บทความวิจัย

การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ร่วมกับหัวเชื้อมูลวัว

กรรณิกา แสนภักดี และ รจพรรณ นิรัญศิลป์*
สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1805 6559 อีเมล: rotjapun@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.10.002
รับเมื่อ 27 มีนาคม 2566 แก้ไขเมื่อ 28 มิถุนายน 2566 ตอบรับเมื่อ 19 กันยายน 2566 เผยแพร่ออนไลน์ 1 ตุลาคม 2567
© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ร่วมกับมูลวัว ดำเนินการภายใต้การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนที่มีการหมักแบบแบทช์และมีสภาวะอุณหภูมิเมโซฟิลิก 35±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วัน กำหนดอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบตั้งต้นและหัวเชื้อถูกควบคุมที่ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งฟางข้าวถูกปรับสภาพด้วย 4 วิธี ที่ต่างกัน ได้แก่ 1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 2) การหมักกรด 3) การให้ความร้อนโดยใช้เครื่องหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง และ 4) การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับการใช้เครื่องหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง นอกจากนี้ยังใช้ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเป็นตัวควบคุม ผลการศึกษาพบว่าการใช้ฟางข้าวที่มีการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับเครื่องหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงที่สุดที่ร้อยละ 69.6 เมื่อเปรียบเทียบกับการปรับสภาพด้วยวิธีอื่น ซึ่งให้ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด 2,114.26 มิลลิลิตรต่อ 45 วัน ศักยภาพการผลิต ก๊าซมีเทนที่ 706.00 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย และค่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนร้อยละ 66.0 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 สามารถเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพิ่มมูลค่าผ่านกระบวนการผลิตพลังงานทดแทน และช่วยแก้ปัญหาการเผาไหม้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 มูลวัว ก๊าซชีวภาพ การปรับสภาพ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

การอ้างอิงบทความ: กรรณิกา แสนภักดี และ รจพรรณ นิรัญศิลป์, "การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ร่วมกับหัวเชื้อมูลวัว," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 35, ฉบับที่ 2, หน้า 1–11, เลขที่บทความ 252-016847, เม.ย.–มิ.ย. 2568.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 35 ฉบับที่ 2 เม.ย.–มิ.ย. 2568
The Journal of KMUTNB., Vol. 35, No. 2, Apr.–Jun. 2025

Research Article

Biogas Production from San-pah-tawng 1 Rice Straw with Cow Manure Inoculum

Kannika Sanpakdee and Rotjapun Nirunsin*

Department of Renewable Energy, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1805 6559, E–mail: rotjapun@gmail.com
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.10.002
Received 27 March 2023; Revised 28 June 2023; Accepted 19 September 2023; Published online: 1 October 2024
© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The aim of this study is to investigate biogas production from San-pah-tawng 1 rice straw that was inoculated with cow manure. The experiments were carried out in an anaerobic batch process at 35+2 °C mesophilic temperature for 45 days. The ratio of substrate to inoculum was controlled to 1:2 w/v with 4 different pretreatments of rice straw, namely 1) use of 2% w/v sodium hydroxide (NaOH), 2) pre-acidification, 3) autoclaving, and 4) use of 2% w/v NaOH along with autoclaving. Untreated rice straw was also used as a control group. The results showed that biogas production from rice straw pretreated with 2% w/v NaOH with an autoclave achieved the highest COD removal efficiency of 69.60% and the maximum cumulative biogas yield of 2,114.26 mL/ 45 day with a 706.00 mL CH/g VS biomethane potential yield and 66.00% methane content. The results conclusively indicate that San-pah-tawng 1 rice straw has a potential to be an efficient feedstock for biogas production. The utilization of the rice straw is deemed valorization of waste to sustainable energy. The practice seems to be one of the solutions to the problem of agricultural combustion.

Keywords: San-pah-tawng1, Rice Straw, Cow Manure, Biogas, Pre-treated, Agricultural Residue

Please cite this article as: K. Sanpakdee and R. Nirunsin, "Biogas production from San-pah-tawng 1 rice straw with cow manure inoculum," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 2, pp. 1–11, ID. 252-016847, Apr.–Jun. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

ฟางข้าวถูกจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรที่พบในปริมาณมากในพื้นที่ภาคเหนือ ประกอบกับในแต่ละเขตพื้นที่ประชาชนส่วนใหญ่นิยมเพาะปลูกข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 เพื่อใช้บริโภคและจำหน่าย พอถึงช่วงฤดูการเก็บเกี่ยวก็จะเก็บเกี่ยวใช้ประโยชน์เฉพาะผลผลิตเท่านั้น แต่ยังเหลือฟางข้าวที่ถูกทิ้งไว้ในนาข้าว และถูกกำจัดโดยการเผาเพื่อการเตรียมดินในการเพาะปลูกครั้งต่อไป [1] โดยปัญหาที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาฟางข้าว คือ ปัญหาหมอกควันหรือที่รู้จักกันดีในชื่อเรียก ฝุ่น PM 2.5 ซึ่งปัญหาเหล่านี้ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และส่งผลเสียต่อระบบทางเดินหายใจของประชาชนในพื้นที่และบริเวณใกล้เคียงโดยรอบเป็นประจำทุกปีในช่วงฤดูกาลเพาะปลูกและเก็บเกี่ยว [2] โดยปัญหา PM 2.5 กลายเป็นปัญหาใหญ่ในปัจจุบัน อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืช ความเสื่อมโทรมและการทำลายโครงสร้างของดิน รวมไปถึงระบบนิเวศอื่น ๆ ซึ่งหนึ่งในวิธีที่ใช้ในการกำจัดฟางข้าวเหลือทิ้งทางการเกษตรนี้ คือ การนำไปเป็นวัตถุดิบการผลิตในรูปแบบของพลังงาน ซึ่งก๊าซชีวภาพจัดอยู่ในพลังงานทดแทนและเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

ก๊าซชีวภาพเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยใช้แบคทีเรียในการทำปฏิกิริยาทำให้เกิดเป็นก๊าซชีวภาพขึ้น โดยก๊าซชีวภาพดังกล่าวจะให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทนร้อยละ 50–70 [3] ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการให้ความร้อนเพื่อทดแทนก๊าซหุงต้ม น้ำมันเชื้อเพลิง รวมถึงด้านการผลิตไฟฟ้า ซึ่งการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถผลิตได้จากขยะมูลฝอย มูลสัตว์ น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ฟางข้าวจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งในส่วนของลิกนินมีลักษณะห่อหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสไว้ [4] ส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเข้าไปย่อยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสได้ เพื่อให้จุลินทรีย์สามารถเข้าถึงและย่อยได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับสภาพวัตถุดิบก่อนนำไปผลิตก๊าซชีวภาพ [5] โดยจากงานวิจัยของกิตติยา [4] ได้มีการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นธูปฤาษีร่วมกับมูลวัว ซึ่งจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสเช่นเดียวกับฟางข้าว แต่พบว่าก๊าซมีเทนที่ได้จากกระบวนการผลิตเกิดขึ้นได้ไม่ดี อาจเป็นผลมาจากสภาวะในการปรับสภาพและการเติมปริมาณสารอินทรีย์ เช่นเดียวกับจากงานวิจัยของ Fokion และคณะ [6] ที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวโดยใช้วิธีการปรับสภาพด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำเพื่อทำลายโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส และได้มีการทดลองด้วยวิธีการ BMP โดยมีการเติมไนโตรเจนอนินทรีย์ (NH_4Cl) ในระบบเพื่อปรับอัตราส่วนของวัตถุดิบ ผลการทดลองพบว่า ฟางข้าวที่ได้รับการปรับสภาพมีผลผลิตของก๊าซมีเทนสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเนื่องจากจุลินทรีย์ภายในระบบสามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น และอีกส่วนสำคัญของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ หัวเชื้อที่ใช้ในการผลิต เช่นเดียวกับงานวิจัยของเวสารัช และคณะ 2015 [7] ได้มีการผลิตก๊าซชีวภาพจากขุยมะพร้าวที่ผ่านการปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับมูลวัว เนื่องจากมูลวัวสามารถหาได้ภายในพื้นที่ชุมชน มีประโยชน์อย่างมากต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ มูลวัวนั้นมีกลุ่มจุลินทรีย์ที่สำคัญในการผลิตมีเทนที่เป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ คือ กลุ่มเมทาโนจินิกแบคทีเรียซึ่งจำเป็นสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

โดยที่ผ่านมายังไม่มีการนำฟางข้าวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ที่นิยมปลูกและถือเป็นพืชเศรษฐกิจในพื้นที่มาทำการศึกษา ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ร่วมกับหัวเชื้อมูลวัว โดยอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบตั้งต้นและหัวเชื้อถูกควบคุมที่ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นปรับสภาพฟางข้าวด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 4 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 แบบสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำการแช่ฟางข้าวที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง วิธีที่ 2 การหมักกรด (Pre-acidification) โดยกระบวนการหมักแบบกรดอ่อน [8] วิธีที่ 3 ความร้อนโดยใช้เครื่องหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Autoclave) อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน

15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 20 นาที และวิธีที่ 4 การปรับสภาพแบบผสมผสานด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง ทำการแช่ฟางข้าวที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และให้ความร้อนโดยใช้เครื่องหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Autoclave) อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 20 นาที [9] นอกจากนี้ยังใช้ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเป็นตัวควบคุม ระบบการย่อยสลายไม่ใช้ออกซิเจนถูกดำเนินการแบบแบทช์ที่สภาวะเมโซฟิลิก 35±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วัน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วัสดุเหลือทิ้งของฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 และส่วนที่ 2 หัวเชื้อมูลวัว โดยรายละเอียด สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 การเตรียมวัสดุเหลือทิ้งของฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1

นำฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 มาปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการปรับสภาพเชิงกลโดยการบดด้วยเครื่องบดวัสดุทางการเกษตรให้ได้ขนาดของวัสดุหมักประมาณ 1–5 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายได้ดียิ่งขึ้น [8] ใช้สัญลักษณ์เป็น US (Untreated, SAN-PAH-TAWNG 1) จากนั้นนำฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเชิงกลไปปรับสภาพด้วยวิธีการ 4 แบบที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ทั้ง 4 วิธีสามารถทำลายโครงสร้างของวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสได้โดยมีวิธีดังนี้

2.1.1 การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

นำฟางข้าว 100 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1000 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำการแช่ฟางข้าวทิ้งไว้ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปล้างเพื่อให้ pH เป็นกลาง จะใช้สัญลักษณ์เป็น NS (NaOH 2%; SAN-PAH-TAWNG 1)

2.1.2 การปรับสภาพด้วยวิธีการหมักกรด (Pre-acidification)

นำฟางข้าว 100 กรัม ผสมกับน้ำ 1000 มิลลิลิตร มาหมักให้เกิดกระบวนการหมักแบบกรดอ่อน โดยใช้ระยะเวลาในการหมัก 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จะใช้สัญลักษณ์เป็น PS (Pre-acidification; SAN-PAH-TAWNG 1) [8]

2.1.3 การปรับสภาพแบบความร้อนด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Autoclave)

นำฟางข้าว 100 กรัม ผสมกับน้ำ 1000 มิลลิลิตร ทำการปรับสภาพด้วยเครื่องหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 20 นาที จะใช้สัญลักษณ์เป็น AS (Autoclave; SAN-PAH-TAWNG 1)

2.1.4 การปรับสภาพแบบผสมผสานด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Autoclave)

นำฟางข้าว 100 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1000 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มาทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นกรองเอาส่วนที่เป็นของแข็งออกไปล้างเพื่อให้ pH เป็นกลาง และนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 20 นาที จะใช้สัญลักษณ์เป็น NAS (NaOH 2%+Autoclave; SAN-PAH-TAWNG 1) [10]

จากนั้นนำฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพทั้ง 4 วิธี ไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เก็บวัสดุหมักใส่ถุง ปิดให้สนิท จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบของฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 โดยมีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ประกอบด้วย ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid; TS) และปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Volatile Solids; VS)

2.2 การเตรียมหัวเชื้อมูลวัว

นำหัวเชื้อมูลวัวจากเชียงใหม่เฟรชมิลค์ฟาร์ม อำเภอบ้านโฮ่ง จังหวัดลำพูน มาแยกเศษหินที่ติดมากับมูลวัวด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 250 และทำการบดเพื่อให้

รูปที่ 1 หัวเชื้อมูลวัว

ตัวหัวเชื้อมีลักษณะละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีการผสมหัวเชื้อมูลวัวและน้ำที่อัตราส่วน 1:2 จากนั้นนำหัวเชื้อมูลวัวที่ผ่านการผสมแล้วมาทำการหมักในถังหมักชีวภาพให้เกิดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้สิ้นสุดกระบวนการก่อนนำหัวเชื้อไปใช้งาน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะการหมักย่อยแบบไร้อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบของหัวเชื้อ ได้แก่ ค่า pH, TS, VS, ปริมาณค่าความเป็นด่าง (Alkalinity; ALK) และปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatiles Fatty Acid; VFA) โดยทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์

2.3 การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ร่วมกับหัวเชื้อมูลวัว

การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ร่วมกับหัวเชื้อมูลวัว ด้วยวิธีการทำบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential; BMP) [11] ซึ่งระบบจะทำการควบคุมอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อมูลวัวเท่ากับ 1:2 โดยใช้ขวดดูแรนที่ปริมาตรทั้งหมด เท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร และปริมาตรการใช้งานจริงเท่ากับ 400 มิลลิลิตร โดยใช้วัตถุดิบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและวัตถุดิบที่ผ่านการปรับสภาพแล้วทั้ง 4 วิธี โดยทำการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ลักษณะการป้อนสารอินทรีย์แบบครั้งเดียวหรือแบบกะ (Batch Fermentation) โดยระบบมีการกวนผสมด้วยกระบวนการเขย่า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นำขวดการทดลองตั้งทิ้งไว้ในห้อง 35±2 องศาเซลเซียส เพื่อให้อุณหภูมิภายในขวดปฏิกิริยาอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของหัวเชื้อ กำหนดระยะเวลาในการทดลองเท่ากับ 45 วัน โดยทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ประกอบไปด้วยค่า pH, VFA, ALK, COD, TS, VS ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ จากนั้นวัดปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Pressure using a Digital Manometer (DM9200) และวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Biogas Analyzer (Gas Data Version GFM406)

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1

ชนิดของฟางข้าว	ค่าพารามิเตอร์		
	TS, mg/L	VS, mg/L	VS/TS Ratio
US	909,450	796,150	0.88
NS	957,700	881,900	0.92
PS	949,450	840,100	0.88
AS	999,100	893,850	0.89
NAS	909,450	911,850	0.93

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 แสดงดังตารางที่ 1 โดยการปรับสภาพด้วยวิธีการ 4 แบบ พบว่า ค่า TS ของฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ให้ค่าอยู่ในช่วง 909,450–999,100 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า VS ของฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ให้ค่าอยู่ในช่วง 796,150–911,850 มิลลิกรัมต่อลิตร และส่วนสุดท้ายเป็นการแสดงค่าอัตราส่วน VS/TS ในวิธีที่ 1 แบบโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าเท่ากับ 0.92 กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบจะกระตุ้นให้มีการเปลี่ยนสมบัติทางด้านกายภาพ คือ เป็นการกำจัดลิกนินเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการนำสารอินทรีย์ไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ง่ายยิ่งขึ้น [12] วิธีที่ 2 แบบการหมักกรด มีค่าเท่ากับ 0.88 กระบวนการดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงสารชีวโมเลกุล

ของวัตถุดิบให้กลายกรดอินทรีย์ขนาดเล็กด้วยวิธีการทางธรรมชาติ [13] วิธีที่ 3 แบบความร้อน มีค่าเท่ากับ 0.89 ขั้นตอนนี้เป็นการปรับสภาพวัตถุดิบเพื่อทำลายเนื้อเยื่อของเซลลูโลส เพื่อช่วยให้การย่อยมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น [14] วิธีที่ 4 แบบผสมผสาน มีค่าเท่ากับ 0.93 ขั้นตอนนี้เป็นการปรับสภาพแบบด่างร่วมกับความร้อนพบว่า ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยจะปรากฏชัดเจนมากขึ้น และยังทำให้โครงสร้างเปิดออก ช่วยกำจัดลิกนินได้ง่ายและทำให้ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสยังคงอยู่ไม่สูญเสียไป [15] โดยพบว่าอัตราส่วน VS/TS มีอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งค่าอัตราส่วน VS/TS ควรอยู่ในช่วง 0.69–0.95 และอัตราส่วนที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดคือ 0.95 [16] พบว่า การปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสานให้ผลดีที่สุด คือ 0.93

ตารางที่ 2 องค์ประกอบเบื้องต้นของเชื้อมูลวัว

ค่าพารามิเตอร์	หน่วย	ปริมาณ
pH	-	7.16
Temp	°C	30.1
Total solids (TS)	mg/L	43,395
Volatile solids (VS)	mg/L	35,700
VS/TS ratio	-	0.823
Alkalinity (ALK)	mg $CaCO_3$/L	6,276
Volatile fatty acid (VFA)	mg CH_3COOH/L	2,982
VFA/ALK ratio	mg CH_3COOH/ mg $CaCO_3$	0.4

3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลวัว

การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของหัวเชื้อมูลวัว แสดงดังตารางที่ 2 ประกอบไปด้วยค่า pH มีค่าเท่ากับ 7.16 พบว่า ค่าดังกล่าวมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในสภาวะไร้อากาศค่า pH มีความสำคัญต่อการทำงานของระบบที่ต้องรักษาให้อยู่ในช่วง 6.5–7.5 ในส่วนถัดมา คือ อัตราส่วน VS/TS ของมูลวัวเท่ากับ 0.823 พบว่า อัตราส่วนดังกล่าวมีความเหมาะสมเพื่อใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่าอัตราส่วน VS/TS ของตะกอนจุลินทรีย์ในบ่อหมักแบบไร้อากาศจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.70–0.85 และอัตราส่วน VFA/ALK เท่ากับ 0.4 สิ่งนี้บ่งชี้ว่าระบบมีบัฟเฟอร์สูงเพียงพอเมื่อเทียบกับกรดที่มีอยู่ซึ่งจำนวนอัตราส่วน VFA/ALK ที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.4 [17]

3.3 ผลการวิเคราะห์การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ร่วมกับหัวเชื้อมูลวัว

ตารางที่ 3 ในส่วนที่ 1 พบว่า ค่า pH ให้ค่าอยู่ในช่วง 7.26–7.32 สำหรับการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และการปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสานจะเห็นได้ว่าค่า pH มีความเป็นด่างสูงกว่าการปรับสภาพด้วยวิธีอื่น ๆ เนื่องจากในขั้นตอนการปรับสภาพมีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสมบัติเป็นด่าง [18] อย่างไรก็ตามการปรับสภาพทั้ง 4 วิธี พบว่า มีค่าที่เหมาะสม โดยระบบแสดงให้เห็นถึงความเสถียรและมีประสิทธิภาพภายในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี ซึ่งต้องรักษา pH ให้อยู่ในช่วงประมาณ 6.5–7.5 เนื่องจากจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนจะเจริญได้ดี [19]

ส่วนที่ 2 ค่า VFA มีค่าก่อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 860–978 มิลลิกรัมเทียบกับกรดแอซิติกต่อลิตร และมีค่าหลังออกระบบเท่ากับ 272–417 มิลลิกรัมเทียบกับกรดแอซิติกต่อลิตร โดยการปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสาน การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการปรับสภาพด้วยความร้อนมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่าการปรับสภาพด้วยการหมักกรดและการไม่ปรับสภาพ บ่งชี้ว่าการปรับสภาพมีผลโดยตรงกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ [1] อย่างไรก็ตามตลอดระยะเวลาการย่อยสลายพบว่า มีปริมาณ VFA ที่ต่ำกว่าปริมาณที่ส่งผลให้เกิดการยับยั้งกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน บ่งบอกได้ว่าการปรับสภาพทั้ง 4 วิธี ในกระบวนการย่อยสลายอยู่ในสภาวะที่สมดุลและมีเสถียรภาพดี ซึ่งปริมาณ VFA ในระบบควรมีค่าไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมเทียบกับกรดแอซิติกต่อลิตร และ ALK มีค่าก่อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 2,492–2,862 มิลลิกรัมเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร และมีค่าหลังออกระบบอยู่ในช่วง 2,559–2,671 มิลลิกรัมเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ซึ่งการปรับสภาพด้วย

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ร่วมกับหัวเชื้อมูลวัว

ค่าพารามิเตอร์	หน่วย	ชนิดของฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพ				
		US	PS	NS	AS	NAS
pH	-	7.32	7.26	7.30	7.27	7.28
TS	mg/L	28,710	26,810	26,660	27,100	22,830
VS	mg/L	20,850	19,550	19,590	19,810	16,040
VS/TS	-	0.726	0.729	0.735	0.731	0.703
ALK	mg $CaCO_3$/L	2,862	2,548	2,570	2,492	2,626
VFA	mg CH_3COOH/L	978	860	958	929	918
VFA/ALK	-	0.34	0.34	0.37	0.37	0.35
COD	mg/L	22,170	20,470	22,096	21,117	22,244

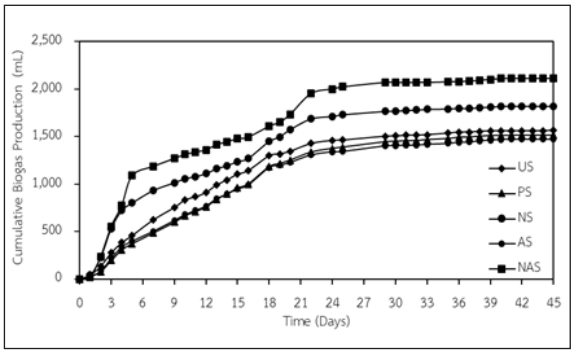
วิธีแบบผสมผสาน วิธีปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และไม่ผ่านการปรับสภาพ มีค่าความเป็นด่างสูงกว่าการปรับสภาพด้วยวิธีทางความร้อนและการหมักกรดซึ่งมีความสอดคล้องกับค่า pH ของระบบที่มีค่าความเป็นด่างสูงกว่าเช่นกัน ความเป็นด่างในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศจะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตพบว่า ในการปรับสภาพแต่ละวิธีแสดงค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ คือ 2,000–3,000 มิลลิกรัมเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร [19] โดยค่าอัตราส่วน VFA/ALK มีค่าอยู่ในช่วง 0.34–0.38 พบว่า ค่าดังกล่าวเป็นช่วงที่ทำให้ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพในการทำงาน และพบว่า การปรับสภาพทั้ง 4 วิธี เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมของ VFA/ALK ควรมีค่าไม่เกิน 0.4 [20]

ส่วนที่ 3 ค่า COD (Chemical Oxygen Demand) หรือ ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีพบว่า ตัวอย่างก่อนเข้าสู่ระบบอยู่ในช่วง 20,470–22,244 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าหลังการหมักอยู่ในช่วง 6,762–17,440 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD ด้วยวิธีการปรับสภาพแบบผสมผสานมีค่าสูงที่สุดที่ร้อยละ 69.60 รองลงมาเป็นการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าเท่ากับร้อยละ 55.68 และการปรับสภาพด้วยการหมักกรดมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ต่ำที่สุดที่ร้อยละ 14.80 ซึ่งสอดคล้องกับวัชรพล [21] ที่ได้กล่าวว่ากระบวนการปรับสภาพทางเคมีจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD สูงกว่ากระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพ เนื่องจากการปรับสภาพทางชีวภาพมีการทำลายโครงสร้างของลิกนินได้น้อยกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ค่อนข้างต่ำ

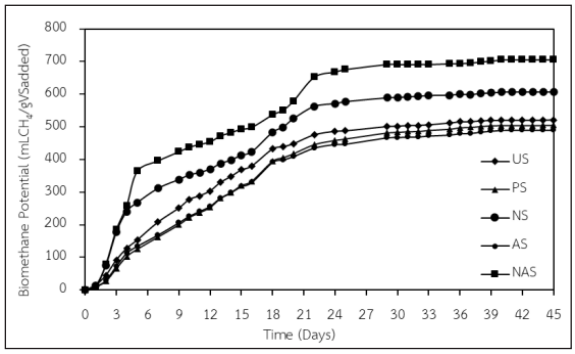
ส่วนที่ 4 ค่า TS ก่อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 22,830–28,710 มิลลิกรัมต่อลิตร และหลังออกระบบอยู่ในช่วง 16,190–19,100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าของแข็งทั้งหมดมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และค่า VS ก่อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 16,040–20,850 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ทราบถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในวัสดุหมัก และพบว่าค่า VS หลังออกระบบอยู่ในช่วง 9,580–12,150 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์ส่งผลให้ปริมาณของแข็งระเหยง่ายมีค่าลดลง และจากการรายงานค่า TS และ VS ข้างต้นพบว่า ค่าของการปรับสภาพทั้ง 4 วิธีจัดอยู่ในช่วงเดียวกัน และมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับงานวิจัยของชุติมา [19] ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์อีกด้วย ซึ่งพบว่า เป็นค่าที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ

3.3.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

รูปที่ 2 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นของฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ที่มีการปรับสภาพแตกต่างกัน ในช่วงระยะเวลา 45 วัน พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการปรับสภาพทั้ง 4 วิธี เพิ่มขึ้นตั้งแต่



รูปที่ 2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1



รูปที่ 3 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1

วันที่ 1–24 จากนั้นจะเริ่มคงที่และลดลง ซึ่งกระบวนการหมักเป็นแบบการเติมสารอินทรีย์แบบครั้งเดียว สารอินทรีย์ถูกจุลินทรีย์ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพไปจนหมด จึงส่งผลโดยตรงทำให้ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นลดลงตามไปด้วย [8] โดยการปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสานมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดที่ 2,114.26 มิลลิลิตรต่อ 45 วัน รองลงมาเป็นการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 1819.97 มิลลิลิตรต่อวัน เนื่องจากการปรับสภาพแบบผสมผสานมีการทำลายโครงสร้างของลิกนินได้ดีที่สุด โดยการปรับสภาพดังกล่าวสามารถย่อยเซลลูโลสให้กลายเป็นสารอาหารที่มีความเหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ และยังกล่าวได้ว่าสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ยังช่วยเพิ่มปริมาณของเซลลูโลสกับเฮมิเซลลูโลส บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการย่อยสลายทำให้จุลินทรีย์สามารถเข้าถึงและย่อยได้ง่ายมากขึ้น ส่งผลให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Remli และคณะ [22] ที่ทำการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง พบว่าเป็นวิธีการปรับสภาพที่ดีที่สุด ส่งผลให้มีปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นร้อยละ 87.54 และกำจัดลิกนินได้ร้อยละ 78.62 ทำให้เพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น และการปรับสภาพอีกกลุ่มที่มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน คือ การปรับสภาพด้วยการหมักกรดและการปรับสภาพด้วยความร้อนซึ่งมีค่ามีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่ำกว่าการไม่ปรับสภาพอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิหรือเวลาที่ไม่เหมาะสมในการปรับสภาพวัตถุดิบจึงส่งผลกระทบต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ [23] แต่ข้อดีของวิธีการทั้ง 2 เป็นการปรับสภาพทางชีวภาพคือกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับกระบวนการทางกายภาพหรือทางเคมีเนื่องจากมีความต้องการใช้พลังงานน้อยลง [24]

3.3.2 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

ในขั้นตอนนี้เป็นการหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยทำการพิจารณาปริมาณของผลผลิตก๊าซชีวภาพต่อหน่วยของแข็งระเหยง่าย เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพมีลักษณะเป็นของแข็ง จากรูปที่ 3 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ในช่วงระยะเวลา 45 วัน พบว่า การปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสานมีค่าสูงสุดที่ 706.00 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย รองลงมาเป็นการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 606.97 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย และการปรับสภาพด้วยการหมักกรด การปรับสภาพด้วยความร้อน และไม่ผ่านการปรับสภาพให้ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ต่ำกว่า โดยพบว่าผลของศักยภาพก๊าซมีเทนแปรผันโดยตรงกับปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสะสม [25] และสัดส่วนของก๊าซมีเทนภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง1 ที่มีการปรับสภาพแตกต่างกัน โดยมีการวัดค่าตลอดระยะเวลาในการทดลอง 45 วัน จำนวน 4 ครั้ง พบว่า สัดส่วนของก๊าซ

มีเทนจากการปรับสภาพแบบผสมผสานให้ค่าสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 66.0 รองลงมาเป็นปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 62.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายด่าร่วมกับความร้อน หรือสารละลายด่างอย่างเดียวสามารถทำให้โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสอ่อนแอลง ซึ่งทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนให้เกิดเป็นก๊าซมีเทนได้ง่ายมากขึ้น [26] โดยแสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ในชีวมวลเหล่านี้สามารถย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้สูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกมลดารา และคณะ [27] กล่าวว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 48–65 บ่งบอกถึงศักยภาพการนำก๊าซมีเทนไปใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานได้ โดยสัดส่วนก๊าซมีเทนตามทฤษฎี คือ ประมาณร้อยละ 50–70 [2]

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ร่วมกับมูลวัว โดยอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบตั้งต้นและหัวเชื้อถูกควบคุมที่ 1:2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นปรับสภาพฟางข้าวด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 4 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 แบบโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิธีที่ 2 การหมักกรด วิธีที่ 3 ความร้อน และวิธีที่ 4 การปรับสภาพแบบผสมผสาน นอกจากนี้ยังใช้ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเป็นตัวควบคุม ระบบการย่อยสลายไม่ใช้ออกซิเจนถูกดำเนินการแบบแบทช์ที่สภาวะเมโซฟิลิก 35 ±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วัน พบว่าการปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสานมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงที่สุดที่ร้อยละ 69.60 อีกทั้งยังมีปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด 2,114.26 มิลลิลิตรต่อ 45 วัน และให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพจำเพาะมีค่าสูงสุดที่ 706.00 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย สุดท้ายให้ค่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 66.0 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์สันป่าตอง 1 ที่มีการปรับสภาพด้วยวิธีผสมผสาน สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ดีที่สุด อีกทั้งยังแก้ไขปัญหาด้านราคาและการขาดแคลนพลังงานและยังช่วยแก้ปัญหาการเผาไหม้ของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ส่งผลกระทบและเป็นส่วนหนึ่งของปัญหา PM 2.5 พื้นที่ภาคเหนือในปัจจุบันได้ และเนื่องด้วยงานวิจัยข้างต้นเป็นการทำในรูปแบบ BMP ซึ่งเป็นรูปแบบการหมักแบบแบทช์โดยมาตราฐาน เมื่อได้ผลการทดลองที่ดีที่สุดแล้ว สามารถนำไปทดลองในแบบต่อเนื่อง เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ในสเกลใหญ่ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้ทุนศิษย์ก้นกุฏิ จากบัณฑิตวิทยาลัย ประจำปี 2562 ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ และทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน

เอกสารอ้างอิง

[1] R. Tunlaya, “The public participation in the control of agricultural residues burning regulation,” Thesis B.S., Natural Resources and Environment, Naresuan University, 2020 (in Thai).

[2] M. Sutharat and B. Susira, “Health risk assessment of exposure PM2.5 from industrial area in Pluak Daeng district, Rayong province,” *Naresuan Phayao Journal*, vol. 14, pp. 95–110, 2021 (in Thai).

[3] P. A Htay, “Optimizing Methanation of Cassava Pulp Digestion by Zero Valent Iron,” Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Engineering, Suranaree University of Technology Academic, 2019 (in Thai).

[4] P. Kittiya, S. Prapa and P. Ratchapol, “Biogas production from pretreated cattail (*Typha angustifolia* L.) with cow dung by Fed-batch

fermentation process," *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University*, vol. 4, no. 5, pp. 2408–1248, 2017 (in Thai).

[5] P. Supawadee, "Pretreatment of lignocellulosic materials for ethanol production," *Faculty of Science and Technology*, vol. 5, pp. 641–649, 2014 (in Thai).

[6] K. Fokion, C. Denise, D. James, G. K. Kimon-Andreas, and C. Afroditi, "Anaerobic digestion of steam-exploded wheat straw and co-digestion strategies for enhanced biogas production," *Applied Sciences*, vol. 10, pp. 8284, 2020.

[7] W. Soontornchaiboon, T. Plyngam, and R. Pawongrat, "Pretreatment of coconut husk for biogas production by anaerobic fermentation with cow dung," *RMUTP Research Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 19–30, 2015 (in Thai).

[8] S. Sasithorn, C. Tapana, H. Nigran, C. Jutaporn, and N. Rotjapun, "The study of the mixing duration time and recirculation rate effect to biogas production from sweet corn waste by dry fermentation process," *CRMA Journal*, vol. 18, 2020 (in Thai).

[9] C. Natthaporn, "Microwave-Assisted Alkali Pretreatments Of Rice Straw For Enhancing The Efficiency Of Enzymatic Hydrolysis," Suranaree University of Technology, 2016 (in Thai).

[10] S. Pimnarin, R. Pichaya, and N. Chackrit, "Physical Pretreatment of Water Hyacinth for Biogas Production," *Thai Environmental Engineering Journal*, vol. 30, no. 2, pp. 9-18, 2016 (in Thai).

[11] P. Ratchapol, "Pretreatment processes for enhancing the efficiency of ethanol production from lignocellulosic agricultural wastes," *Veridian E-Journal,Science and Technology Silpakorn University*, vol. 2, no. 1, pp. 2408–1248, 2015 (in Thai).

[12] S. Michel, W. H. Stijn, H. Van, H. Sander, V. Han, and R. Katleen, "Laccase Enzyme Detoxifies Hydrolysates and Improves Biogas Production from Hemp Straw and Miscanthus, *Bioresource Technology*, vol. 244, no. 1, pp. 597–609, 2017.

[13] P. Piyanut, "Study of Xylose Production from Oil Palm Empty Fruit Bunch," M.S. thesis, Engineering in Chemical Engincering Prince of Songkla University, 2014 (in Thai).

[14] P. Ratchapol, "The optimal condition for hydrolyses preparation from water hyacinth using autoclave for ethanol production," *Veridian E-Journal,Science and Technology Silpakorn University*, vol. 4, no. 1, pp. 891–901, 2011 (in Thai).

[15] D. Aditi, G. Tanvi, K.T. Abhilash, M. Julie, F. Kylie, and K. S. Rajesh, "Thermophilic Anaerobic Digestion: Enhanced and Sustainable Methane Production from Co-Digestion of Food and Lignocellulosic Wastes," *Energy*, vol. 11, pp.1-13, 2018.

[16] K. Chitchanoke, "Biogas production from rubber leaves by co-digestion with pig manure for household-scale," M.S. thesis, Engineering in Chemical Engineering Prince of Songkla University, 2011 (in Thai).

[17] P. Khathapon and R. Thaneeya, "Evaluation of biogas production potential from combination of food waste with Pre-treatment of napier grass by NaOH," *Civil Engineering*, vol. 25, pp. 1–6, 2020 (in Thai).

[18] M. Gabriele, P. Stefano, N.L. Piet, and E. Giovanni, "Increased biogas production from wheat

straw by chemical pretreatments," *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 608-614, 2018.

[19] K. Chutima, K. Kulyakorn, and Y. Supawadee, "Development of the biogas production system from a Co-digestion of inoculums chicken manure and napier grass in covered lagoon with circulating," *NIGRC KKU*, pp. 445–455, 2017 (in Thai).

[20] T. Amorpan, S. Kanyarat, Y. L. Shao, P. Chettaphong, S. Chayanon, and C. Sumate, "Anaerobic digestion of napier grass (*Pennisetum purpureum*) in two-phase dry digestion system versus wet digestion system," *Bioenergy Research*, vol. 13, pp. 853–865, 2020.

[21] W. Watcharapol, "Alkaline pretreatment and temperature effect in anaerobic excess sludge digestion," M.S. thesis, Engineering in Environmental, Suranaree University of Technology, 2013 (in Thai).

[22] N. Remli, U. Shah, R. Mohamad, and S. Abd-Aziz, "Effects of Chemical and Thermal Pretreatments on the Enzymatic Saccharification of Rice Straw for Sugars Production," *BioResources*, vol. 9, no. 1, pp. 510–522, 2014.

[23] U H. Javier, O H. Inty, M C. Mónica, S. Alexia, H. Fernando, and B. Nagamani, "Insight into pretreatment methods of lignocellulosic biomass to increase biogas yield: current state, challenges, and opportunities," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 18, pp. 3721, 2019.

[24] A. Abraham, A K. Mathew, H. Park, O. Choi, R. Sindhu. Parameswaran, A. Pandey, J. H. Park, and B. Sanga, "Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass," *Bioresource Technology*, vol. 301, pp. 122725, 2020.

[25] T. Liua, X. Zhou, Z. Li, X. Wang, and J. Sun, "Effects of liquid digestate pretreatment on biogas production for anaerobic digestion of wheat straw," *Bioresource Technology*, vol. 280, pp. 345–351, 2019.

[26] C. Nilwan, M. RomSai, C. Warut, and W. Anuphan, "The potential of methane production of the dwarf napier under alkaline pretreatment," *RMUTL Engineering Journal*, vol. 1, pp. 32–36, 2016 (in Thai).

[27] L. Kamoldala, D. Natthawut, and D. Chonlada, "Study of biogas production from agricultural waste to decrease the pollution in northern region," *ITTECON*, vol. 3, pp. 1–9, 2015 (in Thai).