

การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกจากโรงงานผลิตขนมปัง
โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน
แบบสองขั้นตอน

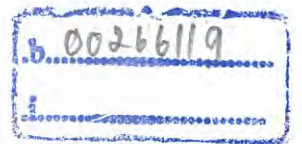
BIOGAS PRODUCTION FROM TARO WASTE FROM
BAKERY FACTORY BY TWO-STAGE
ANAEROBIC DIGESTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม)
ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกจากโรงงานผลิตขนมปัง
โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน
แบบสองขั้นตอน

BIOGAS PRODUCTION FROM TARO WASTE FROM
BAKERY FACTORY BY TWO-STAGE
ANAEROBIC DIGESTION



TB00264

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม)
ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIOGAS PRODUCTION FROM TARO WASTE FROM
BAKERY FACTORY BY TWO-STAGE
ANAEROBIC DIGESTION



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 การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกจากโรงงานผลิตขนมปังโดยกระบวนการ
ย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน
Biogas Production From Taro Waste From Bakery Factory By
Two-stage Anaerobic Digestion

ชื่อนักศึกษา นายจิรายุ มุลศาลา รหัสนักศึกษา 55051251
นายชนะเมือง เมืองนก รหัสนักศึกษา 55051255
นายภานุเดช บุญกว้าง รหัสนักศึกษา 55051365

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิตจุลชีววิทยาอุตสาหกรรม


ภาควิชา ชีววิทยา

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.ดุชนี ธนะบริพัฒน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา
จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. กานต์ วงศาริยะ ประธานกรรมการ	
ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
รศ.ดร.ดุชนี ธนะบริพัฒน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกจากโรงงานผลิตขนมปังโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน		
ชื่อนักศึกษา	นายจิรายุ	มุลศาลา	รหัสนักศึกษา 55051251
	นายชนะเมือง	เมืองนก	รหัสนักศึกษา 55051255
	นายภานุเดช	บุญกว้าง	รหัสนักศึกษา 55051365
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	ชีววิทยา		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.ดุชนิ ธนะบริพัฒน์		

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกโดยการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการ ระบบประกอบด้วยถังหมักสองขั้นตอน ถังหมักกรดมีปริมาตรการหมัก 24.4 ลิตรและถังหมักก๊าซมีปริมาตร 61.0 ลิตร ซึ่งถังหมักทั้งสองมีการกวนผสมกันอย่างสมบูรณ์ ดำเนินระบบด้วยการเติมสารละลายเศษเปลือกในอัตราส่วน 1เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรดหรือ 244 กรัม และ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรดหรือ 732 กรัม ความถี่ในการเติมสารละลาย 1 วันต่อครั้ง ผลการศึกษานี้พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ในช่วง 98.0–98.80 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งอยู่ในช่วง 95.08–96.44 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยอยู่ในช่วง 97.06–97.65 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองทำให้ทราบว่า อัตราส่วนของการป้อนสารละลายเศษเปลือกที่เหมาะสมคือ 1 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่ 3 เปอร์เซ็นต์ไม่เหมาะสม เพราะหลังจากที่เติมสารละลายเศษเปลือกที่ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรดตรวจพบฝ้าตะกอนอยู่บนผิวน้ำซึ่งเป็นอุปสรรคต่อกระบวนการ

คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ, การย่อยแบบไร้ออกซิเจน, ถังหมักแบบสองขั้นตอน, เศษเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Biogas Production From Taro Waste From Bakery Factory By Two-Stage Anaerobic Digestion.	
Students	Mr. Jirayu Moonsala	Student ID 55051251
	Mr. Chanamuang muangnok	Student ID 55051255
	Mr. Phanudet boonkwang	Student ID 55051365
Degree	Bachelor of Science (Industrial Microbiology)	
Department	Biology	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
Academic Year	2015	
Advisor	Dr. Pramote Srirote	
Co-advisor	Assoc.Prof.Dr. Dusanee Thanaboripat	

Abstract

The study on biogas production from taro waste using laboratory scale, two-stage anaerobic digestion system, was investigated. This system contained two tanks, i.e acid tank with working volume of 24.4 liters and methane tank with working volume of 61.0 liters. Both tanks were continuously mixed by stirrers. Taro wastes at 1 % or 244 grams and 3 % or 732 grams were fed into acid tank. The frequency of feeding solution was 1 date at a time. It was found that the efficiencies of COD removal were between 98.01 - 98.80 %, solid removals were between 95.08 - 96.44 %, and volatile solid removals were between 97.06 - 97.65 %. The result showed that the appropriate feeding rate of taro waste solution was at 1 % or above. However, the feeding rate of taro waste should not be at 3 % because it would cause scum on the surface of the acid tank and would be an obstacle for the process.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, taro, two-stage reactor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพิเศษเรื่อง การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกจากโรงงานผลิตขนมปัง โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ให้ข้อเสนอแนะ รวมถึงการติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร. ดุษณี ธนะบริพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ ดร. กานต์ วงศาริยะ ประธานกรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องเพื่อให้รายงานวิจัยฉบับนี้ มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณ ศักรินทร์ บุญล้ำ และนักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และคอยให้คำแนะนำเป็นอย่างดี รวมถึงคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนทุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท เพอร์ซิเดนท เบเกอร์รี่ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาเปลือกเปลือกเหลือทิ้งจากโรงงานขนมปังที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ครอบครัวมูลศาลา ครอบครัวเมืองนก และ ครอบครัวบุญกว้าง ที่ให้กำลังใจ และการสนับสนุนเป็นอย่างดีในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่าน หากงานวิจัยฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใดทางคณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

จิรายุ มูลศาลา
ชนะเมือง เมืองนก
ภานุเดช บุญกว้าง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ลักษณะและองค์ประกอบเฟือก	3
2.2 ก๊าซชีวภาพ	4
2.3 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic digestion)	5
2.3.1. กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	5
2.3.1.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ (hydrolysis)	6
2.3.1.2 การหมักกรดอินทรีย์ระเหยและการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยเป็นกรดแอซีติก (acidogenesis and acetogenesis)	6
2.3.1.3 กระบวนการสร้างมีเทน (methanogenesis)	7
2.4 สภาพแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน	7
2.4.1 อุณหภูมิ	8
2.4.2 ความเป็นกรดเป็นด่างหรือพีเอช (pH)	8
2.4.3 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	8
2.4.4 ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ	8
2.4.5 กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid : VFA)	9
2.4.6 การกวนผสม (Mixing)	9
2.4.7 สารอาหาร สารยับยั้งและสารพิษ	9
2.5 ระบบถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน	9
2.5.1 ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์	10
2.5.2 ถังปฏิกรณ์แบบ Contact Tank	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 ถังปฏิกรณ์แบบ Anaerobic Contact (AC)	10
2.5.4 ถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอน	11
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	14
3.1 เศษเฟือก	14
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	15
3.3 เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น	15
3.4 ระบบถังหมัก	15
3.4.1 ถังหมักกรด (acid tank)	16
3.4.2 ถังหมักก๊าซ (methane tank)	16
3.4.3 มอเตอร์ (motor)	17
3.4.4 เครื่องตั้งเวลา (timer)	17
3.4.5 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ	17
3.5 การดำเนินงานวิจัย	17
3.5.1 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อป้อนเข้าสู่ถังหมัก	17
3.5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารละลายเศษเฟือก	18
3.5.3 การทดสอบระบบถังหมัก	18
3.5.4 การเริ่มต้นดำเนินระบบและสภาวะในการดำเนินระบบ	18
3.5.5 วิธีการวิเคราะห์และเก็บข้อมูล	19
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	20
4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบทั้งหมด	20
4.1.1 ค่าพีเอช	20
4.1.2 ปริมาณซีไอดี	21
4.1.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมด	22
4.1.4 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด	23
4.1.5 ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย	24
4.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น	25
4.3 ตะกอนจุลินทรีย์ที่พบในถังหมัก	28
4.4 วิจารณ์ผลการทดลอง	29
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	31
5.1 สรุปผลการวิจัย	31

สารบัญ (ต่อ)

5.2 ข้อเสนอแนะ	หน้า
เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก	33
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	36
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง	37
	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกสด	4
2.2 แสดงสัดส่วนของก๊าซชีวภาพ	4
4.1 ผลสรุปการทดลองเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของระบบการย่อยภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน	27
ข-1 ค่าพีเอชของสารละลายเปลือกเปลือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ	42
ข-2 ปริมาณซีไอดีของสารละลายเปลือกเปลือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ	43
ข-3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของสารละลายเปลือกเปลือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ	44
ข-4 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของสารละลายเปลือกเปลือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ	45
ข-5 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยของสารละลายเปลือกเปลือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ	46
ข-6 ปริมาณก๊าซชีวภาพ	47



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผีอก (<i>Colocasia esculenta</i>)	3
2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	5
3.1 เศษผีอก	14
3.2 เศษผีอกที่ทำการหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ	14
3.3 ถังหมักแบบสองชั้นตอนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	16
3.4 แผนภาพแสดงระบบถังหมักแบบสองชั้นตอน	17
4.1 ค่าพีเอชของสารละลายเศษผีอกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ	20
4.2 ปริมาณซีโอดีของสารละลายเศษผีอกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ	21
4.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของสารละลายเศษผีอกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ	22
4.4 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของสารละลายเศษผีอกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ	23
4.5 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยของสารละลายเศษผีอกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ	24
4.6 แสดงฝ้าตะกอนของสารละลายเศษผีอกลอยบนผิวหน้า	25
4.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดการทดลอง	26
4.8 เปลวไฟที่ได้จากการหมักการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผีอก โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองชั้นตอน	26
4.9 จุลินทรีย์ที่พบในถังหมักกรดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	28
4.10 จุลินทรีย์ที่พบในถังหมักก๊าซที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมในประเทศกำลังพัฒนา ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ก่อให้เกิดปัญหาด้านมลพิษตามในด้านต่างๆมากมาย ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางน้ำ อากาศ และ ชยะของเสีย โดยปัญหาขยะจากโรงงานอุตสาหกรรม จำเป็นต้องได้รับการกำจัดอย่างถูกวิธี เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบตาม โดย วิธีการกำจัดขยะของเสียที่นิยมใช้กันคือ การเทกองกลางแจ้ง การฝังกลบ การเผา และการหมักเป็นปุ๋ยหรือวัสดุปรับปรุงดิน อีกทั้งในปัจจุบันสถานการณ์ปัญหาความต้องการพลังงานมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกขณะ ในขณะที่พลังหลัก เช่น น้ำมันดิบมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการหาแหล่งพลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็นและได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

การผลิตก๊าซชีวภาพเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีประโยชน์ต่อสังคมทั้งในด้านพลังงาน และ สิ่งแวดล้อม โดยการเผาก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง โดยใช้ความร้อนในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลต่างๆ เช่น ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยนำมาเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(generator)เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาคุณภาพชีวิต ลดกลิ่นรบกวนจากของเสียที่เกิดขึ้น ทำให้แมลงวันไม่สามารถใช้ของเสียและน้ำเสียเหล่านั้นเป็นแหล่งเพาะพันธุ์และแพร่กระจายเชื้อโรค การแพร่กระจายของก๊าซมีเทนลดลง ช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์ภาวะเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน สำหรับประโยชน์ในด้านการเกษตร สามารถใช้กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้เกิดประโยชน์โดยการนำกากที่เหลือจากการหมักก๊าซชีวภาพมาทำเป็นปุ๋ย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

ดังนั้นโครงการพิเศษนี้เห็นประโยชน์ที่จะนำเศษเปลือกที่เหลือจากกระบวนการผลิตของโรงงานขนมปังซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม มาศึกษาต่อยอดเพื่อให้เกิดประโยชน์และพัฒนาในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษากระบวนการหมักก๊าซชีวภาพโดยใช้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในถังหมักแบบสองขั้นตอนโดยใช้เศษเปลือกที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบ

2) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือก

3) เพื่อศึกษาความเหมาะสมของอัตราการเติมสารละลายเศษเปลือกเข้าสู่ระบบให้ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกเผือกและความเหมาะสมของอัตราการเติมสารละลายเศษเผือกโดยกระบวนการหมักแบบสองขั้นตอน แล้ววิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการหมัก ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณซีโอดี (COD) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย (VFA)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเผือกและทราบอัตราการป้อนสารละลายเศษเผือกที่เหมาะสมเข้าสู่ระบบเพื่อให้ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ
- 2) เป็นแนวทางในการพัฒนาศักยภาพพลังงานทดแทนชนิดการหมักก๊าซชีวภาพ โดยการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมาเป็นวัตถุดิบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะและองค์ประกอบของเผือก

เผือก (ชื่อวิทยาศาสตร์ *Colocasia esculenta*) เป็นพืชล้มลุก ในแฟมมีลี Araceae ลักษณะต้นคล้ายบอน เป็นพืชที่ต้องการน้ำมาก หรือต้องการความชื้นในการเจริญเติบโตค่อนข้างสูง ดังนั้นเผือกจึงเจริญได้ดีในดินที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำ สามารถปลูกได้ทั่วประเทศ เผือกเป็นพืชหัวที่มีลำต้นใต้ดินสะสมอาหารเรียกว่าหัว (รูปที่ 2.1) ซึ่งเกิดจากการขยายของลำต้นใต้ดิน พร้อมกับความยาวของลำปล้องลดลง เมื่อหัวมีขนาดใหญ่จะมีรากช่วยดึงหัวให้ลึกลงในดิน ที่ปลายรากเหล่านี้จะงอกโตขึ้นเป็นหัวย่อยที่มีขนาดเล็ก เรียกว่า ลูกเผือก ซึ่งจะทำหน้าที่ยึดลำต้น ช่วยดูดน้ำและแร่ธาตุ และสามารถใช้เป็นส่วนที่ขยายพันธุ์ได้ต่อไป ใบเผือกมีรูปร่างคล้ายหูช้าง หรือคล้ายหัวใจ ขนาดใบกว้างประมาณ 2-30 เซนติเมตร ยาว 35-45 เซนติเมตร ก้านใบยาว 45-150 เซนติเมตร เผือกแต่ละต้นจะมีก้านใบประมาณ 12-18 ก้าน สีของก้านใบ ลักษณะใบและขอบใบจะแตกต่างกันไปตามพันธุ์ เช่น ก้านใบอาจมีสีเขียวอ่อนเขียวเข้ม ม่วง หรือจุดสีม่วง ขอบใบเรียบหรือเป็นคลื่น ปลายใบอาจแหลมหรือมน ตัวใบอาจหนาและเป็นมันหรือบางและด้าน ดอกจะมีลักษณะเป็นช่อดอก มีดอกย่อยเกาะติดกับก้านดอกเดียวกัน ดอกย่อยจะเริ่มบานจากดอกที่อยู่ล่างสุดขึ้นไปทางปลายช่อ ไม่มีก้านดอกย่อย ดอกจะเกาะติดกับก้านดอกเดี่ยวซึ่งลักษณะยาวและมีจานหุ้มช่อดอกไว้ ช่อดอกมีขนาดยาว 10-15 เซนติเมตร จำนวนช่อดอกประมาณ 5-15 ช่อต่อต้น ช่อดอกมีก้านยาว 15-30 เซนติเมตร ดอกเผือกมีสีขาวครีม และสีเหลืองอ่อนแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ ผลของเผือกมีขนาดเล็ก เป็นผลเล็ก ๆ เกาะกลุ่มอยู่ในก้านดอกเดียวกัน ผลจะมีสีขาวเปลือกบาง เนื้อผลอวบน้ำ เมื่อแก่มีสีน้ำตาลดำภายในผลจะมีเมล็ดเล็ก ๆ อยู่จำนวนมาก (มาลินี และคณะ, 2541) โดยองค์ประกอบทางเคมีของหัวเผือกสดจะประกอบด้วยน้ำ 2 ใน 3 และคาร์โบไฮเดรต 13-29% โดยมีองค์ประกอบอื่นจำพวกโปรตีน ไขมัน เส้นใย และ เถ้าอีกเล็กน้อย แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เผือก (*Colocasia esculenta*)

(ที่มา : https://marketlessmondays.files.wordpress.com/2011/11/img_2466.jpg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกสด

องค์ประกอบ	ปริมาณ
ความชื้น	63-85%
คาร์โบไฮเดรต (แป้งส่วนใหญ่)	13-29%
โปรตีน	1.4-3.0%
ไขมัน	0.16-0.36%
ครูดไฟเบอร์	0.60-1.18%
เถ้า	0.60-1.3%
วิตามินซี	7-9 มก. ต่อ 100 กรัม
วิตามินบี	0.18 มก. ต่อ 100 กรัม
โรโบฟลาวิน	0.04 มก. ต่อ 100 กรัม
ไนอาซิน	0.9 มก. ต่อ 100 กรัม

ที่มา : Onwueme (1994)

2.2 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) หมายถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกาศด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีก๊าซอื่นๆ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่า และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น (ตาราง 2.2) กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพต้องไม่ให้อากาศเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนมีการผลิตก๊าซมีเทนลดลง นอกจากนี้ในธรรมชาติก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อมีแบคทีเรีย สารอินทรีย์ และอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในสภาวะที่ไม่มีอากาศ โดยก๊าซชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมัก เช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ บึงและนาข้าวที่มึ่น้ำท่วมขัง เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ตารางที่ 2.2 แสดงสัดส่วนของก๊าซชีวภาพ

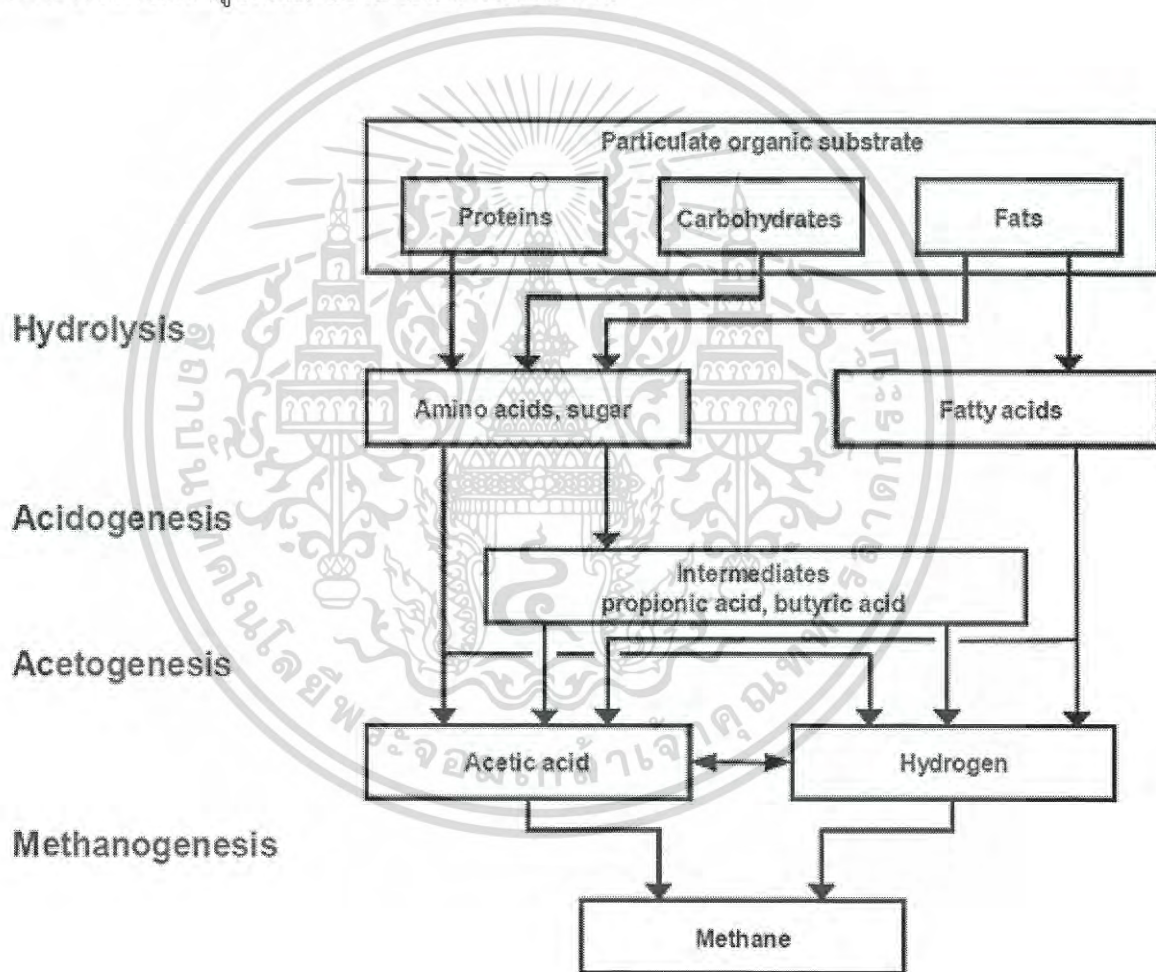
ก๊าซ	โดยปริมาตร (%)
มีเทน	55 – 65
คาร์บอนไดออกไซด์	35 – 45
ไนโตรเจน	0 – 1
ไฮโดรเจน	0 – 1
ไนโตรเจนซัลไฟด์	0 – 1
ออกซิเจน	0 – 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ที่มา : ยุกา (2552) อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic digestion)

2.3.1. กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยกลุ่มแบคทีเรียในสภาพแวดล้อมที่ไร้ออกซิเจน เป็นกระบวนการที่สามารถพบได้ในธรรมชาติในสภาพแวดล้อมที่ไร้ออกซิเจน เช่น หนองน้ำ ตะกอนใต้แม่น้ำ ดินที่มีน้ำขัง หรือ ในลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม วัตถุประสงค์หลายชนิดสามารถนำมาใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสีย ขยะชุมชน เศษผลผลิตทางการเกษตร ของเสียจากโรงงานอาหาร (Holliman *et al.*, 2008) ขั้นตอนของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (รูปที่ 2.1) แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

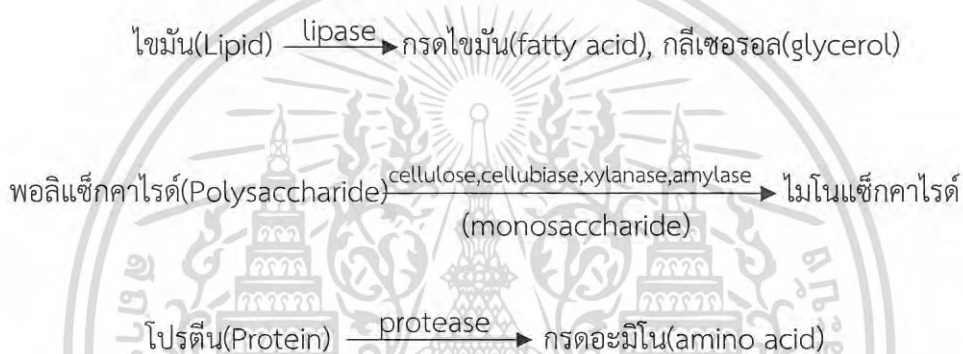


รูปที่ 2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน
ที่มา : Laurila (2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ (hydrolysis)

การย่อยสลายสารอินทรีย์หรือไฮโดรไลซิสเป็นกระบวนการแรกในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ขั้นตอนนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการแตกสลายสารโมเลกุลใหญ่ สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีขนาดโมเลกุลใหญ่ (polymer) ทั้งที่สามารถละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ถูกทำให้ละลายน้ำโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งใช้ เอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ (extracellular enzyme) ของแบคทีเรียพวก hydrolytic bacteria เช่น proteolytic enzyme, cellulolytic enzyme และ lipolytic enzyme เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ได้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเป็นโมเลกุลเดี่ยว (monomer) ที่ละลายน้ำได้ เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน และกลีเซอรอล (Rutz *et al.*, 2008) ดังจะเห็นได้จากสมการ



แบคทีเรียกลุ่มหลักที่ทำการย่อยสลายเซลลูโลสและแป้งได้แก่ *Bacterioides succinogenes*, *Clostridium lochhadii*, *C. cellobioporus*, *Ruminococcus flavefaciens*, *R. albus*, *Butyrivibrio fibrosolvens*, *C. thermocellum*, *C. stercorarium*, *Micromonospora bispora*, *Streptococcus bovis*, *Bacterioides amylophilus*, *Selenomonas ruminatum*, *Succinomonas amylolytica*, *Bacterioides ruminicola* สำหรับแบคทีเรียกลุ่มหลักที่ทำการย่อยสลายไขมันได้แก่ *Anaerovibrio lipotyca*, *Syntrophomonas wolfei*, *Clostridium* และ *Micrococcus* สายพันธุ์ต่างๆ และแบคทีเรียกลุ่มหลักที่ทำการย่อยสลายโปรตีนได้แก่ กลุ่มของ *Clostridia* เช่น *Clostridium perfringens*, *C. bifermentans*, *C. histolyticum*, *C. sporogenes* และ *Bacterioides*, *Butyrivibrio*, *Fusobacterium*, *Selenomonas* *Peptococcus* (Arsova, 2010)

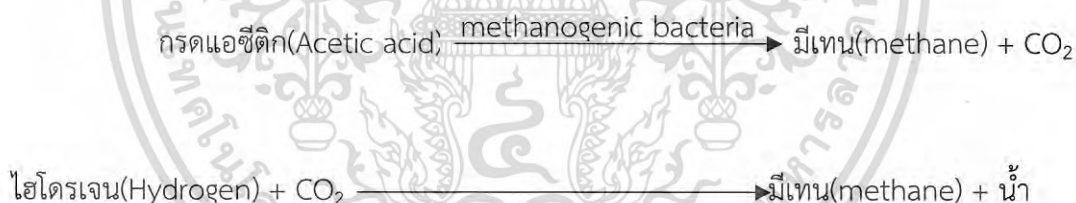
2.3.1.2 การหมักกรดอินทรีย์ระเหยและการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยเป็นกรดแอซิดิก (acidogenesis and acetogenesis)

ในช่วงการหมักกรดอินทรีย์ระเหย(Acidogenesis)ผลิตภัณฑ์หลังจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ จะถูกเปลี่ยนแปลงโดยแบคทีเรียกลุ่ม acidogenic โดยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน กรดไขมัน และแอลกอฮอล์ จะถูกย่อยเป็นอะซีเตต ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการ Acidogenesis ยังไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน โดยผลิตภัณฑ์จะต้องถูกแปรสภาพในขั้น acetogenesis โดยกรดไขมันระเหยและแอลกอฮอล์จะถูกออกซิไดซ์เหมือนอะซีเตตเพื่อเป็นไปเป็นสารตั้งต้นสำหรับแบคทีเรียกลุ่ม methanogenic ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดไขมันระเหย สายคาร์บอนและแอลกอฮอล์ที่สายยาวกว่า 2 หน่วยจะถูกออกซิไดซ์เป็น อะซีเตต และก๊าซไฮโดรเจน การผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มจะทำให้เกิดความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนซึ่งจะทำให้เกิดการยับยั้งการเผาผลาญพลังงานของแบคทีเรีย acetogenic ในระหว่างการสร้างก๊าซมีเทนและไฮโดรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งกระบวนการ acetogenesis และ methanogenesis มักจะมีการทำงานเป็นรูปแบบขนานกัน เป็น symbiosis ของทั้งสองกลุ่มของสิ่งมีชีวิต (Rutz et al., 2008) โดยแบคทีเรียที่พบในระยะ acetogenesis ได้แก่ *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Micrococcus* หรือ *Flavobacterium* ในระยะ Acetogenesis จะพบ อะซีเตตแบคทีเรีย จำพวก *Syntrophomonas* และ *Syntrophobacter* (Arsova, 2010)

2.3.1.3 กระบวนการสร้างมีเทน (methanogenesis)

การผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากถูกผลิตโดยแบคทีเรียในกลุ่ม methanogenic bacteria โดยใช้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการก่อนหน้า 70% ของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมาจากอะซีเตต ส่วนที่เหลืออีก 30% มีที่มาจาก การเปลี่ยนแปลงไฮโดรเจน (H) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ตามสมการดังต่อไปนี้



กระบวนการสร้างมีเทนเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่ช้าที่สุดของกระบวนการ การผลิตก๊าซให้มีปริมาณมีเทนมากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง องค์ประกอบของวัตถุดิบอาหาร อัตราการป้อน อุณหภูมิและพีเอช เป็นตัวอย่างของปัจจัยที่มีอิทธิพลกระบวนการสร้างมีเทน การย่อยมากเกินไป การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเข้าของออกซิเจนจำนวนมาก ส่งผลทำให้การผลิตก๊าซมีเทนหยุดลง (Rutz et al., 2008) แบคทีเรียส่วนใหญ่ที่พบในกระบวนการนี้ได้แก่ *Methanobacterium*, *Methanosaeta* *Methanothermobacter*, *Methanobrevibacter*, *Methanosarcina*, (Arsova, 2010)

2.4 สภาพแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

เนื่องจากในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม ที่เกี่ยวข้องกัน ได้แก่ แบคทีเรียพวกที่ไม่สร้างก๊าซมีเทนและแบคทีเรียพวกที่สร้างเอ็กสทรานเป็นเอ็กสาร์ทที่ส่งวนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซมีเทน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมที่จะทำให้แบคทีเรียเหล่านี้อยู่ด้วยกันได้เป็นอย่างดี ในการที่จะควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทำให้แบคทีเรียที่อยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ (อาริยา, 2546) ดังนี้

2.4.1 อุณหภูมิ (temperature)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเกิดขึ้นจากกลุ่มแบคทีเรียหลายชนิดที่แตกต่างกันการตอบสนองต่อแบคทีเรียแต่ละกลุ่มจึงมีความแตกต่างกัน แต่โดยส่วนมากระบบของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนใจอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 30°C - 40°C หรือ 50°C - 60°C ในกรณีที่ระบบมีอุณหภูมิต่ำจะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพน้อยแต่ก็ขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ ในกรณีที่อุณหภูมิสูงแบคทีเรียยังสามารถทำการผลิตก๊าซชีวภาพได้แต่ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมให้ได้อัตราการผลิตก๊าซสูงสุดจะอยู่ในช่วงไม่เกิน 60°C - 70°C โดยถ้าหากอุณหภูมิสูงกว่า 60°C แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดจะทำงานได้ดีกว่ากลุ่มที่ผลิตก๊าซชีวภาพทำให้เกิดกรดในระบบมากเกินไป (Schnürer และ Jarvis, 2010)

2.4.2 ความเป็นกรดเป็นด่างหรือพีเอช (pH)

ค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตก๊าซชีวภาพควรอยู่ในช่วงระหว่าง 6.5 ถึง 8 ซึ่งมีความเหมาะสมกับแบคทีเรียกลุ่ม methanogenic bacteria และ acetogen โดยแบคทีเรีย 3 กลุ่มหลักในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนมีความไวต่อค่าพีเอชแตกต่างกัน โดย hydrolysis bacteria และ acidogenic bacteria มีค่าพีเอชเหมาะสมอยู่ที่ 5 ถึง 6 ส่วน methanogenic bacteria มีค่าพีเอชเหมาะสมอยู่ที่ 6.5 - 7.8 ซึ่งการแยกแบคทีเรีย 2 กลุ่มออกจากกันในการผลิตก๊าซชีวภาพจะส่งผลให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้ดีขึ้น (Zhao, 2011)

2.4.3 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน การใช้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ โดยพบว่าแบคทีเรียมีอัตราการใช้คาร์บอนเร็วกว่าไนโตรเจน 25 - 30 เท่า ดังนั้นปริมาณคาร์บอนในสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบควรมีมากกว่าไนโตรเจน 25 - 30 เท่า ซึ่งสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะมีประสิทธิภาพต่อเมื่อสามารถย่อยสลายได้ในเวลาเดียวกัน (Saha et al., 2005)

2.4.4 ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนนั้น การย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (loading) เพื่อไม่ให้ระบบเกิดการหยุดทำงานในการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบควรปรับให้เหมาะสมกับแบคทีเรียที่ใช้งาน โดยปกติแล้วในการเริ่มต้นระบบควรเติมสารอินทรีย์ในปริมาณน้อยอย่างต่อเนื่องเพื่อให้จุลินทรีย์เจริญ (Schnürer และ Jarvis, 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid: VFA)

ปริมาณกรดไขมันระเหยมีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดแอสिटิก กรดบิวทีริกและกรดโพรพิโอนิก เป็นต้น ผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด หากพบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีมากขึ้น มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ ในระบบที่มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก ($> 2,000$ มิลลิกรัมของกรดแอสिटิกต่อลิตร) ช่วงแรกจะทำให้ค่าความเป็นด่างของระบบลดลง และถ้ายังไม่มีมาตรการกำจัดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้น้อยลง ต่อมาค่าพีเอชของระบบก็จะลดต่ำลง และถ้าค่าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน หากยังไม่ได้ทำการแก้ไขปล่อยให้ค่าพีเอชลดต่ำลงถึง 4.5-5.0 ก็จะทำให้ระบบเสียสมดุลเป็นผลให้ระบบล้มเหลวได้ ในสภาวะปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในถังปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัมของกรดแอสिटิกต่อลิตร และวิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุดควรให้มีค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่างไม่ควรเกิน 0.3-0.4 (ฟาริดา และคณะ, 2557)

2.4.6 การกวนผสม (Mixing)

การผสมสารตั้งต้นจะช่วยให้แบคทีเรียและสารตั้งต้นสัมผัสกันได้อย่างขึ้นและยังช่วยรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอตลอดทั้งกระบวนการ ซึ่งการสัมผัสกันระหว่างแบคทีเรียกับสารตั้งต้นช่วยให้เอนไซม์ย่อยสลายสารตั้งต้นได้ทั่วถึงซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนนอกจากนี้การกวนผสมยังป้องกันการสะสมของสารตั้งต้นด้านล่างถังหมักและช่วยในการป้องกันการเกิดฟอง (Schnürer และ Jarvis, 2010)

2.4.7 สารอาหาร สารยับยั้งและสารพิษ

ธาตุอาหาร เช่น เหล็ก นิเกิล โคบอลต์ ซีลีเนียม ทั้งสแตน ล้วนมีความสำคัญสำหรับการเจริญและอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน เช่นเดียวกับสารอาหารหลักจำพวกคาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ ซัลเฟอร์ โดยหากสารอาหารเหล่านี้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียอาจจะทำให้เกิดการยับยั้งและขัดขวางการทำงานของระบบ อีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนคือการเกิดของสารที่เป็นพิษซึ่งอาจจะเกิดจากการนำเข้าสู่ระบบโดยการเติมสารอาหารหรืออาจจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Rutz *et al.*, 2008)

2.5 ระบบถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน

ถังปฏิกรณ์มีความสำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมาก เนื่องจากมีข้อจำกัดหลายประการซึ่งแตกต่างกันในแต่ละปฏิกรณ์ เช่น ระยะเวลาการเก็บกัก การเริ่มต้นระบบ นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างกันในด้านเชื้อแบคทีเรียที่หลากหลาย เชื้อแบคทีเรียในแต่ละกลุ่มสามารถเจริญในสภาวะที่ต่างกันโดยเฉพาะกลุ่มเชื้อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะการเจริญเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสภาพแวดล้อมมาก จึงส่งผลให้ยังไม่เป็นที่นิยม แต่พบว่าจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อทำการลดขนาดของถังปฏิกรณ์ในขณะที่เพิ่มปริมาณเชื้อแบคทีเรียในระบบ การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถนำมาพัฒนาได้ 2 แนวทาง คือ ด้านเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในระบบ เช่น ชนิดของเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ หรือสภาวะแวดล้อมในระบบ ได้แก่ การเพิ่มอุณหภูมิในระบบ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงสามารถเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีและการควบคุมค่าพีเอช ให้อยู่ในช่วงที่เชื้อแบคทีเรียเจริญและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นด้านวิศวกรรม (Engineering Approach) ในด้านการออกแบบถังปฏิกรณ์เพื่อให้เหมาะสมกับการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งถังปฏิกรณ์มีหลายแบบ (จินตนา, 2552)

2.5.1 ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์

ระบบถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) นั้นเป็นการเรียกตามลักษณะภายในถังที่มีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากันทุกจุด (Completely mixed) ถังปฏิกรณ์แบบนี้ถือเป็นถังปฏิกรณ์อุดมคติ (Ideal Reactor) โดยถังกวนสมบูรณ์นี้ถูกพัฒนาขึ้นมา จากถังย่อยสลัดจ์ ซึ่งเป็น Conventional Anaerobic Digester ที่มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากการกวนผสมไม่ดีทำให้ระยะเวลาย่อยสลายยาวนาน จึงได้มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสกันของสารอาหารในสารอินทรีย์และจากถังย่อยสลัดจ์ (Septic Tank) โดยมีการติดตั้งใบกวน เช่น แบบ Paddle สกรู (Screw) หรือ Gas Diffuser ในการกวนผสมของแบคทีเรียและสารอาหาร ในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียดีขึ้น ถังปฏิกรณ์แบบนี้ระยะเวลาที่เก็บของแข็งเท่ากับระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย ทำให้ถังปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ หากของเสียหรือน้ำเสียที่เป็นวัตถุดิบย่อยสลายได้ยาก ใช้เวลานาน ถัง CSTR นี้จึงเหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง (High Concentration) มีสารแขวนลอยสูง หรือแม้กระทั่งมีสารพิษปนอยู่ (Toxic Wastewater) ทั้งนี้เนื่องจากถังปฏิกรณ์มีการกวนอยู่ตลอดเวลา ทำให้เมื่อสารพิษถูกป้อนเข้าระบบจะถูกเจือจางทันที จึงไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อแบคทีเรียเหมือนระบบอื่น แต่ถังปฏิกรณ์แบบนี้ มีข้อเสียคือ ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อให้ระยะเวลาที่เก็บของแข็งเท่ากับระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียเพื่อลดการสะสมของสารอินทรีย์และเพิ่มเชื้อแบคทีเรียให้แก่ระบบเนื่องจากไม่มีกลไกการหมุนเวียนตะกอนแบคทีเรียมาใช้ใหม่

2.5.2 ถังปฏิกรณ์แบบ Contact Tank

เป็นถังปฏิกรณ์ที่คล้ายกับถังปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ (CSTR) คือ มีการกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์ แต่ถังปฏิกรณ์แบบ Contact Tank จะมีการกวนผสมที่มีการกวนกันอย่างสมบูรณ์เพียงช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งมีข้อดีคือสามารถดูแลรักษาได้ดีกว่าถังปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์

2.5.3 ถังปฏิกรณ์แบบ Anaerobic Contact (AC)

ถังปฏิกรณ์ชนิดนี้เป็นการพัฒนาระบบถังปฏิกรณ์แบบกวนกับถังตกตะกอนเพื่อให้สารละลายที่ออกจากถังถูกส่งไปเก็บที่ถังตกตะกอนเพื่อแยกส่วนของเชื้อแบคทีเรียและนำกลับมาเข้าระบบใหม่ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ค่าระยะเวลาการกักเก็บของแข็งมากกว่าระยะเวลาการกักเก็บของเหลวซึ่งช่วยลดขนาดถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ได้ แต่ระบบนี้ยังมีข้อเสียในเรื่องการเพิ่มถังตกตะกอนเข้าไปส่งผลให้ยากต่อการแยกตะกอน เชื้อแบคทีเรียจากน้ำที่ออกจากระบบและในถังตกตะกอนยังมีการผลิตก๊าซชีวภาพ และการย่อยสลายของสารอินทรีย์ปะปนอยู่ซึ่งทำให้ตะกอนลอยขึ้นแทน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบโดยมีการควบคุมป้องกันก๊าซไม่ให้เข้าสู่ถังตกตะกอน หรือการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเพื่อเร่งการตกตะกอน

2.5.4 ถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอน

ในการเพิ่มสารอินทรีย์ในระบบโดยวิธีการตกตะกอนและนำเชื้อแบคทีเรียมาใช้ใหม่ สามารถควบคุมได้ยาก จึงมีการพัฒนาถังปฏิกรณ์ใหม่ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ในการผลิตก๊าซมีเทนหรือก๊าซชีวภาพนั้นขึ้นอยู่กับเชื้อแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ เชื้อแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดอินทรีย์และเชื้อแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มมีสภาวะการเจริญที่แตกต่างกัน จึงมีแนวคิดที่พัฒนาระบบเป็นการแยกถังปฏิกรณ์ออกเป็น 2 ถัง(Two-Phase Anaerobic Digestion) โดยมีกลไกการผลิตก๊าซชีวภาพ 2 ขั้นตอน ในแต่ละถังปฏิกรณ์จะมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อเชื้อแบคทีเรียในแต่ละกลุ่ม และการแยกถังปฏิกรณ์ทำให้ สามารถปรับคุณสมบัติของเหลวหรือวัตถุดิบที่เข้าระบบเพื่อให้เหมาะสมกับเชื้อแบคทีเรียได้ ซึ่งถังปฏิกรณ์แรกเป็นถังที่สร้างกรดอินทรีย์จะมีเชื้อแบคทีเรียสร้างกรด และถังปฏิกรณ์ที่สร้างก๊าซมีเทนจะมีเชื้อแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทน ทำให้เชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดทำงานได้เต็มกำลังและใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ โดยใช้ค่าพีเอชเป็นตัวกำหนดและความคุมเชื้อแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ ข้อดีของถังปฏิกรณ์ระบบนี้คือ สามารถเก็บกักเชื้อแบคทีเรียในระบบได้มาก สามารถบ้อนสารอินทรีย์ได้ปริมาณสูง ลดขนาดถังปฏิกรณ์โดยการพัฒนาระบบการเก็บกับเชื้อแบคทีเรียภายในถังปฏิกรณ์ 2 แบบคือ

2.5.4.1 การตรึงเชื้อแบคทีเรียบนวัสดุตัวกลางหรือการสร้างแผ่นฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) เช่น ถังปฏิกรณ์ Anaerobic Filter หรือ Anaerobic Fixed Film Reactor และ Expanded/Fluidized Bed Reactor

2.5.4.2 การพัฒนาเชื้อแบคทีเรียให้มีการเจริญรวมเป็นก้อน (Granular Sludge) เพื่อเป็น การเพิ่มปริมาณการตกตะกอนของเชื้อแบคทีเรียในระบบรวมถึงให้เชื้อแบคทีเรียสามารถเจริญแบบ แขนงลอยภายในถังปฏิกรณ์(Suspended growth) เช่น Plug Flow Reactor และ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) อีกทั้งยังมีถังปฏิกรณ์ที่รวบรวมการพัฒนาทั้ง 2 วิธี ร่วมกัน เรียกว่าถังปฏิกรณ์แบบลูกผสม (Hybrid Reactor) คือเป็นการให้เชื้อแบคทีเรียเจริญอยู่บนตัวกลางและการเจริญแบบแขวนลอยภายในถังปฏิกรณ์ โดยถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนสามารถนำไปประยุกต์ได้หลากหลายขึ้นอยู่กับลักษณะสารอินทรีย์และลักษณะของเสียที่ต้องการย่อยสลาย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อรณพ (2534) ศึกษาผลของวิธีการบ้อนสารอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ในถังปฏิกรณ์ โดยศึกษาการบ้อนสารอาหาร 3 ลักษณะ ได้แก่ บ้อนจากด้านบน บ้อนจากด้านล่าง และบ้อนจาก ด้านข้าง โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีตัวกรอง ขนาดถัง 61.2 ลิตร ปริมาตรใช้งาน 52 ลิตร ใช้วงแหวน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีวีซี ขนาด 1.8 x 1.8 เซนติเมตรเป็นวัสดุรองรับ โดยสันนิษฐานว่าการป้อนสารอาหารทางด้านล่าง และด้านข้างจะช่วยให้มีการกระจายของสารอาหารและแบคทีเรีย ทำให้กระบวนการของถังปฏิกรณ์ ทำงานได้เต็มที่ยิ่งขึ้น จากการศึกษาพบว่า การป้อนสารด้านบนและด้านล่างมีความแตกต่างอย่างเห็น ได้ชัดเมื่อเทียบกับการป้อนด้านข้างเมื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และเสถียรภาพ ของระบบ โดยถังที่มีการป้อนสารอาหารจากทางด้านบนมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมากกว่า ด้านล่างและด้านข้างตามลำดับ

อาริยา (2546) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้ สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนโดยใช้ปริมาตรของถังหมักกรด 27.73 ลิตร และปริมาตรถังหมัก ก๊าซ 52.83 ลิตร โดยในถังทั้งสองมีการควบคุมอย่างสมบูรณ์โดยเริ่มระบบด้วยสารละลายเศษอาหาร ที่มีค่าของแข็งทั้งหมดประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์(น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่ระยะเวลาเก็บกัก เท่ากับ 35, 30, 25 และ 20 วัน อัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 5.77, 6.39, 8.30 และ 10.27 กรัม ซีโอดีต่อ ลิตรต่อวัน ตามลำดับ พบว่า ระยะเวลาเก็บกัก 35 วัน อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 5.77 กรัมซีโอดีต่อ ลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้สูงสุด 90.13 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่ เกิดขึ้น 31.19 ลิตรต่อวัน สำหรับระยะเวลากักเก็บที่ 20 วัน อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.27 กรัมซี โอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้สูงสุด 82.11 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณก๊าซชีวภาพ ทั้งหมดที่เกิดขึ้นเท่า 54.35 ลิตรต่อวัน

เพ็ญศิริ (2551) ศึกษาผลของอุณหภูมิและสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพของกาก ตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม แสดงให้เห็นว่ากระบวนการที่อุณหภูมิสูง (thermophilic) และการเติมสารอาหารเสริมในช่วงระยะเวลาที่สั้นไม่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ฐิติวรรณ และคณะ (2557) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกเปลือกภายใต้สภาวะไม่ใช้ อากาศแบบสองขั้นตอน โดยศึกษาสภาวะและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ที่ระยะเวลากัก เก็บ 25 วัน จะได้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 1.99 ลิตรต่อวัน และก๊าซชีวภาพมีสัดส่วนของก๊าซ มีเทน 44.6-66.7 เปอร์เซ็นต์

Visvanathan *et al.* (2011) ศึกษาอัตราการป้อนสารอินทรีย์ พบว่ามีผลต่อกรดไขมัน ระเหยง่าย การกำจัดสารอินทรีย์ และกิจกรรมของแบคทีเรียในถังหมักแบคทีเรียอุณหภูมิต่ำแบบสอง ขั้นตอน ชนิดมีตัวกรอง (TAnMBR) โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ส่งผลให้กรดไขมัน ระเหยง่ายเปลี่ยนรูปจากกรดแอสติกไปเป็นกรดเอ็น-บิวทริก และความเข้มข้นรวมของกรดไขมัน ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ และผลจากการเพิ่มขึ้นของการป้อน สารอินทรีย์ทำให้การป้อนสารอินทรีย์ครั้งที่สองมีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น แต่การกำจัด สารอินทรีย์ลดลงในการป้อนสารอินทรีย์ครั้งที่สามในขณะที่กิจกรรมของแบคทีเรียในถังหมักเพิ่มขึ้น เรื่อยๆ

Rio *et al.* (2016) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มแบคทีเรียโดย การควบคุมค่าพีเอชในกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนของมูลสุกร โดยปรับค่าความเป็น กรดเป็นค่าที่ 6, 7 และ 8 จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้ สภาวะกรดต่ำ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะไร้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดเป็นด่างโดยค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ 7 ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ 6 และ 8 และพบว่ากลุ่มของแบคทีเรียที่มีความหลากหลายเป็นอย่างมาก โดยแบคทีเรียหลักที่พบที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 7 คือ *Methanocorpusculum* เมื่อเทียบกับ *Methanosarcina* ที่พบทั้งที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 6 และ 8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เศษเปลือก

เศษเปลือกที่ใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เพอร์ซิเดนท์ เบเกอร์ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ เศษเปลือกที่ได้นั้นจะเป็นแผ่นผิวนอกของเปลือก (รูปที่ 3.1) ทำการหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ (รูปที่ 3.2) และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันปฏิกิริยาทางเคมีที่จะเกิดขึ้น ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.1 เศษเปลือก



รูปที่ 3.2 เศษเปลือกที่ทำการหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH meter) รุ่น UB-10 บริษัท Demver ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2) เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น AR120 บริษัท Ohaus ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น AR2140 บริษัท Ohaus ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 4) เครื่องบดปั่น (Blender) บริษัท National ประเทศญี่ปุ่น
- 5) เตาเผา (Hotspot furnace) รุ่น CSF 1200
- 6) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น ED53 บริษัท Binder ประเทศเยอรมัน
- 7) โถดูดความชื้น (Desiccator) บริษัท Duran ประเทศอังกฤษ
- 8) เตาไฟฟ้า (Hot plate) รุ่น HS10-2 บริษัท Torrey pines sciencetific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 9) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น 6/300 บริษัท Facon
- 10) ตู้แช่แข็ง (Freezer) รุ่น SF-PC997 บริษัท Panasonic ประเทศญี่ปุ่น
- 11) ชุดเครื่องแก้ว บริษัท Pyrex ประเทศสหรัฐอเมริกา และบริษัท Duran ประเทศอังกฤษ

3.3 เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น

เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองได้มาจากบ่อบำบัดน้ำเสียของบริษัท เพอร์ซิเดนท์ เบเกอร์ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ ทำการปรับสภาพจุลินทรีย์เพื่อให้สามารถย่อยสลายและใช้สารละลายเศษฝือกเป็นสารตั้งต้นของการเจริญในสภาวะไร้ออกซิเจน

3.4 ระบบถังหมัก

ถังหมักที่ใช้ในการทดลองเป็นระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (continuous stirred tank reactor, CSTR) (รูปที่ 3.3) ซึ่งประกอบด้วย



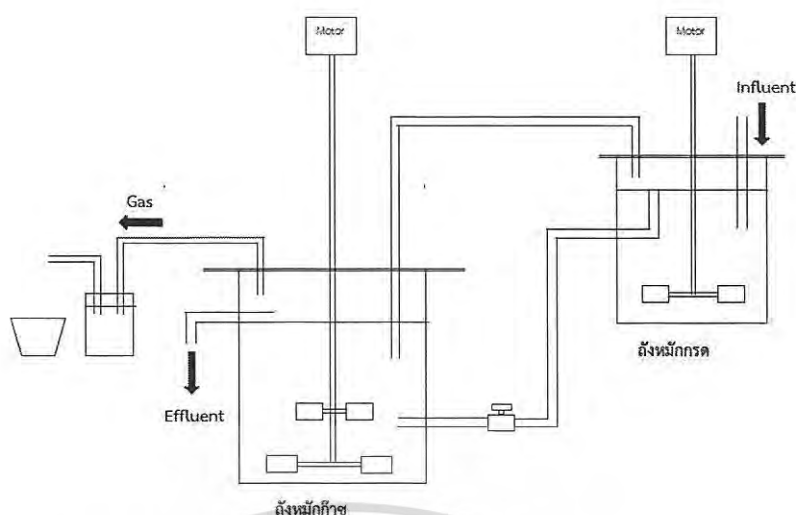
รูปที่ 3.3 ถังหมักแบบสองชั้นตอนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.4.1 ถังหมักกรด (acid tank)

มีปริมาตรความจุสุทธิ 36.14 ลิตร และปริมาตรการหมัก 24.4 ลิตร เจาะด้านข้างถังเพื่อต่อเข้ากับถังหมักก๊าซ ส่วนด้านบนของถังเจาะเป็นรู สำหรับใส่สารละลายเศษเปลือกเข้าระบบถังหมัก และท่อนำก๊าซจากถังหมักกรดเข้าสู่ถังหมักก๊าซ (รูปที่ 3.3) ภายในถังมีการกวนผสมโดยมีเพลลาและใบพัดติดปลายเพลลา 1 ชุด (รูปที่ 3.4) ต่อกับมอเตอร์ 25 วัตต์ มีความเร็วการหมุนประมาณ 10 รอบต่อนาที ซึ่งควบคุมโดยใช้เครื่องตั้งเวลาตั้งไว้ให้ทำงาน 15 นาที และ หยุด 45 นาทีเพื่อไม่ให้มอเตอร์ทำงานหนักเกินไป

3.4.2 ถังหมักก๊าซ (methane tank)

ตัวถังทำด้วยสแตนเลส (stainless steel) มีปริมาตรความจุสุทธิ 67.36 ลิตร และปริมาตรการหมัก 61.00 ลิตร เจาะถังด้านข้างเป็นข้อต่อเพื่อเป็นท่อระบายขอเหลวออกจากถัง ส่วนด้านบนเจาะเป็นท่อนำก๊าซเข้าจากถังหมักกรด และท่อนำก๊าซออกเพื่อวัดปริมาณก๊าซ (รูปที่ 3.3) ภายในถังมีการกวนผสมโดยมีเพลลาและใบพัดติดปลายเพลลา 2 ชุด (รูปที่ 3.4) ต่อกับมอเตอร์ 25 วัตต์ มีความเร็วการหมุนประมาณ 10 รอบต่อนาที ซึ่งควบคุมโดยใช้เครื่องตั้งเวลา ตั้งไว้ให้ทำงาน 15 นาที และหยุด 45 นาที เพื่อไม่ให้มอเตอร์ทำงานหนัก



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงระบบถังหมักแบบสองขั้นตอน

3.4.3 มอเตอร์ (motor)

มอเตอร์ที่ใช้ภายในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซให้เกิดการผสมกัน มีขนาด 25 วัตต์ ความเร็วรอบประมาณ 10 รอบต่อนาที ทำงานด้วยไฟฟ้ากระแสสลับใช้ไฟ 220 โวลต์

3.4.4 เครื่องตั้งเวลา (timer)

ใช้ทำการตั้งเวลาการเปิดและปิดการทำงานของมอเตอร์ โดยต่อเครื่องตั้งเวลาเข้ากับมอเตอร์ถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ เพื่อไม่ให้มอเตอร์นั้นทำงานหนักเกินไป

3.4.5 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

ระบบเก็บก๊าซชีวภาพมีลักษณะเป็นขวดพลาสติกความจุ 6 ลิตร วางในนอนต่อกัน 4 ขวด โดยเจาะรูด้านข้างขวดบริเวณฐานของขวด 2 รู และด้านตรงข้ามอีกสองรู แล้วทำการใส่สายยาง โดยให้สายยางด้านหนึ่งอยู่ข้างล่าง เพื่อเป็นช่องระบายน้ำของทั้ง 4 ถัง และอีกด้านจะอยู่ด้านบนเพื่อ เป็นช่องระบายก๊าซ

3.5 การดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อป้อนเข้าสู่ถังหมัก

นำเศษเปลือกที่แช่แข็งไว้มาละลาย ชั่งเศษเปลือกที่หั่นเตรียมไว้ 224 กรัม (1 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด) และใส่น้ำโดยอัตราส่วนเปลือกต่อน้ำเท่ากับ 1:1 ผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องบดปั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารละลายเศษเนื้อ

นำสารละลายเศษเนื้อมาวิเคราะห์หาค่าต่างๆ (ภาคผนวก ก) ดังนี้

- 1.) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)
- 2.) ค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)
- 3.) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids, TS)
- 4.) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (total volatile solids, TVS)
- 5.) ปริมาณกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid, VFA)

3.5.3 การทดสอบระบบถังหมัก

การตรวจสอบรอยรั่วของถังเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับถังหมักแบบไร้ออกซิเจน เพราะในกระบวนการหมักต้องทำในระบบปิดอย่างแท้จริง หากเกิดรอยรั่วจะทำให้ก๊าซชีวภาพออกรั่วตามรูรั่วต่างๆ ทำให้เกิดแรงดันไม่มากพอที่จะทำให้ก๊าซไปแทนที่น้ำ ทำการทดสอบโดยการเติมน้ำให้สูงกว่ารอยต่อต่างๆ แล้วสังเกตการรั่วของน้ำ และทำการทดสอบรอยรั่วของก๊าซโดยการใช้น้ำฟองสบู่ ทาบริเวณรอยต่อต่างๆ แล้วทำการเป่าลม สังเกตฟองสบู่ และอุดรอยรั่วด้วยกาวยิปซัม

3.5.4 การเริ่มต้นดำเนินระบบและสถานะในการดำเนินระบบ

ในการทดลองนี้ใช้ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยใช้ถังหมักแบบ continuous stirred tank reactor ซึ่งถังหมักกรดมีปริมาตรความจุ 36.14 ลิตรและมีปริมาตรการหมัก 24.4 ลิตร ต่อเข้ากับถังหมักก๊าซ มีปริมาตรความจุ 67.36 ลิตรและปริมาตรการหมัก 61.00 ลิตรจำนวน 1 ถัง การเริ่มต้นระบบ เตรียมตะกอนจุลินทรีย์ของถังหมักก๊าซและปรับสภาพให้พร้อมใช้งาน และใส่ในถังหมักก๊าซจนเต็ม สำหรับถังหมักกรด ซึ่งเผือก 244 กรัม หรือเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด แล้วผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 พร้อมปั่นให้ละเอียด ใส่ในถังหมักกรดที่มีน้ำกลั่นใสจนเต็มถัง หมักไว้จนสารละลายเผือกมีค่าพีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 หลังจากทำการเตรียมสารละลายทั้งสองถังพร้อมที่จะใช้งาน ให้ทำการเติมเผือก 244 กรัม หรือเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด แล้วผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 พร้อมปั่นให้ละเอียด ป้อนใส่ระบบ และมีความถี่ในการเติมสารละลายเศษอาหาร 1 วันต่อครั้ง โดยทำการทดลองเป็นระยะเวลา 75 วัน

3.5.5 วิธีการวิเคราะห์และเก็บข้อมูล

ตัวอย่างสารละลายเศษฝือกที่ถูกป้อนในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ จะถูกนำไปวิเคราะห์หา ค่าพีเอช ค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ปริมาณความเป็นด่างทั้งหมด ทุกๆ 3 วัน จนระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยทำการพิจารณาจากค่าก๊าซชีวภาพที่ได้ในแต่ละวัน แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพความเหมาะสมของระบบ โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง 3 ซ้ำ ต่อการทดลอง 1 ครั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

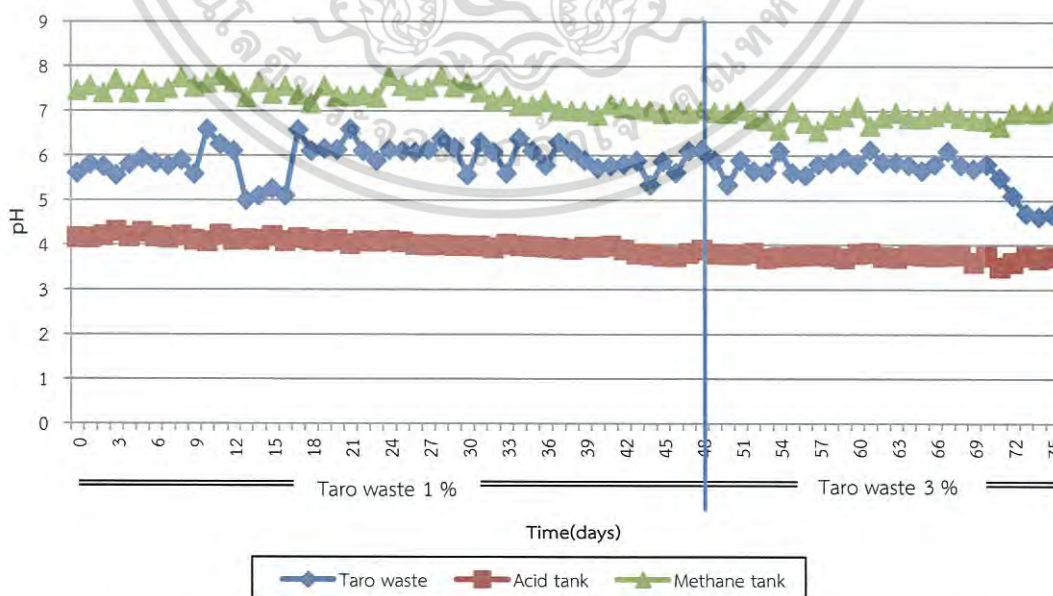
ผลการวิจัยและและการอภิปรายผล

4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบทั้งหมด

ในระหว่างการทดลอง ตัวอย่างสารละลายเศษฝือกที่เข้าสู่ระบบ ในถังหมักกรด และถังหมักก๊าซจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าพีเอช ปริมาณซีโอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย เมื่อปริมาณก๊าซค่อนข้างคงที่จะเริ่มทำการเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบ โดยผลการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ มีดังนี้

4.1.1 ค่าพีเอช

ผลของค่าพีเอช ของสารละลายเศษฝือกที่เข้าสู่ระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ ตลอดการทดลองที่ควบคุมการเติมสารละลายเศษฝือกที่ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าค่าพีเอชของสารละลายเศษฝือกอยู่ในช่วง 4.63–6.59 สำหรับในถังหมักกรดอยู่ในช่วง 4.30–3.50 ซึ่งมีค่าพีเอชลดลงเมื่อเทียบกับค่าพีเอชของสารละลายเศษฝือก เนื่องจากการปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหยที่เพิ่มขึ้นจากการย่อยสารอินทรีย์ (Rao *et al.*, 2000) ค่าพีเอชของถังหมักก๊าซอยู่ในช่วง 6.58–7.78 ถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม เพราะช่วงที่เหมาะสมของการผลิตก๊าซมีเทนคือ 6.5–8.2 ซึ่งเหมาะสมสำหรับกระบวนการ methanogenesis (Huang *et al.*, 2015) ค่าพีเอชเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่สุดสำหรับความเสถียรภาพของระบบ ซึ่งมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่ม acidogenic และ methaogenic (Liu *et al.*, 2008)

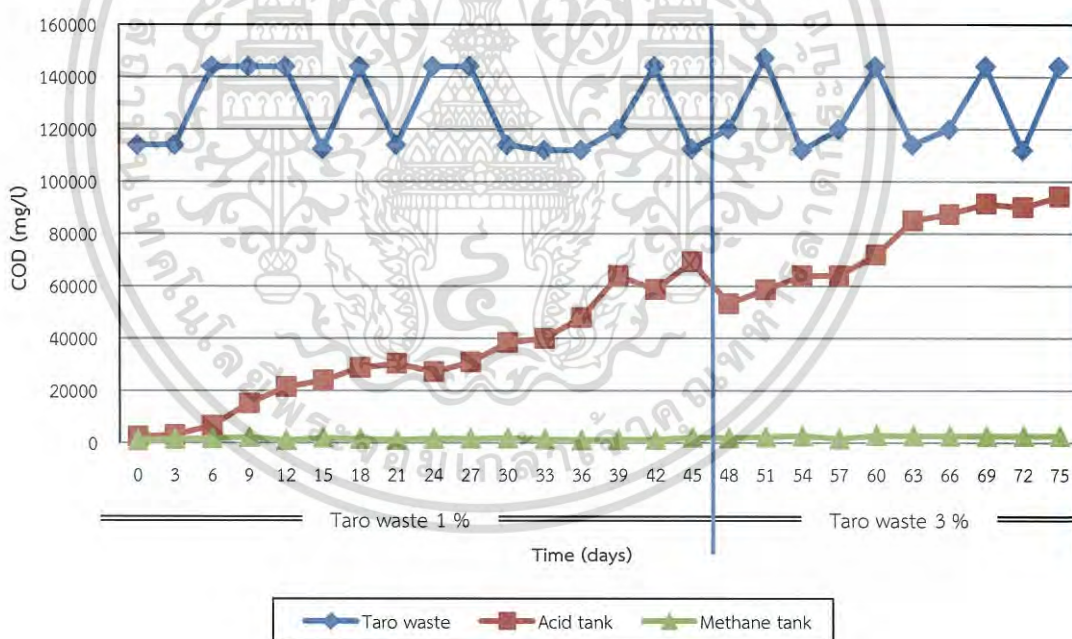


รูปที่ 4.1 ค่าพีเอชของสารละลายเศษฝือกที่เข้าสู่ระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ปริมาณซีโอดี

ปริมาณซีโอดีของสารละลายเศษเปลือกที่เติมเข้าสู่ระบบ ในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ ควบคุมการเติมสารละลายเศษเปลือกสู่ระบบโดยใช้เศษเปลือกที่ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าปริมาณซีโอดีของสารละลายเศษเปลือกอยู่ในช่วง 112,000-147,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังหมักกรดมีปริมาณซีโอดีอยู่ในช่วง 2,400-94,300 มิลลิกรัมต่อลิตรและถังหมักก๊าซปริมาณซีโอดีอยู่ในช่วง 907-2,880 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพบว่าในถังหมักก๊าซนั้นปริมาณซีโอดีลดลง ในขณะที่ปริมาณซีโอดีของถังหมักกรดเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับสารละลายเศษเปลือก เมื่อทำการควบคุมการเติมสารละลายเศษเปลือกสู่ระบบโดยใช้เศษเปลือกที่ 1 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด ปริมาณซีโอดีลดลง จาก 127,060 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 1,528 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 98.8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการควบคุมการเติมสารละลายเศษเปลือกที่ใช้เศษเปลือกที่ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด ค่าซีโอดีลดจาก 127,720 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 2,479 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 98.01 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า การทำงานของระบบสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์จากสารละลายเศษเปลือกได้เป็นอย่างดี (ตารางที่ 4.1)



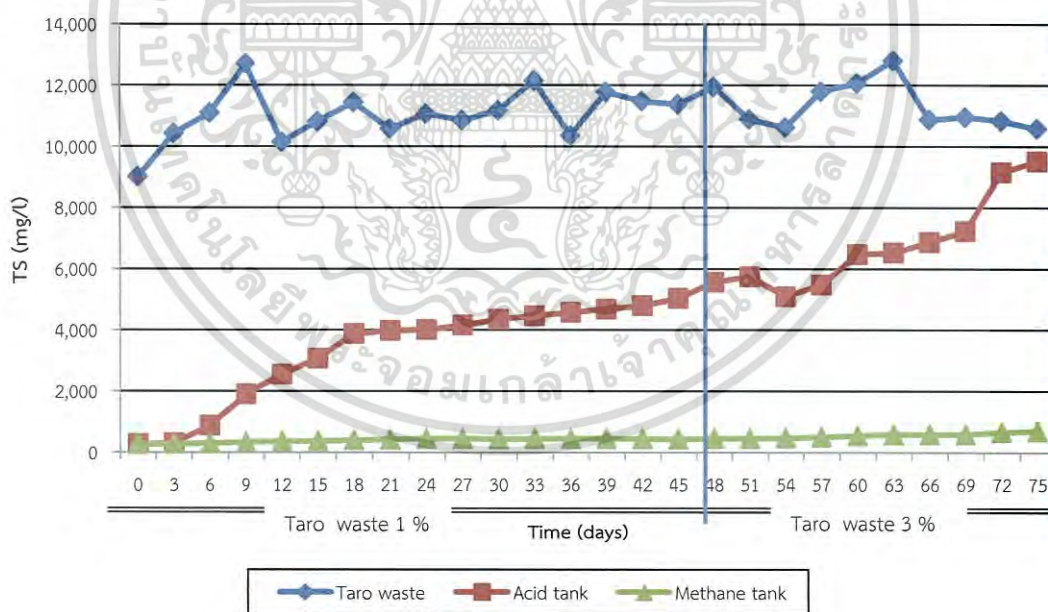
รูปที่ 4.2 ปริมาณซีโอดีของสารละลายเศษเปลือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมด

ปริมาณของแข็งทั้งหมดของสารละลายเศษเปลือกที่เติมเข้าสู่ระบบ ในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ ซึ่งควบคุมการเติมสารละลายเศษเปลือกสู่ระบบโดยใช้ปริมาณเศษเปลือกที่ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด พบว่าของแข็งทั้งหมดของสารละลายเศษเปลือกอยู่ในช่วง 9,008 - 12,808 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังหมักกรดมีปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 267 - 9,518 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซปริมาณของแข็งอยู่ในช่วง 263 - 698 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.3

เมื่อทำการควบคุมการเติมเศษเปลือกสู่ระบบโดยใช้เศษเปลือกที่ 1 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรดของแข็งทั้งหมดลดลงจาก 11,029 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 392 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 96.44 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการควบคุมการเติมสารละลายเศษเปลือกโดยใช้เศษเปลือกที่ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลงจาก 11,340 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 558 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 95.08 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สารละลายของเหลวที่ออกจากถังหมักก๊าซมีลักษณะเจือจางขึ้น แสดงให้เห็นว่าการทำงานของระบบสามารถลดปริมาณของแข็งทั้งหมดจากสารละลายเศษเปลือกได้ (ตารางที่ 4.1)

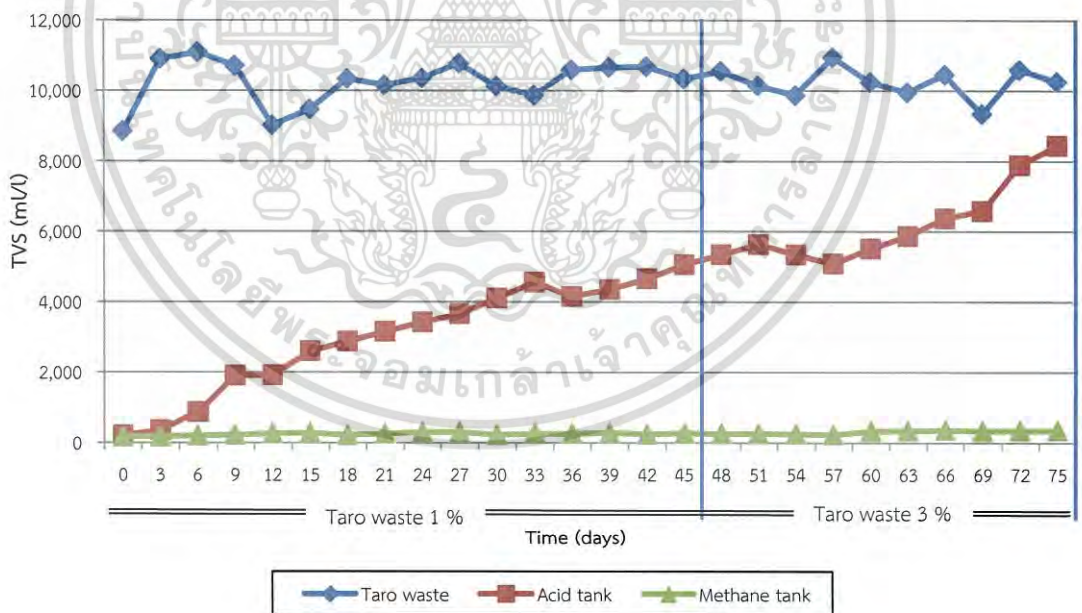


รูปที่ 4.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของสารละลายเศษเปลือกที่เข้าสู่ระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ

4.1.4 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด

ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของสารละลายเศษฝือกที่เติมเข้าสู่ระบบ ในถังหมักกรด และ ถังหมักก๊าซ ซึ่งควบคุมการเติมสารละลายเศษฝือกเข้าสู่ระบบโดยใช้ปริมาณเศษฝือกที่ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด พบว่าปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของสารละลายเศษฝือกอยู่ในช่วง 8,850 - 10,950 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังหมักกรดมีปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด อยู่ในช่วง 200 - 8,439 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด อยู่ในช่วง 167 - 353 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.4

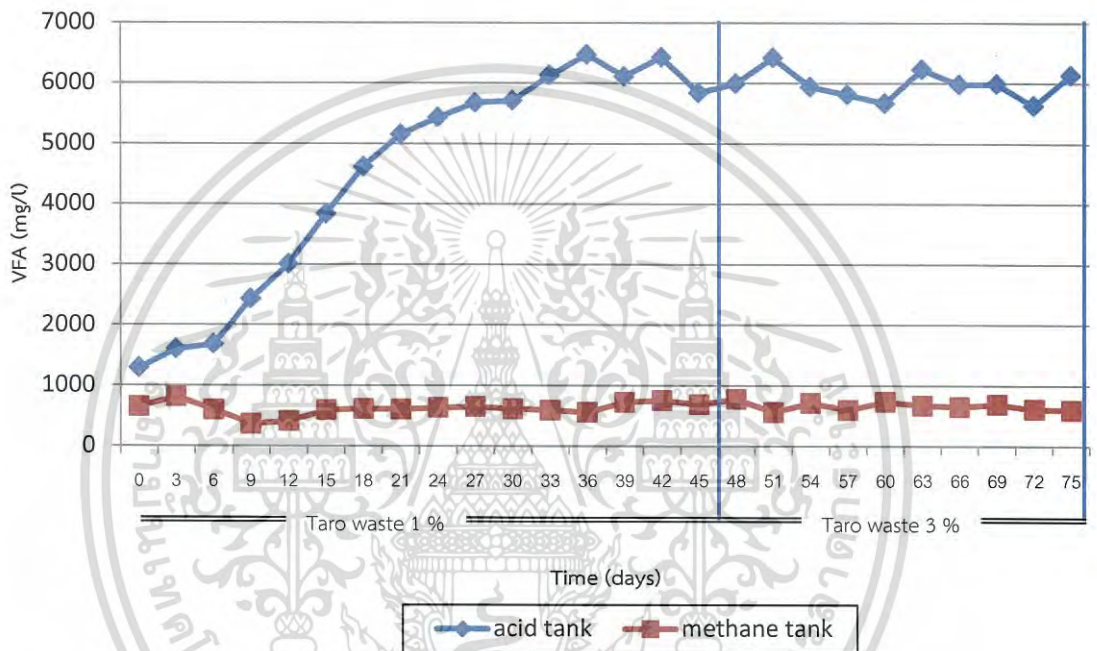
เมื่อทำการควบคุมการเติมสารละลายเศษฝือกเข้าสู่ระบบโดยใช้เศษฝือกที่ 1 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดลดจาก 10,247 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 241 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 97.65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการควบคุมการเติมสารละลายเศษฝือกเข้าสู่ระบบโดยใช้เศษฝือกที่ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดลดลงจาก 10,237 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็น 97.06 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการทำงานของระบบสามารถลดปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดจากสารละลายเศษฝือกได้ (ตารางที่ 4.1)



รูปที่ 4.4 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของสารละลายเศษฝือกที่เข้าระบบในถังหมักกรด และถังหมักก๊าซ

4.1.5 ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย

ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย (volatile fatty acid, VFA) ในถังหมักกรด และถังหมักก๊าซ ซึ่งควบคุมการเติมสารละลายเศษฝือกสู่ระบบโดยใช้ปริมาณเศษฝือกที่ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหยนี้คิดในรูปของกรดแอสติก พบว่าปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย ของถังหมักกรด อยู่ในช่วง 1,287 – 6,470 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย อยู่ในช่วง 363 – 810 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยของสารละลายเศษฝือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ

4.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น

ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบ รวมถึงค่าความสัมพันธ์ต่างๆ และประเมินความเหมาะสมของการควบคุมปริมาณเฟือกที่ป้อนสู่ระบบในแต่ละวัน ที่ 1 และ 3 เพอร์เซ็นต์ ทำการบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพ คิดเป็นค่าเฉลี่ยของก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.7 และมีการตรวจสอบโดยการจุดไฟเพื่อเป็นการยืนยันได้ว่าก๊าซที่ผลิตสามารถนำไปใช้งานได้ แสดงดังรูปที่ 4.8

ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้จากการแทนที่น้ำ โดยวัดจากปริมาณน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยก๊าซ โดยในแต่ละวันจะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพในหน่วยลิตรต่อวัน ภายใต้สภาวะทดลอง พบว่าการเติมเศษเฟือกที่ 1 เพอร์เซ็นต์ มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยทั้งหมด 3.64 ลิตรต่อวัน

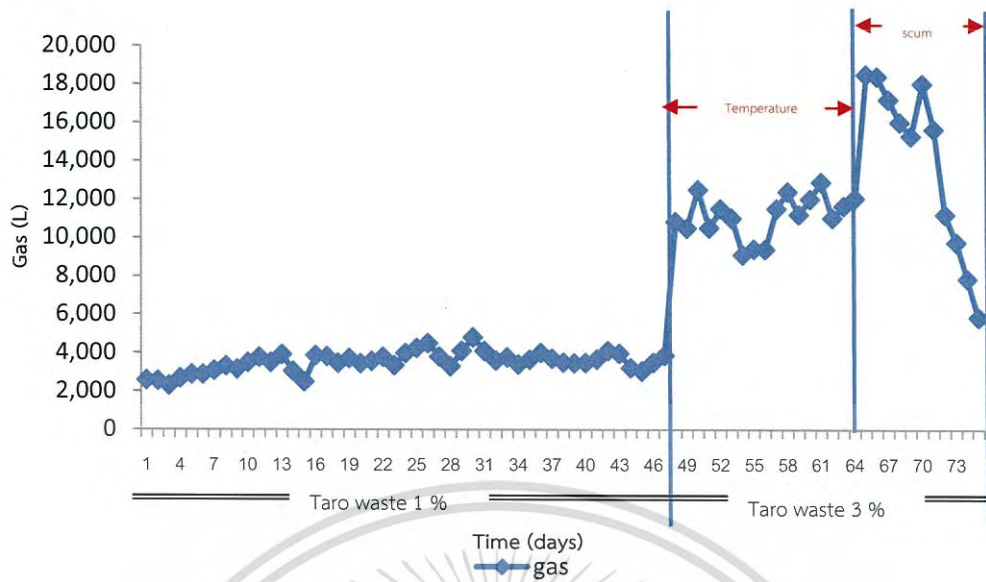
เมื่อเพิ่มปริมาณที่ใส่เป็น 3 เพอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด ปริมาณก๊าซที่ได้ในแต่ละวันมีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยทั้งหมด 11.43 ลิตร(ตารางที่ 4.1) แต่เกิดปัญหาที่ต้องแก้ไข คือเกิดฝ้าตะกอนของวัตถุบลอยบนผิวหน้า (scum)(รูปที่ 4.6) ทำให้ขัดขวางการไหลของสารละลายเศษเฟือกในถังหมักกรดไปสู่ถังหมักก๊าซ ถึงแม้ว่าจะมีการกวนผสมก็ตาม และเมื่อเวลานานขึ้นทำให้ฝ้าตะกอนมีลักษณะแข็งและไม่สามารถไหลลงในถังหมักก๊าซทำให้สารละลายเศษเฟือกในถังหมักกรดมีปริมาณการสะสมมากจนไม่สามารถใส่สารละลายเศษเฟือกเพิ่มได้

จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ในที่ 1 และ 3 เพอร์เซ็นต์มีค่าเฉลี่ยคือ 3.64 และ 11.43 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้ในแต่ละวันคือ 66.7 เพอร์เซ็นต์ (ฐิติวรรณ และคณะ, 2557) ปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จะเท่ากับ 2.43 และ 7.62 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 แสดงฝ้าตะกอนของสารละลายเศษเฟือกลอยบนผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดการทดลอง



รูปที่ 4.8 เปลวไฟที่ได้จากการหมักการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษฝัอก โดยกระบวนการย่อยสลาย ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

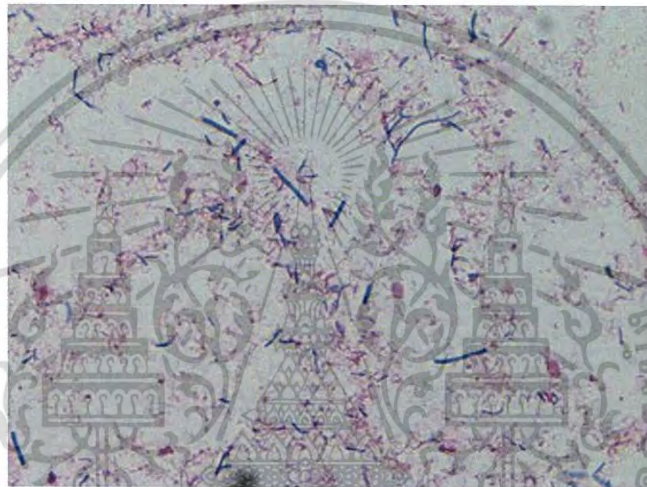
ตารางที่ 4.1 ผลสรุปการทดลองเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของระบบการย่อยภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

Parameter	1	2
Taro (%)	1	3
pH		
Food waste	5.91	5.65
Acid tank	4.03	3.74
Methane	7.36	6.86
COD		
Food waste(mg/l)	127,060	127,720
Acid tank (mg/l)	31,778	76,037
Methane tank (mg/l)	1,528	2,479
Removal (%)	98.80	98.01
TS		
Food waste(mg/l)	11,029	11,340
Acid tank (mg/l)	3,305	6,766
Methane tank (mg/l)	392	558
Removal (%)	96.44	95.08
TVS		
Food waste(mg/l)	10,247	10,237
Acid tank (mg/l)	2,989	6,208
Methane tank (mg/l)	241	300
Removal (%)	97.65	97.06
VFA		
Acid tank (mg/l)	4,462	5,980
Methane tank (mg/l)	614	658
Total gas production (l/d)	3.64	11.43

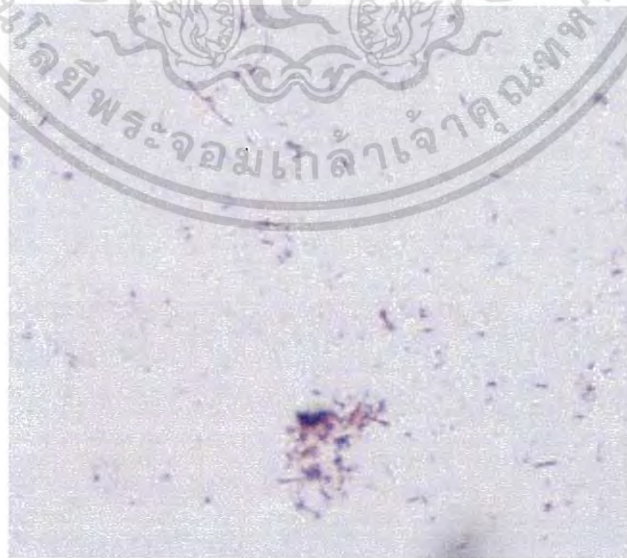
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ตะกอนแบคทีเรียที่พบในถังหมัก

จากการส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ของสารละลายทั้งสองถังหมัก คือ ถังหมักกรด และถังหมักก๊าซซึ่งทั้งสองถังมีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน แบคทีเรียที่ตรวจพบจึงค่อนข้างมีความแตกต่างกัน ซึ่งในถังหมักกรดจะมีแบคทีเรียที่ผลิตกรดอินทรีย์ระเหย จากการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของแบคทีเรีย โดยวิธีการย้อมแกรม ส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า พบแบคทีเรียที่มีลักษณะเซลล์เป็นท่อน(rod) (รูปที่ 4.9) ซึ่งในถังหมักก๊าซจะมีแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน จากที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบแบคทีเรียที่มีลักษณะเซลล์เป็นท่อน(rod) และกลม(cocci) (รูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.9 แบคทีเรียที่พบในถังหมักกรด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.10 แบคทีเรียที่พบในถังหมักก๊าซ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตขนมปัง โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน พบว่าเศษเปลือกที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสามารถนำมาผลิตก๊าซชีวภาพได้และการควบคุมปัจจัยที่เหมาะสมของการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนก็เป็นสิ่งสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ

ในการทดลองของ Rio และคณะ (2016) ซึ่งเป็นการทดลองการเปรียบเทียบระหว่าง การใช้ อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำในการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน พบว่าการหมักที่อุณหภูมิต่ำมีการลดลงของค่า TVS ค่อนข้างช้า ถึงแม้จะมีการปรับสภาพก่อนการหมักก็ตาม แต่ในขณะที่การหมักที่อุณหภูมิสูงมีประสิทธิภาพการย่อยสลายได้ดีกว่า แต่ข้อเสียคือแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนอ่อนแอต่อ อุณหภูมิสูง ซึ่งในถังหมักแบบสองขั้นตอน สามารถนำมาประยุกต์โดยการควบคุมอุณหภูมิของถังหมัก กรดและก๊าซในสภาวะที่มีความแตกต่างกันได้

ค่าพีเอช มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเจริญของแบคทีเรียและการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อย ตามการทดลองของ Romanowska และคณะ (2012) ได้มีการปรับสภาพของวัตถุดิบก่อนที่จะนำไปหมักแบบไร้ออกซิเจน โดยการใช้เอนไซม์มาช่วยในการย่อยวัตถุดิบให้มีโมเลกุลเล็กลง และการปรับสภาพพีเอช ของถังหมักให้เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียและการทำงานของเอนไซม์ สามารถส่งเสริมให้ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น

ความเร็วรอบของการกวนก็เป็นปัจจัยหนึ่ง ซึ่งมีผลต่อการผสมให้เข้ากันระหว่างวัตถุดิบ แบคทีเรียซึ่งความเร็วรอบที่ 10 รอบต่อนาที อาจช้าเกินไปสำหรับทำให้เกิดการกวนผสมระหว่าง แบคทีเรียกับเปลือกอย่างสมบูรณ์ และขนาดของวัตถุดิบก่อนการหมักก็เป็นส่วนสำคัญสำหรับการย่อยเช่นกัน ในการทดลองของสมศักดิ์และสุพล (2554) พบว่าการปรับสภาพขนาดของวัตถุดิบก่อนทำการหมักนั้นมีผลต่อการผลิตก๊าซซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการย่อยโดยสารเคมีก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก และปัญหาที่ประสบเหมือนกันคือ การเกิดตะกอนลอยบนผิวหน้าซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยหลายวิธี โดยวิธีของ สมศักดิ์และสุพล (2554) คือการเติมสารละลาย Potassium aluminium phosphate 100 กรัมลงในส่วนผสมของวัตถุดิบที่เติมเข้าถังหมักกรดทุกสัปดาห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองของ Schafer *et al.* (1999) ศึกษาการย่อยของขยะอินทรีย์ที่เป็นของแข็ง ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน(continuous stirred tank reactor, CSTR) พบว่าระบบการควบคุมปัจจัยต่างๆ การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ดีกว่า และประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าขั้นตอนเดียวอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกเหลือทิ้ง โดยใช้ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน เปรียบเทียบระหว่างการบ้อนสารละลายเศษเปลือกที่ 1 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด และ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย โดยเฉลี่ยเท่ากับ 98.41 95.76 และ 97.36 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ พีเอชของสารละลายเศษเปลือกที่เข้าระบบมีค่าเฉลี่ย 5.78 ถังหมักกรดพีเอชมีค่าเฉลี่ย 3.89 และถังหมักก๊าซพีเอชมีค่าเฉลี่ย 7.11

ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการควบคุมปริมาณสารละลายที่บ้อนสู่ระบบที่ 1 เปอร์เซ็นต์และ 3 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 3.64 และ 11.43 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งปริมาณผลผลิตก๊าซที่บ้อนเข้าสู่ระบบ 3 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับ 1 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณอัตราส่วนเพิ่มมากขึ้น 3.14 เท่า แต่ในการทดลองระบบที่ 3 เปอร์เซ็นต์ ประสบปัญหาการทดลอง คือเมื่อระยะเวลาผ่านไป 17 วัน เกิดการลอยตัวของตะกอนสารละลายทำให้ขัดขวางการไหลของของเหลวภายในถังหมักกรดไปสู่ถังหมักก๊าซทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้มีค่าผิดเพี้ยน จนทำให้เกิดการกักเก็บสารละลายเศษเปลือกในถังหมักกรดมากเกินไปจนไม่สามารถใส่สารละลายเศษเปลือกได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากสรุปผลการวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเปลือกเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตขนมปัง โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมดังนี้

1. อัตราการบ้อนสารละลายเศษเปลือกที่สามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพควรอยู่ใน 1 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรด แต่ไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์
2. หากต้องการใช้อัตราการบ้อนสารละลายเศษเปลือกที่ 3 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะต้องปรับความถี่ในการบ้อนปริมาณสารละลายให้เว้นระยะนานขึ้น เพื่อให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารละลายเศษเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. เพิ่มอัตราความเร็วของการกวนให้เร็วขึ้นเพื่อให้สารละลายเปลือกในถังหมักเกิดการผสมกันแบคทีเรียได้ดีขึ้น
4. สามารถเติม Potassium aluminium phosphate 100 กรัมลงในส่วนผสมของวัตถุดิบที่บ้อนเข้าถังหมักกรด สัปดาห์ละครั้ง สามารถแก้ปัญหาการลอยบนผิวหน้าของวัสดุหมักได้ระดับหนึ่ง (สพฤกษ์และสมศักดิ์, 2554)

5. มีการปรับสภาพวัตถุดิบตั้งต้นให้เหมาะสมก่อนเข้าสู่การหมักแบบไร้ออกซิเจน ได้แก่
1. การทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กเช่น การใช้เครื่องมือบดที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น
การใช้สารเคมีในการย่อย
 2. ปรับค่าพีเอชของวัตถุดิบให้เหมาะสมกับแบคทีเรียในถังหมัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2554. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานจากขยะ. กรุงเทพฯ: เอเบิล คอนซัลแตนท์.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2556. คู่มือไบโอแก๊สเชฟตี. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

กลุ่มงานเคมีสำนักวิจัยและพัฒนา. 2550. คู่มือการปฏิบัติงานการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. กรุงเทพฯ : สำนักวิจัยและพัฒนากรมชลประทาน.

จินตนา จิตรภูภักดี. 2552. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและพัลพ์สับประรดโดยการหมักแบบ 2 ขั้นตอน. กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ฐิติวรรณ กันเมียน, ญัฐพร ชัยธีรสุเวท, ญัฐวดี ศรีคำดี และพิชามญชู่ โรจนกุลสุวรรณ. 2557. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกเผือกโดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 2 ขั้นตอน. กรุงเทพฯ: โครงการพิเศษวิทยาศาตรบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และวิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธีศักดิ์. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เพ็ญศิริ ประชาภิตติกุล. 2551. ผลของอุณหภูมิและอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

มาลินี พิทักษ์, สมศรี บุญเรือง และรังสิมันต์ สัมฤทธิ์. 2541. การปลูกเผือก. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการเกษตร

ยุพา ต้นทวี. 2552. การควบคุมมลพิษทางน้ำ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

พาริตา พรหมมา, ดุชนิ ธนะบริพัฒน์ และปราโมทย์ ศิริโรจน์. 2557. “การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์”. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 23(2) :31-50.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

สมศักดิ์ พิทักษานุรัตน์ และสุพล บ่อคุ้ม. 2557. "อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ของการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1". การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่15.หน้า 272 วิทยาลัยการปกครองท้องถิ่น มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, 28 มีนาคม 2557

อรณพ นพรัตน์. 2534. ผลของวิธีการป้อนสารอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์แบบมีตัวกรอง. กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อาริยา สิริชวนกุล. 2546. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Arsova, L. 2010. Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product. New York: Columbia University.

Holliman, P.J., Jones, D.L., Ward, A.J. and Hobbs, P.J. 2008. "Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources". *Bioresource Technology*. 99 : 7928– 7940.

Huang, Y., Zhao, M., Huang, Z., Miao, H., Xu, Z., Ruan, W. and Yang, L. 2015. "Enhancing biogas generation performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment". *International Biodeterioration & Biodegradation*. 105 : 153-159.

Laurila, K. 2013. Optimization of growth conditions for a recombinant keratinase producing bacterial strain. Borås: University of Borås.

Liu, C.F., Yuan, X.Z., Zeng, G.M., Li, W.W. and Li, J., 2008. "Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste". *Bioresource Technology*. 99 : 882-888.

Onwueme, I.C. 1994. Tropical root and tuber crops: production, perspectives and future prospects. Rome: FAO Plant production and protection paper.

Rao, M.S., Singh S.P., Singh A.K. and Sodha, M.S. 2000. "Bioenergy conversion studies of the organic fraction of MSW assessment of ultimate bioenergy production potential of municipal garbage". *Applied Energy*. 66 : 75-87.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Río, R.S.D., García, M.P. and Alonso, R.M. 2016. "Thermophilic and mesophilic temperature phase anaerobic codigestion (TPAcD) compared with single-stage co-digestion of sewage and sugar beet pulp lixiviation". *Biomass and Bioenergy*. 93 : 107-115.
- Romanowska, I.M. Kowalska, K. Ski, Z. 2012. "Enzymatic pretreatment of lignocellulosic wastes to improve biogas production". *Waste Management*. 32 : 1131-1137.
- Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R. and Seadi, T.A. 2008. *Biogas Handbook*. Esbjerg: University of Southern Denmark.
- Saha, U.K., Dewan, A., Kalita, P., Buragohain, B. and Mahanta, P. 2005. "Discussion on factors affecting biogas production and field investigation of a novel duplex digester". *Solar Energy Society of India*. 15(2) : 1-12.
- Schafer, J., Schmid-Staiger, U., Trosch, W. and Schober, G. 1999. "One and two-stage digestion of solid organic waste". *Water Research*. 33(3) : 854-860.
- Schnürer, A. and Jarvis, A. 2010. *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. British Columbia: Innovation and Climate Action Branch. Ministry of Agriculture and Lands.
- Visvanathan, C., Abeynayaka, A. and Wijekoon, K.C. 2011. "Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor". *Bioresource Technology*. 102 : 5353-5360.
- Zhao, C. 2011. *Effect of Temperature on Biogas Production in Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater UASB Systems in Hammarby Sjöstadverket*. Stockholm: Department of Land and Water Resource Engineering. Royal institute of Technology.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

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. เครื่องอังน้ำ (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 ชั่งน้ำหนักของถ้วยระเหยแต่ละใบ
2. เติมปริมาตรน้ำตัวอย่างที่เหมาะสม (50-100 มิลลิลิตร) ลงในถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักจากข้อ 1
3. นำถ้วยระเหยที่มีตัวอย่างไปตั้งบนเครื่องอังน้ำจนกระทั่งน้ำในถ้วยระเหยหมด จากนั้นนำถ้วยระเหยไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนแห้งและมีน้ำหนักคงที่ ทำให้จานระเหยเย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือ น้ำหนักของของแข็งทั้งหมด นำไปคำนวณ

การคำนวณ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยระเหย (evaporating dish) ซึ่งมีความจุตั้งแต่ 10-100 มิลลิลิตร อาจจะเป็นถ้วยกระเบื้อง (porcelain) หรือถ้วยพลาตินัม (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 ± 50 องศาเซลเซียส

วิธีการวิเคราะห์

1. หลังจากผ่านการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด จนน้ำหนักคงที่แล้ว นำถ้วยระเหยดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ค่าของแข็งระเหยง่าย โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 ± 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น นำไปชั่งน้ำหนักสารที่เหลืออยู่ 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) โดยวิธีฟลักซ์แบบปิด (กลุ่มงานเคมี สำนักวิจัยและพัฒนา, 2550)

การเตรียมสารเคมี

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

ชั่งสารโพแทสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) (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 กิโลกรัมของกรดซัลฟูริกเข้มข้น ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาร Ag_2SO_4 ละลายจนหมด ถ้าต้องการละลายให้เร็วขึ้นก็อาจจะใช้วิธีการกวนอย่างต่อเนื่องซึ่งจะละลายสาร Ag_2SO_4 ได้ภายในเวลา 30 นาที

3. Ferroin Indicator Solution

ละลาย 1,10 - phenanthroline monohydrate ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) 1.485 กรัม และสารเฟอร์รัสซัลเฟต ($\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 695 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร

4. กรดซัลฟามิก (Sulfamic acid)

เพื่อใช้ในการกำจัดไนโตรที่ในตัวอย่างน้ำ โดยใส่กรดซัลฟามิก 10 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิกรัมของไนโตรที่ไนโตรเจน โดยใส่ในภาชนะย่อยสลายก่อนนำไปย่อย

5. Potassium Hydrogen Phthalate (KHP) Standard

ละลาย Potassium hydrogen phthalate ($\text{HCOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$) (อบแห้งจนน้ำหนักคงที่ ที่อุณหภูมิ 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 ต่อ มิลลิกรัม สารละลายนี้สามารถเก็บไว้ในตู้เย็นได้ 3 เดือน

6. Ferrus ammonium sulfate ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$)

สาร $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ 39.2 กรัมด้วยน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป 20 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

- ล้างหลอดย่อยด้วยสลายด้วย 20% H_2SO_4 เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์
- เลือกใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่าง และสารเคมีที่เหมาะสมดังตาราง

ขนาดของหลอดย่อยสลาย	น้ำตัวอย่าง (ml)	สารละลายในการย่อยสลาย (ml)	กรดซัลฟิวริกรีเอเจนท์ (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

3. นำน้ำตัวอย่างใส่หลอดย่อยสลายที่เตรียมไว้ และเติม digestion reagent

4. ค่อยๆเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ลงไป 3.5 มิลลิลิตร ให้ชั้นของกรดอยู่ที่ชั้นของน้ำตัวอย่าง และ digestion reagent

5. ปิดฝาหลอดย่อยสลายด้วยฝาเกลียว นำเข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

6. เตรียมแบลนค์ โดยใช้ น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง ทำตามขั้นตอนเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ไตเตรตหาปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ ที่เหลือ หรือมาเกินพอดีด้วยสารละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$ โดยใช้สารละลายเฟอร์โรอินเป็นอินดิเคเตอร์ ที่จุดยุติสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ บันทึกปริมาตรที่ไทเทรตขณะที่สารละลายเริ่มเปลี่ยนสีเป็นน้ำตาลแดงทันที

8. คำนวณหาค่าซีไอดีจากสูตร

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

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

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องมือวัดพีเอช
2. เครื่องเซนติฟิวจ์
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. หาความเป็นด่างโดยการไตเตรตตัวอย่างกับสารละลาย มาตรฐาน H_2SO_4 0.05 N จนพีเอชมีค่าเป็น 4 จดปริมาตรกรดที่ใช้ไป คำนวณความเป็นด่างทั้งหมด แล้วไตเตรตต่อไปจนพีเอชเป็น 3.5 (ทำการกวนสารละลายตลอดเวลา)
4. ต้มไล่ CO_2 เป็นระยะเวลาประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. ไตเตรตต่อด้วย สารละลายมาตรฐาน NaOH 0.05 N จนพีเอชเป็น 4 แล้วไตเตรตต่อไปจนพีเอชเป็น 7 (จดปริมาณสารละลายมาตรฐานต่างที่ใช้ตั้งแต่พีเอช 4 ถึง 7)

การคำนวณ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่ากรดอินทรีย์ระเหย

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

กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัม/ลิตร as CH_3COOH) = ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมด \times 1.5

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

กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัม/ลิตร as CH_3COOH) = ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมด \times 1.0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ค่าพีเอชของสารละลายเปลือกเปลือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ

Time (days)	Taro waste	Acid tank	Methane tank	Time (days)	Taro waste	Acid tank	Methane tank
0	5.60	4.16	7.45	40	5.72	3.95	6.90
1	5.80	4.15	7.56	41	5.77	3.98	7.14
2	5.75	4.20	7.40	42	5.80	3.89	7.07
3	5.56	4.30	7.70	43	5.88	3.80	7.04
4	5.80	4.18	7.40	44	5.34	3.78	7.01
5	5.93	4.28	7.70	45	5.86	3.75	6.94
6	5.83	4.18	7.41	46	5.62	3.74	6.97
7	5.78	4.15	7.50	47	6.10	3.81	6.95
8	5.90	4.20	7.74	48	6.12	3.89	7.01
9	5.58	4.11	7.53	49	5.89	3.80	6.97
10	6.58	4.07	7.62	50	5.34	3.79	6.95
11	6.25	4.22	7.78	51	5.89	3.78	7.01
12	6.10	4.11	7.64	52	5.65	3.82	6.83
13	5.00	4.12	7.30	53	5.63	3.70	6.78
14	5.10	4.11	7.64	54	6.10	3.73	6.58
15	5.25	4.19	7.38	55	5.61	3.75	6.98
16	5.10	4.08	7.55	56	5.55	3.76	6.73
17	6.57	4.15	7.35	57	5.80	3.77	6.55
18	6.10	4.10	7.17	58	5.84	3.75	6.81
19	6.15	4.07	7.56	59	5.95	3.70	6.88
20	6.13	4.11	7.32	60	5.82	3.80	7.08
21	6.59	4.01	7.32	61	6.12	3.82	6.67
22	6.10	4.08	7.35	62	5.85	3.73	6.85
23	5.88	4.07	7.30	63	5.85	3.71	6.96
24	6.13	4.09	7.78	64	5.79	3.78	6.84
25	6.10	4.06	7.56	65	5.66	3.76	6.83
26	6.08	4.00	7.46	66	5.80	3.75	6.89
27	6.13	3.99	7.53	67	6.10	3.76	6.98
28	6.38	4.00	7.78	68	5.78	3.77	6.85
29	6.18	3.98	7.53	69	5.70	3.60	6.80
30	5.56	3.98	7.62	70	5.80	3.75	6.78
31	6.29	3.97	7.42	71	5.50	3.50	6.65
32	6.08	3.93	7.22	72	5.10	3.60	6.95
33	5.60	4.01	7.33	73	4.70	3.75	6.97
34	6.38	3.98	7.11	74	4.63	3.69	6.95
35	6.10	3.96	7.12	75	4.68	3.73	6.98
36	5.78	3.95	7.23				
37	6.29	3.93	7.01				
38	6.10	3.90	7.00				
39	5.89	3.95	6.99				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ปริมาณซีไอดีของสารละลายเปลือกเผือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ

Time (days)	Taro waste (mg/l)	Acid tank (mg/l)	Methane tank (mg/l)
0	114,000	2,400	907
3	114,000	3,040	1,466
6	144,000	6,624	1,760
9	144,000	15,200	2,240
12	144,000	21,440	1,014
15	112,480	24,000	2,038
18	144,000	28,800	1,534
21	114,000	30,400	1,216
24	144,000	27,200	1,600
27	144,000	30,938	2,672
30	114,000	38,400	1,814
33	112,000	40,000	1,440
36	112,000	48,000	1,120
39	120,000	64,000	1,200
42	144,000	58,720	1,280
45	112,480	69,280	2,140
48	120,000	53,280	1,920
51	147,200	58,640	2,320
54	112,000	64,000	2,720
57	120,000	64,000	1,600
60	144,000	72,000	2,880

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของสารละลายเปลือกเปลือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ

Time (days)	Taro waste (mg/l)	Acid tank (mg/l)	Methane tank (mg/l)
0	9,008	267	263
3	10,425	300	275
6	11,093	871	292
9	12,712	1,904	338
12	10,143	2,545	357
15	10,819	3,071	370
18	11,442	3,872	403
21	10,582	3,980	418
24	11,071	4,010	451
27	10,856	4,153	448
30	11,178	4,350	435
33	12,150	4,465	443
36	10,354	4,575	450
39	11,775	4,685	448
42	11,485	4,793	441
45	11,378	5,038	432
48	11,952	5,569	456
51	10,886	5,745	457
54	10,624	5,095	475
57	11,804	5,483	504
60	12,070	6,475	554
63	12,808	6,523	587
66	10,874	6,875	591
69	10,965	7,225	597
72	10,838	9,155	663
75	10,580	9,518	698

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดของสารละลายเปลือกเปลือกที่เข้าระบบในถังหมักกรด และถังหมักก๊าซ

Time (days)	Taro waste (mg/l)	Acid tank (mg/l)	Methane tank (mg/l)
0	8,850	200	167
3	10,900	350	167
6	11,093	870	192
9	10,712	1,904	216
12	9,016	1,918	264
15	9,472	2,597	273
18	10,341	2,875	212
21	10,158	3,152	253
24	10,356	3,421	298
27	10,778	3,654	298
30	10,123	4,105	223
33	9,874	4,556	252
36	10,593	4,152	254
39	10,661	4,352	278
42	10,687	4,658	238
45	10,341	5,063	265
48	10,553	5,341	254
51	10,142	5,636	256
54	9,874	5,346	243
57	10,950	5,086	224
60	10,245	5,512	325
63	9,956	5,871	334
66	10,458	6,374	353
69	9,340	6,582	329
72	10,594	7,889	337
75	10,256	8,439	345

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยของสารละลายเปลือกเปลือกที่เข้าระบบในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ

Time (days)	Acid tank (mg/l)	Methane tank (mg/l)
0	1,287	650
3	1,600	810
6	1,680	593
9	2,431	363
12	3,005	407
15	3,835	587
18	4,615	613
21	5,150	600
24	5,430	630
27	5,675	646
30	5,710	612
33	6,130	590
36	6,470	555
39	6,110	723
42	6,430	753
45	5,841	687
48	5,990	774
51	6,420	560
54	5,940	710
57	5,810	595
60	5,670	730
63	6,230	670
66	5,980	650
69	5,990	690
72	5,631	610
75	6,135	595

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 ปริมาณก๊าซชีวภาพ

Time (days)	Gas production (l/d)	Time (days)	Gas production (l/d)
1	2,570	41	3,670
2	2,540	42	4,100
3	2,300	43	3,970
4	2,680	44	3,210
5	2,880	45	3,037
6	2,880	46	3,490
7	3,078	47	3,860
8	3,310	48	10,820
9	3,138	49	10,490
10	3,500	50	12,500
11	3,760	51	10,500
12	3,490	52	11,500
13	3,910	53	11,000
14	3,037	54	9,104
15	2,490	55	9,410
16	3,860	56	9,380
17	3,810	57	11,500
18	3,460	58	12,400
19	3,719	59	11,200
20	3,450	60	12,010
21	3,560	61	12,900
22	3,780	62	11,020
23	3,350	63	11,640
24	3,980	64	12,050
25	4,250	65	18,500
26	4,500	66	18,400
27	3,800	67	17,200
28	3,290	68	16,010
29	4,100	69	15,290
30	4,800	70	18,020
31	4,100	71	15,640
32	3,590	72	11,200
33	3,760	73	9,750
34	3,400	74	7,850
35	3,650	75	5,850
36	4,000		
37	3,690		
38	3,500		
39	3,460		
40	3,480		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้