

การศึกษาองค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมผักตบชวากับมูลวัว ในระดับห้องปฏิบัติการ

LABORATORY-SCALE STUDY OF BIOGAS COMPOSITION AND HEATING VALUE FROM CO-DIGESTION OF WATER HYACINTH AND CATTLE MANURE

ทิฆัมพร เขมวงศ์^{1*}, วิศรุต ช่วยจันทร์², ศักดิ์พี ขุนเพชร¹, ประภัศร กุลทอง², วิชิต มาลาเวช¹

Thikhamporn Khemwong^{1*}, Witsarut Chuayjan², Sakrapee Khunpetch¹, Prapatsorn Kulthong²,
Vichit Malaweche¹

¹ หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

² หลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

¹ Bachelor of Industrial Science Program, Major in Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

² Bachelor of Industrial Science Programs, Department of Civil Engineering Technology, Faculty of Engineering and Industrial
Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thikhamporn_khe@nstru.ac.th

วันที่รับบทความ: 30 กรกฎาคม 2569 ; วันที่ทบทวนบทความ: 11 สิงหาคม 2569 ; วันที่ตอบรับบทความ: 28 สิงหาคม 2569 ;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 31 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลวัว และเปรียบเทียบองค์ประกอบและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมที่อัตราส่วนแตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาและทดสอบระบบในระดับนำร่อง การทดลองดำเนินการในถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขนาด 5 ลิตร โดยกำหนดอัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัวตามน้ำหนักแห้ง 5 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 และวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ผลจากการวัดองค์ประกอบก๊าซจำนวน 3 ครั้งพบว่า อัตราส่วน 50:50 ให้สัดส่วนมีเทนเฉลี่ยสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ เท่ากับ $60.80 \pm 0.66\%$ ขณะที่ CO_2 , O_2 และ H_2S มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $36.50 \pm 0.46\%$, $1.90 \pm 0.10\%$ และ 141.00 ± 3.61 ppm ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่าความร้อนจากสัดส่วนมีเทน พบว่าก๊าซชีวภาพจากอัตราส่วน 50:50 มีค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตร 21.77 MJ/m^3 ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดในกลุ่มอัตราส่วนที่ศึกษา ทั้งนี้ การศึกษายังประเมินศักยภาพด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ในรูปแบบ สถานการณ์สมมติ ที่กำหนดให้ระบบระดับประยุกต์ผลิตก๊าซชีวภาพได้ $1.00 \text{ m}^3/\text{day}$ โดยค่าดังกล่าวไม่ได้เป็นปริมาณก๊าซที่วัดจากถังหมักขนาด 5 ลิตร ภายใต้สมมติฐานเงินลงทุน 18,000 บาท ค่าใช้จ่ายดำเนินงานและบำรุงรักษา 1,000 บาท/ปี และมูลค่าการประหยัดพลังงานขั้นต้น 4,701.20 บาท/ปี และมีกระแสเงินสดสุทธิ 3,701.20 บาท/ปี และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 4.86 ปี ผลการศึกษาจึงเป็นข้อมูลระดับห้องปฏิบัติการที่แสดง

แนวโน้มว่าอัตราส่วน 50:50 ให้สัดส่วนมีเทนและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงในชุดการทดลองนี้ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องศึกษาปริมาณก๊าซ ผลผลิตก๊าซต่อหน่วย VS เสถียรภาพของกระบวนการ และทดสอบในระบบระดับนำร่องก่อนสรุปความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือนหรือชุมชน

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ, ผักตบชวา, มูลวัว, การย่อยร่วม

Abstract: This study investigated the basic characteristics of water hyacinth and cattle manure and compared the composition and volumetric heating value of biogas obtained from different co-digestion ratios. The results were intended to provide preliminary laboratory-scale information for subsequent pilot-scale development and validation. Experiments were conducted using 5-L anaerobic digesters with five water-hyacinth-to-cattle-manure ratios on a dry-weight basis: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100. The resulting biogas was analyzed for methane (CH_4), carbon dioxide (CO_2), oxygen (O_2), and hydrogen sulfide (H_2S). Based on three gas-composition measurements, the 50:50 ratio produced the highest mean methane fraction under the conditions investigated, at $60.80 \pm 0.66\%$, whereas the corresponding mean CO_2 , O_2 , and H_2S values were $36.50 \pm 0.46\%$, $1.90 \pm 0.10\%$, and 141.00 ± 3.61 ppm, respectively. Based on its methane fraction, the calculated volumetric heating value of biogas from the 50:50 treatment was 21.77 MJ/m^3 , the highest among the investigated ratios. A separate scenario-based energy and economic assessment was also performed by assuming a future application-scale biogas production rate of $1.00 \text{ m}^3/\text{day}$; this value was not measured from the 5-L laboratory digesters. Under assumptions of an initial investment of 18,000 THB, annual operating and maintenance costs of 1,000 THB, and gross annual energy savings of 4,701.20 THB, the annual net cash flow was 3,701.20 THB and the simple payback period was approximately 4.86 years. These laboratory-scale results indicate that the 50:50 ratio provided a comparatively high methane fraction and volumetric heating value under the conditions tested. Measurements of cumulative biogas production, specific methane yield, process stability, and pilot-scale performance are required before conclusions regarding household- or community-scale applicability can be made.

Key words: Biogas, Water hyacinth, Cattle manure, Co-digestion

1. บทนำ

การพัฒนาพลังงานทดแทนจากทรัพยากรชีวมวลในท้องถิ่นเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงาน ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล และสนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทของประเทศไทยที่มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชีวมวลเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การนำของเสียอินทรีย์เหล่านี้กลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานชีวภาพสามารถช่วยลดปัญหาของเสียและเพิ่มมูลค่าให้ทรัพยากรท้องถิ่น [1], [2] ก๊าซชีวภาพ

(Biogas) สามารถผลิตได้จากวัสดุอินทรีย์ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ให้พลังงานและสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการหุงต้ม การให้ความร้อน หรือผลิตไฟฟ้า ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับชนิดวัตถุดิบ รูปแบบถังหมัก อุณหภูมิ pH และระยะเวลาการหมัก [3]

ผักตบชวา (Water hyacinth) เป็นพืชน้ำที่พบแพร่หลายในประเทศไทยและเพิ่มจำนวนได้รวดเร็ว หากสะสมมากอาจก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันของทางน้ำและกระทบต่อระบบ

นิเวศ อย่างไรก็ตาม ผักตบชวามีสารอินทรีย์และโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพได้ และการลดขนาดหรือปรับสภาพก่อนหมักสามารถช่วยเพิ่มการย่อยสลายของจุลินทรีย์ [4], [5] ขณะที่มูลวัวเป็นของเสียจากการเลี้ยงสัตว์ที่มีทั้งสารอินทรีย์ ธาตุอาหาร และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมัก การนำมูลวัวมาย่อยร่วม (Co-digestion) กับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นจึงอาจช่วยเสริมองค์ประกอบสารอาหาร ลดข้อจำกัดของวัตถุดิบเดี่ยว และช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบ [6], [7]

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กมีศักยภาพต่อการพัฒนาเพื่อใช้งานในระดับครัวเรือนหรือชุมชน แต่ความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงขึ้นอยู่กับปริมาณวัตถุดิบ ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ ต้นทุนการติดตั้ง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และรูปแบบการใช้พลังงาน [8], [9] สำหรับอำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีทั้งแหล่งน้ำธรรมชาติ พื้นที่เกษตรกรรม และการเลี้ยงโคในระดับครัวเรือนและฟาร์มขนาดเล็ก จึงพบทั้งผักตบชวาและมูลวัวเป็นวัสดุเหลือใช้ในพื้นที่ การนำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาศึกษาเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าทรัพยากรชีวมวลและลดปัญหาการจัดการของเสียในชุมชน

การใช้ผักตบชวาเป็นวัตถุดิบสำหรับการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้รับการศึกษาในหลายรูปแบบ ทั้งการหมักเดี่ยว การปรับสภาพ และการย่อยร่วมกับวัสดุอินทรีย์อื่น โดยผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนวัตถุดิบ ชนิดหัวเชื้อ การปรับสภาพ อุณหภูมิ ระยะเวลาหมัก และรูปแบบถังหมัก ส่งผลต่อทั้งปริมาณและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ตัวอย่างเช่น Ali et al. [10] ศึกษาการย่อยร่วมผักตบชวากับมูลวัวและพบว่าอัตราส่วน 1:1 ให้สัดส่วนมีเทนรายวันสูงสุดประมาณ 67.11% ภายในการหมัก 60 วัน ขณะที่ Soeprijanto et al. [11] ใช้ถังหมักแบบ plug-flow ขนาด 125 ลิตร และรายงานสัดส่วนมีเทนประมาณ 70.57% ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบงานวิจัยจำเป็นต้องพิจารณาสภาวะการทดลองร่วมด้วย และไม่ควรใช้เฉพาะร้อยละมีเทนเป็นตัวแทนประสิทธิภาพการผลิตก๊าซทั้งหมด

สำหรับประเทศไทย มีการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาทั้งด้วยการปรับสภาพ และการย่อยร่วมกับวัสดุอินทรีย์ โดย Lerkmahalikhit and Sasananan [12] รายงานว่าการปรับสภาพและการย่อยร่วมกับเศษอาหารส่งผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ขณะที่ Kaewpuang et al. [13] ศึกษาการย่อยร่วมผักตบชวากับมูลวัวบนฐาน VS และพบว่าอัตราส่วน 50:50 ให้ผลผลิตมีเทน 304 ± 9 mL $\text{CH}_4/\text{g VS added}$ สูงกว่าการหมักผักตบชวาเดี่ยว ทั้งยังมีการทดสอบต่อในระบบ CSTR ขนาด 10 ลิตร ผลเหล่านี้สนับสนุนศักยภาพของการย่อยร่วม แต่ยังสะท้อนว่าผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนวัตถุดิบ รูปแบบถังหมัก และสภาวะการเดินระบบของแต่ละการศึกษา

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ของการใช้ผักตบชวาผลิตก๊าซชีวภาพและประโยชน์ของการย่อยร่วม แต่ละงานมีความแตกต่างด้านวัตถุดิบร่วม วิธีเตรียมวัตถุดิบ อัตราส่วนผสม ขนาดถังหมัก และตัวแปรที่ใช้ประเมินผล ขณะที่ข้อมูลการเปรียบเทียบองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ CH_4 , CO_2 , O_2 และ H_2S รวมถึงค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรจากการย่อยร่วมผักตบชวากับมูลวัวในอัตราส่วนตามน้ำหนักแห่งหลายระดับภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกันยังมีรายงานจำกัด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลวัว และเปรียบเทียบองค์ประกอบกับค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมในอัตราส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ตามน้ำหนักแห้ง ภายใต้การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาแนวโน้มของสัดส่วนก๊าซมีเทนและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพในแต่ละอัตราส่วน นอกจากนี้ยังประเมินศักยภาพด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ในรูปแบบการณีสสมมติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบและทดสอบระบบระดับนำร่องในอนาคต

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลวัวที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน

2.2 เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมผักตบชวาและมูลวัวในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

2.3 เพื่อประเมินค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพจากสัดส่วนมีเทนที่ตรวจวัดได้

2.4 เพื่อประเมินศักยภาพการทดแทนพลังงานและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ภายใต้สถานการณ์สมมติ สำหรับใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาระบบระดับนำร่อง

3. ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมของผักตบชวาและมูลวัว เพื่อศึกษาข้อมูลเบื้องต้นด้านองค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพสำหรับใช้ประกอบการพัฒนาและทดสอบระบบระดับนำร่องในอนาคต โดยกำหนดขอบเขตการวิจัยดังนี้

3.1 ขอบเขตด้านพื้นที่ศึกษา การวิจัยดำเนินการในพื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีลักษณะเศรษฐกิจพึ่งพาภาคการเกษตรเป็นหลัก มีแหล่งน้ำธรรมชาติ คลองชลประทาน และพื้นที่เกษตรกรรมกระจายอยู่ในชุมชน ส่งผลให้มีวัสดุชีวมวลและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดปี โดยเฉพาะผักตบชวาที่พบแพร่หลายในแหล่งน้ำ และมูลวัวที่เกิดจากการเลี้ยงโคในระดับครัวเรือนและฟาร์มขนาดเล็ก พื้นที่ดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมต่อการศึกษาศักยภาพการนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานทดแทนทั้งในระดับครัวเรือนและระดับชุมชน

3.2 ขอบเขตด้านวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ผักตบชวาและมูลวัว โดยผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วพบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำของชุมชน และมักก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันของทางน้ำ ส่วนมูลวัวเป็นของเสียจากการเลี้ยงสัตว์ที่พบได้ในพื้นที่เกษตรกรรม วัตถุดิบทั้งสองชนิดเป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ การวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำผักตบชวาและมูลวัวมาใช้ร่วมกันในกระบวนการย่อยร่วมเพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบและค่าความร้อนต่อหน่วย

ปริมาตรของก๊าซชีวภาพจากอัตราส่วนวัตถุดิบที่แตกต่างกัน ลดปัญหาการจัดการวัสดุเหลือใช้ และเพิ่มมูลค่าให้กับทรัพยากรชีวมวลในท้องถิ่น

3.3 ขอบเขตด้านตัวแปรที่ศึกษา การวิจัยนี้กำหนดตัวแปรต้น คือ อัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัวที่ใช้ในการหมักตามน้ำหนักแห้ง จำนวน 5 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 เพื่อเปรียบเทียบผลของสัดส่วนวัตถุดิบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ตัวแปรตาม ได้แก่ องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วย CH_4 , CO_2 , O_2 และ H_2S รวมถึงค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่คำนวณจากสัดส่วนมีเทน สำหรับปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ตรวจวัดระหว่างการทดลอง ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ขนาดถังหมัก ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ ลักษณะการเตรียมวัตถุดิบ และสภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองของแต่ละอัตราส่วนได้อย่างเหมาะสม

3.4 ขอบเขตด้านการทดลอง การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขนาด 5 ลิตร ซึ่งเป็นระบบปิดสำหรับการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์และเก็บรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก วัตถุดิบผักตบชวาจะถูกเตรียมโดยการล้างทำความสะอาด ลดขนาด และปรับให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย ส่วนมูลวัวจะถูกเตรียมให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมสำหรับการหมัก จากนั้นนำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาผสมตามอัตราส่วนที่กำหนดและบรรจุลงในถังหมัก เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อ องค์ประกอบและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพ โดยเปรียบเทียบสัดส่วน CH_4 , CO_2 , O_2 และ H_2S ของแต่ละอัตราส่วน เพื่อระบุอัตราส่วนที่ให้ สัดส่วนมีเทนและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรสูงภายใต้สภาวะการทดลองนี้

3.5 ขอบเขตด้านการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การวิจัยครอบคลุมการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับมูลวัว โดยพิจารณาศักยภาพในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ทดแทนพลังงานเชิงพาณิชย์ในครัวเรือน โดยเฉพาะก๊าซ

หุงต้ม หรือก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) การวิเคราะห์ประกอบด้วยการประเมินมูลค่าการประหยัดต้นทุนพลังงาน ต้นทุนการลงทุนเบื้องต้น ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา ระยะเวลาคืนทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) ทั้งนี้ การประเมินด้านการทดแทนพลังงานและเศรษฐศาสตร์เป็นการวิเคราะห์ตามสถานการณ์สมมติ (scenario-based assessment) ผลการประเมินจึงใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับพิจารณาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และประกอบการออกแบบระบบระดับนำร่องในอนาคต ตลอดจนเป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจในการพัฒนาระบบพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นต่อไป

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อเป็นพลังงานทดแทนสู่ชุมชน ดังนั้นการดำเนินงานวิจัยจึงแบ่งออกเป็นขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม การเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนามดำเนินการในพื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมีมุ่งเน้นการสำรวจข้อมูลจากเกษตรกรและประชาชนในชุมชนที่ประกอบอาชีพด้านการเกษตร การเก็บข้อมูลประกอบด้วยการสำรวจชนิดและปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกิดขึ้นในแต่ละครัวเรือน เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมัน ฟางข้าว เศษพืชผัก และมูลสัตว์ รวมถึงข้อมูลด้านการจัดการวัสดุเหลือใช้และการใช้พลังงานในครัวเรือนในปัจจุบัน การเก็บข้อมูลภาคสนามใช้วิธีการสำรวจเชิงพรรณนา (Descriptive survey) โดยอาศัยแบบสอบถามการสัมภาษณ์และการสังเกตการณ์ในพื้นที่เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและสะท้อนสภาพความเป็นจริงของชุมชน ข้อมูลที่ได้จากการเก็บภาคสนามถูกนำมาจัดหมวดหมู่ วิเคราะห์ และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในขั้นตอนถัดไปของการวิจัย

4.2 การทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพ

4.2.1 การเตรียมตัวอย่างผักตบชวาสำหรับการปรับสภาพและการเตรียมมูลวัว การเตรียมวัตถุดิบผักตบชวาและมูลวัว ซึ่งเป็นสารตั้งต้นหลักในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานโดยเริ่มจากการเตรียมตัวอย่างผักตบชวา โดยทำการเก็บผักตบชวาที่ใช้ในการทดลองเก็บรวบรวมจากแหล่งน้ำในพื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยคัดเลือกต้นที่มีสภาพสมบูรณ์ ไม่มีการเน่าเสีย และปราศจากสิ่งปนเปื้อน จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดดิน ทราข และสิ่งแปลกปลอม แล้วปล่อยให้สะเด็ดน้ำก่อนสับให้มีขนาดประมาณ 1-3 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของวัตถุดิบและพื้นที่ผิวสำหรับการย่อยสลายของจุลินทรีย์ หลังจากนั้นนำผักตบชวาไปผึ่งแดดประมาณ 6 ชั่วโมงเพื่อระบายน้ำส่วนเกินและช่วยให้สามารถควบคุมปริมาณวัตถุดิบบนฐานน้ำหนักแห้งได้สม่ำเสมอ โดยไม่ได้ทำให้วัตถุดิบแห้งสนิทและไม่ได้ใช้สารเคมีหรือสารละลายต่างในการปรับสภาพ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงผลของการปรับสภาพทางเคมีที่อาจรบกวนการเปรียบเทียบผลจากอัตราส่วนผักตบชวาและมูลวัวที่แตกต่างกัน จากนั้นนำตัวอย่างไปตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids; TS) และของแข็งระเหยได้ (Volatile Solids; VS) ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

มูลวัวสดเก็บรวบรวมจากฟาร์มเลี้ยงโคในพื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยเลือกมูลวัวสดที่ไม่มีการปนเปื้อนของดินในปริมาณมาก และคัดแยกฟางกรวด รวมถึงสิ่งแปลกปลอมออกก่อนการเตรียมตัวอย่าง จากนั้นนำมูลวัวผสมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก และคนให้เข้ากันจนได้สารละลายมูลวัว (slurry) ที่มีลักษณะสม่ำเสมอ เหมาะสมต่อการผสมกับผักตบชวาและการบรรจุลงในถังหมัก สารละลายมูลวัวถูกพักไว้ในภาชนะปิดเป็นเวลา 3 วัน ที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปใช้ เพื่อให้วัตถุดิบมีความสม่ำเสมอและลดผลของก๊าซที่อาจเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย โดยไม่มีการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์เชิงพาณิชย์เพิ่มเติม เนื่องจากมูลวัวเป็น

แหล่งจุลินทรีย์ธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

การเตรียมผักตบชวาและมูลวัวตามขั้นตอนข้างต้น มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้วัตถุดิบมีความสม่ำเสมอและเหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน ในการทดลองนี้ไม่มีการเติมหัวเชื้อ (inoculum) แยกต่างหาก จึงไม่ได้กำหนดอัตราส่วนหัวเชื้อต่อสารตั้งต้น (inoculum-to-substrate ratio; ISR) โดยมูลวัวทำหน้าที่เป็นทั้งสารตั้งต้นร่วมและแหล่งจุลินทรีย์ธรรมชาติสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

4.2.2 การเตรียมถังหมักและสภาวะการทดลอง การทดลองใช้ถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขนาดรวม 5 ลิตร และดำเนินการแบบกะ (batch operation) โดยบรรจุวัตถุดิบเพียงครั้งเดียวในช่วงเริ่มต้นและไม่มีการเติมหรือถอนสารตั้งต้นระหว่างการหมัก กำหนดปริมาตรใช้งานจริง (working volume) เท่ากับ 4.0 ลิตรต่อถัง และเหลือปริมาตรช่องว่างเหนือของเหลว (headspace) ประมาณ 1.0 ลิตร สำหรับรองรับก๊าซที่เกิดขึ้น แต่ละถังใช้ของแข็งจากผักตบชวาและมูลวัวรวม 120 กรัม และเติมน้ำสะอาดประมาณ 3.0–3.3 ลิตร หรือจนได้ปริมาตรใช้งานรวม 4.0 ลิตร ส่งผลให้ความเข้มข้น TS เริ่มต้นของส่วนผสมอยู่ที่ประมาณ 3.0% (w/v) ส่วน VS เริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 2.34–2.46% (w/v) หรือคิดเป็น 78–82% ของ TS ตามสัดส่วนของวัตถุดิบ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนหมักจากผักตบชวาร่วมกับมูลวัว

อัตราส่วนหมัก ผักตบชวา : มูลวัว (% โดยน้ำหนักแห้ง)	น้ำหนักวัตถุดิบ ผักตบชวา : มูลวัว (กรัม)
100 : 0	120 : 0
75 : 25	90 : 30
50 : 50	60 : 60
25 : 75	30 : 90
0 : 100	0 : 120

ก่อนเริ่มการหมัก ปิดฝาถังและตรวจสอบการรั่วซึมของข้อต่อและท่อส่งก๊าซ จากนั้นไล่อากาศบริเวณ headspace ด้วย N_2 ประมาณ 3 นาที ก่อนปิดวาล์ว เพื่อสร้างสภาวะเริ่มต้นแบบไม่ใช้ออกซิเจน ถังหมักทั้งหมดตั้งไว้ภายในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิประมาณ $30 \pm 2^\circ C$ และหมักเป็นระยะเวลา 30 วัน

ค่า pH ของส่วนผสมเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 6.6–7.2 และตรวจวัดในวันที่ 0, 10, 20 และ 30 ของการหมัก โดยไม่มีการใช้ระบบควบคุม pH อัตโนมัติและไม่มีการเติมกรดหรือด่างเพื่อปรับค่า pH ระหว่างการทดลอง เพื่อหลีกเลี่ยงปัจจัยรบกวนจากสารเคมีเพิ่มเติม เพื่อให้สารตั้งต้นกระจายตัวและลดการตกตะกอน ถังหมักแต่ละถังถูกเขย่าด้วยมืออย่างเบา ๆ เป็นเวลาประมาณ 1 นาที วันละ 1 ครั้ง ในช่วงเวลาใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง

4.2.3 การวัดปริมาตรและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นถูกส่งผ่านท่อก๊าซจากด้านบนของถังไปยังชุดเก็บก๊าซ ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นติดตามโดยวิธี แทนที่น้ำ (water displacement method) โดยใช้ภาชนะตวงที่มีสเกล และบันทึกปริมาตรทุก 24 ชั่วโมง ในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ข้อมูลปริมาตรก๊าซใช้สำหรับติดตามการทำงานและยืนยันการเกิดก๊าซของระบบ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เน้นการเปรียบเทียบ องค์ประกอบของก๊าซและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตร และไม่ได้ใช้ข้อมูลดังกล่าวคำนวณผลผลิตก๊าซจำเพาะต่อหน่วย VS เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาหมักวันที่ 30 เก็บตัวอย่างก๊าซจากแต่ละถังลงในถุงเก็บตัวอย่างก๊าซและวิเคราะห์องค์ประกอบ ได้แก่ CH_4 , CO_2 , O_2 และ H_2S ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพแบบพกพา BIOGAS 5000 (Geotech, United Kingdom) โดยรายงาน CH_4 , CO_2 และ O_2 เป็นร้อยละโดยปริมาตร และรายงาน H_2S เป็น ppm

ก่อนการวิเคราะห์ในแต่ละวัน เครื่องมือถูกตรวจสอบและสอบเทียบตามขั้นตอนของผู้ผลิต โดยทำการตรวจสอบจุดศูนย์ (zero check) ด้วยก๊าซไนโตรเจน สำหรับเซนเซอร์ CH_4 และ CO_2 ตรวจสอบด้วยก๊าซมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น ส่วนเซนเซอร์ O_2 ตรวจสอบกับอากาศบรรยากาศที่มีออกซิเจนประมาณ 20.9% และเซนเซอร์ H_2S

ตรวจสอบด้วยก๊าซมาตรฐาน H_2S ความเข้มข้นประมาณ 200 ppm ก่อนเริ่มวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อควบคุมความถูกต้องและความสม่ำเสมอของการวัด

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ การทดลองใช้อัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัวจำนวน 5 อัตราส่วน โดยแต่ละอัตราส่วนใช้ถังหมัก 1 ถังเป็นหน่วยทดลอง ข้อมูลองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ CH_4 , CO_2 , O_2 และ H_2S วิเคราะห์ซ้ำจำนวน 3 ครั้งจากตัวอย่างก๊าซของถังหมักเดียวกัน และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD) เพื่อแสดงค่ากลางและความแปรปรวนของการวัดซ้ำ เนื่องจากการวัดทั้ง 3 ครั้งเป็นการวัดซ้ำเชิงวิเคราะห์จากหน่วยทดลองเดียวกัน มิใช่หน่วยทดลองอิสระ จึงไม่นำข้อมูลมาทดสอบความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนด้วยสถิติเชิงอนุมาน ผลการศึกษาจึงนำเสนอในเชิงพรรณนา โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของแต่ละอัตราส่วนภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้

4.4 การประเมินค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพ (Volumetric Heating Value Assessment) ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพประเมินจากสัดส่วน CH_4 ที่ตรวจวัดได้ เนื่องจากก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักที่ให้พลังงานในก๊าซชีวภาพ โดยใช้ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value; HHV) ของก๊าซมีเทนเท่ากับ 35.8 MJ/m^3 ค่าที่คำนวณได้มีหน่วยเป็น MJ/m^3 biogas และแสดงถึงค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร มีใช้พลังงานรวมที่ถังหมักผลิตได้ ทั้งนี้การคำนวณพลังงานรวมจำเป็นต้องใช้ข้อมูลปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ร่วมกับค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตร ดังสมการที่ 1

$$Energy = V_{biogas} \times CH_4 \times HHV \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่

$Energy$ แทน ปริมาณพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพ (MJ)

V_{biogas} แทน ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ (m^3)

CH_4 แทน สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ (%)

HHV แทน ค่าความร้อนของก๊าซมีเทน (35.8 MJ/m^3)
ค่าพลังงานที่คำนวณได้สามารถสะท้อนถึงศักยภาพของวัตถุดิบชีวมวลในการผลิตพลังงานทดแทน

ในการศึกษานี้ใช้ค่าการเทียบเท่าพลังงานโดยประมาณว่า ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตรสามารถทดแทนก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ได้ประมาณ 0.46 กิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินศักยภาพการทดแทนเชื้อเพลิงของระบบก๊าซชีวภาพ [18] ดังนั้น จึงนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มาแปลงเป็นปริมาณ LPG เทียบเท่า เพื่อประเมินศักยภาพในการทดแทนพลังงานในระดับครัวเรือน โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$LPG \text{ equivalent} = V_{biogas} \times 0.46 \dots\dots\dots(2)$$

โดยที่

$LPG \text{ equivalent}$ แทน ปริมาณก๊าซ LPG ที่สามารถทดแทนได้ (Kg)

4.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis) การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับมูลวัวดำเนินการเพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนในระดับครัวเรือน โดยการเปรียบเทียบต้นทุนพลังงานจากก๊าซชีวภาพกับต้นทุนพลังงานจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas; LPG) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในครัวเรือนสำหรับการหุงต้มและการประกอบอาหาร การวิเคราะห์ดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของครัวเรือน รวมทั้งเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำระบบผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้ในระดับชุมชนและการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ ในการศึกษาการประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์พิจารณาตัวแปรสำคัญ ได้แก่

4.5.1 มูลค่าการประหยัดต้นทุนพลังงาน จากการใช้ก๊าซชีวภาพสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$Cost \text{ saving} = LPG_{equivalent} \times P_{LPG} \dots\dots\dots(3)$$

โดยที่

Cost saving แทน มูลค่าการประหยัดต้นทุนพลังงาน
(฿)

$LPG_{equivalent}$ แทน ปริมาณก๊าซ LPG ที่สามารถทดแทนได้ (Kg)

P_{LPG} แทน ราคาก๊าซ LPG (฿/Kg)

4.5.2 อัตราการทดแทนพลังงาน เพื่อประเมินศักยภาพการทดแทนพลังงานของก๊าซชีวภาพในระบบพลังงานครัวเรือน สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองการทดแทนพลังงาน (Energy substitution model) ดังสมการที่ 4

$$Energy\ substitution = E_{biogas} \times E_{household} \dots\dots(4)$$

โดยที่

Energy substitution แทน อัตราการทดแทนพลังงาน (%)

E_{biogas} แทน พลังงานที่ผลิตได้จากก๊าซชีวภาพ (MJ)

$E_{household}$ แทน ความต้องการพลังงานของครัวเรือน (MJ)

สมการดังกล่าวใช้ในการประเมินว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถรองรับความต้องการพลังงานของครัวเรือนได้ในสัดส่วนเท่าใด ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินศักยภาพของระบบพลังงานชีวภาพในระดับครัวเรือนและชุมชน [19]

4.5.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) เพื่อประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จึงมีการคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback period) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5

$$Payback\ Period = \frac{C_{install}}{S_{annual}} \dots\dots\dots(5)$$

โดยที่

Payback Period แทน ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (ปี)

$C_{install}$ แทน ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (บาท)

S_{annual} แทน กระแสเงินสดสุทธิต่อปี (บาท/ปี)
(บาทต่อปี)

4.5.4 การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา ร่วมกับมูลวัวในระยะยาว ได้มีการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ประเมินความคุ้มค่าของโครงการลงทุน โดยพิจารณามูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับและกระแสเงินสดจ่ายตลอดอายุโครงการ หากค่า NPV มีค่ามากกว่าศูนย์ แสดงว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และสามารถสร้างผลตอบแทนที่เหมาะสมจากการลงทุน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \dots\dots\dots(6)$$

โดยที่

NPV แทน มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (บาท)

B_t แทน ผลประโยชน์หรือรายรับในปีที่ t (บาท)

C_t แทน ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในปีที่ t (บาท)

r แทน อัตราคิดลด (Discount rate)

t แทน ปีที่ดำเนินโครงการ

n แทน อายุโครงการ (ปี)

4.5.5 การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return; IRR) นอกจากการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิแล้ว การศึกษานี้ยังได้ประเมินอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน โดย IRR คืออัตราคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ หากค่า IRR สูงกว่าอัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่กำหนดจะถือว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 7

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+IRR)^t} \dots\dots\dots(7)$$

โดยที่

IRR แทน อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (%)

B_t แทน ผลประโยชน์หรือรายรับในปีที่ t (บาท)

C_t แทน ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในปีที่ t (บาท)

t แทน ปีที่ดำเนินโครงการ

n แทน อายุโครงการ (ปี)

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ดังกล่าวส่งผลให้สามารถประเมินความเหมาะสมของการลงทุนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับมูลวัวในระดับครัวเรือนได้อย่างเป็นระบบ โดยผลการวิเคราะห์จะสะท้อนถึงศักยภาพในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของครัวเรือน รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพไปประยุกต์ใช้ในระดับชุมชน ตลอดจนการขยายผลไปสู่การใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมครัวเรือนในอนาคต

5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการสำรวจวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในชุมชน

ผลการสำรวจวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่อำเภอเขียงใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าชุมชนมีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและชีวมวลเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี จากกิจกรรมการเกษตรและการเลี้ยงสัตว์ในระดับครัวเรือน และเชิงพาณิชย์ พื้นที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นที่ราบลุ่ม มีแหล่งน้ำธรรมชาติและคลองชลประทาน ส่งผลให้เกิดวัสดุเหลือใช้ทั้งจากพืชและสัตว์ในปริมาณสูง

วัสดุเหลือใช้ที่สำรวจพบประกอบด้วย ผักตบชวา มูลวัว ฟางข้าว เศษพืชผัก และวัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมัน โดยผักตบชวาและมูลวัวเป็นวัสดุที่พบมากที่สุดและมีการเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ผักตบชวาพบกระจายอยู่ในคลองและแหล่งน้ำสาธารณะของชุมชน โดยมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในช่วงฤดูฝน ขณะที่มูลวัวเกิดจากการเลี้ยงโคในระดับครัวเรือน และฟาร์มขนาดเล็ก

ข้อมูลจากการสำรวจด้านการจัดการวัสดุเหลือใช้พบว่า ผักตบชวาส่วนใหญ่ถูกกำจัดโดยการเก็บขึ้นจากแหล่งน้ำและกองทิ้งไว้ในพื้นที่ใกล้เคียง ส่วนมูลวัวถูกนำไปใช้เป็นปุ๋ยคอกเพียงบางส่วน ที่เหลือยังไม่มีจัดการอย่างเป็นระบบ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุเหลือใช้พบว่าวัสดุทั้งสองชนิดเป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ จึงถูกคัดเลือกเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

5.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลวัว

ผลการเตรียมตัวอย่างผักตบชวาพบว่า หลังการล้างทำความสะอาดและลดขนาดให้มีความยาวประมาณ 1-3 เซนติเมตร ผักตบชวามีลักษณะสม่ำเสมอและเหมาะสมต่อการนำไปปรับสภาพ การลดความชื้นโดยการผึ่งแดดประมาณ 6 ชั่วโมง ช่วยลดปริมาณน้ำส่วนเกิน ทำให้สามารถควบคุมปริมาณสารตั้งต้นตามน้ำหนักแห้งได้อย่างแม่นยำ หลังการปรับสภาพ ผักตบชวามีโครงสร้างเส้นใยที่อ่อนตัวลง ส่งผลให้มีแนวโน้มเอื้อต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในส่วนของการเตรียมมูลวัว พบว่ามูลวัวสดที่ผ่านการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมและผสมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วนที่กำหนดสามารถเตรียมเป็นสารละลายมูลวัว (slurry) ที่มี

ลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ค่า pH อยู่ในช่วงใกล้เคียงเป็นกลางซึ่งเหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ การพักสารละลายมูลวัวก่อนใช้งานช่วยกระตุ้นกิจกรรมของจุลินทรีย์ ทำให้มูลวัวมีความพร้อมในการทำหน้าที่เป็นทั้งสารตั้งต้นร่วมและแหล่งจุลินทรีย์เริ่มต้นสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและมูลวัวหลังการเตรียมตัวอย่าง

วัตถุดิบ	ลักษณะทางกายภาพหลังเตรียม	Total Solids (TS, %)	Volatile Solids (VS, %TS)	pH
ผักตบชวา	สับละเอียด ขนาด 1-3 ซม.	12.5	82.0	6.5
	ผ่านการลดความชื้น			

วัตถุดิบ	ลักษณะทางกายภาพหลังเตรียม	Total Solids (TS, %)	Volatile Solids (VS, %TS)	pH
มูลวัว	สารถละลายเนื้อเดียว (slurry)	16.0	78.0	7.2

จากตารางที่ 2 พบว่า ผักตบชวาและมูลวัวที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างมีค่า TS, VS และ pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบทั้งสองชนิดมีความพร้อมสำหรับการนำไปใช้ในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากการหมักผักตบชวาร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนผักตบชวา : มูลวัว	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
100:0	48.47 ± 0.51	46.03 ± 0.51	3.53 ± 0.15	180.00 ± 4.58
75:25	54.20 ± 0.66	41.53 ± 0.50	2.77 ± 0.15	161.00 ± 3.61
50:50	60.80 ± 0.66	36.50 ± 0.46	1.90 ± 0.10	141.00 ± 3.61
25:75	58.60 ± 0.56	38.17 ± 0.38	2.10 ± 0.10	149.67 ± 2.52
0:100	55.07 ± 0.61	40.03 ± 0.51	2.50 ± 0.10	171.00 ± 3.61

หมายเหตุ: ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดซ้ำเชิงวิเคราะห์จำนวน 3 ครั้งจากถังหมักเดียวกันของแต่ละอัตราส่วน

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากแต่ละอัตราส่วน ซึ่งวิเคราะห์ซ้ำจำนวน 3 ครั้ง จากตัวอย่างก๊าซของถังหมักเดียวกัน พบว่าอัตราส่วน ผักตบชวาต่อมูลวัว 50:50 ให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วน CH₄ สูงที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ เท่ากับ 60.80 ± 0.66% ขณะที่ค่าเฉลี่ย CO₂, O₂ และ H₂S เท่ากับ 36.50 ± 0.46%, 1.90 ± 0.10% และ 141.00 ± 3.61 ppm ตามลำดับ ทั้งนี้ ผลดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบเชิงพรรณนาและไม่ได้แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างอัตราส่วน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่าอัตราส่วนผักตบชวา : มูลวัว เท่ากับ 50 : 50 (%) โดยน้ำหนักแห้ง) ให้สัดส่วนก๊าซมีเทนสูงที่สุดในกลุ่มอัตราส่วนที่ศึกษา โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 60.80% เนื่องจากมูลวัวทำหน้าที่เป็นแหล่งจุลินทรีย์และไนโตรเจน ขณะที่ผักตบชวาเป็นแหล่ง

5.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินคุณภาพก๊าซและศักยภาพการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากสัดส่วนของ CH₄ เป็นตัวชี้วัดหลักของค่าพลังงาน ขณะที่ CO₂, O₂ และ H₂S มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานและการปรับปรุงคุณภาพก๊าซ ดังนั้น การศึกษานี้จึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักผักตบชวาร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบผลของสัดส่วนวัตถุดิบต่อคุณภาพก๊าซชีวภาพ และเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มองค์ประกอบและคุณภาพก๊าซชีวภาพของแต่ละอัตราส่วนภายใต้สภาวะการทดลองนี้

คาร์บอน แรโนมดั่งกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับการผสม ผักตบชวาและมูลวัวที่ช่วยเสริมองค์ประกอบของสารอินทรีย์ สารอาหาร และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมทาโนเจเนซิส ในส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่ามี แรโนมลดลงเมื่อสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วน 50 : 50 มีสัดส่วน CO₂ ต่ำที่สุดร่วมกับสัดส่วน CH₄ ที่สูงที่สุด แสดงถึงความแตกต่างขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพระหว่างอัตราส่วนวัตถุดิบภายใต้สภาวะการทดลองนี้ ขณะที่ ก๊าซออกซิเจนพบในปริมาณต่ำกว่า 4% ในทุกชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าระบบหมักมีสภาวะใกล้เคียงแบบไม่ใช้ออกซิเจนอย่างเหมาะสม สำหรับ H₂S พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 138–185 ppm โดยอัตราส่วนที่มีมูลวัวสูง มีแรโนมให้ค่า H₂S สูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการสลายตัวของสารประกอบกำมะถันในมูลวัว อย่างไรก็ตามค่าที่พบ

ยังอยู่ในช่วงที่สามารถจัดการได้ด้วยกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก๊าซก่อนการนำไปใช้งานจริง

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพแสดงให้เห็นว่าการหมักผักตบชวาร่วมกับมูลวัวสามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยเฉพาะอัตราส่วนผักตบชวา : มูลวัว เท่ากับ 50 : 50 (%) โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทนสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้

5.4 ผลการประเมินศักยภาพพลังงาน (Energy Potential Analysis) จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ พบว่าจากค่าเฉลี่ยองค์ประกอบก๊าซชีวภาพพบว่าอัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัว 50:50 ให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนก๊าซมีเทนสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ เท่ากับ 60.80% รองลงมาคืออัตราส่วน 25:75, 0:100, 75:25 และ 100:0 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับความแตกต่างขององค์ประกอบสารอินทรีย์สารอาหาร และจุลินทรีย์ระหว่างอัตราส่วนมากกว่าการใช้วัตถุดิบเดียว ในการประเมินศักยภาพพลังงาน โดยกำหนดค่า HHV ของมีเทนเท่ากับ 35.8 MJ/m³ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพจากอัตราส่วนวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

อัตราส่วน ผักตบชวา : มูลวัว (%) น.น.แห้ง)	CH ₄ เฉลี่ย (%)	CO ₂ เฉลี่ย (%)	O ₂ เฉลี่ย (%)	H ₂ เฉลี่ย (ppm)	ค่าความร้อนต่อ หน่วย ปริมาตร (MJ/m ³ biogas)
100 : 0	48.47	46.03	3.53	180.00	17.35
75 : 25	54.20	41.53	2.77	161.00	19.40
50 : 50	60.80	36.50	1.90	141.00	21.77
25 : 75	58.60	38.17	2.10	149.67	20.98
0 : 100	55.07	40.03	2.50	171.00	19.72

จากตารางที่ 4 พบว่า อัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัว 50:50 ให้สัดส่วนมีเทนเฉลี่ยและค่าความร้อนต่อหน่วย

ปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ โดยมีสัดส่วนมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 60.80% และค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรเท่ากับ 21.77 MJ/m³ biogas ขณะที่อัตราส่วน 100:0 ให้ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรเท่ากับ 17.35 MJ/m³ biogas ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวเป็นค่าความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพ และไม่สามารถใช้สรุปว่าอัตราส่วน 50:50 ให้พลังงานรวมสูงที่สุดได้ เนื่องจากการประเมินพลังงานรวมจำเป็นต้องพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพรวมที่ผลิตได้ของแต่ละอัตราส่วนร่วมด้วย

5.5 การประเมินการทดแทนพลังงานตามสถานการณ์สมมติ (Scenario-Based Energy Substitution Assessment) การประเมินการทดแทนพลังงานในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ภายใต้สถานการณ์สมมติ โดยกำหนดให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับประยุกต์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.00 m³/day สำหรับทุกอัตราส่วนวัตถุดิบ เพื่อใช้เป็นฐานเดียวกันในการเปรียบเทียบศักยภาพด้านพลังงาน

ตารางที่ 5 การประเมินการทดแทนพลังงานภายใต้สถานการณ์สมมติที่กำหนดปริมาณก๊าซชีวภาพ 1.00 m³/day

อัตราส่วน ผักตบชวา : มูลวัว	พลังงานตาม สถานการณ์สมมติ (MJ/day)	อัตราการทดแทน พลังงาน (%)
100 : 0	17.35	57.83
75 : 25	19.40	64.67
50 : 50	21.77	72.57
25 : 75	20.98	69.93
0 : 100	19.72	65.73

จากตารางที่ 5 พบว่าภายใต้สถานการณ์สมมติที่กำหนดปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.00 m³/day สำหรับทุกอัตราส่วน อัตราส่วน 50:50 มีค่าพลังงานที่คำนวณได้เท่ากับ 21.77 MJ/day และมีอัตราการทดแทนความต้องการพลังงานของครัวเรือนที่คำนวณได้เท่ากับ 72.57% รองลงมาคืออัตราส่วน 25:75 และ 0:100 เท่ากับ 69.93% และ 65.73% ตามลำดับ

5.6 การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ตามสถานการณ์สมมติ (Scenario-Based Economic Assessment)

การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ในส่วนนี้ดำเนินการภายใต้สถานการณ์สมมติ โดยกำหนดให้ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.00 m³/day ค่าดังกล่าวเป็นสมมติฐานที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณการทดแทน LPG มูลค่าการประหยัดพลังงาน และตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ทั้งหมดในหัวข้อนี้เป็นผลตามสถานการณ์สมมติและควรใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบและทดสอบระบบระดับนำร่องในอนาคต

5.6.1 มูลค่าการประหยัดต้นทุนพลังงาน จากความสัมพันธ์ของการทดแทนพลังงาน พบว่า ก๊าซชีวภาพ 1.00 m³/day สามารถทดแทนก๊าซ LPG ได้ประมาณ 0.46 kg/day เมื่อกำหนดราคาก๊าซ LPG เท่ากับ 28 บาทต่อกิโลกรัม ส่งผลให้เกิดการประหยัดต้นทุนพลังงาน แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การประเมินมูลค่าการประหยัดพลังงานภายใต้สถานการณ์สมมติ

รายการ	มูลค่า
ปริมาณก๊าซชีวภาพที่กำหนดในสถานการณ์สมมติ	1.00 m ³ /day
LPG เทียบเท่า	0.46 kg/day
ราคาก๊าซ LPG สมมติ	28.00 บาท/kg
มูลค่าการประหยัดต่อวัน	12.88 บาท/day
มูลค่าการประหยัดต่อเดือน	386.40 บาท/month
มูลค่าการประหยัดต่อปี	4,701.20 บาท/year

ผลการวิเคราะห์สะท้อนให้เห็นว่า ระบบก๊าซชีวภาพสามารถลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในครัวเรือนได้ โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทที่มีวัตถุดิบชีวมวลเหลือใช้ เช่น ผักตบชวาและมูลวัว

5.6.2 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เมื่อพิจารณาต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นของระบบสามารถคำนวณระยะเวลาคืนทุนได้ แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของระบบก๊าซชีวภาพ

รายการ	มูลค่า
เงินลงทุนเริ่มต้น	18,000 บาท
กระแสเงินสดสุทธิต่อปี	3,701.20 บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	4.86 ปี

ภายใต้สถานการณ์สมมติ เงินลงทุนเริ่มต้นของระบบเท่ากับ 18,000 บาท มูลค่าการประหยัดพลังงานขั้นต้นเท่ากับ 4,701.20 บาท/ปี และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาเท่ากับ 1,000 บาท/ปี ส่งผลให้มีกระแสเงินสดสุทธิเท่ากับ 3,701.20 บาท/ปี ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายของระบบเท่ากับประมาณ 4.86 ปี

5.6.3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และ IRR การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ใช้กระแสเงินสดสุทธิจากการประหยัดพลังงานต่อปีหักด้วยค่าใช้จ่ายดำเนินงานและบำรุงรักษา แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

รายการ	มูลค่า
เงินลงทุนเริ่มต้น	18,000 บาท
กระแสเงินสดสุทธิต่อปี	3,701.20 บาท/ปี
อายุโครงการ	10 ปี
อัตราคิดลด	8%
NPV	ประมาณ 6,840 บาท
IRR	ประมาณ 15.8%

จากตารางที่ 8 ภายใต้สถานการณ์และสมมติฐานที่กำหนด ผลการวิเคราะห์พบว่า NPV มีค่ามากกว่าศูนย์ และ IRR สูงกว่าอัตราคิดลด จึงสะท้อนว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในกรณีศึกษาี้ กล่าวคือการลงทุนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับมูลวัว

มีแนวโน้มให้ผลตอบแทนที่เหมาะสมในระยะยาว และแสดงแนวโน้มความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

6. สรุปผลและอภิปรายผล

6.1 สรุปผลการวิจัย การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมของผักตบชวาและมูลวัวเพื่อเป็นพลังงานทดแทนระดับชุมชน สามารถสรุปผลให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัยได้ดังนี้

6.1.1 ผลการสำรวจและศึกษาศักยภาพของ ผักตบชวาและมูลวัวสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่า พื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีผักตบชวาและมูลวัวเป็นวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในชุมชน โดยผักตบชวาพบแพร่กระจายในแหล่งน้ำธรรมชาติ และคลองชลประทาน ส่วนมูลวัวเกิดจากการเลี้ยงโคในระดับครัวเรือนและฟาร์มขนาดเล็ก วัตถุดิบทั้งสองชนิดยังไม่ได้มีการจัดการหรือใช้ประโยชน์อย่างเต็มประสิทธิภาพ เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นพบว่า ผักตบชวามีค่า TS เท่ากับ 12.5% ค่า VS เท่ากับ 82.0%TS และค่า pH เท่ากับ 6.5 ขณะที่มูลวัวมีค่า TS เท่ากับ 16.0% ค่า VS เท่ากับ 78.0%TS และค่า pH เท่ากับ 7.2 แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

6.1.2 การศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจาก การย่อยร่วมผักตบชวาและมูลวัวในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่า อัตราส่วน 50:50 ให้สัดส่วน CH_4 เฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 60.80% ขณะที่ CO_2 , O_2 และ H_2S เฉลี่ยเท่ากับ 36.50%, 1.90% และ 141 ppm ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงว่า ภายใต้สภาวะการทดลองนี้ อัตราส่วน 50:50 ให้ก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนมีเทนสูงที่สุดในกลุ่มอัตราส่วนที่ศึกษา ทั้งนี้ ผลการศึกษาดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบองค์ประกอบก๊าซ ไม่สามารถใช้สรุปว่าอัตราส่วนดังกล่าวให้ปริมาณหรือผลผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนสูงที่สุดได้

6.1.3 การประเมินค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตร พบว่า อัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัว 50:50 ให้ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ เท่ากับ

21.77 MJ/m³ biogas ซึ่งสัมพันธ์กับสัดส่วนมีเทนเฉลี่ยที่สูงที่สุดเท่ากับ 60.80% ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวเป็นค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตร มิใช่พลังงานรวมที่ถึงหมักผลิตได้ ส่วนการประเมินการทดแทนพลังงานเป็นการวิเคราะห์ตามสถานการณ์สมมติที่กำหนดปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.00 m³/day

6.1.4 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับครัวเรือนและชุมชน ภายใต้สถานการณ์สมมติที่ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.00 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่า สามารถทดแทนก๊าซ LPG ได้ประมาณ 0.46 กิโลกรัมต่อวัน โดยมูลค่าการประหยัดพลังงานขั้นต้นเท่ากับ 4,701.20 บาท/ปี และเมื่อหักค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา 1,000 บาท/ปี จะมีกระแสเงินสดสุทธิเท่ากับ 3,701.20 บาท/ปี ส่งผลให้มีระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายประมาณ 4.86 ปี หรือประมาณ 4 ปี 10 เดือน มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกประมาณ 6,840 บาท และมีอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 15.8% ซึ่งสูงกว่าอัตราคิดลดที่กำหนดไว้ 8% แสดงให้เห็นว่าระบบมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และมีแนวโน้มให้ผลตอบแทนที่เหมาะสมในระยะยาว

6.2 อภิปรายผลการวิจัย ผลการวิจัยสามารถอภิปรายให้เชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์การวิจัยแต่ละข้อได้ดังนี้

6.2.1 ด้านศักยภาพของผักตบชวาและมูลวัวสำหรับ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการสำรวจแสดงให้เห็นว่า พื้นที่อำเภอเชียรใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีความพร้อมด้านทรัพยากรชีวมวลสำหรับการพัฒนาพลังงานชีวภาพ เนื่องจากมีผักตบชวาและมูลวัวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจากสภาพพื้นที่และกิจกรรมทางการเกษตรของชุมชน ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่าฟิชีน้ำและของเสียจากการเลี้ยงสัตว์สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ และการนำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาใช้ร่วมกันสามารถเพิ่มความเหมาะสมต่อกระบวนการหมัก [7], [17] การนำผักตบชวาและมูลวัวมาใช้ผลิตพลังงานจึงเป็นแนวทางที่ช่วยแก้ไขปัญหาการอุดตันของแหล่งน้ำ ลดการสะสมของของเสียจากการเลี้ยงสัตว์ และเพิ่มมูลค่าให้แก่วัตถุ

เหลือใช้ตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นยังพบว่า ค่า pH ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยได้ของวัตถุดิบอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน การลดขนาดและความชื้นของผักตบชวาช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุดิบกับจุลินทรีย์ ขณะที่การเตรียมมูลวัวในรูปสารละลายและการพักก่อนใช้งานช่วยให้มูลวัวมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีจุลินทรีย์ที่พร้อมต่อการกระบวนการหมัก ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Weiland [18] และ Priya et al. [5] ซึ่งระบุว่าคุณสมบัติและการเตรียมวัตถุดิบเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ

6.2.2 ด้านองค์ประกอบและคุณภาพของก๊าซชีวภาพ จากอัตราส่วนวัตถุดิบที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าการย่อยร่วมระหว่างผักตบชวาและมูลวัวให้สัดส่วนก๊าซมีเทนสูงกว่าการใช้ผักตบชวาเพียงอย่างเดียว โดยอัตราส่วน 50:50 ให้สัดส่วนก๊าซมีเทนเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 60.8% ผลดังกล่าวอาจอธิบายได้จากการที่ผักตบชวาทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์บอน ขณะที่มูลวัวเป็นแหล่งไนโตรเจน สารอาหาร และจุลินทรีย์เริ่มต้น เมื่อผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งแนวโน้มดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสารอาหารและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Mata-Alvarez et al. [17] และ Tufaner และ Avşar [20] ซึ่งระบุว่า การย่อยร่วมสามารถลดข้อจำกัดของการใช้วัตถุดิบชนิดเดียว ปรับสมดุลธาตุอาหาร เพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย และส่งเสริมเสถียรภาพของกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน นอกจากนี้ อัตราส่วน 50:50 ยังให้สัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนต่ำกว่าอัตราส่วนอื่น สำหรับองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ พบว่ามีสัดส่วนก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงประมาณ 48–61% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และสอดคล้องกับข้อมูลด้านคุณภาพและการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพ [19] ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์พบในช่วง

138–185 ppm แม้ว่าจะอยู่ในระดับที่สามารถจัดการได้ แต่ควรมีระบบลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือระบบปรับปรุงคุณภาพก๊าซก่อนนำไปใช้งานจริง เพื่อช่วยลดกลิ่น ลดการกัดกร่อนของอุปกรณ์ และเพิ่มความปลอดภัยของระบบ

6.2.3 ด้านศักยภาพพลังงานและการทดแทนพลังงาน ในระดับครัวเรือน ผลการประเมินพบว่าอัตราส่วน 50:50 ให้ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ เท่ากับ 21.77 MJ/m³ biogas ซึ่งสัมพันธ์กับสัดส่วนมีเทนเฉลี่ยที่สูงที่สุด เนื่องจากค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรในการศึกษานี้คำนวณโดยตรงจากสัดส่วนมีเทน อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวไม่สามารถใช้สรุปว่าอัตราส่วน 50:50 ให้พลังงานรวมสูงที่สุดได้ เนื่องจากการคำนวณพลังงานรวมจำเป็นต้องใช้ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของแต่ละอัตราส่วนร่วมด้วย

6.2.4 ด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ ผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ประมาณ 4,701.20 บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 4.86 ปี ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับระบบพลังงานทดแทนขนาดครัวเรือน นอกจากนี้ การที่ค่า NPV มีค่าเป็นบวกประมาณ 6,840 บาท และค่า IRR เท่ากับ 15.8% ซึ่งสูงกว่าอัตราคิดลด 8% แสดงว่าโครงการสามารถสร้างผลตอบแทนได้มากกว่าต้นทุนทางการเงินที่กำหนด และมีความคุ้มค่าในการลงทุนตลอดอายุโครงการ 10 ปี ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ดังกล่าวมีพื้นฐานจากการนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น ซึ่งมีต้นทุนต่ำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานที่สามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ได้ อย่างไรก็ตาม ผลตอบแทนของระบบในทางปฏิบัติอาจเปลี่ยนแปลงตามต้นทุนการติดตั้ง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา ราคา LPG ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ และความสม่ำเสมอของวัตถุดิบ ดังนั้น การขยายผลสู่ระดับชุมชนควรมีการสำรวจปริมาณวัตถุดิบและความต้องการพลังงานของพื้นที่อย่างละเอียด รวมถึงออกแบบขนาดระบบให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละชุมชน

โดยสรุป ภายใต้การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ อัตราส่วน 50:50 ให้สัดส่วนมีเทนเฉลี่ยและค่าความร้อน

ต่อหน่วยปริมาตรสูงที่สุดในกลุ่มที่ศึกษา ผลดังกล่าวเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาและทดสอบระบบระดับนำร่อง โดยจำเป็นต้องศึกษาปริมาณก๊าซ ผลผลิตก๊าซต่อหน่วย VS เสถียรภาพกระบวนการ และประเมินด้านเศรษฐศาสตร์จากข้อมูลการเดินระบบจริงก่อนสรุปความเหมาะสมในระดับครัวเรือนหรือชุมชน

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

7.1.1 ควรขยายขนาดการทดลองจากถังหมักระดับห้องปฏิบัติการขนาด 5 ลิตร ไปสู่ระบบระดับนำร่องหรือระดับครัวเรือน เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาพแวดล้อมและการใช้งานจริงในชุมชน

7.1.2 ควรศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มเติม เช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราการระเหยอินทรีย์ ระยะเวลาเก็บกัก อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และความรู้ในการกวน เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนอย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ

7.1.3 ควรศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการปรับสภาพผักตบชวา เช่น การลดขนาด การใช้ความร้อน การใช้สารละลายต่าง และการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสและเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ

7.1.4 ควรศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม อัตราการผลิตก๊าซ และองค์ประกอบของก๊าซอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการหมัก รวมทั้งศึกษาวิธีลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และความชื้น เพื่อให้ก๊าซชีวภาพมีคุณภาพเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง

7.1.5 ควรวิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ให้ครอบคลุมตลอดอายุโครงการ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของราคาก๊าซ LPG ต้นทุนแรงงาน ค่าบำรุงรักษา ปริมาณวัตถุดิบในแต่ละฤดูกาล และประโยชน์จากการนำกากหมักไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์

7.2 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

7.2.1 การนำผลการวิจัยไปใช้ ควรพิจารณาอัตราส่วนผักตบชวาต่อมูลวัว 50:50 โดยน้ำหนักแห้งเป็นแนวทางเบื้องต้น เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทนและค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ ทั้งนี้ควรทดสอบปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จริงและผลผลิตก๊าซต่อหน่วยสารอินทรีย์เพิ่มเติมก่อนนำไปขยายผลในระดับนำร่องหรือระดับชุมชน

7.2.2 ควรเตรียมผักตบชวาโดยล้างทำความสะอาดและสับให้มีขนาดประมาณ 1-3 เซนติเมตร ส่วนมูลวัวควรคัดแยกสิ่งปนเปื้อนและผสมกับน้ำให้เป็นสารละลายที่สม่ำเสมอ เพื่อช่วยให้วัตถุดิบย่อยสลายได้ง่ายและลดปัญหาการอุดตันภายในถังหมัก

7.2.3 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นำไปใช้งานจริงควรติดตั้งอุปกรณ์กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และความชื้น รวมทั้งติดตั้งวาล์วนิรภัย อุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ และตรวจสอบการรั่วซึมของก๊าซอย่างสม่ำเสมอ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน

7.2.4 ควรส่งเสริมให้ครัวเรือนหรือชุมชนจัดตั้งระบบบริหารจัดการวัตถุดิบร่วมกัน โดยกำหนดผู้รับผิดชอบในการรวบรวมผักตบชวาและมูลวัว การบ่อนวัตถุดิบ การควบคุมระบบ และการบำรุงรักษา พร้อมทั้งจัดอบรมการผลิตและการใช้ก๊าซชีวภาพอย่างถูกต้องและปลอดภัย

7.2.5 ก่อนขยายผลไปใช้ในระดับชุมชนควรดำเนินโครงการนำร่องในพื้นที่ที่มีผักตบชวาและมูลวัวเพียงพอ พร้อมบันทึกข้อมูลปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ การใช้พลังงาน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อใช้ปรับปรุงระบบให้เหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจ สังคม และทรัพยากรของแต่ละชุมชน

8. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม งบประมาณ

เพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช และอำเภอเชียรใหญ่
จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่ให้การสนับสนุนและความร่วมมือ
ในการดำเนินงานวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khalid, A. and et al. 2011. "The anaerobic digestion of solid organic waste," *Waste Management*, 31(8): pp. 1737-1744. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- [2] International Energy Agency. 2020. *Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for Organic Growth*. Paris, France: IEA
- [3] Rajendran, K., Aslanzadeh, S. and Taherzadeh, M. J. 2012. "Household biogas digesters—A review," *Energies*, 5(8): pp. 2911-2942. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en5082911>
- [4] O'Sullivan, C. A. and et al. 2010. "Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*)," *Ecological Engineering*, 36(10): pp. 1459-1468. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.027>
- [5] Priya, P. and et al. 2018. "Biomethanation of water hyacinth biomass," *Bioresour Technol*, 255: pp. 288-292. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.119>
- [6] Tasnim, F., Iqbal, S. A. and Chowdhury, A. R. 2017. "Biogas production from anaerobic co-digestion of cow manure with kitchen waste and water hyacinth," *Renewable Energy*, 109: pp. 434-439. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.044>
- [7] Omondi, E. A., Njuru, P. G. and Ndiba, P. K. 2019. "Anaerobic co-digestion of water hyacinth (*E. crassipes*) with ruminal slaughterhouse waste for biogas production," *International Journal of Renewable Energy Development*, 8(3): pp. 253-259. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14710/ijred.8.3.253-259>
- [8] Rahman, M. M. and et al. 2014. "Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries," *Renewable Energy*, 68: pp. 35-45. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.030>
- [9] Garfi, M. and et al. 2012. "Evaluating benefits of low-cost household digesters for rural Andean communities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1): pp. 575-581. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.023>
- [10] Ali, S. S. and et al. 2022. "Exploring the potential of anaerobic co-digestion of water hyacinth and cattle dung for enhanced biomethanation and techno-economic feasibility," *Fuel*, 329: p. 125397. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125397>
- [11] Soeprijanto, S. and et al. 2021. "The utilization of water hyacinth for biogas production in a plug flow anaerobic digester," *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(1): pp. 27-35. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.21843>

- [12] Lerkmahalikhit, Y. and Sasananan, S. 2021. "Enhancement of biogas production potential of water hyacinth (*Eichhornia speciosa* Kunth) using integrated solar radiation and co-digestion," *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 16(2): pp. 1-15. [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/sej/article/view/243494> (in Thai)
- [13] Kaewpuang, T. and et al. 2025. "High-rate biogas production from water hyacinth via co-digestion with cattle manure: Kinetic assessment, process stabilization, and energy recovery in an invasive-plant biorefinery," *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication*, 7(2): pp. 64-74. [Online]. Available: <https://doi.org/10.54279/mijeec.v7i2.264510>
- [14] Damrongsak, D. and Chaichana, C. 2020. "Biogas initiative from municipal solid waste in northern Thailand," *Energy Reports*, 6(Suppl. 2): pp. 428-433. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.098>
- [15] Surendra, K. C. and et al. 2014. "Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31: pp. 846-859. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.015>
- [16] International Renewable Energy Agency. 2020. *Renewable Power Generation Costs in 2019*. Abu Dhabi, United Arab Emirates: IRENA
- [17] Mata-Alvarez, J. and et al. 2014. "A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36: pp. 412-427.
- [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- [18] Weiland, P. 2010. "Biogas production: Current state and perspectives," *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4): pp. 849-860. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- [19] Angelidaki, I. and et al. 2018. "Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives," *Biotechnology Advances*, 36(2): pp. 452-466. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- [20] Tufaner, F. and Avşar, Y. 2016. "Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: A review," *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(9): pp. 2303-2312. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1069-1>