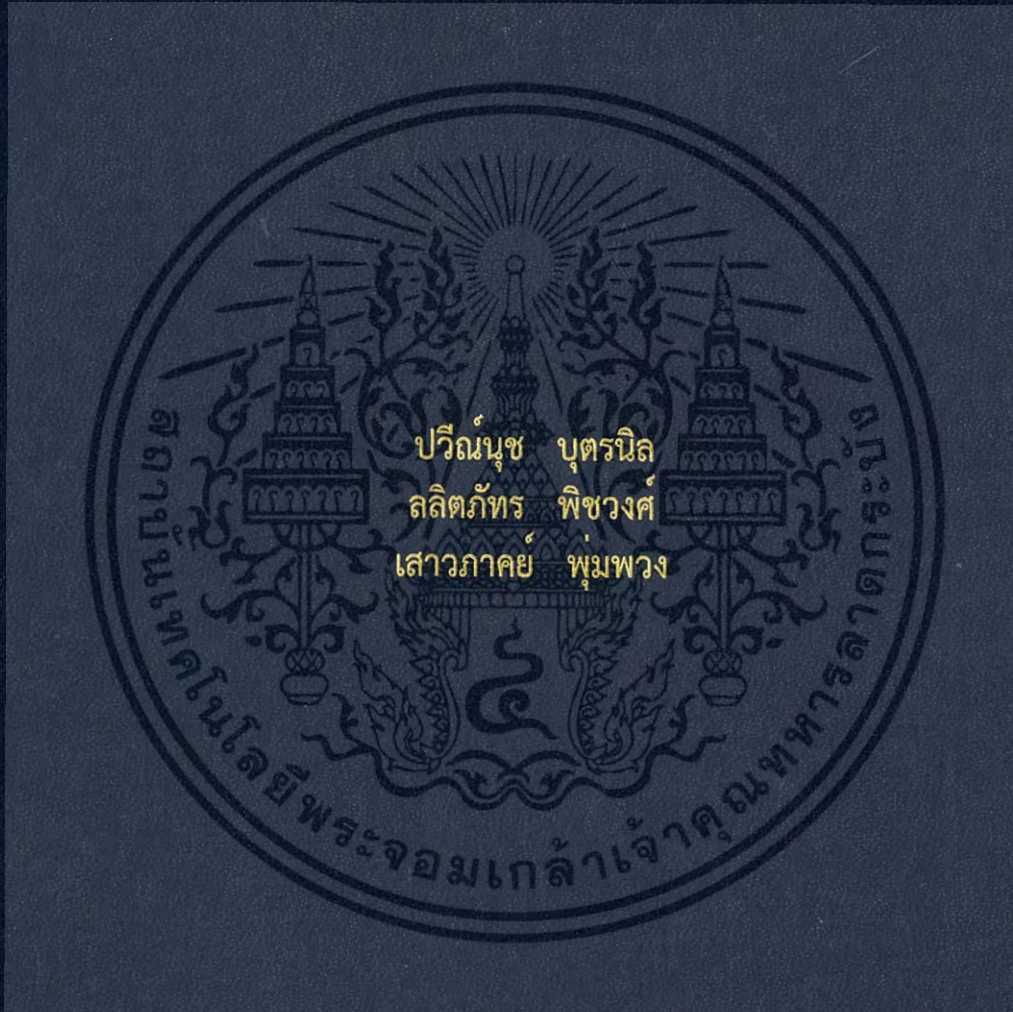


การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกเหลือทิ้งของโรงงานผลิต  
ขนมปังภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

BIOGAS PRODUCTION FROM TARO WASTE OF BAKERY  
FACTORY UNDER ANAEROBIC CONDITION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกเหลือทิ้งของโรงงานผลิต  
ขนมปังภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

BIOGAS PRODUCTION FROM TARO WASTE OF BAKERY  
FACTORY UNDER ANAEROBIC CONDITION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIOGAS PRODUCTION FROM TARO WASTE OF BAKERY  
FACTORY UNDER ANAEROBIC CONDITION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
(INDUSTRIAL MICROBIOLOGY)  
DEPARTMENT OF BIOLOGY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกเหลือทิ้งของโรงงานผลิตขนมปัง  
ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

Biogas Production from Taro Waste of Bakery Factory  
under Anaerobic Condition

ชื่อนักศึกษา

นางสาวปวีณนุช บุตรนิล รหัสนักศึกษา 55051333

นางสาวลลิตภัทร พิขวงศ์ รหัสนักศึกษา 55051382

นางสาวเสาวภาคย์ พุ่มพวง รหัสนักศึกษา 55051419

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

ชีววิทยา

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

รศ.ดร.ดุชนิ ธนะบริพัฒน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (จุลชีววิทยา  
อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กานต์ วงศาโรยะ ประธานกรรมการ	
ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
รศ.ดร.ดุชนิ ธนะบริพัฒน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกเหลือทิ้งของโรงงานผลิตขนมปัง ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปวีณนุช บุตรนิล รหัสนักศึกษา 55051333 นางสาวลลิตภัทร พิชวงค์ รหัสนักศึกษา 55051382 นางสาวเสาวภาคย์ พุ่มพวง รหัสนักศึกษา 55051419
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	ชีววิทยา
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.ดุชนี ธนะบริพัตน์

#### บทคัดย่อ

การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกเหลือทิ้งของโรงงานผลิตขนมปังภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในระดับห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาหาความเข้มข้นของหัวเชื้อที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ 0, 20, 30, 60, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตรต่อปริมาตร) ปริมาตรในการหมัก 6 ลิตร ระยะเวลา 27 วัน พบว่าที่ระดับความเข้มข้นหัวเชื้อที่ 30 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด คือ 22.2 ลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ที่ 45.2 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นใช้ความเข้มข้นของหัวเชื้อที่ 30 เปอร์เซ็นต์ มาศึกษาเพื่อหาปริมาณของเศษเปลือกที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด โดยใช้ปริมาณเศษเปลือกที่แตกต่างกัน คือ 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเศษเปลือกปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุดคือ 45.5 ลิตร ในระยะเวลา 18 วัน และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 93.0 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ, การย่อยสลายแบบไร้อากาศ, เศษเปลือก

Title	Biogas Production from Taro Waste of Bakery Factory under Anaerobic Condition	
Students	Miss Paveenuch Butnil	Student ID 55051333
	Miss Lalittaphat Phitchawong	Student ID 55051382
	Miss Saowapak Phoompoung	Student ID 55051419
Degree	Bachelor of Science (Industrial Microbiology)	
Department	Biology	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
Academic Year	2015	
Advisor	Dr. Pramote Sirirote	
Co-advisor	Assoc. Prof. Dr. Dusanee Thanaboripat	

### Abstract

Biogas production from taro waste of bakery factory under anaerobic condition in laboratory scale was studied by using the concentration of inoculums at 0, 20, 30, 60, 90 and 100 % (v/v) with working volume of 6 liters and incubated for 27 days. The result showed that the highest cumulative biogas production was 22.2 liters when using inoculum at 30 % and efficiency for the COD removal was 45.2 %. Therefore, inoculum at 30 % was used for further investigation to find the optimal volume of taro waste for the highest cumulative biogas yield. The volume of taro waste was performed at 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 and 30 %. It was found that the highest cumulative biogas production of 45.5 liters was from taro waste at 30 % after 18 days of fermentation and the efficiency for COD removal was 93.0 %.

**Keyword :** Biogas, Anaerobic digestion, Taro waste

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่อง การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกเหลือทิ้งจากโรงงานขนมปัง ภายใต้สภาวะไร้อากาศ เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยนี้ เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาและ รศ.ดร.ดุชนิ ธนะบริพัทธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาในการแก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนคอยแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนการติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี รวมถึง ดร.กานต์ วงศาริยะ ประธานกรรมการที่กรุณาให้ความรู้และข้อเสนอแนะต่างๆ ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาชีววิทยา และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี ตลอดจนให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท เพอร์ซิเดนท เบเกอร์รี่ จำกัด (ฟาร์มเฮ้าท์) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการให้หัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นและเศษเปลือกที่เป็นของเสียเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต มาใช้ในการทดลอง

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของคณะผู้จัดทำ ที่คอยสนับสนุนและคอยให้กำลังใจที่ดี โดยตลอดเสมอมา

ปวีณนุช บุตรนิล

ลลิตภัทร พิชวงค์

เสาวภาคย์ พุ่มพวง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 ลักษณะทั่วไปของเหือก	3
2.1.1 องค์ประกอบของเหือก	3
2.1.2 ประโยชน์และโทษของเหือก	5
2.2 ก๊าซชีวภาพ	5
2.2.1 แหล่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ	7
2.2.2 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	7
2.2.3 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	12
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>16</b>
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	17
3.3 หัวเชื้อจุลินทรีย์	17
3.4 เศษเหือก	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ระบบถังหมักก๊าซชีวภาพ	18
3.5.1 ถังหมัก	18
3.5.2 ถังเก็บก๊าซชีวภาพ	19
3.5.3 มอเตอร์ (motor)	20
3.5.4 เครื่องตั้งเวลา (timer)	20
3.6 วิธีการทดลอง	20
3.6.1 การเตรียมวัตถุดิบ	20
3.6.2 วิเคราะห์คุณลักษณะหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นและวัตถุดิบเริ่มต้น	21
3.6.3 การผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ความเข้มข้นของหัวเชื้อที่ระดับต่างๆ	21
3.6.4 การผลิตก๊าซชีวภาพจากปริมาณเศษเพื่อระดับต่างๆ	22
3.6.5 การวิเคราะห์ทางเคมี	23
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล</b>	<b>24</b>
4.1 คุณสมบัติของหัวเชื้อและวัตถุดิบเริ่มต้น	24
4.2 ผลการศึกษาหัวเชื้อที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือก	25
4.2.1 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย และกรดไขมันระเหยง่ายต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	25
4.2.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	30
4.3 ผลการศึกษาปริมาณเศษเปลือกที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	34
4.3.1 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย และปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	34
4.3.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของระบบ	40
4.4 การทดสอบก๊าซชีวภาพเบื้องต้นและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	46
4.4.1 ผลการศึกษาก๊าซชีวภาพเบื้องต้น	46
4.4.2 ผลการศึกษาก๊าซชีวภาพเบื้องต้น	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผลการวิจัย	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	52
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ	53
ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบของเนื้อเยื่อ	4
2.2 แสดงองค์ประกอบของใบเยื่อ	4
2.3 แสดงองค์ประกอบของเปลือกเยื่อ	4
2.4 แสดงเอนไซม์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรไลซิส	9
2.5 แสดงกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน	10
2.6 แสดงผลิตภัณฑ์จากแบคทีเรียสร้างมีเทน	11
3.1 แสดงความเข้มข้นของหัวเชื้อ ปริมาณหัวเชื้อ น้ำหนักเศษเยื่อและปริมาตรน้ำกลั่นที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ	22
3.2 แสดงปริมาณเศษเยื่อ น้ำหนักเศษเยื่อ ปริมาณหัวเชื้อและปริมาตรน้ำกลั่นที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากปริมาณเศษเยื่อระดับต่างๆ	23
3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง	23
4.1 แสดงคุณสมบัติของหัวเชื้อเบื้องต้น	24
4.2 แสดงคุณสมบัติของเศษเยื่อ	25
4.3 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของระบบ	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	8
3.1 แสดงลักษณะเศษฝือก	17
3.2 แสดงชุดถังหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบแบช	18
3.3 แสดงถังหมักไร้ออกซิเจนแบบแบชขนาด 8 ลิตร	19
3.4 แสดงถังเก็บก๊าซชีวภาพ	19
3.5 แสดงการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนทำการทดลองโดยวิธีการหั่นให้มีขนาดเล็ก	20
3.6 แสดงสภาพวัตถุดิบก่อนทำการทดลองโดยวิธีปั่นให้ละเอียด	21
4.1 แสดงลักษณะของแบคทีเรียที่พบ ภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า	24
4.2 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 0 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุมที่ 1)	27
4.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 100 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุมที่ 2)	27
4.4 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 20 เปอร์เซ็นต์	28
4.5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 30 เปอร์เซ็นต์	28
4.6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 60 เปอร์เซ็นต์	29
4.7 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 90 เปอร์เซ็นต์	29
4.8 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุมที่ 1)	31
4.9 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุมที่ 2)	31
4.10 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์	32
4.12 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์	33
4.13 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์	33
4.14 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 0 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุม)	35
4.15 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 1 เปอร์เซ็นต์	35
4.16 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 3 เปอร์เซ็นต์	36
4.17 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 5 เปอร์เซ็นต์	36
4.18 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 7 เปอร์เซ็นต์	37
4.19 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 10 เปอร์เซ็นต์	37
4.20 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 15 เปอร์เซ็นต์	38
4.21 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 20 เปอร์เซ็นต์	38
4.22 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 25 เปอร์เซ็นต์	39
4.23 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 30 เปอร์เซ็นต์	39
4.24 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุมการทดลองที่ 2)	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษ เปลือกเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์	41
4.26 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษ เปลือกเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์	42
4.27 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษ เปลือกเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์	42
4.28 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษ เปลือกเท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์	43
4.29 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษ เปลือกเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์	43
4.30 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษ เปลือกเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์	44
4.31 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษ เปลือกเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์	44
4.32 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษ เปลือกเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์	45
4.33 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษ เปลือกเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์	45
4.34 แสดงลักษณะสีของเปลวไฟที่ได้จากการหมักก๊าซชีวภาพ ปริมาณเศษเปลือก 30 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 30 เปอร์เซ็นต์	46
4.35 ลำดับความร้อนจากสีของเปลวไฟ	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการพัฒนาเศรษฐกิจและความเป็นอยู่ของประชาชนภายในประเทศ อาจกล่าวได้ว่าพลังงานมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ ในขณะที่ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานกำลังทวีจำนวนมากยิ่งขึ้น พลังงานที่ได้จากแหล่งธรรมชาติกลับมีปริมาณและมีแนวโน้มลดลง (สุนทร และคณะ, 2545) ส่งผลให้หลายหน่วยงานให้ความสนใจเกี่ยวกับการใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ โดยพลังงานจากก๊าซชีวภาพจึงถือได้ว่าเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่มีส่วนช่วยแก้ไขปัญหาล้างแฉะและวิกฤตพลังงานที่กำลังเกิดขึ้น รวมทั้งสามารถลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานเชื้อเพลิงและเทคโนโลยีจากต่างประเทศได้

ปัจจุบันอัตราการขยายตัวของแหล่งอุตสาหกรรมและการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจเป็นไปอย่างรวดเร็ว มีผลทำให้มีปริมาณของเสียจากแหล่งอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ซึ่งการจัดการกับปริมาณของเสียจากแหล่งอุตสาหกรรมจำนวนมากนั้น มักมีข้อจำกัดในด้านการจัดหาพื้นที่สำหรับการกำจัด (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2539) ดังนั้นการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียจากแหล่งอุตสาหกรรม จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการจัดการกับปัญหาของเสียจากแหล่งอุตสาหกรรมโดยมีส่วนช่วยลดปัญหาจากการขาดแคลนพื้นที่หลุมฝังกลบ (จำนง, 2550) โดยก๊าซมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำกัดขยะด้วยวิธีการหมักแบบไร้ออกซิเจนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ช่วยลดการปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ ลดการเกิดมลภาวะทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียจากแหล่งอุตสาหกรรม ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงเป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของการใช้หัวเชื้อเริ่มต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมโดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

- 1) เพื่อศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนโดยใช้เศษเปลือก
- 2) เพื่อศึกษาปริมาณหัวเชื้อในระดับต่างๆ ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ
- 3) เพื่อศึกษาปริมาณเศษเปลือกที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

นำเศษฝอยมาใช้ในกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน วัดปริมาณก๊าซสะสม ความเป็นกรดเป็นด่าง ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย กรดไขมันระเหยง่าย และการวิเคราะห์ซีโอดี โดยมี การเติมปริมาณหัวเชื้อที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0, 20, 30, 60, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นเลือกระดับความเข้มข้นของหัวเชื้อที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุด มาทำการศึกษาหา ปริมาตรเศษฝอยที่เหมาะสม ได้แก่ 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้ สภาวะไร้ออกซิเจนในถังหมักที่ใช้ปริมาตรการหมักขนาด 6 ลิตร

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถคาดการณ์ถึงปริมาณหัวเชื้อต่อปริมาณเศษฝอยที่เหมาะสมของการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับ Pilot scale
- 2) สามารถลดปัญหาเศษฝอยเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในระบบอุตสาหกรรมได้
- 3) สามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ลักษณะทั่วไปของเผือก

เผือก (*Colocasia esculenta*) เป็นพืชล้มลุกอายุยืนในวงศ์ *Araceae* ลำต้นใต้ดินมีลักษณะเป็นหัวรูปลูกข่างกลม สีน้ำตาล ประกอบด้วยหัวใหญ่ 1 หัว และมีหัวเล็กแตกออกรอบๆ ขนาดรูปร่างของหัวเผือกและสีของเนื้อเผือก มีความแตกต่างกันออกไปตามพันธุ์ หัวเผือกขนาดใหญ่มีน้ำหนักตั้งแต่ 450 กรัม จนถึงมากกว่า 3.5 กิโลกรัม ส่วนหัวเผือกขนาดเล็กมีน้ำหนักตั้งแต่น้อยกว่า 28 กรัม จนถึง 450 กรัม เนื้อเผือกจะมีสีแตกต่างกัน คือ สีขาว สีเหลือง สีส้ม ไปจนถึงสีแดง หรือ สีม่วง ปกติลำต้นของเผือกจะมีความสูงประมาณ 0.4 เมตร จนถึง 2 เมตร ใบเผือกเป็นใบเลี้ยงเดี่ยวเรียงวน ใบมีขนาดใหญ่ ลักษณะเป็นรูปหัวใจหรือเป็นรูปลูกศรแกมรูปหัวใจ ปลายใบแหลม โคนใบแต่ละด้านกลมหรือเป็นเหลี่ยม เห็นเส้นใบได้ชัดเจน ก้านใบอาจยาวได้ถึง 1 เมตร โดยใบจะเกิดจากใต้ดิน ออกดอกเป็นช่อ ก้านช่อดอกมีความยาวประมาณ 15 ถึง 30 เซนติเมตร สั้นกว่าก้านใบ ผลเป็นสีเขียวเปลือกบาง ไม่ค่อยมีเมล็ด

เผือกเป็นพืชที่มีต้นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และตอนใต้ของเอเชียกลาง สำหรับประเทศไทย เผือกถือเป็นพืชเศรษฐกิจระดับท้องถิ่นที่สำคัญ ประชาชนนิยมบริโภคเผือกเพราะมีกลิ่นหอม รสชาติดี โดยประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศ ที่พบในประเทศไทย จำแนกได้ 4 สายพันธุ์ ได้แก่ เผือกหอม (หัวเผือกมีขนาดใหญ่ มีหัวเล็กติดอยู่เล็กน้อย กาบใบใหญ่สีเขียว), เผือกเหลือง (หัวเผือกมีขนาดย่อมและมีสีเหลือง), เผือกไม้หรือเผือกไหหลำ (หัวเผือกมีขนาดเล็ก) และเผือกตาแดง (ที่ตาของหัวเผือกมีสีแดงเข้ม มีหัวเล็กๆ ติดอยู่รอบหัวใหญ่เป็นจำนวนมาก กาบใบและเส้นใบมีสีแดง) (อภิชัย, 2552)

#### 2.1.1 องค์ประกอบของเผือก

เผือกเป็นพืชที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง โปรตีน แคลเซียม ฟอสฟอรัส โปแทสเซียม วิตามินบี1 วิตามินซี และสารอาหารอื่นๆ เกือบครบทุกชนิดที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย จึงเป็นพืชที่ให้พลังงานและบำรุงสุขภาพไปพร้อมกัน โดยองค์ประกอบของเนื้อเผือก ใบเผือกและเปลือกเผือก ดังแสดงในตาราง ดังนี้ 2.1-2.3

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของเนื้อเยือก

องค์ประกอบในเนื้อเยือก	ปริมาณต่อน้ำหนักเนื้อเยือก 100 กรัม
ความชื้น	63.8
เส้นใย	5.1
ไขมัน	0.11
โปรตีน	0.52
แป้ง	34.6

ที่มา : Cho และคณะ (2007)

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของใบเยือก

องค์ประกอบในใบเยือก	ปริมาณต่อน้ำหนักใบเยือก 100 กรัม
ความชื้น	92.15
เส้นใย	2.0
ไขมัน	0.41
โปรตีน	2.72
แป้ง	4.02

ที่มา : Cho และคณะ (2007)

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบของเปลือกเยือก

องค์ประกอบในเปลือกเยือก	ปริมาณต่อน้ำหนักเปลือกเยือก 100 กรัม
ความชื้น	95.3
ไขมัน	0.08
โปรตีน	0.73
แป้ง	3.2

ที่มา : Cho และคณะ (2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 ประโยชน์และโทษของเปลือก

ประโยชน์โดยทั่วไปของเปลือก คือ นิยมนำมาใช้บริโภค เป็นวัตถุดิบในการทำอาหารคาวหวาน และนำไปทำเป็นแป้งเปลือกเพื่อใช้ในการทำขนมต่างๆ โดยเปลือกมีปริมาณของเส้นใยค่อนข้างสูง ทำให้มีความสำคัญต่อระบบทางเดินอาหาร นอกจากนี้สารประกอบอื่นๆ ในเปลือกก็มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่นกัน ได้แก่ วิตามินเอ (vitamin A) และวิตามินอี (vitamin E) ที่เป็นส่วนสำคัญในการช่วยปรับสภาพผิว ลดการเกิดสิวและริ้วรอย วิตามินซี (vitamin C) ที่มีในปริมาณมากจะช่วยกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันให้สร้างเม็ดเลือดขาวมากขึ้นและยังทำหน้าที่เป็นสารต้านทานอนุมูลอิสระซึ่งสามารถป้องกันการเกิดภาวะโรคหัวใจและโรคมะเร็ง รวมทั้งคริปโทแซนทิน (cryptoxanthin) ที่พบในเปลือกยังช่วยลดโอกาสการเกิดมะเร็งปอดและมะเร็งช่องปาก

นอกเหนือจากประโยชน์ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว เปลือกก็มีโทษเช่นกัน โดยส่วนหัวและลำต้นทั้งหมดของเปลือกมีผลึกแคลเซียมออกซาเลต (calcium oxalate) ซึ่งมีฤทธิ์ทำให้คันและทำให้เกิดนิ่วในไต จึงไม่ควรรับประทานแบบดิบๆ ต้องนำมาผ่านการต้มหรือหมักก่อนจึงจะสามารถนำไปรับประทานได้ สำหรับผู้บริโภคบางรายอาจมีอาการแพ้เปลือกได้ ถึงแม้ว่าจะทำให้สุกแล้วก็ตาม อาการที่พบ คือ คันในช่องปากหรือทำให้ลิ้นชา การรับประทานเปลือกในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้มีม้ามทำงานผิดปกติได้ (Nagdeve, 2016)

## 2.2 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยจุลินทรีย์หลายประเภท ทำงานร่วมกันภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยสารอินทรีย์ที่ใช้อาจมาจากส่วนประกอบของขยะมูลฝอย มูลสัตว์ ผลผลิตทางการเกษตร รวมทั้งของเสียเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (นคร, 2553) ซึ่งสารอินทรีย์ประมาณ 80–90 เปอร์เซ็นต์จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ จากนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด แต่ส่วนใหญ่ คือ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) พบประมาณ 55–65 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณก๊าซทั้งหมด โดยก๊าซมีเทนนั้น มีคุณสมบัติเป็นก๊าซที่จุดแล้วติดไฟ มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ไม่มีสีและไม่มีกลิ่น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ก๊าซมีเทนถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนแทนพลังงานฟอสซิล โดยมักจะนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการหุงต้ม การให้แสงสว่าง และให้ความร้อน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในผลิตไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถนำก๊าซชีวภาพกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรมได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ภายในประเทศจึงจะช่วยลดการใช้และลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศซึ่งกำลังเป็นวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานของโลกได้เป็นอย่างมาก (วรุฒิ, 2558) ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ ของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ (ยุพา, 2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีเทน (CH <sub>4</sub> )	55 – 65	เปอร์เซ็นต์
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	35 – 45	เปอร์เซ็นต์
ไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	0 – 1	เปอร์เซ็นต์
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	0 – 1	เปอร์เซ็นต์
ไนโตรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S)	0 – 1	เปอร์เซ็นต์
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	0 – 1	เปอร์เซ็นต์

มีเทนบริสุทธิ์จะให้ความร้อน 9,000 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่ค่าความร้อนของก๊าซจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับองค์ประกอบของมีเทน ดังนั้นก๊าซชีวภาพที่มีมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก 55-65 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าความร้อนประมาณ 4,500-6,300 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียในโรงงานที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงมากซึ่งไม่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการแบบใช้ออกซิเจนได้ (ยุพา, 2552) โดยคุณสมบัตินี้แตกต่างไปของก๊าซชีวภาพ (วรวิทย์, 2558) มีดังนี้

อุณหภูมิขณะที่มีการลุกไหม้	700	องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	1.2	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ปริมาณความเข้มข้นก๊าซขณะลุกไหม้	6-12	เปอร์เซ็นต์
ค่าความร้อน	5.0-7.5	กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อนำก๊าซชีวภาพปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร มาทำการเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ จะได้ค่าความร้อนเทียบเท่า ดังนี้

ก๊าซหุงต้ม (LPG)	0.46	กิโลกรัม
น้ำมันเบนซิน	0.67	ลิตร
น้ำมันดีเซล	0.60	ลิตร
น้ำมันเตา	0.55	ลิตร
ไม้ฟืน	1.50	กิโลกรัม

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่สามารถผลิตได้ สามารถคาดคะเนได้จากปริมาณสารอินทรีย์ต่อปริมาตรของน้ำเสียจากแหล่งของน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ที่ใช้ โดยมีตัวชี้วัดคือ ปริมาณค่าบีโอดี (biological oxygen demand, BOD) และค่าซีโอดี (chemical oxygen demand, COD) จากตัวอย่างของน้ำเสีย โดยการทดสอบหาค่าบีโอดีนั้น เป็นการหาปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่าง ในขณะที่การทดสอบหาค่าซีโอดี เป็นการหาปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สมบูรณ์ระหว่างสารเคมีกับตัวอย่างน้ำเสีย ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างบีโอดีและซีโอดีจะบ่งบอกถึงสัดส่วนของสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (นคร, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 แหล่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

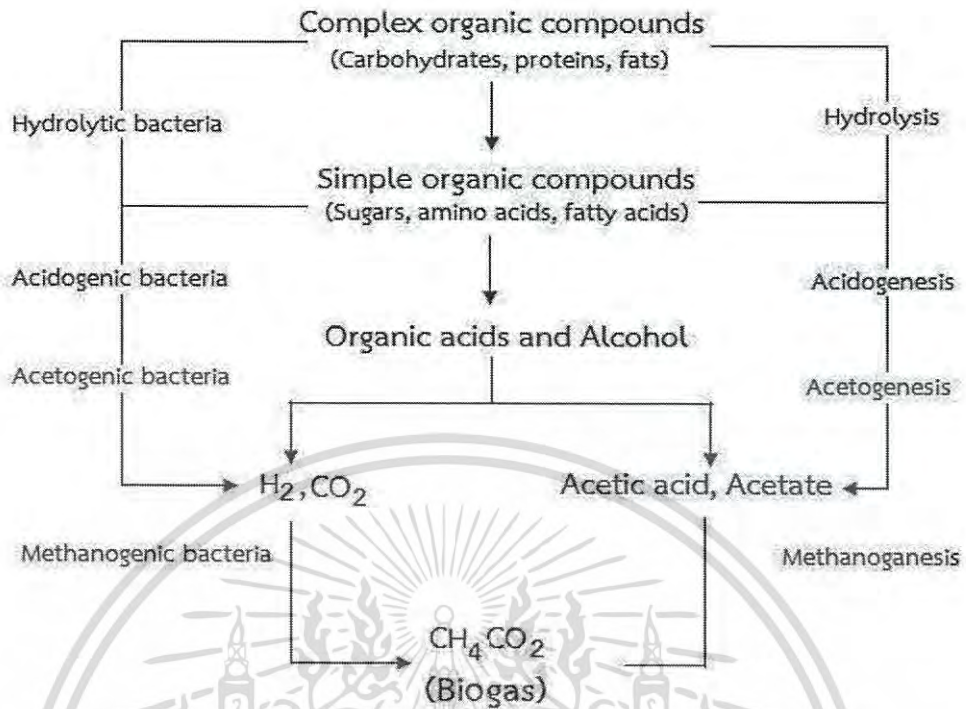
กระบวนการการผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะใช้น้ำเสียหรือของเสียทางการเกษตร สิ่งปฏิกูล และขยะจากอุตสาหกรรมเป็นแหล่งวัตถุดิบหลัก นอกจากนี้มูลสัตว์ยังเป็นที่ยอมรับโดยทั่วกันว่า มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างมาก เนื่องจากในมูลสัตว์จะมีแบคทีเรีย ชนิดที่ไม่ต้องการใช้ออกซิเจน ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับที่สามารถผลิตก๊าซธรรมชาติได้ ในปัจจุบันได้มีการ พัฒนานำพืชพลังงานมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเพิ่มความหลากหลายของพืชในการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปทางการเกษตรสามารถนำมาใช้ผลิตก๊าซชีวภาพได้เช่นกัน โดยมีวิธีการคือ การใช้แบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนเป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย นอกจากนี้วิธีนี้จะช่วยลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมแล้ว หลังเสร็จสิ้นกระบวนการยังจะให้ผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกใหม่แทนพลังงานฟอสซิลที่กำลังจะหมดไปได้ น้ำเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรม ชุมชน ตลอดจนฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ก็สามารถนำมาบำบัดผ่านระบบนี้ได้เช่นกัน นอกเหนือจากก๊าซชีวภาพที่ได้แล้ว หลังจากการกระบวนการบำบัดเสร็จสมบูรณ์ยังจะได้กากตะกอนอินทรีย์ ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับปุ๋ยอินทรีย์ที่สามารถนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินได้อีกด้วย นอกจากนี้วัตถุดิบดังกล่าว การนำผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเป็นพืชที่มีการเพาะปลูกอย่างแพร่หลาย และมีศักยภาพพอที่จะใช้ผลิตก๊าซชีวภาพและเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ ยังถือได้ว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานภายในประเทศ (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2553)

### 2.2.2 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่สร้างมีเทน (Non-methanogenic bacteria) โดยกลุ่มสร้างมีเทน จะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเป็นสารอาหาร และให้ผลผลิตเป็นก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นหลัก โดยมีก๊าซอื่นๆในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไข่เน่าหรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ซึ่งแบคทีเรียในกลุ่มนี้ไม่ชอบออกซิเจนอิสระ ( $\text{O}_2$ ) ดังนั้นในการผลิตก๊าซชีวภาพจะต้องควบคุมไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนที่อยู่ภายในระบบ เพราะจะทำให้การผลิตก๊าซมีเทนไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร และเนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถใช้สารอาหารที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเท่านั้น การผลิตก๊าซมีเทนจากสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน จึงต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไม่สร้างมีเทน เพื่อทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนสูงให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนต่ำ เพื่อให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถย่อยสลายได้ ดังนั้นในการผลิตก๊าซมีเทนจะต้องอาศัยความร่วมมือของแบคทีเรียหลายๆ กลุ่มเข้า

ด้วยกัน (สารโวจน์, 2552) โดยกระบวนการสร้างมีเทนทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.1

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

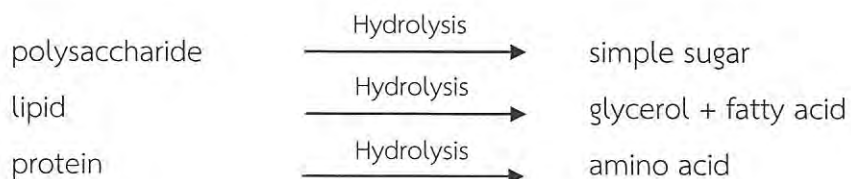


รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

ที่มา : Muzenda (2014)

ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพนั้น จะประกอบไปด้วยกระบวนการย่อยสลาย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นกระบวนการลดขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในวัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นนั้น มีโมเลกุลขนาดใหญ่และไม่สามารถละลายน้ำได้ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน เป็นต้น จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการแตกตัวเพื่อให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงและละลายในน้ำได้ โดยมีแบคทีเรียช่วยในการปล่อยเอนไซม์เร่งการแตกตัวของโมเลกุล ทำให้ได้สารอินทรีย์โมเลกุลเล็กลง ได้แก่ น้ำตาล โมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโนและกรดไขมัน ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

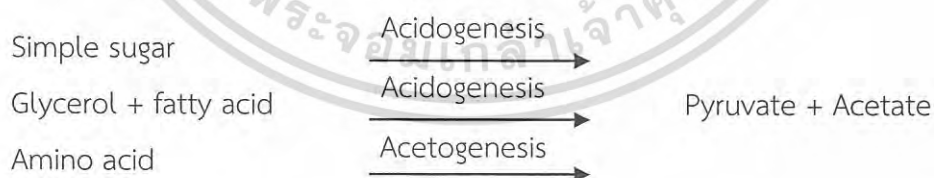
โดยขั้นตอนการลดขนาดโมเลกุลด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส แสดงให้เห็นถึงสารอินทรีย์ที่ได้หลังจากการลดขนาดด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส (นคร, 2553) สามารถแบ่งเอนไซม์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงเอนไซม์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรไลซิส

ชนิดของเอนไซม์	สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์ที่ได้
Proteinase	Protein	Amino Acid
Cellulase	Cellulose	Cellobiose, glucose
Hemicellulase	Hemicellulose	Sugar (glucose, xylose, mannose)
Amylase	Starch	Glucose
Lipase	Fat	Fatty acid, glycerol
Pectinase	Pectin	Sugar (galactose, arabinose)

ที่มา : Muzenda (2014)

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการแอซิโตเจนิซิสและกระบวนการแอซิโตเจนิซิส (Acidogenesis and Acetogenesis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ ทำให้สามารถซึมผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้ จากนั้นแบคทีเรียจะทำการดูดซึมกรดอินทรีย์เข้าสู่เซลล์และหลั่งเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในเซลล์ให้กลายเป็นกรดแอซิดิกและก๊าซไฮโดรเจนแล้วขับออกสู่ภายนอกเซลล์ โดยกระบวนการนี้จะเรียกว่า กระบวนการแอซิโตเจนิซิส ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่ที่พบในกระบวนการนี้เป็นแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรด (acid forming bacteria) ดังสมการ



แบคทีเรียที่พบในกระบวนการขั้นที่ 1 และ 2 เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการช่วยลดขนาดและช่วยเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ ไม่ได้มีหน้าที่ในการสร้างก๊าซมีเทน เรียกแบคทีเรียกลุ่มนี้ว่า กลุ่มไม่สร้างก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียในกลุ่มนี้มีหลายสายพันธุ์และมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน (นคร, 2553) ดังแสดงในตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน

ชนิดของแบคทีเรีย	cellulose	starch	peptone	casein	lipid
<i>Alcaligenes bookerii</i>	-	-	-	-	x
<i>A. faecalis</i>	x	-	-	-	-
<i>B. cereus</i> var. <i>mycoides</i>	-	x	-	x	-
<i>B. cereus</i>	x	x	x	x	-
<i>B. circulans</i>	-	-	x	-	-
<i>B. firmus</i>	-	-	x	-	-
<i>B. megaterium</i>	x	x	-	x	x
<i>B. pumilis</i>	-	-	x	x	-
<i>B. sphaericus</i>	-	-	x	x	x
<i>B. subtilis</i>	-	-	x	x	x
<i>Clostridium carnofoetidum</i>	x	-	-	-	-
<i>Escherichia coli</i>	-	-	x	x	-
<i>Micrococcus candidum</i>	-	x	-	-	-
<i>M. luteus</i>	-	-	-	-	x
<i>M. varians</i>	-	x	x	x	-
<i>M. ureae</i>	-	x	-	-	-
<i>Paracolobacterium intermedium</i>	-	-	x	-	-
<i>P. coliforme</i>	-	-	x	-	-
<i>Proteus vulgaris</i>	x	-	-	-	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	x	-	-	-	-
<i>Ps. oleovorans</i>	-	-	-	-	x
<i>Ps. perolens</i>	-	-	-	-	x
<i>Ps. reptilivora</i>	x	-	-	-	-
<i>Ps. riboflavin</i>	x	-	-	-	x
<i>Pseudomonas</i> spp.	x	x	x	x	x
<i>Streptomyces bikiniensis</i>	-	-	-	-	x

ที่มา : นคร (2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการที่ 3 กระบวนการเมทาโนเจนิซิส (Methanogenesis) เป็นกระบวนการสุดท้ายในการผลิตก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) โดยแบคทีเรียกลุ่มหนึ่งที่เรียกว่าเมทาโนเจน (methanogen) หรือแบคทีเรียสร้างมีเทน (methane forming bacteria) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการเจริญ ทำหน้าที่สลายและเปลี่ยนกรดแอซิดิกและไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยก๊าซต่างๆที่เกิดขึ้นจะลอยขึ้นบนผิวน้ำและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ ดังสมการ



กระบวนการสร้างก๊าซมีเทนมี 2 ขั้นตอน ที่มีความสำคัญในการผลิต คือ กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) และรีดักชัน (reduction) ขั้นตอนแรกจะเป็นการเปลี่ยนกรดแอซิดิกโดยการออกซิเดชันกับน้ำเพื่อเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนก่อน จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกรีดักชันเพื่อเปลี่ยนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและน้ำต่อไป ดังสมการ



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียสายพันธุ์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงผลิตภัณฑ์จากแบคทีเรียสร้างมีเทน

ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์ที่ได้
<i>Methanobacterium formicum</i>	CO CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> formate	CH <sub>4</sub>
<i>M. mobilis</i>	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> formate	CH <sub>4</sub>
<i>M. propionicum</i>	propionate	CO <sub>2</sub> + acetate*
<i>M. ruminantium</i>	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> formate	CH <sub>4</sub>
<i>M. sohngenii</i>	Acetate Butyrate	CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub>
<i>Methanococcus mazei</i>	Acetate Butyrate	CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) แสดงผลิตภัณฑ์จากแบคทีเรียสร้างมีเทน

ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์ที่ได้
<i>M. suboxydans</i>	Caproate Butyrate	propionate* acetate*
<i>M. vannielii</i>	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> formate	CH <sub>4</sub>
<i>Methanosarcina barkeri</i>	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> Methanol	CH <sub>4</sub> CH <sub>4</sub> CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub>
<i>M. methanica</i>	Acetate Butyrate	CH <sub>4</sub>

\*หมายเหตุ acetate และ propionate จะถูกเปลี่ยนเป็น CH<sub>4</sub> โดยกระบวนการ 2 ขั้นตอน  
ที่มา : นคร (2553)

### 2.2.3 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีปัจจัยที่สำคัญหลายชนิดที่มาเกี่ยวข้อง โดยกระบวนการเมทาบอลิซึมของแบคทีเรียจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายปัจจัย ดังนั้นตัวแปรเหล่านี้จึงต้องพิจารณาอย่างละเอียดถี่ถ้วนและต้องทำการควบคุมในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้แบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรด (Acidogenic bacteria) มีความต้องการด้านสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างจากแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) และยังมีแบคทีเรียชนิดอื่นในระหว่างกระบวนการหมัก โดยปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ (นคร, 2553) ได้แก่

#### 2.2.3.1 ปริมาณของเหลวที่ใช้ในถังหมัก

การเติมน้ำหรือปริมาณของเหลวเข้าไปในระบบจะช่วยให้การเจือจาง (dilution) และรักษาระดับปริมาณของแข็งรวมในระบบให้ถูกต้องตามที่ได้ทำการออกแบบระบบไว้ โดยในระบบทั่วไปจะมีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids) ประมาณ 10–25 เปอร์เซ็นต์ หากมีค่าของแข็งทั้งหมดในระบบน้อยเกินไป จะทำให้ส่วนที่เป็นของแข็งบางส่วนตกตะกอนลงสู่ก้นถัง แต่ถ้ามีปริมาณของของแข็งอยู่มากเกินไป จะมีผลทำให้เกิดการขัดขวางการไหลขึ้นของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.2 อุณหภูมิ

กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิแตกต่างกันได้ โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ อุณหภูมิต่ำ (Psychrophilic Anaerobic Digestion) อุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic Anaerobic Digestion) และอุณหภูมิสูง (Thermophilic Anaerobic Digestion) ที่อุณหภูมิต่ำ จะมีอุณหภูมียู่ในช่วง 10-25 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับวัตถุดิบที่มีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตสูง แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างขั้นตอนของกระบวนการหมักจะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิไม่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย ที่อุณหภูมิปานกลาง โดยปกติจะถูกนำมาใช้ในการบำบัดของเสียจากแหล่งอุตสาหกรรมมากที่สุด เนื่องจากสามารถทำได้ง่าย มีเสถียรภาพในการทำงานและมีความเหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย โดยมีอุณหภูมียู่ในช่วง 30-37 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูง คือ 50-65 องศาเซลเซียส แบคทีเรียจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในของเสียในอัตราสูง โดยทั่วไปมักใช้ในการบำบัดของเสียจากสัตว์ ของเสียจากกระบวนการผลิตในระบบอุตสาหกรรมและขยะในบางประเทศในเขตยุโรป เช่น ประเทศเดนมาร์กและประเทศเนเธอร์แลนด์ เนื่องจากมีอัตราการย่อยสลายสูง ใช้ระยะเวลาในการกักเก็บน้อย สามารถทำลายแบคทีเรียก่อโรคและไวรัสได้มากที่สุด (Cheng, 2009)

### 2.2.3.3 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมในช่วงระหว่าง 6.5–7.5 (Bharti and Kumar, 2012) แต่ช่วงที่ดีที่สุดคือ 7.0-7.2 และเมื่อค่าต่ำกว่า 6.5 เกิดจะการสร้างกรดขึ้น ทำให้เกิดการยับยั้งแบคทีเรียในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน ดังนั้นต้องมีการรักษาระดับค่าความเป็นกรดเป็นด่างในระบบให้ดี เนื่องจากแบคทีเรียในขั้นตอนแอสซิโดเจเนซิสจะผลิตกรดระเหยง่ายจำนวนมาก ทำให้ระบบมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 5.0 ซึ่งแบคทีเรียสร้างมีเทนจะไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นจึงควรควบคุมระยะเวลาในการหมักย่อยโดยการเติมสารประเภทต่างเข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดเป็นด่างให้อยู่ในช่วงที่มีความเหมาะสมในการผลิตมีเทน เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) แต่ในบางครั้งค่าความเป็นกรดเป็นด่างอาจลดลงเนื่องจากการเติมสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นมากเกินไป ดังนั้นการเพิ่มค่าความเป็นกรดเป็นด่างจึงสามารถทำได้โดยการหยุดเติมสารอินทรีย์หรือลดอัตราการเติมสารอินทรีย์

### 2.2.3.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก (Hydraulic retention time, HRT)

การใช้ระยะเวลาการหมักนาน จะช่วยเพิ่มปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แบคทีเรียสามารถเปลี่ยนกรดระเหยง่ายให้กลายเป็นมีเทนได้มากขึ้น แต่หากใช้ระยะเวลาในการหมักมากเกินไป อาจทำให้แบคทีเรียมีปริมาณมากเกินไปกว่าที่ระบบจะรับได้

### 2.2.3.5 อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ถังหมัก

อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ถังหมักเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่สุดในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบไม่ควรป้อนในอัตราที่สูงจนเกินไป เนื่องจากแบคทีเรียในกระบวนการแอสซิโดเจนิซิสมักจะผลิตกรดระเหยง่ายในจำนวนที่มากกว่าปกติ ทำให้กระบวนการหมักมีความเป็นกรดสูง ส่งผลให้แบคทีเรียในกระบวนการเมทาโนเจนิซิสมิไม่สามารถเจริญได้ เพราะค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียชนิดนี้คือ 6.5–7.5 จึงส่งผลให้ไม่สามารถผลิตมีเทนหรือผลิตออกมาได้น้อยมาก อัตราการป้อนสูงสุดจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการ

### 2.2.3.6 ความสามารถในการย่อยสลายของสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายในทางชีวภาพ (biodegradability) จะส่งผลให้มีการผลิตมีเทนในปริมาณมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารอินทรีย์ เช่น ปริมาณของแข็งที่ระเหย (volatile solids, VS) หากมีค่าการระเหยสูงจะทำให้ความสามารถในการย่อยสลายของสารอินทรีย์มากขึ้น ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีการย่อยสลายแตกต่างกัน

นอกจากปัจจัยเหล่านี้แล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น ขนาดของสารอินทรีย์ตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ปริมาณของสารยับยั้งและสารพิษในระบบ การกวนผสมภายในถังหมัก (mixing) ปริมาณสารอาหารและอื่นๆ เป็นต้น

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พาริดา และคณะ (2557) ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ลูกผสม 3 สายพันธุ์ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และหญ้าอาลาฟิล พบว่าหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์อาลาฟิลมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 และหญ้าเนเปียร์ยักษ์ โดยให้ผลผลิตที่อัตราส่วนระหว่างหญ้าต่อจุลินทรีย์เป็น 1:2 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 24.29 ลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 85.0 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนระหว่างหญ้าต่อเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์อาลาฟิลในถังหมักขนาด 8 ลิตร ปริมาตรหมัก 5 ลิตร เป็นเวลา 54 วัน คือ 1:3 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 76.97 ลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 80.6 เปอร์เซ็นต์ และเป็นอัตราส่วนที่การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีแนวโน้มที่ดี เหมาะสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพแบบขั้นตอนเดียว

ฐิติวรรณ และคณะ (2557) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกเผือกภายใต้สภาวะไม่ใช้อากาศแบบสองขั้นตอน โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างเปลือกเผือกต่อน้ำประปาที่ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักก๊าซชีวภาพ ศึกษาสภาวะและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าที่อัตราส่วนของเปลือกเผือกต่อน้ำประปา (1:4) สามารถหมักก๊าซชีวภาพได้โดยของเหลวไม่ล้นออกจากถังหมัก นอกจากนี้ยังพบว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตขนมปังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพและมีองค์ประกอบของมีเทนมากกว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากถังหมักก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยที่ระยะเวลาการเก็บ 25 วัน จะได้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 1.99 ลิตรต่อวัน และก๊าซชีวภาพมีสัดส่วนของก๊าซมีเทน 44.6-66.7 เปอร์เซ็นต์

Sirirote และคณะ (2010) ทำการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยกระบวนการหมักแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบตั้งต้น โดยนำมันสำปะหลังแห้งปริมาณ 50 กรัม มาปั่นผสมกับน้ำ 200 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเติมมันสำปะหลังแห้งที่ปั่นแล้วเข้าสู่ถังหมักกรด ปริมาตร 6 ลิตร โดยใช้ถังมีเทนปริมาตร 21 ลิตร ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 33 องศาเซลเซียส ใช้หัวเชื้อปริมาณ 10% จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พบว่า ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดจากถังมีเทนคือ 13.20 ลิตรต่อวัน หลังการหมักเป็นระยะเวลา 31 วัน ประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่าย เท่ากับ 86.21, 84.11, 92.44% และ 5,745 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณของมีเทนที่ได้จากการทดลองนี้คือ 64.3% และจากผลการทดลองที่ได้ นั้น สรุปได้ว่า การย่อยสลายแบบ 2 ขั้นตอน เป็นสภาวะที่มีความเหมาะสมกับแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียผลิตมีเทนมากกว่าการย่อยสลายแบบขั้นตอนเดียว เพราะช่วยส่งเสริมกิจกรรมทั้งหมดภายในถังหมัก ส่วนมันสำปะหลังนั้นสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบที่ดีในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยเช่นกัน

Anunputtikul และ Rodtong (2004) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกจากแหล่งวัตถุดิบที่อุดมไปด้วยแป้งโดยมันสำปะหลัง โดยกระบวนการย่อยสลายแบบขั้นตอนเดียว มีปริมาตรของถังหมัก คือ 5 ลิตร และ 20 ลิตร ทำการย่อยสลายแบบแบบชด้วยมันสำปะหลังแห้งที่มีความชื้นเฉลี่ย 18% ที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 30 วัน โดยใช้ถังหมักที่ปริมาตร 5 ลิตร เติมแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนให้มีความเข้มข้นเป็น 1.00% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของของแข็งทั้งหมด และเติมยูเรีย 0.04% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพ 1.95 ลิตรต่อวัน โดยมีปริมาณมีเทนสูงสุดคือ 67.92% ที่ระยะเวลาการหมัก 10 วัน โดยกระบวนการย่อยสลายจะสิ้นสุดลงเมื่อหมักได้ 16 วัน จากนั้นเพิ่มปริมาตรการหมักเป็น 20 ลิตร ได้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพ 5.50 ลิตรต่อวัน โดยมีปริมาณมีเทนคือ 55.70% ที่ระยะเวลาการหมัก 10 วัน จากนั้นกระบวนการจะหยุดลงที่ระยะเวลาการหมัก 24 วัน โดยจะมีการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีปริมาณมีเทนคือ 67%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เครื่องชั่ง 1 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น KD-321 บริษัท Tanita ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.2 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น PA214 บริษัท Ohaus ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH meter) รุ่น UB-10 บริษัท Demver ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.4 เครื่องปั่น รุ่น HW-CH1 บริษัท House worth ประเทศจีน
- 3.1.5 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Z383K บริษัท Hermle ประเทศเยอรมัน
- 3.1.6 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น ED53 บริษัท Binder ประเทศเยอรมัน
- 3.1.7 โถดูดความชื้น (Desiccator) บริษัท Duran ประเทศอังกฤษ
- 3.1.8 ตู้เย็น (Refrigerator) อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส
- 3.1.9 เตาเผา (Hot spot furnace) รุ่น Gallenkamp ประเทศอังกฤษ
- 3.1.10 กล้องจุลทรรศน์ รุ่น CH30 บริษัท Olympus ประเทศญี่ปุ่น
- 3.1.11 ไทม์เมอร์ รุ่น YA-16 บริษัท Programateur journalier ประเทศจีน

## 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 Crystal violet
- 3.2.2 Safranin
- 3.2.3 Gram iodine
- 3.2.4 แอลกอฮอล์ 95%
- 3.2.5  $H_2SO_4$
- 3.2.6  $K_2Cr_2O_7$
- 3.2.7  $HgSO_4$
- 3.2.8  $Ag_2SO_4$
- 3.2.9  $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$
- 3.2.10  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$
- 3.2.11  $HCOOC_6H_4COOK$
- 3.2.12  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$
- 3.2.13 สารละลายมาตรฐาน  $H_2SO_4$  0.05 N
- 3.2.14 สารละลายมาตรฐาน NaOH 0.05 N

## 3.3 หัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นที่นำมาใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เพอร์ซิเดนท์ เบเกอร์ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ นำมาทำการปรับสภาพจุลินทรีย์เพื่อให้สามารถย่อยสลายและใช้สารละลายเศษเปลือกเป็นสารตั้งต้นในการเจริญภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

## 3.4 เศษเปลือก

เศษเปลือกที่ใช้ในการทดลองเป็นของเสียเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิต (รูปที่ 3.1) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เพอร์ซิเดนท์ เบเกอร์ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะเศษเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ระบบถังหมักก๊าซชีวภาพ

ระบบถังหมักก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลองคือ กระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบแบช (Batch) (รูปที่ 3.2) โดยระบบถังหมักประกอบด้วย



รูปที่ 3.2 แสดงชุดถังหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบแบช

#### 3.5.1 ถังหมัก

ถังหมักที่ใช้เป็นถังพลาสติกชนิดแข็งไม่มีฝา ความสูง 27 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 23 เซนติเมตร ความจุ 8 ลิตร ปริมาตรหมัก 6 ลิตร เจาะด้านข้างของถัง เพื่อใส่ข้อต่อและวาล์วสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำหมัก ด้านบนปิดด้วยแผ่นอะคริลิกใสหนา 4 เซนติเมตร ที่เจาะช่องสำหรับใส่ใบพัดกวนน้ำหมัก และช่องสำหรับใส่ท่อ นำก๊าซออกจากถังหมักซึ่งปลายอีกด้านต่อเข้ากับถังเก็บก๊าซชีวภาพที่มีน้ำบรรจุอยู่ขนาด 6 ลิตร บริเวณด้านข้างของถังเก็บก๊าซเจาะรูพร้อมต่อเข้ากับสายยาง เพื่อให้เป็นทางออกจากระบบของน้ำขณะเกิดการแทนที่โดยก๊าซชีวภาพจากถังหมัก (รูปที่ 3.3)

ก่อนการใช้งานให้ตรวจสอบรอยรั่วของถังหมัก โดยการใช้น้ำสบู่แล้วเป่าลมเข้าสู่ถังหมัก จากนั้นอุดรอยรั่ว และปิดบริเวณข้อต่อด้วยกาวซิลิโคน



รูปที่ 3.3 แสดงถังหมักไร้ออกซิเจนแบบแบชขนาด 8 ลิตร

### 3.5.2 ถังเก็บก๊าซชีวภาพ

ถังเก็บก๊าซชีวภาพในการทดลอง ใช้ถังบรรจุน้ำพลาสติกขนาด 6 ลิตร วางตามแนวอนเจาะรูปบริเวณด้านข้างของถัง เชื่อมถังหมักเข้ากับถังแทนที่น้ำด้วยสายยาง เมื่อเกิดก๊าซขึ้นภายในถังหมัก ก๊าซจากถังหมักจะเคลื่อนที่ผ่านท่อเข้าไปแทนที่น้ำในถังเก็บก๊าซชีวภาพ โดยใช้ภาชนะรองรับน้ำที่ไหลออกมาเพื่อนำไปวัดปริมาตร (รูปที่ 3.4) ทำการตรวจสอบรอยรั่วก่อนนำไปใช้งานเช่นเดียวกับถังหมัก



รูปที่ 3.4 แสดงถังเก็บก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3 มอเตอร์ (motor)

มอเตอร์ที่ใช้เพื่อให้เกิดระบบกวนภายในถังหมัก คือ มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 4 วัตต์ ความเร็วรอบที่ใช้สำหรับการกวน 2.5 รอบต่อนาที ใช้ไฟฟ้า 220 โวลต์

### 3.5.4 เครื่องตั้งเวลา (timer)

ใช้เพื่อทำการตั้งเวลาเปิดและปิดการทำงานของมอเตอร์ โดยต่อเข้ากับมอเตอร์ถังหมักก๊าซชีวภาพ ตั้งเวลาให้มีการกวน 15 นาที และหยุด 45 นาที เพื่อไม่ให้มอเตอร์ทำงานหนักจนเกินไป

## 3.6 วิธีการทดลอง

### 3.6.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำเศษเปลือกที่ได้มาทำการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนนำเข้าสู่กระบวนการ โดยทำการหั่นเพื่อให้มีขนาดเล็กกลวงเหลือประมาณ 1 เซนติเมตร (รูปที่ 3.5) จากนั้นนำเศษเปลือกที่ผ่านการหั่นแล้ว มาทำการบั่นให้ละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีก่อนนำไปใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.5 แสดงการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนทำการทดลองโดยวิธีการหั่นให้มีขนาดเล็ก



รูปที่ 3.6 แสดงสภาพวัตถุบีก่อนทำการทดลองโดยวิธีปั่นให้ละเอียด

### 3.6.2 วิเคราะห์คุณลักษณะหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นและวัตถุบีกเริ่มต้น

นำหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นและเศษเปลือกที่เก็บไว้ในตู้แช่แข็งอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส มาทำการละลายให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน จากนั้นนำไปวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง วิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และปริมาณของแข็งระเหย (VS) โดยวิธีของ Arnold (ภาคผนวก ข)

### 3.6.3 การผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ความเข้มข้นของหัวเชื้อที่ระดับต่างๆ

นำเศษเปลือกมาละลายให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน จากนั้นนำไปผสมกับหัวเชื้อลงในถังหมักขนาด 8 ลิตร โดยใช้ปริมาตรในการหมัก 6 ลิตร กำหนดปริมาณเศษเปลือก 200 กรัม ต่อความเข้มข้นของหัวเชื้อที่ระดับต่างๆ ได้แก่ 0, 20, 30, 60, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ความเข้มข้นของหัวเชื้อที่ 0 และ 100 เปอร์เซ็นต์เป็นชุดควบคุม ดังตารางที่ 3.1 ต่อมาทำการปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างให้มีค่าประมาณ 6.8 ทำการทดลองภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิห้อง บันทึกปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและทำการเก็บตัวอย่างน้ำหมักเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดเป็นด่างของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย กรดไขมันระเหยง่าย และซีโอดี ทำทุกๆ 3 วัน จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล

ตารางที่ 3.1 แสดงความเข้มข้นของหัวเชื้อ ปริมาณหัวเชื้อ น้ำหนักเศษเปลือกและปริมาตรน้ำกลั่นที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ความเข้มข้นของหัวเชื้อ (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณหัวเชื้อ (มิลลิลิตร)	น้ำหนักเศษเปลือก (กรัม)	ปริมาตรน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)
20	1,200	200	4,800
30	1,800	200	4,200
60	3,600	200	2,400
90	5,400	200	600
Control 1 (0)	0	200	6,000
Control 2 (100)	0	0	0

#### 3.6.4 การผลิตก๊าซชีวภาพจากปริมาณเศษเปลือกระดับต่างๆ

นำเศษเปลือกมาละลายให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน ทำการทดลองโดยกำหนดให้มีปริมาณเศษเปลือกดังนี้ 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ต่อปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ ซึ่งสามารถให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ได้จากการทดลอง ดังตารางที่ 3.2 ทำการทดลองภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิห้อง บันทึกปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและทำการเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย กรดไขมันระเหยง่าย และซีโอดี ทุกๆ 3 วัน จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล นั่นคือปริมาณก๊าซที่วัดได้มีปริมาตรคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณเศษฝือก น้ำหนักเศษฝือก ปริมาณหัวเชื้อและปริมาตรน้ำกลั่นที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากปริมาณเศษฝือกระดับต่างๆ

ปริมาณเศษฝือก (เปอร์เซ็นต์)	น้ำหนักเศษฝือก (กรัม)	ปริมาณหัวเชื้อ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)
1	60	1,800	4,140
3	180	1,800	4,020
5	300	1,800	3,900
7	420	1,800	3,780
10	600	1,800	3,600
15	900	1,800	3,300
20	1,200	1,800	3,000
25	1,500	1,800	2,700
30	1,800	1,800	2,400
Control (0)	0	1,800	4,200

### 3.6.5 การวิเคราะห์ทางเคมี

ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ 3 วัน ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ โดยใช้วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3.3 ซึ่งแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีวิเคราะห์
ความเป็นกรดเป็นด่าง	-	pH meter
ก๊าซรายวัน	ลิตร	Archimedes' principle
ก๊าซสะสม	ลิตร	Archimedes' principle
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	Gravimetric method
ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	Gravimetric method
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	กรัมต่อลิตร	Closed reflux
กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid, VFA)	มิลลิกรัมต่อลิตร	Titration method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 คุณสมบัติของหัวเชื้อและวัตถุดิบเริ่มต้น

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของหัวเชื้อเบื้องต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 มีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.1 ค่าของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 25.6 กรัมต่อลิตร ค่าของแข็งระเหยเท่ากับ 11.6 กรัมต่อลิตร และค่าของแข็งทั้งหมดต่อของแข็งระเหย 45.2 เปอร์เซ็นต์ จากผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของแบคทีเรียโดยวิธีการย้อมแกรม ส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า (รูปที่ 4.1) พบว่าแบคทีเรียมีลักษณะเป็นท่อน ซึ่งคล้ายกับเชื้อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Zeikus, 1977) การวิเคราะห์คุณสมบัติของเศษฝือก ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 6.3 ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 90.1 กรัมต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งระเหยได้ เท่ากับ 88.5 กรัมต่อลิตร และสามารถคิดเป็นสัดส่วนค่าของแข็งทั้งหมดต่อของแข็งระเหยเท่ากับ 98.3 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของหัวเชื้อเบื้องต้น

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้จากการทดลอง
pH	7.1
TS (g/L)	25.6
VS (g/L)	11.6
TS/VS (%)	45.2



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของแบคทีเรียที่พบ ภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติของเศษเปลือก

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้จากการทดลอง
pH	6.3
TS (g/l)	90.1
VS (g/l)	88.5
TS/VS (%)	98.3

#### 4.2 ผลการศึกษาหัวเชื้อที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือก

จากการทดลองหมักเศษเปลือกปริมาณ 200 กรัม ต่อหัวเชื้อที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0, 20, 30, 60, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของหัวเชื้อที่ 0 และ 100 เปอร์เซ็นต์เป็นชุดควบคุม ที่อุณหภูมิห้องในถังหมักขนาด 8 ลิตร ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ทำการตรวจวัดปริมาณการสร้างก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวันจนกระทั่งก๊าซที่ได้มีปริมาตรคงที่

##### 4.2.1 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย และกรดไขมันระเหยง่ายต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย และกรดไขมันระเหยง่ายในการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.7 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นภายในเวลา 27 วัน พบว่า แนวโน้มการเกิดก๊าซชีวภาพมีปริมาณสูงขึ้น โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด ในแต่ละชุดการทดลอง คือ ชุดควบคุมที่ 1 ปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 0 เปอร์เซ็นต์ และชุดควบคุมที่ 2 ปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 100 เปอร์เซ็นต์ มีการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้เท่ากับ 2.7 และ 2.2 ลิตร ตามลำดับ ที่ปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 20, 30, 60 และ 90 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 20.7, 22.2, 7.7 และ 11.5 ลิตร ตามลำดับ โดยเรียงลำดับตามความเข้มข้นของหัวเชื้อที่สามารถการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมจากมากไปหาน้อย ได้แก่ 30 เปอร์เซ็นต์ 20 เปอร์เซ็นต์ 90 เปอร์เซ็นต์ และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

นอกจากนี้ในรายงานการวิจัยอื่นๆ ได้รายงานผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกเปลือกแบบไม่ใช้อากาศ 2 ขั้นตอน โดยฐิติวรรณและคณะ (2557) ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างเปลือกเปลือกต่อน้ำประปาที่เหมาะสมในการหมักก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังหมักแบบ 1 ขั้นตอน ระยะเวลาทดลอง 5.8 ชั่วโมง อัตราส่วนที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุดคือ 1:4 ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 4.6 ลิตร

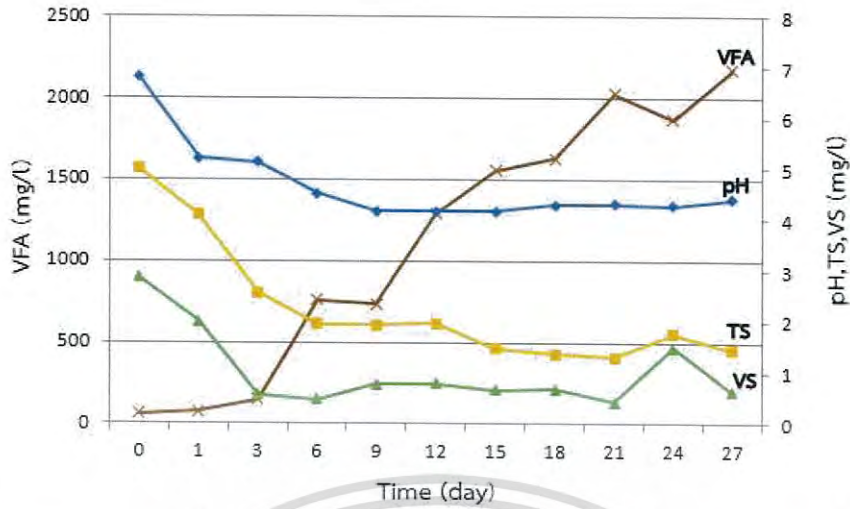
ช่วงระยะแรกของกระบวนการหมักมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อยเนื่องจากอยู่ในช่วงการสลายตัวของสารตั้งต้น หลังจากระยะเวลาผ่านไป ระบบจะเข้าสู่สภาวะที่แบคทีเรียสามารถใช้สารอาหารเพื่อสร้างกรดไขมันระเหยง่าย ซึ่งจะส่งผลต่อค่าพีเอชของระบบ นั่นคือเมื่อมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมาก ค่าพีเอชที่วัดได้จะลดลง จะเห็นได้ว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายจากการทดลองนี้มีค่าไม่เกิน

4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าระบบไม่เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย ทำให้ไม่มีผลยับยั้งการหมักชีวภาพ อย่างไรก็ตาม ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

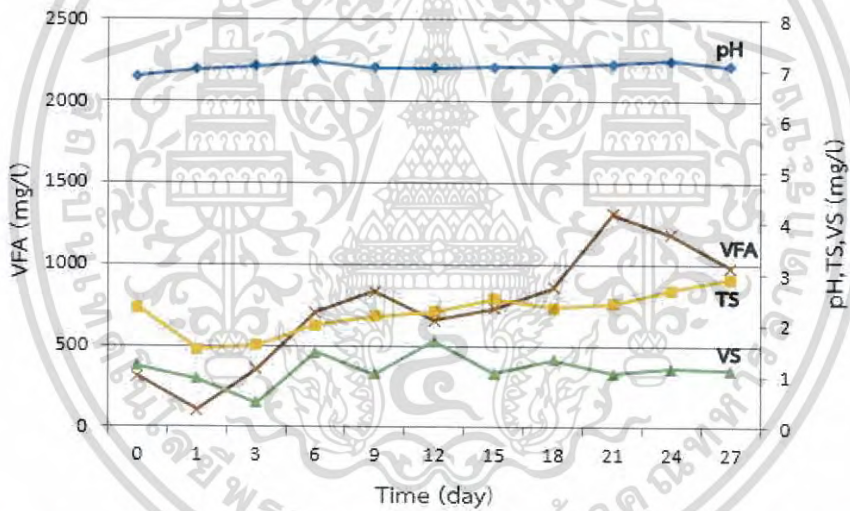
การทำงานของแบคทีเรียพวก Acetogenic bacteria และ Methanogenic bacteria (Schober และคณะ, 1999) เนื่องจากในช่วงระยะแรกของการหมักจะเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซิส แบคทีเรียจะสร้างเอนไซม์ (extracellular enzyme) เพื่อช่วยย่อยโครงสร้างโมเลกุลที่มีความซับซ้อนให้กลายเป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว (จิตชนก, 2554) จากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ (Zhu และคณะ, 2010) ทำให้การเกิดก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลเนื่องจากปริมาณสารอาหารลดลง ทำให้ระดับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันค่อยๆ ลดลงจนมีปริมาณคงที่

ค่าพีเอชนับว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรีย เป็นตัวบ่งชี้ถึงการทำงานของแบคทีเรียในระบบในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการทดลองค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4.1-7.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramirez-Saenz และคณะ (2009) ที่พบค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4.5-8.0 แสดงให้เห็นว่าถึงหมักก๊าซชีวภาพของการทดลองนี้มีความเสถียร หากค่าพีเอชของระบบต่ำกว่า 4.5 จะส่งผลให้การผลิตก๊าซมีเทนน้อยลง โดยแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถทนต่อสภาวะความเป็นกรดสูงหรือค่าพีเอชต่ำได้ (สุพินดา, 2544)

จากการวัดค่าปริมาณของแข็งของทั้งหมด พบว่ามีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในช่วงแรกของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อต่างๆ ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 2.4-5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเวลาผ่านไประบบเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้สารอินทรีย์มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลง อยู่ในช่วง 1.2-2.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และปริมาณของแข็งระเหยในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะเป็นตัวบ่งชี้การย่อยสลายของของเสียไปเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งถ้าค่าของแข็งระเหยในระบบมีค่าสูง แสดงว่ามีความสามารถในการเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ดี ผลการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่ามีค่าปริมาณของแข็งระเหยในช่วงแรกอยู่ในช่วง 0.8-1.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีแนวโน้มลดลงในช่วงสุดท้ายคือ 0.5-1.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักและการทำงานของแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียจะทำการย่อยสารตั้งต้นที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อนให้กลายเป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว อย่างไรก็ตามปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยมีปริมาณไม่คงที่เนื่องจากแบคทีเรียยังนำสารอินทรีย์ไปใช้เป็นแหล่งอาหารได้ไม่หมด

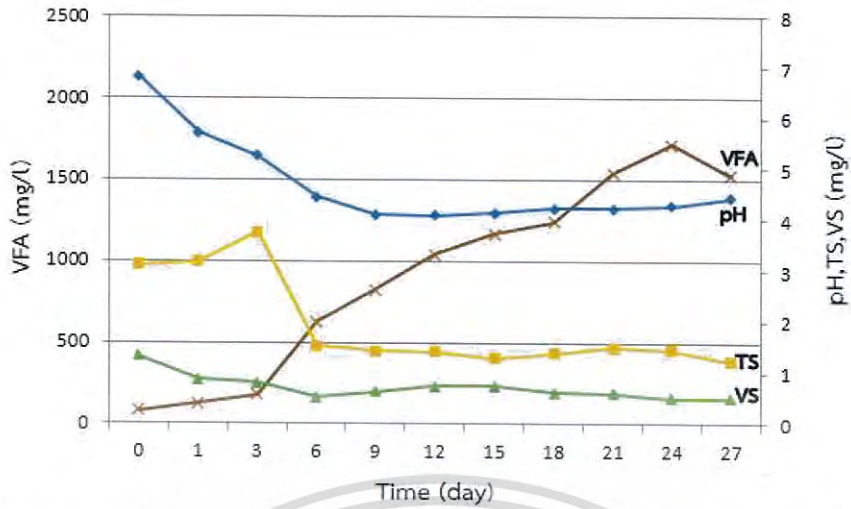


รูปที่ 4.2 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่าย ของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 0 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุมที่ 1)

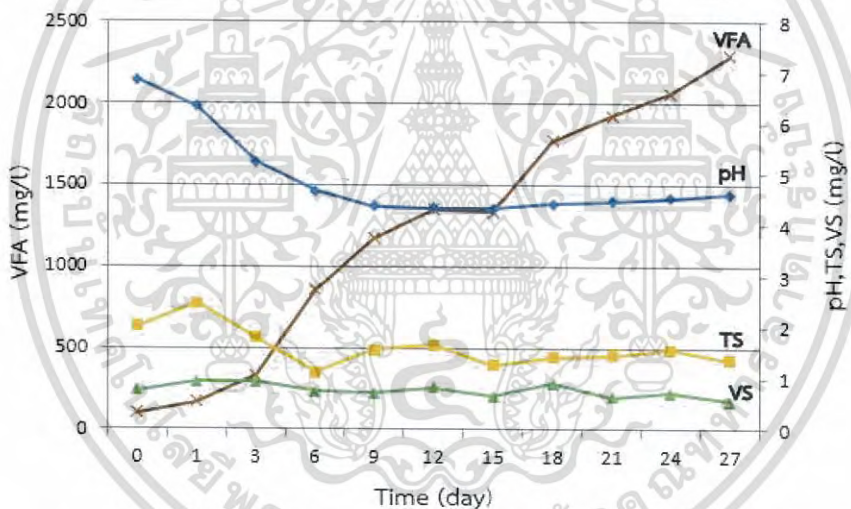


รูปที่ 4.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่าย ของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 100 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุมที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

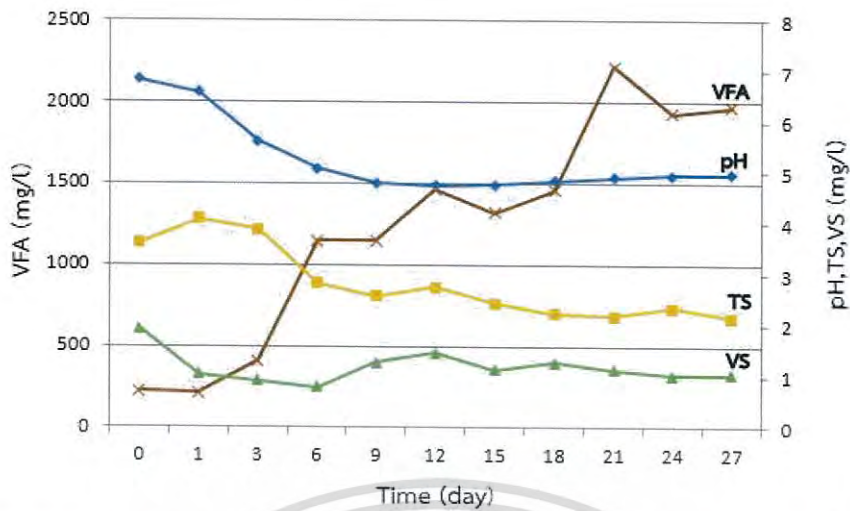


รูปที่ 4.4 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่าย ของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 20 เปอร์เซ็นต์

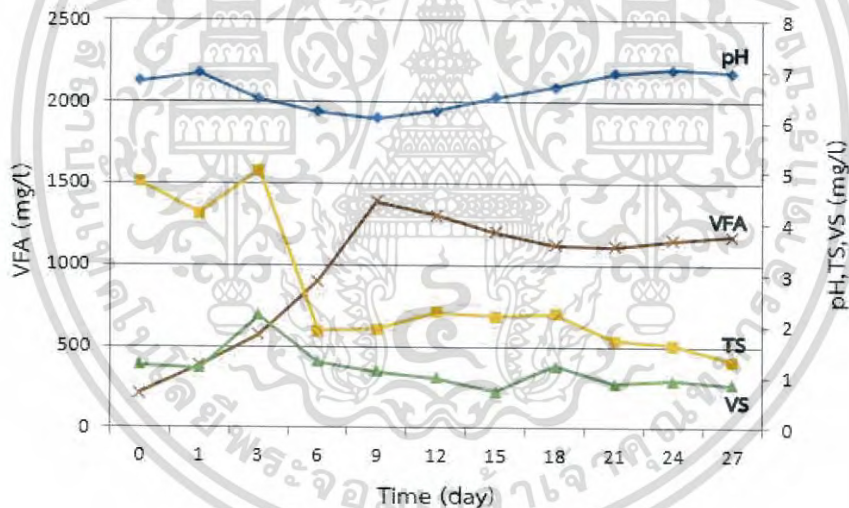


รูปที่ 4.5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่าย ของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่าย ของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 60 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.7 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่าย ของถังหมักที่มีความเข้มข้นหัวเชื้อ 90 เปอร์เซ็นต์

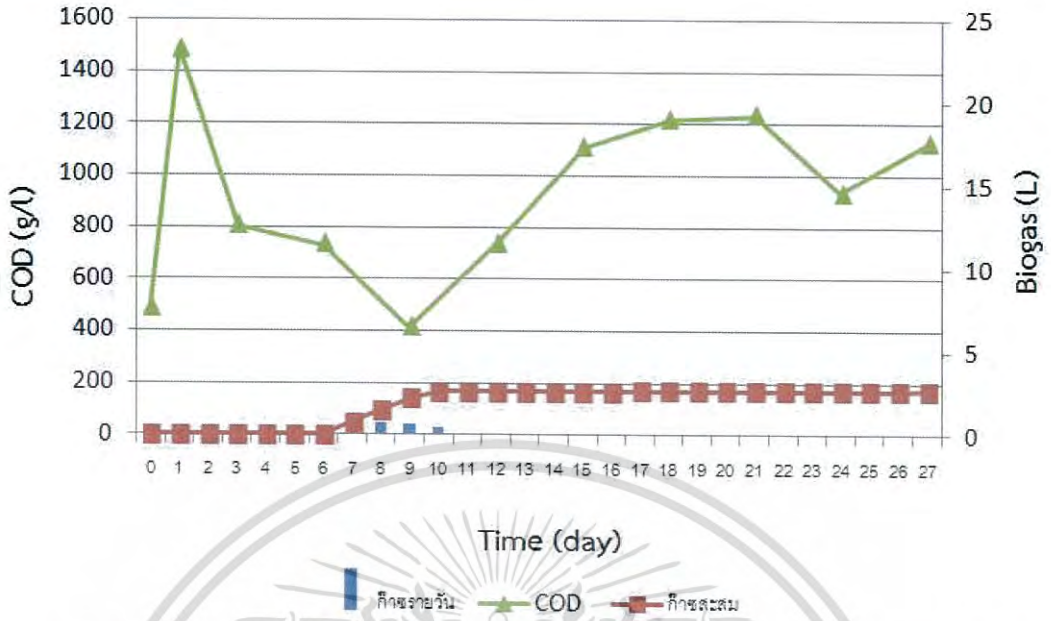
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าซีไอต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

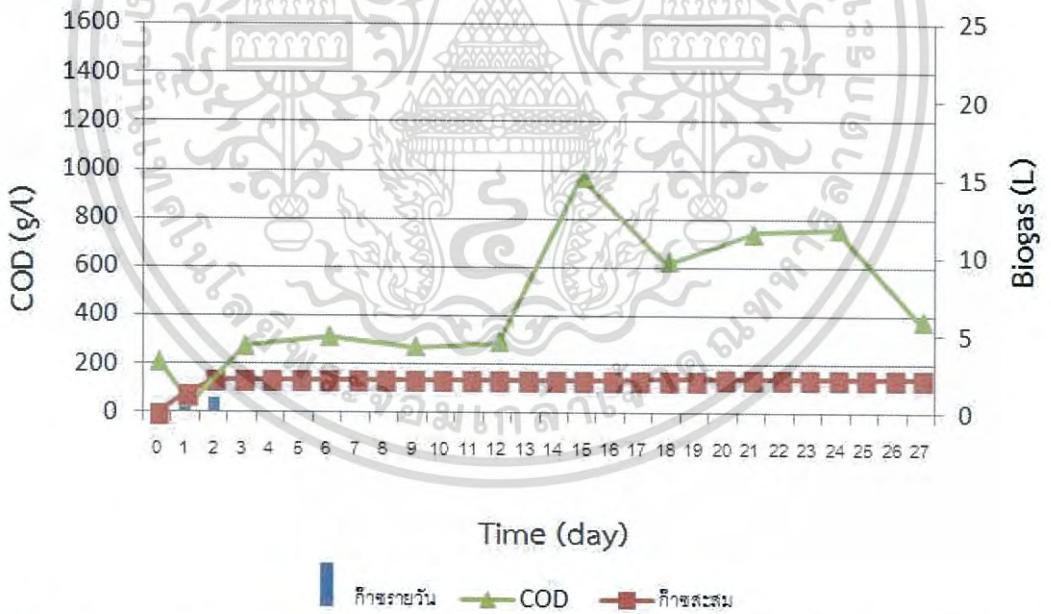
ค่าซีไอในแต่ละชุดการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาในการหมัก ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของแบคทีเรียในระบบที่สามารถย่อยสลายเศษฝือก จากสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ไปเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ โดยเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลองมีค่าซีไอใกล้เคียงกัน ค่าซีไอของชุดควบคุม 1 (ชุดควบคุมที่ปราศจากหัวเชื้อ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายเศษฝือกของแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ที่อาจปะปนมากับเศษฝือก ทำให้เกิดเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำสะสมอยู่ภายในระบบ ซึ่งในระบบไม่มีหัวเชื้อที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และสำหรับชุดควบคุม 2 (ชุดควบคุมที่ปราศจากเศษฝือก) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากภายในระบบไม่มีสารอินทรีย์ตั้งต้นสำหรับการย่อยสลาย (รูปที่ 4.9)

ค่าซีไอเริ่มต้นของแต่ละชุดการทดลองมีดังนี้ ถึงหมักที่มีปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 20 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 426.7 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถึงหมักที่มีปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 30 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 533.3 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ถึงหมักที่มีปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 60 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 966.6 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และถึงหมักที่มีปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 90 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 1097.8 กรัมต่อลิตร แสดงในรูปที่ 4.13 และมีค่าลดลงต่ำที่สุดในวันที่ 9 และ 10 โดยถึงหมักที่มีปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 20 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 142.2 กรัมต่อลิตร ถึงหมักที่มีปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 30 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 284.4 กรัมต่อลิตร ถึงหมักที่มีปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 60 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 355.6 กรัมต่อลิตร และถึงหมักที่มีปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 90 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 213.3 กรัมต่อลิตร

ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอ คือ ปริมาณซีไอที่ระบบสามารถกำจัดได้ โดยคำนวณจากผลต่างของค่าซีไอ ได้ผลการคำนวณดังนี้ ชุดควบคุม 1 และ 2 มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอได้ 23.8 และ 60.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ถึงหมักที่มีปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 20, 30, 60 และ 90 เปอร์เซ็นต์ มีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอ เท่ากับ 37.1, 45.2, 15.4 และ 70.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

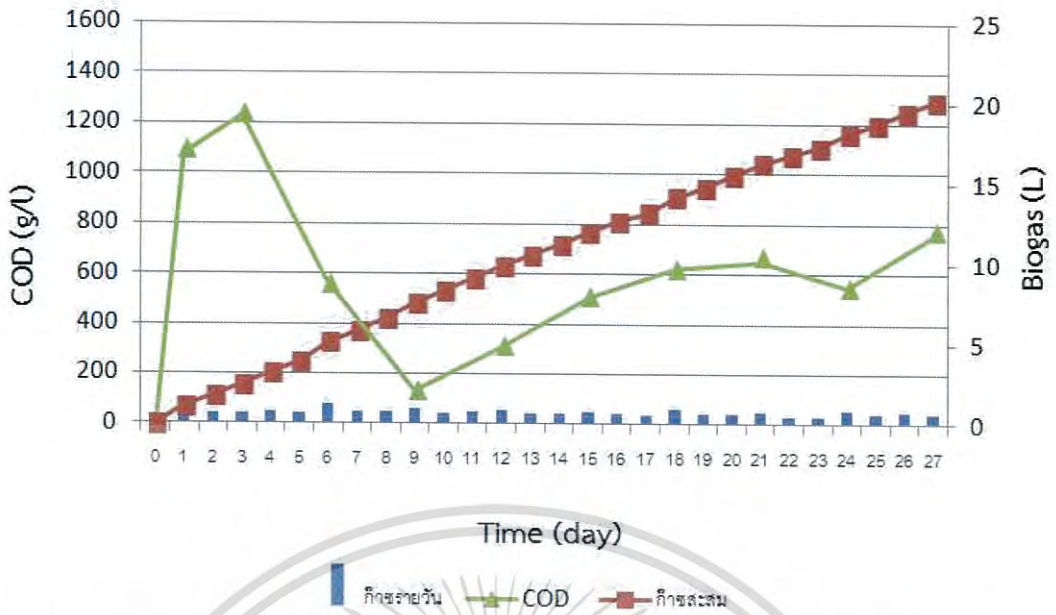


รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุมที่ 1)

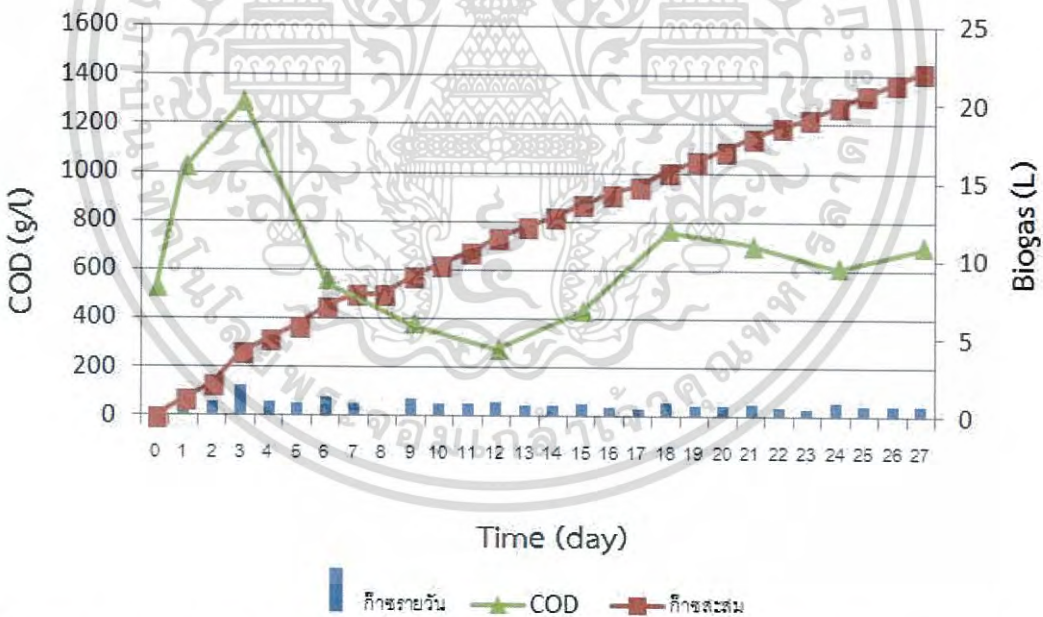


รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุมที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

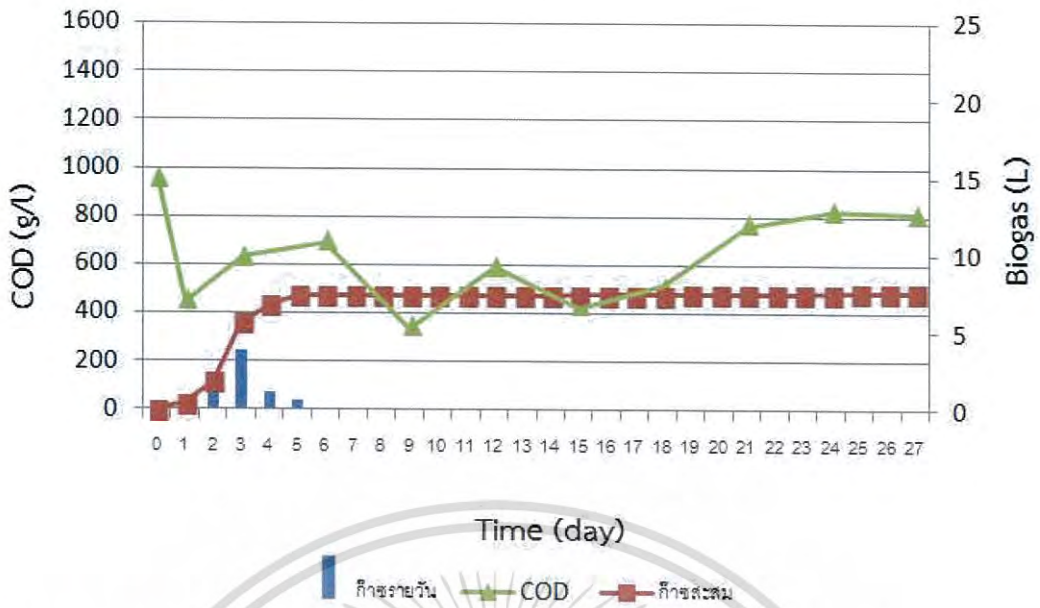


รูปที่ 4.10 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์

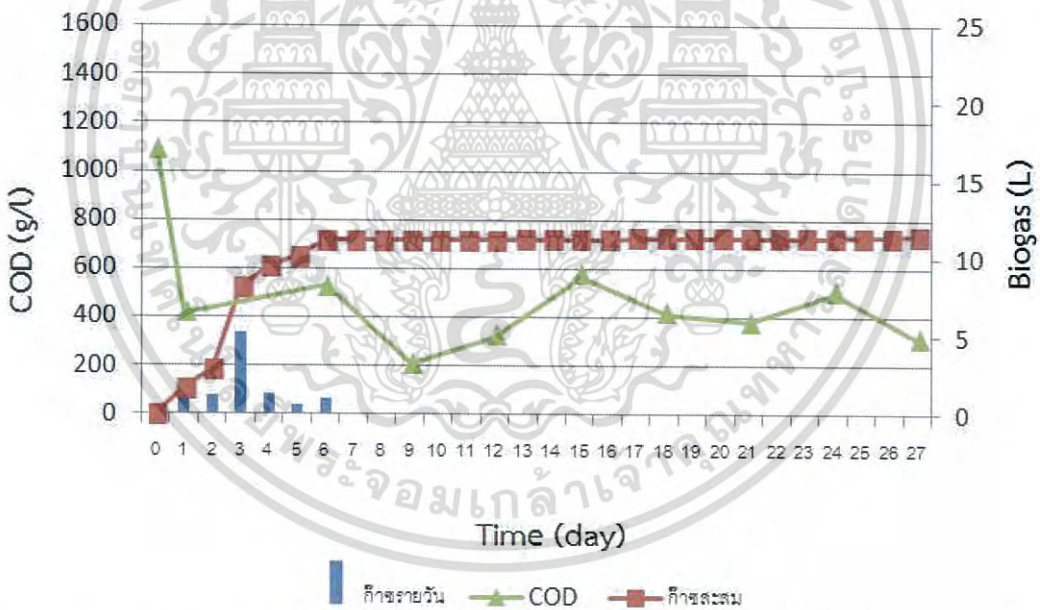


รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

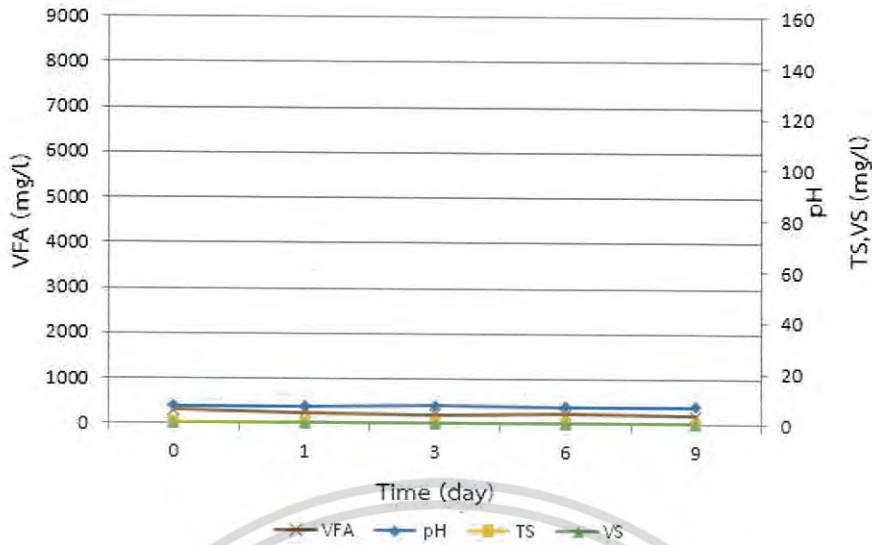
#### 4.3 ผลการศึกษาปริมาณเศษฝือกที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากผลการทดลองที่ 4.2 ปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุดคือ ปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 30 เปอร์เซ็นต์ จึงใช้ศึกษาหาปริมาณเศษฝือกที่เหมาะสมโดยทำการเลือกปริมาณเศษฝือก ดังนี้ 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ใช้ระยะเวลาในการทดลองจนกระบวนการของระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลหรือมีการผลิตก๊าซชีวภาพคงที่

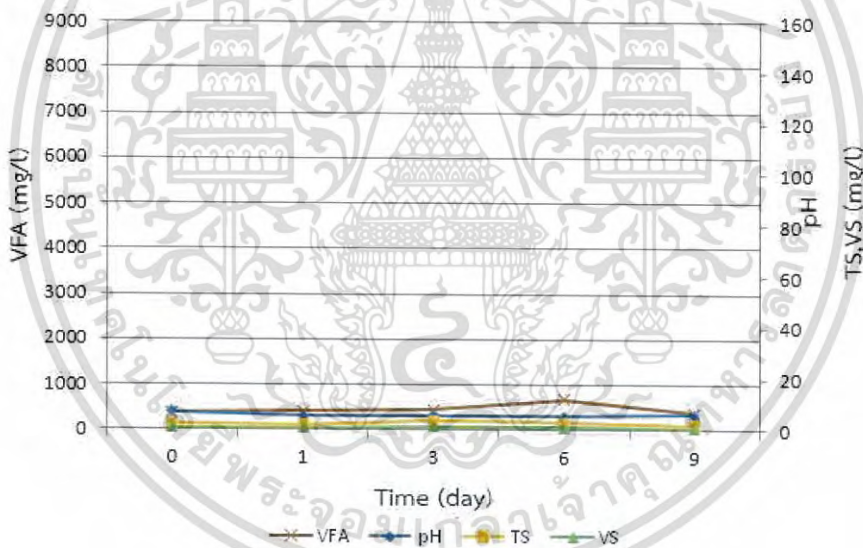
##### 4.3.1 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย และปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างดำเนินการทดลองในถังหมักตลอดระยะเวลาการทดลอง สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 6.8-6.9 ซึ่งสำหรับค่าพีเอชในชุดควบคุมการทดลองระหว่างการหมักอยู่ในช่วง 6.6-7.1 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ค่าพีเอชของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 5.5-6.1 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ค่าพีเอชของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 4.8-4.4 ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ค่าพีเอชของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 4.7-4.4 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ค่าพีเอชของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 5.0-4.3 ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ค่าพีเอชของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 5.2-4.1 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ค่าพีเอชของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 5.3-4.0 ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ค่าพีเอชของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 6.8-3.5 ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ค่าพีเอชของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 5.1-3.5 ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ ค่าพีเอชของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในช่วง 5.1-3.8 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชในแต่ละถังการทดลองมีแนวโน้มลดลง ซึ่งค่าพีเอชนับว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรีย

ปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณสารต่างๆ โดยรวมที่อยู่ในระบบซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรีย ผลการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งทั้งหมดในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ และปริมาณของแข็งระเหยในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะเป็นตัวชี้วัดการย่อยสลายของของเสียเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งถ้าค่าของแข็งระเหยในระบบสูง แสดงว่ามีความสามารถในการเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ดี ผลการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.14-4.23

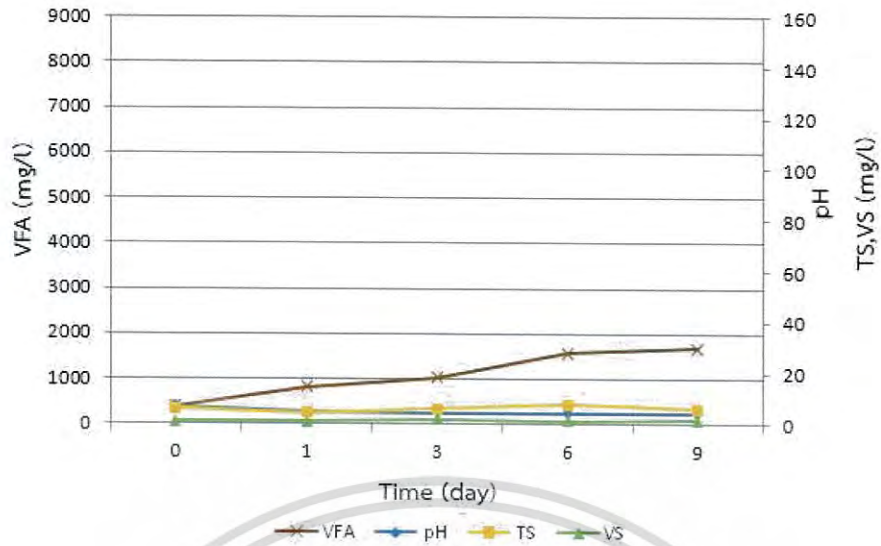


รูปที่ 4.14 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 0 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุม)

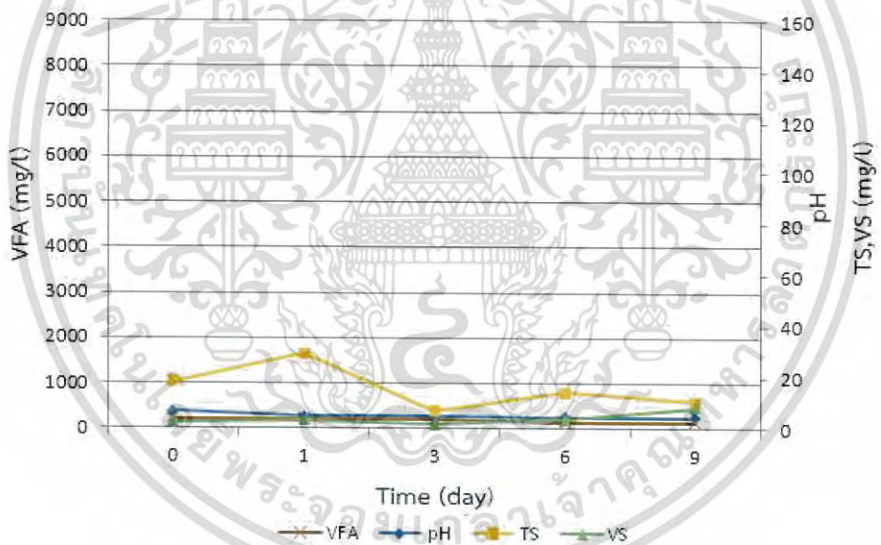


รูปที่ 4.15 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 1 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

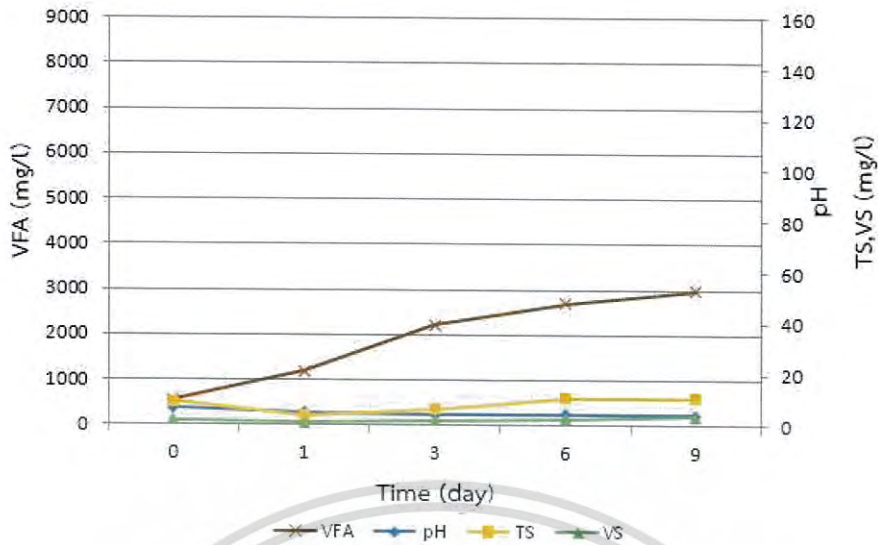


รูปที่ 4.16 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 3 เปอร์เซ็นต์

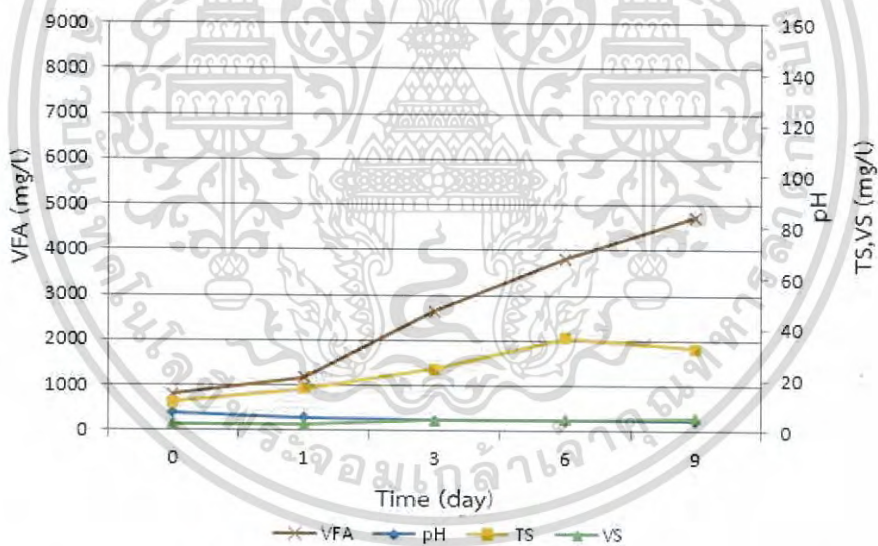


รูปที่ 4.17 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 5 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

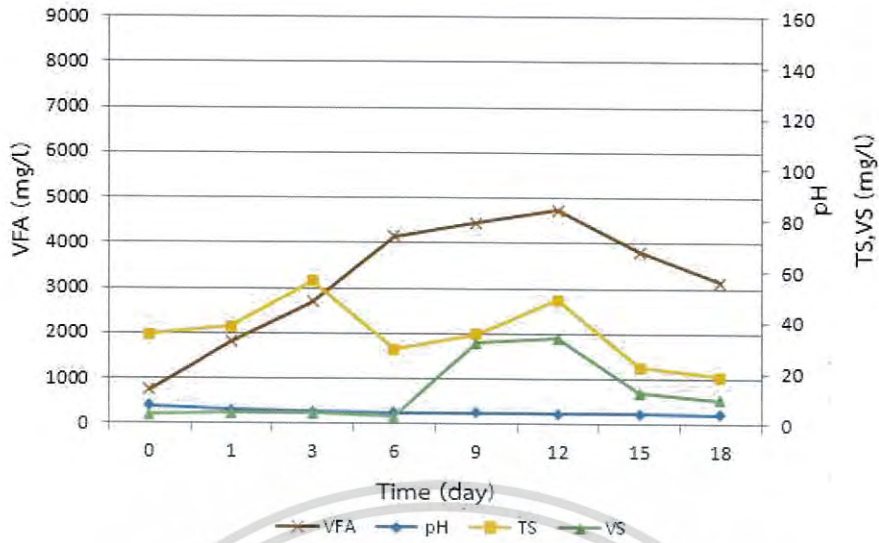


รูปที่ 4.18 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 7 เปอร์เซ็นต์

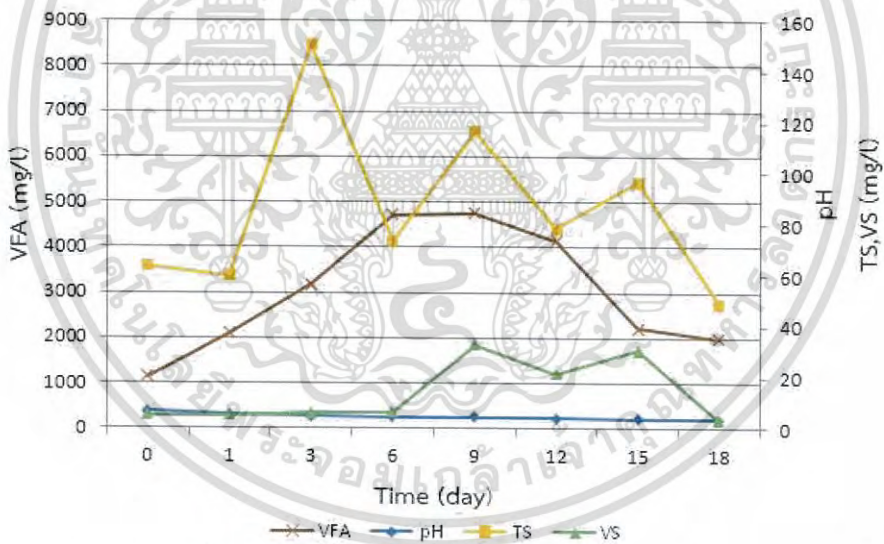


รูปที่ 4.19 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

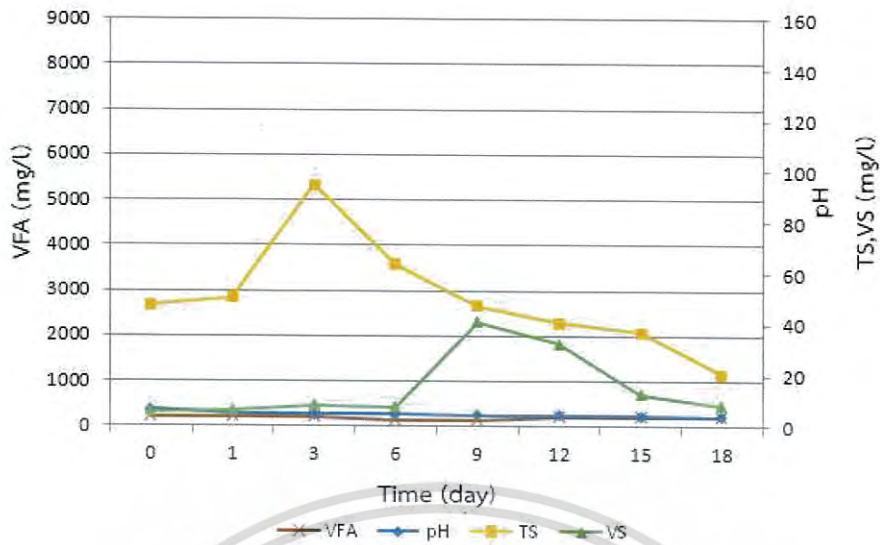


รูปที่ 4.20 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษเปลือก 15 เปอร์เซ็นต์

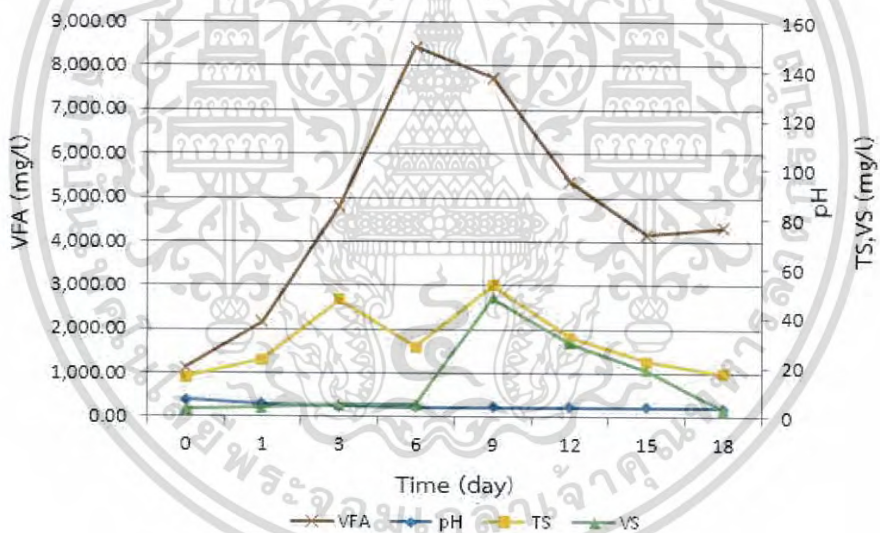


รูปที่ 4.21 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษเปลือก 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 25 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.23 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือก 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

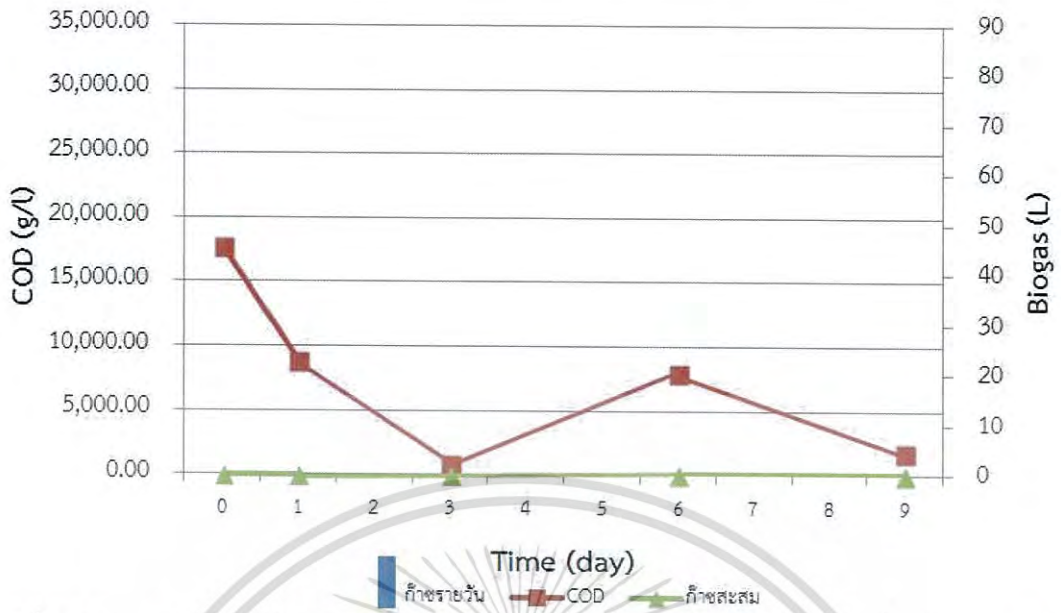
#### 4.3.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าซีไอต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอของระบบ

ค่าซีไอเป็นการหาค่าสารอินทรีย์ที่ไม่ใช่ออกซิเจนอิสระแต่อาจเป็นออกซิเจนใดๆ ที่อยู่ในสารรีบิเล็กตรอนต่างๆ ซึ่งผลการทดลองที่ 4.3 มีแนวโน้มของค่าซีไอดีคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2 เนื่องจากในแต่ละชุดการทดลองค่าซีไอมีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการหมัก ดังแสดงในรูปที่ 4.24-4.33 ซึ่งทำให้ค่าซีไอเริ่มต้นมีค่ามากกว่าซีไอในวันสุดท้ายของการทดลอง โดยที่การทดลองที่เติมปริมาณเศษเหือกที่ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองเป็นเวลา 9 วัน และการทดลองที่เติมปริมาณเศษเหือก 15, 20, 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองเป็นเวลา 18 วัน ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองต่างกันเนื่องจากการผลิตก๊าซชีวภาพมีอัตราการลดลงไม่เท่ากัน จึงทำให้ค่าซีไอสุดท้ายของแต่ละการทดลองมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการทำงานของแบคทีเรียในระบบ ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Xie และคณะ (2011) ซึ่งรายงานว่าค่าซีไอจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และลดลงเรื่อยๆ ในระหว่างระยะเวลาการหมัก

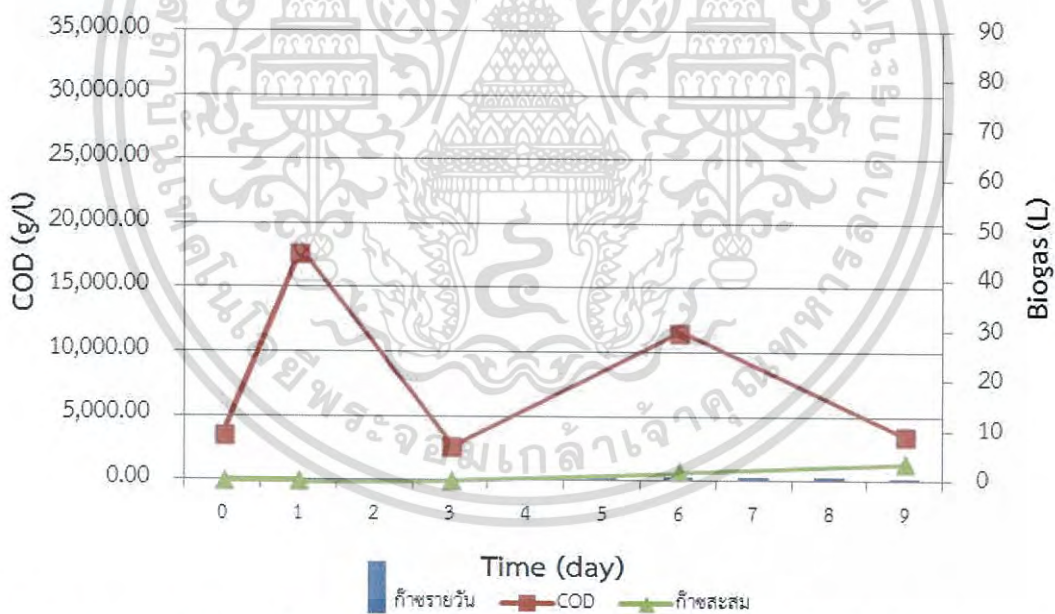
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอของระบบ

ปริมาณเศษเหือกในถังหมัก (เปอร์เซ็นต์)	ซีไอดี (กรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี (เปอร์เซ็นต์)
	ซีไอดี เริ่มต้น	ซีไอดี สุดท้าย	
0	17,777.8	1,777.8	90.0
1	3,555.6	3,555.6	80.0
3	3,555.6	3,555.6	71.4
5	10,666.7	3,555.6	66.7
7	8,888.9	10,666.7	33.3
10	7,111.1	17,777.8	40.8
15	7,111.1	1,233.3	89.9
20	24,888.9	1,137.8	85.4
25	12,444.4	5,155.6	40.0
30	12,444.4	586.7	93.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

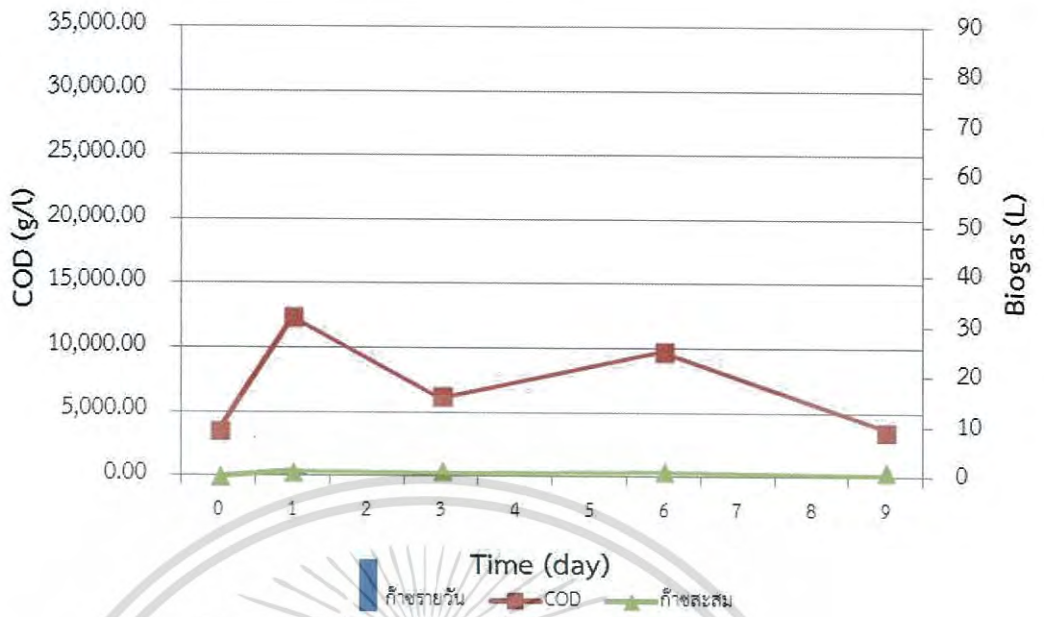


รูปที่ 4.24 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ (ชุดควบคุมการทดลองที่ 2)

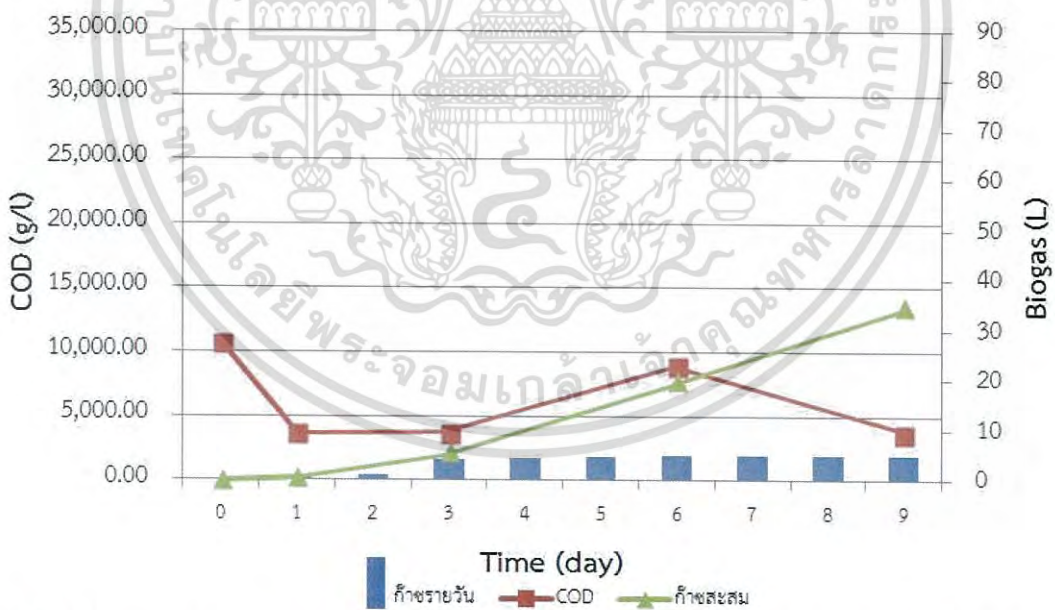


รูปที่ 4.25 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

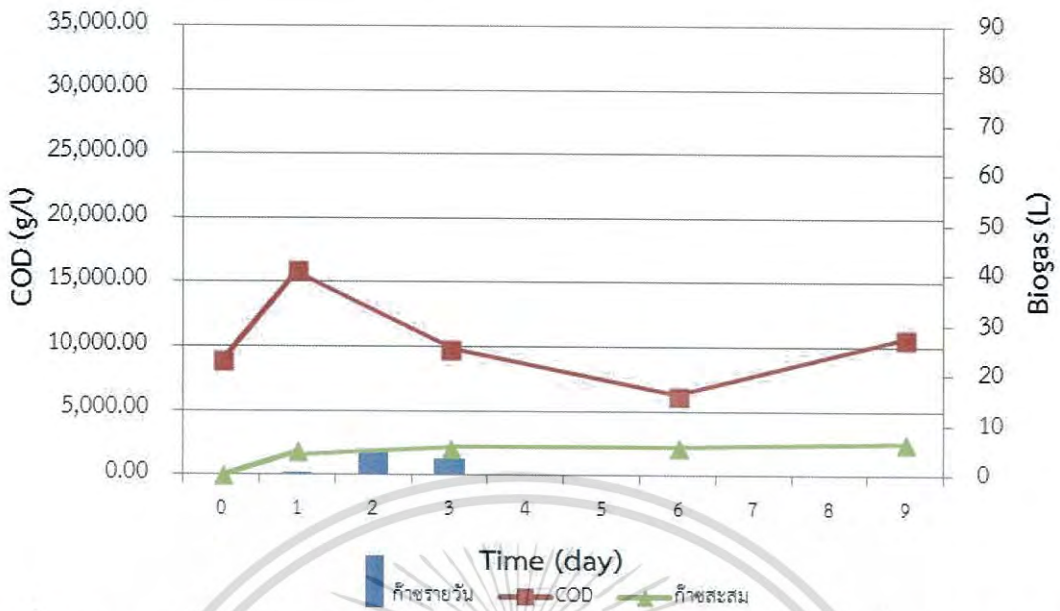


รูปที่ 4.26 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษเปลือกเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์

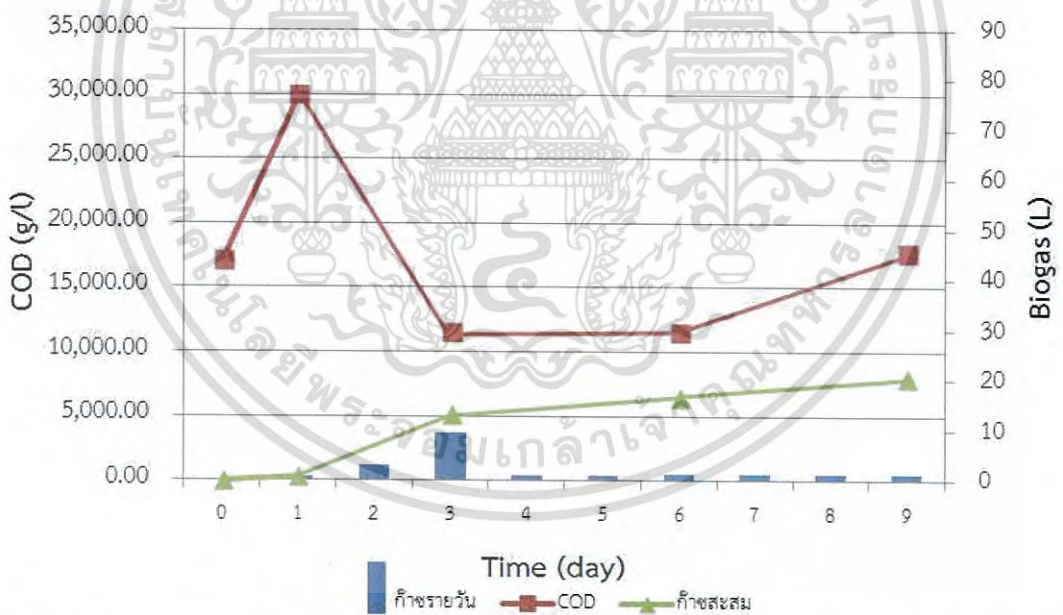


รูปที่ 4.27 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษเปลือกเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

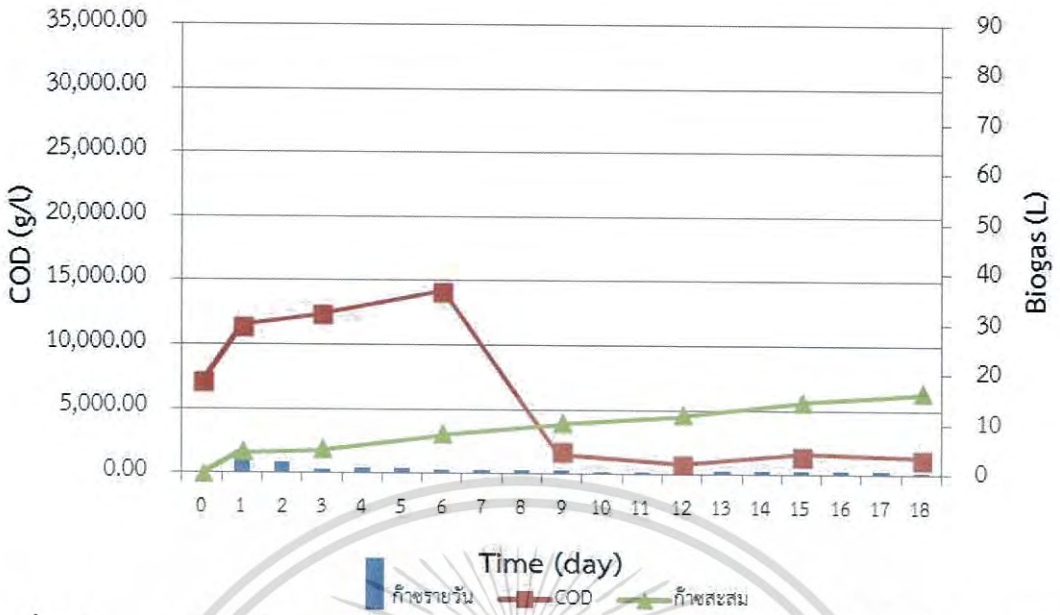


รูปที่ 4.28 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษผักเท่ากับ 7 เปอร์เซ็นต์

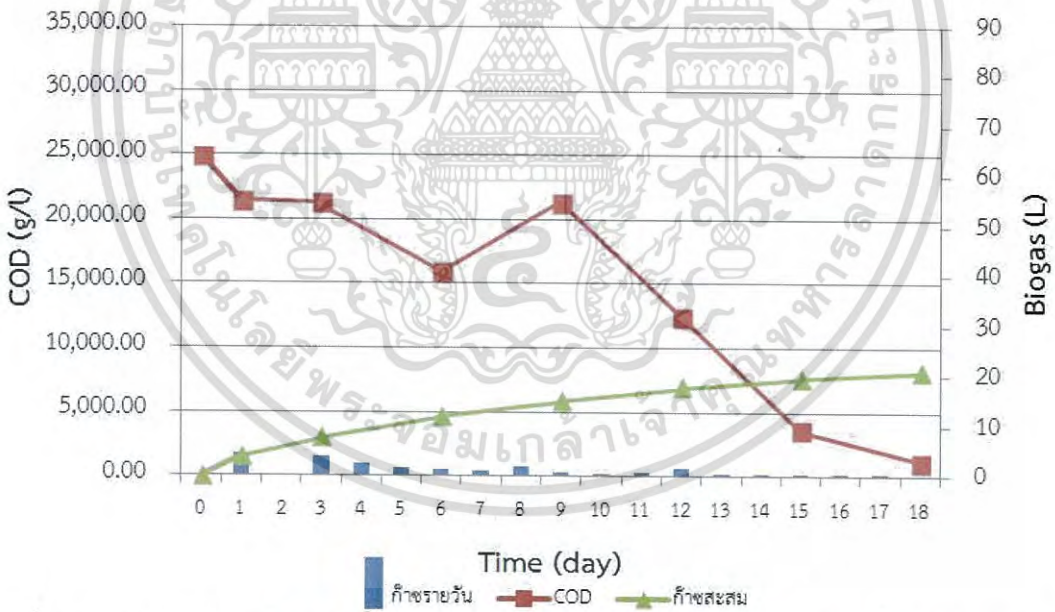


รูปที่ 4.29 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษผักเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

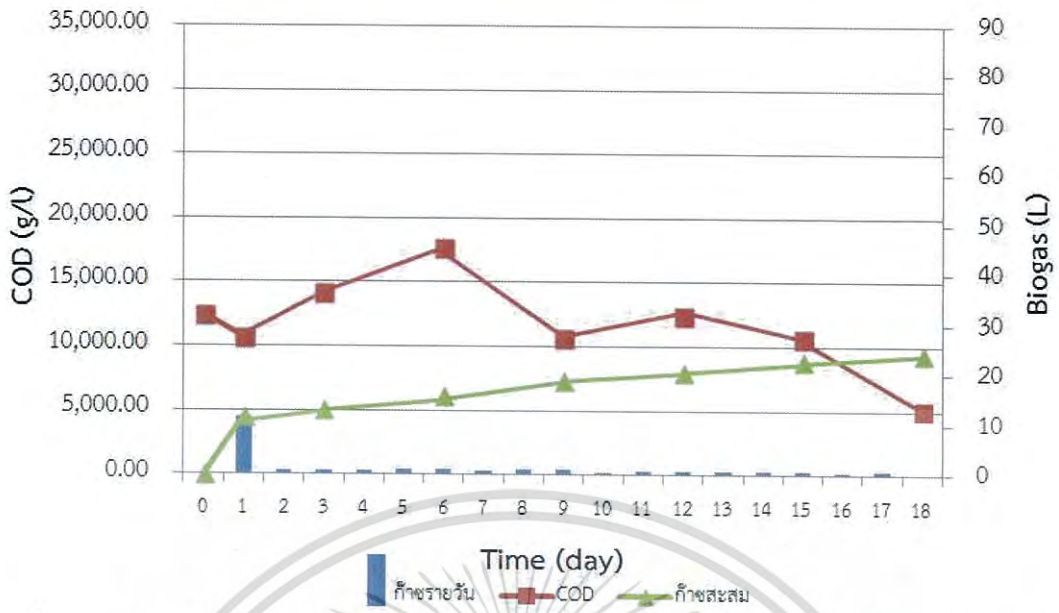


รูปที่ 4.30 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์

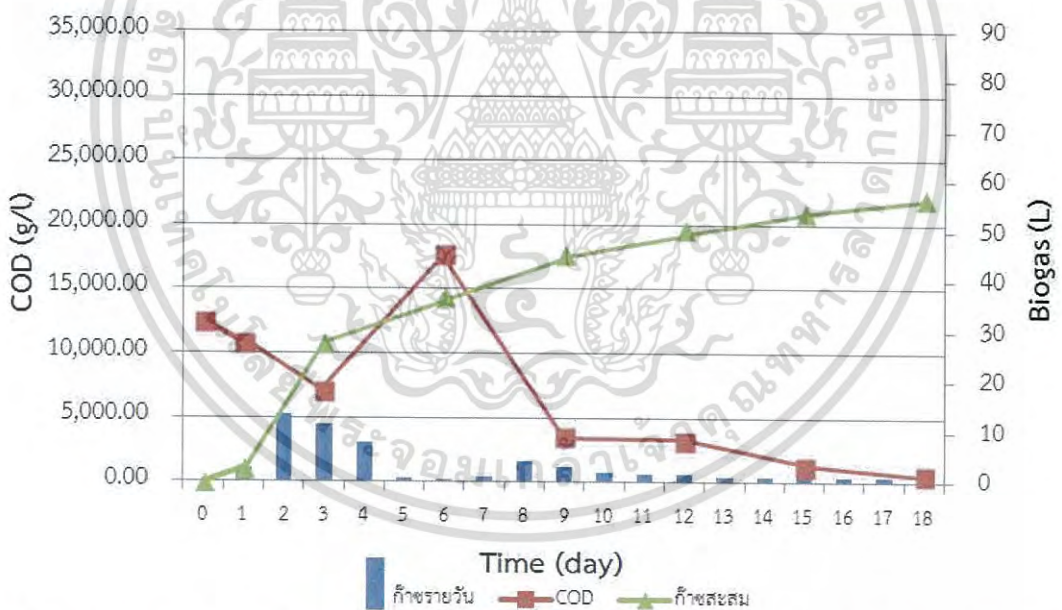


รูปที่ 4.31 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษเปลือกเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์



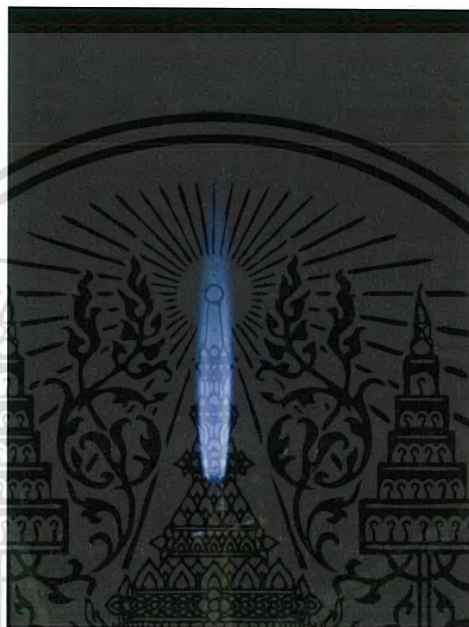
รูปที่ 4.33 แสดงปริมาณก๊าซรายวัน ปริมาณก๊าซสะสม และค่าซีโอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษเปลือกเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 การทดสอบก๊าซชีวภาพเบื้องต้นและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

### 4.4.1 ผลการศึกษาก๊าซชีวภาพเบื้องต้น

นำก๊าซที่ได้จากการหมักมาทำการทดสอบก๊าซชีวภาพเบื้องต้นโดยการจุดไฟ ปรากฏว่าจุดติดไฟ และเปลวไฟที่ได้เป็นสีน้ำเงิน ดังแสดงในรูปที่ 4.34 เปลวไฟที่ได้อยู่ในระดับ 4 เนื่องจากค่าพลังงานความร้อนแปรผันตามความถี่ของคลื่นแสง โดยสีน้ำเงินมีความยาวคลื่นสั้น ความถี่สูง จึงทำให้มีค่าพลังงานความร้อนสูงตามไปด้วย (รัชตา และคณะ, 2556) ดังแสดงในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะสีของเปลวไฟที่ได้จากการหมักก๊าซชีวภาพ ปริมาณเศษเชื้อ 30 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 30 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.35 ลำดับความร้อนจากสีของเปลวไฟ

(ที่มา : <http://cfbt-us.com/wordpress/?p=840>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลองหมักปริมาณเศษฝือก 30 เปอร์เซ็นต์ ต่อ ปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อ 30 เปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วยก๊าซมีเทน 66.7 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 24.1 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซออกซิเจน 0.8 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซอื่นๆ 8.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วงค่าที่ได้จริงตามทฤษฎี คือ ก๊าซมีเทน 55-65 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 35-45 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซออกซิเจน 0-1 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซอื่นๆ 0-30 เปอร์เซ็นต์ (ยุพา, 2552) และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกฝือก 2 ขั้นตอน โดยฐิติวรรณและคณะ (2557) จะพบว่ามีความเฉลี่ยขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกัน คือ ก๊าซมีเทน 57.6 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 15.6 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซออกซิเจน 3.8 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซอื่นๆ 23.0 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมในระดับห้องปฏิบัติการ จากการศึกษาเปรียบเทียบความเข้มข้นหัวเชื้อที่เหมาะสมภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 27 วัน พบว่าปริมาณความเข้มข้นของหัวเชื้อที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสูงสุด ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของ หัวเชื้อที่ 30 เปอร์เซ็นต์ต่อเศษฝือก 200 กรัม มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 22.2 ลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดีเป็นร้อยละ 45.2 และมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างในระหว่างการย่อยสลายเป็น 4.3-6.8

ปริมาณเศษฝือกที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาณหัวเชื้อ 1.8 ลิตร ในถังหมัก ขนาด 8 ลิตร ใช้ปริมาตรหมัก 6 ลิตร เป็นระยะเวลา 9 วัน คือ ปริมาณเศษฝือก 30 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด เท่ากับ 45.5 ลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเป็นร้อยละ 93.0 ซึ่งมีแนวโน้มการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้น

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากสรุปผลการทดลองการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษฝือกเหลือทิ้งของโรงงานผลิตขนมปังภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ดังนี้

1. ศึกษาสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพ เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น
2. ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษฝือกแบบ 2 ขั้นตอน
3. ศึกษาการเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมจากเศษฝือก เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน

## เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. 2539. รายงานสรุปสำหรับผู้บริหารการศึกษาความเหมาะสมการผลิตก๊าซมีเทนจากขยะชุมชนเพื่อเป็นเชื้อเพลิงพลังงาน. กรุงเทพฯ : ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม.
- กลุ่มงานเคมีสำนักวิจัยและพัฒนา. 2550. คู่มือการปฏิบัติงานการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. กรุงเทพฯ : สำนักวิจัยและพัฒนากรมชลประทาน.
- จำนง อ่างมาศ. 2550. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่องการผลิตน้ำมันสังเคราะห์และก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ชิตชนก คงแดง. 2554. “การผลิตก๊าซชีวภาพจากบิogasโดยหมักร่วมกับมูลสุกรสำหรับใช้ในครัวเรือน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- รัฐดิวรรณ กันเมียน, ญัฐพร ชัยธีระสุเวท, ญัฐวดี ศรีคำดี และพิชามญช์ โรจนกุลสุวรรณ. 2557. “การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกเผือกโดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 2 ชั้นตอน.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์และวิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธศักดิ์. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นคร ทิพย์าวงศ์. 2553. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- พาริตา พรหมมา, คุณณี ธนะบริพัฒน์และปราโมทย์ ศิริโรจน์. 2557. “การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์.” วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 23(3) : 31-50.
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2553. เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซชีวภาพ. กรุงเทพฯ : มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม.
- ยุพา ต้นทวี. 2552. การควบคุมมลพิษทางน้ำ. กรุงเทพฯ : โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รัชดา น้อยท้วม, วาสุกรี จันทร์แจ่มและศุจินทรา แฉ่งสูงเนิน. 2556. “การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วรวิทย์ จุฬาลักษณ์านุกุล. 2558. เชื้อเพลิงชีวภาพด้วยตัวเร่งชีวภาพ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

สารโรจน์ บุญยกิจสมบัติ. 2552. พลังงานทดแทนก๊าซชีวภาพ (Biogas) ผลิตกันอย่างไร.

[Online]. Available : <http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue8/articles/article1.html>

สุนทร บุญญาธิการ. 2545. พลังงานไกล้ตัว. กรุงเทพมหานคร : เฟิสท์ออฟเซท.

สุพินดา จุระเจน. 2544. “การเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักเศษผักและผลไม้ไร้อากาศแบบ  
แห้งที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยี  
สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อภิชัย อารยะเจริญชัย. 2552. เฟือก. [Online]. Available :

<http://www.sc.mahidol.ac.th/wiki/doku.php>.

Anunputtikul, W. and Rodtong, S. 2004. “Laboratory scale experiments for biogas  
production from cassava tuber.” 238-243. the Joint International  
Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE)” December  
1-3, 2004, Hua Hin, Thailand.

A.O.A.C. 2000. Official Methods of Analysis of the Association of Official  
Analytical Chemist. 11<sup>st</sup> ed. Washington, D.C. : The Association of Official  
Analytical Chemist.

Arnold, E.G. 1992. Standard Methods for the examination of water and  
wastewater. 18<sup>th</sup>. New York : American Public Health Association.

Bharti, A. and Kumar, S. 2012. Management of Organic Waste. Rijeka : InTech.

Cheng, J.J. 2009. Biomass to Renewable Energy Processes. The United States of  
America : Taylor and Francis Group.

Cho, J.J., Yamakawa, R.A. and Hollyer, J. 2007. “Hawaiian Kalo, Past and Future.”  
Sustainable Agriculture, University of Hawaii, Hawaii.

Hartin, E. 2009. Flames. [Online]. Available : <http://cfbt-us.com/wordpress/?p=840>.

Nagdeve, M. 2016. Health benefits of taro root. [Online]. Available :

<https://www.organicfacts.net/health-benefits/other/taro-root.html>.

Muzenda, E. 2014. Bio-methane generation from organic waste: A review. [Online].

Available : [http://www.iaeng.org/publication/WCECS2014/WCECS2014\\_pp647-652.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCECS2014/WCECS2014_pp647-652.pdf)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Ramirez-Saenz, D., Zarate-Segura, P.B., Guerrero-Barajas, C. and Garcia-Pena, E.I. 2009. "H<sub>2</sub>S Volatile fatty acids elimination by biofiltration: clean-up process for biogas potential use." *Journal of Hazardous Materials*. 163 : 1272-1281.
- Schober, G., J. Schafer, U.Schimid-Staiger and W.Trosch. 1999. "One and two-stage digestion of solid organic waste." *Water Research*. 33(3) : 854-860.
- Sirirote, P., Thanaboripat, D., Klinkroon, N. and Tripak, S. 2010. "The production of biogas from cassava tubers." *KMITL Science and Technology Journal*. 10(1) : 30-36.
- Xie, S., Lawlor, P.G., Frost, J.P., Hu, Z. and Zhan, X., 2011. "Effect of pig manure to grass silage ration on methane production in batch anaerobic, co-digestion of concentrated pig manure and grass silage." *Bioresource Technology*. 102 : 5728-5733.
- Zeikus, J. G. 1977. "The biology of methanogenic bacteria." *Bacteriological Reviews*. 41(2) : 514-541.
- Zhu, J. Wan, C. and Li, Y. 2010. "Enhanced solidstate anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment." *Bioresource Technology*. 101 : 7523-7528.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## ข้อมูลดิบ

1. การทดลองที่ 4.2 การศึกษาหัวเชื้อที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือก  
ตารางที่ ก-1 ปริมาณก๊าซรายวัน (ลิตร) ของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อระดับต่างๆ

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน (ลิตร)					
	0 เปอร์เซ็นต์ (ถึงควบคุม 1)	20 เปอร์เซ็นต์	30 เปอร์เซ็นต์	60 เปอร์เซ็นต์	90 เปอร์เซ็นต์	100 เปอร์เซ็นต์ (ถึงควบคุม 2)
0	0	0	0	0	0	0
1	0	1.12	1.12	0.41	1.67	1.20
2	0	0.65	0.96	1.40	1.28	0.95
3	0	0.68	1.99	3.86	5.23	0
4	0	0.74	0.91	1.11	1.35	0
5	0	0.71	0.82	0.63	0.64	0
6	0	1.20	1.27	0.03	1.03	0
7	0.76	0.76	0.79	0	0.04	0
8	0.78	0.76	0	0	0	0
9	0.66	0.98	1.09	0	0	0
10	0.42	0.71	0.80	0	0	0
11	0.03	0.76	0.79	0	0	0
12	0	0.84	0.93	0	0	0
13	0	0.65	0.69	0	0.04	0
14	0	0.65	0.68	0	0	0
15	0.01	0.80	0.81	0.03	0	0
16	0	0.66	0.65	0	0	0
17	0.03	0.53	0.52	0.03	0.08	0.02
18	0	0.96	0.95	0	0.01	0
19	0	0.67	0.67	0.03	0	0
20	0	0.69	0.67	0.02	0	0.06
21	0	0.76	0.84	0.02	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ปริมาณก๊าซรายวัน (ลิตร) ของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อระดับต่างๆ

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน (ลิตร)					
	0 เปอร์เซ็นต์ (ถึงควบคุม 1)	20 เปอร์เซ็นต์	30 เปอร์เซ็นต์	60 เปอร์เซ็นต์	90 เปอร์เซ็นต์	100 เปอร์เซ็นต์ (ถึงควบคุม 2)
21	0	0.76	0.84	0.02	0	0
22	0	0.52	0.66	0	0	0
23	0	0.49	0.49	0	0	0
24	0	0.84	0.88	0.03	0	0
25	0	0.65	0.69	0.03	0.04	0
26	0	0.72	0.74	0	0.03	0
27	0.04	0.68	0.74	0.05	0.06	0

ตารางที่ ก-2 ค่าพีเอชของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อระดับต่างๆ

วันที่	ค่าพีเอช					
	ถึงควบคุม 1 0 เปอร์เซ็นต์	20 เปอร์เซ็นต์	30 เปอร์เซ็นต์	60 เปอร์เซ็นต์	90 เปอร์เซ็นต์	ถึงควบคุม 2 100 เปอร์เซ็นต์
0	6.80	6.82	6.84	6.83	6.80	6.88
1	5.21	5.72	6.33	6.58	6.96	7.02
3	5.13	5.26	5.25	5.61	6.45	7.09
6	4.52	4.45	4.67	5.08	6.20	7.17
9	4.17	4.12	4.37	4.80	6.08	7.05
12	4.18	4.09	4.34	4.75	6.21	7.05
15	4.18	4.14	4.33	4.78	6.48	7.07
18	4.30	4.23	4.43	4.85	6.70	7.07
21	4.31	4.24	4.47	4.91	3.96	7.14
24	4.29	4.29	4.53	4.96	7.03	7.20
27	4.41	4.44	4.62	4.98	6.98	7.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายของถั่วงอกที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อระดับต่างๆ

วันที่	ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	0 เปอร์เซ็นต์ (ถึงควบคุม 1)	20 เปอร์เซ็นต์	30 เปอร์เซ็นต์	60 เปอร์เซ็นต์	90 เปอร์เซ็นต์	100 เปอร์เซ็นต์ (ถึงควบคุม 2)
0	60.00	80.00	100.00	220.00	210.00	310.00
1	73.33	123.33	166.67	213.33	383.33	103.33
3	150.00	180.00	330.00	406.67	573.33	356.67
6	760.00	623.33	856.67	1,146.67	900.00	703.33
9	733.33	822.22	1,172.22	844.44	1,888.89	833.33
12	1,288.89	1,038.89	1,350.00	1,461.11	1,305.56	655.56
15	1,555.56	1,166.67	1,333.33	1,316.67	1,200.00	727.78
18	1,626.67	1,240.00	1,773.33	1,556.67	1,120.00	856.67
21	2,029.17	1,537.50	1,925.00	2,216.67	1,512.50	1,308.33
24	1,870.00	1,716.67	2,060.00	1,930.00	1,153.33	1,180.00
27	2,176.67	1,523.33	2,290.00	1,970.00	1,176.67	980.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) และของแข็งระเหย (Volatile solids, VS) ของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อระดับต่างๆ

วันที่	ความเข้มข้นหัวเชื้อ (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณของแข็งระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	ถังควบคุม 1 (0)	5.00	2.87
	20	3.12	1.33
	30	2.02	0.76
	60	3.62	1.93
	90	4.82	1.23
	ถังควบคุม 2 (100)	2.35	1.19
1	ถังควบคุม 1 (0)	4.09	2.70
	20	3.18	0.87
	30	2.47	0.93
	60	4.10	1.04
	90	4.21	1.16
	ถังควบคุม 2 (100)	1.53	0.95
3	ถังควบคุม 1 (0)	2.57	0.57
	20	3.76	0.81
	30	1.80	0.93
	60	3.89	0.91
	90	5.05	2.21
	ถังควบคุม 2 (100)	1.61	0.98
6	ถังควบคุม 1 (0)	1.95	0.48
	20	1.52	0.52
	30	1.12	0.75
	60	2.84	0.79
	90	1.90	1.29
	ถังควบคุม 2 (100)	2.00	1.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) และของแข็งระเหย (Volatile solids, VS) ของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อระดับต่างๆ

วันที่	ความเข้มข้นหัวเชื้อ (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณของแข็งระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
9	ถังควบคุม 1 (0)	1.94	0.77
	20	1.43	0.63
	30	1.58	0.70
	60	2.58	1.27
	90	1.94	1.10
	ถังควบคุม 2 (100)	2.17	1.04
12	ถังควบคุม 1 (0)	1.97	0.79
	20	1.42	0.74
	30	1.66	0.83
	60	2.76	1.46
	90	2.27	0.97
	ถังควบคุม 2 (100)	2.26	1.69
15	ถังควบคุม 1 (0)	1.48	0.66
	20	1.29	0.74
	30	1.26	0.65
	60	2.44	1.14
	90	2.19	0.70
	ถังควบคุม 2 (100)	2.52	1.05
18	ถังควบคุม 1 (0)	1.37	0.68
	20	1.39	0.61
	30	1.42	0.89
	60	2.23	1.28
	90	2.23	1.22
	ถังควบคุม 2 (100)	2.34	1.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) และของแข็งระเหย (Volatile solids, VS) ของถึงหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อระดับต่างๆ

วันที่	ความเข้มข้นหัวเชื้อ (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณของแข็งระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
21	ถึงควบคุม 1 (0)	1.31	0.43
	20	1.49	0.59
	30	1.45	0.64
	60	2.19	1.14
	90	1.72	0.87
	ถึงควบคุม 2 (100)	2.43	1.05
24	ถึงควบคุม 1 (0)	1.76	1.50
	20	1.45	0.50
	30	1.57	0.71
	60	2.35	1.02
	90	1.63	0.93
	ถึงควบคุม 2 (100)	2.70	1.15
27	ถึงควบคุม 1 (0)	1.45	0.63
	20	1.24	0.50
	30	1.35	0.55
	60	2.16	1.04
	90	1.30	0.85
	ถึงควบคุม 2 (100)	2.91	1.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 ค่าซีไอทีของถังหมักที่มีความเข้มข้นของหัวเชื้อระดับต่างๆ

วันที่	ค่าซีไอที (กรัมต่อลิตร)					
	0 เปอร์เซ็นต์ (ถังควบคุม 1)	20 เปอร์เซ็นต์	30 เปอร์เซ็นต์	60 เปอร์เซ็นต์	90 เปอร์เซ็นต์	100 เปอร์เซ็นต์ (ถังควบคุม 2)
0	497.78	426.67	533.33	966.60	1,097.78	213.33
1	1,493.33	1,102.22	1,031.11	462.22	426.67	71.11
3	817.78	1,244.44	1,297.78	640.00	533.33	284.44
6	746.67	568.89	568.89	711.11	533.33	320.00
9	426.67	142.22	391.11	355.56	213.33	284.44
12	746.67	320.00	284.44	604.44	337.78	302.22
15	1,120.00	515.56	444.44	444.44	586.67	977.78
18	1,226.67	628.89	775.56	513.33	425.56	635.56
21	1,244.44	675.56	711.11	782.22	391.11	746.67
24	942.22	551.11	622.22	835.56	515.56	764.44
27	1,137.78	782.22	711.11	817.78	320.00	391.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดลองที่ 4.3 ผลการศึกษาปริมาณเศษเนื้อที่ที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ ก-6 ปริมาณก๊าซรายวัน (ลิตร) ของถังหมักที่มีปริมาณเศษเนื้อที่ระดับต่างๆ

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน (ลิตร)									
	ถังควบคุม	1 เปอร์เซ็นต์	3 เปอร์เซ็นต์	5 เปอร์เซ็นต์	7 เปอร์เซ็นต์	10 เปอร์เซ็นต์	15 เปอร์เซ็นต์	20 เปอร์เซ็นต์	25 เปอร์เซ็นต์	30 เปอร์เซ็นต์
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0.97	0.53	4.83	0.73	4.48	4.00	11.59	2.77
2	0	0	0.11	1.00	0.63	2.91	2.15	2.42	0.76	13.52
3	0	0.01	0.12	4.29	0.08	9.51	0.70	1.67	0.82	11.48
4	0	0.25	0.05	4.50	0.02	1.09	1.02	1.21	0.78	7.91
5	0.04	0.72	0	4.77	0.08	1.19	1.09	1.14	0.95	0.90
6	0.05	0.88	0.02	4.95	0.18	1.25	0.84	1.87	1.11	0.41
7	0.03	0.84	0	4.98	0.04	1.26	0.68	1.12	0.86	1.07
8	0.12	0.72	0.02	5.04	0.41	1.26	0.78	0.93	1.05	4.25
9	0.07	0.41	0.04	5.12	0.40	1.26	0.75	0.87	1.01	3.14
10							0.58	0.62	0.53	1.81
11							0.54	0.84	0.68	1.72
12							0.72	1.54	0.69	1.56
13							0.75	0.60	0.70	1.16
14							0.87	0.45	0.79	1.03

ตารางที่ ก-6 (ต่อ) ปริมาณก๊าซรายวัน (ลิตร) ของถังหมักที่มีปริมาณเศษเปลือกที่ระดับต่างๆ

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน (ลิตร)									
	ถังควบคุม	1 เปอร์เซ็นต์	3 เปอร์เซ็นต์	5 เปอร์เซ็นต์	7 เปอร์เซ็นต์	10 เปอร์เซ็นต์	15 เปอร์เซ็นต์	20 เปอร์เซ็นต์	25 เปอร์เซ็นต์	30 เปอร์เซ็นต์
15							0.87	0.46	0.66	1.25
16							0.80	0.55	0.55	1.00
17							0.70	0.44	0.70	0.97
18							0.60	0.33	0.29	1.06



ตารางที่ ก-7 ค่าพีเอชของถังหมักที่มีปริมาณเศษเปลือกที่ระดับต่างๆ

วันที่	ค่าพีเอช									
	ถังควบคุม	1 เปอร์เซ็นต์	3 เปอร์เซ็นต์	5 เปอร์เซ็นต์	7 เปอร์เซ็นต์	10 เปอร์เซ็นต์	15 เปอร์เซ็นต์	20 เปอร์เซ็นต์	25 เปอร์เซ็นต์	30 เปอร์เซ็นต์
0	6.85	6.84	6.85	6.80	6.80	6.89	6.83	6.82	6.80	6.85
1	7.11	5.45	4.79	4.68	4.95	5.21	5.30	5.30	5.07	5.11
3	7.16	5.63	4.49	4.64	4.29	4.22	4.76	4.79	4.90	4.18
6	6.93	5.51	4.33	4.43	4.31	4.12	4.50	4.54	4.69	4.12
9	6.99	6.06	4.37	4.43	4.27	4.11	4.44	4.43	4.61	3.99
12							4.26	4.12	4.44	3.93
15							4.10	3.80	4.18	3.86
18							3.97	3.52	3.74	3.76

ตารางที่ ก-8 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายของถั่มักที่มีปริมาณเศษเปลือกที่ระดับต่างๆ

วันที่	ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)									
	ถึงควบคุม	1	3	5	7	10	15	20	25	30
	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์
0	312.50	375.00	395.83	212.50	550.00	804.17	745.83	1,137.50	212.50	1,112.50
1	250.00	416.67	820.83	208.33	1,195.83	1,179.17	1,816.67	2,095.83	208.33	2,158.33
3	220.83	454.17	1,033.33	216.67	2,216.67	2,633.33	2,700.00	3,170.83	216.67	4,816.67
6	237.50	679.17	1,570.83	145.83	2,695.83	3,804.17	4,145.83	4,716.67	145.83	8,420.83
9	204.17	375.00	1,683.33	150.00	2,979.17	4,737.50	4,445.83	4,745.83	150.00	7,737.50
12							4,737.50	4,145.83	208.33	5,358.33
15							3,804.17	2,216.67	216.67	4,145.83
18							3,137.78	1,985.83	212.50	4,320.33

ตารางที่ ก-9 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) และของแข็งระเหย (Volatile solids, VS) ของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกที่ระดับต่างๆ

วันที่	ความเข้มข้นฝือก (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณของแข็งระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	ถังควบคุม	0.75	0.16
	1	2.38	0.55
	3	6.15	1.12
	5	18.31	2.43
	7	9.27	1.84
	10	11.07	2.65
1	ถังควบคุม	0.77	0.35
	1	2.07	0.70
	3	4.59	1.04
	5	29.27	3.26
	7	3.86	1.07
	10	16.30	2.61
3	ถังควบคุม	0.75	0.35
	1	3.60	1.47
	3	5.92	1.87
	5	7.07	1.49
	7	6.45	1.85
	10	24.19	4.24
6	ถังควบคุม	0.54	0.34
	1	2.91	0.97
	3	7.87	1.22
	5	14.22	3.60
	7	10.69	2.51
	10	36.43	4.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-9 (ต่อ) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) และของแข็งระเหย (Volatile solids, VS) ของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกที่ระดับต่างๆ

วันที่	ความเข้มข้นฝือก (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณของแข็งระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
9	ถังควบคุม	0.32	0.22
	1	1.79	0.68
	3	5.90	1.59
	5	10.50	8.31
	7	10.66	3.39
	10	32.38	5.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

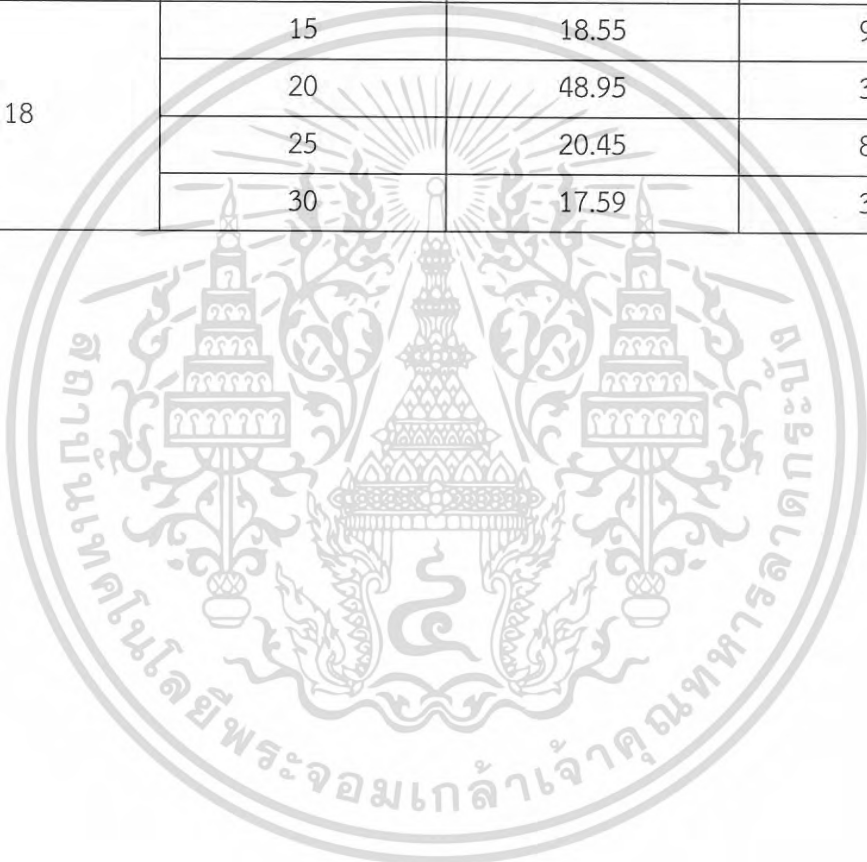
ตารางที่ ก-9 (ต่อ) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) และของแข็งระเหย (Volatile solids, VS) ของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกที่ระดับต่างๆ

วันที่	ความเข้มข้นฝือก (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณของแข็ง ระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
0	15	34.89	3.55
	20	63.64	5.20
	25	47.51	5.72
	30	15.89	3.05
1	15	38.01	4.08
	20	59.77	5.06
	25	50.26	6.35
	30	23.09	3.70
3	15	55.92	4.29
	20	150.60	5.95
	25	94.71	8.10
	30	47.61	5.01
6	15	29.35	2.76
	20	73.51	6.36
	25	63.76	7.64
	30	28.43	5.05
9	15	35.24	31.71
	20	116.43	32.83
	25	47.36	41.03
	30	53.34	48.21
12	15	48.68	33.64
	20	78.38	21.39
	25	40.58	32.48
	30	32.33	30.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-9 (ต่อ) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) และของแข็งระเหย (Volatile solids, VS) ของถังหมักที่มีปริมาณเศษฝือกที่ระดับต่างๆ

วันที่	ความเข้มข้นฝือก (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณของแข็งระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
15	15	22.44	12.37
	20	96.75	30.57
	25	36.88	12.79
	30	22.39	18.96
18	15	18.55	9.59
	20	48.95	3.14
	25	20.45	8.23
	30	17.59	3.03



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-10 ค่าซีไอดีของถังหมักที่มีปริมาณเศษเปลือกที่ระดับต่างๆ

วันที่	ค่าซีไอดี (กรัมต่อลิตร)									
	ถังควบคุม	1 เปอร์เซ็นต์	3 เปอร์เซ็นต์	5 เปอร์เซ็นต์	7 เปอร์เซ็นต์	10 เปอร์เซ็นต์	15 เปอร์เซ็นต์	20 เปอร์เซ็นต์	25 เปอร์เซ็นต์	30 เปอร์เซ็นต์
0	17,777.78	3,555.56	3,555.56	10,666.67	8,888.89	7,111.11	7,111.11	24,888.89	12,444.44	12,444.44
1	8,888.89	17,777.78	12,444.44	3,555.56	16,000.00	30,022.22	11,444.44	21,444.44	10,666.67	10,777.78
3	888.89	2,666.67	6,222.22	3,555.56	9,777.78	11,555.56	12,444.44	21,333.33	14,222.22	7,111.11
6	8,000.00	11,555.56	9,777.78	8,888.89	6,222.22	11,555.56	14,222.22	16,000.00	17,777.78	17,777.78
9	1,777.78	3,555.56	3,555.56	3,555.56	10,666.67	17,777.78	1,777.78	21,333.33	10,666.67	3,555.56
12							833.22	12,444.44	12,444.44	3,235.56
15							1,444.44	3,626.67	10,666.67	1,244.44
18										

## ภาคผนวก ข.

### วิธีวิเคราะห์

#### 1. การวิเคราะห์ความเป็นกรดเป็นด่าง (AOAC, 2000)

นำตัวอย่างน้ำจากถังหมักมาวัดด้วยเครื่องวัดความเป็นกรดเป็นด่างโดยตรง

#### 2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids) โดยวิธีของ Arnold (Arnold, 1992)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยระเหย (evaporating dishes) ซึ่งมีความจุตั้งแต่ 10-100 มิลลิลิตร อาจจะเป็นถ้วยกระเบื้อง (porcelain) หรือถ้วย (platinum) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวอย่าง และชนิดของตัวอย่าง
2. เครื่องอ่างน้ำ (water bath) หรือตู้อบ (oven) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
3. ตู้อบ (oven) อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส
4. เครื่องชั่งละเอียด (สามารถชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4

##### วิธีวิเคราะห์

1. นำถ้วยระเหยไปอบในเตาอบจนมีน้ำหนักคงที่ (ใช้อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง) จากนั้นนำมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งหาน้ำหนักของถ้วยระเหยแต่ละใบ
2. เติมปริมาตรน้ำตัวอย่างที่เหมาะสม (50-100 มิลลิลิตร) ลงในถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักจากข้อ 1
3. นำถ้วยระเหยที่มีตัวอย่างไปตั้งบนเครื่องอ่างน้ำจนกระทั่งน้ำในถ้วยระเหยหมด จากนั้นนำถ้วยระเหยไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนแห้งและมีน้ำหนักคงที่ ทำให้งานระเหยเย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งหาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือ น้ำหนักของของแข็งทั้งหมด นำไปคำนวณการคำนวณ

$$\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มิลลิลิตร)} = \frac{\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \times 1000}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง}}$$

### 3. วิธีการวิเคราะห์ค่าของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS) โดยวิธีของธงชัยและวิบูลย์ลักษณ์ (2540)

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยระเหย (evaporating dish) ซึ่งมีความจุตั้งแต่ 10-100 มิลลิลิตร อาจจะเป็นถ้วยกระเบื้อง (porcelain) หรือถ้วยแพลตินัม (platinum) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวอย่าง และชนิดของตัวอย่าง
2. เครื่องอังน้ำ (water bath) หรือตู้อบ (oven) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
3. ตู้อบ (oven) อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส
4. เครื่องชั่งละเอียด (สามารถชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4
5. เตาเผาใช้ที่อุณหภูมิ  $500 \pm 50$  องศาเซลเซียส

#### วิธีการวิเคราะห์

1. หลังจากผ่านการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด จนน้ำหนักคงที่แล้ว นำถ้วยระเหยดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ค่าของแข็งระเหยง่าย โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $500 \pm 50$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น นำไปชั่งหาน้ำหนักสารที่เหลืออยู่ สมมติน้ำหนักเป็น C กรัม (อาจารย์ให้อุณหภูมิต่ำลงในเตาเผา ก่อนจึงนำถ้วยระเหยไปใส่ในโถดูดความชื้น เพราะถ้าใส่ในโถดูดความชื้นเลยทันทีจากการเผาเสร็จแล้ว โถดูดความชื้นอาจแตกได้)

#### การคำนวณ

$$\text{ของระเหยง่าย หรือ VS (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{A - B}{C} \times 10^6$$

A = น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็งหลังเผา

B = น้ำหนักถ้วยระเหย

C = ปริมาณตัวอย่างน้ำ (มล.)

#### 4. การวิเคราะห์ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (กลุ่มงานเคมี สำนักวิจัยและพัฒนา, 2550)

##### การเตรียมสารเคมี

##### 1. Digestion reagent (Standard Potassium Digestion Solution 0.0167M)

ชั่งสารโพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) (อบแห้งที่ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น) 4.913 กรัม ใส่ลงในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และสารเมอคิวรีซัลเฟต ( $HgSO_4$ ) 33.3 กรัม คนให้สารละลายตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

##### 2. กรดซัลฟูริกเอเจนท์ (Sulfuric Acid Reagent)

เตรียมสารละลายผสมระหว่างสารซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) และ กรดซัลฟูริกเข้มข้น ในอัตราส่วน 5.5 กรัมของสาร  $Ag_2SO_4$  ต่อ 1 กิโลกรัมของกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้สาร  $Ag_2SO_4$  ละลายจนหมด ถ้าต้องการละลายให้เร็วขึ้นก็อาจจะใช้วิธีการกวนอย่างต่อเนื่องซึ่งจะละลายสาร  $Ag_2SO_4$  ได้ภายในเวลา 30 นาที

##### 3. Ferriin Indicator Solution

ละลาย 1,10 - phenanthroline monohydrate ( $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$ ) 1.485 กรัม และสารเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) 695 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร

##### 4. กรดซัลฟามิก (Sulfamic acid)

เพื่อใช้ในการกำจัดไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำ โดยใส่กรดซัลฟามิก 10 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิกรัมของไนโตรเจนไนโตรเจน โดยใส่ในภาชนะย่อยสลายก่อนนำไปย่อย

##### 5. Potassium Hydrogen Phthalate (KHP) Standard

ละลาย Potassium hydrogen phthalate ( $HCOOC_6H_4COOK$ ) (อบแห้งจนน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จากนั้นทำให้เย็นในโถดูดความชื้น) จำนวน 425 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นและเจือจางจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารมาตรฐานที่มีค่าซีโอดีเท่ากับ 500 มิลลิกรัม  $O_2$  ต่อลิตร ในทางทฤษฎี Potassium hydrogen phthalate มีค่าซีโอดี 1.176 มิลลิกรัม  $O_2$  ต่อมิลลิกรัม สารละลายนี้สามารถเก็บไว้ในตู้เย็นได้ 3 เดือน

##### 6. Ferrus ammonium sulfate ( $Fe (NH_4)_2(SO_4)_2$ )

สาร  $Fe (NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot H_2O$  39.2 กรัมด้วยน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป 20 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีวิเคราะห์

- ล้างหลอดย่อยด้วยสลายด้วย 20%  $H_2SO_4$  เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์
- เลือกใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่าง และสารเคมีที่เหมาะสมดังตาราง

ขนาดของหลอดย่อยสลาย	น้ำตัวอย่าง (ml)	สารละลายในการย่อยสลาย (ml)	กรดซัลฟูริกรีเอเจนท์ (ml)	ปริมาตรทั้งหมด (ml)
16 × 100 mm	2.5	1.5	3.5	7.5
20 × 150 mm	5.0	3.0	7.0	15.0
25 × 150 mm	10.0	6.0	14.0	30.0

- นำน้ำตัวอย่างใส่หลอดย่อยสลายที่เตรียมไว้ และเติม digestion reagent
- ค่อยๆเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น ลงไป 3.5 มิลลิลิตร ให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นของน้ำตัวอย่าง และ digestion reagent
- ปิดฝาหลอดย่อยสลายด้วยฝาเกลียว นำเข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- เตรียมแบลนด์ โดยใช้ น้ำกลั่น แทนตัวอย่าง ทำตามขั้นตอนเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง
- ไทเทรตหาปริมาณ  $K_2Cr_2O_7$  ที่เหลือ หรือมาเกินพอดีด้วยสารละลาย  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  โดยใช้ สารละลายนโปโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ ที่จุดยุติสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ บันทึกปริมาตรที่ไทเทรตขณะที่สารละลายเริ่มเปลี่ยนสีเป็นน้ำตาลแดงทันที
- คำนวณหาค่าซีโอดีจากสูตร

#### การคำนวณ

$$COD (mg/l) = \frac{(a-b) \times N \times 8000}{ml \text{ sample}}$$

เมื่อ a คือ ปริมาตร (ml) ของ  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  ที่ใช้ไทเทรต Blank

B คือ ปริมาตร (ml) ของ  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง

N คือ Normality ของ  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$  ที่ใช้ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid, VFA) และ ความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) โดยวิธีของธงชัยและวิบูลย์ลักษณ์ (2540)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องมือวัดพีเอช
2. เครื่องเซนติพีวจ์
3. Hot plate และเครื่องกวนแม่เหล็ก

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน  $H_2SO_4$  0.05 N
2. สารละลายมาตรฐาน NaOH 0.05 N

วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำส่วนใสมาใช้ประมาณ 50 มิลลิลิตร
2. วัดค่าความเป็นพีเอช
3. หาค่าความเป็นด่างโดยการไตเตรทตัวอย่างกับสารละลาย มาตรฐาน  $H_2SO_4$  0.05 N จนพีเอชมีค่าเป็น 4 จตปริมาณกรดที่ใช้ไป คำนวณความเป็นด่างทั้งหมด แล้วไตเตรทต่อไปจนพีเอชเป็น 3.5 (ทำการกวนสารละลายตลอดเวลา)
4. ต้มไล่  $CO_2$  เป็นระยะเวลาประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. ไตเตรทต่อด้วย สารละลายมาตรฐาน NaOH 0.05 N จนพีเอชเป็น 4 แล้วไตเตรทต่อไปจนพีเอชเป็น 7 (จตปริมาณสารละลายมาตรฐานต่างที่ใช้ตั้งแต่พีเอช 4 ถึง 7)

การคำนวณ

$$\text{ความเป็นด่างทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร as } CaCO_3) = \frac{\text{NaOH, มล} \times N \text{ NaOH} \times 50 \times 10^3}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง, มล}}$$

การคำนวณค่ากรดอินทรีย์ระเหย

กรณี 1 ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมด > 180 (มิลลิกรัม/ลิตร as  $CaCO_3$ )

$$\text{กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัม/ลิตร as } CH_3COOH) = \text{ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมด} \times 1.5$$

กรณี 2 ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมด < 180 (มิลลิกรัม/ลิตร as  $CaCO_3$ )

$$\text{กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัม/ลิตร as } CH_3COOH) = \text{ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมด} \times 1.0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้