

ผลของกระบวนการปรับสภาพฟางข้าวต่อการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้ระบบการหมักร่วม แบบด้วยมูลวัวแบบไม่ใช้ออกซิเจน

Effects of rice straw pretreatment on biogas production in an anaerobic co-digestion
system with cow manure

สุรีย์พร ธรรมิกพงษ์, ผุสดี ภูมรา และ ปัทธพร คุณาพงษ์กิติ*

Sureeporn Thummikpong, Phussadee Phummara and Pattaraporn Kunapongkiti*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวด้วยกระบวนการปรับสภาพและกระบวนการหมักร่วม โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวที่ไม่ผสม และฟางข้าวที่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเก๋าในอัตราส่วน 3:1 และ 5:1 โดยพิจารณาปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (น้ำหนักแห้ง) พบว่า ก้อนเชื้อเห็ดเก๋าช่วยในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้ โดยพบว่าในตัวอย่างที่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเก๋ามีเฮมิเซลลูโลสลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ไม่มีการผสม ฟางข้าวที่ไม่ผสมมีค่าเซลลูโลส 33.76 เปอร์เซ็นต์, เฮมิเซลลูโลส 34.90 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 21.94 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่อัตราส่วน 3:1 มีค่าเซลลูโลส 35.50 เปอร์เซ็นต์, เฮมิเซลลูโลส 16.29 เปอร์เซ็นต์ และ ลิกนิน 28.30 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วน 5:1 มีค่าเซลลูโลส 37.36% เฮมิเซลลูโลส 18.11 เปอร์เซ็นต์ และ ลิกนิน 25.77 เปอร์เซ็นต์ ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากการใช้มูลวัวผสมฟางข้าวกับก้อนเชื้อเห็ดเก๋า การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ชุด การทดลองละ 2 ซ้ำ โดยนำวัสดุอัตราส่วน 5:1 มาผสมกับมูลวัวในอัตราส่วน 100:0, 90:10 และ 70:30 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า ทั้ง 3 อัตราส่วนให้ผลการผลิตก๊าซชีวภาพที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F=0.40$, $P>0.05$)

คำสำคัญ: กระบวนการปรับสภาพ, กระบวนการหมักร่วม, ฟางข้าว, ก้อนเชื้อเห็ดเก๋า, ก๊าซชีวภาพ

Abstract

This study aimed to investigate the biogas potential from rice straw through pretreatment and co-digestion processes. The experiment was conducted in two phases. The first phase compared the chemical composition of untreated rice straw with rice straw mixed with spent mushroom substrate (SMS) at ratios of 3:1 and 5:1 (rice straw: SMS), with particular focus on cellulose, hemicellulose, and lignin content (dry weight basis). The results showed that SMS facilitated the degradation of hemicellulose, as evidenced by a marked reduction in hemicellulose content in the mixed samples relative to untreated rice straw. Untreated rice straw contained cellulose at 33.76%, hemicellulose at 34.90%, and lignin at 21.94%, whereas the 3:1 mixture yielded cellulose at 35.50%, hemicellulose at 16.29%, and lignin at 28.30%, and the 5:1 mixture yielded cellulose at 37.36%, hemicellulose at 18.11%, and lignin at 25.77%. The second phase investigated biogas production from co-digestion of cattle manure with the rice straw–SMS mixture. Three treatment groups were established, each conducted in duplicate, using the 5:1 rice straw-to-SMS ratio combined with cattle manure at proportions of 100:0, 90:10, and 70:30 (rice straw–SMS mixture: cattle manure). The analysis of biogas production revealed that the three substrate mixing ratios did not differ significantly in terms of biogas yield ($F=0.40$, $P>0.05$).

Keywords: pretreatment, anerobic co-digestion, rice straw, spent mushroom, biogas

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Muang District, Chachoengsao 24000, Thailand

* Corresponding author. E-mail: Pattaraporn.kun@rru.ac.th

Received: December 27, 2025; Revised: April 20, 2026; Accepted: June 18, 2026

บทนำ

การพัฒนาเศรษฐกิจฐานรากในการใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมเป็นปัจจัยหนึ่งในการสร้างความยั่งยืนให้กับประเทศไทยให้บรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (sustainable development goals: SDGs) รัฐบาลไทยจึงประกาศใช้โมเดลเศรษฐกิจบีซีจี (BCG) ได้แก่ เศรษฐกิจชีวภาพ (bio economy) เป็นการนำทรัพยากรทางธรรมชาติหรือผลผลิตทางการเกษตร มาพัฒนาต่อยอดโดยใช้ความรู้ เทคโนโลยีและนวัตกรรม เพื่อสร้างมูลค่า เชื่อมโยงกับเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ที่คำนึงถึงการนำทรัพยากรมาใช้ให้เกิดประโยชน์และคุ้มค่าที่สุด โดยเน้นแก้ไขวงจรปัญหาความเสื่อมโทรมของทรัพยากร มลพิษและของเสีย รวมถึงการมุ่งไปสู่การลดปริมาณของเสียให้น้อยลงหรือเท่ากับศูนย์ (zero waste) และเศรษฐกิจสีเขียว (green economy) ที่มุ่งเน้นการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมต่อโลกอย่างยั่งยืนควบคู่ไปกับการพัฒนาเศรษฐกิจ

การนำของเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ชีวมวลมาใช้เป็นวัตถุดิบ ในการผลิตพลังงานทดแทนในการผลิต เช่น ก๊าซชีวภาพ สามารถลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสร้างเศรษฐกิจหมุนเวียนภายในชุมชน ได้แก่ ลดปัญหาขยะจากการเกษตร ลดการปัญหาการเผาทิ้ง เช่น การเผาฟางข้าว และการผลิตก๊าซชีวภาพยังส่งผลดีในทางเศรษฐศาสตร์ กล่าวคือ ชุมชนที่ใช้ก๊าซชีวภาพทดแทนก๊าซหุงต้มเป็นการลดค่าใช้จ่ายในชุมชน นอกจากนี้รัฐบาลยังมีนโยบายสนับสนุนการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนของประเทศด้วย อย่างไรก็ตามชีวมวลจากพืชซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ประกอบอยู่ในผนังเซลล์ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ อย่างไรก็ตามฟางข้าวเป็นพืชชีวมวล โดยพืชชีวมวลมีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส มีลิกนินห่อหุ้มอยู่ ทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis stage) ส่งผลให้การเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเกิดขึ้นได้ช้า และกระทบต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปัจจัยจำกัด (rate limiting step) ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion) ดังนั้นการนำชีวมวลมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพจำเป็นต้องปรับสภาพชีวมวลก่อน เพื่อย่อยสลายโมเลกุลของลิกนินก่อนเข้ากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic microorganisms) งานวิจัยที่ผ่านมาใช้กระบวนการทางชีวเคมี เคมี และทางกายภาพ ในการปรับสภาพชีวมวลก่อนเข้าสู่ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การนำชีวมวลผ่านการปรับสภาพ ด้วยก้อนเชื้อเห็ดเก่า (spent mushroom) เป็นการนำจุลินทรีย์จากก้อนเชื้อเห็ดเก่ามาย่อยสลายลิกนิน ทำให้ได้ก๊าซมีเทนในสัดส่วนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ใช้การปรับสภาพชีวมวล (Mustafa et al., 2016; Mamimin et al., 2021)

นอกจากนี้การผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic microorganisms) แบบใช้สารอินทรีย์ตั้งต้นเพียงแหล่งเดียวอาจได้ก๊าซมีเทนในสัดส่วนที่น้อยกว่าการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศโดยใช้สารอินทรีย์จากสองแหล่ง (anaerobic co-digestion) นำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อลดปัญหาการไม่คงที่ของค่า C/N ratio จากสารอินทรีย์เริ่มต้นเพียงแหล่งเดียว การใช้โดยใช้ของเสียจากการเกษตรซึ่งมีค่า C/N ratio สูง มาผสมกับสารอินทรีย์ที่มีสัดส่วนของ C/N ratio ต่ำในสัดส่วนที่เหมาะสม เป็นการเพิ่มผลผลิตและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (Bayrakdar et al., 2017; Matheri et al., 2017; Shen et al., 2019) นอกจากนี้มูลสัตว์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตทางการเกษตรที่มีจุลินทรีย์ไม่ใช้ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มเดียวกับที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากผลการศึกษาของ Gashaw et al., (2020) พบว่า การเติมมูลวัวในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มค่า alkalinity และปริมาณไนโตรเจนในระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้กระบวนการหมักภายใต้สภาวะ anaerobic digestion มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการ

สะสมของกรดไขมันระเหย (volatile fatty acids: VFA) ซึ่งเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบหมัก หากมีการสะสมในระดับสูงเกินไป ด้วยเหตุนี้การควบคุมสัดส่วนของมูลวัวในกระบวนการหมักร่วมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และช่วยรักษาสมดุลของระบบจุลินทรีย์ให้ดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิผลสูงสุด

อย่างไรก็ตาม ประเทศไทยยังคงขาดงานวิจัยที่สามารถเชื่อมโยงผลการทดลองทางวิทยาศาสตร์ไปสู่การประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาขยะทางการเกษตรในระดับชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อลดช่องว่างระหว่างองค์ความรู้เชิงทฤษฎีกับการนำไปใช้จริง โดยมุ่งเน้นการลดต้นทุนพลังงานและลดมลพิษจากการเผาฟางข้าว ซึ่งสอดคล้องโดยตรงกับแนวทาง BCG economy ของประเทศไทย การศึกษานี้เลือกใช้ก้อนเชื้อเห็ดเก่าเป็นวัสดุชีวภาพในการปรับสภาพฟางข้าว ซึ่งจัดเป็นวิธีการทางชีววิทยาซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ถึงแม้ว่าวิธีดังกล่าวจะมีความเสี่ยง แต่งานวิจัยด้านการใช้ก้อนเชื้อเห็ดเก่าร่วมกับฟางข้าวยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวด้วยกระบวนการปรับสภาพและกระบวนการหมักร่วม งานวิจัยนี้ศึกษาอัตราส่วนการผลิตก๊าซชีวภาพจากนำฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพมาผสมกับระหว่างฟางข้าวและมูลสัตว์โดยใช้กระบวนการหมักร่วม (anaerobic co-digestion) ที่อัตราส่วนต่างกัน ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้เพื่อลดปัญหาวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ลดปัญหาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มรายได้ ลดรายจ่ายให้กับชุมชน และสร้างความยั่งยืนทางด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมให้กับชุมชนต่อไป

วิธีการศึกษา

1. ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

การศึกษาศักยภาพก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวด้วยกระบวนการปรับสภาพและกระบวนการหมักร่วมการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือ ตอนที่ 1 ศึกษาระยะเวลาและอัตราส่วนของฟางข้าวต่อก้อนเชื้อเห็ดในกระบวนการปรับสภาพ และตอนที่ 2 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากนำฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับ กระบวนการหมักร่วม (anaerobic co-digestion)

1.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาระยะเวลาและอัตราส่วนของฟางข้าวต่อก้อนเชื้อเห็ดในกระบวนการปรับสภาพ

การทดลองนี้ใช้กระบวนการปรับสภาพฟางข้าวผสมกับก้อนเชื้อเห็ดเก่าในอัตราส่วน (ก้อนเชื้อเห็ด:ฟางข้าว โดยน้ำหนัก) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ฟางข้าวไม่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเก่า 3:1 และ 5:1 โดยใช้ระบบใช้อากาศในถังที่มีอากาศไหลเวียนได้ระบบปิดเป็นระยะเวลา 45 วัน ศึกษาผลของระยะเวลาและอัตราส่วนของก้อนเชื้อเห็ดในกระบวนการปรับสภาพ และวิเคราะห์ ความชื้น (AOAC International, 2005) เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินตามวิธี detergent method ก่อนนำไปทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ

1.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากนำฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับกระบวนการหมักร่วม

เมื่อได้อัตราส่วนและระยะเวลาการปรับสภาพที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 แล้ว นำส่วนผสมของฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพมาทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วมแบบไม่ใช้อากาศ โดยใช้มูลวัวจากวัวอายุประมาณ 10 ปีเป็นวัตถุดิบร่วม การทดลองนี้กำหนดอัตราส่วนของมูลวัวต่อส่วนผสมฟางข้าวและก้อนเชื้อเห็ดที่ผ่านการปรับสภาพเป็น 3 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 90:10 และ 70:30 โดยใช้ถังปฏิกรณ์ระบบปิดขนาด 1.50 ลิตรที่มีปริมาตรใช้งาน 0.80 ลิตร และปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 7.80-8.20 ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เพื่อรักษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ ตลอดการทดลองและวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

2. การทดลองเดินระบบ

การทดลองนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 35-37°C โดยใช้ขวดพลาสติกขนาด 1.50 ลิตร เป็นถังหมักแบบไร้อากาศ ที่มีปริมาตรใช้งาน (working volume) 0.80 ลิตร ถังหมักถูกติดตั้งจุดเก็บตัวอย่างน้ำและก๊าซ พร้อมทั้งอุดรอยต่อทุกจุดด้วยกาวซิลิโคนเพื่อป้องกันการรั่วซึมของอากาศภายนอกเข้าสู่ระบบ การวัดปริมาตร ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอาศัยหลักการแทนที่น้ำด้วยก๊าซ โดยก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะถูกนำออกผ่านวาล์วด้านบนของถังหมัก จากนั้นไหลผ่านท่อสายยาง หลอดแก้ว และท่อซิลิโคนตามลำดับ ก่อนเข้าสู่ภาชนะกักเก็บที่ทำงานตามหลักการแทนที่น้ำ เพื่อวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

การทดลองเดินระบบ เริ่มต้นจาก (start-up) ใช้มูลวัว ลงในถังหมักประมาณร้อยละ 40 ของปริมาตร ถังหมัก จากนั้นนำฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพจากการทดลองที่ 1 ผสมกับมูลวัวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากชุมชน โดยวัวมีอายุ ประมาณ 10 ปี ต่อจากนั้นเทผสมวัตถุดิบดังกล่าวลงในถังหมักประมาณร้อยละ 80 ของปริมาตรของถังหมัก ปิดฝาถังหมัก ให้แน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าได้ ต่อจากนั้นเริ่มวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) อุณหภูมิ pH ปริมาณของแข็งแขวนลอย (suspended solid: SS) และปริมาณของแข็ง ระเหยได้ (volatile solid: VS) มีวิธีวิเคราะห์ ดัง (Table 1)

Table 1 Parameters and analytical methods used for feedstock characterization in anaerobic digestion.

parameter	unit	method	reference
pH		electrometric method	APHA (2017)
TSS	mg/L	SM 2540 D	APHA (2017)
total alkalinity	mg/kg as CaCO ₃	titration	APHA (2017)
VS	mg/kg	dried at 103-105°C, ignited at 550°C	APHA (2017)
TKN	mg/kg as N	Macro-Kjeldahl	APHA (2017)
VFA	mg/kg as CH ₃ COOH	titration	APHA (2017)

3. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การออกแบบการทดลองที่ 2 ชุดการทดลองทำการทดลอง 2 ซ้ำ และวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การศึกษานี้ ก้อนเชื้อเห็ดเก่า ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากฟาร์มเพาะเห็ด ถูกนำมาใช้เป็นตัวช่วยในการย่อยสลาย โครงสร้างของฟางข้าว และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ในด้านองค์ประกอบทางเคมี พารามิเตอร์ชีวภาพ และปริมาณ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ภายใต้สภาวะที่ต่างกัน ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ตอนที่ 1 การวิเคราะห์ องค์ประกอบจากการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้ก้อนเชื้อเห็ดเก่าในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน และตอนที่ 2 ปริมาณการผลิต ก๊าซชีวภาพจากการใช้มูลวัวผสมฟางข้าวกับก้อนเชื้อเห็ดเก่าในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบจากการปรับสภาพฟางข้าว โดยใช้ก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋

การศึกษานี้เป็นการศึกษาการย่อยสลายของฟางข้าวที่ผสมกับก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋แบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ฟางข้าวไม่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋ และอัตราส่วนก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋:ฟางข้าว (โดยน้ำหนัก) 3:1 และ 5:1 โดยทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 45 วัน และคลุกเคล้าด้วยมือตลอดระยะเวลาการทดลอง จากการสังเกตพบว่า ก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋:ฟางข้าว 3:1 และ 5:1 เป็นอัตราส่วนที่ทำให้ฟางข้าวย่อยสลายได้ดี ขณะที่ฟางข้าวที่ไม่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋มีลักษณะของฟางข้าวไม่เปลี่ยนแปลง ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความชื้น (moisture), ของแข็งทั้งหมด (total solids: TS) และของแข็งระเหยได้ (volatile solids: VS) ผลการวิเคราะห์พบว่า ฟางข้าวที่ไม่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋มีค่า TS และ VS สูงที่สุด โดยมีค่า TS เท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์ และ VS เท่ากับ 75.50 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ตัวอย่างฟางข้าวที่ผสมกับก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋ในอัตราส่วน 3:1 และ 5:1 มีค่า TS ลดลงเหลือ 27.70 และ 25.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนค่า VS ลดลงเหลือ 22 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋ช่วยส่งเสริม การย่อยสลายของวัตถุดิบ โดยทำให้ของแข็งอินทรีย์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากงานวิจัยของ Martín et al., (2023) พบว่า ก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋เป็นแหล่งของเอนไซม์หลายชนิด ได้แก่ ligninases, cellulase, hemicellulase, xylanase และ laccase ซึ่งเอนไซม์ที่มีศักยภาพสูงในการย่อยสลาย ลิกโนเซลลูโลส สำหรับค่าความชื้น (moisture: as fed basis) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในกลุ่มที่เติมก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋ โดยฟางข้าวที่ไม่ผสมมีค่าความชื้น 13.57 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่กลุ่มที่ผสมในอัตราส่วน 3:1 และ 5:1 มีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น 74.63 และ 76.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความชื้นที่เพิ่มขึ้นนี้มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลาย เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายวัตถุดิบอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพดัง (Table 2)

Table 2 Physicochemical properties of feedstock mixtures with pretreated rice straw and spent mushroom substrate at different ratios.

parameter	sample		
	rice straw	3:1	5:1
TS (%)	91.00	27.70	25.60
VS (%)	75.50	22.00	20.00
moisture (%)	as fed basis	74.63	76.31

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose), เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของลิกโนเซลลูโลส โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างฟางข้าวที่ไม่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋กับฟางข้าวที่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋ในอัตราส่วน 3:1 และ 5:1 (ก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋:ฟางข้าว โดยน้ำหนัก) หลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเป็นเวลา 45 วัน ผลการวิเคราะห์ที่คิดบนฐานวัตถุดิบแห้ง (dry matter basis) พบว่า ฟางข้าวที่ไม่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋มีค่าเซลลูโลส เท่ากับ 33.76 เปอร์เซ็นต์, เฮมิเซลลูโลส เท่ากับ 34.90 เปอร์เซ็นต์ และ ลิกนินเท่ากับ 21.94 เปอร์เซ็นต์ ฟางข้าวที่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋ในอัตราส่วน 3:1 มีค่าเซลลูโลส เท่ากับ 35.50 เปอร์เซ็นต์, เฮมิเซลลูโลส เท่ากับ 16.29 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน เท่ากับ 28.30 เปอร์เซ็นต์ ฟางข้าวที่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเต๋อเก๋ในอัตราส่วน 5:1 มีค่าเซลลูโลส เท่ากับ 37.36 เปอร์เซ็นต์, เฮมิเซลลูโลส เท่ากับ 18.11 เปอร์เซ็นต์ และ ลิกนิน เท่ากับ 25.77 เปอร์เซ็นต์ ดัง (Table 3)

Table 3 Lignocellulosic composition of feedstock mixtures with pretreated rice straw and spent mushroom substrate at different ratios.

parameter		sample		
		rice straw	3:1	5:1
cellulose (%)	dry matter basis	33.76	35.50	37.36
hemicellulose (%)	dry matter basis	34.90	16.29	18.11
lignin (%)	dry matter basis	21.94	28.30	25.77

จากผลการทดลองพบว่า ก้อนเชื้อเห็ดเก่ามีศักยภาพในการช่วยย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้อย่างชัดเจน โดยปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ผสม อย่างไรก็ตาม หลังจากกระบวนการปรับสภาพฟางข้าวเบื้องต้น (pretreatment) โดยใช้ก้อนเชื้อเห็ดเก่า ที่อัตราส่วน 3:1 และ 5:1 ยังมีปริมาณลิกนินสูงถึง 28.30 และ 25.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับซึ่งเกินกว่าค่าที่แนะนำ (ควรต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งวัตถุดิบที่เหมาะสมควรมีปริมาณเซลลูโลสในช่วง 30-40 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 15-25 เปอร์เซ็นต์ และลิกนินไม่ควรเกิน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยคิดบนฐานน้ำหนักแห้ง (dry matter basis) (Wang et al., 2023) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผสมฟางข้าวกับก้อนเชื้อเห็ดเก่าสามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุชีวมวล โดยเฉพาะการลดลงของเฮมิเซลลูโลส ของฟางข้าวที่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเก่าในอัตราส่วน 3:1 และ 5:1 เมื่อเทียบกับฟางข้าวที่ไม่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเก่า มีค่าอยู่ในเกณฑ์วัตถุดิบที่เหมาะสมกับการผลิตก๊าซชีวภาพ ถึงแม้ว่าปริมาณเซลลูโลสของทั้ง 3 ชุดการทดลองไม่ลดลง แต่มีค่าอยู่ในเกณฑ์วัตถุดิบที่เหมาะสมกับการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่นเดียวกัน และการใช้ก้อนเชื้อเห็ดเก่าเป็นวัสดุ pretreatment สำหรับฟางข้าวสามารถช่วยลดปริมาณเฮมิเซลลูโลสได้ ขณะที่ลิกนินยังคงอยู่ในระดับสูง และเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al., (2023) พบว่าการใช้เชื้อราหรือก้อนเชื้อเห็ดเก่าสามารถย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสได้ดี โดยเฉพาะในวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลส เช่น ฟางข้าว ซึ่งช่วยให้กระบวนการย่อยสลายและผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al., (2019) ที่ระบุว่า การใช้เชื้อราในก้อนเชื้อเห็ดเก่าสามารถช่วยในการย่อยสลายโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสโดยเฉพาะ ในส่วนของเฮมิเซลลูโลส และเพคติน ซึ่งส่งผลให้วัตถุดิบสามารถนำไปย่อยในระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเซลลูโลสและลิกนินยังไม่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด ซึ่งแสดงว่าเชื้อเห็ดในก้อนเชื้อเห็ดเก่ายังมีความสามารถในการย่อยเซลลูโลสและลิกนินอย่างจำกัด ทั้งนี้ เนื่องจากก้อนเชื้อเห็ดเก่ามีส่วนผสมของวัสดุรองพื้น เช่น แกลบ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลิกนินและเซลลูโลสอยู่ในสัดส่วนสูง จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในกลุ่มที่เติมก้อนเชื้อเห็ดเก่าไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการเติมก้อนเชื้อ ทั้งนี้ควรมีการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบของก้อนเชื้อเห็ดเก่าโดยตรงเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนยิ่งขึ้นเกี่ยวกับบทบาทของเชื้อเห็ดต่อการย่อยสลายของลิกโนเซลลูโลสในระบบ

การปรับสภาพ (pretreatment) มีบทบาทสำคัญในการลดความซับซ้อนของการย่อยสลายของจุลินทรีย์ผ่านการทำลายโครงสร้างอินทรีย์เชิงซ้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น การปรับสภาพยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลผลิต โดยสามารถเพิ่มสัดส่วนมีเทนในก๊าซชีวภาพได้สูงถึงร้อยละ 120 เมื่อเทียบกับวัตถุดิบชีวมวลที่ไม่ผ่านการบำบัด (Kasinath et al., 2021; Rani et al., 2021; Mustafa et al., 2017) ในการผลิตก๊าซชีวภาพ (biogas) จากวัตถุดิบชีวมวล เช่น ฟางข้าว สิ่งสำคัญคือต้องพิจารณาสัดส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เพราะแต่ละองค์ประกอบมีผลต่อความสามารถในการย่อยได้ของจุลินทรีย์ (biodegradability) และปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ องค์ประกอบหลักของวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่

เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีคุณสมบัติและบทบาทแตกต่างกัน เซลลูโลสเป็นโพลีแซ็กคาไรด์ (polysaccharide)เชิงซ้อนที่สามารถย่อยได้โดยจุลินทรีย์เฉพาะกลุ่ม แม้จะให้ก๊าซชีวภาพได้ดีแต่จะต้องผ่านกระบวนการเตรียมวัตถุดิบโดยการปรับสภาพเสียก่อน เพื่อเปิดโครงสร้างให้จุลินทรีย์เข้าถึงได้ง่าย หากมีปริมาณเซลลูโลสสูงเกินไปโดยไม่มีการเตรียมที่เหมาะสม อาจทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้ช้า สำหรับเฮมิเซลลูโลสถือเป็นองค์ประกอบที่ย่อยง่ายที่สุดในกลุ่มลิกนินเซลลูโลส และสามารถให้ก๊าซชีวภาพได้อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการหมัก จึงเป็นแหล่งคาร์บอนสำคัญที่ช่วยเร่งการผลิตก๊าซ ส่วนลิกนินนั้นไม่สามารถย่อยได้โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างห่อหุ้มเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้จุลินทรีย์เข้าถึงสารอาหารเหล่านั้นได้ยาก หากมีปริมาณลิกนินสูงเกินไปจะยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซโดยตรง ดังนั้นการช่วยลดปริมาณลิกนินและเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงของจุลินทรีย์ ส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงควรมีการปรับกระบวนการปรับสภาพเพิ่มเติมด้วยวิธีการปรับสภาพทางกายภาพ การใช้วิธีการปรับสภาพทางชีวเคมี หรือการใช้วิธีการปรับสภาพด้วยวิธีอื่น ๆ ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมร่วมด้วย จากงานวิจัยของ Pakvilai et al., (2021) พบว่า การปรับสภาพทางกายภาพและมูลวัว โดยมีการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพกระทั่งได้สภาวะที่อัตราส่วนของไบออยต่อมูลวัว 1:1 โดยการปรับสภาพทางกายภาพเพื่อให้ไบออยมีขนาดเล็กลงจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของไบออย พบว่ามีค่าเซลลูโลส 39.096 ± 0.559 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 25.291 ± 0.937 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 18.556 ± 1.399 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างไบออยและมูลวัว พบว่า เปอร์เซ็นต์มีเทนสูงสุด มีค่า 65.11 ± 0.30 เปอร์เซ็นต์ จากงานวิจัยที่ของ Mamimin et al., (2021) ทะลายปาล์มน้ำมันที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพโดยการเพาะเห็ดฟาง *Volvariella volvacea* หลังการเพาะเห็ด พบว่า โครงสร้างของวัสดุถูกย่อยสลายบางส่วน ได้แก่ เซลลูโลสลดลง 3.30 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลสลดลง 21.30 เปอร์เซ็นต์ และลิกนินลดลง 17.60 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้วัสดุมีโครงสร้างที่อ่อนตัวลงและย่อยสลายได้ดีขึ้น เมื่อนำก้อนเชื้อเห็ดเก่าไปใช้ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศพบว่าสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด $281 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{ VS/ton}$ นอกจากนี้ เมื่อทำการหมักร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานปาล์มน้ำมันในสัดส่วน 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเป็น 54 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ยังวิธีอื่นในการปรับสภาพฟางข้าว Maduang et al., (2018) ศึกษาผลของการปรับสภาพฟางข้าวด้วยคลื่นอัลตราโซนิกควบคู่กับการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก พบว่า เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและมีการลดลงของหมู่ฟังก์ชัน

2. ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากการใช้มูลวัวผสมฟางข้าวกับก้อนเชื้อเห็ดเก่า

จากผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างที่ผสมฟางข้าวกับก้อนเชื้อเห็ดเก่าในอัตราส่วน 5:1 มีองค์ประกอบของเซลลูโลส (37.36 เปอร์เซ็นต์) และเฮมิเซลลูโลส (18.11 เปอร์เซ็นต์) อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ และในการทดลองเบื้องต้นโดยการนำตัวอย่างฟางข้าวไม่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเก่า และอัตราส่วนก้อนเชื้อเห็ดเก่า:ฟางข้าว (โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วน 3:1 และ 5:1 ผสมกับมูลวัว ในอัตราส่วน 90:10 และ 70:30 (มูลวัว:วัตถุดิบ) พบว่า ตัวอย่างที่ผสมฟางข้าวกับก้อนเชื้อเห็ดเก่า ในอัตราส่วนนี้มีแนวโน้มการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าวไม่ผสมก้อนเชื้อเห็ดเก่า และอัตราส่วนก้อนเชื้อเห็ดเก่า:ฟางข้าว (โดยน้ำหนัก) (ไม่แสดงผลการทดลอง) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกฟางข้าวกับก้อนเชื้อเห็ดเก่าในอัตราส่วน 5:1 มาทดลองต่อไป อย่างไรก็ตาม ฟางข้าวกับก้อนเชื้อเห็ดเก่าในอัตราส่วน 5:1 ยังมีปริมาณลิกนินสูงถึง 25.77 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกินกว่าค่าที่แนะนำ (ควรต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์) โดยลิกนินเป็นองค์ประกอบที่ต้านทานการย่อยสลาย ส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพอาจเกิดขึ้นได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาต่อยอดโดยการนำตัวอย่างอัตราส่วน 5:1 มาผสมกับมูลวัวในสัดส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 100:0, 90:10 และ 70:30 (มูลวัว:ตัวอย่างที่ผสมฟางข้าวกับก้อนเชื้อเห็ดเก่าในอัตราส่วน 5:1) เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพฟางข้าวด้วยก้อนเชื้อเห็ดเก่าต่อสภาวะทางชีวเคมีที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทั่วไป อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ

ย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนอยู่ในช่วง 20-30 ทั้งนี้ อัตราส่วน C/N ที่สูงหรือต่ำเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพของกระบวนการ Neshat et al., (2017) รายงานว่า อัตราส่วน C/N ที่ต่ำ (11-14) และการขาดแคลนคาร์บอนในมูลวัว สามารถนำไปสู่การสะสมของแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งก่อให้เกิดการยับยั้งต่อจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน ในทางกลับกัน Ma et al., (2020) ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราส่วน C/N เป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มผลผลิตมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลวัว อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วน C/N สูงเกินไปจนเกิดภาวะขาดแคลนไนโตรเจน ความเข้มข้นและความสามารถในการบำบัดฟอรัสของระบบจะลดลง ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอาจนำไปสู่ภาวะกรดของระบบในที่สุดด้วยเหตุนี้ การย่อยร่วม (co-digestion) จึงถูกนำมาใช้เป็นกลยุทธ์สำคัญในการปรับสมดุลอัตราส่วน C/N ผ่านการผสมวัตถุดิบหลายประเภทที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการและยกระดับประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทน

การทดลองนี้วิเคราะห์พารามิเตอร์ทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ pH, total suspended solids (TSS), volatile solids (VS), total Kjeldahl nitrogen (TKN), volatile fatty acids (VFA) และ total alkalinity ซึ่งเป็นดัชนีสำคัญในการประเมินสภาวะของระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) พบว่า จากการทดลองใช้มูลวัวผสมวัตถุดิบที่มีอัตราส่วน 5:1 ในอัตราส่วน 100:0, 90:10 และ 70:30 (มูลวัว:วัตถุดิบ) พบว่าการเติมมูลวัวมีผลต่อสมดุลทางชีวเคมีของระบบหมักอย่างชัดเจน โดยค่า pH ในทุกอัตราส่วนอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เมทาโนเจน (methanogen) (7.20-8.00) ซึ่งอัตราส่วน 90:10 และ 70:30 มีค่า pH สูงขึ้น แสดงถึงการช่วยปรับสภาวะกรด-ด่างของระบบได้ดี ในขณะที่ total suspended solids (TSS) สูงที่สุดในอัตราส่วน 90:10 ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อาจเกิดจากโครงสร้างของวัตถุดิบที่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย ค่าความเป็นด่าง (total alkalinity) เพิ่มขึ้นตามปริมาณของมูลวัว โดยอัตราส่วน 70:30 มีค่าความเป็นด่างสูงสุด ซึ่งช่วยรองรับกรดระเหยและรักษาเสถียรภาพของระบบ ค่า volatile solids (VS) ซึ่งแสดงถึงอินทรีย์วัตถุที่สามารถย่อยได้ มีค่าสูงในทุกอัตราส่วน โดยอัตราส่วน 90:10 มีค่าสูงที่สุด แสดงถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ขณะที่ค่า total Kjeldahl nitrogen (TKN) สูงสุดในอัตราส่วน 70:30 แสดงถึงการเพิ่มปริมาณธาตุไนโตรเจนซึ่งมีผลต่อการกระตุ้นการเจริญของจุลินทรีย์ สำหรับค่า volatile fatty acids (VFA) สูงสุดในอัตราส่วน 70:30 แสดงถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ แต่ต้องควบคุมไม่ให้ VFA สะสมเกินระดับที่เป็นพิษ โดยสรุปอัตราส่วน 90:10 ดัง (Table 4) ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งส่งผลต่อความสมดุลทางชีวภาพที่ดีทั้งด้านค่า pH, VS, TKN และ VFA ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพที่เหมาะสมในการนำไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยต่อระบบย่อยสลาย

Table 4 Physical and chemical characteristics of cattle manure and pretreated rice straw with spent mushroom substrate mixtures at different ratios for anaerobic digestion.

parameter	unit	sample		
		100:0	90:10	70:30
pH		7.2	7.5	8.0
TSS	mg/L	47,380	138,200	98,400
total alkalinity	mg/kg as CaCO ₃	3,545	3,642	4,086
VS	mg/kg	766,100	780,300	775,500
TKN	mg/kg as N	1,013	1,013	1,289
VFA	mg/kg as CH ₃ COOH	898	948	1,177

การผลิตก๊าซชีวภาพจากการศึกษาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการผสมวัตถุดิบฟางข้าวผ่านการปรับสภาพด้วยก้อนเชื้อเห็ดเห็ดเก่าในอัตราส่วน 5:1 กับมูลวัวในอัตราส่วน 100:0, 90:10 และ 70:30 พบว่าอัตราส่วนของมูลวัวมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะชีวเคมีของระบบ และส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ดัง (Figure 1)

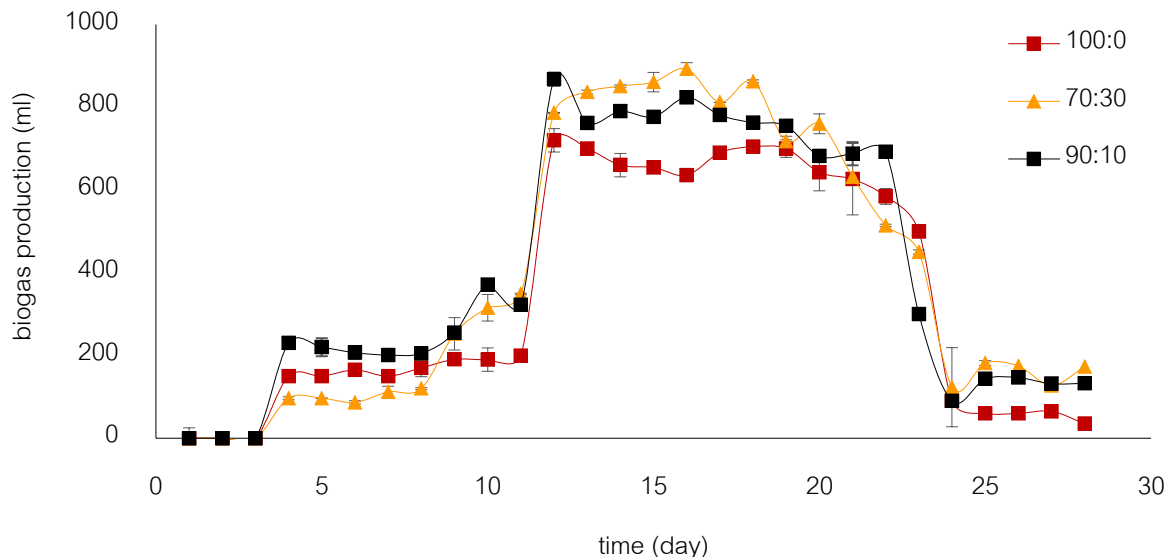


Figure 1 Biogas production during the anaerobic co-digestion of cattle manure with pretreated rice straw and spent mushroom substrate at various ratios.

จาก (Figure 1) ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในช่วง 30 วัน พบว่าทุกอัตราส่วนเริ่มมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นตั้งแต่หลังวันที่ 3 และเข้าสู่ช่วงการผลิตสูงสุดระหว่างวันที่ 10-20 โดยที่อัตราส่วน 90:10 ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 868 ± 16 มิลลิลิตรต่อวัน อัตราส่วน 70:30 ให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพพลรองลงมา โดยมีปริมาณการผลิต ก๊าซชีวภาพสูงสุดใกล้เคียงกับ 90:10 แต่มีแนวโน้มลดลงเร็วกว่าหลังจากวันที่ 20 และอัตราส่วน 100:0 มีปริมาณก๊าซต่ำสุดตลอดการทดลอง และมีการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างชัดเจนหลังจากวันที่ 22

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนประกอบด้วยค่า pH, total suspended solids (TSS), total alkalinity, volatile solids (VS), total Kjeldahl nitrogen (TKN) และ volatile fatty acids (VFA) พบว่าอัตราส่วนการผสมมีผลต่อคุณสมบัติของระบบหมักอย่างชัดเจน โดยอัตราส่วน 90:10 ให้ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ที่ 7.50 และมีค่า VS สูงสุด (780,300mg/kg) ซึ่งบ่งชี้ถึงปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ย่อยได้สูง และค่า VFA อยู่ในระดับที่เหมาะสม (948mg/kg) ไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์เมทาโนเจน นอกจากนี้ยังมีค่า total alkalinity (3,642mg/kg) และ TKN (1,013mg/kg) ในระดับที่สมดุล ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพทางชีวภาพที่ดี ในขณะที่อัตราส่วน 70:30 แม้จะมีค่า VS สูง รองรับการผลิตก๊าซได้ดีในช่วงต้น แต่ค่า VFA ที่สูงถึง 1,177mg/kg อาจส่งผลต่อการสะสมกรดอินทรีย์ภายในระบบ และจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ผลิตมีเทนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เป็นอย่างมาก โดยกระบวนการผลิตมีเทนจะเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วง pH 6.8-7.2 (Qiu et al., 2023) อย่างไรก็ตาม Pongsuwan (2020) รายงานว่า การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของก๊าซชีวภาพทำให้ pH 7.0 และ pH 10.0 สามารถลดความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพได้ร้อยละ 55 และร้อยละ 62.20 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า VFA ซึ่งส่งผลยับยั้งต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน และอาจนำไปสู่ความไม่เสถียรหรือความล้มเหลวของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน Cai et al., (2021) รายงานว่า การควบคุม

ค่า pH ให้อยู่ในสภาวะให้เป็นกลางไม่เพียงช่วยเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการผลิตมีเทนเท่านั้น แต่ยังช่วยส่งเสริมการย่อยสลายของค่า VFA อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นหากไม่มีการควบคุมพารามิเตอร์เหล่านี้ได้อย่างเหมาะสมอาจทำให้เกิดความไม่เสถียรในระยะยาว และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพจากการเดินระบบตั้งแต่วันที่ 4 ซึ่งเป็นวันที่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจนถึงวันที่ 22 ซึ่งเป็นวันที่ปริมาณก๊าซชีวภาพเริ่มลดลง (Figure 1) พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่อัตราส่วน 90:10 70:30 และ 100:0 คือ 801 ± 80 mL, 769 ± 34 mL และ 672 ± 56 mL ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยการใช้ค่า F (F-statistic) และค่า P (p-value) มีค่า $F=0.40$ และค่า $P=0.67$ ($P>0.05$) ดัง (Table 5)

Table 5 One-way ANOVA results for biogas production from the anaerobic co-digestion of cattle manure and pretreated rice straw at various mixing ratios.

source of variation	sum of squares (SS)	degrees of freedom (df)	mean square (MS)	F-statistic	p-value
mixing ratios	75,804.26	2	37,902.13	0.40	0.67
error	7,631,039.27	81	94,210.36		
total	7,706,843.52	83			

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้ตาราง One-way ANOVA พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากทั้ง 3 อัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F=0.40$, $P>0.05$) แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมไม่มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพโดยรวมภายใต้สภาวะสภาวะการทดลองดังกล่าว อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากมีจำนวนซ้ำของการทดลองเพียง 2 ซ้ำ ($n=2$) อันเป็นผลมาจากปริมาณที่จำกัดของฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยก้อนเชื้อเห็ดเก่าซึ่งจำนวนซ้ำที่น้อยนี้อาจส่งผลต่อกำลังในการทดสอบทางสถิติ (statistical power) ในการตรวจพบความแตกต่าง ดังนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปจึงควรเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำเพื่อเพิ่มความแม่นยำและยืนยันความน่าเชื่อถือทางสถิติ

สรุป

การศึกษานี้พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยก้อนเชื้อเห็ดเก่า ในอัตราส่วน 5:1 มีความเป็นไปได้ที่นำไปใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับมูลวัวในการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ ฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยก้อนเชื้อเห็ดเก่า (อัตราส่วน 5:1) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับมูลวัวในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยศึกษาอัตราส่วนผสม 3 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 90:10 และ 70:30 (มูลวัว:ฟางข้าวปรับสภาพ) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสจากฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยก้อนเชื้อเห็ดเก่า พบว่า การใช้ก้อนเชื้อเห็ดเก่าช่วยลดปริมาณเฮมิเซลลูโลสได้ แต่ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินยังไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน บ่งชี้ว่าอาจจำเป็นต้องมีการปรับสภาพเพิ่มเติมเพื่อการย่อยสลายลิกนินให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ในส่วนของปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักแบบไร้อากาศโดยใช้อัตราส่วนผสมมูลวัว:ฟางข้าวปรับสภาพ ได้แก่ 100:0, 90:10 และ 70:30 (มูลวัว:ฟางข้าวปรับสภาพ) ในด้านปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพและเสถียรภาพของระบบในทุกอัตราส่วนผสม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F=0.40$, $P>0.05$) โดยมีค่า VS และ TKN สูง ค่า VFA อยู่ในระดับที่เหมาะสมและมีค่า alkalinity เพียงพอสำหรับรองรับกรดในระบบ

ส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เมทาโนเจน อย่างไรก็ตาม การทดลองดังกล่าวยังเป็นเพียงการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการที่มีระยะเวลาจำกัด (30 วัน) และยังขาดการวิเคราะห์สัดส่วนก๊าซมีเทนรวมถึงข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์ซึ่งประเด็นเหล่านี้ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อรองรับการขยายผลสู่ระดับชุมชนในอนาคต

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (fundamental fund) ประจำปีงบประมาณ 2567 มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์

เอกสารอ้างอิง

- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd eds.). American Public Health Association.
- AOAC International. (2005). *Official methods of analysis* (18th eds.). AOAC International.
- Bayrakdar, A., Molaey, R., Sürmeli, R. O., Sahinkaya, E., & Çalli, B. (2017). Biogas production from chicken manure: Co-digestion with spent poppy straw. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 205-210. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.007>
- Cai, G., Zhao, L., Wang, T., Lv, N., Li, J., Ning, J., Pan, X., & Zhu, G. (2021). Variation of volatile fatty acid oxidation and methane production during the bioaugmentation of anaerobic digestion system: Microbial community analysis revealing the influence of microbial interactions on metabolic pathways. *Science of The Total Environment*, 754, 142425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142425>
- Gashaw, A., Teshita, A., & Mekonnen, A. (2020). Biogas production from cow dung and its blending with crop residues: Effect on methane yield and digester performance. *Renewable Energy*, 157, 1125-1132. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.074>
- Kasinath, A., Fudala-Ksiazek, S., Szopinska, M., Bylinski, H., Artichowicz, W., Remiszewska-Skwarek, A., & Luczkiewicz, A. (2021). Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>
- Shen, J., Zhao, C., Liu, Y., Zhang, R., Liu, G., & Chen, C. (2019). Biogas production from anaerobic co-digestion of durian shell with chicken, dairy, and pig manures. *Energy Conversion and Management*, 198, 110535. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.110535>
- Ma, G., Ndegwa, P., Harrison, J. H., & Chen, Y. (2020). Methane yields during anaerobic co-digestion of animal manure with other feedstocks: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 728, 138224. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138224>

- Maduang, T., Chunhachart, O., & Pawongrat, R. (2018). The effect on morphological change of cellulose fibers by sonochemical-assisted pretreatment of lignocellulosic biomass. *RMUTSB Academic Journal*, 6(1), 26-36. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-sci/article/view/124475/98416> (in Thai)
- Mamimin, C., Chanthong, K., Leamdum, C., O-Thong, S., & Prasertsan, P. (2021). Improvement of empty palm fruit bunches biodegradability and biogas production by integrating the straw mushroom cultivation as a pretreatment in the solid-state anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 319, 124213. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124213>
- Martin, C., Zervakis, G. I., Xiong, S., Koutrotsios, G., & Strætkevren, K. O. (2023). Spent substrate from mushroom cultivation: Exploitation potential toward various applications and value-added products. *Bioengineered*, 14(1), 2252138. <https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2252138>
- Matheri, A. N., Ndiweni, S. N., Belaid, M., Muzenda, E., & Hubert, R. (2017). Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 756-764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.274>
- Mustafa, A. M., Poulsen, T. G., & Sheng, K. K. (2016). Fungal pretreatment of rice straw with *Pleurotus ostreatus* and *Trichoderma reesei* to enhance methane production under solid-state anaerobic digestion. *Applied Energy*, 170, 661-671. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.153>
- Mustafa, A. M., Poulsen, T. G., Xia, Y., & Sheng, K. (2017). Combinations of fungal and milling pretreatments for enhancing rice straw biogas production during solid-state anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 224, 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.028>
- Neshat, S. A., Mohammadi, M., Najafpour, G. D., & Lahijani, P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.137>
- Pakvilai, N., Jankaew, M., & Sawasdee, V. (2021). Potential of biogas production by co-digestion between physical pretreatment sugar cane leaf and cow dung. *Journal of Engineering and Digital Technology*, 9(2), 69-76. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/TNIJournal/article/view/244518> (in Thai)
- Pongsuwan, T. (2020). Development of biogas scrubber prototype by using neutral solution. *RMUTSB Academic Journal*, 8(2), 227-239. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-sci/article/view/241582> (in Thai)
- Qiu, S., Zhang, X., Xia, W., Li, Z., Wang, L., Chen, Z., & Ge, S. (2023). Effect of extreme pH conditions on methanogenesis: Methanogen metabolism and community structure. *Science of The Total Environment*, 877, 162702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162702>

- Rani, P., Pathak, V. V., & Bansal, M. (2021). Co-digestion of wheat straw and animal manure pretreated with calcium hydroxide for biomethane production: Kinetic study. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100145. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100145>
- Wang, S., Wang, X., & Shen, D. (2023). Enhancing anaerobic digestion of lignocellulosic biomass through fungal pretreatment: A review. *Bioresource Technology Reports*, 22, 101455. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101455>
- Zhang, X., Zhang, R., Zhang, G., & Liu, G. (2019). Effect of fungal pretreatment on lignocellulosic structure and biogas production from corn stover. *Bioresource Technology*, 277, 289-296. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.003>