

การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยวิธีการหมัก
ในสภาวะไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

BIOGAS PRODUCTION FROM CASSAVA PULP USING
ONE-STAGE ANAEROBIC DIGESTION



โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ
ปีการศึกษา 2561 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIOGAS PRODUCTION FROM CASSAVA PULP USING ONE-STAGE ANAEROBIC DIGESTION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2018

หัวข้อโครงการพิเศษ การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยวิธีการหมักใน
สภาวะไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว
Biogas Production from Cassava Pulp using
One-stage Anaerobic Digestion

ชื่อนักศึกษา นางสาวนัฐสมล แดงกระจ่าง รหัสนักศึกษา 58050636
นางสาวพิชานันท์ ม่วงแก้ว รหัสนักศึกษา 58050661
นางสาวศศิธร วิจิตร รหัสนักศึกษา 58050681

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการ	ลายมือชื่อ
ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ประธานกรรมการ	
รศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการ	
ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยวิธีการหมักในสภาวะไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนัฐสมล	แดงกระจ่าง	รหัสนักศึกษา 58050636
	นางสาวพิชานันท์	ม่วงแก้ว	รหัสนักศึกษา 58050661
	นางสาวศศิธร	วิจิตร	รหัสนักศึกษา 58050681
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2561		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยวิธีการหมักในสภาวะไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว โดยใช้ถังหมักก๊าซชีวภาพ ขนาด 5 ลิตร มีการกวนผสม 8 ชั่วโมงต่อวัน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นการแปรสภาพน้ำแ่่งมันสำปะหลัง 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 1), 60, 80 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปหมักเพื่อเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ตอนที่ 2 ศึกษาอัตราการเติมน้ำแ่่งที่ได้จากการศึกษาการแปรสภาพในตอนแรกที่ 300, 500, 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน โดยศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าสภาพความเป็นด่าง ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งระเหยง่าย ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Data Meter จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแปรสภาพน้ำแ่่งมันสำปะหลังคือ อุณหภูมิห้อง (30 ± 1) องศาเซลเซียส อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่เหมาะสมคือ 500 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าพีเอช 6.65 ± 0.10 ค่าสภาพความเป็นด่าง 601.33 ± 6.12 มิลลิลิตรต่อลิตรในรูปแบบแคลเซียมคาร์บอเนต ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด 889.63 ± 6.12 มิลลิลิตรต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งระเหยง่าย 243.70 ± 22.67 มิลลิลิตรต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด 204.33 ± 24.97 มิลลิลิตรต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย 89.28 ± 9.34 มิลลิลิตรต่อลิตร ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย 6.67 ± 9.83 มิลลิลิตรต่อลิตร ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี 308.00 ± 49.76 มิลลิลิตรออกซิเจนต่อลิตรและค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 6.46 ± 0.23 มิลลิลิตรต่อลิตร อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 853.33 ± 35.12 มิลลิลิตรต่อวัน ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) 58.70-60.50% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 35.60-40.8% และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) 20-25 ส่วนในล้านส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่คำสำคัญ : กากมันสำปะหลัง ก๊าซชีวภาพ การหมักในสภาวะไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

Title	Biogas Production from Cassava Pulp using One-stage Anaerobic Digestion		
Student	Miss Natthasamon Dangkajang	Student ID 58050636	
	Miss Pichanun Mounkaew	Student ID 58050661	
	Miss Sasitorn Wijit	Student ID 58050681	
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2018		
Advisor	Asst.Prof.Dr. Suwannee Junyapoon		

Abstract

This special project studied biogas production from cassava pulp using one-stage anaerobic digestion. The biogas reactor with working volume of 5 liters was mixed with a stirrer for 8 hr/d. The study was divided into two steps: 1) study the optimum temperature for conditioning starch solution at room temperature (30 ± 1), 60, 80 °C for biogas production 2) study the optimum feed rate of starch solution, derived from step 1 at 300, 500, 1,000 mL/d. Biogas production rate was examined. The optimum fermentation conditions were investigated such as pH, alkalinity (Alk), total solids (TS), volatile solid (VS), total suspended solids (TSS), volatile suspended solids (VSS), volatile fatty acid (VFAs), chemical oxygen demand (COD) and C/N ratio. Biogas compositions were measured by Gas Data Meter. The results showed that room temperature (30 ± 1) was the optimum temperature for conditioning starch solution. The optimum feed rate of starch solution was 500 mL/d. The optimum fermentation conditions were pH value 6.65 ± 0.10 , alkalinity value 601.33 ± 6.12 mg/L as CaCO_3 , TS 889.63 ± 6.12 mg/L, VS 243.70 ± 22.67 mg/L, TSS 204.33 ± 24.97 mg/L, VSS 89.28 ± 9.34 mg/L, VFAs 6.67 ± 9.83 mg/L, COD value 308.00 ± 49.76 mgO_2/L and C/N ratio 6.46 ± 0.23 mg/L. Biogas production rate was 853.33 ± 35.12 mL/d. Biogas was composed of methane 58.70-60.50%, carbon dioxide 35.60-40.8% and hydrogen sulfide 20-25 ppm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ **Keywords** : cassava pulp, biogas, one-stage anaerobic digestion เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณาและความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่อง และใส่ใจรายละเอียดของการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ อาจารย์ภาควิชาชีววิทยา ที่ให้คำปรึกษา แก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำความรู้ และช่วยสนับสนุนโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ราชสีมา กรีน เอ็นเนอร์ยี จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์กากมันสำปะหลัง และ บริษัท เพอร์ซิเดนท์ เบเกอร์ จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการดำเนินงานโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ทำให้ได้รับการศึกษาตลอดจนคอยเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีรวมถึงเพื่อนๆและบุคคลอื่น ที่ไม่ได้กล่าวถึง ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นัฐสมล แดงกระจ่าง
พิชานันท์ ม่วงแก้ว
ศศิธร วิจิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ก๊าซชีวภาพ.....	3
2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	4
2.3 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ.....	6
2.3.1 แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด.....	6
2.3.2 แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน.....	8
2.4 สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ.....	8
2.4.1 อุณหภูมิ.....	8
2.4.2 สารอาหาร.....	9
2.4.3 สภาพความเป็นต่าง.....	9
2.4.4 ค่าพีเอช.....	9
2.4.5 สารพิษ.....	10
2.4.6 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย.....	10
2.4.7 เวลาเก็บกัก.....	10
2.4.8 การกวนผสม.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ การค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่ 2.5.1 ด้านพลังงาน..... 11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 ด้านสิ่งแวดล้อม.....	11
2.3.3 ด้านการเกษตร.....	11
2.5.4 ด้านอื่นๆ.....	12
2.6 มั่นสำปะหลัง.....	12
2.6.1 องค์ประกอบหลักของมั่นสำปะหลัง.....	12
2.6.2 ประโยชน์ของมั่นสำปะหลัง.....	14
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	18
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	18
3.1.1 สารเคมี.....	18
3.1.2 อุปกรณ์.....	18
3.2 วัสดุดิบที่ใช้.....	19
3.2.1 กากมั่นสำปะหลัง.....	19
3.2.2 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบ.....	20
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	21
3.3.1 ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุดิบที่ป้อนเข้าระบบ.....	21
3.3.2 ศึกษาผลของการปรับสภาพน้ำแป้งมั่นสำปะหลังโดยใช้ความร้อน และอัตราการเติมน้ำแป้งมั่นสำปะหลังต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	22
3.3.2.1 การปรับสภาพน้ำแป้งมั่นสำปะหลังโดยใช้ความร้อน.....	22
3.3.2.2 การศึกษาอัตราการเติมน้ำแป้งมั่นสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิต ก๊าซชีวภาพ.....	24
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	25
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากมั่นสำปะหลัง.....	25
4.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแปรสภาพน้ำแป้งมั่นสำปะหลัง โดยใช้ความร้อน.....	27
4.3 ผลการศึกษาอัตราการเติมน้ำแป้งมั่นสำปะหลังที่เหมาะสม.....	28
4.3.1 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ.....	28
4.3.2 ผลการศึกษาค่าสภาพความเป็นด่างในระบบ.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 4.3.3 ผลการศึกษาค่าของแข็งทั้งหมดในระบบนั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้าน 29 ค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง 4.3.4 ผลการศึกษาค่าของแข็งระเหยง่ายในระบบนี้แล้วของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำ 30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 ผลการศึกษาค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระบบ.....	31
4.3.6 ผลการศึกษาค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในระบบ.....	31
4.3.7 ผลการศึกษาค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ.....	32
4.3.8 ผลการศึกษาค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีในระบบ.....	33
4.3.9 ผลการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ.....	33
4.4 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำแป้งมันสำปะหลัง.....	34
4.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลวิจัย.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์.....	42
ก-1 ความเป็นกรด-ด่าง.....	42
ก-2 สภาพความเป็นต่าง.....	42
ก-3 ความชื้น.....	43
ก-4 ของแข็งทั้งหมด.....	43
ก-5 ของแข็งระเหยง่าย.....	44
ก-6 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด.....	45
ก-7 ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย.....	45
ก-8 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย.....	46
ก-9 ความต้องการออกซิเจนทางเคมี.....	47
ก-10 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด.....	48
ก-11 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและปริมาณแป้งโดยวิธีฟินอล-ซัลฟิวริกแอซิด.....	49
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง.....	51
ข-1 คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง.....	51
ข-2 คุณลักษณะของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	51
ข-3 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	52
ข-4 ผลการศึกษาสภาวะของเหลวภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	58
ข-5 ผลการศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำ
 ไปทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	3
2.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ.....	3
2.3 องค์ประกอบหลักของหัวมันสำปะหลัง.....	13
2.4 องค์ประกอบหลักของเนื้อมันสำปะหลัง.....	13
2.5 องค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง.....	13
3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์.....	21
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง.....	25
4.2 ผลการวิเคราะห์น้ำแป้งมันสำปะหลังก่อนเข้าระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	26
ข-1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง.....	51
ข-2 ผลการทดลองของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	51
ข-3 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	53
ข-4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	58
ข-4.2 ค่าสภาพความเป็นด่างของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	59
ข-4.3 ค่าของแข็งทั้งหมดของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	59
ข-4.4 ค่าของแข็งระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	60
ข-4.5 ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	60
ข-4.6 ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	61
ข-4.7 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	61
ข-4.8 ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	62
ข-4.9 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	62
ข-4.10 ค่าปริมาตรก๊าซชีวภาพ.....	63
ข-4.11 ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด.....	64
ข-4.12 ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกกำจัด.....	65
ข-5 ค่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ.....	5
3.1 วัตถุประสงค์ที่ป้อนเข้าระบบ.....	20
3.2 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.3 วิธีการตรวจเชื้อจุลินทรีย์.....	23
3.4 การหาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับสภาพน้ำแ่งมันสำปะหลัง.....	23
4.1 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณ ที่อุณหภูมิต่างๆในการแปรสภาพน้ำแ่ง.....	27
4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่างของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	28
4.3 ค่าสภาพความเป็นต่างของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	29
4.4 ค่าของแข็งทั้งหมดของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	30
4.5 ค่าของแข็งระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	30
4.6 ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	31
4.7 ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	32
4.8 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	32
4.9 ค่าความต้องการออกซิเจนของของเหลวที่ในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	33
4.10 ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	34
4.11 ค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	34
4.12 ค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	35
4.13 ค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซชีวภาพ.....	36
4.14 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพภายในระบบ.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
Alk	สภาพความเป็นด่าง
TS	ค่าของแข็งทั้งหมด
VS	ค่าของแข็งระเหยง่าย
TSS	ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
VSS	ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย
VFAs	ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย
COD	ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี
TKN	ค่าไนโตรเจนทั้งหมด
TOC	อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด
C/N	ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน
SRT	ระยะเวลาเก็บกักจุลชีพ
HRT	ระยะเวลาเก็บกักน้ำ
v/v	ปริมาตรโดยปริมาตร
w/v	น้ำหนักโดยปริมาตร
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/L as CaCO ₃	มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต
MJ/m ³	เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร
cm/s	เซนติเมตรต่อวินาที
m ³ /m ³	ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร
°C	องศาเซลเซียส
kJ/m ³ -°C	กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร-องศาเซลเซียส
kg/m ³	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ppm	ส่วนในล้านส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานส่วนใหญ่ที่มนุษย์นำมาใช้ ซึ่งปริมาณของพลังงานเหล่านี้มีอยู่อย่างจำกัดและมีปริมาณที่ลดน้อยลง การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล นอกจากจะได้พลังงานออกมาแล้วยังปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และฝุ่นละอองอีกเป็นจำนวนมากก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2547) ดังนั้นพลังงานทดแทนที่เป็นพลังงานสะอาดจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถนำของเสีย เช่น มูลสัตว์ น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานแปงมันสำปะหลัง โรงงานน้ำมันปาล์ม โรงงานผลไม้กระป๋อง โรงงานน้ำตาล โรงงานผลิตแอลกอฮอล์ โรงฆ่าสัตว์และขยะจากชุมชนหรือร้านค้า ภัตตาคาร หรือของเหลือใช้ทางการเกษตร มาผ่านกระบวนการหมักในสภาวะไร้อากาศ เพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ จะได้ก๊าซชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อนได้ ซึ่งปัจจุบันมีการผลิตและใช้ก๊าซชีวภาพอย่างแพร่หลาย ทั้งในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ รวมถึงชุมชนทั่วไป (กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน, 2557)

มันสำปะหลังเป็นพืชไร่เศรษฐกิจที่มีความสำคัญมากชนิดหนึ่งของไทย จัดเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง ผลผลิตส่วนใหญ่ส่งออกต่างประเทศในรูปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น มันเส้น มันอัดเม็ดแป้งมัน เป็นต้น (ปรารภณาและคณะ, 2552) กระบวนการแปรรูปในอุตสาหกรรมแป้งมันก่อให้เกิดกากมันสำปะหลังที่เป็นของเสีย ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตประมาณ 81 เปอร์เซ็นต์ โดยกากมันสำปะหลัง 1 ตัน (น้ำหนักเปียก) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 70-100 ลูกบาศก์เมตร (พงษ์พันธ์และธนากร, 2554)

งานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปน้ำแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ความร้อนในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังและศึกษาอัตราการเติมน้ำแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปน้ำแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ความร้อนในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด 1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราการเติมน้ำแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ นำไปใช้

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์คุณลักษณะกากมันสำปะหลังเบื้องต้น ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต, ปริมาณแป้ง, ความชื้นและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

1.3.2 วิเคราะห์ตัวอย่างของเหลว (Effluent) ที่เกิดจากกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศ ได้แก่ พีเอช (pH), สภาพความเป็นด่าง (Alk), ค่าของแข็งทั้งหมด (TS), ค่าของแข็งระเหยง่าย (VS), ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS), ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (VSS), ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFAs), ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD), ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)

1.3.3 เตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลังจากการนำกากมันสำปะหลังไปผสมกับน้ำกลั่นในสัดส่วน 5% (w/v)

1.3.4 ศึกษาการแปรสภาพน้ำแป้งมันสำปะหลัง โดยแปรค่าอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง, 60 องศาเซลเซียส และ 80 องศาเซลเซียส ทั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปเป็นวัตถุดิบในการหมัก

1.3.5 นำสภาวะการแปรสภาพน้ำแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมไปศึกษาอัตราส่วนการเติมน้ำแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.3.6 วัดปริมาณก๊าซชีวภาพทุกวันโดยวิธีการแทนที่ก๊าซชีวภาพที่ผลิตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2% (2% NaCl) วิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Data Meter และคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นพลังงานสะอาด

1.4.2 เป็นการใช้ประโยชน์จากของเหลือทิ้งในอุตสาหกรรม

1.4.3 เพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม

1.4.4 ลดปริมาณขยะจากอุตสาหกรรม

1.4.5 ลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก ที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ด้วยจุลินทรีย์ ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นก๊าซผสม โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และก๊าซอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น
มีเทน (CH ₄)	50-70 % (v/v)
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	20-50 % (v/v)
ไอน้ำ (vapor)	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 ₂ S)	50-10,000 ppm

ที่มา : สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย (2553)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติ	ค่าที่ได้
ค่าความร้อน	21.60 MJ/m ³
ความเร็วเปลวไฟ	25 cm/s
อัตราส่วนอากาศต่อก๊าซชีวภาพ	6.03 m ³ /m ³
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 °C
ค่าความจุความร้อน	1.6 kJ/m ³ -°C
ความหนาแน่น	1.15 kg/m ³

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน (2555)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพ (สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2553)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างซับซ้อน โดยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหลายขั้นตอน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

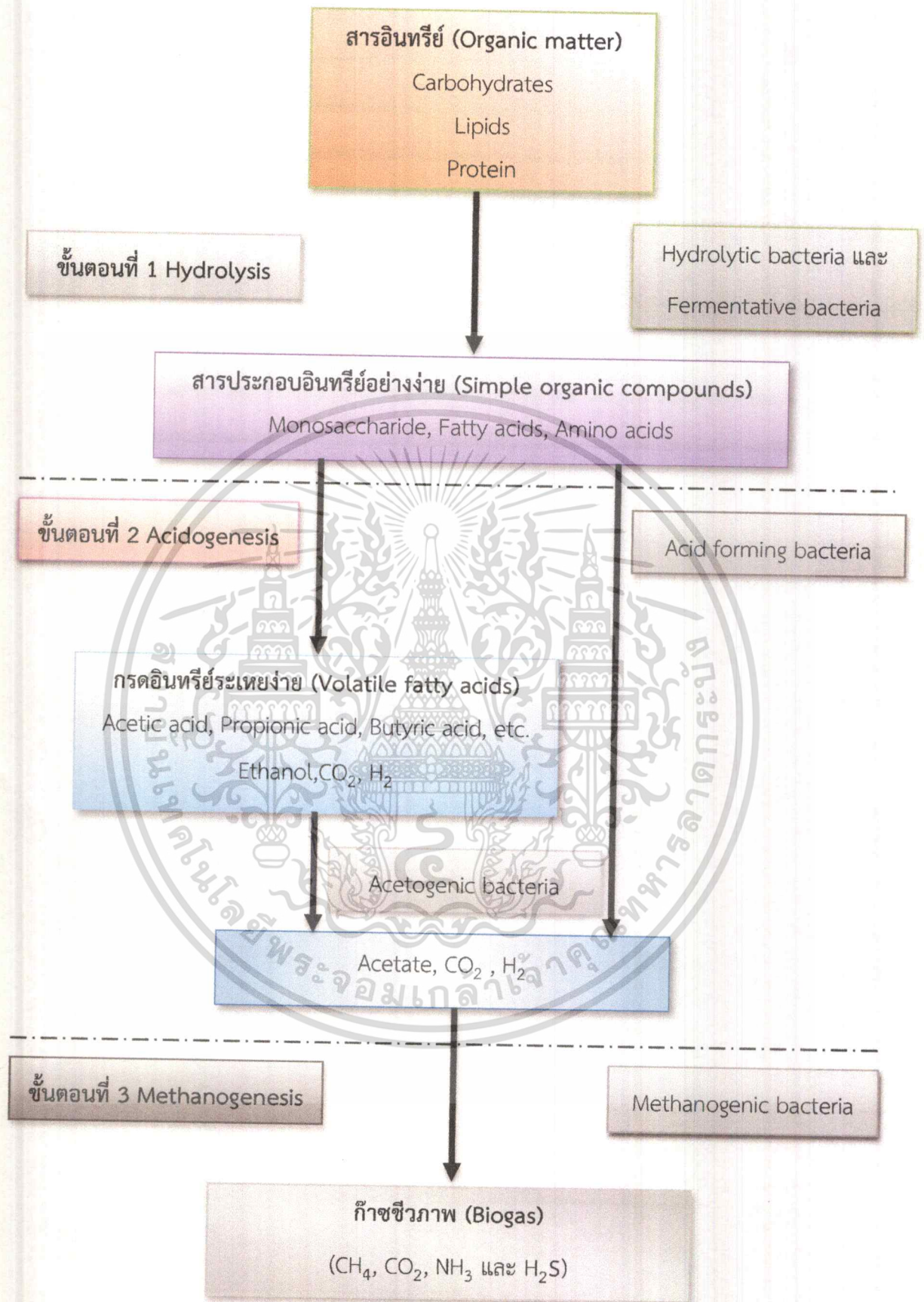
ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เป็นต้น ให้มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลที่เล็กลงและสามารถละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระยะเวลาการเก็บกักของเสีย แบคทีเรียกลุ่มที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้คือ แบคทีเรียกลุ่มไฮโดรไลติก (Hydrolytic bacteria) และกลุ่มเฟอร์เมนเตทีฟ (Fermentative bacteria)

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียที่เติบโตได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative bacteria) ใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงาน ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids) เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดไพรูวอิก ($\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$) กรดบิวทีริก ($\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$) เป็นต้น และสารอื่น ๆ เช่น เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) ซึ่งชนิดของแบคทีเรียจะถูกเรียกแตกต่างกันไปตามชนิดของสารอินทรีย์นั้น ๆ ต่อมากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มอะซิโดเจเนติก (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นอะซิเตต ฟอर्मेट ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจเรียกว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen forming bacteria) เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มักสร้างกรดอินทรีย์ด้วย แต่ตัวที่ผลิตกรดได้อาจไม่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ จึงถือว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นชนิดของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดด้วย แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด อาจเรียกรวมว่าเป็นแบคทีเรียกลุ่มไม่ผลิตก๊าซมีเทน (Non-methanogenic bacteria)

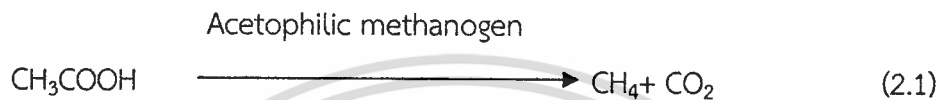
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ 2.1** ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน โดยขั้นตอนการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง: Breure and Andel (1987) งดเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ผลผลิตสุดท้ายคือ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำ (H_2O) และก๊าซอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) สารตั้งต้นของขั้นตอนนี้เป็นผลผลิตที่ได้มาจากขั้นตอนการผลิตกรด โดยสารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรดอะซิติก (CH_3COOH) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังปฏิกิริยา 2.1-2.2



แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้มีความเฉพาะเจาะจงสูง คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenic producing bacteria) ได้แก่กลุ่ม Acetoclastic methanogenic bacteria (Acetophilic methanogen) และ Hydrogenophilic methanogen

ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศนี้ แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม และมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ดังนั้นการเจริญเติบโตและปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.3 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ (สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2553)

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ ต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดร่วมกัน ซึ่งแบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria)

2.3.1 แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) แบคทีเรียส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้คือ Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีอากาศ โดยได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นกรดไขมัน กรดอินทรีย์ระเหยง่าย แอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าความ

เป็นกรด-ต่าง 4.0-6.5 และทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1) อะซิโตเจนนิคแบคทีเรียแบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่ที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน มีอัตราการเจริญเติบโตสูง เนื่องจากสามารถใช้อาหารได้หลายชนิดในการดำรงชีพ แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ ผลผลิตที่ได้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิออนิก กรดบิวทีริก กรดฟอร์มิก เป็นต้น

2) อะซิโตเจนนิคแบคทีเรียแบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นพวกย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายในกระบวนการไฮโดรไลซิสและอะซิโตเจนิซิส แล้วเปลี่ยนให้เป็นกรดอะซิติก สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

ก) Hydrogen producing acetogenic bacteria

แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส ซึ่งได้แก่ แอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลายตัว แล้วได้เป็นกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน หรือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนเป็นผลผลิต ดังปฏิกิริยา 2.3 - 2.5



ข) Homoacetogenic bacteria แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1) Autotroph ได้แก่ แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ในการเจริญเติบโต และได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นอะซิเตต (หรือกรดอะซิติก) ดังปฏิกิริยา 2.6



2) Heterotroph ได้แก่ แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม ในการเจริญเติบโต ผลผลิตที่ได้มีทั้งอะซิเตตและโพรพิออนิก ซึ่งเป็นสารตัวกลางที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ดังปฏิกิริยา 2.7



ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria) สามารถใช้สารอาหารได้ไม่กี่ชนิด แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแบ่งตามชนิดการใช้สารตั้งต้นได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophs เปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซมีเทน ดังปฏิกิริยา 2.8



แบคทีเรียกลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญคือ จะใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศในขั้นตอนที่ 2 โดยช่วยคงสภาวะให้มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่ำลง ซึ่งมีผลต่อการเกิดอะซิเตตอย่างต่อเนื่อง

2) Acetotrophic methanogen หรือ Acetoclastic bacteria จะเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังปฏิกิริยา 2.9



2.4 สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ (สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2553)

การที่จะทำให้แบคทีเรียผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี จะต้องสร้างสภาวะแวดล้อมภายในระบบให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เนื่องจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นผลจากการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกัน อีกทั้งแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนเจริญเติบโตช้าและมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพทั้งทางกายภาพและทางเคมีในระบบเป็นอย่างมาก ถ้าสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสมจะทำให้แบคทีเรียผลิตก๊าซได้น้อยลง ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยหลายปัจจัย ได้แก่

2.4.1 อุณหภูมิ (Temperature)

เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์เนื่องจากการทำงานของถังปฏิกรณ์ต้องอาศัยจุลินทรีย์หลายกลุ่มที่สามารถเจริญเติบโตและเกิดเมทาบอลิซึมได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมี 3 ระยะ ดังนี้

1) ระยะ Psychrophilic ช่วงอุณหภูมิ 0-20 องศาเซลเซียส การทำงานของแบคทีเรียเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นร้อยละ 40-50 แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า psychophysics bacteria

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ระยะเวลา Mesophilic ช่วงอุณหภูมิ 20-45 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิทั่วไปในการดูแลระบบโดยเฉพาะประเทศในเขตร้อน ประสิทธิภาพในการสร้างก๊าซมีเทนเป็นร้อยละ 70-80 แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า mesophilic bacteria

3) ระยะเวลา Thermophilic ช่วงอุณหภูมิ 45-90 องศาเซลเซียสซึ่งอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นร้อยละ 90-95 แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า thermophilic bacteria

อุณหภูมิที่แบคทีเรียเจริญเติบโตอยู่เป็นอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของเซลล์ ภาวะโภชนาการของแบคทีเรีย และกิจกรรมของเอนไซม์ในเซลล์ ดังนั้น อุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดชนิดของแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ซึ่งจุลินทรีย์ในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ปฏิบัติชีวเคมีเกิดขึ้นได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 2 ช่วง คือ ช่วง mesophilic มีอุณหภูมิระหว่าง 30-40 องศาเซลเซียส และช่วง thermophilic อุณหภูมิระหว่าง 45-55 องศาเซลเซียส

2.4.2 สารอาหาร (Nutrients)

โดยทั่วไป แบคทีเรียนอกจากต้องการสารอาหารหลักในการเจริญเติบโตแล้วยังต้องการธาตุอาหารอื่น เพื่อช่วยในการสร้างเซลล์ใหม่ ธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส อัตราส่วนที่เหมาะสมในระบบหมักควรมีอัตราส่วน COD : N : P เป็น 100 : 2 : 0.4 หรือ BOD : N : P เป็น 100 : 1.1 : 0.2 ถ้ามีธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมนี้ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพจะลดต่ำลง ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีปริมาณธาตุไนโตรเจนมากเกินไปจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียหรือเปลี่ยนแปลงสภาพแบคทีเรียได้ เช่น ทำให้ตะกอนของแบคทีเรียมีน้ำหนักเบาถึงปฏิกรณ์มีโอกาสสูญเสียชีวมวลได้มากขึ้น ส่วนฟอสฟอรัสพบว่าถ้ามีการขาดฟอสฟอรัสทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ลดลงถึงร้อยละ 50 แต่ถ้ามีมากเกินไปก็ไม่มีประโยชน์ทั้งต่อประสิทธิภาพของถังและกิจกรรมของจุลินทรีย์

2.4.3 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

เป็นค่าแสดงความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตอน ซึ่งค่าสภาพต่างเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของระบบ ถ้าระบบมีความเป็นด่างสูงแสดงว่าระบบมี Buffering capacity สูงทำให้สามารถรักษาค่า pH ของระบบให้คงตัวอยู่ได้นานไม่เกิดการแปรปรวนของค่า pH ได้ง่ายเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกรดในระบบ ในทางตรงกันข้าม ถ้าระบบมีค่าสภาพต่างต่ำ เมื่อเกิดการสะสมตัวของกรดไขมันระเหยได้ในระบบปริมาณสูง ค่า pH ของระบบจะลดลงอย่างมาก ดังนั้น ในการควบคุมระบบให้ทำงานปกติจำเป็นต้องรักษาค่าสภาพต่างไม่ให้ต่ำจนเกินไป ค่าสภาพต่างที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ในช่วง 1,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรโดย CaCO_3

2.4.4 ค่าพีเอช (pH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ค่าพีเอช มีความสำคัญต่อการทำงานของจุลินทรีย์ เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่ออัตรากิจกรรมของเอนไซม์ ซึ่งเอนไซม์แต่ละตัวทำงานได้ดีในช่วงค่าพีเอชแคบ ๆ และมีกิจกรรมสูงสุดใช้

ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสม ดังนั้น จุลินทรีย์แต่ละชนิดจึงมีช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโต และเมทาบอลิซึมแตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) Hydrolytic bacteria แบคทีเรียประเภทนี้เจริญเติบโตได้ดีที่ระดับพีเอชที่เป็นกลาง สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับพีเอช และสามารถทนได้ถึงระดับพีเอชต่ำ ๆ ที่พีเอช 4.5

2) Acidogenic bacteria แบคทีเรียประเภทนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับกลุ่ม Hydrolytic bacteria เช่น จุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตกรด (ผลิตก๊าซไฮโดรเจน) มีความต้องการพีเอชอยู่ระหว่าง 4.0-6.0

3) Methanogenic bacteria แบคทีเรียประเภทนี้เจริญเติบโตได้ดีในระดับพีเอชเป็นกลาง อยู่ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 6.5-7.5 ถ้าพีเอชมีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง และถ้าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงตัวอย่างรวดเร็ว เพราะที่ภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน

2.4.5 สารพิษ (Toxics)

สารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน อาจมีโลหะปนเปื้อน โดยถ้าในถังปฏิกิริยามีปริมาณความเข้มข้นของโลหะสูงอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ และการผลิตก๊าซมีเทนหรือทำให้ระบบล้มเหลวได้ ดังนั้น ควรมีการตรวจสอบปริมาณความเข้มข้นของโลหะในถังปฏิกิริยาเพื่อไม่ให้มีความเข้มข้นสูง ซึ่งจะทำให้ไปหยุดการทำงานของแบคทีเรียและทำให้ระบบล้มเหลวได้

2.4.6 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids)

กรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นตัวให้อิเล็กตรอนของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ส่วนตัวรับอิเล็กตรอนของแบคทีเรียกลุ่มนี้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีความสำคัญต่อการผลิตก๊าซมีเทน แต่ถ้ามีการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบมากเกินไป จะเกิดการสะสมทำให้ค่าพีเอชลดลง และเกิดการยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดและกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน วิธีการลดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทำได้โดยการเติมต่างลงไปในระบบ

2.4.7 เวลาเก็บกัก (Retention time)

เวลาเก็บกักในระบบของการหมักแบบไร้อากาศ หมายถึง เวลาเก็บกักจุลชีพ (solid retention time : SRT) หรือเวลาเก็บกักน้ำ (hydraulic retention time : HRT) อยู่ในถังหมักจนกระทั่งออกมาจากระบบ ซึ่งการควบคุมระบบมักเลือกใช้ค่าเวลาการเก็บกักค่าใดค่าหนึ่ง การควบคุมค่าเวลาเก็บกักในการเดินระบบมีความสำคัญ คือ ถ้าเวลาเก็บกักยาวนานเกินไปจะทำให้สิ้นเปลือง เนื่องจากต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่เกินความจำเป็น นอกจากนี้เวลาเก็บกักขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการย่อยสลายของสารอินทรีย์ หากสารอินทรีย์ย่อยสลายยาก เวลาเก็บกักนานขึ้น จะช่วยให้เกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากใช้เวลาเก็บกักสั้นเกินไป แบคทีเรียจะเจริญเติบโตไม่ทัน เกิดการชะแบคทีเรียออกจากกระบวน ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานใช้

ของระบบลดลง ดังนั้นการควบคุมเวลาเก็บกักที่เหมาะสมจะทำให้แบคทีเรียที่อยู่ภายในระบบที่ ปริมาณคงที่ ระยะเวลาเก็บกักเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยสภาพแวดล้อมภายในระบบ และลักษณะ ของของเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบรวมไปถึงชนิดของแบคทีเรียในระบบเป็นสำคัญ เกณฑ์การออกแบบ ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (HRT) สำหรับถังหมักแบบอัตราปกติอยู่ที่ 30-60 วัน ถังหมักแบบกวนผสม สมบูรณ์ที่ 15-30 วัน และถังหมักแบบเอเอสปีอาร์มีค่า HRT ที่ 0.25-0.5 วัน เป็นต้น

2.4.8 การกวนผสม (Mixing)

การผสมเป็นการทำให้แบคทีเรียมีโอกาสสัมผัสกับอาหารมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยา การย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น ในกรณีแป้งมันสำปะหลังจะลดการจับตัวกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการย่อยแป้ง ได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้อุณหภูมิภายในระบบทั่วถึงการผสมสามารถลดเวลาเก็บกักของถัง ปฏิกริยาได้ วิธีการผสมโดยใช้ใบพัดกวนจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการผสมโดยหมุนเวียนก๊าซที่ เกิดขึ้นภายในระบบ การผสมสามารถเลือกรูปแบบได้ทั้งการผสมแบบต่อเนื่องและเป็นช่วงเวลา กลุ่มแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนมีความไวต่อการผสมเร็ว (Rapid Mixed, Velocity) มากควรหลีกเลี่ยง การผสมที่อาจทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนหลุดออกจากระบบเพราะจะทำให้ระบบล้มเหลวได้

2.5 ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ (กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

2.5.1 ด้านพลังงาน

- 1) หุงต้มอาหารแทนก๊าซแอลพีจี (LPG) หรือแทนถ่านไม้
- 2) เดินเครื่องยนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า
- 3) เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนกับกระบวนการผลิตในตัว Hot Oil Burner หรือใน

Strem Boiler ทดแทนการใช้ น้ำมันเตา

2.5.2 ด้านสิ่งแวดล้อม

- 1) ลดปัญหาของกลิ่นและก๊าซพิษ ไม่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นรบกวนผู้อยู่อาศัยบริเวณ ช้างเคียง
- 2) ลดปัญหาการเกิดโรค ไม่เป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรคและสัตว์นำโรค
- 3) ลดปัญหาเรื่องคุณภาพแหล่งน้ำธรรมชาติ ไม่เป็นต้นเหตุทำให้แหล่งน้ำสาธารณะ เน่าเสีย

4) ลดการปล่อยทิ้งก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ เป็นการช่วยลดอัตราการเกิดภาวะเรือน กระจก ซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น

2.5.3 ด้านการเกษตร

- 1) นำไปผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อใช้ในการเพาะปลูกและปรับปรุงดิน ทั้งในรูปปุ๋ยแห้ง และปุ๋ยน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2) การย่อยสลายอินทรีย์แบบไร้อากาศทำให้ปริมาณเชื้อโรคที่เป็นสาเหตุของ โรคที่ชุกบางชนิดลดลงและมีส่วนทำลายการงอกของเมล็ดวัชพืชถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 ด้านอื่นๆ

เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร การใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้อย่างคุ้มค่า หรือมีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ถือเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.6 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง (ชื่อวิทยาศาสตร์ *Manihot esculenta* Crantz.) มีชื่อในภาษาอังกฤษ เรียกว่า Cassava มีถิ่นกำเนิดอยู่ในเขตร้อนของทวีปอเมริกา ต่อมาได้มีการขยายการเพาะปลูกไปสู่แหล่งอื่นๆ จนทำให้มันสำปะหลังกลายเป็นพืชอาหาร (พืชที่ให้คาร์โบไฮเดรตสูง) ที่สำคัญเป็นอันดับ 5 ของโลก มันสำปะหลังเป็นพืชเขตร้อน สามารถเจริญเติบโตได้ในดินทุกชนิด ประเทศไทยมีสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการปลูกมันสำปะหลังมากแห่งหนึ่งของโลก มันสำปะหลังมีข้อดีคือ เป็นพืชที่ปลูกง่าย ทนแล้งได้ดีกว่าพืชชนิดอื่นๆ ต้องการการดูแลต่ำ มีโรคและศัตรูพืชรบกวนน้อย และสามารถปลูกได้ผลแม้จะปลูกในพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินไม่เพียงพอ จึงทำให้เกษตรกรนิยมปลูกมันสำปะหลัง (ปรารภณาและคณะ, 2552)

มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทย แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- 1) ชนิดหวาน (Sweet cassava) เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ต่ำ ไม่มีรสขม ใช้เพื่อบริโภคของมนุษย์ มีทั้งชนิดเนื้อร่วน ยุ่ย และชนิดเนื้อเหนียวแน่น
- 2) ชนิดขม (Bitter cassava) เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) สูง เป็นพืชและมีรสขม ไม่เหมาะสำหรับการบริโภคของมนุษย์ หรือใช้หัวสดเลี้ยงสัตว์โดยตรง แต่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปต่างๆ เช่น แป้งมัน มันอัดเม็ด แอลกอฮอล์ เนื่องจากมีปริมาณแป้งสูง

2.6.1 องค์ประกอบหลักของมันสำปะหลัง (กลุ่มอนุรักษดินและน้ำ, 2552)

มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ในรากเมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบ และส่วนที่เป็นสีเขียว จะสะสมในรูปคาร์โบไฮเดรตคือ แป้งไว้ในรากความสามารถในการสร้างและสะสมแป้งในราก มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากพันธุ์ของมันสำปะหลังอายุการเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยวและปัจจัยอื่น ๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของหัวมันอาจจะแตกต่างกันไปโดยทั่วไปหัวมันสำปะหลังมีอายุ 12 เดือนที่ได้รับปริมาณน้ำฝนเพียงพอ และไม่มีฝนตกชุกขณะเก็บเกี่ยวจะมีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.3 องค์ประกอบหลักของเนื้อมันสำปะหลังและองค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบหลักของหัวมันสำปะหลัง

องค์ประกอบในหัวมันสำปะหลัง	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักหัวมัน)
น้ำ	60.21–75.32
เปลือก	4.08–14.08
เนื้อ (แป้ง)	25.87–41.88
ไซยาไนด์ (ppm)	2.85–39.27

ที่มา : กลุ่มอนุรักษ์ดินและน้ำ (2552)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบหลักของเนื้อมันสำปะหลัง

องค์ประกอบในหัวมันสำปะหลัง	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักเนื้อมัน)
แป้ง	71.90–85.00
โปรตีน	1.57–5.78
เยื่อใย	1.77–3.95
เถ้า	1.20–2.80
ไขมัน	0.06–0.43
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59–8.66

ที่มา : กลุ่มอนุรักษ์ดินและน้ำ (2552)

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง

คุณลักษณะ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ปริมาณความชื้น (moisture content)	≥ 14
ปริมาณแป้ง (starch content)	≤ 35
ปริมาณเยื่อใย (crude fiber content)	≥ 18
ปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรด (sand/silica content)	≥ 3

ที่มา : สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2561)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ประโยชน์ของมันสำปะหลัง (กลุ่มอนุรักษดินและน้ำ, 2552)

มันสำปะหลังเป็นพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางทั้งทางตรงและทางอ้อม ทั้งด้านอุตสาหกรรมและเป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ ทุกส่วนของต้นมันสำปะหลังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ แยกตามส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1) หัวสด

- ก) ใช้เป็นอาหารมนุษย์โดยรับประทานสด ต้ม นึ่ง ย่าง อบ หรือเชื่อม ฯลฯ
- ข) ใช้เป็นอาหารสัตว์ ทั้งที่เป็นหัวสด กากที่เหลือจากการทำแป้ง เปลือกของหัว
- ค) ใช้ส่งโรงงานอุตสาหกรรมทำแป้ง มันเส้น มันอัดเม็ด แอลกอฮอล์ ฯลฯ

2) ใบ

- ก) ใช้เป็นอาหารสัตว์ รับประทานเป็นผักสด ต้ม จิ้ม น้ำพริก นำมาแกงปรุงเป็นซุซ
- ข) ใช้เป็นอาหารสัตว์ ในรูปใบสด ตากแห้งป่นผสมกับอาหารชั้นเลี้ยงสัตว์

3) ลำต้น

- ก) ทำเป็นท่อนพันธุ์ โดยตัดออกเป็นท่อนๆนำไปปลูกได้
- ข) ใช้เป็นอาหารสัตว์ โดยตัดส่วนยอดผสมกับใบสดหรือตากแห้งเป็นอาหารหยาบ

4) เมล็ด

- ก) ใช้สกัดน้ำมันที่มีคุณภาพดีสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยาได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พงษ์พันธ์และธนากร (2554) ศึกษาและทดสอบหาหัวเชื้อจุลินทรีย์และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังของกระบวนการผลิตแป้งมันและศึกษาผลของอุณหภูมิและสภาพความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีปริมาณสูงสุดโดยใช้ค่าที่ทดลองในระดับสากลเพื่อที่จะนำผลการทดลองดังกล่าวมาใช้ในระบบถังหมักก๊าซชีวภาพขนาดเครื่องต้นแบบในลำดับต่อไป การออกแบบการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนโดยแต่ละส่วนใช้เวลาทดลอง 7 วันส่วนแรกเป็นการทดสอบหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมโดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากฟาร์มสุกรฟาร์มวัวและโรงงานแป้งมันสำปะหลังและปรับค่า pH เท่ากับ 7 (เป็นกลาง) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่าหัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงแป้งมันสำปะหลังเกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุดส่วนที่สองเป็นการทดสอบผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพโดยการทดลองได้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิตั้งแต่ 25 -50 องศาเซลเซียสและได้ควบคุมค่า pH เท่ากับ 7 (เป็นกลาง) พบว่าอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพสูงที่สุดคือ 35 องศาเซลเซียส ส่วนที่สามเป็นการทดสอบผลของความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพการทดลองได้นำอุณหภูมิจากการทดลองในส่วนที่สองพบว่าทำให้เกิดก๊าซสูงสุด 35 องศาเซลเซียสมาเป็นตัวแปรควบคุม ในการทดลองส่วนที่สามซึ่งได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5-10 โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1.0 จากผลการทดลองพบว่า

ค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีแนวโน้มต่อการเกิดก๊าซมากที่สุดคือค่า pH เท่ากับ 8 ดังนั้นจากการศึกษานี้พบว่าการใช้กากมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพควรใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานแป่งมันสำปะหลังและควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส ค่า pH เท่ากับ 8 เพื่อให้เกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดเวลาที่ให้อัตราการเกิดก๊าซสูงสุดคือ 3-4 วัน

สุรลักษณ์และสิรินทรเทพ (2557) ศึกษาการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกโดยใช้หัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังในระบบถังหมักชั้นตอนเดียวแบบไม่ซับซ้อนระดับห้องปฏิบัติการที่มีปริมาตรหมัก 5-50 ลิตรที่อุณหภูมิห้อง (29-31 องศาเซลเซียส) โดยไม่มีการกวนผลการศึกษาที่ได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์กล่าวคือได้มีเทนที่มีศักยภาพสูงเพียงพอการใช้เป็นแหล่งพลังงานจากหัวมันสำปะหลังดิบซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยที่ผลิตได้ปริมาณมากและจัดได้ว่ามีมูลค่าต่ำและจากกากมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานแป่งมันสำปะหลังโดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนเมื่อผลิตมีเทนด้วยสภาวะเหมาะสมจากการศึกษาที่ปริมาตรหมัก 50 ลิตรได้เปรียบเทียบการใช้หัวมันสำปะหลัง 2 พันธุ์คือ CMR35-22-196 (ระยอง 11) และระยอง 5 มีแ่งร้อยละ 25.56 และ 28.72 ตามลำดับ พบว่าหัวมันสำปะหลังที่เตรียมเป็นชิ้นหัวมันแห้ง (ความชื้นร้อยละ 17.37 และ 14.18 ตามลำดับ) ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 1.0 (จากผลการศึกษาช่วงร้อยละ 0.25-16.0) เต็มยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนร้อยละ 0.04 น้ำหนักต่อปริมาตร (จากการศึกษาแหล่งไนโตรเจนต่างกัน 3 ชนิด) กิจกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์สิ้นสุดภายใน 38 และ 35 วันตามลำดับ ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด 313 และ 304 ลิตร (หรือ 363 และ 340 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสดที่มีความชื้นร้อยละ 52 และ 56 ตามลำดับ) เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 626 และ 608 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมดที่มีมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุดร้อยละ 75.9 และ 76.0 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการหมัก 21 และ 19 วัน ความเข้มข้นของมีเทนโดยรวมในปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดร้อยละ 52 และ 61 ซึ่งได้มีเทนทั้งสิ้น 161 และ 185 ลิตรเทียบเท่าปริมาณมีเทนทั้งหมดที่เกิดขึ้น 322 และ 370 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมดที่ให้ตามลำดับสำหรับการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง (ตัวแทนกากมันสำปะหลังที่เลือกมาศึกษามีความชื้นร้อยละ 83 มีแ่งร้อยละ 24.40) นั้นเมื่อใช้กากมันที่เตรียมแห้ง (ความชื้นร้อยละ 15.19) ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 1.0 (จากผลการศึกษาช่วงร้อยละ 0.5-4.0) เต็มยูเรียร้อยละ 0.04 น้ำหนักต่อปริมาตร (จากการศึกษาแหล่งไนโตรเจนต่างกัน 3 ชนิด) ในปริมาตรหมัก 50 ลิตรให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 148 ลิตร (หรือ 69 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสดที่มีความชื้นร้อยละ 83) เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น 296 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมดที่ให้ มีมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุดร้อยละ 75.4 โดยปริมาตรที่ระยะเวลาการหมัก 38 วัน ความเข้มข้นของมีเทนโดยรวมในปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดร้อยละ 56 ซึ่งได้มีเทนทั้งสิ้น 82 ลิตรเทียบเท่าปริมาณมีเทนทั้งหมดที่เกิดขึ้น 165 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมดที่ให้ผลการผลิตมีเทนนี้ได้จากใช้เชื้อเริ่มต้นที่ทางโครงการได้พัฒนาขึ้นเป็นเชื้อเริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพสูงในการย่อย แป่งมันสำปะหลังดิบและการผลิตมีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลังและได้ข้อมูลด้านปัจจัย

สำคัญที่มีผลต่อการผลิตมีเทนจากหัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลังเพื่อการเพิ่มศักยภาพ และขยายขนาดการผลิตก๊าซต่อไป

สมยศและคณะ (2557) ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพเพื่อศึกษาอัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมโดยใช้ถังหมักขนาด 1,200 มิลลิลิตรและใช้เวลาทดลอง 15 วัน เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมมาทำการทดลองในถังต้นแบบขนาด 50 ลิตร โดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากบ่อหมักก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานแปงมันควบคุมค่า pH เท่ากับ 8 พบว่าการเกิดก๊าซชีวภาพจะเริ่มเกิดเมื่อการทดลองผ่านไป 3 วันและมีระยะอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด 4-5 วันและพบว่าอัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมที่สุด 4:6 สัดส่วนโดยปริมาตร มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด 1,294 มิลลิลิตรและมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด 258 มิลลิลิตรต่อวันและมีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของอัตราส่วน 4:6 มากกว่าอัตราส่วน 8:2, 6:4, 5:5, 2:8 และกากมันสำปะหลังอย่างเดียว 88.5%, 16.8%, 41.2%, 15.9%, 87.1% ตามลำดับและมีสัดส่วนของก๊าซชีวภาพของอัตราส่วน 4:6 ก๊าซมีเทน (CH_4) 50.3% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 45.9 % และก๊าซอื่น ๆ 3.80%

จันจิราและคณะ (2560) ศึกษาอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังหมักกรด มีปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตรและถังหมักก๊าซมีเทนมีปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร มีการกวนผสมที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาทีและหยุดกวน 15 นาที ศึกษาสภาวะในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าสภาพความเป็นด่าง ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งระเหยง่าย ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย กรดไขมันระเหยง่าย ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี ค่าคาร์บอนทั้งหมด ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยแปรค่าอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 30 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากผลการทดลองพบว่าอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมคือ 10 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าพีเอชในถังหมักกรด 3.84-4.10 และในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า 6.59-6.78 มีค่าสภาพความเป็นด่างในถังหมักก๊าซมีเทน $1,019 \pm 4.52$ มิลลิกรัมต่อลิตรโดยแคลเซียมคาร์บอเนตของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายในถังหมักกรด มีค่า $5,621.83 \pm 626.42$, $5,100.92 \pm 601.02$ มิลลิกรัมต่อลิตรและในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า $2,137.08 \pm 169.92$, $1,323.50 \pm 175.02$ มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในถังหมักกรดมีค่า $4,319.75 \pm 630.09$, $4,173.25 \pm 627.92$ มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า $1,011.00 \pm 143.03$, 945.50 ± 134.15 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดไขมันระเหยง่ายในถังหมักกรดมีค่า $1,979.19 \pm 153.16$ มิลลิกรัมต่อลิตรและในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า 55.00 ± 22.96 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีไอดีในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า $4,189.97 \pm 260.68$ มิลลิกรัมต่อลิตรและ 88.04 ± 44.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ส่วนหนึ่งสำหรับการใช้ของนักศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในถังหมักกรดมีค่า 11.39 ± 2.36 และ 0.43 ± 0.04 ในถังหมักก๊าซมีเทนอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 4.39 ± 1.14 ลิตรต่อวัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 20.79-34.55 และ 13.81- 22.60 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายและ 3,310.56-3,594.13 และ 2,198.21-2,429.63 มิลลิลิตรต่อกรัมของกรดไขมันระเหยง่ายก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ประกอบก๊าซมีเทน $67.14 \pm 1.40\%$ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ $31.51 \pm 1.58\%$ ก๊าซออกซิเจน $1.14 \pm 0.31\%$ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 31.79 ± 7.75 ส่วนในล้านส่วน

อุษาและคณะ (2561) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยสารกรดและด่าง เพื่อสลายพันธะและสลายโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในรูปของน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 1.67% TS และ 5% TS ผลการศึกษาพบว่าสภาวะการไฮโดรไลซิสที่ pH 2 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และทำปฏิกิริยา 30 นาทีก่อนการหมักที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5% TS ให้การผลิตก๊าซชีวภาพสูงถึง 0.1757 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้งระเหยเมื่อเทียบกับสภาวะที่ให้การผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 1.67% TS ที่ให้การผลิตก๊าซชีวภาพ 0.0027 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้งระเหยจะพบว่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง 5% TS สามารถทดแทนค่าใช้จ่ายในรูปของก๊าซหุงต้มและพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าที่ความเข้มข้น 1.67% TS ถึง 65 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

- 1) กรดซัลฟิวริก (conc.H₂SO₄) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 3) กรดบอริก (H₃BO₃) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 4) โพแทสเซียมไดโครเมต (K₂Cr₂O₇) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 5) ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag₂SO₄) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 6) 1, 10-phenanthroline monohydrate (C₁₂H₁₈N₂·H₂O) บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 7) เฟอร์รัส(II)แอมโมเนียมซัลเฟต (Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 8) เฟอร์รัส(II)ซัลเฟตเอปตาไฮเดรต (FeSO₄·7H₂O) บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 9) คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO₄) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 10) โพแทสเซียมซัลเฟต (K₂SO₄) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 11) เอทิลแอลกอฮอล์ 95% (95% Ethyl alcohol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 12) ฟีนอล (Phenol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 13) กลูโคส (D-Glucose) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 14) เมทิลเรด (Methyl red) บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 15) เมทิลีนบลู (Methylene blue) บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3.1.2 อุปกรณ์

- 1) เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น Genesys10S UV-Vis บริษัท Thermo Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น C860 version 1.2 บริษัท Hanna Instrument ประเทศเบลเยียม
- 3) ตู้อบ (Oven) รุ่น UN55 บริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
- 4) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ML 204/01 บริษัท Metter Toledo ประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สวิตเซอร์แลนด์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) เครื่องกรองลดความดัน รุ่น Aspirator บริษัท Evela Tokyo ประเทศญี่ปุ่น
- 6) เครื่องวัดก๊าซชีวภาพ (Gas data meter) รุ่น GFM 416 บริษัท Best Technic ประเทศอังกฤษ
- 7) ชุดเครื่องกลั่นเจลท์ดาล (Kjeldahl digestion apparatus) รุ่น KI Cerhardt บริษัท Scientific Promotion Co.,Ltd ประเทศไทย
- 8) หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ใช้แก้วที่ทำด้วยบอโรซิลิเกต ขนาด 16×100 mm ที่มีฟลูออโรเอทิลีน (Tetrafluoroethylene, TFE)
- 9) เครื่องปั่นกวน (Magnetic stirrers) รุ่น MR Hei-Tec บริษัท Heidolph Instruments GmbH & Co.KG ประเทศเยอรมนี
- 10) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 11) กระจกครอบโยแก้ว เบอร์ 42 บริษัท Macherey–Nagel ประเทศเยอรมนี
- 12) เตาเผา (Muffle furnace) รุ่น Centroller P320 บริษัท Naberthem ประเทศเยอรมนี
- 13) เครื่องปั๊มน้ำชนิดรีดท่อ (Peristaltic Pump) รุ่น Model 77250-62 บริษัท MasterflexL/S ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 14) เครื่องแก้วต่างๆ

3.2 วัสดุที่ใช้

3.2.1 กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ราชสีมา กรีน เอ็นเนอร์ยี จำกัด จังหวัดนครราชสีมา ทำการเก็บรักษากากมันสำปะหลังโดยเก็บใส่ถุงซิปล็อค เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพ

กากมันสำปะหลังที่ใช้ป้อนเข้าระบบ เตรียมโดยชั่งกากมันสำปะหลัง 50 กรัม ผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปกรองผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช (เพื่อป้องกันการอุดตันของระบบ) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ

(ก) กากมันสำปะหลัง (ข) น้ำแป้งมันสำปะหลัง 5% (w/v)

3.2.2 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบ

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียบริษัท เพอร์ซิเดนท์ เบเกอร์ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรม เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศ EGSB (Extended Granular Sludge Bed) เชื้อจุลินทรีย์จะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ สีดำ (Granular) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 ศึกษาคุณลักษณะของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ

1) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำแป้งมันสำปะหลัง 5% (w/v) โดยทำการวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (pH), สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk), ความชื้น (Moisture content), ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solid, TS), ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solid, VS), ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solids, TSS), ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (Volatile suspended solids, VSS), กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFAs), ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD) และค่าไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl nitrogen, TKN) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	pH meter
สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)	Titration โดยวิธีมาตรฐาน APHA (1999)
ความชื้น (Moisture content)	อบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (1999)
ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids)	ระเหยน้ำออกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (1999)
ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids)	เผาที่อุณหภูมิ 550°C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (1999)
ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solids)	กรองและอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (1999)
ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (Volatile suspended solids)	เผาที่อุณหภูมิ 550°C วิธีมาตรฐาน APHA (1999)
ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids)	Direct titration method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์

ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand)	Closed Reflux, Titrimetric Method วิธีมาตรฐาน APHA (1999)
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen)	Kjeldahl method
ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate)	วิธีฟินอล-ซัลฟิวริกแอซิด
ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch)	วิธีฟินอล-ซัลฟิวริกแอซิด

3.3.2 ศึกษาผลของการปรับสภาพน้ำแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ความร้อนและอัตราการเติมน้ำแป้งมันสำปะหลังต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

การศึกษาประสิทธิภาพการหมักก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง แป้งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การปรับสภาพน้ำแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ความร้อนและการหาอัตราการเติมน้ำแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนี้

3.3.2.1) การปรับสภาพน้ำแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ความร้อน

1) การเตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลัง โดยชั่งกากมันสำปะหลัง 50 กรัม ผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ปั่นจนให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปกรองกากออก จะได้น้ำแป้งมันสำปะหลัง

2) ทำการปรับสภาพน้ำแป้งมันสำปะหลัง โดยวิธีการต้มน้ำแป้งมันสำปะหลัง โดยแปรค่าอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 1), 60 และ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นทิ้งไว้ให้ลดลงถึงอุณหภูมิห้องก่อนนำไปใช้

3) เตรียมเชื้อจุลินทรีย์ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยตวงเชื้อจุลินทรีย์จำนวน 60 มิลลิลิตร ใส่กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ได้ 80 มิลลิลิตรและรอนตกตะกอน (มันลิน, 2548) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นรินน้ำกลั่นออก

4) เตรียมชุดควบคุมโดยเติมน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ใส่เชื้อจุลินทรีย์ที่ได้ในข้อ 3 (คิดเป็น 20%)

5) เตรียมชุดทดลอง โดยเติมน้ำแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพจากข้อ 2 จำนวน 300 มิลลิลิตรลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ใส่เชื้อจุลินทรีย์ที่ได้ในข้อ 3

เอกสา (คิดเป็น 20%) ปิดด้วยจุกยางดำ ที่มีการต่อท่อ นำก๊าซและมีการเก็บก๊าซชีวภาพโดยวิธีการแทนที่ในราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2% (รูปที่ 3.4) โดยทำการปั่นกวนที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 วิธีการตวงเชื้อจุลินทรีย์ (มันลิน, 2548)



สารละลายกักกันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิต่าง+ เชื้อจุลินทรีย์

รูปที่ 3.4 ชุดทดลองในการหาสถานะอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับสภาพน้ำแป้งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2) การศึกษาอัตราการเติมน้ำแบ่งมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิต

ก๊าซชีวภาพ

1) เตรียมน้ำแบ่งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จำนวน 4,000 มิลลิลิตร ใส่ในขวดดูแรนขนาด 5,000 มิลลิลิตร โดยชั่งกากมันสำปะหลัง 200 กรัม ใส่น้ำกลั่น 4,000 มิลลิลิตร บั่นกวนที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปกรองผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช (เพื่อป้องกันการอุดตันของระบบ) จะได้น้ำแบ่งมันสำปะหลัง

2) เติมเชื้อจุลินทรีย์ 20% โดยตวงเชื้อจุลินทรีย์ใส่ในกระบอกตวงให้ได้ 800 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน (มันสิน,2548)

3) ทำการบั่นกวนที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

4) เมื่อระยะเวลาครบ 24 ชั่วโมง จดบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน และทำการถ่ายของเหลว 300 มิลลิลิตรออกจากระบบ (Effluent) และใส่น้ำแบ่งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เท่ากับปริมาณที่ถ่ายออก ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน

5) วิเคราะห์ของเหลวที่ถ่ายออกจากระบบ (Effluent) ตามวิธีมาตรฐาน ดังนี้ ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk), ความชื้น (Moisture content), ค่าของแข็งทั้งหมด (TS), ค่าของแข็งระเหยง่าย (VS), ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS), ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (VSS), ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFAs), ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD), ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

6) วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยใช้ Gas Data Meter

7) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่แปรค่าการเติมน้ำแบ่ง (feed rate) 500 มิลลิลิตรต่อวัน และ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบชั้นตอนเดียว โดยเก็บก๊าซชีวภาพโดยใช้วิธีการแทนที่ใน 2% NaCl ของเหลวที่ใช้ในการป้อนเข้าสู่ระบบ คือ น้ำแ่งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร การทดลองแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นการแปรสภาพน้ำแ่งมันสำปะหลังโดยใช้ความร้อน โดยแปรค่าอุณหภูมิในการแปรสภาพน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ อุณหภูมิห้อง (30 ± 1), 60, 80 องศาเซลเซียส และตอนที่ 2 เป็นการหาอัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่เหมาะสมโดยแปรค่าที่ 300, 500, 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการป้อนเข้าสู่ระบบ (Feed) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1 ภาคผนวก ข) และผลการวิเคราะห์น้ำแ่งมันสำปะหลังก่อนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2 ภาคผนวก ข)

จากผลการศึกษาพบว่า กากมันสำปะหลังที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าพีเอช 3.44 ± 0.06 ประกอบด้วย ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 173.38 ± 16.77 กรัมต่อลิตร ปริมาณแป้งทั้งหมด 84.23 ± 3.20 กรัมต่อลิตร และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด 40.58 ± 0.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณสารอาหารเพียงพอที่จะใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้เป็นก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง	ค่าที่ได้
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	3.44 ± 0.06
ความชื้น (Moisture content) (%)	84.13 ± 0.06
ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (Total carbohydrate) (g/L)	173.38 ± 16.77
ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch) (g/L)	84.23 ± 3.20
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	40.58 ± 0.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่มีการถือโดย ทั้งสิ้น ยกเว้นแต่เพียงแต่เอกสารฉบับนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์น้ำแป้งมันสำปะหลังก่อนเข้าระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

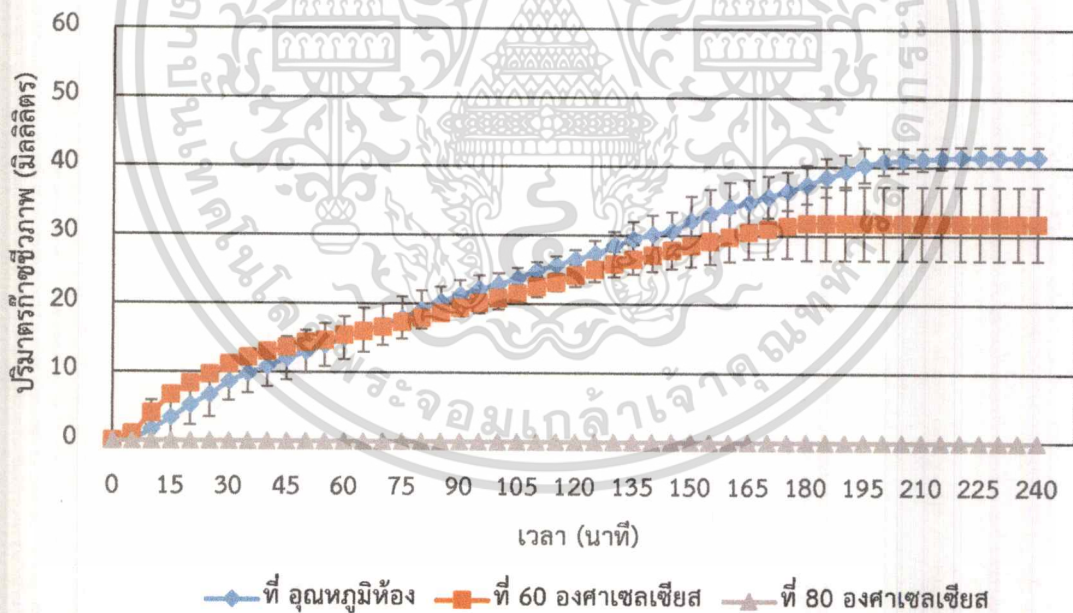
พารามิเตอร์	ค่าที่ได้
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	3.48±0.01
ของแข็งทั้งหมด (Total solids) (mg/L)	1,450.33±94.48
ของแข็งที่แขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids) (mg/L)	1,351.11±83.29
ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) (mg/L)	1,444.55±94.93
ของแข็งแขวนลอยที่ระเหยได้ (Volatile Suspended Solids) (mg/L)	673.33±33.83
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) (mg/L as CH ₃ COOH)	70.83±1.44
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl nitrogen) (mg/L)	23.52±0.00
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand) (mg/L)	1,600.00±0.00
อัตราส่วนคาร์บอน ต่อ ไนโตรเจน (C/N ratio)	22.59±0.46

จากการเตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลัง 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เพื่อใช้ป้อนเข้าสู่ถังหมัก พบว่าน้ำแป้งมันสำปะหลังมีค่า COD ค่อนข้างสูง และมีค่า C/N ratio ที่เหมาะที่จะนำไปหมักเป็น ก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแปรสภาพน้ำแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ความร้อน

การศึกษาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแปรสภาพน้ำแป้งมันสำปะหลัง ในการป้อนเข้าถึงหมักก๊าซชีวภาพ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 1), 60 และ 80 องศาเซลเซียส ทำการหมักเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าน้ำแป้งมันสำปะหลังที่ป้อนให้กับเชื้อจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิห้อง ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$) มีปริมาตรก๊าซ 41.50 ± 1.50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาตรก๊าซ 31.83 ± 5.35 มิลลิลิตร และที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ไม่เกิดก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3 ภาคผนวก ข) จากผลการทดลองพบว่าน้ำแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิห้อง ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$) เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านั้นให้เป็นก๊าซชีวภาพ เนื่องจากแป้งดิบถูกต้มด้วยความร้อนกลายเป็นแป้งสุกจะเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) ทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งถูกเปลี่ยนแปลงให้ง่ายต่อการถูกย่อย แต่เมื่อปล่อยให้แป้งสุกทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงโดยผ่านกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) กลายเป็นแป้งคืนตัวเกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกใหม่ ทำให้โครงสร้างแป้งถูกเปลี่ยนแปลงให้มีความทนทานต่อการถูกย่อย (ธนากร, 2559) ดังนั้นจึงใช้น้ำแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิห้อง ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$) ทำการการทดลองช่วงต่อไป



รูปที่ 4.1 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิต่างๆในการแปรสภาพน้ำแป้ง

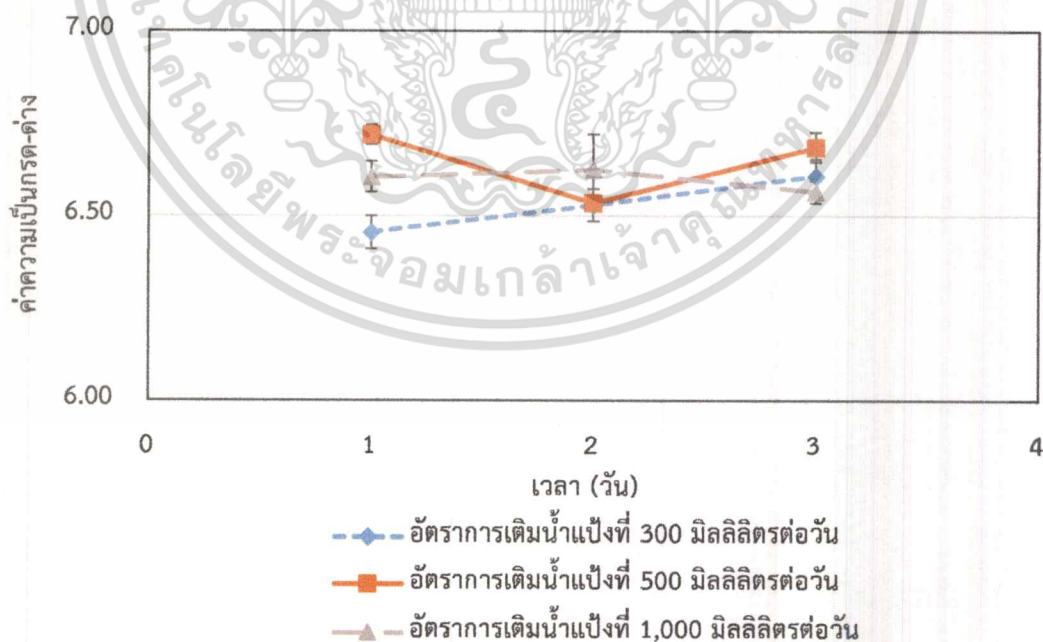
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาอัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่เหมาะสม

จากการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแปรสภาพน้ำแ่งมันสำปะหลังในการบ้อนเข้าถังหมักก๊าซชีวภาพ ได้ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิห้อง ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$) จึงทำการศึกษาอัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่เหมาะสม โดยแปรค่าปริมาณการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังเข้าระบบให้เท่ากับปริมาณของเหลวที่ออกจากระบบที่ 300, 500, และ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ได้ผลการทดลองดังนี้

4.3.1 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ

ค่าพีเอชเป็นค่าที่ส่งผลกระทบต่อระบบการทำงานของจุลินทรีย์ ถ้าระบบมีค่าพีเอชต่ำหรือค่อนข้างเป็นกรดจะส่งผลให้ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพต่ำ (อุษาและคณะ, 2561) จากการศึกษาค่าพีเอชของของเหลวที่ออกจากระบบพบว่า อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลัง 300 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.53 ± 0.08 อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลัง 500 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.65 ± 0.10 และอัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลัง 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.65 ± 0.03 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.1 ภาคผนวก ข) จากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชของเหลวในระบบมีค่าค่อนข้างเป็นกลาง ซึ่งสอดคล้องกับค่าพีเอชที่ทำให้ Methanogenic bacteria แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนเจริญเติบโตได้ดีในระดับพีเอชเป็นกลาง ที่มีค่าเหมาะสมอยู่ในช่วงประมาณ 6.5-7.5 ถ้าพีเอชมีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง (สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2553)

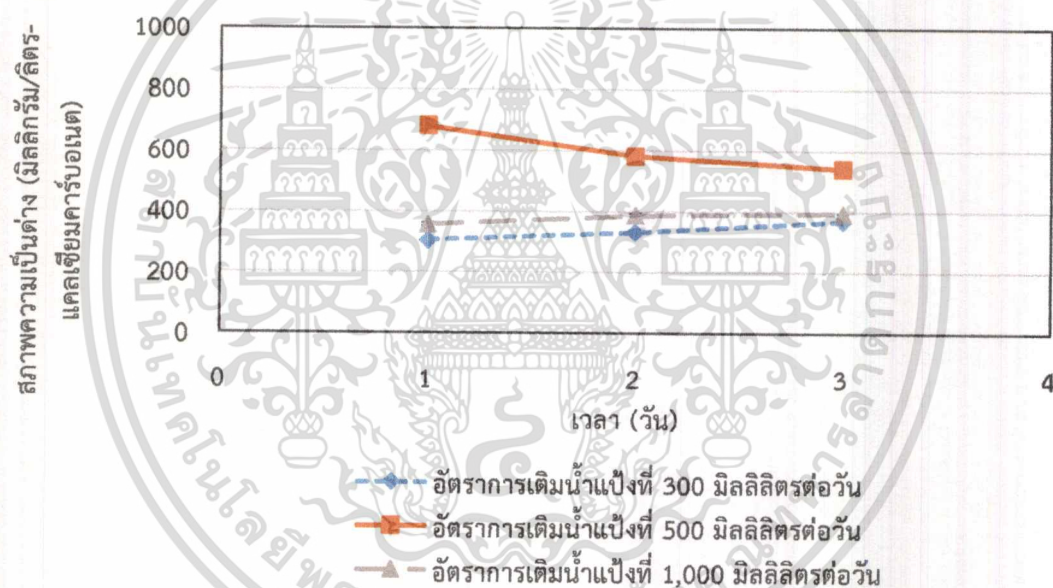


รูปที่ 4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่างของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการศึกษาค่าสภาพความเป็นต่างในระบบ

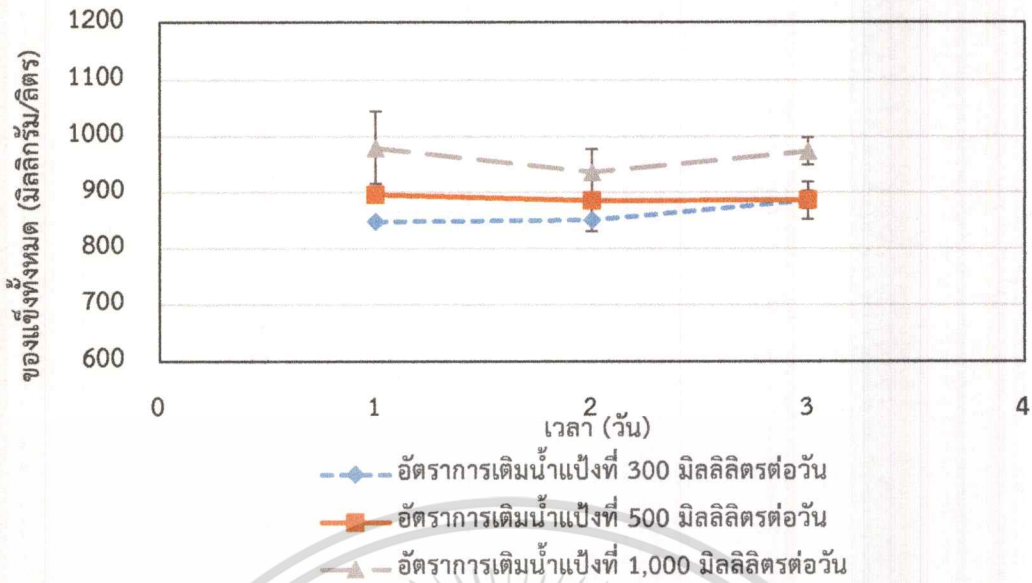
ค่าสภาพความเป็นต่างเป็นตัวบ่งบอกความเสถียรภาพในระบบ จากผลการทดลองพบว่า สภาพความเป็นต่างในถังหมักก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ช่วง 335.56 ± 32.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ช่วง 601.33 ± 6.12 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ช่วง 380.00 ± 20.48 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.2 ภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่าค่าสภาพความเป็นต่างในถังหมักก๊าซชีวภาพสอดคล้องกับผลของค่าความเป็นกรด-ด่างที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้ถ้าระบบมีค่าสภาพความเป็นต่างต่ำแสดงว่า ระบบค่อนข้างเป็นกรดส่งผลให้ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพต่ำลง โดยทั่วไประบบควรมีสภาพต่างทั้งหมดประมาณ 1,000-1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต (Metcalf and Eddy, 2003)



รูปที่ 4.3 ค่าสภาพความเป็นต่างของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

4.3.3 ผลการศึกษาค่าของแข็งทั้งหมดในระบบ

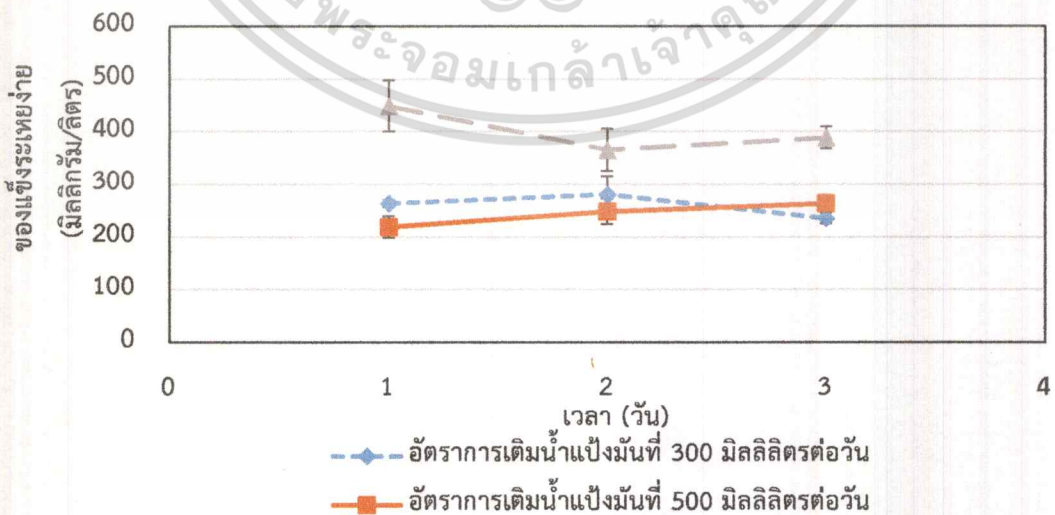
จากผลการทดลองพบว่า ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดของถังหมักก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 861.85 ± 20.60 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 889.63 ± 6.12 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 963.52 ± 23.45 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.3 ภาคผนวก ข) ซึ่งการลดลงของปริมาณของแข็งทั้งหมด แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพของเชื้อจุลินทรีย์ (Song et al., 2014) ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ค่าของแข็งทั้งหมดของของเหลือในถังหมักก๊าซชีวภาพ

4.3.4 ผลการศึกษาค่าของแข็งระเหยง่ายในระบบ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายของถังหมักก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 259.96 ± 22.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 243.70 ± 22.67 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 401.08 ± 43.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.4 ภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่าค่าของแข็งระเหยง่ายลดลง เนื่องจากแ่งถูกย่อยสลายเป็นกรดไขมันระเหยง่าย และถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพในที่สุด

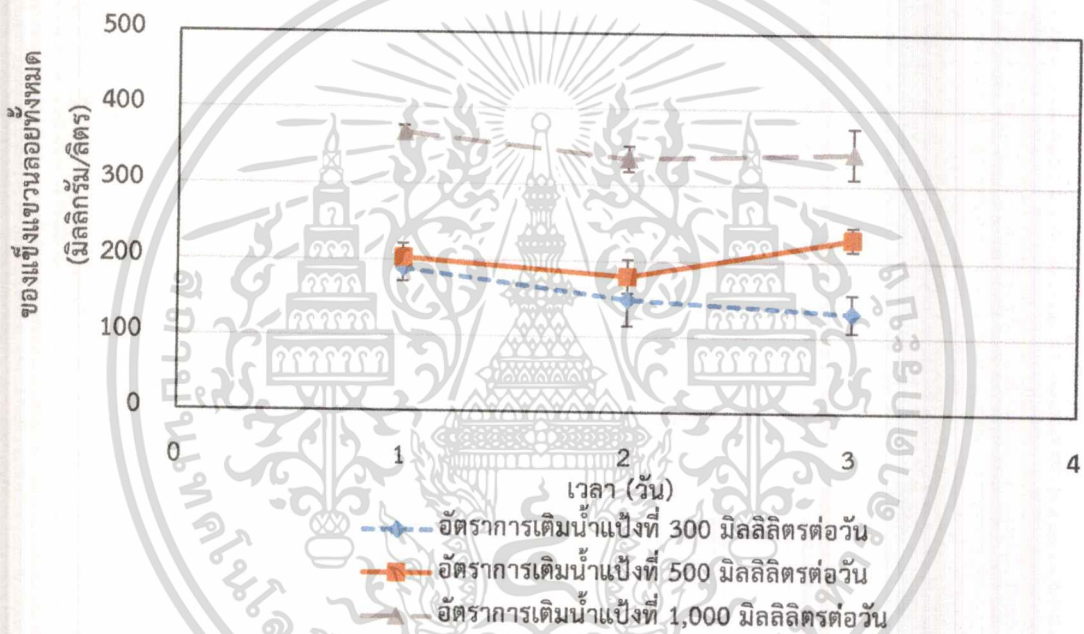


รูปที่ 4.5 ค่าของแข็งระเหยง่ายของของเหลือในถังหมักก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคนใช้ อัตราการเติมน้ำแ่งมันที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

4.3.5 ผลการศึกษาค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระบบ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในถังหมักก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 156.74 ± 29.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 204.33 ± 24.97 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 348.22 ± 17.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.5 ภาคผนวก ข) ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระบบสารอินทรีย์ของทุกอัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังมีค่าลดลงจากน้ำแ่่งเริ่มต้น เนื่องจากในน้ำแ่่งมันสำปะหลังจะถูกย่อยสลายเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

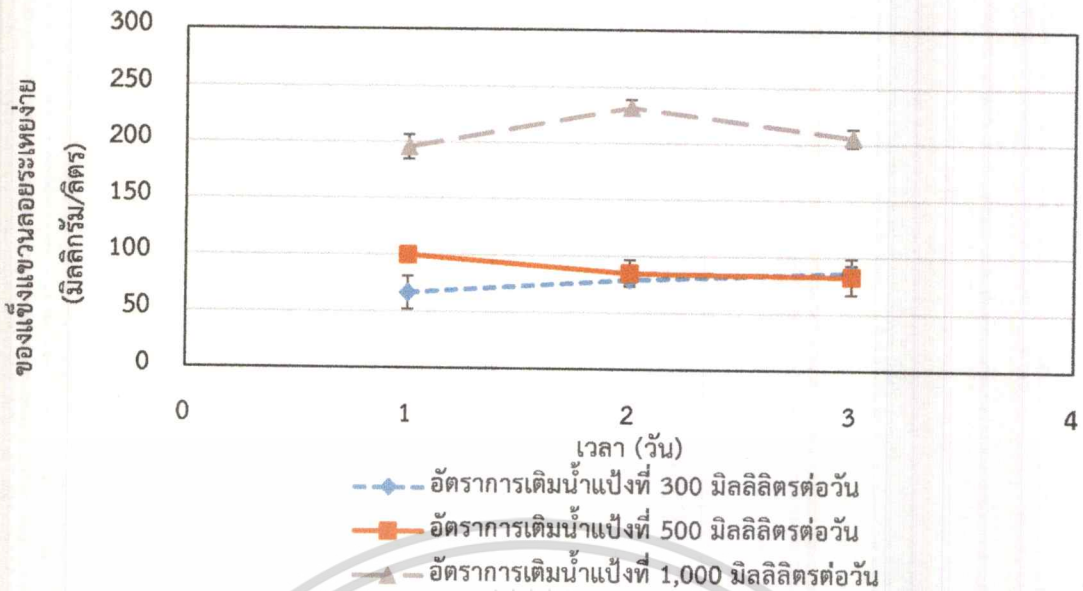


รูปที่ 4.6 ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

4.3.6 ผลการศึกษาค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในระบบ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในถังหมักก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 77.33 ± 9.98 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 89.28 ± 9.34 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 211.21 ± 18.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.6 ภาคผนวก ข) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

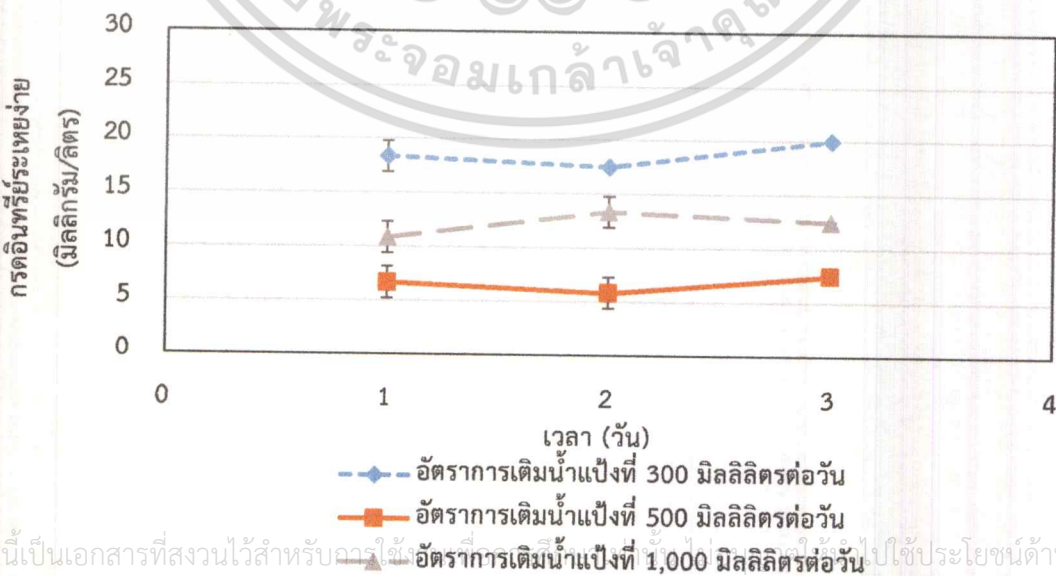
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

4.3.7 ผลการศึกษาค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ

จากผลการทดลองพบว่า ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายในถังหมักก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติมน้ำแบ่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 18.61 ± 1.27 มิลลิลิตรต่อลิตร ที่อัตราการเติมน้ำแบ่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 6.67 ± 0.83 มิลลิลิตรต่อลิตร และที่อัตราการเติมน้ำแบ่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 12.22 ± 1.27 มิลลิลิตรต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.7 ภาคผนวก ข) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีปริมาณน้อยเนื่องจากถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ในสภาวะปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ภายในถังปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิลิตรของกรดอะซิติกต่อลิตร (สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2553)

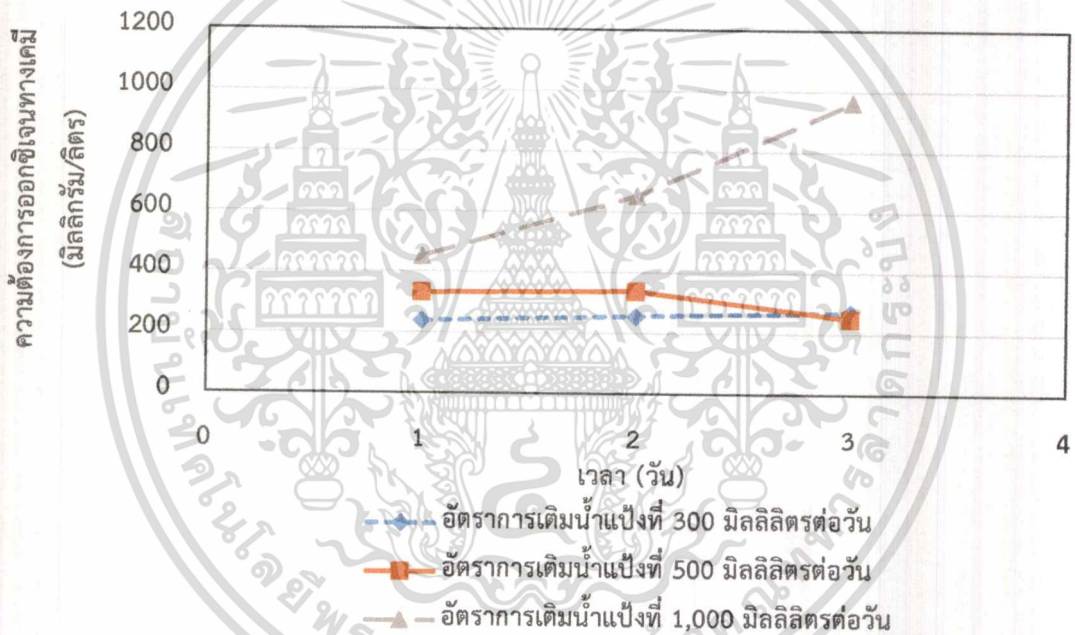


รูปที่ 4.8 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้... ใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง

4.3.8 ผลการศึกษาค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีในระบบ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีในถังหมักก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อ มีค่าอยู่ในช่วง 256.00 ± 16.00 มิลลิกรัม ออกซิเจนต่อลิตร ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อ มีค่าอยู่ในช่วง 308.00 ± 49.76 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร และที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อ มีค่าอยู่ในช่วง 690.22 ± 257.32 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.8 ภาคผนวก ข) ซึ่งมีค่า COD ลดลงจากน้ำแ่่งเริ่มต้น เนื่องจากสารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนแปลงเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ อย่างไรก็ตามของเหลวที่ออกจากถังหมักก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300, 500, 1,000 มิลลิลิตร มีค่า COD มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง จึงไม่สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้

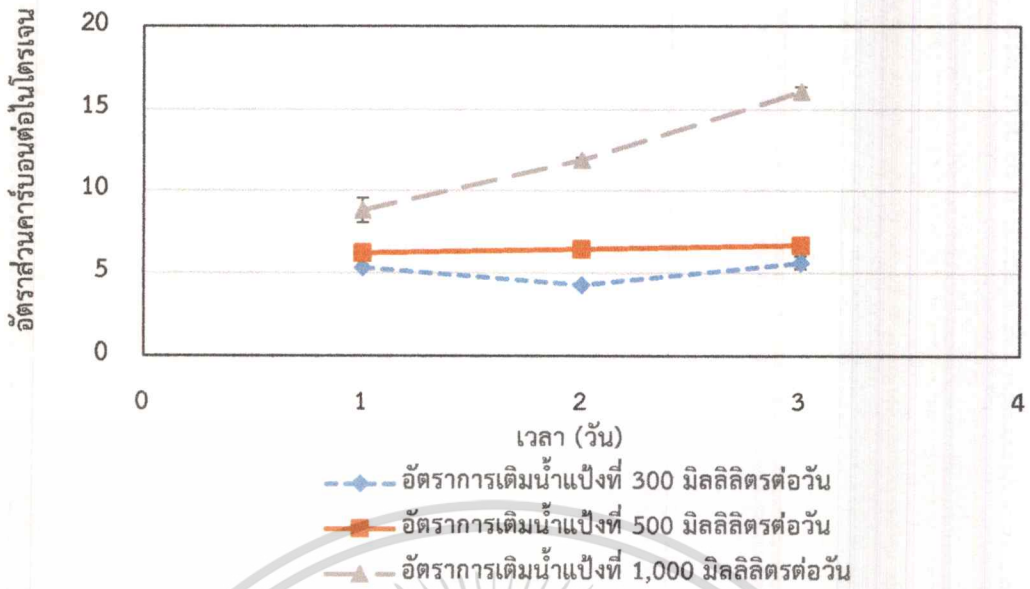


รูปที่ 4.9 ค่าความต้องการออกซิเจนของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

4.3.9 ผลการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในถังหมักก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 5.10 ± 0.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 6.46 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่าอยู่ในช่วง 12.25 ± 3.64 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.9 ภาคผนวก ข)

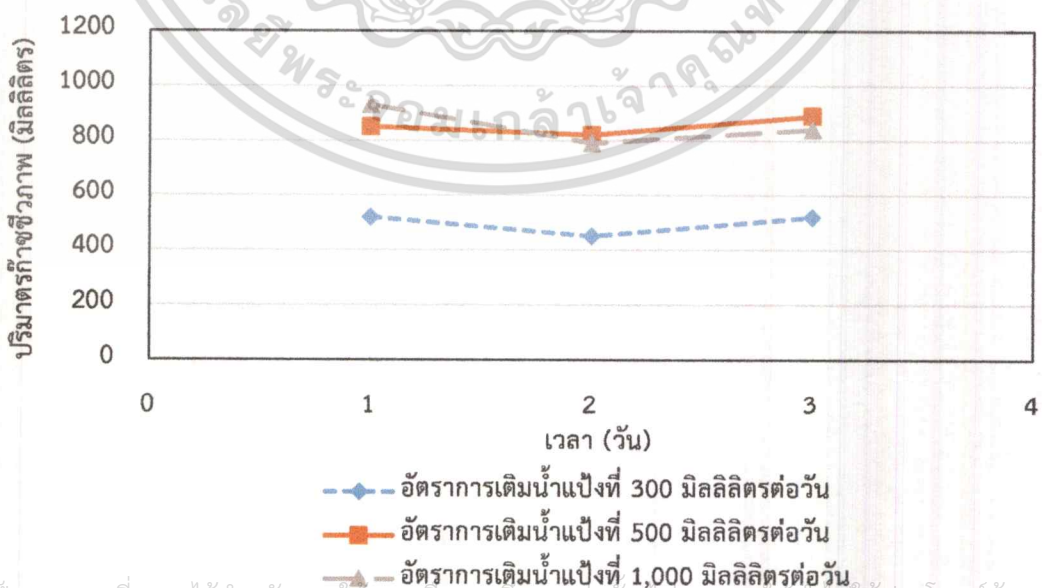
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ค่าอัตราส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

4.4 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำแ่งมันสำปะหลัง

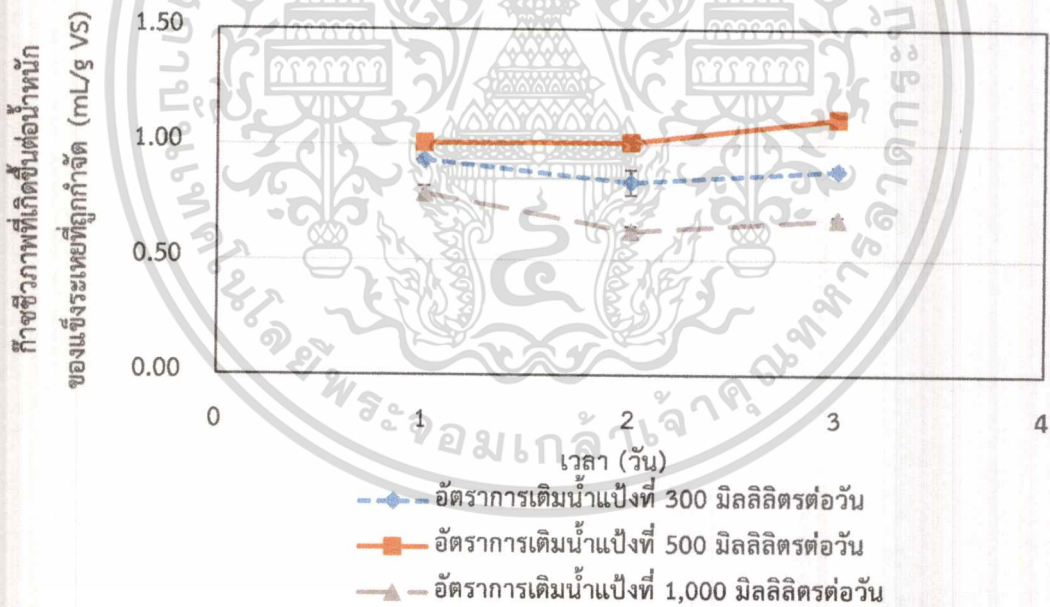
จากผลการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ที่อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 496.67 ± 40.41 มิลลิลิตรต่อวัน ที่อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 853.33 ± 35.12 มิลลิลิตรต่อวัน ที่อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 853.33 ± 70.95 มิลลิลิตรต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.10 ภาคผนวก ข) จากผลการทดลอง พบว่าที่อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน เป็นอัตราการเติมน้ำแ่งที่เหมาะสม



รูปที่ 4.11 ค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักก๊าซชีวภาพ

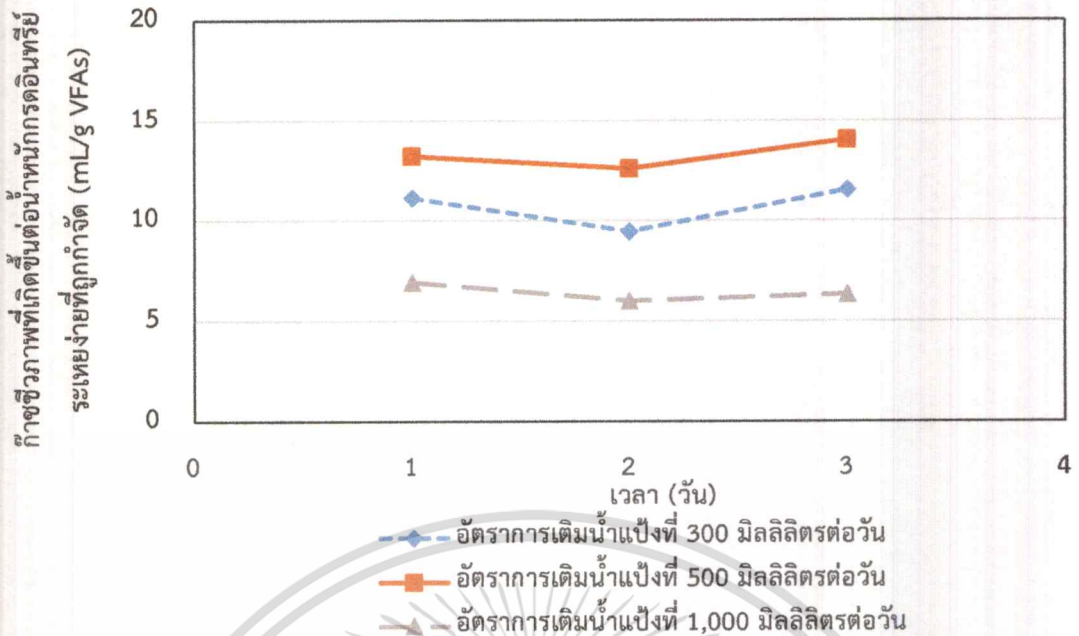
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงผลการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่าย และกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300, 500, 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.88 ± 0.05 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.04 ± 0.06 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย และที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.70 ± 0.08 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.11 ภาคผนวก ข) และ รูปที่ 4.13 แสดงค่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 10.73 ± 1.10 มิลลิลิตรต่อกรัมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 13.31 ± 0.72 มิลลิลิตรต่อกรัมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ที่อัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 6.42 ± 0.47 มิลลิลิตรต่อกรัมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4.12 ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.12 ค่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

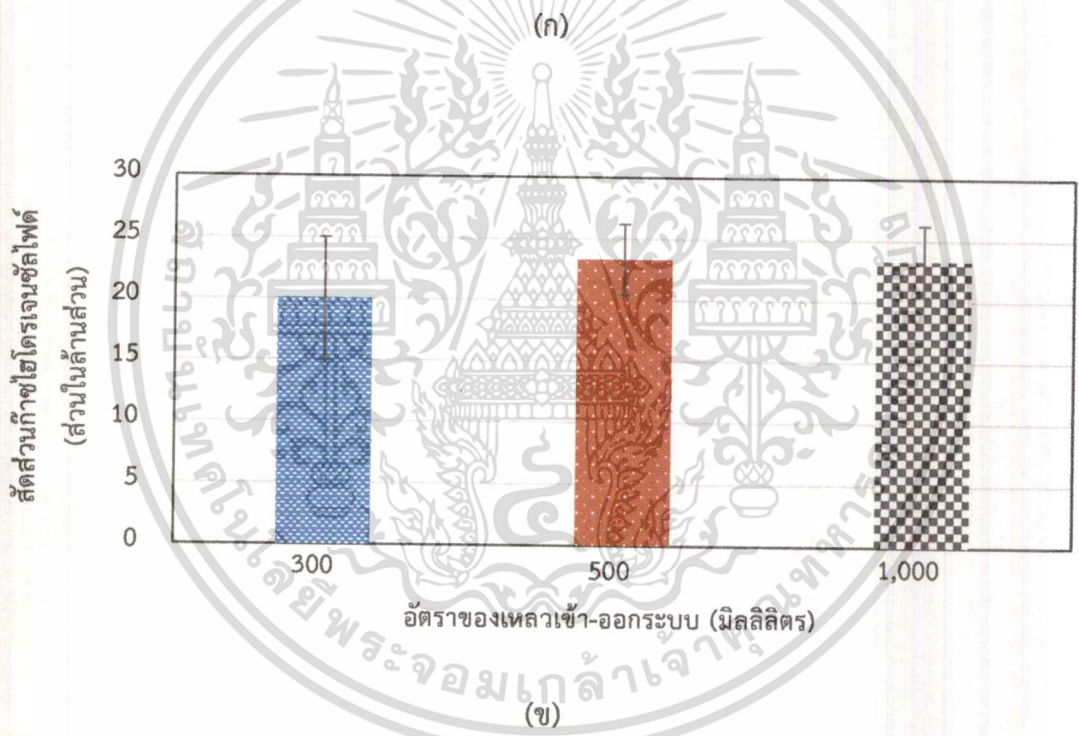
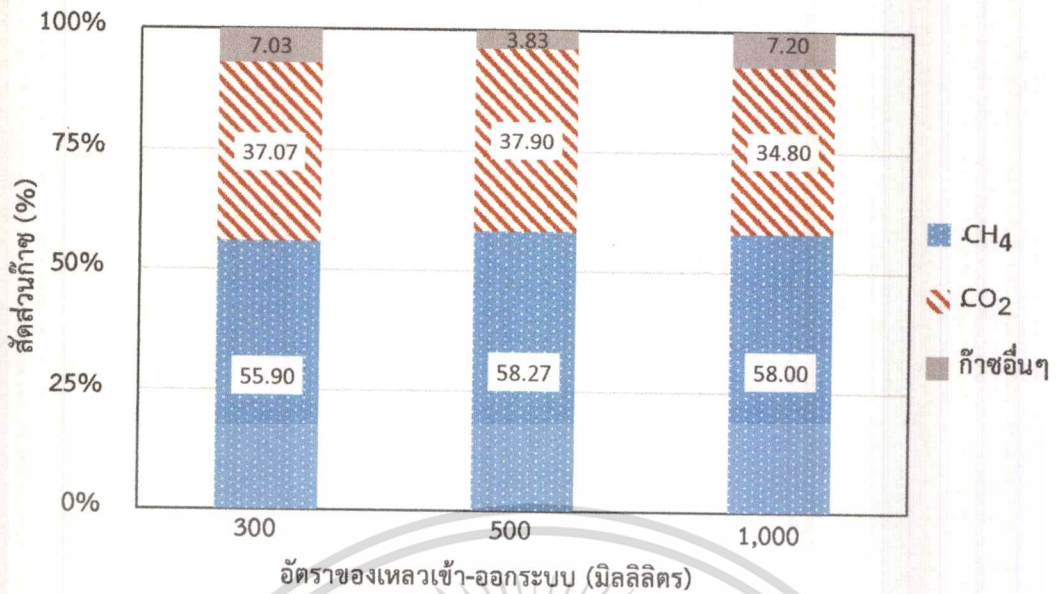


รูปที่ 4.13 ค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อหน้าหนักของกรตอินทรีย์ระยะเหยง่ายที่ถูกกำจัด ในถังหมักก๊าซชีวภาพ

4.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

จากผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Data Meter พบว่าที่อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ 300 มิลลิลิตรต่อวัน จะได้ค่ามีเทน (CH_4) อยู่ในช่วง 51.20-59.80 เปอร์เซ็นต์ ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อยู่ในช่วง 31.40-41.20 เปอร์เซ็นต์ ค่าออกซิเจน (O_2) อยู่ในช่วง 0.40-1.50 เปอร์เซ็นต์ และค่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) อยู่ในช่วง 15-25 ส่วนในล้านส่วน ที่อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน จะได้ค่ามีเทน (CH_4) อยู่ในช่วง 58.70-60.50 เปอร์เซ็นต์ ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อยู่ในช่วง 35.60-40.8 เปอร์เซ็นต์ ค่าออกซิเจน (O_2) อยู่ในช่วง 1.10-2.10 เปอร์เซ็นต์ และค่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) อยู่ในช่วง 20-25 ส่วนในล้านส่วน และที่อัตราการเติมน้ำแ่งมันสำปะหลังที่ 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน จะได้ค่ามีเทน (CH_4) อยู่ในช่วง 56.4-59.1 เปอร์เซ็นต์ ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อยู่ในช่วง 30.90-37.60 เปอร์เซ็นต์ ค่าออกซิเจน (O_2) อยู่ในช่วง 0.40-1.50 เปอร์เซ็นต์ และค่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) อยู่ในช่วง 20-25 ส่วนในล้านส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-5 ภาคผนวก ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพภายในระบบ (ก) ก๊าซมีเทน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ (ข) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยวิธีการหมักในสภาวะไร้อากาศแบบ ขั้นตอนเดียว โดยใช้ถังหมักก๊าซชีวภาพ (ขวดดูเรน) ปริมาตร 5 ลิตร มีการกวนผสม 8 ชั่วโมงต่อวัน เก็บก๊าซชีวภาพโดยวิธีการแทนที่ก๊าซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2% การทดลองใช้น้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่หนึ่ง การปรับสภาพน้ำแ่่งมันสำปะหลังโดยใช้ความร้อนโดยแปรค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนกับน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ อุณหภูมิห้อง (30 ± 1), 60, 80 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของน้ำแ่่งมันสำปะหลังในการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ อุณหภูมิห้อง (30 ± 1) องศาเซลเซียส โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 41.50 ± 1.50 และตอนที่สอง การแปรค่าอัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 300, 500, 1,000 มิลลิลิตรต่อวัน พบว่าอัตราการเติมน้ำแ่่งมันสำปะหลังที่ 500 มิลลิลิตรต่อวัน เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการหมักก๊าซชีวภาพ มีค่าพีเอช 6.65 ± 0.10 ค่าสภาพความเป็นด่างมีค่า 601.33 ± 6.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่า 889.63 ± 6.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายมีค่า 243.70 ± 22.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่า 204.33 ± 24.97 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายมีค่า 89.28 ± 9.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่า 6.67 ± 9.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีมีค่า 308.00 ± 49.76 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตรและค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่า 6.46 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 853.33 ± 35.12 มิลลิลิตรต่อวัน มีค่ามีเทน (CH_4) 58.70-60.50 เปอร์เซ็นต์ ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 35.60-40.8 เปอร์เซ็นต์ และค่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) 20-25 ส่วนในล้านส่วน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการหมักก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน
2. แปรค่าความเข้มข้นของน้ำแ่่งมันสำปะหลัง
3. ศึกษาการลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. คู่มือปฏิบัติงานการผลิตและใช้ก๊าซชีวภาพอย่างปลอดภัยสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชน. กระทรวงพลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน. 2557. คู่มือความปลอดภัยในการผลิตและการใช้พลังงานก๊าซชีวภาพ. กระทรวงพลังงาน.

กลุ่มอนุรักษ์ดินและน้ำ. 2552. มั่นสำปะหลัง. เอกสารวิชาการ. สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน.

จันจิรา แผลดชัยภูมิ, ณัฐชยา ป้อมเสน และ ณัฐวดี ต่วนเทศ. 2560. การศึกษาอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ธนากร รติธรรมธร. 2559. ผลของการให้ความร้อนและทำให้เย็นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการย่อยของแป้ง. บทความวิชาการ. คณะพยาบาลศาสตร์ วิทยาลัยนานาชาติ เซนต์เทเรซา.

ปรารธนา ปรารธนาดี, จิรัชัย พุทธิกุลสมศิริ, เจริญชัย โขมพัตราภรณ์ และ ชุมพล มณฑาทิพย์กุล. 2552. การจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังในประเทศไทย. โครงการวิจัยของสำนักงานและคณะกรรมการอุดมศึกษา.

พงษ์พันธ์ พรหมพิพัตต์ และ ธนากร วงวัฒนาเสถียร. 2554. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง. งานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

มันลิน ตันซุลเวศม์. 2548. โครงการอบรมเรื่องการดูแลระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล. เอกสารการอบรม. กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.

สมยศ เนตรสงคราม, อาคม แก้วระวัง และ รัชพล สันติวารกร. 2557. ผลของอัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุรลักษณ์ รอดทอง และ สิรินทรเทพ เต่าประยูร. 2557. มีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน. รายงานการวิจัย. สาขาวิชาจุลชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2547. พลังงานฟอสซิล. เอกสารความรู้ประกอบหลักสูตรการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม. กระทรวงพลังงาน.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และอาหารแห่งชาติ. 2561. มาตรฐานสินค้าเกษตรกากมันสำปะหลัง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และ การใช้ก๊าซชีวภาพ(Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

อุษา ยิ่งชล, นิตยา บุญเทียน, ฉัตรลดา เพี้ยซ้าย และ Htay Aung Pyae. 2561. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากแป้งมันสำปะหลัง. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

American Public Health Association. 1999. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 18th edition. American Public Health Association, Washington, D.C., U.S.A.

Breure, A.M. and Andel, J.G. 1987. **Bioenvironmental Systems.** CRC Press. Cambridge Scientific. Florida. p. 97.

Metcalf & Eddy. 2003. **Wastewater engineering: treatment and reuse.** 4th ed. New York: McGraw-Hill, USA., p.1456.

Song, Z., Yang, G., Liu, X., Yan, Z., Yuan, Y. and Liao, Y. 2014. **Comparison of Seven Chemical Pretreatments of Corn Straw for Improving Methane Yield by Anaerobic Digestion.** (Vol. 9).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

ก-1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 2) ปีกเกอร์

วิธีการวิเคราะห์

- 1) ทำความสะอาดหัวอิเล็กโทรดก่อนทำการวัดค่าพีเอช โดยใช้น้ำบริสุทธิ์ฉีดล้างให้ทั่ว ซับให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู
- 2) เปิดเครื่องทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที
- 3) การปรับเทียบค่าพีเอช โดยใช้บัฟเฟอร์ pH 7 และ pH 4
- 4) วัดค่าพีเอชของตัวอย่าง โดยจุ่มหัวอิเล็กโทรดลงในปีกเกอร์ตัวอย่าง รอจนกว่าค่าพีเอชนิ่งแล้วจึงอ่านค่า
- 5) ทำความสะอาดหัวอิเล็กโทรดทุกครั้งหลังจากการวัดค่าพีเอช โดยใช้น้ำบริสุทธิ์ฉีดล้างให้ทั่ว ซับให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู

ก-2 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 2) เครื่องกวนแม่เหล็ก
- 3) ปีกเกอร์
- 4) บิวเรตขนาด 50mL พร้อมชุดไทเทรต
- 5) กระดาษกรอง GF/C (Glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 cm.
- 6) ชุดกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- 7) เครื่องกรองลดความดัน (Water aspirator) พร้อมขวดซัคชั่น ขนาด 500–1,000 mL

สารเคมี

- 1) สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 0.05 N

วิธีการวิเคราะห์

- 1) นำตัวอย่างน้ำมากรองลดความดัน

- 2) ตวงตัวอย่างน้ำ 50 mL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) นำไปไทเทรตด้วยกรดซัลฟิวริก 0.05 N พร้อมทั้งบันทึกเวลา จนค่า pH เท่ากับ 4 จดบันทึกปริมาตร
- 4) ไทเทรตต่อจนมีค่า pH 3.3-3.5

วิธีการคำนวณ

$$\text{สภาพต่าง (mg/L as CaCO}_3\text{)} = \frac{A \times N \times 50,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)}}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } A &= \text{ ปริมาตรของซัลฟิวริกที่ใช้ (mL)} \\ N &= \text{ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก} \end{aligned}$$

ก-3 ความชื้น (Moisture)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 2) ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105°C
- 3) โถทำแห้ง (Desiccators)
- 4) ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

วิธีการวิเคราะห์

- 1) ชั่งตัวอย่าง 10g ใส่ลงในถ้วยระเหย บันทึกน้ำหนัก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105°C จนน้ำหนักคงที่
- 2) นำตัวอย่างที่อบแล้วใส่โถทำแห้ง ทิ้งให้เย็นแล้วนำมาชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ

วิธีการคำนวณ

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

ก-4 ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)

ของแข็งทั้งหมด (TS) หมายถึง ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากตัวอย่างหมดแล้วและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105°C จนน้ำหนักคงที่ปล่อยให้เย็นลงในโถทำแห้ง (Desiccators) แล้วชั่งน้ำหนัก

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง

- 2) ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105°C

- 3) โถทำแห้ง (Desiccators)

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 02-262-2000 หรือ 02-262-2001

- 4) ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)
- 5) เครื่องอังน้ำ (Water bath)

วิธีการวิเคราะห์

- 1) นำถ้วยระเหยไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยทิ้งให้เย็นในโถทำแห้งแล้วชั่งน้ำหนัก (บันทึกเป็น A) และนำไปเก็บไว้ที่โถทำแห้งจนกว่าจะนำมาใช้งาน
- 2) เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำให้เหมาะสม
- 3) นำไปตั้งบนเครื่องอังน้ำจนแห้ง แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
- 4) นำถ้วยระเหยใส่ในโถทำแห้ง ปล่อยให้เย็นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก (บันทึกเป็น B)
- 5) ทำซ้ำจนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่

วิธีการคำนวณ

$$\text{ของแข็งทั้งหมด (mg/L)} = \frac{(B - A)g \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

ก-5 ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids, VS)

ของแข็งระเหยง่าย คือ ของแข็งที่ระเหยได้เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550±50°C เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 2) เตาเผา (Muffle furnace) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 550±50°C
- 3) โถทำแห้ง (Desiccators)
- 4) ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

วิธีการวิเคราะห์

- 1) นำถ้วยระเหยที่ได้จากการหาของแข็งทั้งหมด (TS) ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550±50°C จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที)
- 2) ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งน้ำหนัก (บันทึกเป็น C)

วิธีการคำนวณ

$$\text{ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)} = \frac{(B - C)g \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-6ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids, TSS)

ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) หมายถึงส่วนของของแข็งที่เหลือค้ำบนกระดาษกรองใยแก้วหลังจากการกรองตัวอย่าง

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 2) ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103–105°C
- 3) โถทำแห้ง (Desiccators)
- 4) ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)
- 5) เครื่องอ่างไอน้ำ (Water bath)
- 6) กระดาษกรอง GF/C (Glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 cm.
- 7) ชุดกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- 8) เครื่องกรองลดความดัน (Water aspirator) พร้อมขวดซักชั้น ขนาด 500–1,000 mL

วิธีการวิเคราะห์

- 1) นำกระดาษกรองไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้งแล้วชั่งน้ำหนัก (บันทึกเป็น A)
- 2) วางกระดาษกรองลงในกรวยบุชเนอร์ที่ต่อเข้ากับเครื่องกรองแบบลดความดัน
- 3) กรองตัวอย่างน้ำจนน้ำแห้ง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น
- 4) นำกระดาษกรองไปอบแห้งที่ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้งแล้วชั่งน้ำหนัก (บันทึกเป็น B)

วิธีการคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/L)} = \frac{(B - A)g \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

ก-7ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (Volatile Suspended Solids, VSS)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 2) เตาเผา (Muffle furnace) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 550±50°C
- 3) โถทำแห้ง (Desiccators)
- 4) กระดาษกรอง GF/C (Glass fiber filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 cm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการวิเคราะห์

- 1) นำกระดาษกรองที่ได้จากการหาของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$ จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที)
- 2) ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งหาน้ำหนัก (บันทึกเป็น C)

วิธีการคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (mg/L)} = \frac{(B - C)g \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

ก-8 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFAs)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 2) เครื่องกวนแม่เหล็ก
- 3) ปีกเกอร์
- 4) บิวเรตขนาด 50mL พร้อมชุดไทเทรต
- 5) เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)

สารเคมี

- 1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.05 N

วิธีการวิเคราะห์

- 1) นำของเหลวจากการวิเคราะห์หาสภาพความเป็นด่างไปต้มเพื่อไล่กรดคาร์บอนิก ต้มจนเดือด แล้วจับเวลาต่ออีกประมาณ 3 นาที
- 2) ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 3) นำของเหลวที่ได้ไปไทเทรตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 N พร้อมทั้งบันทึกเวลาจนค่า pH เท่ากับ 7 จดบันทึกปริมาตร

วิธีการคำนวณ

$$\text{กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (mg/L)} = \frac{A \times N \times 50,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)}}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (mL)

N = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-9ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand, COD) โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux, Titrimetric Method)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ขนาด 16×100 mm
- 2) ฮีทติ้งบล็อก (Heating block) ก่ออลูมิเนียมตัน ลึก 45-50 mm หรือ
- 3) ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ $150\pm 2^{\circ}\text{C}$
- 4) ถังมือกันกรด
- 5) ปิเปต ขนาด 2, 5 และ 10 mL
- 6) บิวเรต ขนาด 25 mL
- 7) ปีกเกอร์
- 8) ขวดรูปชมพู่ ขนาด 25 mL

สารเคมี

- 1) สารละลาย (Digestion reagent): สารละลาย $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 4.913 g ที่ผ่านการอบแห้งที่ 130°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ละลายในน้ำกลั่น 500 mL ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 mL และเติม HgSO_4 ลงไป 33.3 g คนให้ละลายตั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 L
- 2) กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ผสม AgSO_4 (Sulfuric acid reagent): AgSO_4 22 g ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น น้ำหนัก 4.1 kg (2.5 L) แล้วตั้งทิ้งไว้ 1-2 วันเพื่อให้ละลาย
- 3) สารละลายมาตรฐาน (Ferrous acid reagent: FAS) 0.1 N: ละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{FeSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 39 g ในน้ำกลั่นแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป 20 mL ทำให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนปริมาตร 1 L สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลาย Digestion reagent ดังนี้ เติมน้ำกลั่น 10 mL สารละลาย Digestion reagent 14 mL ทิ้งให้เย็นแล้วเติมเฟอโรอิน อินดิเคเตอร์ 1-2 หยด นำมาไทเทรตกับสารละลาย FAS จุดยุติจะได้เป็นสารละลายสีน้ำตาลแดง
- 4) สารละลายเฟอโรอิน อินดิเคเตอร์: ละลาย 1-10 Phenantroline monohydrate 1.485 g และ $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 695 mL ในน้ำกลั่นแล้วเติมน้ำกลั่นจนปริมาตรครบ 100 mL

วิธีการวิเคราะห์

- 1) ล้างหลอดแก้วและฝาด้วยกรดซัลฟิวริก 20% ก่อนใช้งานทุกครั้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อน
- 2) เลือกใช้ปริมาตรของน้ำตัวอย่างและสารเคมีที่เหมาะสม
- 3) ปิเปตตัวอย่างน้ำมา 2.5 mL

4) เติมสารละลาย Digestion reagent 1.5 mL เขย่าให้เข้ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ผสม AgSO_4 จำนวน 3.5 mL ให้ไหลลงตามข้างหลอด
- 6) ปิดฝาหลอดให้สนิท ค่อยๆ เขย่าเพื่อให้สารผสมเข้ากันดี
- 7) นำหลอดใส่สีที่ตั้งบดหรือตุ๋นที่ $150 \pm 2^\circ\text{C}$ แล้วต้มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 8) ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 9) นำสารละลายที่ได้เทใส่ขวดรูปชมพู่โดยหยดเฟอโรอิน อินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วนำไปไทเทรตด้วย FAS
- 10) เมื่อถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นสีน้ำตาลแดง

วิธีการคำนวณ

$$\text{ซีโอดี (mgO}_2\text{/L)} = \frac{(A-B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

- เมื่อ
- A = ปริมาณของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลงค์ (mL)
 - B = ปริมาณของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างน้ำ (mL)
 - N = ความเข้มข้นของ FAS (N)

ก-10 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ชุดเครื่องย่อยสลาย (Digestion apparatus)
- 2) ชุดเครื่องกลั่นหาแอมโมเนีย
- 3) กระจกบอควาง
- 4) ปิเปต ขนาด 5, 10 mL
- 5) บิวเรต ขนาด 25 mL
- 6) ปีกเกอร์
- 7) ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 mL

สารเคมี

- 1) น้ำกลั่นที่ปราศจากแอมโมเนีย (Ammonia)
- 2) สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)
 - ละลายเมธิลเรด 200 mg ในเอซิลแอลกอฮอล์ 95% หรือในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 100 mL และ ละลายเมธิลีนบลู 100 mg ในเอซิลแอลกอฮอล์ 95% หรือในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 50 mL นำสารละลายทั้งสองชนิดมาผสมกัน

3) สารละลายกรดบอริก (Boric acid solution)

- ละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 20 g ในน้ำกลั่น เจือจางให้เป็น 1 L

4) สารละลายย่อยสลาย (Digestion reagent)

- ชั่ง K_2SO_4 134 g และ $CuSO_4$ 7.3 g นำมาผสมกัน เติมน้ำกลั่น 800 mL คนให้ทั่วจนสารละลายหมด จากนั้นค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 134 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 L (ควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$)

4) สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.02 N

วิธีการวิเคราะห์

- 1) ตวงตัวอย่างน้ำ 50 mL ใส่หลอดย่อย
- 2) เติมสารละลายย่อยสลาย (Digestion reagent) 50 mL เขย่าให้เข้ากัน
- 3) นำไปต้มบนเตาของชุดเครื่องย่อย ย่อยจนกระทั่งมีควันสีขาวขึ้นและสารละลายเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเขียวใส
- 4) ทิ้งสารละลายให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 5) นำหลอดย่อยไปกลั่นที่เครื่องกลั่น (Distillation) โดยปลายของสายยางที่มีของเหลวออกมาให้นำขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL (ซึ่งมีสารละลายบอริก 50 mL และอินดิเคเตอร์ผสม 1-2 หยด) ไปรองรับของเหลวที่กลั่นออกมา
- 6) นำของเหลวที่ได้จากการกลั่นมาไทเทรตด้วยกรดซัลฟิวริก 0.02 N
- 7) เมื่อถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงอ่อน

วิธีการคำนวณ

$$\text{ทีเคเอ็น (mgN/L)} = \frac{(A-B) \times 280}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } A &= \text{ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ (mL)} \\ B &= \text{ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับแบลงค์ (mL)} \end{aligned}$$

ก-11 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตและปริมาณแป้ง โดยวิธีฟีนอล-ซัลฟิวริกแอซิด (Phenol-Sulfuric acid)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) หลอดทดลอง
- 2) เครื่องอ่างน้ำ (Water bath)
- 3) กระบอกตวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด 5) กระดาษชั่งน้ำหนักให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) กรวยกรอง
- 7) Spectrophotometer

สารเคมี

- 1) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc.H₂SO₄)
- 2) ฟีนอล (C₆H₆O)
- 3) กลูโคส (C₆H₁₂O₆)

วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์โบไฮเดรต

- 1) ชั่งตัวอย่าง 0.50 g ผสมน้ำกลั่น 10 mL
- 2) เติมสารละลายฟีนอล 1 mL และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 mL ในหลอดทดลอง เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที
- 3) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 nm
- 4) นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคส

การวิเคราะห์หาปริมาณแป้ง

- 1) ชั่งตัวอย่าง 0.50 g ผสมน้ำกลั่น 10 mL
- 2) นำสารละลายไปต้มประมาณ 15 นาที กรองน้ำส่วนใสไปทำการวิเคราะห์
- 3) เติมสารละลายฟีนอล 1 mL และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 mL ในหลอดทดลอง เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 nm
- 4) นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานสารละลายกลูโคส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

ข-1 คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง

คุณลักษณะของกากมัน สำปะหลัง	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ความชื้น (Moisture content) (%)	84.13	84.19	84.07	84.13	0.06
ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (Total carbohydrate) (g/L)	179.98	185.85	154.32	173.38	16.77
ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch) (g/L)	87.77	81.53	83.39	84.23	3.20
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	40.92	39.96	40.85	40.58	0.54

ข-2 คุณลักษณะของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (Feed)

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	3.48	3.48	3.47	3.48	0.01
ของแข็งทั้งหมด (Total solids) (mg/L)	1,500.00	1,341.00	1,510.00	1,450.33	94.82
ของแข็งที่แขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids) (mg/L)	1,423.33	1,260.00	1,370.00	1,351.11	83.29

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) (mg/L)	1,496.33	1,335.00	1,502.33	1,444.55	94.93
ของแข็งแขวนลอยที่ระเหยได้ (Volatile Suspended Solids) (mg/L)	643.33	666.66	710.00	673.33	33.83
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) (mg/L as CH ₃ COOH)	70.00	72.50	70.00	70.83	1.44
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl nitrogen) (mg/L)	23.52	23.52	23.52	23.52	0.00
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand) (mg/L)	1,600.00	1,600.00	1,600.00	1,600.00	0.00
อัตราส่วนคาร์บอน ต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	22.86	22.07	22.86	22.59	0.46

ข-3 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ ข-3 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาท)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ห้อง (30±1)	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	3.00	2.00	0.00	1.67	1.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ห้อง (30±1)	15	6.00	4.00	0.00	3.33	3.06
	20	7.50	6.00	2.00	5.17	2.84
	25	9.00	8.00	3.00	6.67	3.21
	30	11.00	9.50	5.50	8.67	2.84
	35	12.00	11.00	6.50	9.83	2.93
	40	13.00	12.00	7.50	10.83	2.93
	45	14.50	13.00	8.50	12.00	3.12
	50	15.50	14.00	9.50	13.00	3.12
	55	16.50	15.00	10.50	14.00	3.12
	60	17.50	16.00	11.50	15.00	3.12
	65	18.50	17.50	12.50	16.17	3.21
	70	19.00	18.50	13.50	17.00	3.04
	75	20.00	19.50	14.50	18.00	3.04
	80	21.00	20.50	16.00	19.17	2.75
	85	22.00	21.00	18.00	20.33	2.08
	90	23.00	22.00	19.00	21.33	2.08
	95	23.50	23.00	20.00	22.17	1.89
	100	24.00	23.50	21.00	22.83	1.61
	105	25.00	24.00	22.00	23.67	1.53
	110	26.00	25.00	23.50	24.83	1.26
115	27.00	25.50	24.50	25.67	1.26	
120	28.00	26.00	25.50	26.50	1.32	
125	29.50	26.50	26.00	27.33	1.89	
130	30.50	28.50	26.50	28.50	2.00	
135	32.00	29.50	27.00	29.50	2.50	
140	33.00	30.00	27.50	30.17	2.75	
145	33.50	30.50	28.00	30.67	2.75	
150	36.00	31.50	29.00	32.17	3.55	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก 5 ปี จะมีให้ตั้งเงื่อนไขบางอย่างของเอกสารนี้ครั้งที่มีค่าไป

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ห้อง (30±1)	155	37.00	32.50	30.00	33.17	3.55
	160	38.00	33.50	31.00	34.17	3.55
	165	38.50	34.00	32.00	34.83	3.33
	170	39.00	35.00	33.00	35.67	3.06
	175	39.50	36.00	34.00	36.50	2.78
	180	40.50	37.00	35.00	37.50	2.78
	185	41.50	38.00	36.00	38.50	2.78
	190	42.00	39.00	37.00	39.33	2.52
	195	43.00	40.00	38.00	40.33	2.52
	200	43.00	40.00	39.50	40.83	1.89
	205	43.00	40.00	40.00	41.00	1.73
	210	43.00	40.00	40.50	41.17	1.61
	215	43.00	40.00	41.00	41.33	1.53
	220	43.00	40.00	41.50	41.50	1.50
	225	43.00	40.00	41.50	41.50	1.50
	230	43.00	40.00	41.50	41.50	1.50
	235	43.00	40.00	41.50	41.50	1.50
240	43.00	40.00	41.50	41.50	1.50	
60	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	1.00	0.00	2.00	1.00	1.00
	10	4.50	2.00	5.50	4.00	1.80
	15	7.00	5.50	7.50	6.67	1.04
	20	8.00	7.50	9.50	8.33	1.04
	25	9.50	9.00	10.50	9.67	0.76
	30	11.00	11.00	11.50	11.17	0.29
	35	12.00	12.00	12.50	12.17	0.29
	40	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
	45	13.00	14.50	13.50	13.67	0.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับกองทัพอากาศเท่านั้น การเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย
 ไม่ทำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกห้ามมิให้ตัดเนื้อหาบางส่วนออกโดยไม่แจ้งให้ทราบก่อน

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
60	50	14.00	15.00	14.00	14.33	0.58
	55	14.00	15.50	14.50	14.67	0.76
	60	15.50	16.00	15.00	15.50	0.50
	65	16.00	16.50	15.50	16.00	0.50
	70	17.00	17.00	16.00	16.67	0.58
	75	18.00	17.50	16.50	17.33	0.76
	80	19.00	18.00	17.00	18.00	1.00
	85	19.50	19.00	17.50	18.67	1.04
	90	20.50	20.00	18.00	19.50	1.32
	95	21.00	21.00	18.50	20.17	1.44
	100	22.00	21.50	19.00	20.83	1.61
	105	22.50	22.00	20.00	21.50	1.32
	110	24.00	22.50	21.00	22.50	1.50
	115	24.50	23.00	22.00	23.17	1.26
	120	26.00	23.50	23.00	24.17	1.61
	125	27.00	24.00	24.00	25.00	1.73
	130	28.00	24.50	25.00	25.83	1.89
	135	29.00	25.00	25.50	26.50	2.18
	140	30.00	25.50	26.00	27.17	2.47
	145	31.00	26.00	26.50	27.83	2.75
150	32.00	26.50	27.00	28.50	3.04	
155	33.00	27.00	27.50	29.17	3.33	
160	34.00	27.50	28.00	29.83	3.62	
165	35.00	28.00	28.50	30.50	3.91	
170	36.00	28.50	28.50	31.00	4.33	
175	37.00	29.00	28.50	31.50	4.77	
180	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35	
185	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งสำหรับคณาจารย์ที่สอนในรายวิชานี้เท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งสำหรับคณาจารย์ที่สอนในรายวิชานี้เท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
60	190	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
	195	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
	200	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
	205	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
	210	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
	215	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
	220	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
	225	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
	230	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
	235	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
	240	38.00	29.00	28.50	31.83	5.35
80	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับยกย่องเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
80	85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	105	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	110	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	115	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	130	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	135	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	140	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	145	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	155	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	160	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	165	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	170	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	175	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	185	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	190	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
195	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
205	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
210	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
215	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
220	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้ประโยชน์ในการค้า
 ไม่ทำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อี 220 ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาหรือข้อมูลของเอกสารใดๆ ที่มีลิขสิทธิ์ไปใช้

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
80	225	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	230	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	235	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	240	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ข-4 ผลการศึกษาสภาวะของเหลวภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ

1) ผลการศึกษาความเป็นกรด-ด่าง

ตารางที่ ข-4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์ ครั้งที่	ปริมาณของเหลว ที่ออกจากระบบ (mL)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	6.46	6.42	6.49	6.46	0.04
2		6.44	6.56	6.59	6.53	0.08
3		6.63	6.55	6.65	6.61	0.05
4	500	6.69	6.73	6.74	6.72	0.03
5		6.53	6.53	6.55	6.54	0.01
6		6.73	6.65	6.68	6.69	0.04
7	1,000	6.56	6.62	6.64	6.61	0.04
8		6.66	6.52	6.70	6.63	0.09
9		6.60	6.54	6.56	6.57	0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ผลการศึกษาสภาพความเป็นต่าง

ตารางที่ ข-4.2 ค่าสภาพความเป็นต่างของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์ ครั้งที่	ปริมาณ ของเหลวที่ออก จากระบบ (mL)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	300.00	305.00	310.00	305.00	5.00
2		330.00	335.00	330.00	331.67	2.89
3		365.00	375.00	370.00	370.00	5.00
4	500	680.00	680.00	682.00	680.67	1.15
5		580.00	582.50	582.50	581.67	1.44
6		535.00	550.00	540.00	541.67	7.64
7	1,000	360.00	360.00	350.00	356.67	5.77
8		395.00	385.00	385.00	388.33	5.77
9		395.00	395.00	395.00	395.00	0.00

3) ผลการศึกษาของแข็งทั้งหมด

ตารางที่ ข-4.3 ค่าของแข็งทั้งหมดของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์ ครั้งที่	ปริมาณ ของเหลวที่ออก จากระบบ (mL)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	853.33	843.33	848.33	848.33	5.00
2		873.33	833.33	848.33	851.66	20.21
3		923.33	860	873.33	885.55	33.39
4	500	893.33	896.66	900	896.66	3.34
5		886.66	876.66	893.33	885.55	8.39
6		873.33	903.33	883.33	886.66	15.28
7	1,000	933.33	1053.33	953.33	980.00	64.29
8		920	906.66	983.33	936.66	40.96
9		950	973.33	998.33	973.89	24.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ผลการศึกษาของแข็งระเหยง่าย

ตารางที่ ข-4.4 ค่าของแข็งระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์ ครั้งที่	ปริมาณ ของเหลวที่ออก จากระบบ (mL)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	270.00	256.66	263.33	263.33	6.67
2		256.66	320.00	266.33	281.00	34.12
3		226.66	246.66	233.33	235.55	10.18
4	500	223.33	236.66	196.66	218.88	20.37
5		240.00	276.66	230.00	248.89	24.57
6		270.00	256.66	263.33	263.33	6.67
7	1,000	443.33	500.00	403.33	448.89	48.57
8		330.00	356.66	410.00	365.55	40.73
9		365.55	405.55	395.33	388.81	20.78

5) ผลการศึกษาของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

ตารางที่ ข-4.5 ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์ ครั้งที่	ปริมาณ ของเหลวที่ออก จากระบบ (mL)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	203.33	193.33	170.00	188.89	17.10
2		176.66	110.00	160.00	148.89	34.69
3		160.66	123.33	113.33	132.44	24.95
4	500	183.33	210.00	216.00	203.11	17.39
5		176.66	160.00	203.33	180.00	21.86
6		226.66	246.66	216.33	229.88	15.42
7	1,000	376.67	360.00	366.67	367.78	8.39
8		350.00	336.66	316.66	334.44	16.78
9		316.33	330.66	380.33	342.44	33.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ผลการศึกษาของแข็งแวนลอยระเหยง่าย

ตารางที่ ข-4.6 ค่าของแข็งแวนลอยระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์ ครั้งที่	ปริมาณ ของเหลวที่ออก จากระบบ (mL)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	76.66	73.33	50.00	66.66	14.53
2		73.33	80.00	83.33	78.89	5.09
3		79.66	88.33	91.33	86.44	6.06
4	500	93.33	106.66	99.99	99.99	6.67
5		76.66	80.00	98.33	85.00	11.67
6		86.33	65.55	96.66	82.85	15.84
7	1,000	183.33	200.00	203.33	195.55	10.72
8		226.66	230.00	240.00	232.22	6.94
9		209.55	211.33	196.66	205.85	8.01

7) ผลการศึกษากรดอินทรีย์ระเหยง่าย

ตารางที่ ข-4.7 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์ ครั้งที่	ปริมาณของเหลว ที่ออกจากระบบ (mL)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	17.50	17.50	20.00	18.33	1.44
2		17.50	17.50	17.50	17.50	0.00
3		20.00	20.00	20.00	20.00	0.00
4	500	5.00	7.50	7.50	6.67	1.44
5		5.00	7.50	5.00	5.83	1.44
6		7.50	7.50	7.50	7.50	0.00
7	1,000	10.00	12.50	10.00	10.83	1.44
8		12.50	12.50	15.00	13.33	1.44
9		12.50	12.50	12.50	12.50	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) ผลการศึกษาความต้องการออกซิเจนทางเคมี

ตารางที่ ข-4.8 ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์ ครั้งที่	ปริมาณ ของเหลวที่ออก จากระบบ (mL)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	240.00	240.00	240.00	240.00	0.00
2		256.00	256.00	256.00	256.00	0.00
3		272.00	272.00	272.00	272.00	0.00
4	500	320.00	340.00	340.00	333.33	11.55
5		340.00	340.00	340.00	340.00	0.00
6		240.00	272.00	240.00	250.67	18.48
7	1,000	440.00	440.00	480.00	453.33	23.09
8		640.00	680.00	640.00	653.33	23.09
9		960.00	960.00	972.00	964.00	6.93

9) ผลการศึกษาไนโตรเจนทั้งหมด

ตารางที่ ข-4.9 ค่าไนโตรเจนทั้งหมดของของเหลวในถังหมักก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์ ครั้งที่	ปริมาณของเหลว ที่ออกจากระบบ (mL)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	44.80	44.80	44.80	44.80	0.00
2		59.36	60.48	59.36	59.73	0.65
3		49.28	44.80	50.96	48.35	3.20
4	500	57.12	59.36	58.24	58.24	1.1
5		59.28	60.24	59.28	59.60	0.55
6		57.12	58.24	58.24	57.87	0.65
7	1,000	53.84	50.96	49.84	51.55	2.1
8		35.84	36.24	34.72	35.60	0.79
9		33.60	32.48	33.60	33.23	0.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10) ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ ข-4.10 ค่าปริมาตรก๊าซชีวภาพ

ระยะเวลา (day)	ปริมาณน้ำแ่่งที่เข้า และออกจากระบบ (mL)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (mL/d)	ค่าเฉลี่ย (mL/d)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (mL/d)
1	300	520	496.67	40.41
2		450		
3		520		
4	500	850	853.33	35.12
5		820		
6		890		
7	1,000	930	853.33	70.95
8		790		
9		840		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4.11 ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราของเหลว เข้า-ออกระบบ (mL)	ปริมาตร ก๊าซชีวภาพ	VS removed			mL Biogas/g VS removed			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	520	551.66	565.00	558.33	0.94	0.92	0.93	0.93	0.01
2		450	565.00	501.66	555.33	0.80	0.90	0.81	0.83	0.05
3		520	595.00	575.00	588.33	0.87	0.90	0.88	0.89	0.02
4	500	850	840.00	826.67	866.67	1.01	1.03	0.98	1.01	0.02
5		820	823.33	786.67	833.33	1.00	1.04	0.98	1.01	0.03
6		890	793.33	806.67	800.00	1.12	1.10	1.11	1.11	0.01
7	1,000	930	1188.89	1132.22	1228.89	0.78	0.82	0.76	0.79	0.03
8		790	1302.22	1275.56	1222.22	0.61	0.62	0.65	0.62	0.02
9		840	1266.67	1226.67	1236.89	0.66	0.68	0.68	0.68	0.01

ตารางที่ ข-4.12 ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกกำจัด

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราของเหลว เข้า-ออกระบบ (mL)	ปริมาณ ก๊าซชีวภาพ	VFAs removed			mL Biogas/g VFAs removed			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	300	520	47.50	47.50	45.00	10.95	10.95	11.56	11.15	0.35
2		450	47.50	47.50	47.50	9.47	9.47	9.47	9.47	0.00
3		520	45.00	45.00	45.00	11.56	11.56	11.56	11.56	0.00
4	500	850	65.83	63.33	63.33	12.91	13.42	13.42	13.25	0.29
5		820	65.83	63.33	65.83	12.46	12.95	12.46	12.62	0.28
6		890	63.33	63.33	63.33	14.05	14.05	14.05	14.05	0.00
7	1,000	930	135.00	132.50	135.00	6.89	7.02	6.89	6.93	0.08
8		790	132.50	132.50	130.00	5.96	5.96	6.08	6.00	0.07
9		840	132.50	132.50	132.50	6.34	6.34	6.34	6.34	0.00

ข-5 ผลการศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ ข-5 ค่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ครั้งที่	ปริมาณน้ำกากมันสำปะหลัง ที่นำเข้า-ออกจากถังหมัก (mL)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
1	300	51.2	31.4	1.0	15
2		59.8	38.6	1.5	25
3		56.7	41.2	0.4	20
4	500	59.6	40.8	1.3	20
5		58.7	37.3	2.1	25
6		60.5	35.6	1.1	25
7	1,000	59.1	30.9	1.8	20
8		58.5	37.6	0.9	25
9		56.4	35.9	1.7	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้