

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากกระบวนการหมักร่วมของผักบุง  
และขี้เลื่อยร่วมกับมูลแพะ  
Efficiency of Biogas Production by Co-Digestion between Water  
Morning Glory and Sawdust with Goat Manure

อณิศา เสี่ยมใจ\*

Anthika Sa-ngiamjai\*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย

Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,

Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand

\*Corresponding author E-mail: anthika@aru.ac.th

Received 25 April 2023; Revised 1 March 2024; Accepted 9 March 2024

## บทคัดย่อ

**ความเป็นมาและวัตถุประสงค์:** การพัฒนาพลังงานทางเลือกในปัจจุบันนิยมนำวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและวัชพืชในท้องถิ่น รวมทั้งมูลสัตว์ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ อย่างไรก็ตาม การผลิตแก๊สชีวภาพจากวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสควรมีการปรับสภาพวัสดุก่อนการหมักเพื่อทำลายโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส ซึ่งจะส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายวัสดุได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้การใช้มูลสัตว์เป็นหัวเชื้อตั้งต้นยังอาจช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเหลือทิ้งและลดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพโดยการหมักร่วมของผักบุงและขี้เลื่อยภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ และเปรียบเทียบความเข้มข้นของแก๊สชีวภาพก่อนและหลังการปรับสภาพวัสดุหมัก

**วิธีดำเนินการวิจัย:** ปรับสภาพวัสดุหมัก (ผักบุงและขี้เลื่อย) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2% (w/v) เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนการทดลอง ดำเนินการทดลองโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวขนาด 6 L ปริมาตรใช้งาน 3 L ระยะเวลาการทดลอง 35 วัน เติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียวในขณะเริ่มต้นการทดลอง แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ได้แก่ ชุดควบคุม (มูลแพะ: ผักบุง: ขี้เลื่อย ที่อัตราส่วน 5: 0: 0) ชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (มูลแพะ: ผักบุง: ขี้เลื่อย ที่อัตราส่วน 3: 1: 1) และชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพ (มูลแพะ: ผักบุง: ขี้เลื่อย ที่อัตราส่วน 3: 1: 1) วัดความเข้มข้นของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังหมักทุกวัน ได้แก่ แก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) (%vol) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) (%vol) แก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) (%vol) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) (ppm) เพื่อเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเมื่อใช้วัสดุหมักที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพ จากนั้นจึงวิเคราะห์ปัจจัย

ที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ

**ผลการวิจัย :** การปรับสภาพวัตถุดิบทำให้ C/N ratio สูงขึ้น โดยชุดการทดลองชุดควบคุม ชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพ ให้ค่า C/N ratio เท่ากับ 10.22, 11.37 และ 12.34 ตามลำดับ ชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพมีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุด โดยมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทน เท่ากับ 34% vol รองลงมา ได้แก่ ชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและชุดการทดลองชุดควบคุม ซึ่งมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทน เท่ากับ 25% vol และ 23% vol ตามลำดับ

**สรุป :** เมื่อเปรียบเทียบชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพกับชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่าชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพผลิตแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ที่ความเข้มข้นสูงสุด 34% vol แสดงให้เห็นว่ากระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถเพิ่มศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้ กระบวนการปรับสภาพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายชีวมวล ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์จนเกิดเป็นแก๊สชีวภาพได้ง่ายขึ้น

**การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ :** ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปปรับใช้ในสถานที่จริงเพื่อส่งเสริมการผลิตแก๊สชีวภาพใช้เองภายในฟาร์มให้กับผู้ทำฟาร์มแพะหรือเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะ อีกทั้งยังอาจนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้กับชีวมวลและมูลสัตว์ชนิดอื่นได้อีกด้วย

**คำสำคัญ :** แก๊สชีวภาพ, ผักบู้, ขี้เลื่อย, มูลแพะ, การปรับสภาพ

## Abstract

**Background and Objectives:** Current alternative energy development prefers the use of wastes and by-products from industrial processes, agricultural activities as well as weeds and manures as raw materials for the production of biogas. Nevertheless, production of biogas from a lignocellulosic material requires pretreatment of such a raw material to break down its structure, thus allowing microorganisms to more efficiently digest the material. In addition, use of manure as a substrate may lead to the reduction of costs involved in waste and by-product disposal and hence the reduced environmental impact. The objective of the present study was therefore to investigate the potential of producing biogas by co-fermentation of water morning glory and sawdust with goat manure under anaerobic condition and to compare the production of biogas with and without pretreatment of the substrates.

**Methodology:** Water morning glory and sawdust were pretreated with 2% (w/v) sodium hydroxide solution for 1 hour. Experiments were conducted in a 6-L single-stage anaerobic fermentation tank with a working volume of 3 L for 35 days. The materials were added only once at the start of each experiment. Three experiments with three replicates were

conducted. The control experiment (goat manure: morning glory: sawdust at a ratio of 5:0:0), experiment without pretreatment (goat manure: morning glory: sawdust, at a ratio of 3:1:1) and experiment with pretreatment (goat manure: morning glory: sawdust, at a ratio of 3:1:1) constituted the three experimental series. Concentrations of methane ( $\text{CH}_4$ ) (%vol), carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) (% vol), oxygen ( $\text{O}_2$ ) (% vol) and hydrogen sulfide gas ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (ppm) were followed as these are the major compositions of biogas produced in the fermentation tank; such concentration evolutions were measured daily in order to compare the potential for biogas production between the experiments with and without pretreatment and to evaluate factors that affected biogas production.

**Main Results:** Pretreatment of the raw materials resulted in higher C/N ratios. The ratios belonging to the experiments with pretreatment, without pretreatment and control experiment were 12.34, 11.37, and 10.22, respectively. Pretreatment yielded the highest methane concentration of 34% vol. This was followed by the results of the experiment without pretreatment and the control experiment, where the methane concentrations were 25% and 23% vol, respectively.

**Conclusions:** When comparing between the experiments with and without pretreatment, the former generated methane ( $\text{CH}_4$ ) at the maximum concentration of 34% vol. The pretreatment resulted in the increased efficiency, indicating that the alkaline pretreatment with sodium hydroxide solution enhanced the potential for biogas production and increased the efficiency of biomass degradation. This in turn affected the biogas production process of methane-producing microorganisms in such a way that they could more easily generate biogas.

**Practical Application:** The results could be beneficial for goat farmers who can use the proposed methods to facilitate self-generation of biogas within the farms. The methods may also be applicable with other kinds of biomasses and manures as well.

**Keywords:** Biogas, Water Morning Glory, Sawdust, Goat Dung, Pretreatment

## Introduction

แก๊สชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน [1] องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊สมีเทน 45-70% แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 25-40% ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย ไฮโดรเจน และน้ำ [2-3] ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกิจกรรมที่ใช้แก๊ส

ธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงาน [4] แก๊สชีวภาพมีการผลิตเป็นอย่างมากในทั่วโลก ทั้งในระดับโรงงานขนาดใหญ่ และในบ่อหมักขนาดเล็กระดับครัวเรือน [5] การผลิตแก๊สชีวภาพเป็นวิธีการที่มีต้นทุนต่ำโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ 4 กลุ่ม ได้แก่ Hydrolytic Bacteria, Fermentative Acidogenic Bacteria, Acetogenic Bacteria และ Methanogenic Bacteria กลุ่มจุลินทรีย์เหล่านี้มีหน้าที่ในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ซับซ้อนให้เป็นแก๊สชีวภาพใน 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 Hydrolysis ขั้นตอนที่ 2 Acidogenesis ขั้นตอนที่ 3 Acetogenesis และขั้นตอนสุดท้าย Methanogenesis อย่างไรก็ตามกระบวนการย่อยสลายยังคงเผชิญกับความท้าทายเป็นอย่างมาก รวมถึงวัสดุตั้งต้นของการย่อยสลายทางชีวภาพ ผลิตแก๊สชีวภาพที่ต่ำ สารอาหารที่ไม่สมดุล และการขาดแบคทีเรียแบบ ไมโครออกซิเจนในระบบ [6] การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบ ไมโครออกซิเจนโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือวัชพืชมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในด้านการวิจัยและภาคอุตสาหกรรม ในปัจจุบันมีการพัฒนาพลังงานทางเลือกโดยการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส (Celluloses) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งพบมากในผนังเซลล์พืช [7] มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งการผลิตแก๊สชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสควรมีการปรับสภาพ วัสดุชีวมวลก่อนการหมักเพื่อทำลายโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้นและการใช้มูลสัตว์เป็นหัวเชื้อตั้งต้นเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเหลือทิ้งและลดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้

ผักบุ้ง ชี้อเลื่อย และมูลแพะ เป็นวัสดุเหลือทิ้ง โดยผักบุ้งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการประกอบอาหารชี้อเลื่อย เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการประกอบบ้านไม้เนื้อคาวาน และมูลแพะเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากฟาร์มแพะ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะไร้อากาศและก่อให้เกิดแก๊สมีเทนได้ งานวิจัยครั้งนี้จึงศึกษาศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพโดยการหมักร่วมของผักบุ้งและชี้อเลื่อยร่วมกับมูลแพะโดยการเปรียบเทียบแก๊สชีวภาพที่ได้จากวัสดุหมักที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพก่อนการหมัก อีกทั้งยังเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้ง

## Materials and Methods

### วัตถุดิบ

1. มูลแพะที่นำมาใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์เป็นมูลสดซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากฟาร์มแพะในจังหวัดอ่างทอง นำมาผึ่งจนแห้งในที่ร่ม บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 mesh (Figure 1) จากนั้นนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณลักษณะเบื้องต้น ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณซีโอดี (COD) อินทรีย์คาร์บอน (OC) และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)

2. ผักบุ้งที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นผักบุ้งไทย (*Ipomoea aquatic*) ส่วนโคนต้นที่เหลือทิ้งจากการประกอบอาหาร นำมาล้างทำความสะอาดและหั่นให้มีความยาว 1 cm (Figure 1) จากนั้นวิเคราะห์องค์

ประกอบทางเคมีและคุณลักษณะเบื้องต้นของชีวมวล ได้แก่ อินทรีย์คาร์บอน (OC) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน

3. ชี้อ้อยที่นำมาใช้ในการทดลองเก็บรวบรวมจากโรงงานผลิตบ้านน็อคดาวนในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งเป็นชี้อ้อยไม่ผสม นำมาตากให้แห้งและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 20 mesh (Figure 1) จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณลักษณะเบื้องต้นของชีวมวล ได้แก่ อินทรีย์คาร์บอน (OC) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน

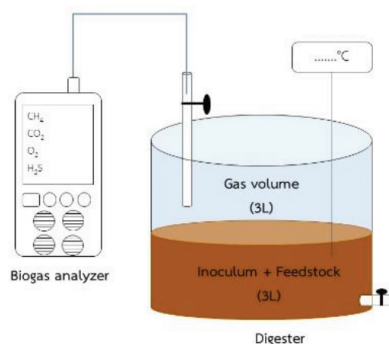
4. ผักบุงและชี้อ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ ผักบุงและชี้อ้อยที่ใช้ในการทดลองถูกปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมีโดยการปรับสภาพด้วยด่าง (Alkaline hydrolysis) [8] นำผักบุงและชี้อ้อยแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2% (w/v) เป็นเวลา 1 hr (Figure 1) จากนั้นล้างผักบุงและ ชี้อ้อยด้วยน้ำปราศจากไอออนประมาณ 7-9 ครั้ง จนน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) คงที่ วิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและคุณลักษณะเบื้องต้นของชีวมวล ได้แก่ อินทรีย์คาร์บอน (OC) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน



**Figure 1** Raw material characteristics. (a) Goat Manure (b) Water Morning Glory (c) Sawdust (d) Pretreated Water Morning Glory (e) Pretreated Sawdust

### ชุดทดลอง

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (bioreactor) หรือถังหมักทำจากถังพลาสติกขนาด 6 L ปริมาตรใช้งาน 3 L จำนวน 9 ถัง แบ่งเป็น 3 ชุดการทดลอง การทดลองละ 3 ถัง ด้านบนของถังมีจุดตรวจวัดอุณหภูมิและจุดเก็บตัวอย่างแก๊สเพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ในส่วนด้านล่างของถังมีจุดเก็บตัวอย่างน้ำ (Figure 2)



**Figure 2** Reactor used in the study

## ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองในครั้งนี้ใช้ชุดการทดลองที่ออกแบบและสร้างขึ้นเองเป็นชุดผลิตแก๊สชีวภาพในถังหมักแบบแบทช์ (Batch) ป้อนวัตถุดิบหมักเพียงครั้งเดียวในขณะเริ่มต้นการทดลอง ในระหว่างการทดลองมีการกวนผสมโดยการเขย่าถังหมักวันละ 1 ครั้ง ๆ ละ 1 นาที แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง (Table 1) วัดความเข้มข้นของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังหมักทุกวัน ได้แก่ แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) (%Vol) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) (%Vol) แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) (%Vol) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (ppm) และเก็บตัวอย่างภายในถังหมักเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature), ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณซีโอดี (COD)

1. ชุดควบคุม มีการเติมมูลแพะเป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน มูลแพะ: ผักบุง: ชี้เลี้ยง เท่ากับ 5: 0: 0 (500 g: 0 g: 0 g) เติมน้ำที่อัตราส่วน น้ำ: วัสดุหมัก เท่ากับ 5: 1 การทดลองชุดนี้มีค่า C/N ratio เท่ากับ 10.22

2. ชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีการเติมวัสดุในถังหมัก ได้แก่ มูลแพะ ผักบุง และชี้เลี้ยงที่ไม่ผ่านการปรับสภาพในอัตราส่วน มูลแพะ: ผักบุง: ชี้เลี้ยง เท่ากับ 3: 1: 1 ดัดแปลงจาก Phattakamon [9] (300 g: 100 g: 100 g) เติมน้ำที่อัตราส่วน น้ำ: วัสดุหมัก เท่ากับ 5: 1 การทดลองชุดนี้มีค่า C/N ratio เท่ากับ 11.37

3. ชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพ มีการเติมวัสดุที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในถังหมัก ได้แก่ มูลแพะ ผักบุง และชี้เลี้ยงในอัตราส่วน มูลแพะ: ผักบุง: ชี้เลี้ยง เท่ากับ 3: 1: 1 ดัดแปลงจาก Phattakamon [9] (300 g: 100 g: 100 g) เติมน้ำที่อัตราส่วน น้ำ: วัสดุหมัก เท่ากับ 5: 1 การทดลองชุดนี้มีค่า C/N ratio เท่ากับ 12.34

**Table 1** Ratio of fermentation materials and C/N ratio

Experiment	Raw material	Ratio	C/N ratio
Control	Goat Manure: Water Morning Glory: Sawdust	5: 0: 0	10.22
Without pretreatment	Goat Manure: Water Morning Glory: Sawdust	3: 1: 1	11.37
With pretreatment	Goat Manure: Water Morning Glory: Sawdust	3: 1: 1	12.34

## วิธีวิเคราะห์

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ มูลแพะ ผักบุง ชี้เลี้ยง ผักบุง และชี้เลี้ยงที่ผ่านการปรับสภาพวิเคราะห์ก่อนการหมัก และเมื่อดำเนินการหมักวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดแก๊สชีวภาพโดยพารามิเตอร์ที่มีการเก็บผลการทดลองทุกวัน ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) และความเข้มข้นของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในถังหมัก ได้แก่ ความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) (%Vol) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) (%Vol) แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) (%Vol) และ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) วัดโดยใช้

เครื่องตรวจวัดแก๊สชีวภาพ Vapore analytical Bio Genious-02 และพารามิเตอร์ที่มีการเก็บผลการทดลอง ทุก 7 วัน ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณซีโอดี (COD) วิธีการตรวจวิเคราะห์และความความถี่ ในการวิเคราะห์แสดงดัง Table 2

**Table 2** Chemical composition of fermentation materials and factors affecting biogas production

Parameter	Method	Period of analysis
TKN	Kjeldahl method	before fermentation
OC	Walkley-Black method	before fermentation
Cellulose	TAPPI 203 om 88	before fermentation
Hemicellulose	TAPPI 203 om 88	before fermentation
Lignin	TAPPI 222 om 88	before fermentation
Biogas (%vol)	Gas detector	every day
Temperature (°C)	Digital thermometer	every day
pH	pH meter	every week
COD (mg/l)	Titrimetric method	every week
C/N ratio	Metcalf and Eddy, 2014	before fermentation

## Results and Discussion

### องค์ประกอบของวัสดุหมัก

องค์ประกอบของวัสดุหมักเป็นปัจจัยหนึ่งที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งปริมาณสารอาหารในวัสดุหมักมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ เนื่องจากหากมีปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมและเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ในการเจริญเติบโตจะส่งผลต่อความเข้มข้นของแก๊สชีวภาพที่เพิ่มขึ้น [10] จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุหมัก พบว่า C/N ratio ของมูลแพะ ผักบู้ง ชี้อ้อย ผักบู้งที่ผ่านการปรับสภาพ และชี้อ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ เท่ากับ 10.22, 6.94, 94.57, 8.39 และ 136.92 ตามลำดับ (Table 3) การปรับสภาพวัตถุดิบส่งผลให้ C/N ratio สูงขึ้น โดยชุดการทดลองชุดควบคุม ชุดการทดลองการที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพ มีค่า C/N ratio เท่ากับ 10.22, 11.37 และ 12.34 ตามลำดับ (Table 1) C/N ratio ที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพควรอยู่ระหว่าง 20-30: 1 [11] หาก C/N ratio ต่ำจะส่งผลให้มีไนโตรเจนมากเกินไปทำให้เปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) หรือแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) อาจเป็นพิษต่อ Methanogenic bacteria ซึ่งมีผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และอัตราการเกิดจุลินทรีย์ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพลดลง แต่หาก C/N ratio สูงจะกระตุ้นให้ Methanogenic bacteria ใช้ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ไนโตรเจนหมดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพลดลงเช่นกัน [12] Table 3 พบว่าการปรับสภาพวัตถุดิบยังมีผล

ต่อปริมาณ cellulose, hemicellulose และ lignin ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ เนื่องจากการปรับสภาพเป็นการทำลายโครงสร้างผลึกของ hemicellulose และ lignin ทำให้มีปริมาณ cellulose เพิ่มมากขึ้น [13] ซึ่งก่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ Methanogenic bacteria เพื่อผลิตเป็นแก๊สชีวภาพได้ดีขึ้น

**Table 3** Compositions of fermented materials

Parameter	Goat Manure	No pretreatment		With pretreatment	
		Water Morning Glory	Sawdust	Water Morning Glory	Sawdust
pH	8.2	N/A	N/A	N/A	N/A
COD (mg/L)	1,833.3	N/A	N/A	N/A	N/A
OC (%)	27	31.3	33.1	33.4	35.6
TKN (%)	2.64	4.51	0.35	3.98	0.26
C/N ratio	10.22	6.94	94.57	8.39	136.92
Cellulose (%)	N/A	27.18	27.74	30.13	32.87
Hemicellulose (%)	N/A	16.14	6.08	8.05	3.56
Lignin (%)	N/A	4.93	3.82	1.01	3.15

N/A = Not applicable

Dry basis

### ผลการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของถังหมัก

1. อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อจุลินทรีย์ในระบบและบ่งชี้ถึงกิจกรรมการเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ [14] จากผลการทดลองพบว่า ตลอดระยะเวลาการหมักมีอุณหภูมิเฉลี่ยคงที่ โดยในชุดควบคุมมีอุณหภูมิเฉลี่ย  $27.7 \pm 2.7$  °C ชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีอุณหภูมิเฉลี่ย  $27.7 \pm 2.6$  °C และชุดที่ผ่านการปรับสภาพมีอุณหภูมิเฉลี่ย  $27.6 \pm 2.7$  °C ซึ่งในกระบวนการหมักและปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพขึ้นอยู่กับอัตราเติบโตของจุลินทรีย์ภายในระบบ โดยทุกชุดการทดลองนั้นเป็นสภาวะอุณหภูมิเมโซฟิลิก (Mesophilic) คือ อุณหภูมิในช่วง 20-45 °C เป็นช่วงอุณหภูมิที่จุลินทรีย์กลุ่มเมโซฟิลิก (Mesophilic Organisms) สามารถเจริญเติบโตและดำรงชีวิตอยู่ได้ภายในระบบ โดยจุลินทรีย์จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตแก๊สชีวภาพ [15-16]

2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงสภาวะการหมักแบบไร้อากาศ การเติบโตของจุลินทรีย์และกิจกรรมของจุลินทรีย์ จากผลการทดลองพบว่า ถังหมักทั้งสามชุดการทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.8-8.5 ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ลดลงในช่วงสองสัปดาห์แรก โดยสาเหตุของการลดลงเนื่องมาจากกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และ



กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในระบบลดลง [17] ประกอบกับแก๊สชีวภาพเกิดขึ้นหลังผ่านช่วงสองสัปดาห์แรกของการหมัก และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ยังคงมีแนวโน้มลดลงของทุกชุดการทดลอง โดยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของทุกชุดการทดลองอยู่ในช่วงที่ Methanogenic bacteria สามารถเติบโตได้ซึ่ง Methanogenic bacteria สามารถเติบโตได้ในช่วง ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 6.5-8.5 [18]

3. ปริมาณซีโอดี (COD) ปริมาณซีโอดี (COD) มีความสำคัญอย่างมากของกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพ เมื่อมีการลดลงของปริมาณซีโอดี (COD) แสดงถึงการสลายตัวของสารอินทรีย์โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น [19] จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณซีโอดีภายในระบบของทุกชุดการทดลองลดลง โดยชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณซีโอดี (COD) ลดลงสูงสุด 67.12% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมและชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพที่มีปริมาณซีโอดี (COD) ลดลงเพียง 53.01% และ 53.85% ตามลำดับ (Table 4) ซึ่งทุกชุดการทดลองของการหมักรวมทั้ง ชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณซีโอดี (COD) ลดลงมากกว่าชุดควบคุม เนื่องจากการหมักร่วมมีปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ [20] การลดลงของปริมาณซีโอดี (COD) ส่งผลต่อความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ดังจะเห็นได้ในชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพพบความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) สูงสุดเท่ากับ 34%Vol รองลงมา ได้แก่ ชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและชุดควบคุมหากมีการเพิ่มปริมาณซีโอดี (COD) ในระบบจะส่งผลให้ความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เพิ่มขึ้นด้วย

**Table 4** Evolution of COD in fermentation tanks

Experiment	COD (mg/L)						COD removal (%)
	Day 0	Day 7	Day 14	Day 21	Day 28	Day 35	
Control	2,880.0	2,640.0	2,346.7	1,920.0	1,600.0	1,353.3	53.01
Without pretreatment	2,773.3	2,586.7	2,240.0	1,813.3	1,493.3	1,280.0	53.85
With pretreatment	2,666.7	2,426.7	1,920.0	1,546.7	1,173.3	876.7	67.12

4. ความเข้มข้นของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังหมัก การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพชุดควบคุม ชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพ มีค่า C/N ratio เท่ากับ 10.22, 11.37 และ 12.34 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า การผลิตแก๊สชีวภาพของชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพให้ผลผลิตแก๊สชีวภาพที่สูงกว่าและเกิดแก๊สชีวภาพเร็วกว่าชุดทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและชุดควบคุม โดยพบว่าชุดทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีการผลิตแก๊สชีวภาพลดลงเล็กน้อยหลังจากวันที่ 31 ของการทดลอง ทั้งนี้เป็นเพราะเชื้อจุลินทรีย์ได้เปลี่ยนโครงสร้างของผักบุงและขี้เลื่อยให้อยู่สภาวะที่เหมาะสมต่อการหมักจึงยังมีการผลิตแก๊สชีวภาพเกิดขึ้น ในขณะที่ชุดทดลองที่ผ่านการปรับสภาพและชุดควบคุมมีการผลิตแก๊สชีวภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีถูกย่อยจนเกือบหมด [21]

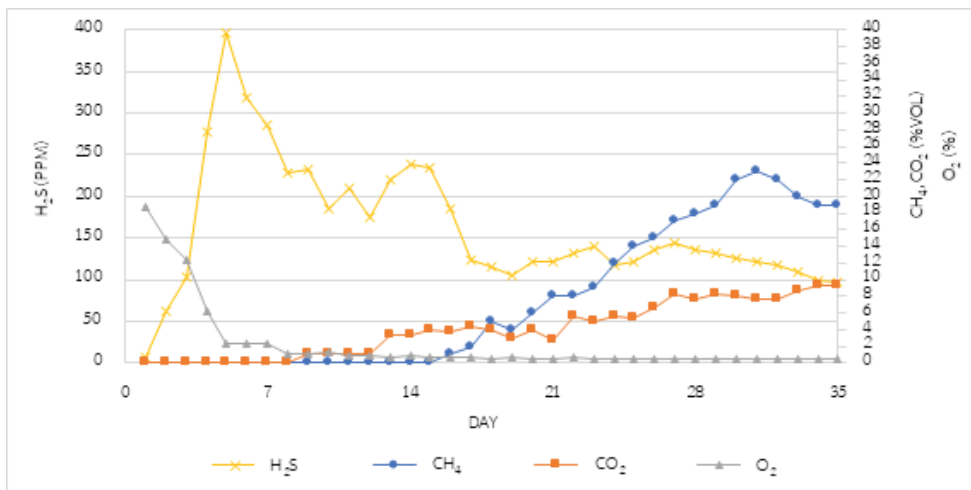
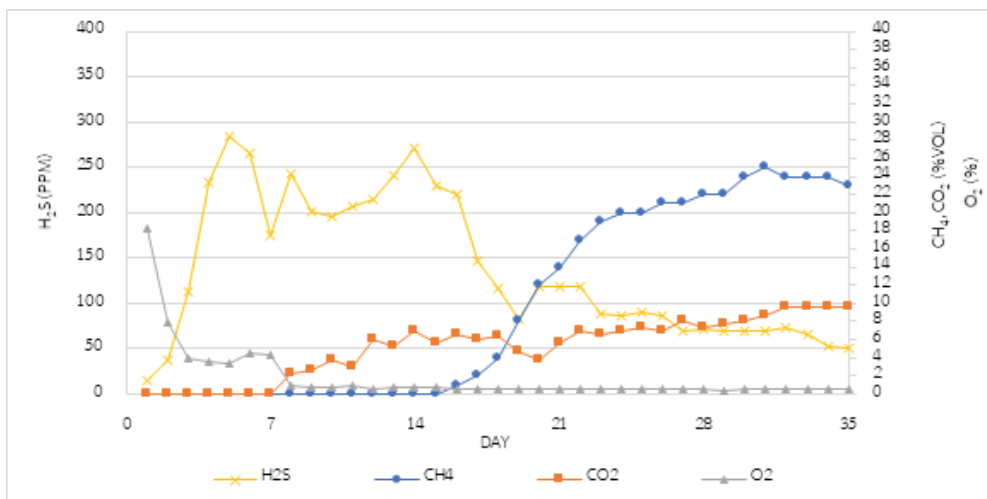
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ได้จากการตรวจวัดแก๊สชีวภาพด้วยเครื่อง Vapore analytical Bio Genius-02 ได้แก่ ความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) (%Vol) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) (%Vol) แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) (%Vol) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (ppm) พบว่า ความเข้มข้นแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เกิดขึ้นหลังจากผ่านการหมักไปแล้ว 14 วัน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เกิดขึ้นหลังผ่านการหมัก 7 วัน เนื่องจากอยู่ในช่วงการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis) และเกิดการผลิตกรดอินทรีย์ (Acidogenesis) จึงมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เกิดขึ้น [22] และหลังจากนั้นจึงเข้าสู่ช่วงการผลิตแก๊สมีเทน (Methanogenesis) เป็นผลให้สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ลดลง และมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Methanogenic bacteria ทำการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารอินทรีย์ให้กลายเป็นแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ส่วนแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) เริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มกระบวนการหมัก และแก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) มีปริมาณลดลง จากการทดลองชุดทดลองที่ผ่านการปรับสภาพมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) สูงกว่าชุดทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและชุดควบคุม ซึ่งในวันที่ 31 ของการหมักชุดทดลองที่ผ่านการปรับสภาพมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) สูงสุด 34%vol แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) 14%vol แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) พบสูงสุดในวันที่ 5 ของการหมัก เท่ากับ 334 ppm และแก๊สออกซิเจนลดเหลือน้อยกว่า 1% ในวันที่ 9 ของการหมัก ขณะที่ชุดทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) สูงสุดในวันที่ 31 ของการหมัก 25%vol แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) 10%vol แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) สูงสุดในวันที่ 5 ของการหมัก เท่ากับ 284 ppm และแก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ลดเหลือน้อยกว่า 1% ในวันที่ 8 ของการหมัก ในขณะที่ชุดควบคุมพบความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) สูงสุด 23%vol ในวันที่ 31 ของการหมักแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) 8%vol แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดในวันที่ 5 ของการหมัก เท่ากับ 396 ppm และแก๊สออกซิเจนลดเหลือน้อยกว่า 1% ในวันที่ 11 ของการหมัก (Figure 4, 5, 6) และในวันที่ 31 ของการหมักเป็นต้นไปทุกชุดการทดลองมีปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพที่ลดลง

**Table 5** Comparison between results of the present study and those of others

Raw material	Pretreatment	Volume of biogas	% $\text{CH}_4$	Reference
Cattail ( <i>Typha angustifolia</i> L.) with cow dung	steam		30.01	[24]
Napier grass with inoculum	1.0% w/v sodium hydroxide solution		35.43	[25]
Morning glory ( <i>Ipomoea aquatica</i> ) co-digested with water hyacinth ( <i>Eichhornia crassipes</i> )	-	0.29 d m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> vs fed day <sup>-1</sup>	-	[26]

**Table 5** Comparison between results of the present study and those of others (Continued)

Raw material	Pretreatment	Volume of biogas	%CH <sub>4</sub>	Reference
sawdust waste, cow dung and water hyacinth	-	0.045 L/TS fed	-	[27]
sawdust waste, cow dung and water hyacinth	-	0.046 L/TS fed	-	[28]
morning glory and sawdust with goat manure	2.0% w/v sodium hydroxide solution		34	This study

**Figure 3** Concentration evolutions of biogas in control experiment**Figure 4** Concentration evolutions of biogas in experiment without pretreatment

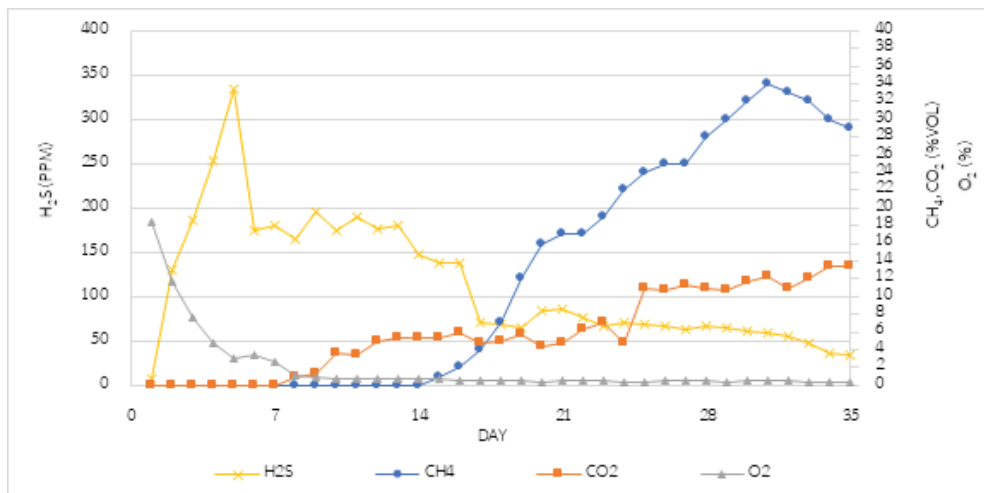


Figure 5 Concentration evolutions of biogas in experiment with pretreatment

ทั้งนี้ ชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) สูงกว่าชุดทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและชุดควบคุม เนื่องจากการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของผักบุ้งและขี้เลื่อย โดยโครงสร้างถูกเปิดออกและเกิดความพรุนมากขึ้น ดังนั้นจุลินทรีย์ภายในระบบสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ง่าย จึงทำให้อัตราการย่อยสลายและการผลิตแก๊สชีวภาพเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและให้ผลผลิตแก๊สชีวภาพที่มากกว่าส่งผลให้ชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) สูงกว่าชุดการทดลองอื่น และหลังผ่านการหมักวันที่ 31 เป็นต้นไปพบว่าชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพและชุดควบคุมมีปริมาณการผลิต แก๊สชีวภาพที่ลดลงมากกว่าชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งมีความเข้มข้นของแก๊สชีวภาพลดลงเล็กน้อย เนื่องจากผักบุ้งและขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีโครงสร้างของวัตถุดิบที่แข็งแรงทำให้ยากต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์จึงต้องใช้ระยะเวลาการย่อยสลายสารอินทรีย์นานขึ้น ทั้งนี้สัดส่วนของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ที่ได้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ตามทฤษฎีคือประมาณ 50 - 70% [23] ซึ่งอาจเกิดจากประสิทธิภาพของระบบหมักที่เป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ ปริมาณสารอาหารเริ่มต้นต่ำ วัสดุหมักอัดตัวกันแน่นเนื่องจากการไม่มีการกวนผสมตลอดเวลาและอุณหภูมิในการเดินระบบซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและอัตราเร็วของปฏิกิริยาทางชีวเคมีซึ่งมีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในถังหมัก

## Conclusion

การผลิตแก๊สชีวภาพเป็นทางออกที่ดีในการแก้ปัญหาการเหลือทิ้งของมูลสัตว์ และวัสดุเหลือทิ้งลิกโนเซลลูโลส ซึ่งคุณลักษณะทางชีวฟิสิกส์ของวัตถุดิบมีศักยภาพในการนำมาผลิตแก๊สชีวภาพ เนื่องจากมูลสัตว์จะถูกใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ และวัสดุเหลือทิ้งลิกโนเซลลูโลสเมื่อถูกย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนสารอินทรีย์

ที่ถูกลดลงจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบแก๊สชีวภาพได้ ซึ่งการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีที่สุด ได้แก่ ชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพ โดยให้การผลิตแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) สูงสุด 34%Vol แสดงให้เห็นว่า กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ ได้ดียิ่งขึ้น และเป็นกระบวนการปรับสภาพที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ทำให้สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มผลผลิตแก๊สชีวภาพได้

## References

1. Mao, C., Feng, Y., Wang, X. and Ren, G., 2015, "Review on Research Achievements of Biogas from Anaerobic Digestion," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, pp. 540-555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
2. Yadvika, S., Sreekrishnan, T.R., Kohli, S. and Rana, V., 2004, "Enhancement of Biogas Production from Solid Substrates Using Different Techniques -A Review," *Bioresource Technology*, 95 (1), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.010>
3. Yentekakis, I.V. and Goula, G., 2017, "Biogas Management: Advanced Utilization for Production of Renewable Energy and Added-value Chemicals," *Frontiers in Environmental Science*, 5, pp. 1–7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00007>
4. Kadam, R. and Panwar, N.L., 2017, "Recent Advancement in Biogas Enrichment and Its Applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, pp. 892–903. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.167>
5. Scarlat, N., Dallemand, J.F. and Fahl, F., 2018, "Biogas: Developments and Perspectives in Europe," *Renewable Energy*, 129, pp. 457-472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
6. Abbas, Y., Yun S., Mehmood A., Shah, F.A., Wang, K., Eldin, E.T., Al-Qahtani, W.H., Ali, S. and Bocchetta, P., 2023, "Co-digestion of Cow Manure and Food Waste for Biogas Enhancement and Nutrients Revival in Bio-circular Economy," *Chemosphere*, 311, pp. 137018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137018>
7. Maduang, T., Chunhachat, O. and Phawongrat, R., 2021, "The Effect on Morphological Change of Cellulose Fibers by Sonochemical-assisted Pretreatment of Lignocellulosic Biomass," *RMUTSB Academic Journal*, 6 (1), pp. 26-36. (In Thai)
8. Jun, S.K., Lee, Y.Y. and Tae, H.K., 2016, "A Review on Alkaline Pretreatment Technology for Bioconversion of Lignocellulosic Biomass," *Bioresource Technology*, 199, pp. 42-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085>

9. Phattakamon, S., 2018., Potential of Biogas Production from Water Hyacinth Mixed with Brewer's Grains by Two Stage Anaerobic Digester, Research Reports, Faculty of Engineering, Rajabhat Mahasarakham University, p. 44. (In Thai)
10. Yamsri, P., Rojanasaeng, N., Dararat, S. and Ngaophuthong, A., 2020, "Biogas Production from Sweet Sorghum with Leach-Bed Reactor," *The 19th National Environmental Conference*, 27-29 May 2020, Chiang Rai, Thailand, pp. 97-104. (In Thai)
11. Kayhanian, M. and Tchobanoglous, G., 1992, "Computation of C/N Ratios for Various Organic Fractions," *Biocycle*, 33, pp. 58-60.
12. Okeh, C.O., Onwosi, O.C. and Odibo, C.F., 2014, "Biogas Production from Rice Husks Generated from Various Rice Mills in Ebonyi State Nigeria," *Renewable Energy*, 62, pp. 204-208. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.006>
13. Abraham, A., Mathew, A.K., Park, H., Choi, O., Sindhu, R., Parameswaran, B., Pandey, A., Park, J.H. and Sang, B., 2020, "Pretreatment Strategies for Enhanced Biogas Production from Lignocellulosic Biomass," *Bioresour. Technol.*, 301, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122725>
14. Babaei, A. and Shayegan, J., 2019, "Effects of Temperature and Mixing Modes on the Performance of Municipal Solid Waste Anaerobic Slurry Digester," *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17 (2), pp. 1077-1084.
15. El-Mashad, M.H., Zeeman, G., Loon, K.P.W., Bot, P.A.G. and Lettinga, G., 2004, "Effect of Temperature and Temperature Fluctuations on Thermophilic Anaerobic Digestion of Cattle Manure," *Bioresour. Technol.*, 95, pp. 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.07.013>
16. Schiraldi, C. and De Rosa, M., 2014, "Mesophilic Organisms," pp. 1,285-1,286, in E. Drioli and L. Giorno (Eds.) *Encyclopedia of Membranes*, Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-40872-4\\_1610-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40872-4_1610-2)
17. Gonde, L., Wickham, T., Brink, H.G. and Nicol, W., 2023, "pH-Based Control of Anaerobic Digestion to Maximise Ammonium Production in Liquid Digestate," *Water*, 15 (3), p. 417. <https://doi.org/10.3390/w15030417>
18. Singharat, K., Sangkarak, S., Pongsuk, O. and Junyapoon, S., 2017, "Biogas Production from Bakery Wastewater in Two-Stage Anaerobic Digestion System," *KMITL Science and Technology Journal*, 17 (1), pp. 103-112.

19. Utami, I., Redjeki, S., Astuti, H.D. and Sani., 2016., "Biogas Production and Removal COD–BOD and TSS from Wastewater Industrial Alcohol (Vinasse) by Modified UASB Bioreactor," *The 3<sup>rd</sup> Bali International Seminar on Science & Technology (BISSTECH 2015)*, 15-17 October 2015, Bali, Indonesia, pp. 1-5.
20. Chanatawon, J. and Poodnoi, N., 2017, Co-digestion of Coffee Grounds and Pretreated Coffee Husk with Cow Manure for Enhancing the Efficiency of Biogas Production," *The 13<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand*, 31 May-2 June 2017, Chiang Mai, Thailand, pp. 1112-1119. (In Thai)
21. Fernandez, A.V., Vargas, G., Alarco, N. and Velasco, A., 2008, "Evaluation of Marine Algae as a Source of Biogas in a Two-stage Anaerobic Reactor System," *Biomass and Bioenergy*, 32 (4), pp. 338-344. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.10.005>
22. Liebetrau, J., Weinrich, S., Sträuber, H. And Kretzschmar, J., 2017, "Anaerobic Fermentation of Organic Material: Biological Processes and Their Control Parameters," pp. 1-30, in R.A. Meyers (Ed.) *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Springer, New York, p. 12,555. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6\\_962-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_962-1)
23. Karki, B.A., Nakarmi M.A., Dhital, P.R., Sharma, I. and Kumar, P., 2015, Biogas as Renewable Source of Energy in Nepal. Theory and Development, 3<sup>rd</sup> ed., Alternative Energy Promotion Center (AEPC), Kathmandu, p. 5.
24. Pomngern, K., Soh-salam, P. and Pawongrat R., 2015, "The Effects of Steam Pretreatment on Production of Biogas from Cattail (*Typha angustifolia* L.) with Cow Dung by Batch Fermentation Process," *Proceedings of the 12<sup>th</sup> KU-KPS Conference*, Nakhon Pathom, Thailand, pp. 549-558. (In Thai)
25. Attiya, K., Pairat, U. and Hanphon, P., 2021, "A Study of Biogas Production Potential from Napier Grass," *Proceedings of The 16<sup>th</sup> RSU National Graduate Research Conference, Rangsit University*, Thailand, pp. 61-69. (In Thai)
26. Adanikin, B.A., Ogunwande, G.A. and Adesanwo, O., 2017, "Evaluation and Kinetics of Biogas Yield from Morning Glory (*Ipomoea aquatica*) Co-digested with Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*)," *Ecological Engineering*, 98, pp. 98-104.
27. Ipeghan, O. and Evelyn, V.O., 2013, "Biogas Production from Sawdust Waste, Cow Dung And Water Hyacinth - Effect of Sawdust Concentration," *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 2 (6), pp. 91-93.

28. Madu, K.E. and Onwuamaeze, P.I., 2018, "Evaluation of Sawdust Concentration on Biogas Production from Sawdust Waste, Cow Dung and Water Hyacinth," *Journal of Industrial Technology*, 3 (1), pp. 41–46.