 2025

Abstract

Organic waste is abundant. One option for utilizing waste to create value is to turn it into solid fuel in the form of biochar. One problem of organic waste is high moisture content in organic waste. This research used a combination of mechanical dehydration methods, namely, water press, which reduces moisture and energy in material preparation process. Water press was carried out on a laboratory scale, considering the factors of the size of the feed into the water press, the feed rate, which affect the density, and the biomass yield. After that, it was fed through the drying process and the torrefaction process at a temperature of 280°C for 60 minutes, respectively.

The biochar product had a heat content ranging from 5,337 - 6,627 kcal/kg. In terms of economics, if sold at the same price as coal, it was still a loss at the laboratory scale.

Keywords: Organic waste/ Heating value/ Dewatering/ Water press

บทนำ

คณะกรรมการความสงบแห่งชาติ (คสช.) เห็นความสำคัญของปัญหาขยะมูลฝอย จึงได้กำหนดให้การแก้ไขปัญหาขยะมูลฝอยเป็นวาระแห่งชาติ และได้มีมติเห็นชอบ Roadmap การจัดการขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย ตามที่กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมได้นำเสนอ ดังนั้น เพื่อให้สามารถดำเนินการในการขับเคลื่อนการดำเนินการแก้ไขปัญหาขยะมูลฝอยของประเทศ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจึงได้บูรณาการแผนบริหารจัดการขยะมูลฝอยของจังหวัดทั้ง 77 จังหวัด (รวมกรุงเทพมหานคร) และจัดทำเป็นแผนแม่บทการบริหารจัดการขยะมูลฝอยของประเทศ (พ.ศ. 2559 - 2564) เพื่อให้สอดคล้องกับทิศทางแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 (พ.ศ. 2566 - 2570) โดยแนวคิดในการจัดการขยะมูลฝอยและของเสียอันตราย ประกอบด้วย ลดการเกิดขยะมูลฝอยหรือของเสียอันตรายที่แหล่งกำเนิด การนำของเสียกลับมาใช้ซ้ำและใช้ประโยชน์ใหม่ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิตของภาคการผลิต รวมทั้งลดปริมาณการเกิดขยะมูลฝอยเพื่อให้เกิดการจัดการขยะมูลฝอยอย่างยั่งยืนต่อไป ขยะมูลฝอยที่ได้จากการคัดแยกจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ใหม่ ส่วนที่เหลือจะนำไปกำจัดโดยวิธีการที่ถูกหลักวิชาการ เพื่อป้องกันและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมส่วนการนำไปผลิตเป็นพลังงานถือเป็นผลพลอยได้ โดยส่งเสริมให้ภาคเอกชนหรือรัฐวิสาหกิจมาลงทุน หรือร่วมลงทุนตามความเหมาะสม และแผนแม่บท ฯ ฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบจากคณะรัฐมนตรีแล้วในการประชุมคณะรัฐมนตรีเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม 2559 [1] ปัจจุบันงานวิจัยในด้านการจัดการขยะในชุมชนมีปริมาณมากขึ้น อย่างไรก็ตามยังมีปริมาณน้อยที่แสดงให้เห็นสถานะต่างๆที่แตกต่างกันของแต่ละชุมชน [1-3]

ขยะอินทรีย์เป็นขยะประเภทหนึ่ง สามารถย่อยสลายได้ แต่หากมีการจัดการไม่ถูกหลักวิชาการจะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ในเขตเมืองที่มีประชากรหนาแน่น ก่อเกิดขยะอินทรีย์ปริมาณมากแต่มีพื้นที่สำหรับทิ้งจำกัด ทางเลือกหนึ่งในการนำสิ่งเหลือใช้มาสร้างมูลค่า คือนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ถ่านชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากวัตถุดิบประเภทชีวมวล ซึ่งขยะอินทรีย์มีปริมาณน้ำมากประมาณ 90% [4, 5] ต้องมีการดัดแปลงสภาพชีวมวลก่อนการนำไปใช้เป็นพลังงานทางเลือก โดยการกำจัดน้ำด้วยวิธีการตากแห้งตามธรรมชาติ หรือใช้เตาอบลมร้อน

ขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะที่มาจากพืชต้องมีการกำจัดน้ำออกก่อนที่จะนำไปทำเชื้อเพลิง การใช้พลังงานเชิงกลในการกำจัดน้ำให้ประสิทธิภาพทางพลังงานดีกว่าการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว จากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการวิจัยที่ดำเนินการวิจัยอย่างชัดเจนในการนำขยะอินทรีย์หรือเศษผักนำไปใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel, RDF) Municipal Solid Waste, MSW to Refuse Derived Fuel, RDF) จากข้อมูลการ

ทดลองเบื้องต้นขยะอินทรีย์หรือเศษผัก สามารถเป็นเชื้อเพลิงขยะได้เนื่องจากมีค่าความร้อนสูงและเมื่อประกอบไกล้เคียงกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดอุตสาหกรรม [4] อย่างไรก็ตามขยะอินทรีย์มีปริมาณน้ำมากดังนั้นการกำจัดน้ำจึงเป็นสิ่งจำเป็นการใช้พลังงานความร้อนเพียงอย่างเดียวอาจทำให้มีต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงค่อนข้างสูง การใช้ความร้อนร่วมกับเชิงกลจะสามารถช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานได้ การกำจัดน้ำมีหลายวิธี ได้แก่ การคั้น การบีบ การอัด การให้ความร้อน ซึ่งการใช้ความร้อนในการระเหยน้ำหรือกำจัดน้ำเพียงอย่างเดียวจะเป็นกระบวนการสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าเชิงกล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแปลงขยะอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกหรือถ่านชีวภาพ โดยพิจารณาเฉพาะส่วนขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้ากระบวนการทำถ่าน โดยใช้เครื่องรีดน้ำในระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ได้คำนวณต้นทุนในการทำไว้ในงานนี้ด้วย

วัสดุและวิธีการ

1. การเตรียมวัตถุดิบ

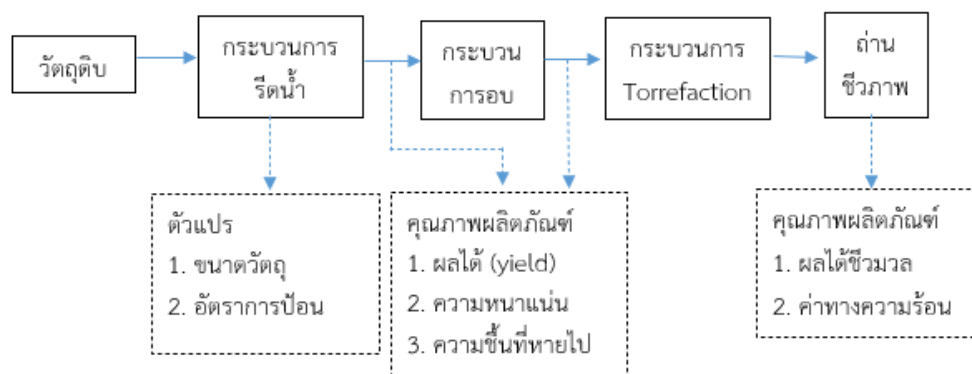
วัตถุดิบที่ใช้คือ เปลือกกะหล่ำปลี (*Brassica oleracea* L. var. capitata) ซึ่งได้จากตลาดสด เทศบาลนครนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี ซึ่งมีปริมาณ 30 ton/month ดังภาพที่ 1 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 1 เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานชีวมวลได้ [1] การทดลองดำเนินการตามขั้นตอนดังภาพที่ 2 และแปรค่าตัวแปรในการทดลองดังตารางที่ 2



ภาพที่ 1 เปลือกกะหล่ำปลี

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกกะหล่ำปลี [4]

ปริมาณองค์ประกอบ (%wt)	กะหล่ำปลี
ความชื้น	93.33±0.14
ปริมาณเถ้า	0.82±0.04
คาร์บอนคงตัว	2.40±0.23
สารระเหย	1.10±0.05
ปริมาณธาตุ (% as-received)	
C	38.89±0.80
H	5.50±0.13
N	3.49±0.01
O	37.61±1.41
S	1.26±0.19
ปริมาณเส้นใย (%as-received)	
Cellulose	2.42±0.06
Hemicellulose	2.02±0.03
Lignin	0.70±0.01
HHV (kcal/kg) (as dried)	4030.81



ภาพที่ 2 แผนผังการทดลอง

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองกระบวนการรีดน้ำ

ตัวแปร	ค่าที่ปรับเปลี่ยน
ขนาดวัตถุดิบ	1x1, 2x2, 4x4 cmxcm
อัตราการป้อน	10, 20, 30 g/min

2. การทดลองกระบวนการรีดน้ำ

วัตถุดิบแห้งให้ได้ขนาดที่ต้องการดังในตารางที่ 2 นำผักที่แห้งได้เข้าเครื่องรีดน้ำดังภาพที่ 3 และ 4 โดยศึกษาผลขนาดและอัตราป้อน บันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งหมดเพื่อใช้ทำสมมูลมวล นอกจากนี้ผักที่ผ่านการรีดน้ำแล้วนำไปศึกษาปริมาณน้ำที่กำจัดออกในขั้นตอนการอบ ที่อุณหภูมิ 105°C เวลา 5-60 minutes เพื่อใช้เปรียบเทียบอัตราการสูญเสีย น้ำ ผักแห้งที่ได้นำเข้าสู่กระบวนการ ทอรรีแฟคชัน (torrefaction) เพื่อแปลงสภาพให้เป็นถ่านชีวภาพและนำผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพไปวิเคราะห์ค่าทางความร้อนต่อไป



ภาพที่ 3 เครื่องรีดน้ำ



4x4 cmxcm

2x2 cmxcm

1x1 cmxcm

ภาพที่ 4 การเตรียมตัวอย่างผักหั่นเพื่อรีดน้ำ 3 ขนาด

3. กระบวนการอบและกระบวนการทอรรีแฟคชัน

หลังผ่านกระบวนการรีดน้ำแล้วตัวอย่างถูกนำไปทำให้แห้งอย่างต่อเนื่องในเตาอบ (Mettler, Universal Oven UF55, Germany) ที่อุณหภูมิ 105°C 1.5 hours เพื่อลดความชื้นก่อนเข้ากระบวนการทอรรีแฟคชัน (torrefaction) ที่กำหนด 30 g 280°C 60 minutes [5]



ภาพที่ 5 เครื่องสำหรับกระบวนการทอรรีแฟคชัน [6]

4. การวิเคราะห์ค่าทางความร้อน

ค่าทางความร้อนวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมย์แคลอรีมิเตอร์ (Parr®, USA) ตามมาตรฐาน ASTM E 711

5. การคำนวณความชื้นที่หายไป

ปริมาณน้ำหนักสุดท้ายลบออกจากน้ำหนักเริ่มต้นได้เป็นน้ำหนักรีดน้ำที่หายไป คำนวณตามสมการ (1)

$$\text{ความชื้นที่หายไป (\%)} = \left(\frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น (g)} - \text{น้ำหนักคงเหลือ (g)}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น (g)}} \right) \times 100 \quad (1)$$

6. ผลได้ชีวมวล

หาได้จากการชั่งน้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักสุดท้ายดังสมการที่ (2)

$$\text{ผลผลิตชีวมวลหลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน (\%)} = \frac{\text{มวลสุดท้ายหลังผ่านทอรีแฟคชัน (g)}}{\text{มวลเริ่มต้นก่อนผ่านทอรีแฟคชัน (g)}} \times 100 \quad (2)$$

7. การคำนวณต้นทุนด้านพลังงาน

$$\text{ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในกระบวนการ (baht)} = \text{พลังงานในการรีดน้ำ (kWh)} \times \text{ค่าไฟฟ้า (baht/kWh)} \quad (3)$$

ผลการศึกษา

1. ผลการทดสอบของกระบวนการรีดน้ำ

เปลือกกะหล่ำปลีได้รับการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการรีดน้ำด้วยเครื่องรีดน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการรีดน้ำดังภาพที่ 6 ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปและอัตราการป้อนต่อนาที่เป็นอัตราส่วนที่แสดงถึงปริมาณของน้ำที่ถูกขจัดออกจากตัวอย่างผักกะหล่ำปลีเมื่อผ่านกระบวนการรีดน้ำ ปริมาณน้ำที่กำจัดออกมาหาได้โดยวิธีชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณน้ำที่ถูกขจัดออกไปและคำนวณตามสมการที่ (1) ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3 การสังเกตข้อมูลในตารางที่ 3 อัตราการป้อนทั้ง 3 อัตราการป้อน 10, 20, และ 30 g/min กับขนาดตัวอย่างผักกะหล่ำปลีที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1x1, 2x2, และ 4x4 cmxcm โดยในแต่ละกรณี มีการวัดน้ำหนักที่หายไปร้อยละ (%) ของน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างพบว่าที่อัตราการป้อนเดียวกัน ขนาดตัวอย่างที่ป้อนไม่มีผลต่อน้ำหนักที่หายไป และที่ขนาดเดียวกันอัตราการป้อนที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อน้ำหนักที่หายไปเช่นกัน ทั้งนี้เพราะเป็นป้อนเข้าระบบด้วยมือ และขนาดที่ใช้เลือกขนาดที่ใกล้เคียงช่องของสกรูมากกว่าและน้อยกว่าเล็กน้อย



ภาพที่ 6 กะหล่ำหลังผ่านกระบวนการรีดน้ำ

ตารางที่ 3 ขนาดของชีวมวลและปริมาณน้ำที่ถูกขจัดออกไป

ขนาด (cmxcm)	น้ำหนักที่หายไปต่อนาทิจาน (%)		
	อัตราป้อน 10 g/min	อัตราป้อน 20 g/min	อัตราป้อน 30 g/min
1x1	74.76	61.71	67.8
2x2	77.38	72.83	72.5
4x4	75.63	78.42	72.8

จากการเตรียมวัตถุดิบด้วยการรีดน้ำ พบว่า ค่าความหนาแน่น (bulk density) จากการรีดน้ำและการอบของการป้อนวัตถุดิบแต่ละขนาดด้วยความเร็วในการป้อนดังตารางที่ 4 ตารางที่ 5 และตารางที่ 6 ทุกขนาดและอัตราการป้อนสามารถเพิ่มความหนาแน่นของขยะได้ใกล้เคียงกันประมาณในช่วง 19-32% ทั้งนี้ความหนาแน่นมีผลต่อราคาต้นทุนในการสร้างทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณกำลังการผลิตที่ต้องการ

การปรับขนาดของวัตถุดิบและอัตราการป้อนที่แตกต่างกัน ได้ค่าผลได้ชีวมวล (Mass yield) ดังผลตารางที่ 7 ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนต่อค่าค่าผลได้ของชีวมวล (Mass yield) แต่สามารถช่วยกำจัดน้ำในตัวอย่างซึ่งหากไม่กำจัดออกจะเปลืองพลังงานในกระบวนการทอรีรีแฟกซ์ ดังนั้นการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการรีดน้ำเป็นการช่วยประหยัดพลังงานหากนำไปอบเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4 ความหนาแน่นของตัวอย่างในการปรับสภาพ ด้วยอัตราป้อน 10 g/min

Size (cmxcm)	การรีดน้ำ		การอบ	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1x1	0.226	0.257	0.524	0.771
2x2	0.166	0.296	0.434	0.775
4x4	0.165	0.201	0.352	0.801

ตารางที่ 5 ความหนาแน่นของตัวอย่างในการปรับสภาพ ด้วยอัตราป้อน 20 g/min

Size (cmxcm)	การรีดน้ำ		การอบ	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1x1	0.260	0.310	0.551	0.787
2x2	0.196	0.392	0.449	0.774
4x4	0.186	0.233	0.385	0.770

ตารางที่ 6 ความหนาแน่นของตัวอย่างในการปรับสภาพ ด้วยอัตราป้อน 30 g/min

Size (cmxcm)	การรีดน้ำ		การอบ	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1x1	0.270	0.314	0.560	0.934
2x2	0.193	0.371	0.480	0.828
4x4	0.196	0.251	0.404	0.878

ตารางที่ 7 ผลผลิตมวลที่ได้จากกระบวนการรีดน้ำ

Size (cmxcm)	Feed 10 g/min	Feed 20 g/min	Feed 30 g/min
1	24.63	26.10	32.19
4	22.62	27.17	27.50

16

29.31

21.58

27.21

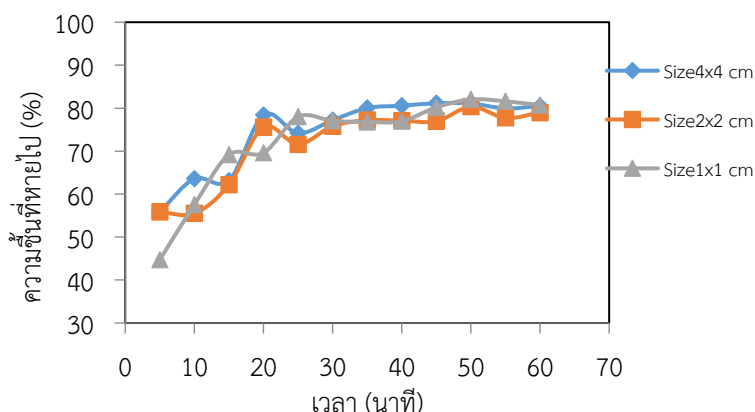
2. ผลการทดสอบของกระบวนการอบ

ผลของความหนาแน่นแสดงดังตารางที่ 4 ถึง 6 พบว่าทุกขนาดและอัตราการป้อนสามารถเพิ่มความหนาแน่นได้มากกว่า 42% ซึ่งมีผลต่อการลดต้นทุนในการสร้างระบบ โดยความหนาแน่นมากใช้ขนาดท่อของระบบเล็กกว่า ทั้งนี้ราคาต้นทุนในการสร้างขึ้นกับปริมาณกำลังการผลิตที่ต้องการ ภาพที่ 8 แสดงปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตลอดระยะเวลาการอบ พบว่าช่วงแรกมีอัตราการระเหยน้ำมากส่งผลต่ออัตราการระเหยสูงกว่าในช่วง 30 นาทีแรก หลังจากนั้นการระเหยน้ำอิสระน้อยลงและน้ำในระดับโมเลกุลเริ่มออกมาจนในที่สุดเหลือแต่ของแข็งและน้ำที่ยึดติดกับโมเลกุลของสาร ซึ่งแสดงเป็นเส้นตรงขนานกับแกน X

ผลได้ชีวมวลแสดงดังตารางที่ 8 พบว่าการปรับขนาดของวัตถุดิบและอัตราการป้อนที่แตกต่างกันไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนต่อผลได้ของชีวมวล แต่สามารถช่วยกำจัดการน้ำในตัวอย่างซึ่งหากไม่กำจัดออกจะเปลืองพลังงานในกระบวนการทอร์รีแฟคชัน ดังนั้นการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการรีดน้ำเป็นการช่วยประหยัดพลังงานหากนำไปอบเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 8 ผลได้ชีวมวลจากกระบวนการอบ

Size (cmxcm)	Feed 10 g/min	Feed 20 g/min	Feed 30 g/min
1	20.17	19.47	20.24
4	21.86	20.31	20.89
16	21.92	22.62	22.42



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบน้ำหนักของชีวมวลแต่ละขนาดที่หายไปกับเวลาที่ใช้อบ

3. คุณสมบัติผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน

กระบวนการทอรีแฟคชันดำเนินการภายใต้สภาวะที่ดีที่สุดตามงานวิจัยของ Saifone et al., 2023 [5] โดยใช้อุณหภูมิ 280°C 60 minutes ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าทางความร้อนดังตารางที่ 9 พบว่าผลของขนาดในขั้นตอนรีดน้ำไม่มีผลต่อค่าทางความร้อนแต่อาจมีผลในขั้นตอนการดำเนินการ เช่น การป้อนที่ยากขึ้น การเพิ่มแรงงานคนที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ขนาดที่ใกล้เคียงระยะสกรูจะทำให้ได้ได้ปริมาณผลได้ที่มากกว่าขนาดที่ต่างจากขนาดสกรูมากๆ อาจจะหล่นปริมาณมากในช่วงป้อน

ตารางที่ 10 ค่าทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้

ขนาด (cmxcm)	ค่าทางความร้อน (HHV, kcal/kg)
1x1	6627.36
2x2	5337.57
4x4	6174.68

4. การคำนวณด้านเศรษฐศาสตร์

จุดคุ้มทุนของกระบวนการเริ่มตั้งแต่การรีดน้ำถึงการทำทอรีแฟคชันของวัตถุดิบขนาดต่างๆ ได้แก่ 1x1 , 2x2 และ 4x4 cmxcm คือ 182.54 , 166.10 และ 185.93 baht/kg ซึ่งคิดราคาเฉลี่ย 178.19 baht/kg หากไม่พิจารณาค่าวัตถุดิบเนื่องจากเป็นขยะ ค่าแรงงาน 6 baht/kg และการสิ้นเปลืองเป็น 1 baht/kg จะได้ราคาต้นทุนเป็น 189.54, 172.10 และ 192.93 baht/kg ซึ่งหากคำนวณต้นทุนรวมโดยเปรียบเทียบกับราคากำหนัดที่มีค่าทางความร้อนเท่ากับราคาเฉลี่ย 5.50 baht/kg พบว่า ราคาซื้อของกำหนัด ณ ปัจจุบันยังคงมีราคาต่ำกว่าต้นทุนในการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยได้กำไรที่ -184.04, -167.60 และ -187.43 baht/kg ตามลำดับ

จากข้อมูลในอดีตพบว่ารายงานต้นทุนการแปลงสภาพชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกมีปริมาณน้อย ตัวอย่างงานวิจัยในอดีตที่คำนวณเรื่องต้นทุน ได้แก่ งานวิจัยของ

Maryam et al. (2020) [7] ได้ทดลองโดยใช้กากองุ่นเป็นวัตถุดิบภายใต้สภาวะทอรีแฟคชันแบบแห้งและแบบเปียก มีค่าต้นทุนการผลิตต่ำสุดเป็น 2.29 \$/GJ (18.23 baht/Gcal) และ 4.14 \$/GJ (32.85 baht/Gcal) ตามลำดับ และงานวิจัยของ Jackrit et al., 2023 การใช้วิธีการแปลงสภาพชีวมวล ด้วยวิธีอบลมร้อน การใช้คลื่นอัลตราโซนิก การใช้คลื่นไมโครเวฟ การใช้การปรับสภาพภายใต้ความดันและอุณหภูมิเพื่อทำลายโครงสร้างชีวมวลในระดับห้องปฏิบัติการแต่ยังไม่มีรายงานในเชิงเศรษฐศาสตร์ จากงานวิจัยของ Jakkrit et al. (2023) [4] พบว่าใช้วิธีการอบโดยตรงเพื่อระเหยน้ำและเพิ่มค่าทางความร้อนได้ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ของการใช้ไมโครเวฟร่วมด้วย มีค่า 0.05 (5 minutes 450 W) และ (5 minutes 800 W) ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวสามารถเพิ่มการระเหยน้ำและสามารถเพิ่มค่าทางความร้อนของชีวมวล มีต้นทุนด้านพลังงานเป็น 0.02 และ 0.05 baht/kg ตามลำดับ

วิจารณ์

ขยะอินทรีย์ ได้แก่ เปลือกกะหล่ำปลีมีความชื้นมากต้องมีการเตรียมวัตถุดิบเบื้องต้นโดยการรีดน้ำซึ่งแต่เดิมใช้การอบแห้งทั้งหมด ในการทดสอบกระบวนการรีดน้ำนี้ประกอบด้วยเปลือกกะหล่ำปลีที่มีการแปรขนาดตัวอย่างของผักกะหล่ำเป็นขนาด 1x1 , 2x2 และ 4x4 cmxcm ตามลำดับ ป้อนตัวอย่างทั้ง 3 ขนาดผ่านเครื่องรีดน้ำด้วยอัตราการป้อน 10, 20 และ 30 g/min ทำการวัดปริมาณน้ำที่นำออกด้วยวิธีชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณน้ำที่ถูกขจัดออกไป จากข้อมูลผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างผักกะหล่ำปลี กล่าวคือ อัตราการป้อนชีวมวลที่สูงขึ้นมีผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างผักกะหล่ำปลีมากขึ้นด้วย ส่วนขนาดของตัวอย่างผักกะหล่ำปลีมีผลต่อการสูญเสียน้ำเช่นเดียวกับอัตราการป้อน ขนาดที่ใหญ่ขึ้นมีการสูญเสียน้ำมากขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างผักกะหล่ำปลีแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนวัตถุดิบและขนาดของตัวอย่างเนื่องจากความเร็วของการป้อนวัตถุดิบเป็นการป้อนด้วยมือ ดังนั้นอัตราป้อนที่เกิดขึ้นจึงเป็นค่าเฉลี่ยจากน้ำหนักป้อนต่อเวลาที่ใช้ไปทั้งหมด ขนาดวัตถุดิบ 4x4 cmxcm มีขนาดใหญ่ทำให้ป้อนได้ช้า และต้องการคนเฝ้าระวังและ ช่วยในการป้อนตลอดเวลา ในขณะที่การป้อนวัตถุดิบขนาด 2x2 และ 1x1 cmxcm ต้องการการเฝ้าระวังน้อยกว่า ซึ่งข้อมูลอาจมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ระบบ

ขนาดใหญ่ขึ้นและอาจมีระเบิดโนมิติป้อน ข้อมูลนี้ได้นำมาวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตพบว่า ขั้นตอนลดขนาดเสียมีต้นทุนสูงขณะที่ได้ปริมาณน้ำออกมาใกล้เคียงกัน

งานวิจัยนี้ได้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชั่น ได้ค่าทางความร้อน ในช่วง 5,337 - 6,627 kcal/kg มีค่าทางความร้อนได้มากกว่าชีวมวลประเภทอื่นๆ ได้แก่ อ้อย ถั่วเหลือง ข้าวโพด ข้าว ข้าวฟ่าง และ ต้นทานตะวัน [8] และได้ค่าทางความร้อนสูงกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ที่บ่งชี้ร่วมกับกระบวนการทอรรีแฟคชั่น [3] งานวิจัยได้สัดส่วนค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผลได้ของชีวมวล (Enhanced conversion factor, ECF) เมื่อเทียบกับวัตถุดิบ (มีค่า HHV 4,030.81 cal/g) มีค่าในช่วง 1.42 ถึง 2.40 นอกจากนี้เมื่อนำถ่านชีวภาพที่ได้เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบ CHNS มีค่าเป็น 47.61% 5.66% 3.33% และ 0% ตามลำดับ และออกซิเจนเป็น 43.4% งานวิจัยนี้ถ่านชีวภาพมีค่า H:C และ O:C ratio เป็น 1.41 และ 0.68 เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลในปัจจุบัน พบว่า ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชั่นและคาร์บอนเซชัน

ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ กระบวนการรีดน้ำเป็นการลดการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับวิธีลดปริมาณน้ำแบบดั้งเดิมโดยใช้การอบไล่ไอน้ำ จากการทดลองพบว่ากระบวนการลดขนาดอาจไม่จำเป็นเนื่องจากการบีบได้ลดขนาดลง และได้ผลค่า HHV มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและทดสอบด้วยปัจจัยและตัวแปรหลักที่สำคัญในระดับห้องปฏิบัติการ ในด้านของความคุ้มค่าหากพิจารณาเพียงด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ ควรพิจารณาด้านอื่นๆ ร่วมด้วย และจากข้อมูลหากเพิ่มปริมาณวัตถุดิบมากขึ้นซึ่งหมายถึงต้นทุนอื่นๆ ก็จะมากขึ้นและทำให้สามารถคำนวณจุดคุ้มทุนได้ถูกต้องมากขึ้น

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ผลิตผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพจากเปลือกกะหล่ำปลีที่ได้หลังผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชั่น ได้ค่าทางความร้อนในช่วง 5,337 kcal/kg ถึง 6,627 kcal/kg ได้สัดส่วนค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผลได้ของชีวมวล (Enhanced conversion factor, ECF) เมื่อเทียบกับวัตถุดิบ (มีค่า HHV 4,030.81 cal/g) ในช่วง 1.42 ถึง 2.40 นอกจากนี้เมื่อนำถ่านชีวภาพที่ได้เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบ CHNS มีค่าเป็น 47.61% 5.66% 3.33%

และ 0% ตามลำดับ และออกซิเจนเป็น 43.4% ได้ค่า H:C และ O:C ratio เป็น 1.41 และ 0.68

งานวิจัยนี้มีค่า SEC การทดลองโดยใช้วัตถุดิบ 3 ขนาด ได้แก่ 1x1 2x2 และ 4x4 cmxcm สามารถคำนวณค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ได้เป็น 40.59 36.88 และ 42.58 kWh/kg ตามลำดับ ต้นทุนทางพลังงานของทั้ง 3 ขนาดไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้แสดงเพียงต้นทุนเบื้องต้นในระดับห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

1. นพพล อินทรีย์, อีรพล เขียวเหลือง, กัมปนาท วงษ์วัฒนพงษ์. กระบวนการจัดการขยะมูลฝอยแบบมีส่วนร่วมของชุมชนอย่างยั่งยืน. *Journal of Modern Learning Development* 2565;7(11):480-93.
2. พิรภพ จันทร์แสนตอ, สนธิญา สุวรรณราช, เกศณีย์ สัตตรัตน์ขจร รูปแบบการกำจัดขยะอินทรีย์ในครัวเรือนอย่างมีส่วนร่วมของชุมชน ตำบลร่องเคาะ อำเภอวังเหนือ จังหวัดลำปาง วารสารราชภัฏเพชรบูรณ์สาร 2563;22(2):31-9.
3. กวินธร เสถียร, ศุภสิทธิ์ ตั๊นา, เสาวลักษณ์ ลิ้มศิริวงศ์, นพรัตน์ รัตนประทุม. สภาพและปัญหาการจัดการขยะในหอพักนิสิต. วารสารสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 2565: 18(2):279-307.
4. Jakkrit S, Kittisak K, Duangkamol R. Simultaneous Drying and Torrefaction Pretreatment of Organic Waste for Upgrading Calorific Value. *International Energy Journal* 2022;22(2):157–66.
5. Saifone H, Kittisak K, Duangkamol R. Organic Waste Conversion by Torrefaction Pretreatment. *International Energy Journal* 2024;24(1):75–82.
6. Nitipong S, Suwat N, Paisan C. Thermal Degradation of Cassava Rhizome in Thermosyphon-Fixed Bed Torrefaction Reactor. *Processes* 2020;8(3):267. doi:10.3390/pr8030267.

7. Akbari M, Oyedun AO, Kumar A. Techno-economic assessment of wet and dry torrefaction of biomass feedstock. *Energy* 2020;207:118287. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118287>.
8. Morato T, Vaezi M, Kumar A. Assessment of energy production potential from agricultural residues in Bolivia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019;102:14–23.