การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

BIOGAS PRODUCTION FROM CASSAVA PULP USING TWO-STAGE ANAEROBIC DIGESTION

วิภาพร คูณทวีเดโช

สาวิตรี พุฒจันทร์

สุดารัตน์ กิจถาวรสวัสดิ์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

BIOGAS PRODUCTION FROM CASSAVA PULP USING TWO-STAGE ANAEROBIC DIGESTION

วิภาพร คูณทวีเดโช

สาวิตรี พุฒจันทร์

สุดารัตน์ กิจถาวรสวัสดิ์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIOGAS PRODUCTION FROM CASSAVA PULP USING TWO-STAGE ANAEROBIC DIGESTION

WIPAPORN KUNTAVEEDECHO
SAWITREE PUTCHAN
SUDARAT KITTAWANSAWAT

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF SCIENCE (ENVIONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน Biogas Production from Cassava Pulp using Two-Stage Anaerobic Digestion
ชื่อนักศึกษา	นางสาววิภาพร คูณทวีเดโช รหัสนักศึกษา 56050755 นางสาวสาวิตรี พุฒจันทร์ รหัสนักศึกษา 56050768 นางสาวสุดารัตน์ กิจถาวรสวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 56050774
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ กรรมการ	
ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน
ชื่อนักศึกษา	นางสาววิภาพร คูณทวีเดโช รหัสนักศึกษา 56050755 นางสาวสาวิตรี พุฒจันทร์ รหัสนักศึกษา 56050768 นางสาวสุดารัตน์ กิจถาวรสวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 56050774
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการ ระบบประกอบด้วยถังหมักสองถังคือ ถังหมักกรดมีปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนมีปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาทีและหยุดกวน 30 นาที เติมกากมันสำปะหลัง 277.3 กรัม โดยปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำประปา (1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรด) ทุกวัน ในขณะเดียวกันสารละลายในถังหมักกรดจะถูกเติมลงในถังหมักก๊าซมีเทนในปริมาตรเดียวกันโดยใช้ปั๊ม ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน จากผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบกากมันสำปะหลังมีแป้ง 90.47±14.70 กรัมต่อลิตรต่อกรัมกากมันสำปะหลังโดยน้ำหนักเปียก หลังจากการหมักในสภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอนโดยใช้ระยะเวลาในการหมักของถังหมักกรด 28 วัน และถังหมักก๊าซมีเทน 74 วัน พบว่า กากมันสำปะหลังมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 19.69±0.19 สภาวะในถังกรดมีค่าพีเอช 3.32-3.40 และถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าพีเอช 6.64-7.40 ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 88.15-93.18 เปอร์เซ็นต์ และการกำจัดของเข็งระเหยง่ายอยู่ในช่วง 94.41-97.16 เปอร์เซ็นต์ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดและกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัดเท่ากับ 244.41±149.09 มิลลิลิตรของก๊าซชีวภาพต่อกรัมของของแข็งระเหย และ 2.83±0.63 ลิตรของก๊าซชีวภาพต่อกรัมของกรดไขมันระเหย ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 6.50±2.05 ลิตรต่อวัน หรือ 23.44±7.39 มิลลิลิตรของก๊าซชีวภาพต่อกรัมกากมันสำปะหลังโดยน้ำหนักเปียก โดยก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ประกอบด้วยก๊าซมีเทน 58.08±8.37 เปอร์เซ็นต์, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25.64±9.75 เปอร์เซ็นต์, ก๊าซออกซิเจน 2.30±2.09 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 414.75±258.15 ส่วนในล้านส่วน

คำสำคัญ : กากมันสำปะหลัง, ก๊าซชีวภาพ, การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน, ถังหมักแบบสองขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Biogas Production from Cassava Pulp using Two-Stage Anaerobic Digestion	
Students	Miss Wipaporn Kuntaveedecho	Student ID 56050755
	Miss Sawitree Putchan	Student ID 56050768
	Miss Sudarat Kittawansawat	Student ID 56050774
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2016	
Advisor	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon	
Co-advisor	Dr. Pramote Sirirote	

Abstract

This special project aims to study biogas production from cassava pulp using two-stage anaerobic digestion system in laboratory scale. The digestion system contained two reactors: acid tank with working volume of 27.73 liters and methane fermenter with working volume of 52.83 liters. Each reactor was mixed with stirrer at 10 rpm for 15 mins and stopped mixing for 30 mins. Cassava pulp, used as substrate, was prepared by mixing 277.3 grams of cassava pulp in 1 liter of tap water (1% w/v of acid reactor). Each day, the substrate was fed into the acid tank at the same amount of hydrolysate from the acid tank transferred to the methane fermenter using peristaltic pump. The experimental period was carried out for 30 days. The results showed that cassava pulp contained starch 90.47±14.70 g L^{-1} per 1 g of cassava pulp by wet weight. In this study, hydraulic retention times (HRT) of acid tank methane fermenter were 28 days and 74 days, respectively. The pH values in acid tank and methane fermenter tank were 3.32-3.40 and 6.64-7.40, respectively. The removal efficiencies of total solids and volatile solids were in the range of 88.15-93.18% and 94.41-97.16%, respectively. Biogas production rates were 244.41±149.09 mL biogas/g VS removed and 2.83±0.63 L biogas/g VFAs removed, respectively. Average was biogas production rate was 6.50±2.05 L/d or 23.44±7.39 ml of biogas per gram of cassava pulp by wet weight. Biogas contained methane 58.08±8.37%, carbon dioxide 25.64±9.75%, oxygen 2.30±2.09 % and hydrogen sulfide 414.75±258.15 ppm.

Keywords: cassava pulp, biogas, anaerobic digestion, two-stage reactor

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษที่ให้ความช่วยเหลือ เสนอแนะ แก้ไขปรับปรุง ให้ความอนุเคราะห์ และเอาใจใส่ในรายละเอียดของการทำโครงงานพิเศษอย่างใกล้ชิด ร่วมถึง ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่อนุเคราะห์ถังหมักในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการทำโครงงานพิเศษนี้ และกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่องเพื่อให้โครงงานพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการสอบโครงงานพิเศษ และ ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ กรรมการสอบโครงงานพิเศษ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะ

ขอขอบคุณ คุณศักรินทร์ บุญล้ำ ที่ให้ความรู้ ช่วยเหลือในการทำระบบเก็บก๊าซชีวภาพ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวถังหมัก

ขอขอบคุณพี่นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือในการศึกษา และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในทุกๆด้าน

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ ให้ความรู้ อีกทั้งช่วยสนับสนุนในการทำโครงงานพิเศษครั้งนี้

ขอขอบคุณ บริษัท ราชสีมา กรีน เอ็นเนอร์ยี จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์กากสำปะหลังที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณพ่อ แม่ และเพื่อน ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอดจนโครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำสำนึกในพระคุณของทุกๆ ท่าน และขอถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ ให้กำลังใจและคำปรึกษาในการทำโครงงานพิเศษ มา ณ ที่นี้

วิภาพร คูณทวีเดโช
สาวิตรี พุฒจันทร์
สุดารัตน์ กิจถาวรสวัสดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฉ
สารบัญรูป ..... ซ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ 1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 ก๊าซชีวภาพ 3
2.1.1 การผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน 4
2.1.2 ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน 7
2.1.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ 8
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน 12
2.1.5 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ 16
2.2 มันสำปะหลัง 16
2.2.1 ประเภทของมันสำปะหลัง 16
2.1.2 อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีการผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลังของประเทศไทย 17
2.2.3 กากมันสำปะหลัง 18
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 24
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี 24
3.1.1 สารเคมี 24
3.1.2 อุปกรณ์ 24
3.1.3 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ 25
3.1.4 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง 25
3.1.5 ระบบถังหมัก 25
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง 31
3.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุป้อน 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 ศึกษาสภาวะของระบบหว่างการหมักและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 32
3.2.3 วิเคราะห์ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ภายในหมักกรดและถังหมักก๊าซชีวภาพ 34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 35
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันปะหลัง 35
4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบทั้งหมด 36
4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบ 36
4.2.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในระบบ 37
4.2.3 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดในระบบ 38
4.2.4 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ 39
4.2.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายในระบบ 40
4.2.6 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ 41
4.3 ผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ 42
4.3.1 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น 42
4.3.2 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหย 44
4.3.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ 46
4.4 ผลการศึกษาวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียในถังหมัก 47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 48
5.1 สรุปผลการวิจัย 48
5.2 ข้อเสนอแนะ 48
เอกสารอ้างอิง 49
ภาคผนวก 53
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์ 54
ก-1 วิธีวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาวะในระหว่างการหมัก 54
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง 59
ข-1 คุณลักษณะของสารละลายกากมันสำปะหลัง 59
ข-2 คุณลักษณะของสารละลายกากมันสำปะหลัง (Feed) 59
ข-3 ผลการศึกษาสภาวะในระว่างการหมักก๊าซชีวภาพ 61
ภาคผนวก ค การคำนวณ 71
ค-1 การคำนวณระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในระบบ 71
ค-2 การคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของกากมันสำปะหลังที่ป้อนเข้าสู่ระบบ 71
ค-3 การคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหย 73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ 3
2.2 คุณสมบัติของแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน 9
2.3 คุณสมบัติของแบคทีเรียบางชนิดที่สร้างก๊าซมีเทน 11
2.4 ช่วงของอุณภูมิที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ 13
2.5 ความเข้มข้นของการกระตุ้นและยับยั้งของโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ท
ที่แตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวก 13
3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์ 31
4.1 คุณลักษณะของกากมันปะหลัง 35
4.2 คุณลักษณะของสารละลายกากมันปะหลัง 36
ข-1.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสารละลายกากมันสำปะหลัง 59
ข-2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายกากมันสำปะหลัง 59
ข-2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าอินทรียคาร์บอนทั้งหมดของสารละลายกากมันสำปะหลัง 60
ข-2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดของสารละลายกากมันสำปะหลัง 60
ข-2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดของสารละลายกากมันสำปะหลัง 60
ข-2.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายของสารละลายกากมันสำปะหลัง 61
ข-2.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยของสารละลายกากมันสำปะหลัง 61
ข-3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของถังหมักกรด 61
ข-3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของถังหมักก๊าซ 62
ข-3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของถังหมักกรด 63
ข-3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดของถังหมักก๊าซ 63
ข-3.5 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักกรด 64
ข-3.6 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักก๊าซ 64
ข-3.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดระหว่างสารละลาย
กากมันสำปะหลังและถังหมักกรด 65
ข-3.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดระหว่างสารละลาย
กากมันสำปะหลังและถังหมักก๊าซ 65
ข-3.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายระหว่าง
สารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักกรด 66
ข-3.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายระหว่าง
สารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักก๊าซ 67
ข-3.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยระหว่าง
สารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักกรด 67
ข-3.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยระหว่าง
สารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักก๊าซ 68
ข-3.13 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันช่วงระยะทดลอง 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ข-3.14 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพในระหว่างการหมัก 70
ค-2.1 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของ
กากมันสำปะหลังที่ป้อนเข้าสู่ระบบ 71
ค-3.1 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น
ต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด 73
ค-3.2 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น
ต่อน้ำหนักกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 กระบวนกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน 4
2.2 ถังหมักแบบหนึ่งขั้นตอน 7
2.3 ถังหมักแบบสองขั้นตอน 8
2.4 ขั้นตอนการคัดแยกกากมันสำปะหลัง 19
3.1 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ 25
3.2 ระบบการหมักแบบสองขั้นตอนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ 26
3.3 รายละเอียดถังหมักแบบสองขั้นตอน 28
3.4 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ 30
3.5 แผนผังขั้นตอนระยะปรับสภาพของระบบ 32
3.6 แผนผังขั้นตอนระยะทดลองของระบบ 33
4.1 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายกากมันสำปะหลังของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ 37
4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในระบบของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ 38
4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดในระบบของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ 39
4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ 40
4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายในระบบของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ 41
4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ 42
4.7 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลัง 43
4.8 เปลวไฟที่ได้จากการหมักการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันปะหลัง โดยกระบวนการการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน 44
4.9 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของแข็งที่ถูกกำจัด และกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด 45
4.10 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพในระหว่างการหมักก๊าซชีวภาพ 46
4.11 ลักษณะเชื้อแบคทีเรียในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซโดยการย้อมสีแกรมแล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000x 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ปัจจุบันมนุษย์ใช้พลังงานฟอสซิลซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เป็นส่วนใหญ่ นอกจากจะเกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต ยังทำให้เกิดปัญหามลพิษอากาศ จึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทดแทนใหม่ ก๊าซชีวภาพจัดเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน นอกจากจะเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนแล้วยังสามารถใช้ของเสียอินทรีย์เป็นวัตถุดิบในการผลิต ส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมเนื่องจากมีพื้นที่ส่วนใหญ่เหมาะแก่การเพาะปลูก มีผลผลิตทางเกษตรที่สำคัญ ได้แก่ ยางพารา ข้าว ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มันสำปะหลังเป็นพืชที่ปลูกได้ง่าย ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ เจริญเติบโตได้ดีแม้ในพื้นดินที่ไม่อุดมสมบูรณ์มากนัก จึงเป็นพืชที่ได้รับความนิยมในการเพาะปลูกของเกษตรกร มันสำปะหลังจัดเป็นสินค้าส่งออกและเป็นพืชที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย สร้างรายได้เข้าประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก (ฟาร์มไทยแลนด์, 2556) โดยนิยมนำมาใช้เป็นอาหารของมนุษย์ ใช้ทำแป้ง ใช้หมักทำแอลกอฮอล์ เบียร์ ขนมปัง และใช้เป็นอาหารสัตว์โดยแปรรูป ในปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังถึง 490 โรงงาน (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2559) การแปรรูปมันสำปะหลังจะมีของเสียต่างๆ จากการแปรรูปเป็นจำนวนมาก ซึ่งหัวมันสำปะหลังสด 1 กิโลกรัม ได้แป้งมันสำปะหลังเฉลี่ย 0.20 กิโลกรัม และได้กากมันสำปะหลัง 0.40-0.90 กิโลกรัม (เจริญศักดิ์, 2553) จากการที่กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะมีแป้งเหลือทิ้งในของเสียเป็นจำนวนมากจึงนิยมนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ อย่างไรก็ตาม ยังมีงานวิจัยไม่มากนักที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง เนื่องจากกากมันสำปะหลังเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก และมีความเป็นกรดสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ เพราะจะมีปัญหาของการสะสมของกรดอะซิติกในถังหมักทำให้ยับยั้งการเจริญของเมทาโนเจนส่งผลให้ระบบล้มเหลว

โครงงานพิเศษนี้จึงสนใจศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน เพื่อศึกษาสภาวะในการผลิตก๊าซชีวภาพ และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานทดแทนที่สะอาดยังสามารถพัฒนาต่อยอดไปในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาสภาวะในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) วิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันสำปะหลังเบื้องต้นตามวิธีมาตรฐาน ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต, ปริมาณแป้ง, ความชื้น, ปริมาณซัลเฟต, อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

2) วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของกากมันสำปะหลังก่อนเข้าระบบ (feed) ได้แก่ pH, Total solids (TS), Volatile solids (VS), Volatile fatty acids (VFAs), Total Organic Carbon (TOC), Total Nitrogen (TN)

3) เติมอาหาร (Feed) 1 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรของปริมาตรถังกรดโดยผสมกากมันสำปะหลัง 277.3 กรัม ปรับด้วยน้ำประปาให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติมเข้าสู่ถังหมักกรด แล้วจะถูกเติมลงในถังหมักก๊าซมีเทนในปริมาตรเดียวกัน

4) วิเคราะห์ตัวอย่างของเหลว (Effluent) ที่เกิดจากกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนตามวิธีมาตรฐาน ได้แก่ pH, Total solids (TS), Volatile solids (VS), Volatile fatty acids (VFAs), Total Organic Carbon (TOC), Total Nitrogen (TN) โดยเก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 2 ครั้ง

5) วัดปริมาณก๊าซก๊าซชีวภาพทุกวัน โดยวิธีแทนที่ใน 2% NaCl และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Data Meter

6) คำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด

2) เป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

3) เป็นการลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน เช่น มูลสัตว์ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมโรงงานอาหาร เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554) โดยองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	อัตราส่วน
มีเทน (CH_4)	50 -70 % (v/v)
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	20 -50 % (v/v)
ความชื้น (H_2O)	0 -10 % (v/v)
ไนโตรเจน (N_2)	0 -5 % (v/v)
ออกซิเจน (O_2)	0 -2 % (v/v)
แอมโมเนีย (NH_3)	0 -1 % (v/v)
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	50 -10,000 ppm

ที่มา : Rey *et al.* (2013)

ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเป็นก๊าซที่ให้พลังงาน รองลงมาคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ส่วนออกซิเจนและไนโตรเจนนั้น อาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีการเติมอากาศในท่อเพื่อกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขณะที่แอมโมเนียและไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นมีปริมาณเพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 2.1) อย่างไรก็ตาม ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นอกจากจะมีกลิ่นเหม็นแล้ว เมื่อรวมกับน้ำหรือความชื้นจะมีฤทธิ์เป็นกรด เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์ได้ นอกจากนี้ความชื้นยังทำให้เกิดคราบตะกรัน เมือกหรือตะกอนจุลินทรีย์ที่อุปกรณ์ต่างๆ เช่น Safety Valve ซึ่งมีผลต่อระบบความปลอดภัยของเครื่องจักร

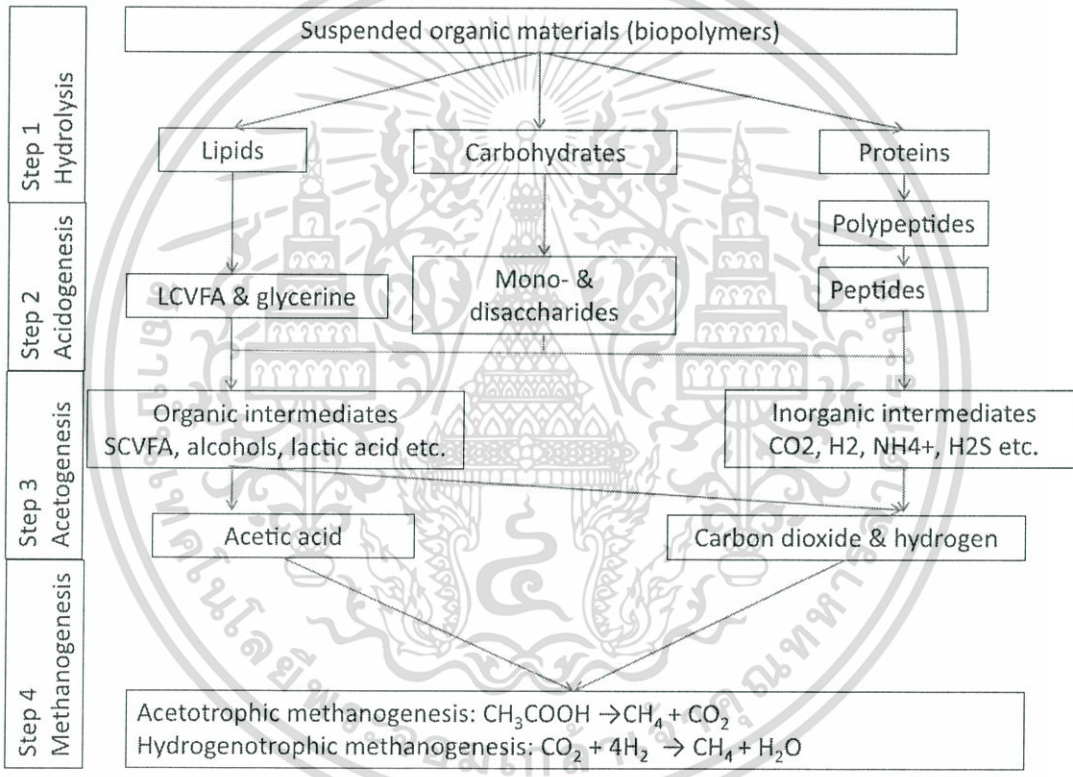
การที่ก๊าซชีวภาพมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งมีความร้อนประมาณ 21 MJ/m^3 หรือ 5.96 KWh/m^2 โดยคำนวณจาก 60% ของก๊าซมีเทน ทำให้มีคุณสมบัติจุดติดไฟได้ดีและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 การผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic bacteria) กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ ดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาชีวเคมีหลายขั้นตอน ประกอบด้วย 4 ปฏิกิริยาหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (อานีตา, 2556) ดังนี้

ขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาอะซิโดเจนนิซิส (Acidogenesis)
ขั้นที่ 3 ปฏิกิริยาอะซิโตเจนนิซิส (Acetogenesis)
ขั้นที่ 4 ปฏิกิริยาเมทาโนเจนนิซิส (Methanogenesis)



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Vincent *et al.*, 2014)

1) **ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)** เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้อยู่ในรูปที่ไม่ซับซ้อนและละลายได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน และกลีเซอรอล เพื่อให้ง่ายต่อการลำเลียงข้ามสู่เยื่อเซลล์ (Cell membrane) ได้ ปฏิกิริยาในขั้นนี้จะถูกเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ที่อยู่ภายนอกเซลล์ (Extracellular enzymes) ของจุลินทรีย์พวกไฮโดรไลติกแบคทีเรีย (Hydrolytic bacteria) อย่างไรก็ตาม ยังมีเอนไซม์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอีก ได้แก่ เซลลูเลส (Cellulases) อะไมเลส (Amylases) โปรตีเอส (Proteases) โดยเอนไซม์เหล่านี้สร้างขึ้นโดยแบคทีเรียที่เกิดการหมัก (Fermentative bacteria) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาขั้นถัดไป อย่างไรก็ตาม การย่อยสลายในขั้นตอนนี้เป็นไปได้ช้าและมีขีดจำกัดในการย่อยสลายสารบางชนิด เช่น พวกเซลลูโลสที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับชนิดของเอนไซม์ที่ถูกปล่อย ซึ่งเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจะเลือกชนิดของปฏิกิริยา ชนิดของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา รวมถึงการทำงานของเอนไซม์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และเอนไซม์ อุณหภูมิ การสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น

2) ปฏิกิริยาอะซิโดเจนนิซิส (Acidogenesis) เป็นปฏิกิริยาที่อาศัยแบคทีเรียเป็นส่วนใหญ่ กรดอะมิโนและน้ำตาลถูกย่อยสลายโดยปฏิกิริยาการหมัก (Fermentation) ซึ่งสารอินทรีย์จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ผลผลิตหลักในปฏิกิริยานี้คือ สารกลางที่จะถูกย่อยสลายได้ต่อไป (Intermediary degradative products) ได้แก่ กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดบิวทิริก (Butyric acid) และสารตั้งต้นโดยตรงของมีเทน (Direct methane precursors) ได้แก่ กรดอะซีติก (Acetic acid) และแก๊สไฮโดรเจน ผลผลิตของแก๊สไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาการหมักมีเพียงเล็กน้อย ซึ่งได้มาจากการปล่อยไฮโดรเจนออก (Dehydrogenation) ของไพรูเวท นอกจากนี้ ผลผลิตของปฏิกิริยานี้ ได้แก่ แอลกอฮอล์และคีโตน เช่น เอทานอล เมทานอล กลีเซอรอล อะซิโตน อะซิเตต คาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยานี้ เรียกว่า อะซิโดจินิกแบคทีเรีย (Acidogenic bacteria) ได้แก่ Obligate และ Facultative anaerobes

3) ปฏิกิริยาอะซิโตเจนนิซิส (Acetogenesis) เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids) ได้แก่ กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก และแอลกอฮอล์ไปเป็นอะซิเตต ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการทำงานของอะซิโตจินิกแบคทีเรีย (Acetogenic bacteria) หรือแบคทีเรียที่สร้างอะซิเตตและไฮโดรเจน (Acetate and H_2 -producing bacteria) ได้แก่ *Syntrobacter wolinii* และ *Syntrophomonas wolfei* แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการความดันไฮโดรเจนต่ำ (Low hydrogen tensions) สำหรับการเปลี่ยนรูปของกรดไขมันระเหย กรณีที่มีความดันไฮโดรเจนค่อนข้างสูง การเกิดอะซิเตตจะลดลง และซับสเตรตจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก และเอทานอลมากกว่ามีเทน อะซิโตจินิกแบคทีเรียและเมทาโนเจน (แบคทีเรียที่สร้างมีเทน) จะมีความสัมพันธ์ที่เอื้อกัน เมทาโนเจนจะช่วยให้เกิดความดันไฮโดรเจนต่ำ สำหรับอะซิโตจินิกแบคทีเรียจะทำให้เกิดความดันไฮโดรเจนสูง อย่างไรก็ตามอะซิโตจินิกแบคทีเรียเจริญเร็วกว่าแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนมาก การทำงานของอะซิโตจินิกแบคทีเรียเกิดขึ้นดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 2.1-2.3

$$\underset{\text{(กรดอะซิติก)}}{CH_3COOH} + 2H_2 \longrightarrow \underset{\text{(เอทานอล)}}{CH_3CH_2OH} + H_2O \qquad \text{------- (2.1)}$$

$$\underset{\text{(กรดโพรไพโอนิก)}}{CH_3CH_2COOH} + 2H_2O \longrightarrow \underset{\text{(กรดอะซิติก)}}{CH_3COOH} + CO_2 + 3H_2 \qquad \text{------- (2.2)}$$

$$\underset{\text{(กรดบิวทิริก)}}{CH_3CH_2CH_2COOH} + 2H_2O \longrightarrow \underset{\text{(กรดอะซิติก)}}{2CH_3COOH} + 2H_2 \qquad \text{------- (2.3)}$$

ปฏิกิริยาอะซิโตเจนนิซิสถือได้ว่าเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการสะสมของกรดไขมันระเหย และแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งปฏิกิริยาในขั้นต่อไป

4) ปฏิกิริยาเมทาโนเจนนิซิส (Methanogenesis) เป็นปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทน (CH_4) โดยแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจน (Methanogens) ซึ่งมีทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบที่มีรูปร่างต่างๆกัน แบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญเติบโตได้ช้ามากในน้ำเสีย โดยมีเวลาที่ใช้เพื่อที่จะให้ประชากรของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนเป็นสองเท่าซึ่งเรียกว่า generation time หรือ doubling time อยู่ที่ 3 วัน (ที่ 35 ^{o}C) และ 50 วัน (ที่ 10 ^{o}C) เมทาโนเจน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

ก) ไฮโดรจิโนโทรฟิคเมทาโนเจน (Hydrogenotrophic methanogens) เป็นแบคทีเรีย (Chemolithotrophs) ซึ่งเปลี่ยนไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นมีเทน เรียก ปฏิกิริยานี้ว่า รีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ (Reduction of CO_2) ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 2.4

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \quad \text{------- (2.4)}$$

เมทาโนเจนจะช่วยรักษาระดับความดันไฮโดรเจนให้อยู่ในระดับต่ำซึ่งจำเป็นสำหรับการเปลี่ยนกรดระเหยง่าย และแอลกอฮอล์ไปเป็นอะซิเตต ก๊าซชีวภาพจะประกอบด้วยก๊าซมีเทนที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ประมาณ 1 ใน 3 ส่วน

ข) อะซีโตโทรฟิคเมทาโนเจน (Acetotrophic methanogens) หรืออะซีโต คลาสติกเมทาโนเจน (Acetoclastic methanogens) เป็นแบคทีเรียที่เปลี่ยนรูปอะซิเตตให้เป็นมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาอะซีโตคลาสติก (Acetoclastic reaction) ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 2.5

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 \quad \text{------- (2.5)}$$

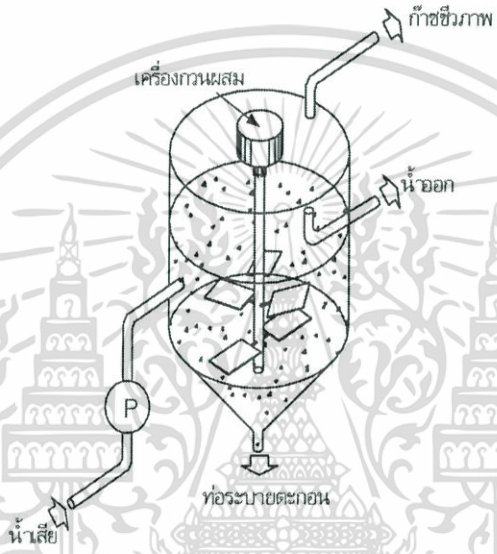
แบคทีเรียกลุ่มนี้โตช้ามากโดยใช้เวลา 2-3 วัน ในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า ขณะที่แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดใช้เวลา 2-3 ชั่วโมงเท่านั้นในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า แบคทีเรียกลุ่มอะซิโตคลาสติกนี้แบ่งออกเป็น 2 จีนัส คือ เมทาโนซาร์ไซนา (Methanosarcina) และเมทาโนทริค (Methanothrix) ก๊าซมีเทนที่เป็นผลผลิตจากการเปลี่ยนรูปของอะซิเตตจะมีถึงสองในสามของก๊าซมีเทนที่สร้างได้ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (เพ็ชรรัตน์, 2538)

1) ถังหมักแบบหนึ่งขั้นตอน (One Phase Anaerobic Digester) เหมาะกับจุลินทรีย์ที่มีสภาวะในการเจริญเติบโตแตกต่างกันไม่มาก วัสดุที่ย่อยสลายได้ง่ายและมีความเป็นกรดไม่มาก เนื่องจากการทำงานของระบบจะเกิดสภาวะที่สร้างกรดและสร้างมีเทนในถังเดียว การควบคุมระบบทำได้ยากอาจทำให้ผลิตก๊าซมีเทนได้น้อย

ข้อดีระบบนี้ คือ เป็นระบบถังที่มีขั้นตอนง่ายไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก ส่วนข้อเสีย คือ การควบคุมระบบทำได้ยาก มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพน้อย และเกิดการสะสมของตะกอน

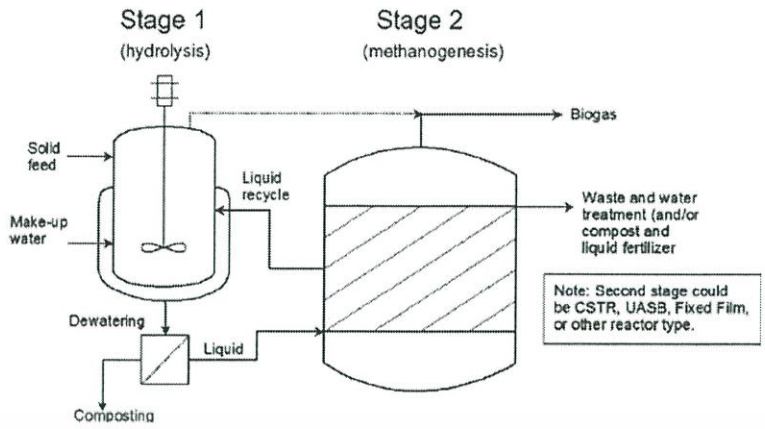


รูปที่ 2.2 ถังหมักแบบหนึ่งขั้นตอน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

2) ถังหมักแบบสองขั้นตอน (Two Phase Anaerobic Digester) เป็นระบบที่มีการแยกการหมักออกเป็นสองส่วนตามลักษณะการทำงานของจุลินทรีย์ เพื่อควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับจุลินทรีย์แต่ละประเภท เนื่องจากการหมักอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ 2 ชนิด ซึ่งในการทำงานของจุลินทรีย์ดังกล่าวมีสภาวะที่แตกต่างกัน ระบบถังหมักแบบสองขั้นตอนใช้พีเอชเป็นตัวกำหนดและควบคุมแบคทีเรีย โดยถังแรกมีพีเอช 3-5 จะมีแบคทีเรียที่สร้างกรด ส่วนถังที่สองมี พีเอช 6.5-8 จะมีแบคทีเรียที่สร้างมีเทน เหมาะกับวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากหรือมีความเป็นกรดสูง เนื่องจากการแบ่งเป็นสองขั้นตอนทำให้ก๊าซไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นในถังใบแรกไม่เกิดการสะสมตัวจนเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทนในถังใบที่สอง

ข้อดีของระบบนี้ คือ จุลินทรีย์ที่สร้างกรดสามารถเจริญเติบโตได้เต็มที่ ไม่มีผลรบกวนจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน ลดปัญหาการสูญเสียจุลินทรีย์ในการสร้างก๊าซมีเทนได้ และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูง ส่วนข้อเสีย คือ ต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์ถังหมักกรด และถังหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ถังหมักแบบสองขั้นตอน (Richa *et al*., 2014)

2.1.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ (ศุภาพร และวสุ, 2553)

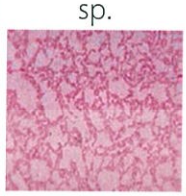
ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีโครงสร้างซับซ้อนภายใต้สภาวะไร้อากาศจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูปของก๊าซชีวภาพนั้น จำเป็นต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนมากเป็นพวกแบคทีเรีย โดยเฉพาะกลุ่ม Strictly anaerobic bacteria และ Facultative anaerobic bacteria ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการ Hydrolysis และ Acidogenesis แบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1) Non-methanogenic bacteria

แบคทีเรียในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นพวก Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีอากาศ โดยได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดไขมันระเหยง่าย กรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ CO_2/H_2 แอมโมเนีย และซัลไฟด์ สามารถเจริญเติบโตได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบ่งตัวเพิ่มจำนวนได้เป็น 2 เท่าภายในเวลา 24 ชั่วโมง ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่ม Acidogenic bacteria และ Acetogenic bacteria ได้แก่ Hydrolytic bacteria, Acid forming bacteria, Acetic acid producing bacteria ดังแสดงในตารางที่ 2.2

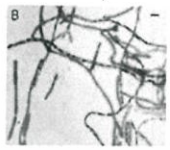
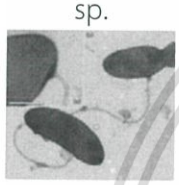
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน

จีนัส	แหล่งที่พบ	รูปร่าง และ คุณสมบัติ ของเชื้อ	การติดสี (Gram's stain)	การ เคลื่อนที่	อุณหภูมิที่ เหมาะสม (°C)
Bacteroides sp. 	พบทั่วไปในธรรมชาติ บางชนิดเป็นแบคทีเรียประจำถิ่นในลำไส้ใหญ่และทางเดินปัสสาวะของคน และยังพบในทางเดินอาหารของสัตว์หลายชนิด เช่น วัว ควาย ไก่ ม้า เป็นต้น	-Obligate anaerobe -รูปร่างแท่งสั้น -ไม่สร้างสปอร์	Gram negative	ไม่เคลื่อนที่	35
Clostridium sp.	พบในแหล่งที่อยู่ที่ไม่มีออกซิเจน เช่น ดิน, ในทางเดินอาหารหรือลำไส้ของสัตว์, สปอร์ของเชื้อพบทั่วไปในธรรมชาติ และจะงอกเมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนและมีอาหารที่เหมาะสม	-Obligate anaerobe -รูปร่างเป็นแท่งหรือแท่งโค้ง -สร้างสปอร์ตรงกลางเซลล์หรือค่อนมาทางปลายด้านใดด้านหนึ่งที่ปลายเซลล์ทำให้ดูคล้ายไม้ตีกลองอาจเรียงต่อกันเป็นโซ่ -สปอร์ทนทานต่อออกซิเจน	Gram positive จนถึง Gram variable	เคลื่อนที่ได้	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) คุณสมบัติของแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน

จีนัส	แหล่งที่พบ	รูปร่าง และ คุณสมบัติ ของเชื้อ	การติดสี (Gram's stain)	การ เคลื่อนที่	อุณหภูมิที่ เหมาะสม (°C)
Flavobacterium sp. 	พบทั่วไปในธรรมชาติ ทั้งในน้ำจืด, น้ำทะเล ดิน อาหาร และ โรงงานผลิตอาหาร	-anaerobe -รูปร่างแท่ง ปลายเรียว หรือแท่งโค้ง	Gram negative	มีทั้ง เคลื่อนที่ และ ไม่ เคลื่อนที่	20-25 แต่ สามารถ เจริญได้ดีที่ 35-37
Butyrivibrio sp. 	พบในทางเดินอาหาร, ลำไส้ของสัตว์ เคี้ยวเอื้อง เช่น วัว และอาจพบได้ในคน พบในถังหมัก หรือ ตะกอนที่มีการทับถม กันใต้น้ำ	-Obligate anaerobe -รูปร่างแท่ง ปลายเรียว หรือแท่งโค้ง	Gram negative	เคลื่อนที่ ได้	30-45

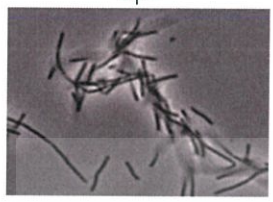
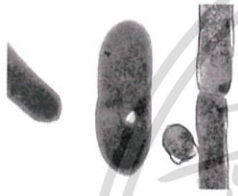
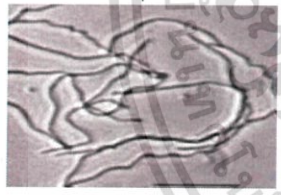
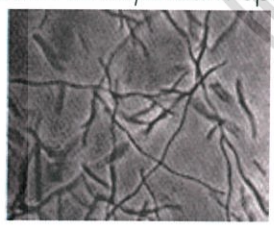
ที่มา : ศุภาพร และวสุ (2553)

2) Methanogenic bacteria

แบคทีเรียในกลุ่มนี้ ตามธรรมชาติพบในชั้นตะกอนของแม่น้ำลำคลอง หรือในกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้อง มีทั้งที่เป็นแกรมบวกและแกรมลบ ขึ้นอยู่กับชนิดของ Cell envelop ของแบคทีเรียที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมีเทน ส่วนใหญ่จัดอยู่ในพวก Obligated anaerobic bacteria เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่ขาดออกซิเจน ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.0-7.8 ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมได้น้อย และมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน โดยเฉลี่ยต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 3-5 วัน ที่ 35 °C ถึง 10 วัน ที่ 10 °C ในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า ได้แก่ แบคทีเรียในกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophs และ Acetotrophic methanogens หรือ Acetoclastic bacteria หรือ Acetate splitting bacteria ได้แก่ Acetoclastic methanogens และ Hydrogenophilic methanogens ดังแสดงในตารางที่ 2.3

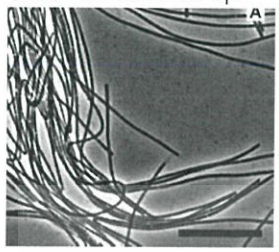
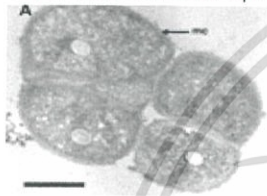
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติแบคทีเรียบางชนิดที่สร้างก๊าซมีเทน

จีนัส	แหล่งที่พบ	รูปร่างเซลล์	วัตถุดิบในการผลิตก๊าซมีเทน	อุณหภูมิที่เหมาะสม (°C)
Methanobacterium sp. 	ทางเดินอาหารสัตว์, ตะกอนดิน ตามแหล่งน้ำ	รูปร่างแท่งยาวจนถึงเป็นเส้นสาย	CO_2+H_2 และ formate	37-45
Methanobrevibacteria sp. 	ทางเดินอาหารสัตว์, ดิน, ในต้นไม้, สิ่งปฏิกูลที่มีการทับถม	รูปร่างกลม, แท่งสั้นหรือคล้ายมีดผ่าตัดปลายแหลม	CO_2+H_2 และ formate	37-49
Methanmicrobium sp. 	ทางเดินอาหารสัตว์	แท่งสั้น	CO_2+H_2, formate	40
Methanospirillum sp. 	ทางเดินอาหารสัตว์, ตะกอนดิน	รูปร่างเป็นเกลียวสั้นจนถึงยาว	CO_2+H_2 และ formate	30-40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) คุณสมบัติแบคทีเรียบางชนิดที่สร้างก๊าซมีเทน

จีนัส	แหล่งที่พบ	รูปร่างเซลล์	วัตถุดิบในการผลิตก๊าซมีเทน	อุณหภูมิที่เหมาะสม (°C)
Methanosaeta sp. 	ถังหมัก	แท่งยาวหรือเป็นสาย	acetate	34-40
Methanosarcina sp. 	ตะกอนดิน, ถังหมัก	รูปร่างกลม ขนาดใหญ่ อยู่เป็นกลุ่ม	CO_2+H_2, acetate และ methanol	35-40

ที่มา: ศุภาพร และวสุ (2553)

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (จินตนา, 2552)

การย่อยสลายของสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับเชื้อจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือ เชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างกรดอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้สูงขึ้นจึงต้องศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่มในสภาวะที่เหมาะสม สามารถจำแนกปัจจัยออกเป็น 2 ลักษณะ ได้คือ

2.1.4.1 ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม ได้แก่

1) ค่าพีเอช มีความสำคัญต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากสามารถส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์และการเจริญที่แตกต่างกันไป ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สร้างกรดจะสามารถเจริญได้ดีที่ช่วงพีเอช เท่ากับ 3.0-5.0 ส่วนเชื้อจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนจะเจริญได้ดีที่ช่วงพีเอช 6.5-8.0 ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนจะมีความไวต่อค่าพีเอชมากที่สุด ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้

2) อุณหภูมิ ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50-65 องศาเซลเซียส ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียสและช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophillic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 5-15 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ใน สภาวะไม่ใช้ออกซิเจนมี 2 ช่วง ได้แก่ 30-35 องศาเซลเซียส และ 50-60 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิช่วง 40-50 องศาเซลเซียส กลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจะถูกยับยั้ง (Gerardi, 2003) ส่วนใหญ่จะเดินระบบที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียสมากกว่า 50-60 องศาเซลเซียส เนื่องจาก Thermophillic bacteria มีความอ่อนไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสิ่งแวดล้อม จึงมักจะประสบปัญหาในการควบคุมระบบการผลิตก๊าซได้มากกว่า Mesophillic bacteria และมีความเสี่ยงในการล้มของระบบสูง รายละเอียดกลุ่มแบคทีเรียแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3 เปรียบเทียบการเดินระบบระหว่าง Mesophillic digesters และ Thermophillic digesters ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์

สภาวะ	ถังหมักแบบมีโซฟิลิก	ถังหมักแบบเทอร์โมฟิลิก
อัตราภาระบรรทุก (Loading rates)	ต่ำ	สูง
การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค (Destruction of pathogens)	ต่ำ	สูง
ความว่องไวต่อสารพิษ (Sensitivity to toxicants)	ต่ำ	สูง
ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (Operational costs)	ต่ำ	สูง
การควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control)	ควบคุมง่าย	ควบคุมยาก

ที่มา : จินตนา (2552)

3) สารพิษและสารยับยั้ง สารที่เป็นพิษอาจอยู่ได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ทั้งนี้ผลของสารพิษมีตั้งแต่พิษโดยตรง (Toxic) ลงไปถึงแค่เพียงยับยั้ง (Inhibit) การทำงานของแบคทีเรีย อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีสารเหล่านั้นก็อาจกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หากมีความเข้มข้นที่พอเหมาะสมสารที่เป็นพิษหรือยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระบบการหมักแบบไม่ใช้อากาศแบ่งออกได้เป็นกลุ่มๆ ดังนี้

- ไอออนบวก ได้แก่ โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) ซึ่งถ้ามีความเข้มข้นที่เหมาะสมจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรียแต่ถ้ามีมากเกินความจำเป็นจะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของการกระตุ้นและยับยั้งของโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ทที่แตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวก

ไอออนบวก	ความเข้มข้น (mg/l)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งรุนแรง
โซเดียม	100-200	3,500-5,500	8,000
โพแทสเซียม	200-400	2,500-4,500	12,000
แคลเซียม	100-200	2,500-4,500	8,000
แมกนีเซียม	75-150	1,000-1,500	3,000

ที่มา : จินตนา (2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โลหะหนัก โดยทั่วไปโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียหรือของเสียอินทรีย์มีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้อากาศ ได้แก่ แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม นิเกิล โคบอลท์ ทองแดง และโครเมียม โดยทองแดง (Cu^{2+}) จะมีผลต่อระบบมากที่สุด แม้ว่าโลหะหนักจะเป็นพิษ แต่โลหะหนักบางประเภทยังมีความจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย เช่น นิเกิลหรือโคบอลต์ เป็นต้น แต่ต้องมีปริมาณที่ไม่มากเกินไป

- กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids , VFAs) การสร้างกรดไขมันระเหยในปริมาณที่มากเกินไปอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีสารอินทรีย์เข้ามาในระบบในปริมาณที่มาก แบคทีเรียสร้างกรดก็จะสร้างกรดไขมันมันระเหยออกมามาก หากว่าระบบมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชหรือมีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ จะทำให้พีเอชของระบบลดลง เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน วิธีการแก้พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทำได้โดยการเติมด่าง เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เพิ่มระยะเวลาการหมัก หรือมีการหมุนเวียนน้ำออกกลับเข้ามาในระบบ

- แอมโมเนีย (NH_3) เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ โปรตีน และยูเรีย เป็นต้น โดยความเป็นพิษจะเกิดขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นสูงกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ซัลไฟด์ (S^{2-}) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ซัลไฟด์สามารถอยู่ได้ทั้งในรูปของสารละลาย หรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟุริกได้ ซึ่งแบคทีเรียสามารถอยู่ในสภาพที่มีซัลไฟด์ไม่เกิน 50-160 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเป็นพิษจะเกิดขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นพิษของซัลไฟด์สามารถทำให้ลดลงได้โดยการทำให้ซัลไฟด์ตกตะกอน นอกจากนี้อาจทำการเจือจางน้ำเสียหรือทำการแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ

- อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนที่นำมาใช้คำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะเป็นปริมาณคาร์บอนและปริมาณไนโตรเจนที่ย่อยสลายได้เท่านั้น สำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 16-19 การปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนทำได้โดยการเติมซับสเตรตอีกชนิดที่มีคาร์บอนหรือไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูง

4) ลักษณะของของเสีย การผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถใช้สารอินทรีย์เป็นซับสเตรตได้หลายชนิด ดังนี้

- น้ำตาลที่มีโมเลกุลอย่างง่าย เช่น กลูโคส เป็นแหล่งของสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย โดยทั่วไปสามารถพบน้ำตาลเป็นองค์ประกอบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและในของเสียจากการเกษตร

- ของเสียที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบมีอยู่มากมายในพืชทั่วไป ของเสียจากโรงงานแปรรูปพืชผลทางการเกษตรจึงมักมีแป้งเป็นองค์ประกอบ ซึ่งแป้งเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญที่สามารถใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนได้

- ของเสียที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในโครงสร้างของพืชมีปริมาณมากในของเสียจากการเกษตรและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตเยื่อกระดาษหรือกระดาษ รวมทั้งในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร

- ของเสียและน้ำเสียจากพวกเศษอาหารมีคาร์โบไฮเดรตสูงโดยอยู่ในรูปน้ำตาลโมเลกุลอย่างง่าย แป้งและเซลลูโลส รวมทั้งมีไขมันและโปรตีนในปริมาณสูง จึงสามารถนำมาผลิตก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกระบวนการแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ แต่มีข้อเสียก็คือ ของเสียมีความผันแปรของชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารอาหารที่เข้าระบบแตกต่างกัน ซึ่งแต่ละองค์ประกอบต้องการสภาวะแวดล้อมและกระบวนการทางชีวภาพในการผลิตก๊าซมีเทนที่แตกต่างกัน สภาวะแวดล้อมเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยจะมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของแบคทีเรีย สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากเศษอาหาร เช่น ค่าพีเอช เวลากักพักน้ำ อัตราป้อนสารอินทรีย์ หรืออัตราส่วนการเจือจาง เป็นต้น โดยค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ทั้งค่าพีเอชเริ่มต้นในการเดินระบบและค่าพีเอชที่ควบคุมในระหว่างกระบวนการหมัก เวลากักพักน้ำที่เหมาะสมจะช่วยป้องกันการถูกล้างออกจากระบบ (Wash out) ของแบคทีเรีย ลดการสะสมของกรดไขมันระเหยที่มากเกินไปในระบบและช่วยเพิ่มปริมาณมวลจุลินทรีย์ในระบบ การที่องค์ประกอบต่างๆ ภายในเศษอาหารเกิดการย่อยสลายที่ค่าพีเอชและเวลากักพักน้ำที่เหมาะสมแตกต่างกัน การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากเศษอาหารจึงสามารถทำได้โดยการปรับสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับช่วงของการย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละชนิด

2.1.4.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ ได้แก่

1) การกวนผสม เป็นการทำให้ส่วนผสมที่อยู่ในระบบให้มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึง ช่วยให้ของเสียที่เข้ามาใหม่เข้าไปแทนที่ของเสียที่ถูกใช้แล้ว ส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้นและช่วยให้ระบบมีการย่อยสลายได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ การกวนยังช่วยป้องกันมิให้มีการแยกชั้นของของเสีย การกวนผสมสามารถลดเวลาเก็บกักของถังปฏิกิริยาได้ วิธีการผสมโดยใช้ใบพัดกวนจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการผสมโดยหมุนเวียนก๊าซที่เกิดขึ้นภายในระบบ การผสมสามารถเลือกรูปแบบได้ทั้งการผสมแบบต่อเนื่องและเป็นช่วงเวลา กลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนมีความไวต่อการผสมเร็วมาก ควรหลีกเลี่ยงการผสมที่อาจทำให้แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนหลุดออกจากระบบ เพราะจะทำให้ระบบล้มเหลวได้

2) อัตราภาระการเติมสารอินทรีย์เป็นปัจจัยในการดำเนินการอย่างหนึ่งที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นก๊าซมีเทนจะต้องมีความเข้มข้นของแบคทีเรียเหมาะสมกับปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบ จึงจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ หากมีสารอินทรีย์เข้ามาในระบบมากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง ในทางตรงกันข้ามหากมีสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไปจะไม่คุ้มค่าในการลงทุน

3) เวลากักเก็บ เวลากักพักในระบบของการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนมี 2 ตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับเวลาในถังปฏิกิริยา หมายถึง เวลากักพักของแข็งเป็นเวลาเฉลี่ยที่แบคทีเรียอยู่ในถังปฏิกิริยา หรือเวลากักพักน้ำเป็นเวลาเฉลี่ยที่น้ำเสียหรือสลัดจ์อยู่ในถังปฏิกิริยาเริ่มตั้งแต่เข้าจนกระทั่งออกมาจากระบบ ตัวแปรทั้งสองอาจจะสัมพันธ์กันหรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการเดินระบบ ทั้งนี้การควบคุมระบบบำบัดจะใช้ค่าเวลาการกักพักน้ำเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากคำนวณได้ง่ายกว่าเวลากักพักตะกอนการควบคุมค่าเวลากักพักมีความสำคัญต่อการเดินระบบเป็นอย่างมาก ถ้าเวลากักพักนานเกินไปจะทำให้การก่อสร้างระบบมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามหากใช้เวลากักพักสั้นเกินไป ความเร็วในการไหลของน้ำจะสูงแบคทีเรียเกิดการหลุดออกจากระบบ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (อาริยา, 2546)

ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพพบว่ามีหลายด้าน ประกอบด้วย

1) ด้านพลังงาน เมื่อพิจารณาถึงด้านเศรษฐกิจแล้ว การลงทุนผลิตก๊าซชีวภาพจะลงทุนต่ำกว่าการผลิตเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นๆ เช่น ฟืน ถ่าน น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม และไฟฟ้า ก๊าซชีวภาพจำนวน 1 ลูกบาศก์เมตร ให้ค่าความร้อน 3,000- 5,000 กิโลแคลอรี่

2) ด้านปรับปรุงสภาพแวดล้อม โดยการนำมูลสัตว์และน้ำล้างคอกมาหมักในบ่อก๊าซชีวภาพจะเป็นการช่วยกำจัดมูลในบริเวณที่เลี้ยงทำให้กลิ่นเหม็นและแมลงวันในบริเวณนั้นลดลง และผลจากการหมักมูลสัตว์ในบ่อก๊าซชีวภาพที่ปราศจากออกซิเจนเป็นเวลานานๆ ทำให้ไข่พยาธิและเชื้อโรคส่วนใหญ่ในมูลสัตว์ตายด้วยซึ่งเป็นการทำลายแหล่งเพาะเชื้อโรคบางชนิด เช่น โรคบิด อหิวาต์ และพยาธิที่อาจแพร่กระจายจากมูลสัตว์ด้วยกัน นอกจากนี้แล้วยังเป็นการป้องกันไม่ให้มูลสัตว์ถูกชะล้างลงไปในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ

3) ด้านการเกษตร การทำเป็นปุ๋ย กากที่ได้จากการหมักก๊าซชีวภาพสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้ดีกว่ามูลสัตว์สดๆ และปุ๋ยคอก ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่มีการหมักจะมีการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนในมูลสัตว์ทำให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และการทำเป็นอาหารสัตว์ โดยนำส่วนที่เหลือจากการหมัก นำไปตากแห้ง แล้วนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์ให้โคและสุกรกินได้ แต่ทั้งนี้มีข้อจำกัด คือ ควรใส่อยู่ระหว่าง 5-10 กิโลกรัม ต่อส่วนผสมทั้งหมด 100 กิโลกรัม จะทำให้สัตว์เจริญเติบโตตามปกติและเป็นการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

2.2 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารในรูปของคาร์โบไฮเดรตหรือแป้งไว้ในราก โดยทั่วไปหัวมันที่มีอายุ 12 เดือน มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแป้งถึงร้อยละ 70-80 ดังนั้น มันสำปะหลังจึงเป็นพืชที่สำคัญชนิดหนึ่งที่เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานแก่คนและสัตว์ได้ดีที่สุด มันสำปะหลังเป็นพืชที่ปลูกอยู่ในเขตร้อน เหมาะสมในดินร่วนปนทรายแต่เป็นพืชทนแล้ง จึงสามารถทำการปลูกได้ในดินทุกชนิดแม้แต่ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ โดยมันสำปะหลังที่ปลูกกันทั่วโลกมีหลายประเภท แต่มันสำปะหลังที่ปลูกเพื่อการค้านั้นมีเพียง Manihot Esculenta Crantz (ชื่อเดิมคือ Manihot Utilissima Pohl) ประเทศไทยสามารถปลูกมันสำปะหลังได้ทุกภาคและปลูกได้ตลอดปีแต่เกษตรกรส่วนใหญ่จะปลูกช่วงต้นฤดูฝน (เดือนพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายน) และช่วงปลายฤดูฝน (เดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน) เนื่องจากการปลูกในช่วงฤดูฝนให้ผลผลิตหัวสดสูงกว่าใน ช่วงอื่นๆ หัวมันสำปะหลังที่ผลิตได้ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมมันเส้นและมันอัดเม็ดและอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง (มิ่งสรรพ์และคณะ, 2546)

2.2.1 ประเภทของของมันสำปะหลัง

1) ชนิดหวาน (Sweet Type) เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคต่ำ ไม่มีรสขม ใช้เพื่อการบริโภคของมนุษย์ มีทั้งชนิดเนื้อร่วนนุ่ม และชนิดเนื้อแน่น เหนียว แต่มีจำนวนน้อย

2) ชนิดขม (Bitter Type) เป็นมันสำปะหลังที่มีกรดไฮโดรไซยานิคสูง เป็นพิษ และมีรสขม ไม่เหมาะสำหรับการบริโภคของมนุษย์ หรือใช้หัวมันสำปะหลังสดเลี้ยงสัตว์โดยตรง แต่จะใช้สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมแปรรูปต่างๆ เช่น แป้งมัน มันอัดเม็ด และแอลกอฮอล์ เป็นต้น เนื่องจากมีปริมาณแป้งสูง มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นชนิดขมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม

2.2.2 อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีการผลิตผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลังของประเทศไทย (มิ่งสรรพ์และคณะ, 2546)

1) อุตสาหกรรมมันเส้น (Cassava chips) หลังเก็บเกี่ยวหัวมันสดแล้ว หัวมันจะถูกนำส่ง เข้าลานมันเพื่อทำการแปรรูปเป็นมันเส้น ซึ่งมันเส้นบางส่วนจะถูกส่งออกไปจำหน่ายในบางประเทศ ได้แก่ จีน เกาหลีใต้ และญี่ปุ่น ในขณะที่บางส่วนจะถูกนำไปแปรรูปเป็นมันอัดเม็ดเพื่อจำหน่ายในต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม การใช้ประโยชน์จากมันเส้นภายในประเทศไทยยังมีค่อนข้างน้อย โดยอุตสาหกรรมที่มีการใช้มันเส้น ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ และอุตสาหกรรมการหมัก ซึ่งสามารถใช้มันเส้นเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมัก เช่น กรดซิตริกและเอทานอล เป็นต้น

2) อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด (Cassava pellets) มันอัดเม็ดหรือที่เรียกว่ามันเม็ดเป็นการนำมันเส้นมาแปรรูปโดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่า Extrusion เพื่อลดปริมาตรลงและลดมลภาวะภายในท่าเรือขณะที่มีการขนย้าย ทำให้สะดวกต่อการขนส่งมากขึ้น อัตราการแปรรูปจากมันเส้นเป็นมันอัดเม็ดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ประสิทธิภาพของเครื่องอัดเม็ด ความชื้นของมันเส้น สิ่งเจือปนต่างๆ เป็นต้น มันอัดเม็ดที่ผลิตได้จะส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอาหารสัตว์ เพราะมีปริมาณแป้งสูงและยังสามารถผลิตและส่งจำหน่ายได้ตลอดทั้งปี เนื่องจากมีราคาไม่สูงนักเมื่อเทียบกับผลิตผลของธัญพืชอื่นๆ รวมทั้งยังขนส่งได้ง่าย ไร้ฝุ่นละออง อย่างไรก็ตาม ปริมาณการส่งออกมีแนวโน้มจะลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการปฏิรูปนโยบายเกษตรร่วมของสหภาพยุโรปที่ทำให้ปริมาณธัญพืชซึ่งเป็นคู่แข่งมันอัดเม็ดในยุโรปมีปริมาณการค้าเพิ่มขึ้นและมีราคาต่ำลง

3) อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ในบรรดาประเทศที่ปลูกมันสำปะหลัง ประเทศไทยเป็นประเทศเดียวที่ใช้มันสำปะหลังมาผลิตเป็นแป้งมากที่สุดและถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในประเทศไทยที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันจะเป็นกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบสลัดแห้ง ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตแบบใหม่ที่ใช้เวลาในการผลิตน้อยโดยตั้งแต่เป็นหัวมันสดเข้าโรงงานจนได้แป้งแห้งใช้เวลาน้อยกว่า 30 นาที แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว และมีความบริสุทธิ์สูง มีสิ่งปน เปื้อนต่ำ โดยจะมีปริมาณแป้ง (Starch) อยู่มากกว่าร้อยละ 95 และมีปริมาณโปรตีนและไขมัน รวมถึงฟอสฟอรัสค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่นๆ และเมื่อได้รับความร้อนจะมีความหนืดสูง ทำให้ได้แป้งเปียกที่ใส ไม่ทึบแสงและมีอัตราการคืนตัวต่ำ (Retrogradation) อย่างไรก็ตาม บางครั้ง แป้งดิบ (Native starch) ก็ไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้ในระดับอุตสาหกรรม จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนคุณสมบัติให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น โดยกระบวนการดัดแปรแป้ง (Starch modification) ซึ่งแป้งที่ได้จะเรียกว่าแป้งดัดแปร

4) อุตสาหกรรมแป้งดัดแปร อุตสาหกรรมแป้งดัดแปรในประเทศไทยใช้กระบวนการดัดแปรทั้ง 3 วิธี คือ การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification) ทางเคมี (Chemical modification) และทางชีวภาพ (Biological modification) ทำให้ได้แป้งดัดแปร 3 ประเภท คือ แป้งพรีเจลาติไนซ์ แป้งดัดแปรทางเคมี และอนุพันธุ์แป้งจากการย่อย โดยแป้งดัดแปรที่มีความสำคัญและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในเชิงอุตสาหกรรมมากที่สุด ได้แก่ แป้งดัดแปรทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แป้งพรีเจลาติไนซ์หรืออัลฟาสตาร์ช (Alpha starch) เป็นแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรทางกายภาพ ซึ่งส่วนใหญ่จะส่งออกไปยังประเทศคู่ค้าสำคัญ คือ เกาหลีและไต้หวัน ส่วนแป้งดัดแปรทางเคมีจะเป็นแป้งที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้มีความหลากหลายตามชนิดของสารเคมีที่ใช้และระดับการแทนที่

- แป้งดัดแปรทางเคมีสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ตามการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 4 ประเภท คือ การเกิดอนุพันธ์ (Derivertization) การลดขนาดโมเลกุลแป้งด้วยกรด (Acid thinning) เด็กซ์ทริไนเซชัน (Dextrinization) และออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งแป้งดัดแปรทางเคมีที่ผลิตในเชิงอุตสาหกรรมที่สำคัญ ได้แก่ แป้งดัดแปรที่มีความคงตัวสูง แป้งครอสลิง (Crosslinked starch) แป้งดัดแปรด้วยกรด (Acid-thinned starch) และแป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch) ซึ่งแป้งดัดแปรทางเคมีที่ได้จะมีต้นทุนที่สูงกว่าแป้งดัดแปรทางกายภาพ เนื่องจากใช้เทคโนโลยีที่สูงกว่า

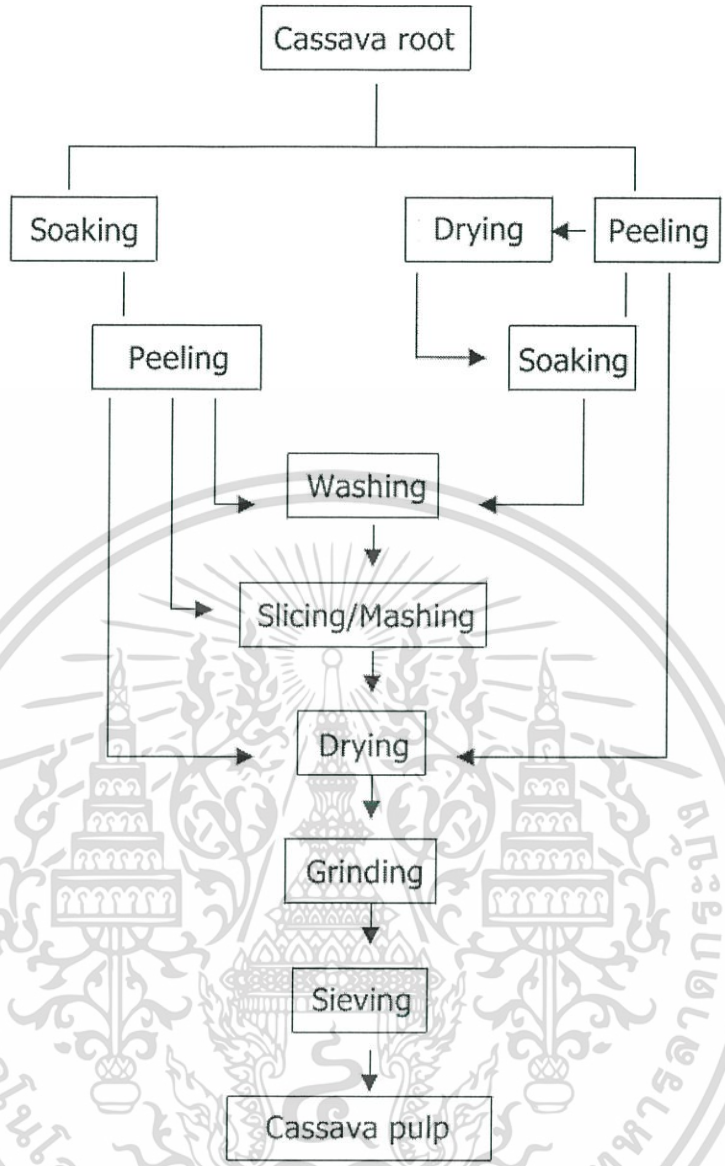
- แป้งดัดแปรอีกประเภทหนึ่ง คือ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยแป้งซึ่งจะแตกต่างกันตามชนิดของเอนไซม์และระดับการย่อย โดยชนิดของเอนไซม์ที่ใช้ย่อยแป้งที่สำคัญ ได้แก่ เอนไซม์ย่อยภายนอก (Exo-enzyme) เอนไซม์ย่อยภายใน (Endo-enzyme) เอนไซม์ย่อยพันธะกิ่ง (Debranching enzyme) และเอนไซม์ Transferase ซึ่งจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ มอลโตเดกซ์ตริน และน้ำเชื่อมกลูโคส ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ อีกหลายชนิด เช่น น้ำเชื่อมฟรุกโทส น้ำตาลแอลกอฮอล์ กรดอะมิโน ผงชูรสและไลซีน เป็นต้น

การใช้ประโยชน์แป้งมันสำปะหลังทั้งแป้งดิบ และแป้งดัดแปรภายในประเทศ นอกจากจะใช้เป็นการบริโภคในครัวเรือนแล้วยังสามารถนำแป้งมันสำปะหลังไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้โดยอุตสาหกรรมที่ใช้แป้งมันสำปะหลังมากที่สุด คืออุตสาหกรรมอาหาร ผงชูรส/ไลซีน สารให้ความหวาน สิ่งทอและกระดาษ

2.2.3 กากมันสำปะหลัง (สุรพงษ์, 2525)

กากมันสำปะหลังเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการเกษตรที่ได้จากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีกระบวนการผลิตเริ่มตั้งแต่การนำหัวมันสำปะหลังสดซึ่งมีความชื้นประมาณ 63.8 เปอร์เซ็นต์ มีแป้งประมาณ 27.7 เปอร์เซ็นต์มาแยกเอาดินออกและนำเข้าเครื่องทำการล้างทำความสะอาดจากนั้นส่งผ่านไปยังเครื่องสับ (Root cutter) เพื่อสับหัวมันสำปะหลังเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วจะทำการขูดหัวมันสำปะหลังด้วยเครื่องขูด (Rasper) จากนั้นทำการแยกส่วนที่เป็นกากออกครั้งแรกในส่วนที่เป็นแป้งนั้นจะแช่อยู่ในบ่อน้ำแป้ง ซึ่งจะนำไปทำการฟอกสีด้วยไอกำมะถันและจะนำแป้งนี้มาแยกกากออกเป็นครั้งที่ 2 ด้วยตะแกรงโยกอีก 2–3 ครั้ง น้ำแป้งที่ได้นี้จะนำไปทำให้ข้นด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยงและเข้าเครื่องอบแห้งซึ่งจะได้แป้งมันสำปะหลังเพื่อนำไปคัดแยกโดยใช้ตะแกรงโยกต่อไป ส่วนที่เป็นกากที่ได้จากการคัดแยกทั้งสองครั้งเป็นส่วนที่เรียกว่ากากมันสำปะหลัง (Cassava pulp)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการคัดแยกกากมันสำปะหลัง (Martin *et al.*, 1993)

จากการทดลองของเยาวมาลย์และ สาโรช (2543) พบว่าในการผลิตแป้งมันสำปะหลังถ้าใช้หัวมันสำปะหลัง 100 เปอร์เซ็นต์จะทำให้ได้กากมันสำปะหลัง 11.1 เปอร์เซ็นต์ และจากรายงานของสถิติการเกษตรปีพ.ศ. 2544 ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พบว่ามีปริมาณผลผลิตของหัวมันสำปะหลังสดในปีพ.ศ. 2545–2546 มีปริมาณ 18.4 ล้านตันต่อปีจะมีกากมันสำปะหลังจากกระบวนการผลิตปริมาณ 2.03 ล้านตันต่อปี และในปีพ.ศ. 2559 มีปริมาณผลผลิตเพิ่มจากที่ปี พ.ศ. 2545-2546 เป็น 59.28 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณ 31.04 ล้านตันต่อปี ดังนั้น จะมีกากมันสำปะหลังจากกระบวนการผลิตปริมาณ 3.45 ล้านตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) ซึ่งในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง นอกจากแป้งมันที่ได้แล้วยังมีผลพลอยได้ที่เกิดขึ้น คือกากมันสำปะหลัง โดยทั่วไปหัวมันสำปะหลังสด 1 ตันจะได้กากมันประมาณ 50-60 กิโลกรัม เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การนำไปเป็นอาหารสัตว์โดยตรง การนำไปหมักเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตก๊าซชีวภาพ การนำไปอบแห้งเพื่อเป็นส่วนประกอบของอาหารสัตว์ การนำไปเป็นส่วนประกอบของมันอัดเม็ด และใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล ส่วนกากมันสำปะหลังแห้งมีค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ 3,027 กิโลแคลรอลี่/กิโลกรัม และมีส่วนที่สามารถย่อยได้ 65-70% แม้ว่ากากแป้งมันสำปะหลังมีระดับเยื่อใยสูง แต่ยังคงมีปริมาณแป้งหลงเหลืออยู่ค่อนข้างมาก กากมันสำปะหลังแห้งจึงเหมาะกับสูตรอาหารสัตว์ที่ต้องการเยื่อใยสูง เช่น อาหารโค-กระบือ, อาหารสุกรแม่อุ้มท้อง และสุกรขุน (สมิต และสุกัญญา, 2559) อย่างไรก็ตามในมันสำปะหลังมีสารชนิดหนึ่งเรียกว่า สารไซยาโนจีนิค กลูโคไซด์ (Cyanogenic glucosides) ซึ่งมีอยู่ในเนื้อเยื่อของมันสำปะหลัง เมื่อเนื้อเยื่อถูกทำลายจะเกิดการแตกตัวของสารประกอบไซยาโนจีนิค กลูโคไซด์ ได้สารพิษในรูปกรดไฮโดรไซยานิค (Hydrocyanic acid) ซึ่งเป็นพิษต่อคนและสัตว์ ถ้าได้รับกรดไฮโดรไซยานิค ประมาณ 1.4 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม อาจจะถึงตายได้ Tewe and Lyayi (1989) รายงานว่าในกากมันสำปะหลังสดมีกรดไฮโดรไซยานิค 34.3-301.3 ppm ปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคมากน้อยต่างกันไปตามชนิดของพันธุ์ (มณฑา และคณะ, 2546) แต่สามารถทำลายหรือลดสารพิษได้ โดยใช้ความร้อนหรือการหมัก (ศูนย์ข้อมูลการใช้มันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์, 2550)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อาริยา (2546) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการ ระบบประกอบด้วยถังหมักกรด มีปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร และถังหมักก๊าซมีปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร ซึ่งถังปฏิกิริยาทั้งสองใบนี้มีการกวนผสมกันอย่างสมบูรณ์ ดำเนินระบบด้วยสารละลายเศษอาหารที่มีค่าของแข็งทั้งหมดประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่ระยะเวลาเก็บกัก เท่ากับ 35, 30, 25 และ 20 วัน คิดเป็นอัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 5.77, 6.39, 8.30 และ 10.27 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าอยู่ระหว่าง 82.11-90.13 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 75.29-84.34 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 83.15-89.29 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีค่าอยู่ระหว่าง 61.75-83.93 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ระยะเวลาเก็บกัก 35 วัน อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 5.77 กรัม ซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงที่สุด เท่ากับ 90.13 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น 31.19 ลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนเป็น 57.32 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 10.27 กรัม ซีโอดี/ลิตร.วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงที่สุด เท่ากับ 82.11 เปอร์เซ็นต์ แต่มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นสูงสุดคือ 54.35 ลิตรต่อวัน และองค์ประกอบของก๊าซมีเทนเท่ากับ 61.26 เปอร์เซ็นต์

จิรายุและคณะ (2558) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเผือกโดยการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นสองในระดับห้องปฏิบัติการ ระบบประกอบด้วยถังหมักสองขั้นตอน ถังหมักกรดมีปริมาตรการหมัก 24.4 ลิตร และถังหมักก๊าซมีปริมาตรการหมัก 61.0 ลิตร ซึ่งถังหมักทั้งสองมีการกวนผสมกันอย่างสมบูรณ์ ดำเนินระบบด้วยการเติมสารละลายเศษเผือกในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรดหรือ 244 กรัม และ 3 เปอร์เซ็นต์ของถังหมักกรดหรือ 732 กรัม ความถี่ในการเติมสารละลาย 1 วันต่อครั้ง ผลการศึกษานี้พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ในช่วง 98.0-98.80 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งอยู่ในช่วง 97.06-96.44 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยอยู่ในช่วง 97.06-97.65 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนของการป้อนสารละลายเศษเผือกที่เหมาะสมคือ 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอัตราส่วนการป้อนสารละลายเผือกที่ 3 เปอร์เซ็นต์จะไม่เหมาะสม เนื่องจากมีฝ้าตะกอนอยู่บนผิวน้ำซึ่งเป็นอุปสรรคต่อกระบวนการหมัก

พงษ์พันธ์และธนากร (2554) ศึกษาและทดสอบหาหัวเชื้อจุลินทรีย์และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมัน และศึกษาผลของอุณหภูมิและสภาพความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีปริมาณสูงสุด การออกแบบการทดลองแบ่งออกเป็นสามส่วนโดยแต่ละส่วนใช้เวลาทดลอง 7 วัน ส่วนแรกเป็นการทดสอบหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมโดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากฟาร์มสุกร, ฟาร์มวัว และโรงงานแป้งมันสำปะหลังและปรับค่า pH เท่ากับ 7 (เป็นกลาง) ที่อุณหภูมิ 35 °C พบว่าหัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงแป้งมันสำปะหลังเกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุด ส่วนที่สองเป็นการทดสอบผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยการทดลองได้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 °C จากอุณหภูมิตั้งแต่ 25 °C ถึง 50 °C และได้ควบคุมค่า pH เท่ากับ 7 (เป็นกลาง) พบว่า อุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพสูงที่สุดคือ 35 °C ส่วนที่สามเป็นการทดสอบผลของความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ การทดลองได้นำอุณหภูมิจากการทดลองในส่วนที่สองที่พบว่าทำให้เกิดก๊าซสูงสุด 35°C มาเป็นตัวแปรควบคุมในการทดลองส่วนที่สาม ซึ่งได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5 จนถึง 10 โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1.0 และจากผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีแนวโน้มต่อการเกิดก๊าซมากที่สุดคือ ค่า pH เท่ากับ 8 ดังนั้นจากการศึกษานี้พบว่าการใช้กากมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ ควรใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง และควบคุมอุณหภูมิที่ 35°C ค่า pH เท่ากับ 8 เพื่อให้เกิดก๊าซชีวภาพ

จีรสมัย (2551) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ระเหยที่ผ่านถังหมักกรดเข้าสู่ถังหมักก๊าซในระบบการหมักแบบสองขั้นตอน ระบบประกอบด้วยถังหมักก๊าซที่มีปริมาตร 2,000 ลิตร มีปริมาตรการหมัก 1,250 ลิตร และมีการผสมอย่างสมบูรณ์ และดำเนินระบบด้วยการเติมของเหลวกรดอินทรีย์เข้าสู่ถังหมักก๊าซโดยมีปริมาตรของเหลวที่เติม 16 ลิตรต่อวัน มีความเข้มข้นร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ตามลำดับ ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 78 วัน คิดเป็นอัตราการป้อนอินทรียสาร (OLR) เท่ากับ 1.94, 2.11, 2.43 และ 2.72 กรัมซีโอดีต่อลิตร.วัน ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่าเมื่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในระบบเพิ่มขึ้น ปริมาณก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วยจนถึงระดับหนึ่ง คือที่ 50 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) มีปริมาตรของเหลวกรดอินทรีย์ระเหยเข้าระบบ 12,109 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุด 1,118.96 ลิตรต่อวัน มีเปอร์เซ็นต์มีเทนร้อยละ 58.84 และมีประสิทธิภาพการกำจัด COD, BOD, TS, TVS และ VFA สูงสุดคือ 91.71, 91.18, 91.95, 94.40 และ 80.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาตรของเหลวกรดอินทรีย์ระเหยเข้าระบบ 15,713 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลง คือ ระบบสามารถผลิตก๊าซได้เพียง 230.50 ลิตรต่อวัน มีเปอร์เซ็นต์มีเทนร้อยละ 20.61 และมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำสุดเป็น 84.90, 84.06, 83.86, 92.20 และ 70.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ระบบมีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยค่อนข้างสูง จนเป็นสาเหตุที่ทำให้แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถทนต่อสภาวะที่ไม่เหมาะสมได้ และไม่ผลิตก๊าซในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พงษ์พันธ์ (2555) ศึกษาและทดลองหาหัวเชื้อจุลินทรีย์และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังหลังกระบวนการผลิตแป้งมัน เพื่อที่จะนำผลการทดลองมาควบคุมในระบบถังหมักก๊าซชีวภาพขนาดเครื่องต้นแบบชนิดกวนผสมสมบูรณ์สองขั้นตอน พบว่าการทดลองหัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงแป้งมันสำปะหลังเกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุด ส่วนการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ พบว่า อุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพสูงที่สุดคือ 35 °C และการทดลองผลของความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ การทดลองได้นำอุณหภูมิจากการทดลองในส่วนที่สองที่พบว่าทำให้เกิดก๊าซสูงสุด 35°C มาเป็นตัวแปรควบคุมในการทดลองส่วนที่สาม และจากผลการทดลองพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีแนวโน้มต่อการเกิดก๊าซมากที่สุด คือ ค่า pH เท่ากับ 8 และนำผลการทดลองในส่วนของห้องปฏิบัติการมาควบคุมในระบบถังหมักก๊าซชีวภาพขนาดเครื่องต้นแบบชนิดกวนผสมสมบูรณ์สองขั้นตอน โดยทดลองในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic range ที่ 35 องศาเซลเซียส) และปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้น เท่ากับ 8 โดยถังหมักแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วยถังหมักกรด จำนวน 1 ถัง ถังหมักก๊าซมีเทนจำนวน 2 ถัง และถังเก็บก๊าซจำนวน 1ถัง โดยต่อกันแบบอนุกรม ใช้กรรมวิธีการเติมสารอินทรีย์ (กากมันสำปะหลังผสมกับน้ำ) แบบครั้งคราว (Batch Feeding) โดยกำหนดให้มีระยะเก็บกักสารอินทรีย์ 12 วัน และของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่เข้าระบบ 20 เปอร์เซ็นต์ อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 0.417 กรัมซีโอดีต่อลิตร- วัน และมีการเพิ่มความถี่ของการกวนโดยเริ่มจากที่ไม่มีการกวนและกวนด้วยความถี่ 0, 24, 8, 4, 2 ชั่วโมง/ครั้ง ครั้งละ 10 นาที/วัน พบว่า มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย 140, 160, 190, 240, 280 ลิตร/วัน โดยมีก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 53.8-54.3% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 24.6% และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ประมาณ 148 ppm และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าสูงถึง 98.87 เปอร์เซ็นต์

Peerawat *et al.* (2015) การศึกษาการหมักแบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิสูงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนจากน้ำทิ้งจากมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 กรัมต่อลิตร การผลิตไฮโดรเจนจากแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 5 กรัมต่อลิตรให้ผลผลิตไฮโดรเจนมากที่สุด รองลงมาคือความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 15 กรัมต่อลิตร ผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนทั้งหมดของกระบวนการหมักแบบสองขั้นตอน คือ 81.5 L H_2 $kgCOD^{-1}$ และ 310.5 L CH_4 $kgCOD^{-1}$ ตามลำดับ มีผลผลิตพลังงานรวม 9.51 L $biogas^{-1}$ โดยประกอบด้วยก๊าซมีเทน 55 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซไฮโดรเจน 11 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 34 เปอร์เซ็นต์

Nipon *et al.* (2014) ศึกษาการนำพลังงานกลับมาใช้จากการหมักเศษอาหาร ในการหมักแบบสองขั้นตอน โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องขนาด 5 ลิตรซึ่งสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนได้ ในกระบวนการหมักขั้นตอนแรกเป็นการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และขั้นตอนที่สองเป็นการผลิตก๊าซมีเทน ใช้อุณหภูมิปานกลาง 30 – 45 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 6 และ 7 และระยะเวลาการกักเก็บไฮดรอลิก 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนที่ผลิตเท่ากับ 292.7 and 391.6 mL g^{-1} VS ปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จากการหมักแบบขั้นตอนเดียว เท่ากับ 364.3 mL g^{-1} VS การได้พลังงานกลับมาใช้การหมักแบบสองขั้นตอนทั้งหมด เท่ากับ $6.5x10^{-2}$ kW ในขณะที่กระบวนการหมักแบบขั้นตอนเดียวได้พลังงานกลับมาใช้ เท่ากับ $4.7x10^{-2}$ kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการหมักแบบสองขั้นตอนมีศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนสูงกว่ากระบวนการหมักแบบขั้นตอนเดียว

Gang *et al.* (2011) ศึกษากระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนเพื่อเพิ่มการผลิตพลังงานชีวภาพจากขยะอินทรีย์ กระบวนการย่อยสลายแบบสองขั้นตอนที่มีระยะเวลาในการกักเก็บ (HRT) 3 วัน สำหรับถังปฏิกรณ์ไฮโดรเจน และ 12 วัน สำหรับถังปฏิกรณ์มีเทน เมื่อเทียบกับการย่อยสลายแบบขั้นตอนเดียวที่ระยะเวลากักเก็บ 15 วัน ใช้สารอินทรีย์ 3 gVS / (L·d) พบว่า ได้ปริมาณก๊าซมีเทนมากกว่าถึง 11 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์เป็น 4.5 gVS / (L·d) กระบวนการย่อยสลายแบบสองขั้นตอนยังคงเสถียรภาพ ในขณะที่กระบวนการย่อยสลายแบบขั้นตอนเดียวล้มเหลว การศึกษาต่อพบว่าเมื่อเปลี่ยนระยะเวลาในการกักเก็บของขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สอง ($HRT_{hydrogen}$:$HRT_{methane}$) ในอัตราส่วน 3:12 ถึง 1:14 อาจได้ก๊าซชีวภาพมากขึ้นถึง 6.7 เปอร์เซ็นต์ ในการวิเคราะห์จุลินทรีย์พบว่าแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเจน เช่น hermoanaerobacterium thermosaccharolyticum ถังปฏิกรณ์มีเทน เช่น Clostridium thermocellum การเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นและระยะเวลากักเก็บ ไม่ได้เปลี่ยนแปลงสายพันธุ์ของแบคทีเรีย แบคทีเรียในถังปฏิกรณ์มีเทนในกระบวนการย่อยสลายแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนนั้นคล้ายคลึงกัน โดยมีกลุ่มแบคทีเรีย อะซีโตคลาสติก เมทาโนเจน เช่น Methanosarcina acetivorans เป็นสายพันธุ์หลัก

Chun (2012) ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนของสารอินทรีย์ที่เหลือใช้ในขั้นตอนการหมักแบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิสูง ในการศึกษาใช้ มันฝรั่ง ขยะมูลฝอยในครัว และ กากถั่วเหลืองบด อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนของมันฝรั่ง คือ 2.1 และ 1.2 ลิตร / ลิตรต่อวัน ของขยะมูลฝอยในครัว คือ 1.7 และ 1.5 ลิตร / ลิตรต่อวัน ของกากถั่วเหลืองบด คือ 0.4 และ 1.4 ลิตร / ลิตรต่อวัน ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน ทั้งหมดเท่ากับ 20 – 85 ml H_2/g VS_{added} และ 329 - 364 ml CH_4/g VS_{added} ตามลำดับ มันฝรั่ง ขยะมูลฝอยในครัว และ กากถั่วเหลืองบด มีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และปริมาณของก๊าซมีเทนลดลง ตามลำดับ ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไม่เพียงขึ้นอยู่กับสัดส่วนคาร์โบไฮเดรตเท่านั้น แต่ยังรวมถึง ค่าพีเอชของสารอินทรีย์อีกด้วย ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนจะสูงขึ้นเมื่อ ค่าพีเอชของสารอินทรีย์ที่นำมาใช้ใกล้เคียงกับค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจนและแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนในกระบวนการหมักแบบสองขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

1) กลูโคส (D-Glucose) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

2) ฟีนอล (Phenol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3) กรดซัลฟิวริก (conc. H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

5) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

6) โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

7) โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3.1.2 อุปกรณ์

1) เครื่อง TOC Analyzer รุ่น TOC-VCSH บริษัท Shimdzu ประเทศญี่ปุ่น

2) เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น Genesys 10S UV-Vis บริษัท Thermo Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา

3) เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น C860 version 1.2 บริษัท Hanna Instruments ประเทศเบลเยี่ยม

4) เตาเผา (Muffle furnance) รุ่น Centroller P320 บริษัท Naberthem ประเทศเยอรมนี

5) ตู้อบ (Oven) รุ่น UN55 บริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี

6) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ML 204/01 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

7) เครื่องกรองลดความดัน รุ่น Aspirator บริษัท Eyela Tokyo ประเทศญี่ปุ่น

8) เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (Gas data meter) รุ่น GFM 416 บริษัท Best Technic ประเทศอังกฤษ

9) โถดูดความชื้น (Desiccator)

10) ชามระเหย (Evarporating dishes) รุ่น Porcelain บริษัท HCT ประเทศเยอรมนี

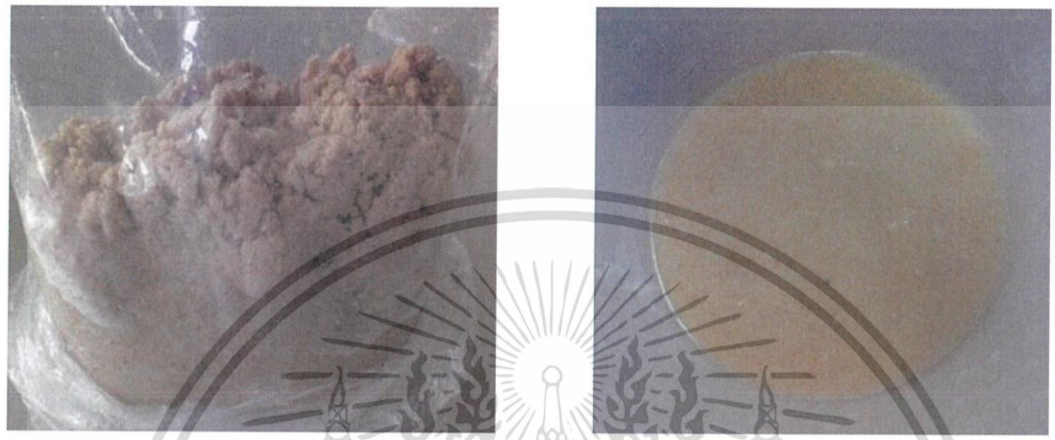
11) ไซลิงค์ฟิลเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมโครเมตร (Syringe Filters) บริษัท CNW Technology ประเทศจีน

12) กระดาษกรองเซลลูโลส cellulose extraction thimbles บริษัท Whatman TM ประเทศอังกฤษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ

กากมันสำปะหลังที่ได้จากบริษัท ราชสีมา กรีน เอ็นเนอร์ยี จำกัด จังหวัดนครราชสีมา นำเปลือกมันสำปะหลังใส่ในถุงพลาสติกแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิแช่แข็งประมาณ -4 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันปฏิกิริยาทางชีวภาพที่จะเกิดขึ้น การเตรียมสารละลายกากมันสำปะหลัง ใช้กากมันสำปะหลัง 277.3 กรัม ผสมน้ำประปาให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร (1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรด) เพื่อป้อนเข้าสู่ระบบ (รูปที่ 3.1)



(ก) (ข)

รูปที่ 3.1 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ
(ก) กากมันสำปะหลัง (ข) สารละลายกากมันสำปะหลัง

3.1.4 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองได้มาจากหัวเชื้อการผลิตก๊าซชีวภาพชีวภาพจากเศษเผือกจากโรงงานผลิตขนมปัง โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (จิรายุ และคณะ, 2558) ซึ่งถังหมักกรดเป็นเชื้อที่เกิดเองจากธรรมชาติ และถังหมักโดยนำเชื้อมาจากบ่อบัดน้ำเสียของบริษัทเพรซิเดนท์ เบเกอรี่ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรม เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ มีการเดินระบบโดยการหมักกรดด้วยกากมันสำปะหลัง 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมัก และใช้หัวเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์ของถังหมัก ซึ่งคาดว่าจะเป็นจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโดจินิกและปรับปริมาตรให้เท่ากับถังหมักด้วยน้ำประปา ส่วนถังหมักก๊าซมีเทนเติมหัวเชื้อเท่ากับปริมาตรบรรจุของถังคาดว่าจะเป็นจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจน ปรับสภาพเป็นระยะ 1 สัปดาห์ ซึ่งสามารถย่อยสลายและใช้สารละลายกากมันสำปะหลังเป็นแหล่งอาหารสำหรับเจริญเติบโตในสภาวะไร้ออกซิเจนได้

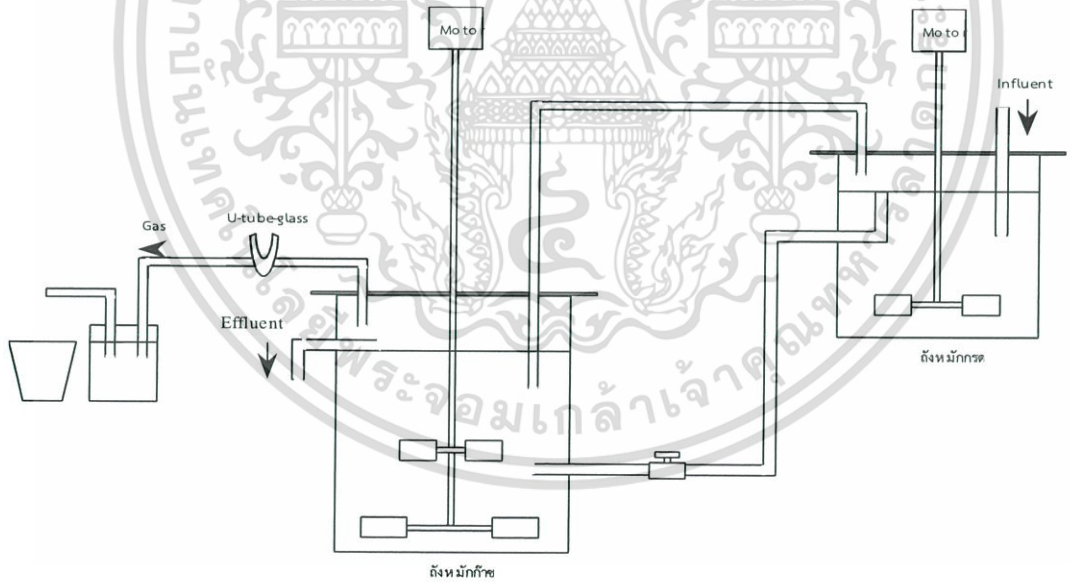
3.1.5 ระบบถังหมัก

ถังหมักในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two-Stage Anaerobic Digestion) ที่มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) แสดงดังรูปที่ 3.2 ได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ อาจารย์ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ซึ่งประกอบด้วย ถังหมักกรด ถังหมักก๊าซมีเทน มอเตอร์ เครื่องตั้งเวลา (อาริยา, 2546) และระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 ระบบการหมักแบบสองขั้นตอนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

(ก) ถังหมักแบบสองขั้นตอน (ข) แผนภาพของระบบถังหมักสองขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

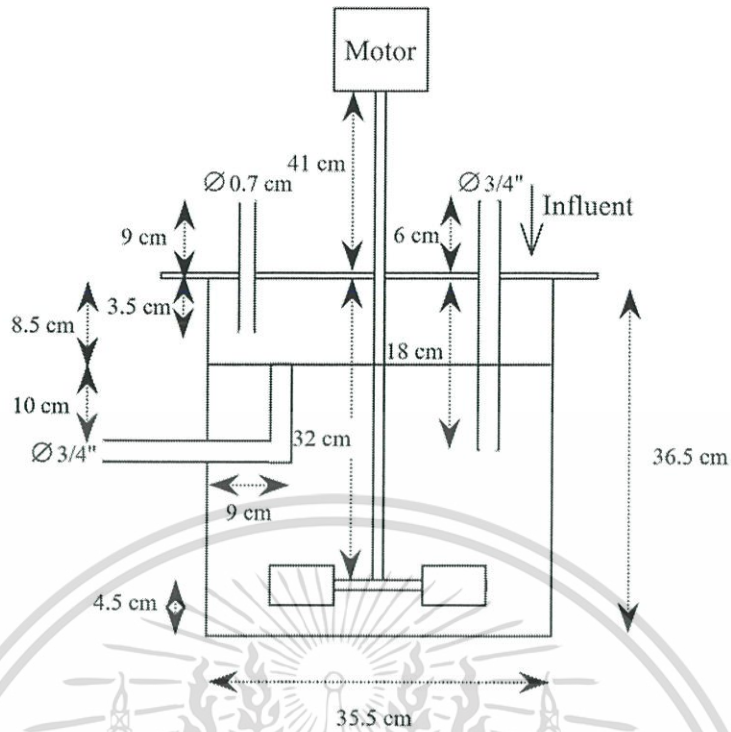
1) ถังหมักกรด (Acid tank)

ตัวถังทำด้วยสแตนเลส (Stainless steel) หนา 1 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 35.5 เซนติเมตร สูง 36.5 เซนติเมตร ด้านบนของถังปิดด้วยแผ่นพลาสติกอะครีลิคใส หนา 8 มิลลิเมตร ยึดติดกับตัวถังด้วยน๊อต และมีประเก็นยางเพื่อป้องกันการรั่วซึม โดยมีปริมาตรความจุ 36.14 ลิตร ปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร เจาะถังด้านข้างเป็นท่อต่อเข้ากับถังหมักก๊าซ ส่วนด้านบนของถังเจาะเป็นท่อสำหรับป้อนสารละลายกากมันสำปะหลังเข้าสู่ระบบถังหมักและท่อนำก๊าซจากถังหมักกรดเข้าสู่ถังหมักก๊าซ ภายในถังหมักจะมีการกวนผสมด้วยชุดสำหรับกวน โดยที่เพลาของชุดกวนนี้ติดอยู่กับฝาถังของถังหมักด้วยลูกปืน และมีชุดประกอบเพลาลักษณะเป็นปลอกสวมตัวเพลาอยู่ เพื่อป้องกันไม่ให้เพลาแกว่งขณะหมุนซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อถังหมักทำให้ถังรั่วซึมได้ เพลาและชุดประกอบเพลาเป็นสแตนเลส มีใบพัดติดอยู่ที่ปลายเพลา 1 ชุด ซึ่งชุดสำหรับกวนต่อกับมอนิเตอร์ขนาด 25 วัตต์ ที่มีความเร็วในการหมุนประมาณ 10 รอบต่อนาที ซึ่งควบคุมด้วยการใช้เครื่องตั้งเวลา ตั้งไว้ให้ทำงาน 15 นาที หยุด 30 นาที เพื่อป้องกันไม่ให้มอนิเตอร์ทำงานหนักเกินไป แสดงดังรูปที่ 3.3 (ก)

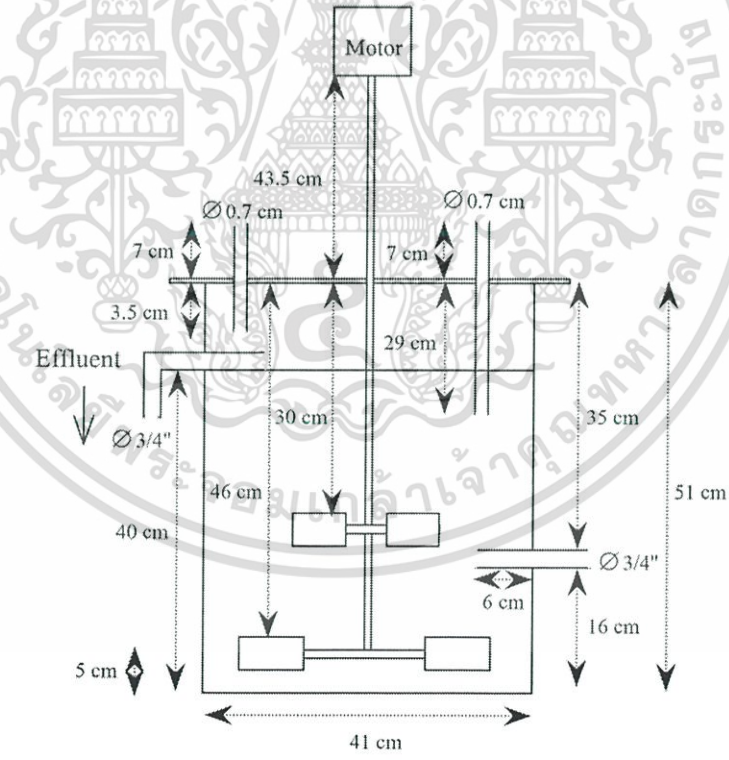
2) ถังหมักก๊าซมีเทน (Methane tank)

ตัวถังทำด้วยสแตนเลส (Stainless steel) หนา 1 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 41.0 เซนติเมตร สูง 51.0 เซนติเมตร ด้านบนของถังปิดด้วยแผ่นพลาสติกอะครีลิคใส หนา 8 มิลลิเมตร ยึดติดกับตัวถังด้วยน๊อต และมีประเก็นยางเพื่อป้องกันการรั่วซึม โดยมีปริมาตรความจุ 67.36 ลิตร ปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร เจาะถังด้านข้างเป็นท่อต่อของเหลวที่ล้นออกจากถัง ส่วนด้านบนของถังเจาะเป็นท่อนำก๊าซ ภายในถังหมักจะมีการกวนผสมด้วยชุดสำหรับกวนโดยที่เพลาของชุดกวนนี้ติดอยู่กับฝาถังของถังหมักด้วยลูกปืน และมีชุดประกอบเพลาลักษณะเป็นปลอกสวมตัวเพลาอยู่ เพื่อป้องกันไม่ให้เพลาแกว่งขณะหมุนซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อถังหมักทำให้ถังหมักรั่วซึมได้ เพลาและชุดประกอบเพลาเป็นสแตนเลส มีใบพัดติดอยู่ปลายเพลา 1 ชุด และที่ระดับสูงกว่าปลายเพลาอีก 1 ชุด ซึ่งชุดสำหรับกวนต่อกับมอเตอร์ขนาด 25 วัตต์ ที่มีความเร็วในการหมุนประมาณ 10 รอบต่อนาที ซึ่งควบคุมด้วยการใช้เครื่องตั้งเวลา ตั้งไว้ให้ทำงาน 15 นาที หยุด 30 นาที เพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์ทำงานหนักเกินไป ก๊าซชีวภาพที่ได้จะผ่านสายยางไปยังระบบเก็บก๊าซชีวภาพไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบและวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยการแทนที่น้ำ แสดงดังรูปที่ 3.3 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 รายละเอียดถังหมักแบบสองขั้นตอน

(ก) ถังหมักกรด (ข) ถังหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) มอเตอร์ (Motor)

มอเตอร์ที่ใช้กวนเพื่อให้ของเหลวภายในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนมีการกวนผสมกัน มีขนาด 25 วัตต์ ความเร็วรอบประมาณ 10 รอบต่อนาที และขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดไฟ 220 โวลต์ รุ่น 4RK25GK-C บริษัท Orientalmotor

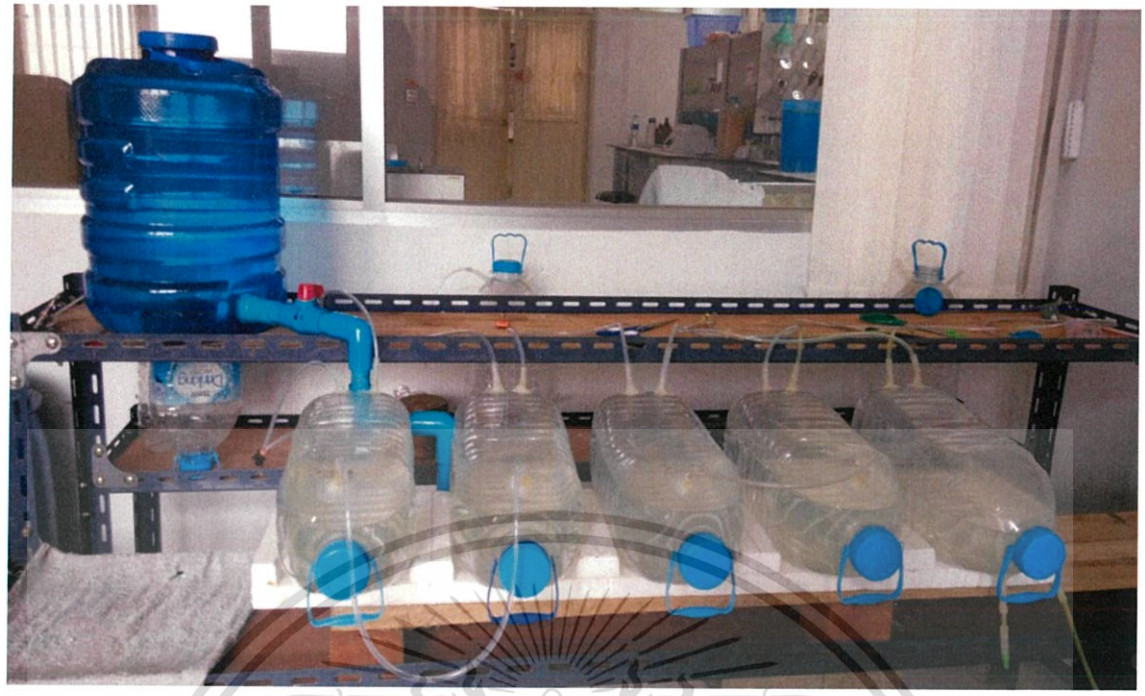
4) เครื่องตั้งเวลา (Timer)

เครื่องตั้งเวลาที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ต่อเข้ากับถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน มีลักษณะเป็นแผงวงจรไฟฟ้า รุ่น ES107 บริษัท Eurosonic

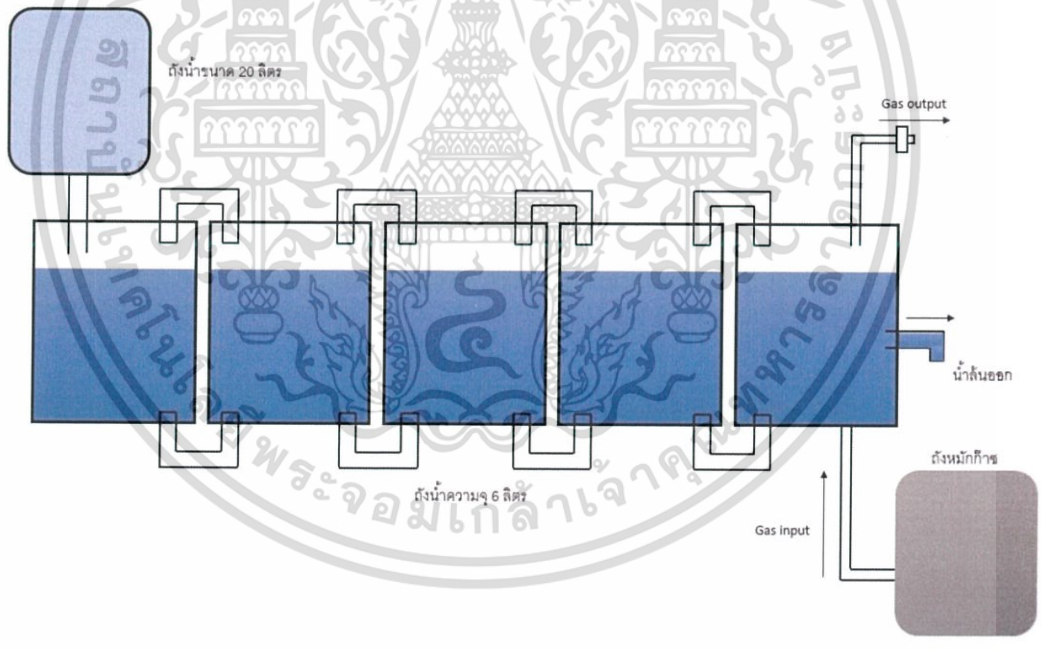
5) ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

ระบบเก็บก๊าซชีวภาพมีลักษณะเป็นขวดพลาสติกขนาดความจุ 6 ลิตร วางในแนวนอนต่อกัน 5 ขวด ขวดใบที่หนึ่งต่อกับสายยางที่นำก๊าซชีวภาพออกมาจากถังหมักก๊าซจากด้านล่างของขวด เพื่อนำน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยก๊าซชีวภาพออกจากระบบเก็บก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้โดยการวัดปริมาณน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยก๊าซชีวภาพ และต่อสายยางด้านบนของขวดใบที่หนึ่งสำหรับปล่อยก๊าซชีวภาพออกจากขวดเมื่อเติมน้ำเข้าสู่ขวด แสดงดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

(ก) ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ (ข) แผนภาพระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

3.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุป้อน

1) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของกากมันสำปะหลังเบื้องต้น โดยทำการวิเคราะห์ความชื้น (Moisture content) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen, TN) ปริมาณอินทรียคาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate) และปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

2) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของสารละลายกากมันสำปะหลัง เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับสารละลายกากมันสำปะหลังที่เติมเข้าไปในระบบ 277 กรัมต่อลิตร จึงนำกากมันปะหลัง 83.1 กรัม ผสมในน้ำประปาให้ได้ปริมาตร 300 มิลลิลิตร แล้วทำการวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen, TN) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

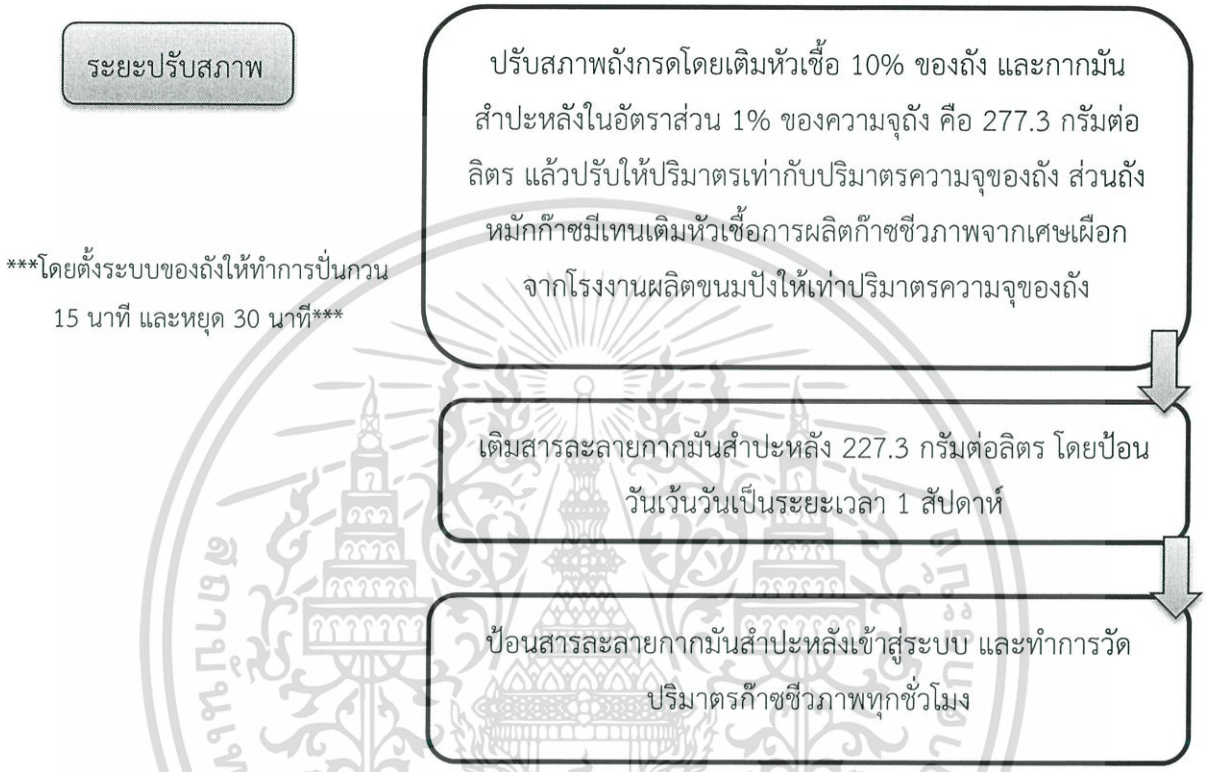
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	pH meter
ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)	ระเหยน้ำออกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS)	เผาที่อุณหภูมิ 550 °C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acids, VFAs)	Titration โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon, TOC)	เครื่อง TOC Analyzer รุ่น TOC-VCSH
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen, TN)	เครื่อง TOC Analyzer รุ่น TOC-VCSH
ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate)	วิธี Phenol-Sulfuric acid
ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch)	วิธี Phenol-Sulfuric acid
ความชื้น (Moisture content)	อบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

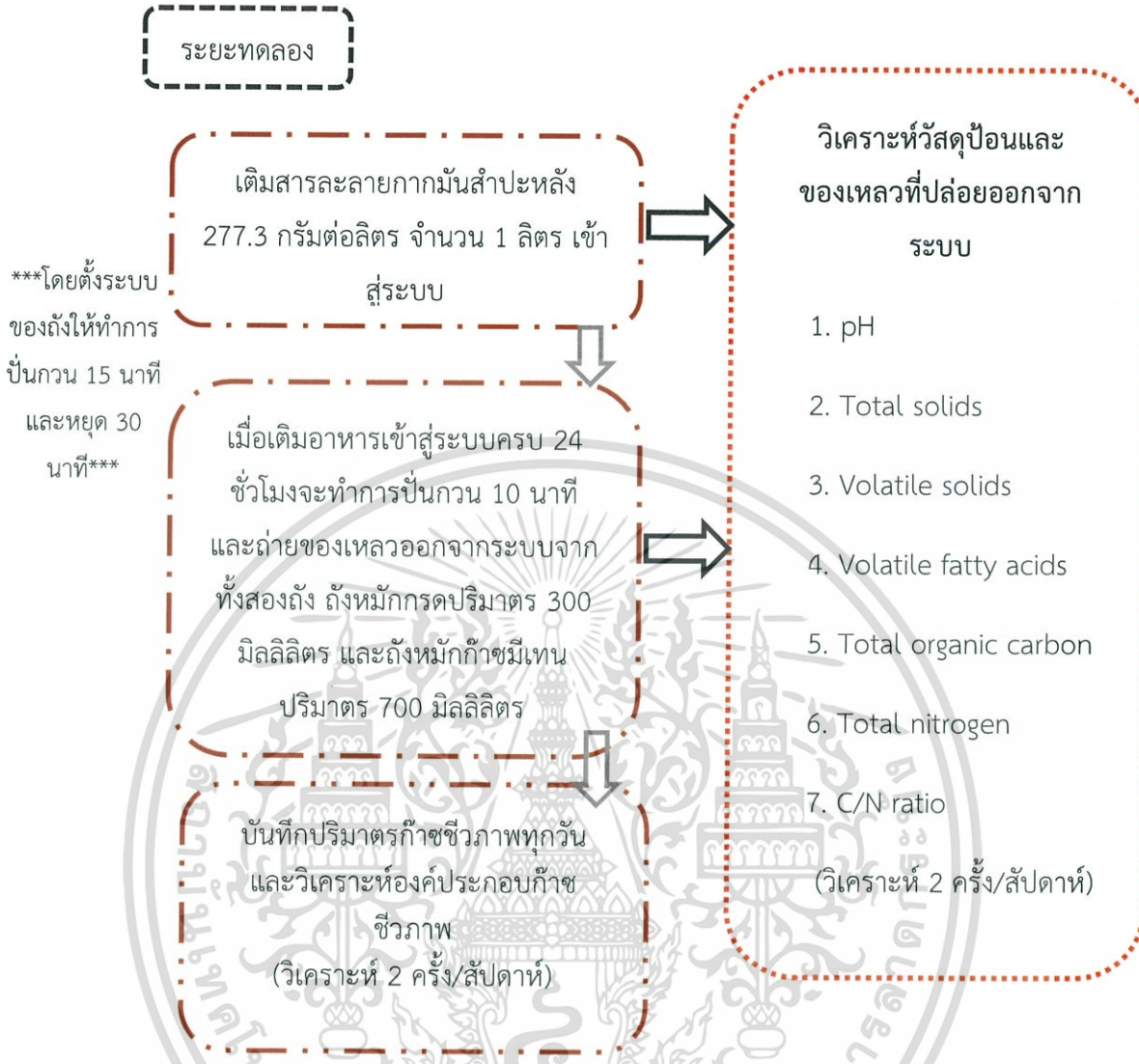
3.2.2 ศึกษาสภาวะของระบบในระหว่างการหมักและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

การทดลองเริ่มตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ 2560 สิ้นสุดเดือน มีนาคม พ.ศ 2560 ใช้เวลารวมประมาณ 1.5 เดือน การศึกษาสภาวะของระบบในระหว่างการหมักแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ระยะปรับสภาพ เพื่อทำให้จุลินทรีย์คุ้นเคยกับวัสดุป้อน และระยะทดลอง ดังสรุปในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนระยะปรับสภาพของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แผนผังขั้นตอนระยะทดลองของระบบ

1) เติมวัสดุป้อนสารละลายกากมันสำปะหลัง 277.3 กรัมต่อลิตร (1 มีนาคม 2560 ถึง 31 มีนาคม 2560) โดยตั้งระบบให้ปั่นกวน 15 นาที หยุด 30 นาที และก่อนเติมวัสดุป้อนในแต่ละครั้งจะต้องทำการถ่ายน้ำตะกอนออกจากระบบ

2) ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุป้อน (Feed) และน้ำตะกอนที่ปล่อยออกจากระบบ (Slurry) โดยทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acids, VFAs) คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) และไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen, TN) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 วิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์สัปดาห์ละ 2 ครั้ง (อังคาร,พฤหัส)

3) ศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำเพื่อบอกปริมาตรก๊าซชีวภาพของระบบของทุกวัน พร้อมบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยใช้เครื่อง Gas data meter ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

3.2.3 วิเคราะห์ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ภายในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

1) เก็บตัวอย่างของผสมที่ปล่อยออกจากถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน 100 มิลลิลิตร

2) นำมาตรวจสอบลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์โดยการย้อมสี Gram stain ตามวิธี Austrian

3) ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1,000 เท่า และบันทึกภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยใช้ถังหมักในระดับห้องปฏิบัติการที่ประกอบด้วยถังหมักกรดปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร ทำการทดลองโดยเติมกากมันสำปะหลัง 277.3 กรัมปรับด้วยน้ำประปาให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร (1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรด) โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงระยะปรับสภาพ (ช่วงที่ I) ตั้งแต่วันที่ 21-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์ในระบบปรับสภาพให้เข้ากับอาหาร (Feed) ใหม่ และช่วงระยะทดลอง (ช่วงที่ II) ตั้งแต่วันที่ 1-31 มีนาคม พ.ศ. 2560 เป็นระยะที่ศึกษาสภาวะต่างๆ ในระบบและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมระยะทำการทดลอง 30 วัน ได้ผลการทดลอง ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันปะหลัง

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.1 ภาคผนวก ข) และคุณลักษณะของสารละลายกากมันสำปะหลังที่ป้อนเข้าสู่ระบบแสดงในตารางที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.1-ข-2.6 ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง (เทียบเป็นต่อกรัมกากมันสำปะหลัง)

คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง	ค่าที่ได้
คาร์โบไฮเดรต (g/L)	170.55±29.61
ปริมาณแป้ง (g/L)	90.47±14.70
ความชื้น (Moisture content) (%)	76.23±4.59
ปริมาณซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟต (mg/L)	23.69±13.79
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	80.90±5.16
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) (mg/L)	4.11±0.23
C/N ratio	19.69±0.19

จากผลการทดลองพบว่า กากมันสำปะหลังประกอบด้วยแป้ง 90.47±14.70 กรัมต่อลิตรต่อกรัมกากมันสำปะหลังโดยน้ำหนักเปียก ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของคาร์โบไฮเดรต สามารถใช้เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ มีปริมาณซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟต 23.69±13.79 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อกรัมกากมันสำปะหลังโดยน้ำหนักเปียก ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากในอุตสาหกรรมผลิตแป้งมีการเติมกรดซัลฟิวริกในกระบวนการสกัดแป้งออกจากกากมันสำปะหลังมี อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 19.69±0.19 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 16–19 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ (จินตนา, 2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของสารละลายกากมันสำปะหลังที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (กากมันสำปะหลัง 277.3 กรัมปรับปริมาตรด้วยน้ำประปาเป็น 1 ลิตร)

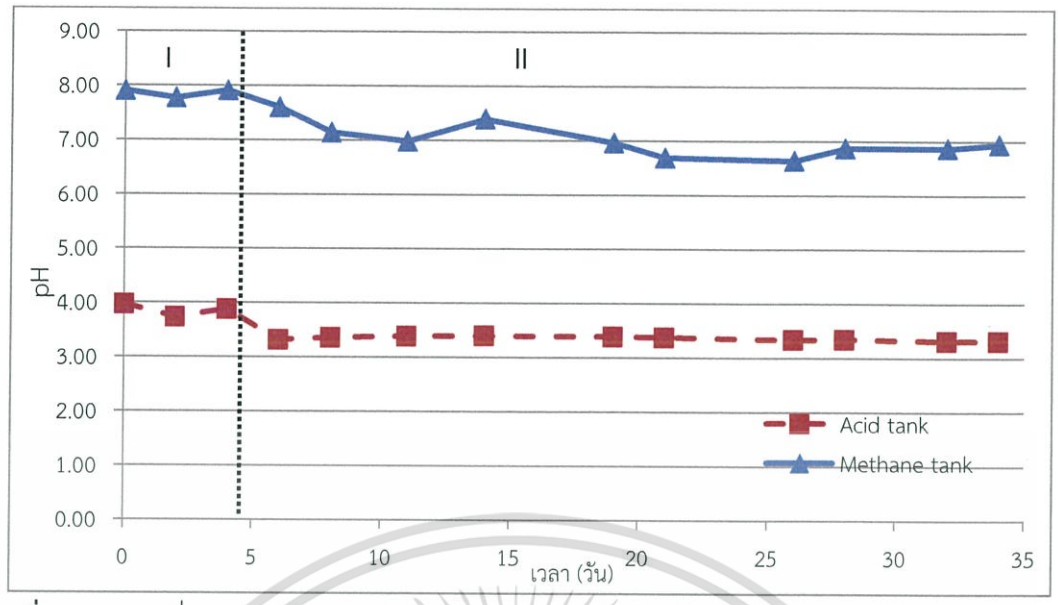
คุณลักษณะของสารละลายกากมันสำปะหลัง	ค่าที่ได้
พีเอช (pH)	3.33-3.37
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	1,234.00-1,690.40
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) (mg/L)	57.58-120.75
ของแข็งทั้งหมด (Total solids) (mg/L)	27,520-40,570
ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) (mg/L)	26,220-39,050
ปริมาณกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids) (mg/L as CH_3COOH)	491.77-633.60

4.2 ผลการศึกษาสภาวะต่างๆ และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบ

จากการผลทดลองพบว่า ค่าพีเอชของสารละลายกากมันสำปะหลัง (Feed) อยู่ในช่วง 3.33-3.37 เนื่องจากมีการปนเปื้อนของกรดซัลฟิวริกที่ตกค้างในกากมันสำปะหลังจากกระบวนการสกัดแป้งออกจากมันสำปะหลัง ช่วงระยะปรับสภาพที่ทำการเติมสารละลายกากมันสำปะหลังวันเว้นวัน (21 กุมภาพันธ์ ถึง 28 กุมภาพันธ์ 2560) (ช่วงที่ I) ค่าพีเอชของถังหมักกรดมีค่าอยู่ในช่วง 3.73-3.97 และถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 7.77-7.91 ส่วนในช่วงทดลองทำการเติมสารละลายกากมันสำปะหลังทุกวัน ความถี่วันละครั้ง (1 มีนาคม ถึง 31 มีนาคม 2560) (ช่วงที่ II) ค่าพีเอชของถังหมักกรดมีค่าอยู่ในช่วง 3.32-3.40 และถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.64-7.60 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.1 และ ข-3.2 ภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่าค่าพีเอชของถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าสูงกว่าถังหมักกรด เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบจะย่อยกากมันสำปะหลังให้เป็นกรดอินทรีย์โดย Hydrolytic bacteria ในถังหมักกรด จากนั้นกลุ่ม Methanogen bacteria จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ในถังหมักก๊าซมีเทน ทำให้ถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนคือช่วงพีเอช 6.6-7.6 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของอาริยา (2546) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในระบบถังหมักก๊าซมีเทนไม่มีการสะสมของกรดไขมันระเหย (VFAs) ที่ส่งผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของเมทาโนเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

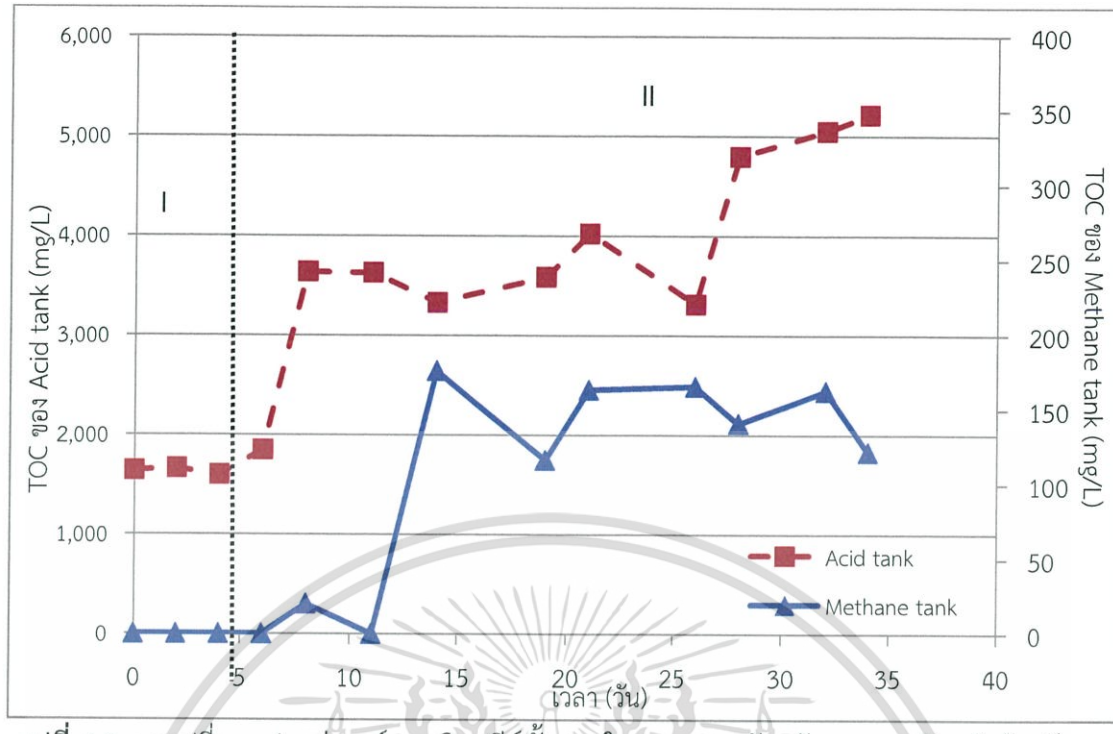


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายกากมันสำปะหลัง ถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

4.2.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในระบบ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดของสารละลายกากมันสำปะหลังที่เข้าสู่ระบบ (Feed) มีค่าอยู่ในช่วง 1,234.00-1,690.40 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.2 ภาคผนวก ข) การเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดของถังหมักกรดในช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองมีค่าอยู่ในช่วง 1,598.67-1,663.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,846.33–5,211.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทนไม่สามารถตรวจพบได้ในช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองมีค่าอยู่ในช่วง 121.77–176.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.3 และ ข-3.4 ภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่าค่าคาร์บอนอินทรีย์ของถังหมักกรดมีค่าสูงกว่าถังหมักก๊าซมีเทน เนื่องจากสารคาร์บอนอินทรีย์ในระบบถูกย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนกลายเป็นกรดอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโดจินิกในถังหมักกรด จากนั้น กรดอินทรีย์ในถังหมักก๊าซมีเทนจะถูกจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนย่อยสลายเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และอื่นๆ ทำให้คาร์บอนอินทรีย์ในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าลดลง จากผลการทดลองพบว่า ค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดของถังหมักก๊าซมีเทนในระยะปรับสภาพ ไม่สามารถตรวจพบได้ เนื่องจากกากมันสำปะหลังประกอบด้วยเส้นใยที่ย่อยสลายได้ยาก (สุรพงศ์, 2553) ดังนั้น ในระยะทดลอง (ช่วงที่ II) จึงได้ทำการลดขนาดของกากมันสำปะหลังด้วยการปั่นให้มีขนาดเล็กลงก่อนนำเข้าสู่ระบบ เพื่อช่วยทำให้เส้นใยย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

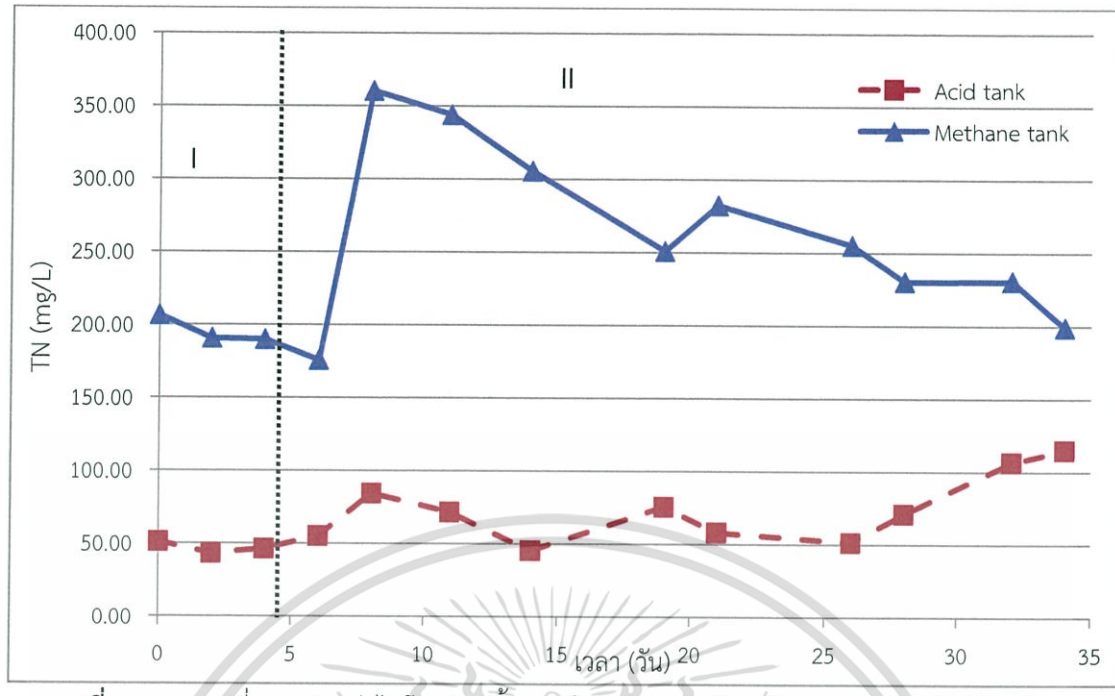


รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในระบบของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

4.2.3 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดในระบบ

จากการทดลองพบว่าค่าไนโตรเจนทั้งหมดของสารละลายกากมันสำปะหลังที่เข้าสู่ระบบ (Feed) มีค่าอยู่ในช่วง 57.58-120.75 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.3 ภาคผนวก ข) ค่าไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักกรดช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองมีค่าอยู่ในช่วง 43.19-51.14 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 45.33–114.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนถังหมักก๊าซมีเทนช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองมีค่าอยู่ในช่วง 189.80-206.50 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 175.60–360.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.5 และ ข-3.6 ภาคผนวก ข) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าสูงกว่าในถังหมักกรด เนื่องจากในการย่อยสลายสารพวกโปรตีนซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในสภาวะไร้ออกซิเจน โปรตีนจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโนในถังหมักกรด จากนั้น กรดอะมิโนจะถูกย่อยสลายเป็นไนโตรเจนซึ่งอยู่ในรูปแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออนในถังหมักก๊าซมีเทน โดยทั่วไปพบว่าแอมโมเนียจะเป็นพิษกับแบคทีเรียเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่แบคทีเรียสามารถทนต่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนได้สูงถึง 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้น การรักษาพีเอชให้เท่ากับ 7.0 หรือต่ำกว่า จะทำให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ซึ่งจุลินทรีย์สามารถทนได้มากกว่า (อานีตา, 2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

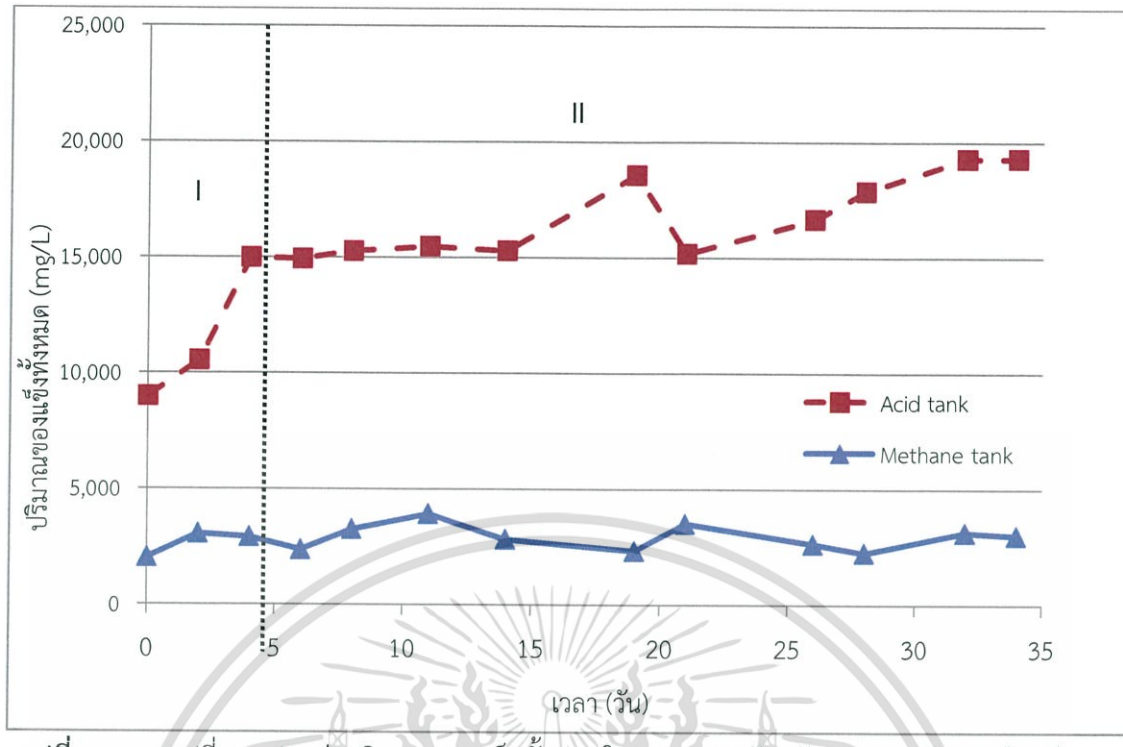


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดในระบบของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

4.2.4 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ

จากการทดลองพบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดของสารละลายกากมันสำปะหลังที่เติมเข้าสู่ระบบ (Feed) อยู่ในช่วง 27,520-40,570 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.4 ภาคผนวก ข) ปริมาณของแข็งทั้งหมดของถังหมักกรดช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองมีค่าอยู่ในช่วง 8,992-14,979 และ 14,930–19,288 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และถังหมักก๊าซมีเทนช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองมีค่าอยู่ในช่วง 2,035- 3,061 และ 2,330-3,920 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.7 และ ข-3.8 ภาคผนวก ข) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าของแข็งทั้งหมดของถังหมักกรดมีค่าสูงกว่าถังหมักก๊าซมีเทน เนื่องจากสารอินทรีย์ในระบบถูกย่อยสลายในสภาวะปราศจากออกซิเจน ทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดในถังหมักกรดมีโครงสร้างและโมเลกุลเล็กลง และจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และอื่นๆ ในถังหมักก๊าซมีเทน ทำให้ค่าของแข็งทั้งหมดของถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับถังหมักกรด (กรมโรงงาน, 2553) โดยระบบนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดในถังหมักกรดอยู่ในช่วง 41.70-54.87 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 74.64-87.46 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบอยู่ในช่วง 88.15-93.18 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัยนี้สอดคล้องกับการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ของจีรสมัย (2551) พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดของของแข็งทั้งหมดสูงสุดคือ 91.95 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

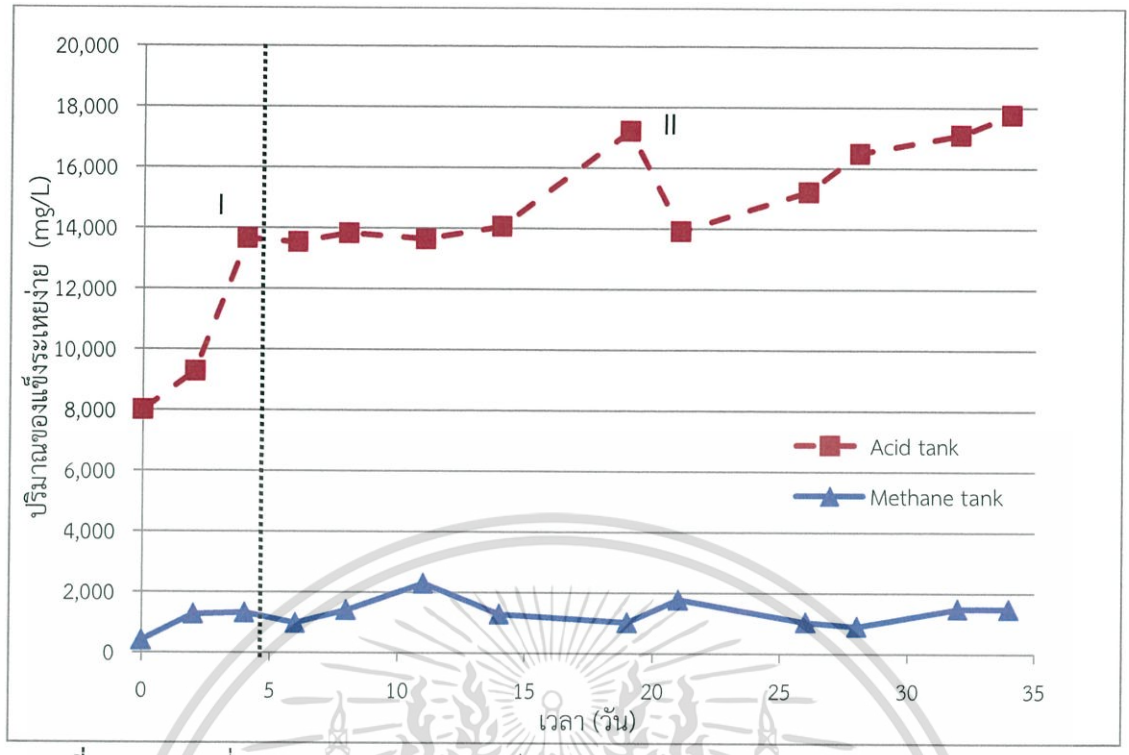


รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

4.2.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายในระบบ

จากการทดลองพบว่า ปริมาณของแข็งระเหยง่ายของสารละลายกากมันสำปะหลังที่เติมเข้าสู่ระบบ (Feed) อยู่ในช่วง 26,220-39,050 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.5 ภาคผนวก ข) และการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยง่าย (VS) ในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนแสดงดังรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.9 และ ข-3.10 ภาคผนวก ข) โดยในถังหมักกรดมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองอยู่ในช่วง 8,000-13,656 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 13,530-17,768 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และถังหมักก๊าซมีเทนมีปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดในช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองอยู่ในช่วง 405-1,320 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 897.33-2,290 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณของแข็งระเหยง่ายในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าต่ำกว่าในถังหมักกรด เนื่องจากจุลินทรีย์มีการย่อยสลายของแข็งระเหยง่ายไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมด มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในถังหมักกรดอยู่ในช่วง 43.81-57.22 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 83.22-94.56 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดในระบบอยู่ในช่วง 94.41-97.16 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

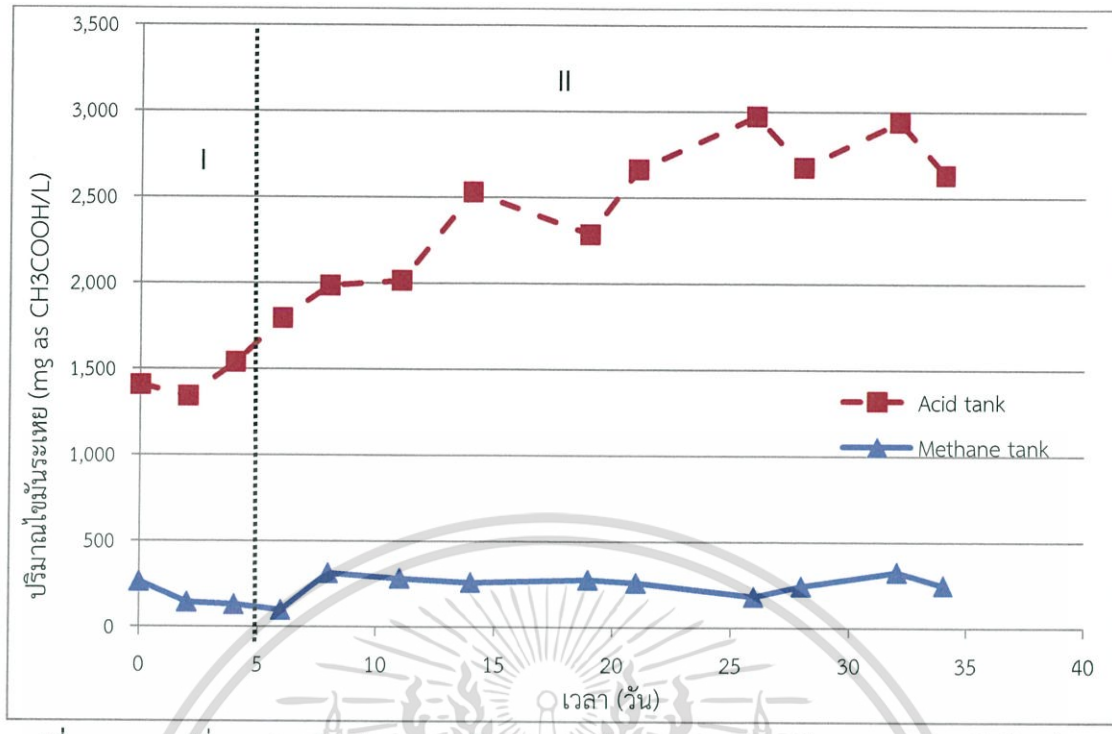


รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายในระบบของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

4.2.6 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ

จากการทดลองพบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหย (VFAs) ของสารละลายกากมันสำปะหลังที่เติมเข้าสู่ระบบ (Feed) มีค่าอยู่ในช่วง 491.77-633.60 mg/L as CH_3COOH (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.6 ภาคผนวก ข) และการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณกรดไขมันระเหยในถังหมักกรดและในถังหมักก๊าซมีเทน แสดงดังรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.11 และ ข-3.12 ภาคผนวก ข) ปริมาณกรดไขมันระเหยในถังหมักกรดช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองมีค่าอยู่ในช่วง 1,340.80-1,537.60 mg/L as CH_3COOH และ 1,793.60 -2,973.80 mg/L as CH_3COOH ตามลำดับ ส่วนในถังหมักก๊าซมีเทนช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สองปริมาณกรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 129.60-261.33 mg/L as CH_3COOH และ 97.60 -325.03 mg/L as CH_3COOH ตามลำดับ โดยปริมาณกรดไขมันระเหยในถังหมักกรดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารอินทรีย์ของสารละลายกากมันสำปะหลังถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายได้เป็นกรดไขมันระเหยต่าง ๆ เช่น กรดอะซิติกและกรดบิวทิริก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ตั้งต้นที่ส่งต่อไปยังถังหมักก๊าซมีเทนเพื่อให้เมทาโนเจนย่อยไปเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป ทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยในถังหมักก๊าซมีเทนลดลง งานวิจัยนี้สอดคล้องกับการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ของจีรสมัย (2551) พบว่ากรดไขมันระเหยของของเหลวจากถังกรดอยู่ในช่วง 7,939–15,713 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในถังหมักกรดให้กลายเป็นกรดไขมันระเหย จึงทำให้ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้น ส่วนในถังหมักก๊าซมีเทนปริมาณของกรดไขมันระเหยลดลง มีค่าอยู่ในช่วง 2,030–4,708 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากกรดไขมันระเหยที่สร้างขึ้นในถังหมักกรดถูกจุลินทรีย์ในถังหมักก๊าซมีเทนนำไปใช้เพื่อผลิตมีเทนทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (รูปที่ 4.1) ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยสูงจะทำให้ค่าพีเอชลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



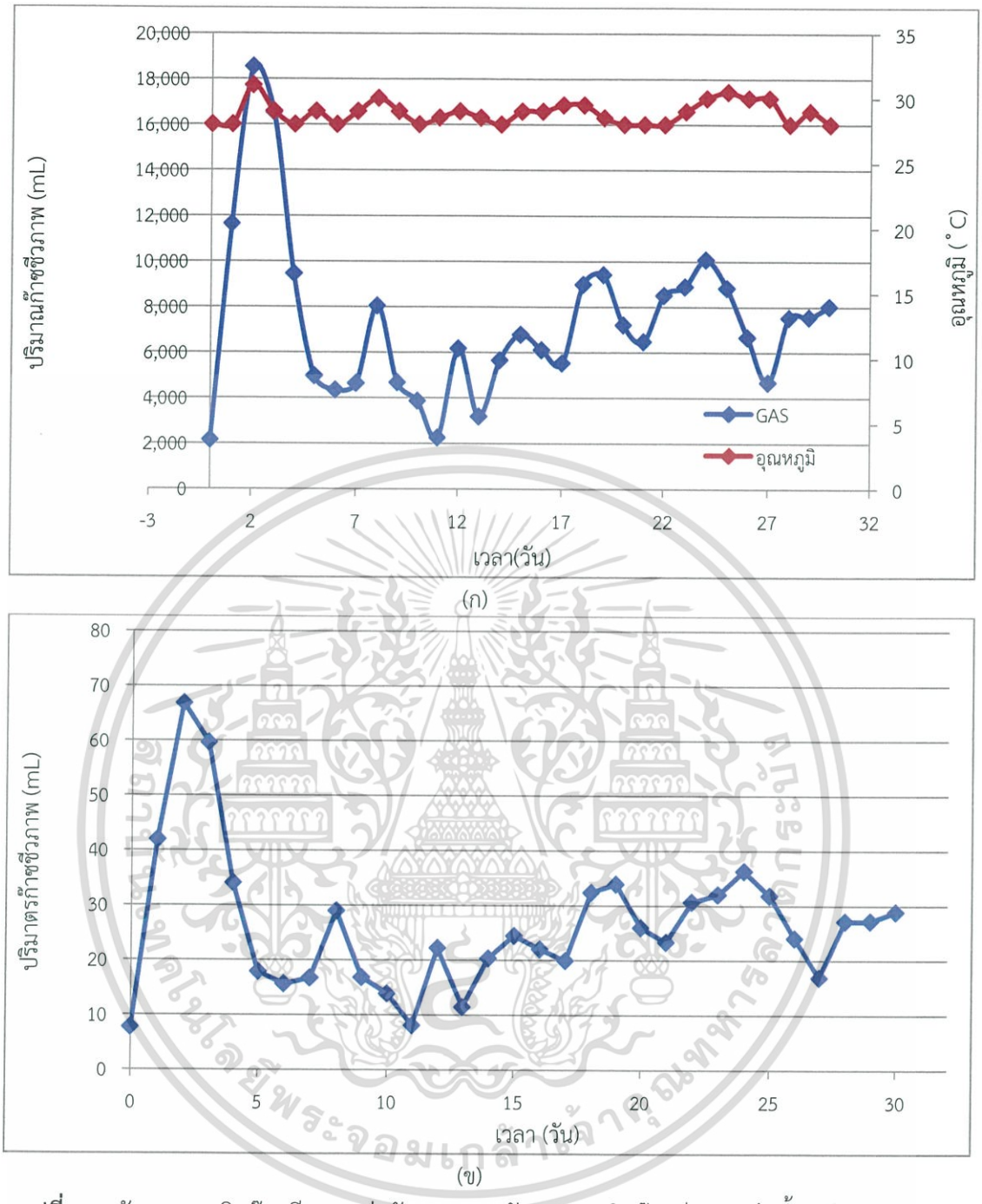
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบของถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

4.3 ผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ

4.3.1 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

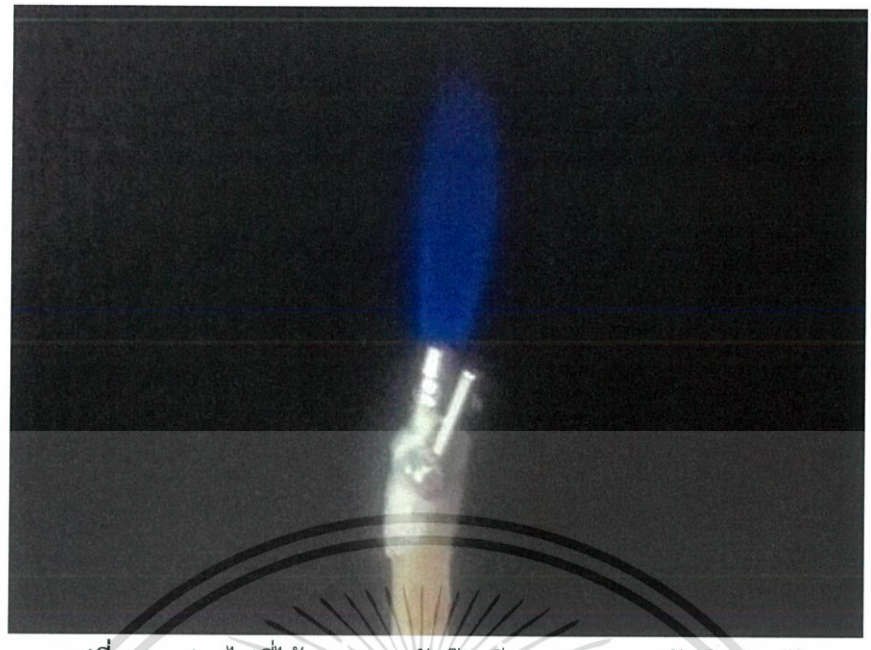
จากผลการทดลองอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในบรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.7ก (ดูรายละเอียดตารางที่ ข-3.13 ภาคผนวก ข) อย่างไรก็ตาม ในช่วงวันที่ 1 ถึง 5 ของการหมักในระยะทดลอง จะมีการเพิ่มปริมาตรก๊าซชีวภาพค่อนข้างสูง เนื่องจากมีการเติมอาหารจากวันเว้นวันในระยะปรับสภาพเป็นเติมอาหารทุกวันในระยะทดลอง อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเริ่มคงที่ในวันที่หกของการหมักในระยะทดลอง (ช่วงที่ II) โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 6.50±2.05 ลิตรต่อวัน ส่วนอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลังโดยน้ำหนักเปียก (ความชื้น 76.23 เปอร์เซ็นต์) มีค่าอยู่ในช่วง 8.11-36.33 มิลลิลิตรของก๊าซชีวภาพต่อกรัมของกากมันสำปะหลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.7ข (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2.1 ภาคผนวก ค) ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ได้มีปริมาณน้อยกว่างานวิจัยของพงษ์พันธ์และธนากร (2554) ที่พบว่ากากมันสำปะหลัง 1 กรัม (โดยน้ำหนักเปียก) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 70-100 มิลลิลิตร ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณความชื้นและองค์ประกอบของแป้งในกากมันสำปะหลังที่ใช้เป็นวัตถุดิบแตกต่างกัน จากการตรวจสอบเปลวไฟในการจุดติดของก๊าซชีวภาพพบว่า เปลวไฟเป็นสีน้ำเงิน (รูปที่ 4.8) แสดงว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีความร้อนเพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นพลังงาน (วิวัฒน์และภัททวัฒน์, 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวัน (ก) และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลัง (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



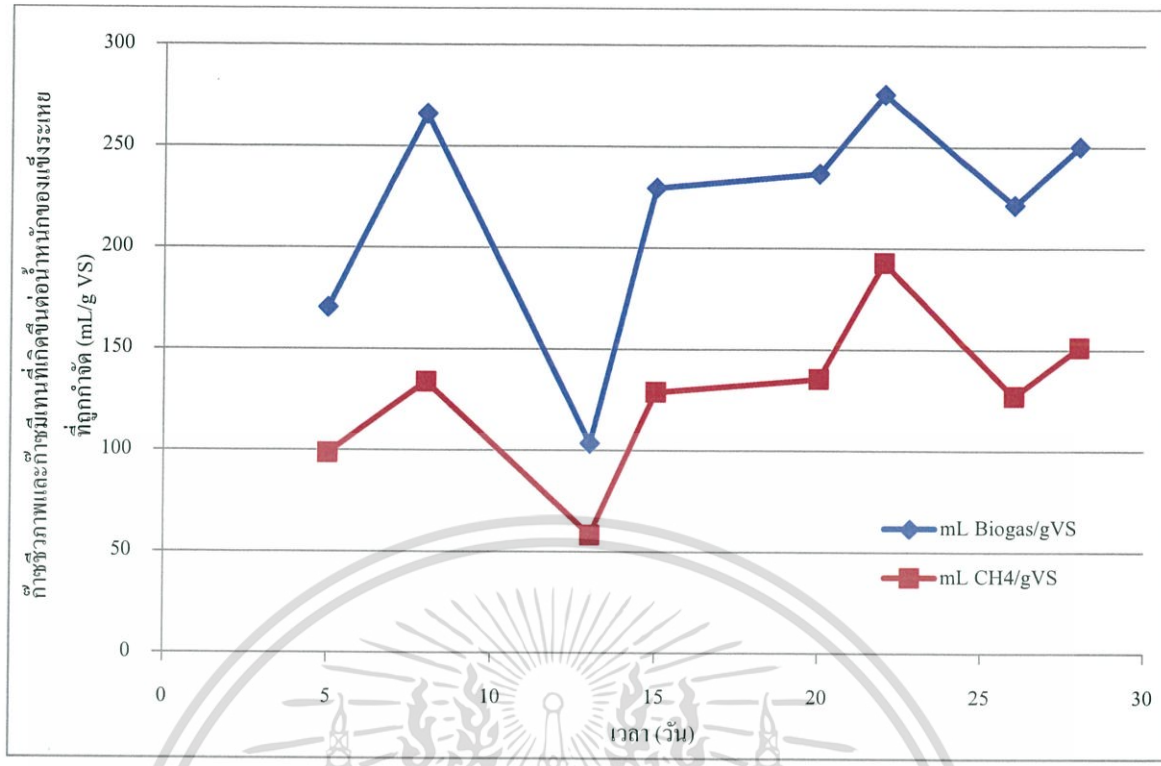
รูปที่ 4.8 เปลวไฟที่ได้จากการหมักก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง
โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

4.3.2 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายและกรดไขมันระเหย

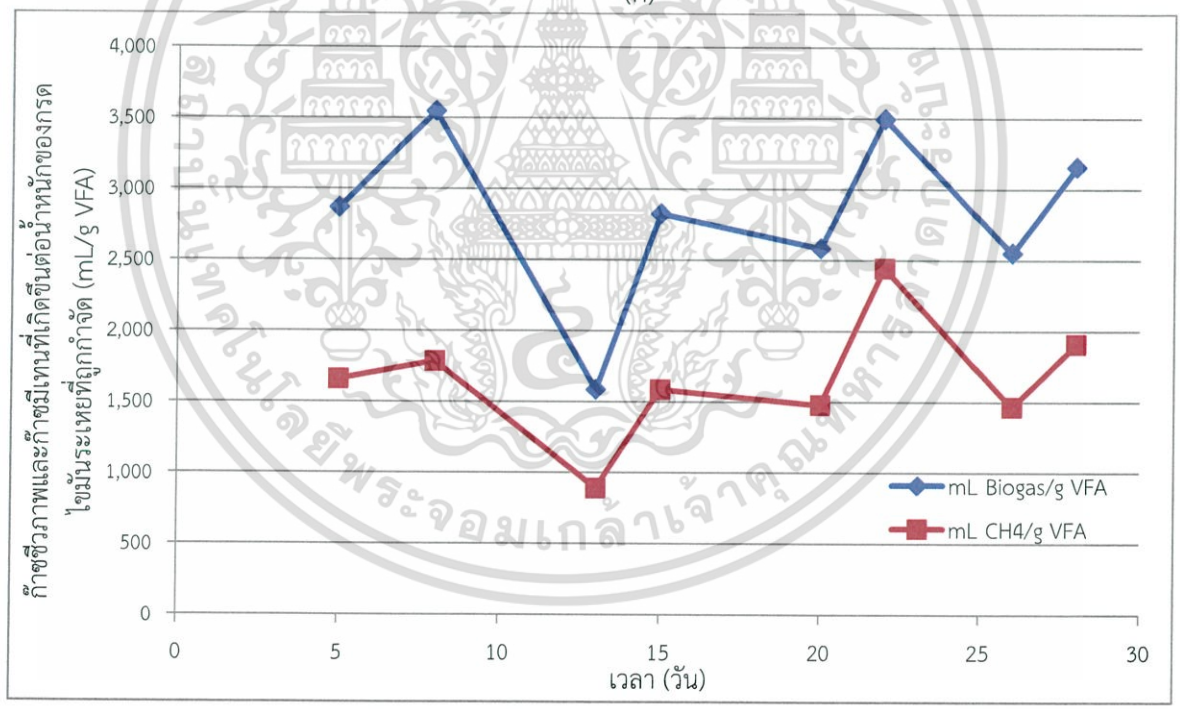
จากผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายและกรดไขมันระเหย จากการหมักกากมันสำปะหลัง 277.3 กรัม ในน้ำประปา 1 ลิตรในช่วงระยะทดลอง (ช่วงที่ II) เติมสารละลายกากมันสำปะหลังเข้าสู่ระบบทุกวันเวลา 8.00 น. ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-3.1 และ ค-3.2 ภาคผนวก ค)

รูปที่ 4.9ก แสดงอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 103.38–275.84 และ 58.10–192.81 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหย ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.9ข แสดงอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.58-3.55 และ 0.89-2.44 ลิตรต่อกรัมของกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ซึ่งอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยมีแนวโน้มการผลิตไปในทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม พบว่าในวันที่ 13 ของการหมักในระยะทดลอง มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง อาจเกิดเนื่องจากอุณหภูมิในห้องหมักลดต่ำลงกว่าสภาพการหมักในวันอื่นๆ เพราะมีการเปิดประตูห้องหมักทิ้งไว้ทำให้ความเย็นจากเครื่องปรับอากาศจากภายนอกเข้ามาในห้องหมัก ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

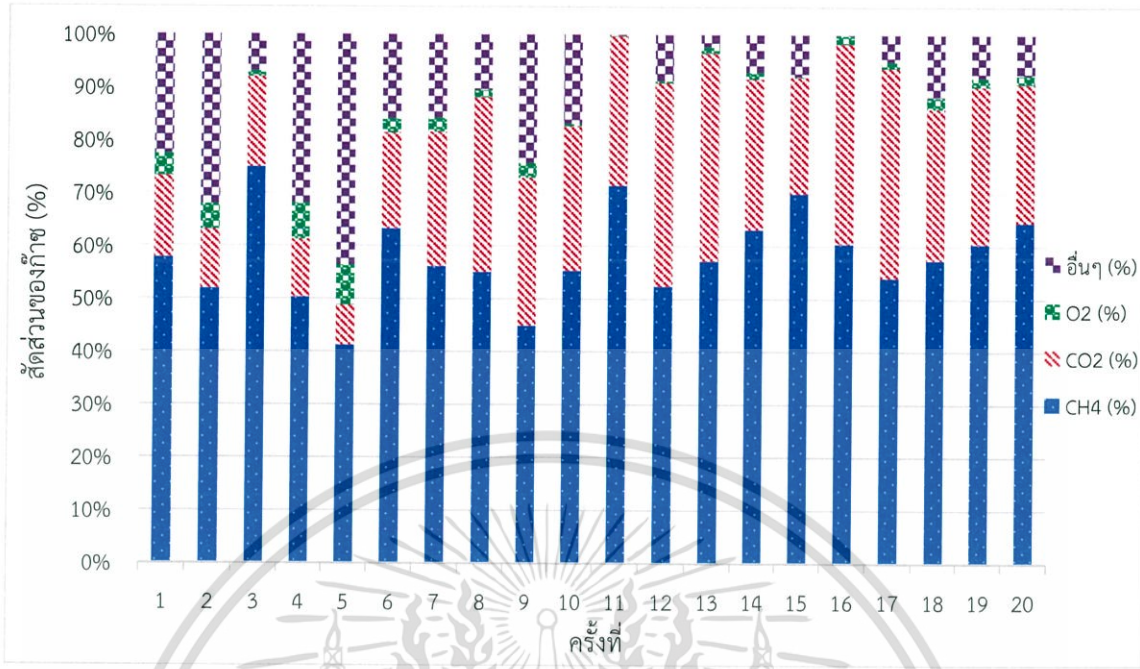


(ข)

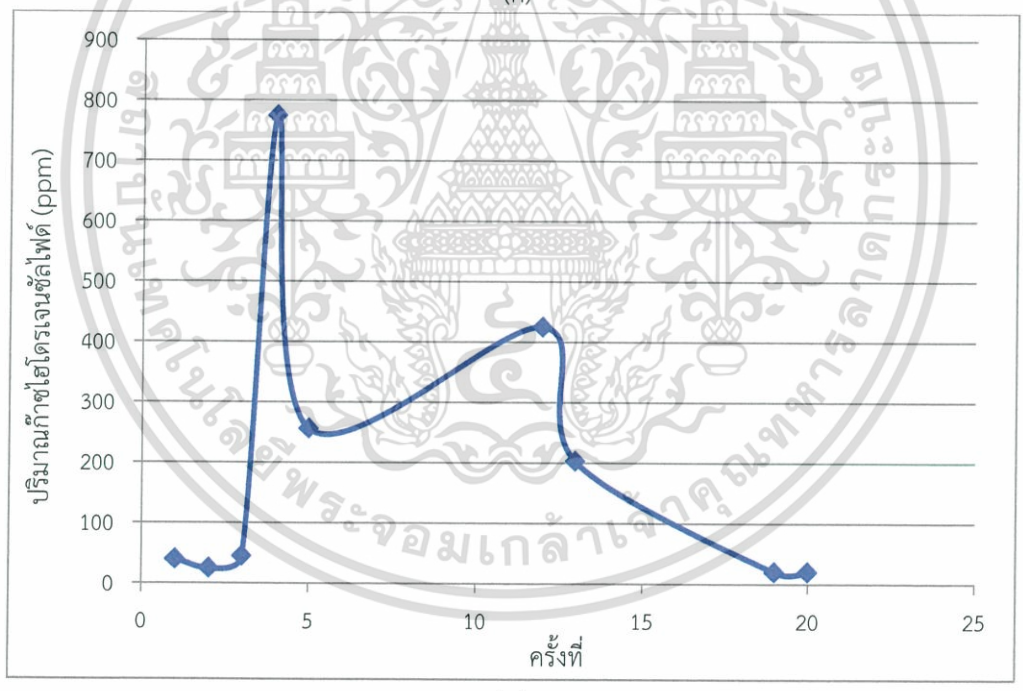
รูปที่ 4.9 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของแข็งที่ถูกกำจัด (ก) และกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพในระหว่างการหมักก๊าซชีวภาพ
(ก) ก๊าซมีเทน (CH_4), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซออกซิเจน (O_2)
(ข) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

จากผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Data Meter พบว่ามีก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าอยู่ในช่วง 41.2–74.9 เปอร์เซ็นต์ และ 7.6–39.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.20 ภาคผนวก ข) ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ที่เกิดจากกระบวนการหมักสารอินทรีย์แบบไร้อากาศของจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุรีลักษณ์ และสิรินทรเทพ (2557) ที่พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังมีปริมาณก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 18.6-76.4 เปอร์เซ็นต์ และพบก๊าซออกซิเจน (O_2) มีค่าอยู่ในช่วง 0.1-7.6 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากอาจมีก๊าซออกซิเจนปนเปื้อนเข้าไปในระหว่างการวัดองค์ประกอบของก๊าซ และพบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) มีค่าอยู่ในช่วง 20–5,045 ส่วนในล้านส่วน ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากในกระบวนการแปรรูปมันสำปะหลังมีการใช้กรดซัลฟิวริก ทำให้มีการตกค้างของกรดซัลฟิวริกในกากมันสำปะหลังเป็นจำนวนมาก ซึ่งกรดซัลฟิวริกนี้จะถูกย่อยสลายโดย Sulfate reducing bacteria กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข)

4.4 ผลการศึกษาวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียในถังหมัก

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของเชื้อจุลินทรีย์โดยการย้อมสีแกรม แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า (รูปที่ 4.11) พบว่าเชื้อจุลินทรีย์ในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนมีทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ ลักษณะรูปร่างของเชื้อจุลินทรีย์ในถังหมักกรดมีลักษณะเป็นท่อนกลม ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นแบคทีเรียกลุ่ม Acetogenic bacteria และในถังหมักก๊าซมีเทน มีลักษณะเป็นเส้นบาง ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นแบคทีเรียนกลุ่ม Methanogen (Chem, 2005)

ถังหมักกรด ถังหมักก๊าซมีเทน

รูปที่ 4.11 ลักษณะเชื้อแบคทีเรียในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนโดยการย้อมสีแกรมแล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักกากมันสำปะหลังโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในถังหมักระดับห้องปฏิบัติการประกอบด้วยถังหมักกรดปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร โดยเติมกากมันสำปะหลัง 277.3 กรัม ปรับด้วยน้ำประปาให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร (1%โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรด) ในช่วงเวลา 08.00-08.05 น. ตั้งแต่วันที่ 1-31 มีนาคม 2560 รวมระยะเวลาทดลอง 30 วัน ซึ่งใช้หัวเชื้อในการหมักได้จากการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเผือก มีการตั้งการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที ทำการปั่นกวนทุก 15 นาที และหยุดปั่นกวน 30 นาที จากผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบพบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถังหมักกรด มีค่า 3.32–3.40 ถังหมักก๊าซมีเทน มีค่า 6.64–7.60 ค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดของถังหมักกรด มีค่า 1,846.33–5,211.67 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทน มีค่า 121.77–176.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักกรด มีค่า 45.33–114.80 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทน มีค่าเป็น 175.60-360.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของถังหมักกรด มีค่า 14,930–19,288 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทน มีค่า 2,330–3,920 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ระหว่าง 88.15-93.18 เปอร์เซ็นต์ ค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายของถังหมักกรด มีค่า 13,530-17,768 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทน มีค่า 897.33-2,290 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายอยู่ระหว่าง 94.41-97.16 เปอร์เซ็นต์ ค่าปริมาณกรดไขมันระเหยของถังหมักกรดมีค่า 1,793.60-2,973.80 มิลลิกรัมต่อลิตรของกรดไขมันระเหย และถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า 97.60-325.03 มิลลิกรัมต่อลิตรของกรดไขมันระเหย อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด มีค่า 103.38-275.84 และ 58.10-192.81 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหย ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด มีค่า 1.58-3.55 และ 0.89-2.44 ลิตรต่อกรัมของกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ก๊าซชีวภาพที่ได้มีปริมาณก๊าซมีเทน (CH_4) 41.2–74.9 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 7.6–39.7 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) 20–5,045 ppm

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพโดยแปรค่าอัตราส่วนกากมันสำปะหลังเพิ่ม

2) ควรศึกษาวิธีการกำจัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบ

3) ควรศึกษาสารธาตุอาหารที่เหลือในตะกอนของถังหมักก๊าซเพื่อนำไปใช้ที่ทำปุ๋ยในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2554. **ก๊าซชีวภาพ** . กระทรวงพลังงาน.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. **คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม**. สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทวงอุตสาหกรรม.

จินตนา จิตรภู่ภักดี. 2552. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและพัลพ์สับปะรดโดยการหมักแบบ 2 ขั้นตอน**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

จิรายุ มูลศาลา, ชนะเมือง เมืองนก และ ภานุเดช บุญกว้าง. 2558. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเผือกจากโรงงานผลิตขนมปังโดยกระบวนการย่อยสลายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.** โครงงานพิเศษปริญญาวิทยาศาตรบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา ภาควิชาชีววิทยา, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จีรสมัย ดลชม. 2551. **ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ระเหยในระบบถังหมักแบบสองขั้นตอน.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิพิเศษฐ์. 2553. **สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เรื่องมันสำปะหลัง.** กรุงเทพฯ.

มณฑา แก้วกิติพงษ์, ทศพร เหล็กชาย และ ภาดร กาญจนดุล. 2546. **มันสำปะหลัง.** สำนักพัฒนาพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

มิ่งสรรพ์ ขาวสอาด และ คณะ. 2546. **ผลการศึกษาวิจัยเรื่องการจัดทำยุทธศาสตร์การค้าผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังกับสาธารณรัฐประชาชนจีน.** สถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [Online] Available:http://utcc2.utcc.ac.th/tradestrategies/web_tradestrategies5/information /tpica16.pdf สืบค้นเมื่อวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2560.

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2553. **เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซชีวภาพ.** กรุงเทพฯ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2559. ข้อมูลรายชื่อผู้ผลิต-ส่งออกผลิตภัณฑ์แปรรูปมันสำปะหลัง. [Online] Available: http://www.tapiocathai.org/M1.html สืบค้นเมื่อวันที่ 6 มิถุนายน 2560.

พงษ์พันธ์ พรมพิพักต์ และ ธนากร วงวัฒนาเสถียร. 2554. **การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง.** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25.

พงษ์พันธ์ พรมพิพักต์. 2555. **การผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กากมันสำปะหลังหลังจากกระบวนการผลิตแป้งมัน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เพ็ชรรัตน์ เชาวกิจ. 2538. **การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย.** โครงงานพิเศษวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฟาร์มไทยแลนด์. 2556. สินค้าส่งออกทางการเกษตรของไทย [Online] Available: http://www.farmthailand.com/399 สืบค้นเมื่อวันที่ 5 มกราคม 2560.

ยุภาพร วอแพง. 2552. **การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลังในเขตภาค ตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย.** รายงานการศึกษาอิสระปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เยาวมาลย์ ค้าเจริญ และ สาโรช ค้าเจริญ. 2543. **คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของข้าวโพดเทียบกับการผลิตข้าวโพดวิทยาศาสตร์จากมันสำปะหลัง.** สาส์นไก่และการเกษตร. 48(8) : 44–51.

วิวัฒน์ วชิรวงศ์กวิน และ ภัททวัฒน์ มณีวัฒนภิญโญ. 2554. **อะตอมและตารางธาตุ.** คู่มือการใช้สื่อการสอนวิชาเคมี [Online] Available: http://www.phukhieo.ac.th/obec-media/2554/manual/%A4%D9%E8%C1%D7%CD%C7%D4%AA%D2%E0%A4%C1%D5/%A4%D9%E8%C1%D7%CD%CA%D7%E8%CD%E0%A4%C1%D5%B5%CD%B906.pdf สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2560.

ศุภาพร หวังศิริเจริญ และ วสุ ปฐมอารีย์. 2553. **จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ.** บทความวิชาการวิทยาศาสตร์. สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย. 64(3), 70-74.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์ข้อมูลการใช้มันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์. 2550. **หลักการใช้มันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์.** [Online] Available: http://www.tapiocafeed.com/use/u01.html สืบค้นเมื่อวันที่ 1 เมษายน 2560.

สมยศ เนตรสงคราม, อาคม แก้วระวัง และ รัชพล สันติวรากร. 2557. **ผลของอัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ.** มหาวิทยาลัยขอนแก่น. [Online] Available: https://gsbooks.gs.kku.ac.th/57/grc15/files/pmp21.pdf สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2560.

สมิต ยิ้มมงคล และ สุกัญญา จัตตุพรพงษ์ .2559. **คุณประโยชน์ของกากมันสำปะหลัง.** ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณวาจกกสิกิจ ฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. [Online] Available: http://cassavapulp.blogspot.com /2016/09/blog-post.html สืบค้นเมื่อวันที่ 1 เมษายน 2560.

สุรพงษ์ เจริญรัก. 2525. **อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง.** เอกสารวิชาการเล่มที่ 7 มันสำปะหลัง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สุรีลักษณ์ รอดทอง และ สิรินทรเทพ เต้าประยูร. 2557. **มีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน.** งานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2559. **มันสำปะหลัง.** [Online] Available: http://cassavapulp .blogspot.com/2016/09/blog-post.html สืบค้นเมื่อวันที่ 20 มกราคม 2560.

อานีตา ปาเก. 2556. **การผลิตแก๊สชีวภาพจากสาหร่ายขนาดใหญ่ร่วมกับซีรัมจากการผลิตน้ำยางข้น.** ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อาริยา วิรัชวรกุล. 2546. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Chem Et. B.J. 2005. **A simplified analysis of granule behavior in ASBR and UASB reactors treating low-strength synthetic wastewater.** Environmental Engineering. 22, 566-590

Chun-Feng Chu, Kai-Qin Xu, Yu-You Li and Yuhei Inamori. 2012. **Hydrogen and methane potential based on the nature of food waste materials in a two-stage thermophilic fermentation process.** International journal of hydrogen energy. 37, 10611 -10618.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gang Luo, Li Xie, Qi Zhou and Irini Angelidaki. 2011. **Enhancement of bioenergy production from organic wastes by two-stage anaerobic hydrogen and methane production process.** Bioresource Technology. 102, 8700-8706.

Martin, J., A. F. Nunes, J. L. Andre and A. Vaz Portugal. 1993. **The post-production system for cassava.** [Online] Available http://www.fao.org

Nipon Pisutpaisal, Chananchida Nathao and Ubonrat Sirisukpoka. 2014. **Biological hydrogen and methane production in from food waste in two-stage CSTR.** Energy Procedia. 50,719–722.

Peerawat Khongkliang, Prawit Kongjan and Sompong O-Thong. 2015. **Hydrogen and methane production from starch processing wastewater by thermophilic two-stage anaerobic digestion.** Energy Procedia. 79, 827–832.

Rey M.D., Font R. and Aracil I. 2013. **Biogas from MSW landfill: Composition and determination of chlorine content with the AOX (adsorbable organically bound halogens) technique.** Energy. 63, 161-167.

Richa Kothari , A.K. Pandey , S. Kumar , V.V. Tyagi and S.K. Tyagi. 2014. **Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 39, 174-195

Tewe O. O. and Lyayi E. A. 1989. **Cyanogenic glycosides.** In Toxicants of Plant Origin. 2, 43-60.

Vincent Okudoh, Cristina Trois, Tilahun Workneh and Stefan Schmidt. 2014. **The potential of cassava biomass and applicable technologies for sustainable biogas production in South Africa: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 32, 1035-1052.

Yusoff Mohd Zulkhairi Mohd, Rahman Noraini Abdul and Shirai Yoshihito . **The effect of hydraulic retention time and volatile fatty acids on biohydrogen production from palm oil mill effluent under non-sterile condition.** Australian journal of basic and applied sciences. 4: 577-587.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์

ก-1 วิธีวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาวะในระหว่างการหมัก

ก-1.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องวัดพีเอช
2) บีกเกอร์
3) เครื่องกวนแม่เหล็กและแท่งเหล็ก

วิธีการทดลอง

1) ทำความสะอาดอิเล็คโทรดก่อนวัดค่าพีเอช โดยใช้น้ำบริสุทธิ์ฉีดล้างให้ทั่ว เช็ดด้วยกระดาษทิชชู่

2) เปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 15 นาที เพื่อให้สัญญาณเสถียร

3) การปรับเทียบค่าพีเอช โดยใช้บัฟเฟอร์ 7 เป็นจุดที่ 1 และใช้บัฟเฟอร์ 4 เป็นจุดที่ 2

4) วัดค่าพีเอชของตัวอย่าง โดยจุ่มอิเล็คโทรดลงในบีกเกอร์ตัวอย่างแล้วคนเบาๆ รอจนกว่าค่าพีเอชไม่เปลี่ยนแปลงจึงอ่านค่า

5) ทำความสะอาดอิเล็คโทรดทุกครั้งหลังจากวัดค่าพีเอช โดยใช้น้ำบริสุทธิ์ฉีดล้างให้ทั่ว ซับด้วยกระดาษทิชชู่ และเมื่อเสร็จปฏิบัติการต้องจุ่มอิเล็คโทรดในสารละลายสำหรับแช่อิเล็คโทรด

ก-1.2 ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)

หลักการ

ของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากสารตัวอย่างจนหมด แล้วนาไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (Dessicator) แล้วชั่งหาน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น จะได้ปริมาณของแข็งทั้งหมด

เครื่องมือและอุปกรณ์

1) จานระเหยกระเบื้อง
2) เตาอบ ควบคุมอุณหภูมิที่ 103-105 องศาเซลเซียส
3) Water Bath
4) เดสิกเคเตอร์
5) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

วิธีการวิเคราะห์

1) การเตรียมจานระเหย จานที่ใช้จะต้องอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดสิกเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน สมมติ = A กรัม

2) เลือกใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ค่อยๆ รินน้ำตัวอย่างที่ต้องการหาของแข็งทั้งหมดใส่ในจานระเหย นำไประเหยน้ำออก ให้หมดบน Water Bath หรือ Hot Plate นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดสิกเคเตอร์

4) ชั่งน้ำหนักจานระเหยทันทีที่เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง สมมติ B กรัม น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นก็คือน้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งคำนวณออกมาในรูปของมิลลิกรัมต่อลิตร

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A)\ \text{กรัม} \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มล)}}$$

ก-1.3 ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS)

หลักการ

ของแข็งระเหยทั้งหมด หมายถึง ปริมาณของสารที่ระเหยไปได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่ไม่สลายไป เรียกว่า ปริมาณของแข็งคงตัว (Fixed Solids)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1) จานระเหยกระเบื้อง
2) เตาอบ ควบคุมอุณหภูมิที่ 103-105 องศาเซลเซียส
3) Water Bath
4) เดสิกเคเตอร์
5) เครื่องชั่ง 4 ตาแหน่ง
6) เตาเผาควบคุมอุณหภูมิที่ 550 ±50 องศาเซลเซียส

วิธีวิเคราะห์

1) นำจานระเหยที่ได้จากการหาของแข็งทั้งหมด (B กรัม) ในข้อ ก-1.2 แล้วนำไปเผาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 550 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที)

2) ปล่อยให้เย็นลงเท่ากับอุณหภูมิห้องในเดสิกเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่ (Fixed Solids) (C กรัม)

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งระเหยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B-C)\ \text{กรัม} \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (มล)}}$$

ก-1.4 กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acid, VFA) และความเป็นด่างทั้งหมด (Total alkalinity,TAlk)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องวัดพีเอช
2) เครื่องเซนติฟิวจ์
3) Hot plate และเครื่องกวนแม่เหล็ก

สารเคมี

1) สารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 0.05 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) สารละลายมาตรฐาน NaOH 0.05 N

วิธีวิเคราะห์

1) นำตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร

2) วัดค่าพีเอช

3) หาความเป็นด่างโดยการไทเทรตตัวอย่างกับสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 0.05 N จนพีเอชมีค่าเป็น 4.0 จดปริมาตรกรดที่ใช้ไป คำนวณความเป็นด่างทั้งหมด แล้วไทเทรตต่อไปจน พีเอชเป็น 3.5 (ทำการกวนสารตลอดเวลา) สมมติ = A มิลลิลิตร

4) ต้มไล่ CO2เป็นระยะเวลาประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

5) ไทเทรตต่อด้วยสารละลายมาตรฐาน NaOH 0.05 N จนพีเอชเป็น 4 แล้วไทเทรตต่อไปจนพีเอชเป็น 7.0 (จดปริมาตรสารละลายมาตรฐานด่างที่ใช้ตั้งแต่พีเอช 4 ถึง 7) สมมติ = B มิลลิลิตร

การคำนวณ

$$\text{สภาพด่างทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป } CaCO_3) = \frac{A \times \text{Normality ของ } H_2SO_4 \times 50 \times 1{,}000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

$$\text{สภาพด่าง VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป } CaCO_3) = \frac{B \times \text{Normality ของ } NaOH \times 50 \times 1{,}000}{\text{มิลลิลิตรตัวอย่าง}}$$

ก) กรณีที่ 1 ถ้าสภาพด่าง VFA น้อยกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป CH_3COOH) = สภาพด่าง VFA x 1.0

ข) กรณีที่ 2 ถ้าสภาพด่าง VFA มากกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คิดในรูป CH_3COOH) = สภาพด่าง VFA X 1.5

ก-1.6 ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen, TN) และ อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1) ไซลิงค์ฟิลเตอร์ 0.45 ไมโครเมตร

2) ไวแอล ขนาด 50 มิลลิลิตร

3) บีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร

4) ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร

สารเคมี

1) โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3)

2) โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP)

3) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)

4) โซเดียมคาร์บอเนต ($NaCO_3$)

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

สำหรับ TOC ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

1) อบโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) ที่อุณหภูมิ 105 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

2) ชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) 0.2125 กรัม ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำอัลตร้าเพียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ TN ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

1) นำโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

2) ชั่งโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) 0.7219 กรัม ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำอัลตร้าเพียร์;

วิธีการทดลอง

1) กรองตัวอย่างด้วยไซลิงค์ฟิลเตอร์ 0.45 ไมโครเมตร ลงในขวดไวแอล

2) นำตัวอย่างวางในช่อง sample cover

3) ประมวลผลโดยเครื่อง TOC Analyzer

ก-1.7 ความชื้น (Moisture content)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องชั่ง 4 ตาแหน่ง

2) ตู้อบ

3) เดสิกเคเตอร์

วิธีวิเคราะห์

1) ชั่งตัวอย่าง 5.xxxx กรัม ใส่ลงในชามระเหย บันทึกน้ำหนัก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่

2) นำตัวอย่างที่อบแล้วใส่เดสิกเคเตอร์ ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ

การคำนวณ

$$\text{ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{(\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$$

ก-1.8 วิธีวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต และปริมาณแป้ง โดยวิธีฟีนอล-ซัลฟูริกแอซิด (Phenol-Sulfuric acid)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1) หลอดทดลอง

2) Water Bath และ Hot plate

3) สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

4) กระดาษกรอง

5) กรวยกรอง

สารเคมี

1) ฟีนอล (C_6H_6O)

2) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc.H_2SO_4)

3) กลูโคส ($C_6H_{12}O_6$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

วิเคราะห์คาร์โบไฮเดรต

1) ชั่งตัวอย่าง 0.5-1 กรัม ผสมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
2) เติมสารละลายฟีนอล 1 มิลลิลิตร และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
3) ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร
4) นำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคส

วิเคราะห์ปริมาณแป้ง

1) ชั่งตัวอย่าง 0.5-1 กรัม ผสมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
2) นำไปต้ม 15 นาที กรองนำส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ต่อ
3) เติมสารละลายฟีนอล 1 มิลลิลิตร และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
4) ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร
5) นำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคส

ก-1.9 การตรวจเชื้อที่ใช้ในถังผลิตก๊าซชีวภาพ

เครื่องมือและอุปกรณ์

1) กล้องจุลทรรศน์
2) สไลด์
3) ลวดเขี่ยเชื้อ
4) ตะเกียงแอลกอฮอล์
5) กระดาษเช็ดเลนส์

สารเคมี

1) สีย้อม Safranin
2) สีย้อม Crystal violet
3) น้ำยาแกรมไอโอดีน
4) แอลกอฮอล์

วิธีการทดลอง

1) หยดสีย้อม Crystal violet ลงบนสไลด์ให้ท่วมรอยที่สเมียร์ทิ้งไว้ 1 นาที
2) ล้างออกด้วยน้ำยาแกรมไอโอดีน แล้วหยดน้ำยาแกรมไอโอดีนให้ท่วมรอยสเมียร์ทิ้งไว้ 1 นาที
3) ล้างน้ำยาแกรมไอโอดีนด้วยน้ำกลั่นแล้วล้างออกอีกครั้งด้วยแอลกอฮอล์ 95% จนน้ำที่ล้างไม่มีสีติดออกมา
4) ย้อมทับ (Counterstain) ด้วยสีย้อม Safranin ทิ้งไว้ 1 นาที
5) ล้างออกด้วยน้ำกลั่น แล้วปล่อยให้สไลด์แห้ง
6) ตรวจผลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า และบันทึกภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ข-1 คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง

ตารางที่ ข-1.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง

พารามิเตอร์	สารละลายกากมันมันสำปะหลัง			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
คาร์โบไฮเดรต (g/L)	149.62	191.49	53.30*	170.55	29.61
ปริมาณแป้ง (g/L)	95.75	101.84	73.81	90.47	14.74
ความชื้น (Moisture content) (%)	76.91	80.45	71.35	76.23	4.59
ปริมาณซัลเฟอร์ในรูปของซัลเฟต (mg/L)	10.66	22.28	38.13	23.69	13.79
อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	75.54	81.31	85.84	80.90	5.16
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) (mg/L)	3.86	4.15	4.31	4.11	0.23
C/N ratio	19.56	19.58	19.90	19.68	0.19

*ไม่นำค่ามาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เนื่องจากข้อมูลมีความคาดเคลื่อนจากทำ Q-test

ข-2 คุณลักษณะของสารละลายกากมันสำปะหลัง (Feed)

ตารางที่ ข-2.1 ผลการทดลองค่าพีเอชของสารละลายกากมันสำปะหลัง

วิเคราะห์ครั้งที่	พีเอช			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	3.37	3.43	3.42	3.41	3.36	0.02
2	3.34	3.34	3.35	3.34		
3	3.36	3.38	3.37	3.37		
4	3.35	3.36	3.36	3.36		
5	3.33	3.33	3.33	3.33		
6	3.35	3.37	3.38	3.37		
7	3.37	3.36	3.34	3.36		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.2 ผลการทดลองค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดของสารละลายกากมันสำปะหลัง

วิเคราะห์ครั้งที่	อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	1,378.00	1,372.00	1,364.00	1,371.33		
2	1,397.00	1,408.00	1,397.00	1,400.67		
3	1,118.00	1,305.00	1,279.00	1,234.00		
4	1,325.00	1,364.00	1,374.00	1,354.33	1,456.51	189.09
5	2,424.00	2,392.80	2,360.10	2,392.30*		
6	1,656.00	1,732.00	1,677.00	1,688.33		
7	1,808.40	1,605.60	1,657.20	1,690.40		

*ไม่นำค่ามาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เนื่องจากข้อมูลมีความคาดเคลื่อนจากทำ Q-test

ตารางที่ ข-2.3 ผลการทดลองค่าไนโตรเจนทั้งหมดของสารละลายกากมันสำปะหลัง

วิเคราะห์ครั้งที่	ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	64.58	66.09	65.2	65.29		
2	62.44	61.80	61.52	61.92		
3	51.18	65.22	61.60	59.33		
4	55.31	58.54	58.88	57.58	75.70	22.47
5	118.77	123.36	120.12	120.75		
6	82.89	87.54	84.82	85.08		
7	84.96	75.6	79.23	79.93		

ตารางที่ ข-2.4 ผลการทดลองค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของสารละลายกากมันสำปะหลัง

วิเคราะห์ครั้งที่	ของแข็งทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	32,556	28,280	33,724	31,520		
2	37,192	33,952	35,252	35,470		
3	49,404	37,500	34,812	40,570		
4	32,700	32,180	33,756	32,880	33,082.86	4,676.72
5	28,872	26,144	27,536	27,520		
6	27,472	27,868	27,928	35,860		
7	27,472	27,868	27,928	27,760		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.5 ผลการทดลองค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายของสารละลายกากมันสำปะหลัง

วิเคราะห์ครั้งที่	ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	30,720	26,580	31,924	29,740	31,618.57	4,583.12
2	35,596	32,484	33,752	33,940		
3	48,000	35,680	33,480	39,050		
4	31,376	30,656	32,232	31,420		
5	27,520	24,948	26,184	26,220		
6	36,720	32,880	33,480	34,360		
7	26,460	26,620	26,716	26,600		

ตารางที่ ข-2.6 ผลการทดลองค่าปริมาณกรดไขมันระเหยของสารละลายกากมันสำปะหลัง

วิเคราะห์ครั้งที่	กรดไขมันระเหย (mg/L as CH_3COOH)			ค่าเฉลี่ย (mg/L as CH_3COOH)	ค่าเฉลี่ยทั้งหมด (mg/L as CH_3COOH)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	523.2	628.8	456	536	551.56	49.30
2	523.2	573.6	624	573.6		
3	1,228.80	984.00	1,132.80	1,115.20*		
4	590.4	489.6	475.2	518.4		
5	552	549.6	566.4	556		
6	493.37	502.95	479	491.77		
7	609.6	657.6	633.6	633.6		

*ไม่นำค่ามาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เนื่องจากข้อมูลมีความคาดเคลื่อนจากทำ Q-test

ข-3 ผลการศึกษาสภาวะในระหว่างการหมักก๊าซชีวภาพ

1) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

ตารางที่ ข-3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของถังหมักกรด

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	พีเอช			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ระยะปรับสภาพ	1	3.99	3.96	3.96	3.97	0.02
	2	3.73	3.73	3.74	3.73	0.01
	3	3.88	3.88	3.89	3.88	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.1 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของถังหมักกรด

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	พีเอช			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ระยะทดลอง	4	3.32	3.32	3.32	3.32	0.00
	5	3.36	3.36	3.36	3.36	0.00
	6	3.39	3.39	3.39	3.39	0.00
	7	3.40	3.41	3.39	3.40	0.01
	8	3.39	3.39	3.39	3.39	0.00
	9	3.39	3.38	3.38	3.38	0.01
	10	3.34	3.34	3.34	3.34	0.00
	11	3.35	3.35	3.35	3.35	0.00
	12	3.32	3.32	3.32	3.32	0.00
	13	3.32	3.32	3.32	3.32	0.00

ตารางที่ ข-3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของถังหมักก๊าซ

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	พีเอช			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ระยะปรับสภาพ	1	7.82	7.91	7.98	7.90	0.08
	2	7.76	7.79	7.76	7.77	0.02
	3	7.82	7.94	7.97	7.91	0.08
ระยะทดลอง	4	7.61	7.61	7.58	7.60	0.02
	5	7.10	7.14	7.18	7.14	0.04
	6	6.98	6.98	6.99	6.98	0.01
	7	7.25	7.53	7.39	7.39	0.14
	8	6.92	6.98	6.97	6.96	0.03
	9	6.66	6.69	6.72	6.69	0.03
	10	6.59	6.59	6.74	6.64	0.09
	11	6.87	6.87	6.87	6.87	0.00
	12	6.78	6.83	6.99	6.87	0.11
	13	6.94	6.94	6.95	6.94	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การเปลี่ยนแปลงค่าอินทรียคาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon)

ตารางที่ ข-3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าอินทรียคาร์บอนทั้งหมดของถังหมักกรด

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ระยะปรับสภาพ	1	1,641.00	1,649.00	1,633.00	1,641.00	8.00
	2	1,653.00	1,671.00	1,665.00	1,663.00	9.17
	3	1,594.00	1,603.00	1,599.00	1,598.67	4.51
ระยะทดลอง	4	1,850.00	1,850.00	1,839.00	1,846.33	6.35
	5	3,623.60	3,636.40	3,647.20	3,635.73	11.81
	6	3,564.00	3,627.00	3,687.00	3,626.00	61.51
	7	3,192.00	3,317.00	3,475.00	3,328.00	141.82
	8	3,493.20	3,540.80	3,716.80	3,583.60	117.78
	9	4,048.00	4,064.00	3,948.40	4,020.13	62.64
	10	3,256.00	3,340.80	3,334.40	3,310.40	47.22
	11	4,928.00	4,696.00	4,760.00	4,794.67	119.82
	12	5,067.00	5,049.00	5,031.00	5,049.00	18.00
	13	5,265.00	5,185.00	5,185.00	5,211.67	46.19

ตารางที่ ข-3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าอินทรียคาร์บอนทั้งหมดของถังหมักก๊าซ

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ระยะปรับสภาพ	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
ระยะทดลอง	4	0	0	0	0	0
	5	47.46	6.47	6.46	20.13	23.67
	6	0	0	0	0	0
	7	166.10	153.10	209.30	176.17	29.42
	8	120.60	117.90	110.90	116.47	5.01
	9	174.50	155.20	161.00	163.57	9.90
	10	174.80	160.90	161.60	165.77	7.83
	11	142.70	140.60	139.30	140.87	1.72
	12	174.30	165.30	148.60	162.73	13.04
	13	133.20	119.60	112.50	121.77	10.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen)

ตารางที่ ข-3.5 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักกรด

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ระยะปรับสภาพ	1	52.28	52.95	48.18	51.14	2.58
	2	39.7	47.45	42.42	43.19	3.93
	3	45.99	46.38	46.44	46.27	0.24
ระยะทดลอง	4	54.83	55.42	54.89	55.05	0.32
	5	82.76	82.76	87.60	84.37	2.79
	6	73.38	75.09	66.39	71.62	4.61
	7	38.38	48.19	49.41	45.33	6.05
	8	71.76	73.12	81.76	75.55	5.42
	9	59.20	59.80	55.04	58.01	2.59
	10	49.76	52.76	51.60	51.37	1.51
	11	75.44	65.60	71.48	70.84	4.95
	12	106.47	107.76	105.27	106.50	1.25
	13	104.15	119.85	120.40	114.80	9.23

ตารางที่ ข-3.6 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักก๊าซ

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ระยะปรับสภาพ	1	203.40	207.80	208.30	206.50	2.70
	2	190.60	191.70	189.40	190.57	1.15
	3	188.60	191.30	189.50	189.80	1.37
ระยะทดลอง	4	178.10	174.60	174.10	175.60	2.18
	5	360.20	361.40	359.00	360.20	1.20
	6	345.60	341.50	344.60	343.90	2.14
	7	305.10	304.90	306.20	305.40	0.70
	8	250.40	251.80	250.30	250.83	0.84
	9	285.90	279.00	282.10	282.33	3.46
	10	255.30	254.10	255.60	255.00	0.79
	11	231.50	230.40	228.90	230.27	1.31
	12	231.50	232.40	228.00	230.63	2.32
	13	200.90	198.60	197.40	198.97	1.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ

ตารางที่ ข-3.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดระหว่างสารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักกรด

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	ของแข็งทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	%removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
ระยะปรับสภาพ	1	7,236	7,168	12,572	8,992	3,101	72.82
	2	10,604	10,512	10,496	10,537	58	68.15
	3	15,172	15,852	13,912	14,979	984	54.72
ระยะทดลอง	4	14,824.00	15,392.00	14,576.00	14,930.00	418.33	54.87
	5	15,520.00	15,508.00	14,752.00	15,260.00	439.98	53.87
	6	14,940.00	15,872.00	15,576.00	15,460.00	476.22	53.27
	7	15,224.00	15,316.00	15,308.00	15,280.00	50.96	53.81
	8	18,712.00	18,424.00	18,536.00	18,560.00	145.18	43.90
	9	14,676.00	16,032.00	14,808.00	15,170.00	747.70	54.15
	10	16,356.00	16,556.00	17,044.00	16,652.00	353.90	49.67
	11	18,156.00	17,092.00	18,360.00	17,869.33	680.87	45.99
	12	19,344.00	19,472.00	19,012.00	19,276.00	237.42	41.73
	13	20,040.00	19,604.00	18,220.00	19,288.00	950.26	41.70

ตารางที่ ข-3.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดระหว่างสารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักก๊าซ

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	ของแข็งทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	%removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
ระยะปรับสภาพ	1	1,876	1,428	2,800	2,035	699.63	93.56
	2	3,008	3,168	3,008	3,061	92.38	90.32
	3	2,752	3,036	2,964	2,917	147.64	90.77
ระยะทดลอง	4	2,360.00	2,448.00	2,304.00	2,370.00	72.59	92.84
	5	3,048.00	3,484.00	3,208.00	3,250.00	220.59	90.18
	6	3,908.00	4,132.00	3,724.00	3,920.00	204.33	88.15
	7	3,248.00	2,968.00	2,256.00	2,820.00	511.46	91.48
	8	2,320.00	2,420.00	2,244.00	2,330.00	88.31	92.96
	9	3,428.00	3,576.00	3,536.00	3,510.00	76.67	89.39
	10	2,484.00	2,720.00	2,700.00	2,634.67	130.86	92.04
	11	2,260.00	2,172.00	2,332.00	2,254.67	80.13	93.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.8 (ต่อ) การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดระหว่างสารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักก๊าซ

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	ของแข็งทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	%removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
	12	3,028.00	3,236.00	3,140.00	3,134.67	104.10	90.52
	13	2,904.00	2,988.00	3,136.00	3,009.33	117.46	90.90

5) การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งระเหยง่าย

ตารางที่ ข-3.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายระหว่างสารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักกรด

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	%removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
ระยะปรับสภาพ	1	6,212	6,176	11,612	8,000	6,212	74.70
	2	9,332	9,232	9,264	9,276	9,332	70.66
	3	13,784	14,580	12,604	13,656	13,784	56.81
ระยะทดลอง	4	13,408	13,948	13,228	13,530	374.70	57.21
	5	14,036	14,083.2	13,368	13,830	399.99	56.26
	6	13,212	13,904	13,808	13,640	374.90	56.86
	7	14,032	14,088	14,056	14,060	28.10	55.53
	8	17,272	17,128	17,216	17,210	72.59	45.57
	9	13,484	14,648	13,608	13,910	639.25	56.01
	10	14,980	15,112	15,560	15,217.33	304.01	51.87
	11	16,752	15,728	16,988	16,489.33	669.81	47.85
	12	17,668	17,528	16,096	17,097.33	870.00	45.93
	13	18,620	17,868	16,816	17,768	906.15	43.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายระหว่างสารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักก๊าซ

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	%removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
ระยะปรับสภาพ	1	304	280	632	405	304	98.72
	2	1,216	1,360	1,240	1,272	1,216	95.98
	3	1,208	1,360	1,392	1,320	1,208	95.83
ระยะทดลอง	4	976.00	1,012.00	960.00	980.00	26.83	96.90
	5	1,248.00	1,628.00	1,364.00	1,410.00	194.79	95.54
	6	2,480.00	2,376.00	2,012.00	2,290.00	245.74	92.76
	7	1,600.00	1,384.00	868.00	1,280.00	376.14	95.95
	8	1,024.00	1,000.00	1,036.00	1,020.00	18.33	96.77
	9	1,640.00	1,832.00	1,828.00	1,770.00	109.79	94.40
	10	992.00	1,076.00	1,048.00	1,038.67	42.77	96.72
	11	920.00	840.00	932.00	897.33	50.91	97.16
	12	1,568.00	1,392.00	1,484.00	1,481.30	88.03	95.31
	13	1,420.00	1,528.00	1,488.00	1,478.67	54.60	95.32

6) การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหย

ตารางที่ ข-3.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยระหว่างสารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักกรด

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	กรดไขมันระเหย (mg/L as CH_3COOH)			ค่าเฉลี่ย (mg/L as CH_3COOH)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ระยะปรับสภาพ	1	3,014.40	2,649.60	2,553.60	2,739.20	243.12
	2	2,395.20	2,270.40	2,356.80	2,340.80	63.92
	3	2,540.80	2,497.60	2,574.40	2,537.60	38.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.11(ต่อ) การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยระหว่างสารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักกรด

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	กรดไขมันระเหย (mg/L as CH_3COOH)			ค่าเฉลี่ย (mg/L as CH_3COOH)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ระยะทดลอง	4	1,761.60	1,852.80	1,766.40	1,793.60	51.32
	5	1,824.00	1,920.00	2,208.00	1,984.00	199.84
	6	2,021.38	2,007.01	2,011.80	2,013.40	7.32
	7	2,529.60	2,592.00	2,462.40	2,528.00	64.81
	8	2,121.60	2,347.20	2,385.60	2,284.80	142.63
	9	2,690.70	2,680.90	2,617.00	2,662.87	40.02
	10	2,965.60	2,995.10	2,960.70	2,973.80	18.61
	11	2,654.40	2,640.00	2,736.00	2,676.80	51.77
	12	2,827.30	2,989.00	3,008.60	2,941.63	99.50
	13	2,568.00	2,640.00	2,688.00	2,632.00	60.40

ตารางที่ ข-3.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยระหว่างสารละลายกากมันสำปะหลังและถังหมักก๊าซ

ระยะ	วิเคราะห์ครั้งที่	กรดไขมันระเหย (mg/L as CH_3COOH)			ค่าเฉลี่ย (mg/L as CH_3COOH)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ระยะปรับสภาพ	1	288.00	336.00	360.00	328.00	36.66
	2	144.00	134.40	148.80	142.40	7.33
	3	129.60	115.20	144.00	129.60	14.40
ระยะทดลอง	4	96.00	96.00	100.80	97.60	2.77
	5	312.00	264.00	360.00	312.00	48.00
	6	311.35	268.24	263.45	281.01	26.38
	7	288.00	249.60	240.00	259.20	25.40
	8	288.00	264.00	278.40	276.80	12.08
	9	260.20	294.60	225.90	260.23	34.35
	10	147.30	157.10	240.60	181.67	51.27
	11	240.00	264.00	225.60	243.20	19.40
	12	352.80	308.70	313.60	325.03	24.17
	13	264.00	240.00	240.00	248.00	13.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวัน

ตารางที่ ข-3.13 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันช่วงระยะปรับสภาพและระยะทดลอง

ระยะ	เวลา (วัน)	อุณหภูมิ (C)	ปริมาณก๊าซ (mL/day)	ปริมาณก๊าซสะสม (mL)
ระยะปรับสภาพ	0	-	1,127.00	1,127.00
	1	-	1,552.00	2,679.00
	2	-	1,645.00	4,324.00
	3	-	2,413.00	6,737.00
	4	-	9,505.00	16,242.00
	5	-	6,725.00	22,967.00
	6	-	4,202.00	27,169.00
	7	-	2,856.00	30,025.00
ระยะทดลอง	8	28	2,144.00	32,169.00
	9	28	11,639.00	43,808.00
	10	28	18,527.00	62,335.00
	11	29	16,540.00	78,875.00
	12	30	9,455.00	88,330.00
	13	31	4,966.00	93,296.00
	14	28	4,341.00	97,637.00
	15	29	4,640.00	102,277.00
	16	30	8,045.00	110,322.00
	17	29	4,674.00	114,996.00
	18	28	3,860.00	118,856.00
	19	28.5	2,250.00	121,106.00
	20	29	6,162.00	127,268.00
	21	28.5	3,179.00	130,447.00
	22	28	5,650.00	136,097.00
	23	29	6,786.00	142,883.00
	24	29	6,110.00	148,993.00
	25	29.5	5,529.00	154,522.00
	26	28	8,991.00	163,513.00
	27	28.5	9,413.00	172,926.00
	28	30	7,210.00	180,136.00
	29	31	6,471.00	186,607.00
	30	28	8,504.00	195,111.00
	31	29	8,885.00	203,996.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.13 (ต่อ) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันช่วงระยะปรับสภาพและระยะทดลอง

ระยะ	เวลา (วัน)	อุณหภูมิ (C)	ปริมาณก๊าซ (mL/day)	ปริมาณก๊าซสะสม (mL)
	32	30	10,074.00	214,070.00
	33	29.5	8,825.00	222,895.00
	34	30	6,670.00	229,565.00
	35	30	4,690.00	234,255.00
	36	28	7,526.00	241,781.00
	37	29	7,546.00	249,327.00
	38	28	8,012.00	257,339.00

8) องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ ข-3.14 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพในระหว่างการหมัก

วันที่	ครั้งที่	CH_4 (%)	CO_2 (%)	O_2 (%)	H_2S (ppm)
6/3/2560	1	57.8	15.4	4.2	40
7/3/2560	2	51.9	11.2	4.8	25
8/3/2560	3	74.9	17	1.1	45
9/3/2560	4	50.3	10.9	6.9	775*
11/3/2560	5	41.2	7.6	7.6	256*
13/3/2560	6	63.3	18.1	2.7	4,050
14/3/2560	7	56.2	25.4	2.6	3,110
16/3/2560	8	55.1	33	1.4	4,815
17/3/2560	9	44.9	28	2.8	»»»
18/3/2560	10	55.3	27.4	0.4	»»»
19/3/2560	11	71.4	28.3	0.1	3,335
20/3/2560	12	52.4	38.5	0.4	»»»
21/3/2560	13	57.2	39.3	1.2	425*
22/3/2560	14	63.1	28.5	1.3	203*
23/3/2560	15	69.9	22	0.2	3,535
24/3/2560	16	60.4	37.9	1.6	»»»
25/3/2560	17	54	39.7	1.2	5,045
27/3/2560	18	57.4	28.6	2.2	4,340
29/3/2560	19	60.4	29.8	1.7	20
30/3/2560	20	64.5	26.2	1.7	20

*นำค่ามาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เนื่องจากข้อมูลมีช่วงความคาดเคลื่อนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

คำนวณ

ค-1 การคำนวณระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในระบบ

1) คำนวณระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในระบบ

$$\text{จาก HRT} = \frac{\text{V (ลิตร)}}{\text{Q (ลิตรต่อวัน)}}$$

V = ปริมาตรถังหมักกรด ($\pi r^2 h$)

ถังหมักกรด : แทนค่า V = π x$(17.75)^2$ x 28.02 = 27,734.14 ลูกบาศก์เซนติเมตร = 27.73 ลิตร

Q = อัตราการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ

ช่วงทำการทดลองอัตราการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ 1 ลิตรต่อวัน

$$\text{HRT} = \frac{27.73 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลิตรต่อวัน}}$$

HRT = 28 วัน

ถังหมักก๊าซ : แทนค่า V = π x$(20.5)^2$ x 40.014 = 52,810.17 ลูกบาศก์เซนติเมตร = 52.81 ลิตร

Q = อัตราการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ

ช่วงทำการทดลองอัตราการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ 0.7 ลิตรต่อวัน

$$\text{HRT} = \frac{52.81 \text{ ลิตร}}{0.7 \text{ ลิตรต่อวัน}}$$

HRT = 74 วัน

ค-2 การคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของกากมันสำปะหลังที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

ทำการเติมกากมันสำปะหลัง (ความชื้น 76.23 เปอร์เซ็นต์) 277.3 กรัม ปรับด้วยน้ำประปาเป็น 1 ลิตร

ตารางที่ ค-2.1 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของกากมันสำปะหลังที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

เวลา (วัน)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (mL)	mL Biogas/g Biomass
0	2,144	7.73
1	11,639	41.97
2	18,527	66.81
3	16,540	59.65
4	9,455	34.10
5	4,966	17.91
6	4,341	15.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2.1 (ต่อ) พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของกากมันสำปะหลังที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

เวลา (วัน)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (mL)	mL Biogas/g Biomass
7	4,640	16.73
8	8,045	29.01
9	4,674	16.86
10	3,860	13.92
11	2,250	8.11
12	6,162	22.22
13	3,179	11.46
14	5,650	20.38
15	6,786	24.47
16	6,110	22.03
17	5,529	19.94
18	8,991	32.42
19	9,413	33.95
20	7,210	26.00
21	6,471	23.34
22	8,504	30.67
23	8,885	32.04
24	10,074	36.33
25	8,825	31.82
26	6,670	24.05
27	4,690	16.91
28	7,526	27.14
29	7,546	27.21
30	8,012	28.89

2) คำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลัง

$$\text{ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลัง} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ } (mL)}{\text{น้ำหนักแห้งของกากมันสำปะหลัง } (g)}$$

$$= \frac{2{,}144\ mL}{277.3\ \text{g Biomass}}$$

$$= 7.73\ \text{mL Biogas/ g Biomass}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-3 การคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหย

ตารางที่ ค-3.1 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด

วันที่	เวลา (วัน)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (mL)	%CH_4	VS removed (g)	mL Biogas/gVS removed	mL CH4/gVS removed
1/3/2560	0	2144	-	30.71	69.8144	-
3/3/2560	2	18527	-	29.83	621.0862	-
6/3/2560	5	4966	57.8	29.16	170.3018	98.4344
9/3/2560	8	8045	50.3	30.26	265.8625	133.7288
14/3/2560	13	3179	56.2	30.75	103.3821	58.1007
16/3/2560	15	6786	56.1	29.57	229.4893	128.7435
21/3/2560	20	7210	57.2	30.45	236.7816	135.4391
23/3/2560	22	8504	69.9	30.83	275.8352	192.8088
27/3/2560	26	6670	57.4	30.14	221.3006	127.0265
29/3/2560	28	7526	60.4	30.07	250.2827	151.1707

3) คำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด

$$\text{ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ } (mL)}{\text{น้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด } (g)}$$

$$= \frac{4{,}966\ mL}{29.16\ \text{gVS removed}}$$

= 170.30 mL Biogas/ g VS removed

4) คำนวณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด

$$\text{ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ } (mL) \text{x } \%\ CH_4}{\text{น้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด } (g) \text{x } 100}$$

$$= \frac{4{,}966\ mL\ x\ 57.8}{29.16\ \text{gVS removed x } 100}$$

= 98.43 mL CH_4/ g VS removed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3.2 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด

วันที่	เวลา (วัน)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (mL)	%CH_4	VFA removed (g)	mL Biogas/gVFA removed	mL CH4/gVFA removed
1/3/2560	0	2144	-	1.70	1,264.15	-
3/3/2560	2	18527	-	1.67	11,080.74	-
6/3/2560	5	4966	57.8	1.73	2,866.57	1,656.88
9/3/2560	8	8045	50.3	2.27	3,545.93	1,783.60
14/3/2560	13	3179	56.2	2.01	1,583.17	889.74
16/3/2560	15	6786	56.1	2.40	2,824.40	1,584.49
21/3/2560	20	7210	57.2	2.79	2,582.25	1,477.05
27/3/2560	26	6670	57.4	2.43	3,494.41	2,442.59
29/3/2560	28	7526	60.4	2.62	2,549.11	1,463.19

5) คำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด

$$\text{ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ } (mL)}{\text{น้ำหนักกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด } (g)}$$

$$= \frac{4{,}966\ mL}{1.73\ \text{gVFA removed}}$$

= 2,866.57 mL Biogas/ g VFA removed

6) คำนวณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด

$$\text{ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ } (mL) \text{x } \%\ CH_4}{\text{น้ำหนักกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด } (g) \text{x } 100}$$

$$= \frac{4{,}966\ mL\ x\ 57.8}{1.73\ \text{gVFA removed x } 100}$$

= 1,656.88 mL CH_4/ gVFA removed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้