การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง โดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน

BIOGAS PRODUCTION FROM WASTEWATER OF BREAD FACTORY USING TWO-PHASE ANAEROBIC DIGESTER

นายครรชัย สิงหาราช

นางสาวศิริรัตน์ สังขรักษ์

นางสาวอรอุมา พงศ์สุข

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง โดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน

BIOGAS PRODUCTION FROM WASTEWATER OF BREAD FACTORY USING TWO-PHASE ANAEROBIC DIGESTER

นายครรชัย สิงหาราช
นางสาวศิริรัตน์ สังขรักษ์
นางสาวอรอุมา พงศ์สุข

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ส ปร
ค 152ก
2558
เลขหมู่ 149255
เลขทะเบียน
วัน เดือน ปี 30 ส.ค. 2561
b. A2580267
i.

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIOGAS PRODUCTION FROM WASTEWATER OF BREAD FACTORY USING TWO-PHASE ANAEROBIC DIGESTER

MR. KUNCHAI SINGHARAT
MISS SIRIRAT SANGKARAK
MISS ONUMA PONGSUK

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังโดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน Biogas Production from Wastewater of Bread Factory Using Two-Phase Anaerobic Digester		
ชื่อนักศึกษา	นายครรชัย	สิงหาราช	55050889
	นางสาวศิริรัตน์	สังขรักษ์	55051008
	นางสาวอรอุมา	พงศ์สุข	55051038
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ ประธานกรรมการ	
ดร. เชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์ กรรมการ	
ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังโดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน		
ชื่อนักศึกษา	นายครรชัย	สิงหาราช	55050889
	นางสาวศิริรัตน์	สังขรักษ์	55051008
	นางสาวอรอุมา	พงศ์สุข	55051038
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน		

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังในสภาวะไม่ใช้อากาศแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง โดยศึกษาอัตราการเติมน้ำเสีย 50, 100, 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อลิตร ทุก 24 ชั่วโมง ในถังหมักขนาด 1 ลิตร จากนั้นนำอัตราการเติมน้ำเสียที่เหมาะสมไปศึกษาสภาวะระหว่างการหมัก และประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 2 ขั้นตอน ประกอบด้วยถังหมักกรดขนาด 1 ลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนขนาด 2 ลิตร ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าอัตราการเติมน้ำเสีย 100 มิลลิลิตรต่อลิตรต่อวัน ผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด ที่ระยะเวลาการกักเก็บ (HRT) 10 วัน พบว่าสภาวะระหว่างการหมักในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพในถังหมักก๊าซมีเทน มีค่าพีเอชค่อนข้างคงที่ที่ 7.03 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพ 0.83 ลิตรต่อวัน มีสัดส่วนของก๊าซมีเทน 24.1-60.8% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพ 1.15 L/VS removed มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี 72.73% ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ละลายน้ำ 75% และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย 77.34% จากการวิเคราะห์จุลินทรีย์ในถังหมักก๊าซมีเทน พบว่าส่วนใหญ่ลักษณะรูปร่างเป็นแท่ง เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งเป็นลักษณะของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ, น้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง, ระบบถังหมักก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Biogas Production from Wastewater of Bread Factory Using Two-Phase Anaerobic Digester		
Student	Mr. Kunchai	Singharat	55050889
	Miss Sirirat	Sangkarak	55051008
	Miss Onuma	Pongsuk	55051038
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2015		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon		

Abstract

This special project studied biogas production from wastewater of bread factory using a two-phase anaerobic digester. Microorganisms used in this study were also from wastewater treatment of bread factory. The feed ratio of wastewater was investigated by varying at 50, 100, 150 and 200 mL/L/d in the 1 Liter fermentor. The conditions during fermentation and the effciency of biogas production in a two-phase anaerobic digester (consisting of acid tank and methane tank) were examined under temperature of 35 °C. The experimental results showed that the feed ratio of wastewater of 100 mL/L/d could produce maximum yield of biogas at retention time (HRT) 10 days. It was found that the conditions during fermentation in the fermentor were pH at 7.03, biogas production rate of 0.83 liter per day, the percentage of methane 24.1-60.8%. Biogas could be produced 1.15 L/VS removed. Removal efficiencies of COD, sCOD and SS were 72.73%, 75% and 77.34%, respectively. Microorganisms found in the methane fermentor were mostly rod shape, gram-positive bacteria which is characteristic of methanogen bacteria.

Keywords: biogas, bread factory wastewater, two phase anaerobic digester

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงงานพิเศษขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษที่กรุณาให้คำแนะนำคำปรึกษาตลอดทั้งความช่วยเหลือในการทำโครงงานพิเศษมาโดยตลอดการดำเนินโครงงาน

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ และ ดร.เชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี และ ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ อาจารย์ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ข้อเสนอแนะและแก้ไขเพิ่มเติมในโครงงานพิเศษ

ขอขอบพะคุณ บริษัท เพรซิเดนท์ เบอเกอรี่ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสียและหัวเชื้อจุลินทรีย์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาคเคมี และภาควิชาชีววิทยาทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการเบิกสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนเทคนิคในการใช้เครื่องมือตลอดการทำโครงงานพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่าน รุ่นพี่ รุ่นน้อง ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ เอื้อเฟื้อสถานที่ และให้กำลังใจมาโดยตลอด ตลอดจนขอขอบคุณ วันเวลาที่ดีที่มีโอกาสศึกษาวิจัย และทำโครงงานพิเศษให้ลุล่วงไปได้

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายซึ่งมิได้กล่าวถึง ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้ด้วย

นายครรชัย สิงหาราช
นางสาวศิริรัตน์ สังขรักษ์
นางสาวอรอุมา พงศ์สุข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ฌ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 ก๊าซชีวภาพ 3
2.2 การผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ 4
2.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ 6
2.3.1 Non-methanogenic bacteria 6
2.3.2 Methanogenic bacteria 8
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน 9
2.4.1 อุณหภูมิ 9
2.4.2 พีเอช 10
2.4.3 กรดไขมันระเหยง่าย และสภาพด่าง 10
2.4.4 ธาตุอาหาร 10
2.4.5 สารพิษ 11
2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน 12
2.5.1 ก๊าซออกซิเจน 12
2.5.2 อุณหภูมิ 12
2.5.3 ความเข้มข้นของของแข็ง 12
2.5.4 การเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย 12
2.5.5 ระยะเวลาการพักตัวของการเกิดก๊าซ 13
2.5.6 การคลุกเคล้า 13
2.5.7 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และความเข้มข้นของกรดระเหย 13
2.5.8 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน 13
2.5.9 สารเคมี และยาปฏิชีวนะ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 ระบบการหมักแบบไม่ใช้อากาศ 14
2.6.1 ถังหมักแบบหนึ่งขั้นตอน 14
2.6.2 ถังหมักแบบสองขั้นตอน 14
2.7 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ 14
2.8 น้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง 15
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย 19
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี 19
3.1.1 อุปกรณ์ 19
3.1.2 สารเคมี 20
3.1.3 เชื้อจุลินทรีย์ 20
3.1.4 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ 20
3.2 การสร้างถังหมัก 21
3.2.1 ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศหนึ่งขั้นตอน 21
3.2.2 ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน 21
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง 23
3.3.1 วิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสีย 24
3.3.2 ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง โดยการหมักแบบไม่ใช้อากาศหนึ่งขั้นตอน 24
3.3.3 ศึกษาอัตราการเติมน้ำเสียที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการหมักแบบไม่ใช้อากาศหนึ่งขั้นตอน 25
3.3.4 ศึกษาสภาวะในระหว่างการหมัก และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ. โดยการหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน 25
3.3.5 ศึกษาลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์ 26
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล 27
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียโรงงานขนมปัง 27
4.2 ผลการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยใช้ถังหมักไม่ใช้อากาศแบบ 1 ขั้นตอน 28
4.3 ผลการศึกษาอัตราการเติมน้ำเสียที่เหมาะสมในการหมักก๊าซชีวภาพโดยถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 1 ขั้นตอน 29
4.4 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบไม่ใช้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่อง 2 ขั้นตอน 30
4.4.1 ผลการศึกษาปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของแข็งภายในระบบ 33
4.4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ..... 34
4.4.4 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์... 35
ในระบบ
4.4.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ..... 36
4.4.6 ผลการศึกษาสภาวะของของเหลวภายในถังอาหาร ถังหมักกรด..... 37
และถังหมักก๊าซมีเทน
4.5 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเชื้อจุลินทรีย์..... 38
4.6 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ..... 39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 40
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 40
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 40

เอกสารอ้างอิง..... 41

ภาคผนวก ก..... 44
ภาคผนวก ข..... 53
ภาคผนวก ค..... 73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	3
2.2	คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ	4
2.3	คุณสมบัติของแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน	7
2.4	คุณสมบัติของอาร์เคียแบคทีเรียบางชนิดที่สร้างก๊าซมีเทน	8
3.1	พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์	24
4.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง	27
4.2	คุณสมบัติของเหลวภายในถังอาหาร ถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน	37
4.3	คุณสมบัติน้ำทิ้งที่ออกจากระบบของถังหมักก๊าซมีเทน	39
ก-1	ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและวารเคมีสาหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ	48
ข-1	ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง	54
ข-2	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาต่างๆ ในการหมักแบบหนึ่งขั้นตอน	54
ข-3	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ของอัตราการเติมน้ำเสียที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตรต่อลิตร	60
ข-4	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ของอัตราการเติมน้ำเสียที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตรต่อลิตร	61
ข-5	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ของอัตราการเติมน้ำเสียที่ปริมาตร 150 มิลลิลิตรต่อลิตร	62
ข-6	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ของอัตราการเติมน้ำเสียที่ปริมาตร0 200 มิลลิลิตรต่อลิตร	63
ข-7	ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่สะสมที่เวลาต่างๆ ในการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องสองขั้นตอน	64
ข-8	ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อของแข็งระเหยที่ถูกย่อยสลาย	64
ข-9	ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีละลายน้ำที่ถูกย่อยสลาย	65
ข-10	ค่าของแข็งทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาต่างๆ	66
ข-11	ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาต่างๆ	66
ข-12	ค่าของแข็งระเหยง่ายถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาต่างๆ	67
ข-13	ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายในถังหมักก๊าซมีเทนและปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น	68
ข-14	ค่าพีเอชและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาต่างๆ	68
ข-15	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-16	ของแข็งภายในระบบ	70
ข-17	ค่าไนโตรเจนของน้ำทิ้งออกจากถังเติมอาหารและถังหมักก๊าซมีเทน	70
ข-18	กราฟมาตรฐานซัลเฟต	70
ข-19	ค่าซัลเฟตของน้ำทิ้งออกจากถังเติมอาหารและถังหมักก๊าซมีเทน	71
ข-20	กราฟมาตรฐานฟอสฟอรัส	71
ข-21	ค่าฟอสฟอรัส	71
ข-22	ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ออกจากถังหมักต่างๆ	72
ข-23	ค่าซีโอดีละลายน้ำของน้ำทิ้งที่ออกจากถังหมักต่างๆ	72
ค-1	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	74
ค-2	ผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อน	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ขั้นตอนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ	4
3.1	ถังหมักไม่ใช้อากาศแบบหนึ่งขั้นตอน	21
3.2	ถังหมักไม่ใช้อากาศแบบสองขั้นตอน	22
3.3	แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง	23
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาในการหมักต่างๆ	28
4.2	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นที่อัตราการเติมน้ำเสียต่างๆ	29
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาในการหมักต่างๆ	30
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ที่เวลาในการหมักต่างๆในถังหมักก๊าซมีเทน	31
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ละลายน้ำที่ถูกกำจัด ที่เวลาในการหมักต่างๆ ในถังหมักก๊าซมีเทน	32
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่เวลาต่างๆ ในถังหมักก๊าซมีเทน	33
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซมีเทนกับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ที่เวลาในการหมักต่างๆ	34
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่เปลี่ยนแปลงในระบบ	35
4.9	กราฟแสดงองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เวลาต่างๆ	36
4.10	ภายถ่ายเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการทดลองโดยการย้อมสีแกรมแล้วส่อง ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการใช้น้ำประมาณ 2 พันล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และมีแนวโน้มการเพิ่มจำนวนโรงงานที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำมากขึ้นทุกปี พบว่าโรงงานอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสียในระดับรุนแรงนั้น ส่วนใหญ่แล้วเป็นอุตสาหกรรมการเกษตร ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางเกษตรกรรม เป็นต้น น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการเกษตรส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียประเภทอินทรีย์ ซึ่งนิยมบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งแบ่งเป็นการบำบัดแบบใช้อากาศ และแบบไม่ใช้อากาศ โดยการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศนั้นจะได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554) ดังนั้นการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เพราะนอกจากจะบำบัดน้ำเสียที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังได้ก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด

น้ำเสียจากโรงงานผลิตขนมปังเป็นน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูง หากทิ้งไว้นานจะส่งกลิ่นเหม็นอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องผ่านการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง การที่น้ำเสียจากโรงงานผลิตขนมปังมีสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ง่าย จึงเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทั่วไปกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียว และการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศสองขั้นตอน การหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียว มีข้อเสีย คือ การควบคุมระบบทำได้ยาก อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพน้อย และเกิดการสะสมของตะกอน ในขณะที่กระบวนการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศสองขั้นตอนอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสร้างกรด (Acid Fermentation) และกลุ่มการสร้างมีเทน (Methane Formation) ซึ่งจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดเจริญได้ดีในสภาวะไร้อากาศ (จีรสมัย, 2551) กระบวนการนี้มีข้อดี คือ จุลินทรีย์ที่สร้างกรดสามารถเจริญได้เต็มที่ ไม่รบกวนจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน ลดปัญหาการสูญเสียจุลินทรีย์ในการสร้างก๊าซมีเทน และมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนสูง

โครงงานพิเศษนี้เป็นการศึกษาอัตราการเติมน้ำเสียที่เหมาะสม ศึกษาสภาวะและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังโดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สะอาด และลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมอาหาร

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาอัตราการเติมน้ำเสียจากโรงงานผลิตขนมปังที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ

2) เพื่อศึกษาสภาวะและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังโดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 2 ขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) วิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังตามวิธีมาตรฐาน APHA ได้แก่ pH, Total Carbon, Total Nitrogen, C/N ratio, Total phosphorus และ COD

2) สร้างถังหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ 1 ขั้นตอน และ 2 ขั้นตอน ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยควบคุมอุณหภูมิในการหมักที่ 35 องศาเซลเซียส

3) ศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในถังหมักแบบ 1 ขั้นตอน โดยศึกษาจากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

4) ศึกษาอัตราการเติมน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังที่เหมาะสมเข้าสู่ถังหมักแบบ 1 ขั้นตอน โดยศึกษาจากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

5) วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังก่อนเข้าระบบ (feed) และของเหลว (effluent) ที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทน ตามวิธีมาตรฐาน APHA ได้แก่ pH, SS, TS, VS, Total nitrogen, Total sulfate, Total phosphorus, COD และ sCOD

6) ศึกษาสภาวะในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังโดยการหมักที่สภาวะไร้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่องสองขั้นตอนที่อัตราการเติมน้ำเสียที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของ effluent ที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนตามวิธีมาตรฐาน APHA ได้แก่ pH, SS, TS, VS, VFA และ sCOD ทำการวัดพารามิเตอร์ทุกวัน

7) วัดปริมาณก๊าซชีวภาพทุกๆ 30 นาที โดยวิธีการแทนที่น้ำโดยใช้ 2% NaCl

8) คำนวณหาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง

9) วิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเมื่อปริมาตรก๊าซที่ 500 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่อง Gas data meter

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังโดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 2 ขั้นตอน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้

2) เป็นการนำน้ำเสียของโรงงานผลิตขนมปังมาใช้ประโยชน์

3) ลดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำเสียลงสู่สิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ เกิดจากการย่อยสลายของซากสิ่งมีชีวิต ทั้งซากพืช ซาก2สัตว์และของเสียจากสัตว์ รวมถึงขยะมูลฝอยที่เป็นขยะอินทรีย์ โดยกระบวนการย่อยสลายทั้งหมดเกิดขึ้นจากการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ในสภาวะที่ไร้อากาศ ก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ถ้ามีสภาพที่เหมาะสม หรือเกิดขึ้นในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพที่สร้างขึ้น (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2554)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น
CH_4	50 -70 % (v/v)
CO_2	20 -50 % (v/v)
H_2O (vapor)	0 -10 % (v/v)
N_2	0 -5 % (v/v)
O_2	0 -2 % (v/v)
NH_3	0 -1 % (v/v)
H_2S	50 -10,000 ppm

ที่มา: Rey *et al.* (2013)

ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นก๊าซที่ให้พลังงาน รองลงมาคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ส่วนออกซิเจนและไนโตรเจนนั้น อาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีการเติมอากาศในท่อเพื่อกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขณะที่แอมโมเนียและไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นมีปริมาณเพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 2.1) อย่างไรก็ตาม ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นอกจากจะมีกลิ่นเหม็นแล้ว เมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์รวมกับน้ำหรือความชื้นจะมีฤทธิ์เป็นกรด เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์ได้ นอกจากนี้ความชื้นยังทำให้เกิดคราบตะกรัน เมือกหรือตะกอนจุลินทรีย์ที่อุปกรณ์ต่างๆ เช่น Safety Valve ซึ่งมีผลต่อระบบความปลอดภัยของเครื่องจักร

เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก จึงทำให้มีคุณสมบัติจุดติดไฟได้ดีและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปต่างๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

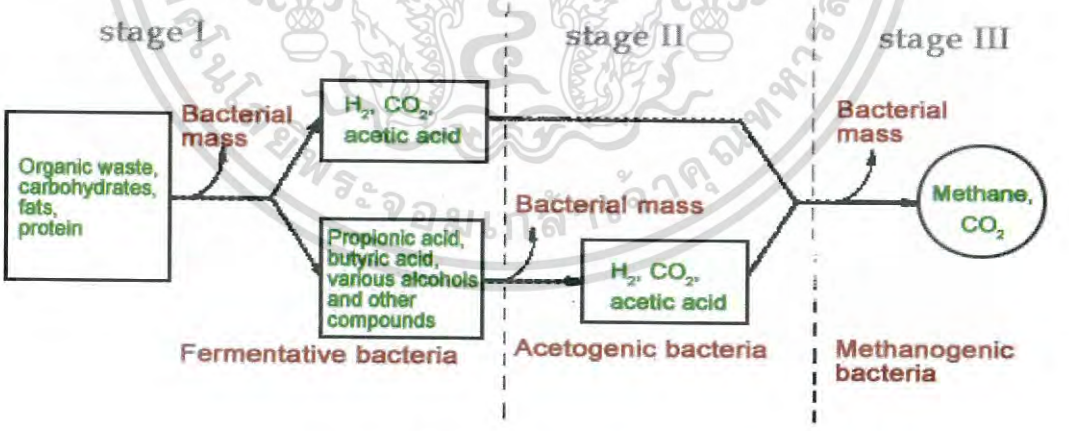
คุณสมบัติ	ค่าที่เหมาะสม
ค่าความร้อน (โดยประมาณ)	21 MJ/m^3 หรือ 5.96 KWh/m^2 (60% มีเทน)
ความเร็วเปลวไฟ	25 cm/s
อัตราส่วน (A/F) ทางทฤษฎี	6.19 m^2 (air)/m^2 (gas)
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 °C
อุณหภูมิจุดติดไฟของมีเทน	600 °C
ค่าความจุความร้อน (Cp)	16 kJ/m^2 °C
ความหนาแน่น	11.5 kg/m^2

ที่มา: มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (2553)

2.2 การผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

(มั่นสิน, 2542)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศจะมีแบคทีเรียอาศัยอยู่ในระบบร่วมกัน 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ แบคทีเรียสร้างกรด แบคทีเรียสร้างมีเทน และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต จากนั้นแบคทีเรียสร้างกรดใช้สารอินทรีย์โดยเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง แบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้สารอาหาร ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง โดยเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

ที่มา: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (มั่นสิน, 2542) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันสายยาว (Long chain fatty acids) ตามลำดับ ดังสมการที่ 2.1-2.3 ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลาย

Fats ⟶ Long chain fatty acids (2.1)

Proteins ⟶ Short chain peptides + Amino acids (2.2)

Polysaccharides ⟶ Monosaccharides + Disaccharides (2.3)

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)

ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปในเซลล์ เพื่อไปใช้เป็นอาหาร และถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids) เช่น กรดอะซิติก กรดบิวไทริก และกรดพรอพิออนิก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็ก และชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสับสเตรท และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน น้ำตาลจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านวิถี Embden-Meyerhof ภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่ถ้าไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง ผลผลิตที่ได้คือ กรดอะซิติก กรดพรอพิออนิก กรดบิวไทริก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ 2.4

$(C_6H_{12}O_6)_n \longrightarrow H(CH_2)_nCOOH + 8\ H_2O + CO_2$ (2.4)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis)

แบคทีเรียอะซิโตจีนิก (แบคทีเรียสร้างอะซิเตท) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน แบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการสับสเตรทเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทธิลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่อาจใช้เป็นสับสเตรทในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียอะซิโตจีนิก (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ ย่อยสลายกรดบิวไทริกและกรดพรอพิออนิกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ ตามลำดับ ดังสมการที่ 2.5

$CH_2)_nCOOH \longrightarrow CH_3COOH + H_2 + CO_2$ (2.5)

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้คือ Facultative และ Obligate anaerobic bacteria เรียกว่า Non-methanogenic bacteria หรืออาจเรียกว่า Acid formers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน

กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้สร้างก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไม่ใช้อากาศ (Obligate anaerobic condition) ดังสมการที่ 2.6-2.7

$$CH_3COOH + H_2O \longrightarrow CH_4 + H_2CO_3 \quad (2.6)$$

$$4\ H_2 + H_2CO_3 \longrightarrow CH_4 + 3\ H_2O \quad (2.7)$$

กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกแลกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดไขมันระเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติก หรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ นอกจากกรดอะซิติกและไฮโดรเจนแล้ว แบคทีเรียอาจใช้สับสเตรทอย่างง่ายอีกเพียงไม่กี่ชนิดในการผลิตมีเทน 70% เช่น เมทานอล และกรดฟอร์มิก (HCOOH) ดังสมการที่ 2.8-2.9

$$4\ CH_3OH \longrightarrow 3\ CH_4 + CO_2 + 2\ H_2O \quad (2.8)$$

$$4\ HCOOH \longrightarrow CH_4 + 3\ CO_2 + 2\ H_2O \quad (2.9)$$

ส่วนอีกประมาณ 30% จะเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนคาร์บอเนต (สมการ 2.7) ในขั้นตอนนี้ความเป็นกรดจะลดลงเนื่องจากกรดจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ CH_4 และ CO_2

2.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ (ศุภาพร และวสุ, 2553)

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีโครงสร้างซับซ้อนภายใต้สภาวะไร้อากาศจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูปของก๊าซชีวภาพนั้น จำเป็นต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนมากเป็นพวกแบคทีเรีย โดยเฉพาะกลุ่ม strictly anaerobic bacteria และ facultative anaerobic bacteria ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการ hydrolysis และ acidogenesis แบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1) Non-methanogenic bacteria ได้แก่ Acid-forming (hydrolytic and fermentative) bacteria และ Acetogenic (acetate and H_2 - producing) bacteria

2) Methanogenic bacteria ได้แก่ Acetoclastic (mathane-forming) bacteria และ Hydrogenutilizing methane bacteria

2.3.1 Non-methanogenic bacteria

แบคทีเรียในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นพวก Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีอากาศ โดยได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดไขมันระเหยง่าย กรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ CO_2/H_2 แอมโมเนีย และซัลไฟด์ สามารถเจริญเติบโตได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบ่งตัวเพิ่มจำนวนได้เป็น 2 เท่าภายในเวลา 24 ชั่วโมง ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่ม Acidogenic bacteria และ Acetogenic bacteria ได้แก่ Hydrolytic bacteria, Acid forming bacteria, Acetic acid producing bacteria ดังแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน

จีนัส	แหล่งที่พบ	รูปร่าง และคุณสมบัติ ของเชื้อ	การติดสี (Gram's stain)	การ เคลื่อนที่	อุณหภูมิที่ เหมาะสม (°C)
Bacteroides sp.	พบทั่วไปในธรรมชาติ บางชนิดเป็นแบคทีเรีย ประจำถิ่นในลำไส้ใหญ่ และทางเดินปัสสาวะของคน และยังพบในทางเดินอาหารของสัตว์หลายชนิด เช่น วัว ควาย ไก่ ม้า เป็นต้น	- Obligate anaerobe -รูปร่างแท่งสั้น - ไม่สร้างสปอร์	Gram negative	ไม่เคลื่อนที่	35
Clostridium sp.	พบในแหล่งที่อยู่ที่ไม่มีออกซิเจน เช่น ดิน, ในทางเดินอาหารหรือลำไส้ของสัตว์, สปอร์ของเชื้อพบทั่วไปในธรรมชาติ และจะงอกเมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนและมีอาหารที่เหมาะสม	- Obligate anaerobe - รูปร่างเป็นแท่งหรือแท่งโค้ง - สร้างสปอร์ตรงกลางเซลล์หรือค่อนมาทางปลายด้านใดด้านหนึ่งที่ปลายเซลล์ ทำให้ดูคล้ายไม้ตีกลอง อาจเรียงต่อกันเป็นโซ่ - สปอร์ทนทานต่อออกซิเจน	Gram positive จนถึง Gram variable	เคลื่อนที่ได้	37
Ruminococcus sp.	พบในผิวเยื่อเมือก ผิวหนัง, ทางเดินอาหารในคนและสัตว์	- Obligate anaerobe - รูปร่างกลมอยู่กันเป็นคู่ (diplococci) หรือต่อเป็นสายสั้นหรือยาวก็ได้	Gram positive	เคลื่อนที่ได้	35-37
Flavobacterium sp.	พบทั่วไปในธรรมชาติทั้งในน้ำจืด, น้ำทะเล ดิน อาหาร และโรงงานผลิตอาหาร	- anaerobe - รูปร่างแท่งปลายเรียว หรือแท่งโค้ง	Gram negative	มีทั้งเคลื่อนที่ และไม่เคลื่อนที่	20-25 แต่สามารถเจริญได้ดีที่ 35-37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน (ต่อ)

จีนัส	แหล่งที่พบ	รูปร่างและคุณสมบัติของเชื้อ	การติดสี (Gram's stain)	การเคลื่อนที่	อุณหภูมิที่เหมาะสม (°C)
Butyrivibrio sp.	พบในทางเดินอาหาร, ลำไส้ของสัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น วัว และอาจพบได้ในคน พบในถังหมักหรือตะกอนที่มีการทับถมกันใต้น้ำ	- Obligate anaerobe - รูปร่างแท่งปลายเรียว หรือ แท่งโค้ง	Gram negative	เคลื่อนที่ได้	30-45

ที่มา: ศุภาพร และวสุ (2553)

2.3.2 Methanogenic bacteria

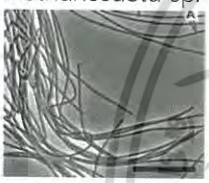
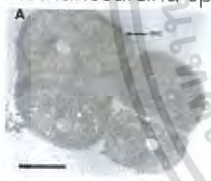
แบคทีเรียในกลุ่มนี้ ตามธรรมชาติพบในชั้นตะกอนของแม่น้ำลำคลอง หรือในกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้อง มีทั้งที่เป็นแกรมบวกและแกรมลบ ขึ้นอยู่กับชนิดของ cell envelop ของแบคทีเรียที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมีเทน ส่วนใหญ่จัดอยู่ในพวก Obligated anaerobic bacteria เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่ขาดออกซิเจน ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.0-7.8 ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมได้น้อย และมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน โดยเฉลี่ยต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 3-5 วัน ที่ 35 °C ถึง 10 วัน ที่ 10 °C ในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า ได้แก่ แบคทีเรียในกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophs และ Acetotrophic methanogens หรือ Acetoclastic bacteria หรือ Acetate splitting bacteria ได้แก่ Acetoclastic methanogens และ Hydrogenophilic methanogens ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของอาร์เคียแบคทีเรียบางชนิดที่สร้างก๊าซมีเทน

จีนัส	แหล่งที่พบ	รูปร่างเซลล์	วัตถุดิบในการผลิตก๊าซมีเทน	อุณหภูมิที่เหมาะสม (°C)
Methanobacterium sp.	ทางเดินอาหารสัตว์, ตะกอนดินตามแหล่งน้ำ	รูปร่างแท่งยาวจนถึงเป็นเส้นสาย	CO_2+H_2 และ formate	37-45
Methanobrevibacteria sp.	ทางเดินอาหารสัตว์, ดิน, ในต้นไม้, สิ่งปฏิกูลที่มีการทับถม	รูปร่างกลม, แท่งสั้น หรือคล้ายมีดผ่าตัดปลายแหลม	CO_2+H_2 และ formate	37-49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของอาร์เคียแบคทีเรียบางชนิดที่สร้างก๊าซมีเทน (ต่อ)

จีนัส	แหล่งที่พบ	รูปร่างเซลล์	วัตถุดิบในการผลิตก๊าซมีเทน	อุณหภูมิที่เหมาะสม (°C)
Methanmicrobium sp.	ทางเดินอาหารสัตว์	แท่งสั้น	CO_2+H_2, formate	40
Methanospirillum sp.	ทางเดินอาหารสัตว์, ตะกอนดิน	รูปร่างเป็นเกลียวสั้นจนถึงยาว	CO_2+H_2 และ formate	30-40
Methanosaeta sp. 	ถังหมัก	แท่งยาวหรือเป็นสาย	acetate	34-40
Methanosarcina sp. 	ตะกอนดิน, ถังหมัก	รูปร่างกลม ขนาดใหญ่ อยู่เป็นกลุ่ม	CO_2+H_2, acetate และ methanol	35-40

ที่มา: ศุภาพร และวสุ (2553)

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Werner *et al.*, 1989) ประกอบด้วย

2.4.1 อุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการไร้ออกซิเจนมีอยู่ 2 ช่วง คือ อุณหภูมิระหว่าง 30-40 °C เรียกว่า เมโซฟิลิก (mesophillic bacteria) อุณหภูมิระหว่าง 45-55 °C เรียกว่า เทอร์โมฟิลิก (thermophillic bacteria) โดยทั่วไปแล้ว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์จะเร็วขึ้น อัตราการเจริญเติบโตก็เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ถ้าเพิ่มสูงเกินกว่าที่เซลล์ทำงานได้ โปรตีน กรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์จะถูกทำลายจนไม่สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเพิ่มการเจริญเติบโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการทำงานของเซลล์ได้จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านั้น การทำงานและการเจริญเติบโตจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว

2.4.2 พีเอช

จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชหนึ่งๆ จุลินทรีย์ส่วนใหญ่มักมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงพีเอช 5-10 เพราะสภาพแวดล้อมส่วนใหญ่ในธรรมชาติมักมีพีเอชอยู่ในช่วงนี้ จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ที่พีเอชต่ำกว่า 5 เรียกว่า acidophiles เช่น ราและแบคทีเรียบางชนิด ส่วนพวกที่เจริญเติบโตได้ที่พีเอช 10-11 เรียกว่า alkaliphiles พีเอชที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนอยู่ระหว่าง 6.8-7.2 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว

2.4.3 กรดไขมันระเหยและสภาพด่าง

กรดไขมันระเหยที่ผลิตโดยแบคทีเรียสร้างกรดปกติ ควรมีค่าประมาณ 200-400 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร กรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณว่าระบบกำลังเสียสมดุล เพราะทำให้พีเอชลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบ ไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนหรือแบคทีเรียสร้างกรด แม้ว่าแบคทีเรียสร้างกรดจะทนต่อกรดที่ผลิตได้มากกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ตาม สังเกตได้จากแบคทีเรียสร้างกรดสามารถอยู่ได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า ดังนั้น สภาพด่างจึงแสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบซึ่งจะรักษาระบบให้มีพีเอชค่อนข้างคงที่และทนต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยได้ โดยทั่วไป กระบวนการไร้ออกซิเจนควรมีสภาพด่างประมาณ 1,500-2,00 มิลลิกรัมต่อลิตร (as $CaCO_3$) นอกจากจะดูสภาพด่างแล้ว ยังต้องพิจารณาอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยในรูปกรดอะซิติกต่อสภาพด่าง (as $CaCO_3$) ด้วย โดยค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างน้อยกว่า 4 มิลลิกรัมต่อลิตร (as $CaCO_3$) ถือได้ว่าระบบยังทำงานได้ดี แต่ถ้าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างสูงกว่า 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (as $CaCO_3$) แล้ว แสดงว่าระบบมีบัฟเฟอร์ต่ำ ควรหาสาเหตุที่ทำให้อัตราส่วนสูงขึ้นและแก้ไข เพราะพีเอชมีแนวโน้มลดลงจนระบบอาจล้มเหลวได้

2.4.4 ธาตุอาหาร

แม้ว่าเซลล์ของแบคทีเรียที่สร้างขึ้นมาในกระบวนการไร้ออกซิเจนจะมีน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน แต่จากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อซัลเฟอร์ (C:N:P:S) ในเซลล์มีค่าประมาณ 100:10:1:1 จึงจำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนนี้ไว้ไม่ให้น้อยกว่านี้ จุลินทรีย์จึงต้องการอาหารเสริมนอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งอัตราส่วนระหว่างบีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสอย่างน้อยควรมีค่าเท่ากับ 100:1:0.2 (McCarty, 1964) สำหรับกระบวนการไร้ออกซิเจน นอกจากนี้ ยังมีธาตุบางอย่างที่แบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์

2.4.4.1 เหล็ก

เหล็กเป็นธาตุอาหารที่ละลายน้ำได้น้อย และสามารถรวมกับซัลไฟด์ในระบบแยกตัวออกจากน้ำ ตกตะกอนผลึกในรูปของเหล็กซัลไฟด์ ทำให้เกิดปัญหาการกำจัดของเหล็กได้ ส่วนโคบอลต์มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่า แต่ก็อาจเกิดปัญหาเดียวกันได้

2.4.4.2 นิกเกิล

นิกเกิลเป็นส่วนประกอบสำคัญของโคเอนไซม์ F_{430} ซึ่งเป็นหนึ่งในโคเอนไซม์สำคัญต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ได้แก่ โคเอนไซม์ F_{420}, F_{430} และ 2-mercaptoethane sulfonic acid โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติแล้วนิกเกิลเป็นสิ่งปนเปื้อนที่ติดอยู่ในสารสกัดจากยีสต์ และในเกลือแร่อื่นๆ ทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนได้รับนิกเกิลจากการปนเปื้อน อย่างไรก็ตาม นิกเกิลอาจรวมกับซัลไฟด์ และตกผลึกได้เช่นเดียวกับเหล็ก จึงอาจมีความจำเป็นต้องเติมนิกเกิลบ้างในกรณีที่ไม่มีหรือมีนิกเกิลไม่เพียงพอ

2.4.4.3 ซัลไฟด์

บทบาทของซัลไฟด์ที่มีต่อระบบไร้ออกซิเจนมีทั้งเชิงบวกและเชิงลบ ซัลไฟด์มีผลเสียต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน เนื่องจากสามารถตกผลึกเหล็ก นิกเกิล และโลหะหนักที่จำเป็นต่างๆ นอกจากนี้ซัลไฟด์ในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 100-150 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน อย่างไรก็ตามซัลไฟด์ในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็เป็นสารจำเป็น และขาดไม่ได้สำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทน เมื่อวิเคราะห์เซลล์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนปรากฏว่าพบซัลไฟด์สูงถึง 2.6 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งทั้งหมด ในขณะที่โคเอนไซม์ 2-mercaptoethane sulfonic acid มีซัลไฟด์เพียง 4 เปอร์เซ็นต์ของที่พบทั้งหมด ดังนั้น ซัลไฟด์ 2.6 เปอร์เซ็นต์นี้ ต้องเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของแบคทีเรีย ความต้องการซัลไฟด์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนอาจแปรเปลี่ยนอยู่ในช่วง 1-25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณซัลไฟด์ที่แบคทีเรียนำไปใช้ได้ จะถูกกำหนดโดยพีเอช และความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบรรยากาศเหนือน้ำของถังปฏิกรณ์

2.4.5 สารพิษ

สารที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบไร้อากาศโดยเฉพาะแบคทีเรียสร้างมีเทนมีหลายชนิด ระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิด และความเข้มข้นของสารเหล่านั้น สารที่เป็นพิษบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณที่พอเหมาะ ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะกลายเป็นพิษได้

2.4.5.1 ไอออนบวก

ไอออนบวกในน้ำเสียที่อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ได้แก่ โซเดียมไอออน โพแทสเซียมไอออน แมกนีเซียมไอออน และแคลเซียมไอออน ไอออนเหล่านี้ถ้ามีความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้าความเข้มข้นสูงเกินไปก็จะเริ่มเป็นพิษต่อแบคทีเรีย โดยเฉพาะไอออนบวกที่มีวาเลนซีสูงจะมีความเป็นพิษมากกว่าไอออนที่มีวาเลนซีต่ำ ซึ่งพิษจากไอออนของแมกนีเซียม และแคลเซียมมีมากกว่าโซเดียม และโพแทสเซียมถึง 10 เท่า ดังนั้น พิษของไอออนบวกเพิ่มขึ้น เมื่อวาเลนซีสูงขึ้น แต่ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตมีเทนยังไม่เป็นที่แน่นอนว่าเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นเท่าใด มีรายงานถึงความเข้มข้นของโซเดียมที่ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตมีเทนที่ 50 เปอร์เซ็นต์อยู่เป็นจำนวนมาก โดยค่าความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 6-40 กรัมต่อลิตร

2.4.5.2 โลหะหนัก

โลหะหนักที่อาจเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ได้แก่ แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง และโครเมียม โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในรูปของไอออน พบว่าลำดับความเป็นพิษของโลหะหนักจะเรียงตามลำดับดังนี้ คือ ทองแดง เหล็ก แคดเมียม และสังกะสี แต่ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลงได้ ถ้าน้ำเสียมีปริมาณซัลไฟด์พอเหมาะ เพราะสามารถรวมกับโลหะหนักเกิดเป็นโลหะซัลไฟด์ซึ่งสามารถตกตะกอนได้

2.4.5.3 แอมโมเนีย

แอมโมเนียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนมาจากการย่อยสลายสารพวกโปรตีน ซึ่งมีไนโตรเจนรวมอยู่ในโมเลกุลด้วย โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปแอมโมเนียและแอมโมเนียมอิออน ดังสมการที่ 2.10

$$NH_4^+ \rightleftharpoons NH_3 + H^+ \qquad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางซ้าย ถ้าพีเอชมากกว่า 7.2 ปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวา ดังนั้นถ้าพีเอชสูงขึ้นแอมโมเนียอยู่ในระบบมากขึ้น แอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนมากกว่าแอมโมเนียมอิออน

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นผลจากการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดเกี่ยวข้องกัน การที่จะทำให้แบคทีเรียผลิตก๊าซได้ดีนั้นจะต้องสร้างสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ (Warner *et al*., 1989) ประกอบด้วย

2.5.1 ก๊าซออกซิเจน

ต้องไม่มีก๊าซออกซิเจนในบ่อหมัก จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนเป็นจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ หากมีก๊าซออกซิเจนอยู่ในระบบ จะทำให้แบคทีเรียนี้หยุดการเจริญเติบโต

2.5.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิในบ่อหมักมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากความเร็วของปฏิกิริยาทางเคมีจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทนจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 3-70 ^{o}C แบคทีเรียที่สามารถผลิตก๊าซมีเทนในช่วงอุณหภูมินี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ ช่วงอุณหภูมิปานกลาง และช่วงอุณหภูมิสูง อุณหภูมิในแต่ละช่วงจะมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ อุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น การย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพจะเร็วขึ้น ทำให้สามารถสร้างบ่อก๊าซขนาดเล็กลงได้ (แต่อุณหภูมิจะไม่มีผลต่อปริมาณก๊าซที่ควรจะผลิตได้ทั้งหมดจากสารอินทรีย์นั้น ซึ่งจะเป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์)

2.5.3 ความเข้มข้นของของแข็ง

เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ความเข้มข้นของของแข็งในบ่อหมักแบบมีการเติมสารอินทรีย์สม่ำเสมอควรมีค่าระหว่าง 5-10% และควรมีค่าประมาณ 25% สำหรับบ่อหมักแบบเติมสารอินทรีย์เพียงครั้งเดียว ความเข้มข้นของของแข็งในบ่อหมักมีมากไปหรือน้อยไปก็จะเกิดผลเสีย คือ ถ้าความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มมากเกินไป ก็จะทำให้เกิดการสะสมของกรดเพิ่มขึ้น (pH ต่ำลง) ทำให้กระบวนการหมักหยุดชะงักเป็นผลทำให้ไม่มีการผลิตก๊าซ แต่ถ้าความเข้มข้นของของแข็งในบ่อหมักน้อยเกินไป ก็จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซต่อปริมาตรของบ่อไม่มากเท่าที่ควร ทำให้ได้ก๊าซน้อย

2.5.4 การเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย (ชไมพร, 2555)

การเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย (feeding system) มีอยู่หลายวิธี ดังนี้

2.5.4.1 การเติมน้ำเสียครั้งเดียว (batch feeding) เป็นการเติมน้ำเสียเพียงครั้งเดียวลงในถังปฏิกิริยา แล้วปล่อยให้แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย หลังจากนั้นจึงมีการถ่ายน้ำเสียที่บำบัดแล้วหรือกำจัดสารอินทรีย์แล้วออกจากระบบ เติมน้ำเสียใหม่เข้าไปในระบบและดำเนินการตามกระบวนการข้างต้น การเติมน้ำเสียในลักษณะนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียปริมาณไม่มากนัก และไม่มีกระบวนการที่ก่อให้เกิดน้ำเสียตลอด 24 ชั่วโมง จะเกิดขึ้นเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่อง ข้อเสียคือ ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดก๊าซต่ำ และปริมาณก๊าซไม่คงที่

2.5.4.2 การเติมน้ำเสียแบบต่อเนื่อง (continuous feeding) เป็นการเติมน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยาหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง คือ จะมีน้ำเสียถูกเติมเข้า และออกจากถังปฏิกิริยาตลอดเวลา เป็นแบบที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ระบบบำบัดน้ำเสียสามารถดำเนินไปอย่างสม่ำเสมอ ประสิทธิภาพของระบบนี้จะสูงสุด การเติมในลักษณะนี้เหมาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกระบวนการผลิตที่ก่อให้เกิดน้ำเสียตลอดเวลา หรือน้ำเสียเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นค่อนข้างคงที่อยู่ตลอดเวลา

2.5.4.3 การเติมน้ำเสียแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous feeding) เป็นการเติมน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยาหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยจะมีการหยุดป้อนน้ำเสียเป็นช่วงๆ ซึ่งส่วนใหญ่มักจะพิจารณาการเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวให้มีความสอดคล้องกับลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้น ในแง่ของคุณภาพของน้ำเสียหรือปริมาณที่มีความแตกต่างกันมาก ทำให้การเกิดก๊าซมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแรกและปริมาณก๊าซค่อนข้างคงที่

2.5.5 ระยะเวลาการพักตัวของการเกิดก๊าซ

ระยะเวลาการพักตัวของการเกิดก๊าซ (Retention time) เป็นระยะเวลาที่ทำให้สารอินทรีย์ถูกผสมอยู่ในบ่อหมักก๊าซ เพื่อให้แบคทีเรียได้ย่อยสลายสารอินทรีย์และใช้เป็นอาหารในการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ให้มากขึ้นก่อนที่จะถูกถ่ายเทออกจากบ่อหมัก ปกติจะใช้เวลา 20-50 วัน ระยะเวลาการพักตัวของการเกิดก๊าซ สำหรับบ่อหมักก๊าซที่มีการเติมสารอินทรีย์ตลอดเวลาหรือเป็นระยะๆ สามารถคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยได้ ดังสมการที่ 2.11

$$\text{ระยะเวลาการพักตัว} = \frac{\text{ปริมาตรบ่อก๊าซ}}{\text{ปริมาตรการเติมสารหมักต่อวัน}}$$

ถ้าระยะเวลาการพักตัวสั้นเกินไป การชะล้างของแบคทีเรียในบ่อหมักจะมีอัตราเร็วกว่าการสร้างแบคทีเรียใหม่ ปฏิกิริยาการย่อยสลายก็จะหยุดชะงัก เนื่องจากปริมาณแบคทีเรียในบ่อหมักลดลงหรือหมดไป แต่ถ้าให้เวลาพักตัวนานเกินไป บ่อหมักจะต้องมีปริมาตรมากขึ้น

2.5.6 การคลุกเคล้า

การคลุกเคล้าตะกอน น้ำ และสารอินทรีย์ เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง เพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดก๊าซเร็วขึ้นและมากขึ้น นอกจากนี้ ยังป้องกันการตกตะกอน และตะกอนลอย (scum) ซึ่งตะกอนอาจจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวออกจากถัง

2.5.7 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และความเข้มข้นของกรดระเหย

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย (pH) เมื่อกระบวนการหมักเข้าสู่สภาพคงที่แล้ว ก็จะทำให้เกิดความสมดุลของความเป็นกรดและด่าง เนื่องจากเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ไบคาร์บอเนต (CO_2-HCO_3) และเกิดแอมโมเนีย-แอมโมเนียม (NH_3-NH_4) ทำให้สารละลายในบ่อหมักมีค่าพีเอชระหว่าง 7.0-8.5 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่วัดได้ในสารละลายในบ่อหมักก๊าซชีวภาพที่ทำงานเป็นปกติ ถ้าค่าพีเอชของสารละลายในบ่อหมักลดต่ำกว่า 6.2 จะหยุดยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน เป็นผลทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลงหรือไม่มีการผลิตเลย สำหรับกระบวนการหมักปกติ ความเข้มข้นของกรดระเหยได้ ซึ่งวัดในรูปของกรดอะซิติก ควรจะต้องต่ำกว่า 2,000 ppm ถ้ากรดระเหยมีค่าสูงกว่านี้ก็จะไปหยุดยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน

2.5.8 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ควรอยู่ระหว่าง 30:1 ถึง 10:1 เนื่องจากแบคทีเรียต้องใช้ทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนในการเจริญเติบโต ถ้าปริมาณไนโตรเจนมากจนเกินไปจะเกิดการสร้างแอมโมเนียมากขึ้น เป็นผลทำให้สภาพในบ่อหมักมีความเป็นด่างซึ่งจะไปหยุดยั้งการทำงานของแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.9 สารเคมีและยาปฏิชีวนะ

สารเคมีและยาปฏิชีวนะที่ใช้ในการรักษาสัตว์ ล้างคอกและอื่นๆ อาจมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากสารเคมีและยาปฏิชีวนะบางชนิดเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพน้อยลงหรือไม่เกิดเลย ดังนั้นบ่อหมักก๊าซชีวภาพจะต้องระวังไม่ให้มีการปนเปื้อนของสารเคมีและยาปฏิชีวนะเข้าไปในบ่อ

2.6 ระบบการหมักแบบไม่ใช้อากาศ (เพ็ชรรัตน์, 2538)

2.6.1 ถังหมักแบบหนึ่งขั้นตอน (One – Phase Anaerobic Digester)

เหมาะกับจุลินทรีย์ที่มีสภาวะในการเจริญเติบโตแตกต่างกันไม่มาก การทำงานของระบบจะเกิดสภาวะที่สร้างกรดและสร้างมีเทนในถังเดียว การควบคุมระบบทำได้ยากอาจทำให้ผลิตก๊าซมีเทนได้น้อย ข้อดีระบบนี้ คือ เป็นระบบถังที่มีขั้นตอนง่ายไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก ส่วนข้อเสีย คือ การควบคุมระบบทำได้ยาก มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพน้อย และเกิดการสะสมของตะกอน

2.6.2 ถังหมักแบบสองขั้นตอน (Two – Phase Anaerobic Digester)

เป็นระบบที่มีการแยกการหมักออกเป็นสองส่วนตามลักษณะการทำงานของจุลินทรีย์ เพื่อควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับจุลินทรีย์แต่ละประเภท เนื่องจากการหมักอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ 2 ชนิด ซึ่งในการทำงานของจุลินทรีย์ดังกล่าวมีสภาวะที่แตกต่างกัน ระบบถังหมักแบบสองขั้นตอนใช้พีเอชเป็นตัวกำหนดและควบคุมแบคทีเรีย โดยถังแรกมีพีเอช 4-5 จะมีแบคทีเรียที่สร้างกรด ส่วนถังที่สองมี พีเอช 6.5-7 จะมีแบคทีเรียที่สร้างมีเทน จากการแบ่งเป็นสองขั้นตอนทำให้ก๊าซไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นในถังใบแรกไม่เกิดการสะสมตัวจนเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทนในถังใบที่สอง ข้อดีของระบบนี้ คือ จุลินทรีย์ที่สร้างกรดสามารถเจริญเติบโตได้เต็มที่ ไม่มีผลรบกวนจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน ลดปัญหาการสูญเสียจุลินทรีย์ในการสร้างก๊าซมีเทนได้ และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูง ส่วนข้อเสีย คือ ต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์เข้าไประหว่างถังหมักกรด และถังมีเทน

2.7 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (ธิระศักดิ์, 2552)

ข้อดีของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

1) เนื่องจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศทำงานด้วยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียส่วนใหญ่ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและพลังงานที่ใช้ในการดำรงชีวิต ทำให้เซลล์เกิดน้อยมาก และช่วยลดปัญหาการบำบัดตะกอนได้

2) ให้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซมีเทนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

3) สามารถรับภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน (shock load) ได้ โดยไม่ทำให้ระบบล้มเหลว แต่ต้องใช้เวลาในการปรับตัวเล็กน้อย

4) ต้องการอาหารเสริมน้อยกว่าระบบชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน

5) ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน เพราะไม่ต้องการใช้ออกซิเจนในการทำงานของจุลินทรีย์

6) สามารถทำงานได้ดี หลังจากที่มีการหยุดทำงานไปชั่วขณะหนึ่ง โดยไม่ต้องทำการเลี้ยงจุลินทรีย์ใหม่

7) ตะกอนจุลินทรีย์มีความคงตัวสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

1) เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็น

2) การใช้งานในทางปฏิบัติจริง ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบระบบการกระจายของน้ำยังไม่ดีพอ ซึ่งทำให้การไหลลัดวงจรได้

3) น้ำออกจากระบบยังมีสารอินทรีย์อยู่สูงกว่าค่ามาตรฐานที่ทางราชการกำหนด จึงจำเป็นต้องมีระบบแบบใช้อากาศมาบำบัดต่อ

2.8 น้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง

ส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียประเภทอินทรีย์ และจำเป็นต้องบำบัดโดยระบบชีวภาพ ซึ่งแบ่งเป็นแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ ในส่วนของการบำบัดโดยไม่ใช้อากาศนั้นจะมีผลิตผลพลอยได้เป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือก๊าซมีเทนในปริมาณต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะน้ำเสียนั้นๆ ก๊าซมีเทนนี้สามารถติดไฟได้ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ ด้วยเหตุนี้ถ้าสามารถปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในโรงงาน ก็จะสามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในเชิงพาณิชย์ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554) เป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้มีประโยชน์และลดปัญหามลภาวะได้อีกด้วย การผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ต้องพิจารณาว่าน้ำเสียมีคุณสมบัติและปริมาณเหมาะสมที่จะผลิตก๊าซชีวภาพหรือไม่ และต้องพิจารณาด้วยว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้ทดแทนพลังงานในกระบวนการผลิตได้มากน้อยเพียงไร โดยปัจจุบันหน่วยงานภาครัฐได้ให้การสนับสนุนผ่านโครงการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ณัฐพงศ์ และสุรีย์พร (2552) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนโดยใช้หัวมันสำปะหลังดิบ โดยใช้กระบวนการหมักแบบสองเฟส (ถังกรดและถังมีเทน) 2 ถัง ทดลองโดยเตรียมมันสำปะหลังป่น 50 กรัม ละลายน้ำ 200 มิลลิลิตร เริ่มหมักด้วยถังกรดปริมาตรประมาณ 6 ลิตร และถังมีเทนปริมาตรประมาณ 21 ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (เฉลี่ย 33 °C) นาน 31 วัน โดยใช้หัวเชื้อจากธรรมชาติ และหัวเชื้อจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พบว่าในถังมีเทนถังที่ 1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสูงสุด 5.32 ลิตรต่อวัน เมื่อหมักได้ 31 วัน ในขณะที่ถังมีเทนถังที่ 2 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสูงสุด 13.20 ลิตรต่อวัน เมื่อหมักได้ 28 วัน ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในถังมีเทนถังที่ 1 และ 2 คิดเป็นร้อยละ 85.13 และร้อยละ 86.21 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งในถัง 1 และ 2 คิดเป็นร้อยละ 80.20 และร้อยละ 84.11 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดในถังมีเทนที่ 1 และ 2 คิดเป็นร้อยละ 90.23 และร้อยละ 92.44 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเฉลี่ยของถังมีเทน 1 และ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7,275 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 5,745 มิลลิกรัมต่อลิตร จากค่าพารามิเตอร์ทำให้ทราบว่าประสิทธิภาพของถังมีเทนถังที่ 2 ดีกว่าถังที่ 1 และจากการทดลองก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นมีก๊าซมีเทนอยู่ร้อยละ 64.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐิติวรรณและคณะ (2557) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกเผือกในสภาวะไม่ใช้อากาศแบบ 2 ขั้นตอน โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างเปลือกเผือกต่อน้ำประปาที่ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนเปลือกเผือก 1 ส่วน : น้ำประปา 4 ส่วน โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นอัตราส่วนที่สามารถหมักก๊าซชีวภาพได้โดยของเหลวไม่ล้นจากถังหมัก เชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตขนมปังไส้เผือกสามารถผลิตก๊าซชีวภาพ และมีมีเทนมากกว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากถังหมักก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร จากการหมักก๊าซชีวภาพโดยใช้อัตราส่วนเปลือกเผือกต่อน้ำประปา 1:4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และใช้เชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตขนมปังไส้เผือก ที่ระยะเวลากักเก็บ (HRT) 25 วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 1.99 ลิตรต่อวัน และก๊าซมีเทน 44.6% ถึง 66.7%

บุญรัตน์ และคณะ (2553) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารจากโรงอาหารโดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ที่อุณหภูมิ 37 °C และใช้เชื้อผสมจากน้ำหมักชีวภาพจากเศษอาหารโดยการเติมอาหารแบบกึ่งต่อเนื่อง จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณอาหารที่เหมาะสมในการเติมคือ 10% ของปริมาตรน้ำหมักและระยะเวลาในการเติมอาหารที่เหมาะสม คือ 24 ชั่วโมง ปริมาตรก๊าซที่ผลิตได้จากน้ำเสียจากโรงงานผลิตไอศกรีมและเศษอาหารมีค่าเท่ากับ 47.18 mL/gCOD และ 5.32 mL/gCOD ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง GC-TCD พบว่า ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำเสียโรงงานผลิตไอศกรีมมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงกว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากเศษอาหาร

Dalkılıc and Ugurlu (2015) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ในอัตราภาระสารอินทรีย์ (OLRs) ที่แตกต่างกัน ในสภาวะ Mesophilic-thermophilic แบบไม่ใช้ออกซิเจนสองขั้นตอน โดยดำเนินการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องภายใต้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน (1.9 g VS/L•d - 4.7 g VS/L•d) และของแข็งทั้งหมด (TS) ประมาณ (3.0-8.25%) พบว่า แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะปรับสภาพความเข้มข้นของ แอมโมเนีย-ไนโตรเจน สูง (>3000 mg/L) ซึ่งเป็นผลมาจากย่อยสลายของมูลไก่ เนื่องจากค่าความเป็นกรดในถังปฏิกรณ์สูง ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหย (VFA) ที่สูง ทำให้ทนต่อระบบ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเฉลี่ยได้ 554 mL/g VS ในขณะที่ให้อาหาร 2.2 กรัม VS/L•d กับระบบ (2.3% VS-3.8% TS) ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยของก๊าซชีวภาพเป็น 74%

Dareioti *et al.* (2010) ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานมะกอก (OMW) มูลวัวเหลว (LCM) และเวย์ชีส (CW) ทำการทดลองโดยใช้กระบวนการหมักในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบ 2 ขั้นตอน เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (CSTRs) ถูกนำมาใช้ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก (35°C) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการ acidogenesis และ methanogenesis กระบวนการโดยรวมได้รับการออกแบบที่มีเวลาเก็บกัก (HRT) 19 วัน อาหารที่เติมแบบต่อเนื่องประกอบด้วย 55% OMW 40% CW และ 5% LCM หลังจาก 87 วันของการหมักได้เปลี่ยนไปเป็นอัตราส่วนเป็น 90% CW และ 10% LCM ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของของเสียอุตสาหกรรมเกษตร มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD 75.5% และ 85.2% สำหรับการทดลองนี้มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 5.5±0.36 และ 4.5±0.30 g total COD/L reactor/d ในขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อัตราการผลิตก๊าซมีเทนที่สภาวะคงตัว 1.35±0.11 และ 1.33±0.15 L CH_4/L reactor/day ตามลำดับ

Dareioti and Kornaros (2014) ศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกัก (HRT) แบบไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยอาหารร่วมของเสียอุตสาหกรรมเกษตรแบบสองขั้นตอนในระบบการกวนต่อเนื่อง (CSTRs) ระบบหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่องทำการทดลองในสภาวะเมโซฟิลิก (37°C) เพื่อศึกษาผลของเวลาเก็บกัก (HRT) ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน ถังผลิตกรดถูกเลี้ยงด้วยน้ำเสียโรงงานมะกอก เวย์ชีส และมูลวัว (อัตราส่วน 55:40:5, v/v/v) และทำการทดลอง 5 ระยะเวลากักเก็บที่แตกต่างกัน (5, 3, 2, 1 และ 0.75 วัน) เพื่อศึกษาการผลิตไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน ผลการทดลองพบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ HRT 0.75 วัน มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด 1.72 L/L reactor/day และผลผลิตไฮโดรเจน 0.54 mol H_2/mol carbohydrates consumed ถังผลิตมีเทนทำการทดลองที่ HRT 20 และ 25 วัน พบว่าการผลิตก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพดีที่ HRT 25 วัน โดยมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.33 L CH_4/L reactor/day

Li *et al.* (2015) ศึกษาการเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนของกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสีย ไขมันและน้ำมัน (FOG) ในเขตเทศบาลเมือง โดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ระบบ คือปรับอุณหภูมิเป็น 55 °C และไม่ปรับอุณหภูมิ ในการย่อยตะกอนร่วมกับไขมันและน้ำมัน ขั้นตอนแรกของระบบการย่อยอาหารร่วม (ระบบ I) มีการเพิ่มความร้อนก่อนการบำบัด pH 10 ที่ 55 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นสภาพที่ดีที่สุดสำหรับการบำบัด FOG ร่วมกับการย่อย ขั้นตอนที่สองของระบบการย่อยอาหารร่วม (ระบบ II) โดยไม่ต้องมีกระบวนการปรับสภาพ ใช้บ่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ระบบย่อยอาหารมีเวลาเก็บกัก (HRT) 24 วัน อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) 1.83 ± 0.09 กรัม TVS/L/d ถูกนำมาใช้กับระบบการย่อยอาหาร ผลการทดลองพบว่าระบบแรกที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจะมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 25.14±2.14 ลิตร/วัน ซึ่งสูงกว่าระบบสองที่ 18.73 1.11 L/d และมีประสิทธิภาพการกำจัด COD 53.3%

Liu *et al.* (2009) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนจากเศษอาหารและผัก และการผสมของขยะเหล่านี้ โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยเติมอาหารแบบครั้งคราวที่อุณหภูมิปานกลาง (35-37°C) และอุณหภูมิสูง (50-52 °C) ส่วนประกอบด้วยเศษอาหาร 50% และผัก 50% ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) เริ่มต้นที่เข้าสู่ถังหมัก ในสภาวะที่อุณหภูมิปานกลาง ที่อัตราส่วนของอาหารเลี้ยงเชื้อและปริมาณเชื้อ 4 อัตรา ได้แก่ 1.6, 3.1, 4.0 และ 5.0 และการย่อยสลายที่อุณหภูมิสูงได้ดำเนินการที่ 1 อัตราส่วนคือ 3.1 ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างอาหารเลี้ยงเชื้อและปริมาณเชื้อมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการทดสอบที่ 4 อัตราส่วนของอาหารเลี้ยงเชื้อและปริมาณเชื้อพบว่า หลังจาก 25 วันของการย่อยสลายที่อุณหภูมิปานกลางพบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีค่าเป็น 778, 742, 784 และ 396 mL/gVS สำหรับเศษอาหาร ตามลำดับ และ 631, 529, 524 และ 407 mL/ gVS สำหรับผัก ตามลำดับ และ 716, 613, 671 และ 555 mL/gVS สำหรับขยะผสม ตามลำดับ และพบ 80% ของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้อย่างต่อเนื่องจาก 10 วันแรกของการย่อยสลาย ส่วนที่อัตราส่วนของอาหารเลี้ยงเชื้อและปริมาณเชื้อ เท่ากับ 3.1 พบว่า ก๊าซชีวภาพและมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายที่อุณหภูมิสูงของเศษอาหาร ผัก และขยะผสม มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณที่ได้จากการย่อยสลายที่อุณหภูมิปานกลาง ซึ่งปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
149255

ก๊าซชีวภาพมีค่าเป็น 430, 372 และ 358 mL/g VS ตามลำดับ และมีปริมาณมีเทนเท่ากับ 245, 206 และ 185 mL/g VS ตามลำดับ

Zhu *et al.* (2007) ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนจากกากมันฝรั่งโดยกระบวนการย่อยอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนสองขั้นตอน ถังผลิตก๊าซไฮโดรเจนเติมอาหารแบบต่อเนื่องภายใต้ pH 5.5 และมีระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 6 ชั่วโมง ถังผลิตก๊าซมีเทนดำเนินการเติมอาหารแบบต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่องมีระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 30 ชั่วโมงและ 90 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยควบคุมค่า pH ที่ 7 อัตราการผลิตก๊าซได้สูงสุด 270 mL/h และโดยเฉลี่ย 119 mL/h จากถังผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยมีระยะเวลาดำเนินการมากกว่า 110 วัน ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่มีอยู่ในก๊าซ 45% (v/v) โดยเฉลี่ย อัตราการผลิตก๊าซสูงสุดและโดยเฉลี่ยจากถังผลิตก๊าซมีเทนในช่วง 74 วันของการหมักเติมอาหารแบบกึ่งต่อเนื่องเป็น 187 และ 141 ml/hr ตามลำดับ ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเฉลี่ยเป็น 76% โดยรวมมี VS 70% , ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 64% ผลผลิตไฮโดรเจนและมีแทนจากกากมันฝรั่งได้ 30 L/kg TS (สูงสุด 68 L/kg) และ 183 L/kg TS (สูงสุด 225 L/kg) ตามลำดับ ผลผลิตพลังงานทั้งหมดที่ได้รับคือ 2.14 kW h/kg TS สูงสุด 2.74 kW h/kg TS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1) เครื่องวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์รวม (Total Organic Carbon) รุ่น TNM-1 บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น

2) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) รุ่น Genesys 105 UV-Uis บริษัท Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา

3) เตาเผา (Muffle furnance) รุ่น Centroller P320 บริษัท Nabertherm ประเทศเยอรมนี

4) ตู้อบ (Oven) รุ่น UN 55 บริษัท Atmosafe ประเทศเยอรมนี

5) เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 บริษัท MSE ประเทศอังกฤษ

6) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น 2842 บริษัท Sartorius ประเทศสหรัฐอเมริกา

7) เครื่องวัดกรด – ด่าง (pH meter) รุ่น 827 pH Lab บริษัท Metrohm ประเทศสหรัฐอเมริกา

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

9) กล้องจุลทรรศน์ Olympus รุ่น CH30 บริษัท Olympus ประเทศญี่ปุ่น

10) เครื่องกวนแบบแม่เหล็กพร้อมแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer and magnetic bar) รุ่น Fisher Hot plate บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา

11) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Waterbath shaker) W 600 บริษัท Atmosafe ประเทศเยอรมนี

12) ปั๊ม peristatic pump รุ่น 77201-60, Cole-Parmer Instrument Company ประเทศสหรัฐอเมริกา

13) ปั๊มดูดสุญญากาศ รุ่น Aspirator A-35 บริษัท Toky Rikakikai ประเทศญี่ปุ่น

14) ชุดกรวยกรองบุชเนอร์ (Buncher funnel) รุ่น RUram 500 mL บริษัท Schott ประเทศเยอรมนี

15) โถดูดความชื้น (Desiccator)

16) เทอร์โมมิเตอร์

17) ขวดแก้วดูเรนขนาด 1 ลิตร 2 ลิตร และ 5 ลิตร

18) กระบอกดักก๊าซขนาด 600 มิลลิลิตร

19) ท่อแก้วงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20) สายไทกอน (Tygon) รุ่น 06409-18 บริษัท Cole-Parmer Instrument Company ประเทศสหรัฐอเมริกา

21) ตัวล็อคสายไทกอน

22) จุกยาง

23) พาราฟิล์ม (Parafilm)

24) กระดาษกรองใยแก้ว เบอร์ 41 บริษัท Macherey – Nagel ประเทศเยอรมนี

25) เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.2 สารเคมี

1) โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

2) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

3) ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเฮปตะไฮเดรต ($Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

4) แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ

5) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Poch S.A. ประเทศโปแลนด์

6) ซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Poch S.A. ประเทศโปแลนด์

7) เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ($Fe(NH_4)_2 \cdot 6H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

8) โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ($HOOCC_6H_4COOK$) ($Fe(NH_4)_2 \cdot 6H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

9) กรดซัลฟิวริก (Conc H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

10) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท SDFCL SD. Fine-chem Limited ประเทศอิตาลี

11) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

12) โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส ($NaSO_4$ anhydrous) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

13) เมทิลเรด (Methyl red) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific UK Limited ประเทศอังกฤษ

3.1.3 เชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสีย ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เพรสซิเดนท์ เบเกอรี่ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

3.1.4. วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ

น้ำเสียจากโรงงานผลิตขนมปัง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เพรสซิเดนท์ เบเกอรี่ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง กรุงเทพมหานค

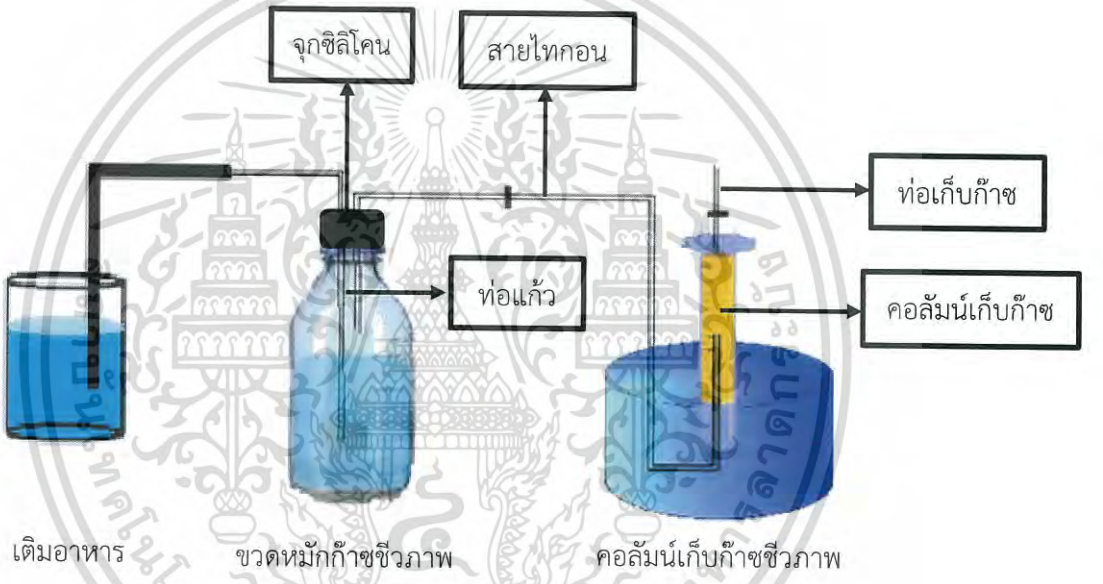
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสร้างถังหมัก

ถังหมักในการศึกษานี้มี 2 ระบบคือ ถังหมักไม่ใช้อากาศหนึ่งขั้นตอน และถังหมักไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน

3.2.1 ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศหนึ่งขั้นตอน

ขวดหมักใช้ขวดดูแรนขนาด 1 และ 2 ลิตร ปิดขวดหมักด้วยจุกซิลิโคนที่มี 2 รู เพื่อใส่ท่อแก้วนำก๊าซและท่อเติมอาหาร ต่อสายไทกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ที่ปลายท่อแก้วที่เป็นท่อนำก๊าซ วัดปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีแทนที่น้ำในกระบอกตวงโดยใช้ NaCl 2% เพื่อลดการละลายของก๊าซชีวภาพในน้ำ ส่วนปลายท่อแก้วอีกด้านหนึ่งต่อสายไทกอนไว้สำหรับเติมอาหาร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศหนึ่งขั้นตอน

3.2.2 ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน

แบ่งเป็น 4 ส่วนย่อย ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ส่วนที่ 1 ขวดอาหาร (Feed)

ใช้ขวดดูแรน ขนาด 1 ลิตร ด้านบนปิดด้วยจุดยางซิลิโคนที่เจาะรู 2 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ด้านหนึ่งใส่ท่อแก้วที่ต่ออยู่กับสายไทกอนไว้สำหรับเปิดให้อากาศเข้าสู่ถังเพื่อปรับความดันและอีกด้านต่อเข้ากับขวดหมักกรด (ส่วนที่2)

ส่วนที่ 2 ขวดหมักกรด (Acid Tank)

ใช้ขวดดูแรน ขนาด 2 ลิตร ด้านบนปิดด้วยจุกยางซิลิโคนที่เจาะรู 2 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ด้านหนึ่งต่อเข้ากับขวดอาหาร (ส่วนที่ 1) ไว้สำหรับเติมอาหารและอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับขวดหมักก๊าซมีเทน (ส่วนที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 3 ขวดหมักก๊าซมีเทน (Methane Tank)

ใช้ขวดแก้วดูแรนสามหัว ขนาด 5 ลิตร หัวแรกปิดด้วยจุกยางซิลิโคนที่เจาะรู 2 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ด้านหนึ่งต่อเข้ากับขวดหมักกรด (ส่วนที่ 2) และอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับคอลัมน์เก็บก๊าซชีวภาพ (ส่วนที่ 4) หัวที่สองปิดด้วยจุกยางดำที่เจาะรู 1 รู ใช้สำหรับการกวนผสมด้วยใบพัดที่ต่อกับมอเตอร์ที่มีความเร็วในการหมุน 100 รอบต่อนาที และหัวที่สามปิดด้วยจุกยางซิลิโคนที่เจาะรู 1 รู ใช้สำหรับการนำของเหลวออกจากระบบ (effluent) เพื่อนำไปวิเคราะห์

ส่วนที่ 4 คอลัมน์เก็บก๊าซชีวภาพ

ประกอบด้วยคอลัมน์ขนาด 600 มิลลิลิตร ที่บรรจุ NaCl 2% จนเต็มคว่ำอยู่ในถังพลาสติกบรรจุ NaCl 2% เพื่อลดการละลายของก๊าซชีวภาพในน้ำ ปริมาตร 4 ลิตร

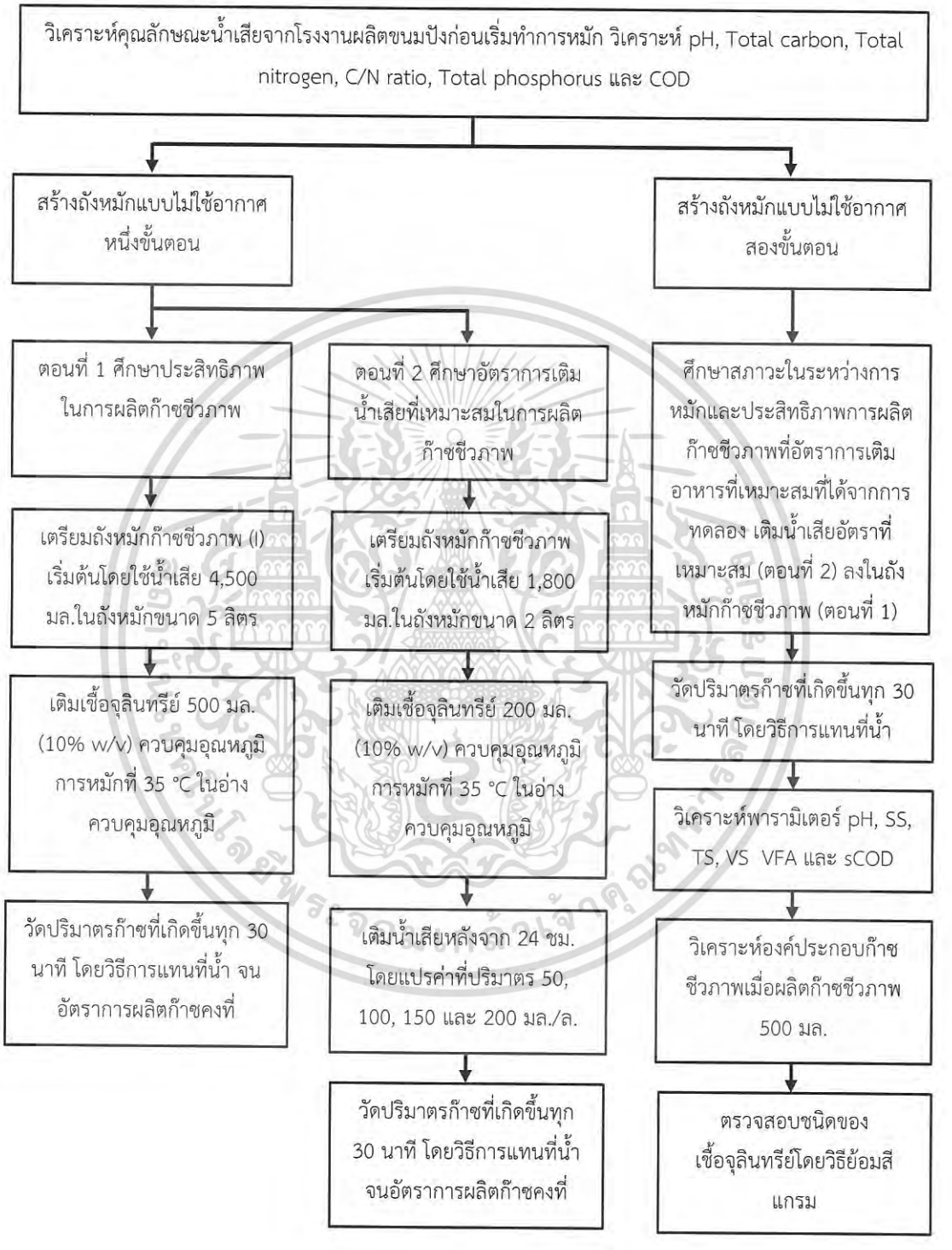
หมายเหตุ: ระบบมีการควบคุมอุณหภูมิในการหมักโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 35 ◦C และทุกการเชื่อมต่อระหว่างท่อนำก๊าซกับสายไทกอนจะใช้พาราฟิล์มพันเพื่อป้องกันการรั่วซึม รวมถึงตัวล็อคสายในแต่ละช่วงเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของสาร

รูปที่ 3.2 ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

สรุปขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 วิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสีย

วิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังตามวิธีมาตรฐาน APHA ได้แก่ pH, Total carbon, Total nitrogen, C/N ratio, Total phosphorus และ COD ดังแสดงในตารางที่ 3.1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก-1 ถึง ก-8 ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ	จำนวนครั้งที่วิเคราะห์
pH	pH meter	ทุกวัน
COD	Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (1995) และ ASTM D1252-06 (2012)	ก่อนการทดลอง
C/N ratio	โดยวิธีมาตรฐานของ AOAC (2006)	ก่อนการทดลอง
SS	Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (1995) และ ASTM C1603 (2010)	ทุกวัน
TS	Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (1995) และ ASTM C1603 (2010)	ทุกวัน
VS	Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (1995) และ ASTM C1603 (2010)	ทุกวัน
VFA	Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (1995)	ทุกวัน
Total phosphorous	Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (1995)	วันสิ้นสุดการทดลอง
Total sulfide	Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (1995) และ ASTM D4658-09 (2009)	วันสิ้นสุดการทดลอง
Composition of biogas	Gas data meter	ปริมาตรก๊าซครบ 500 มิลลิลิตร

3.3.2 ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังโดยการหมักแบบไม่ใช้อากาศหนึ่งขั้นตอน

1) เติมเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง 10% w/v (500 มิลลิลิตร) ลงในขวดดูแรนขนาด 5 ลิตร

2) เติมน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง 4,500 มิลลิลิตร ลงในขวดดูแรนขนาด 5 ลิตร

3) ปิดปากขวดด้วยจุกยางซิลิโคนและต่ออุปกรณ์การเก็บก๊าซโดยวิธีแทนที่น้ำโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (2% w/v) เพื่อลดการละลายของก๊าซชีวภาพในน้ำ ดังรูปที่ 3.1

4) ควบคุมอุณหภูมิการหมักในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

5) ทำการบันทึกค่าปริมาตรก๊าซ ทุก 30 นาที จนอัตราการเกิดก๊าซคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ศึกษาอัตราการเติมน้ำเสียที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักแบบไม่ใช้อากาศหนึ่งขั้นตอน

1) เติมเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงานผลิตขนมปัง 10% w/v (200 มิลลิลิตร) ลงในขวดดูแรนขนาด 2 ลิตร

2) เติมน้ำเสียโดยแปรค่าที่ปริมาตร 50, 100, 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อลิตร ลงในขวดดูแรนขนาด 2 ลิตร

3) ทำการปิดปากขวดด้วยจุกด้วยยางซิลิโคนและต่ออุปกรณ์การเก็บก๊าซโดยวิธีแทนที่น้ำในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (2% w/v) เพื่อลดการละลายของก๊าซชีวภาพในน้ำ

4) ควบคุมอุณหภูมิการหมักในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

5) ทำการบันทึกค่าปริมาตรก๊าซทุกๆ 30 นาที

6) ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ

3.3.4 ศึกษาสภาวะในระหว่างการหมักและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักแบบไม่ใช้อากาศกึ่งต่อเนื่องสองขั้นตอน

1) เตรียมขวดอาหาร (Feed) โดยใช้ขวดดูแรนขนาด 1 ลิตร เติมน้ำเสียจากโรงงานผลิตขนมปัง 1 ลิตร

2) เตรียมขวดหมักกรด (Acid tank) โดยใช้ขวดดูแรนขนาด 2 ลิตร เติมน้ำเสียจากโรงงานผลิตขนมปัง 2 ลิตร

3) เตรียมขวดผลิตก๊าซมีเทน (Methane tank) โดยใช้ขวดดูแรนขนาด 5 ลิตร สามหัว เติมน้ำเสียจากโรงงานผลิตขนมปัง 4,500 มล. และเติมเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง 10% โดยปริมาตร (500 มิลลิลิตร) (ในการทดลองนี้ใช้ขวดหมักก๊าซมีเทนจากการทดลองที่ 3.3.2 มาทำการทดลองต่อ)

4) ทำการต่ออุปกรณ์ ปิดฝาขวดแต่ละขวดด้วยจุกซิลิโคนและจุกยางดำ และต่ออุปกรณ์การเก็บก๊าซโดยวิธีแทนที่น้ำในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (2% w/v) เพื่อลดการละลายของก๊าซชีวภาพในน้ำ ดังรูปที่ 3.2

5) ควบคุมอุณหภูมิการหมักในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C

6) ในทุกๆ 24 ชั่วโมง จะทำการดูดของเหลว (effluent) ออกจากขวดผลิตก๊าซมีเทน (Methane tank) ในอัตราที่ได้จากการทดลองตอนที่ 3.3.3 โดยปั่นกวนที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ก่อนการดูดของเหลว จากนั้นนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ ได้แก่ pH, SS, TS, VS, VFA และ sCOD (ตารางที่ 3.1)

7) ทำการดูดของเหลว (effluent) จากขวดหมักกรด (Acid tank) ไปยังขวดหมักผลิตก๊าซมีเทน (Methane tank) ในอัตราการเติมอาหารที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองตอนที่ 3.3.3

8) ทำการบันทึกค่าปริมาตรก๊าซทุกๆ 30 นาที

9) วิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพเมื่อปริมาตรก๊าซครบ 500 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง Gas data meter

10) หลังจากการหมักเป็นเวลา 15 วัน นำของเหลว (effluent) ในแต่ละขวดหมักไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี โดยขวดอาหาร (Feed) และขวดหมักผลิตก๊าซมีเทน (Methane tank) จะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ pH, SS, TS, VS, Total sulfate, Total

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nitrogen, Total phosphate, COD และ sCOD ส่วนขวดหมักกรด (Acid tank) ทำการวิเคราะห์ pH, SS, TS, VS, COD และ sCOD (ตารางที่ 3.1)

3.3.5 ศึกษาลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์

1) เก็บตัวอย่างของผสม (Slurry) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดหมักก๊าซมีเทน

2) นำมาตรวจสอบลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้วิธีการย้อมแกรมบวกและแกรมลบตามวิธีมาตรฐาน AOAC, 2005. (ดูรายละเอียดใน ก-9 ภาคผนวก ก.)

3) ส่องกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1,000 เท่า

4) ถ่ายภาพบันทึกลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังโดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) ศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยใช้ถังหมักไม่ใช้อากาศแบบ 1 ขั้นตอน 2) ศึกษาอัตราการเติมน้ำเสียโดยใช้ถังหมักไม่ใช้อากาศแบบ 1 ขั้นตอน และ 3) ศึกษาสภาวะในระหว่างการหมักและประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราการเติมอาหารที่เหมาะสมโดยใช้ถังหมักไม่ใช้อากาศแบบ 2 ขั้นตอน ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียโรงงานขนมปัง

ตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-1 ภาคผนวก ข) แสดงผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง พบว่าน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังมีค่าสัดส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:2.3:1.4 ซึ่งมีค่าสูงกว่าสัดส่วน COD:N:P ที่เหมาะสม คือ 100:2.2:0.4 และมีค่าสัดส่วน BOD:N:P เท่ากับ 100:3.8:2.3 ซึ่งมีค่าสูงกว่าสัดส่วน BOD:N:P ที่เหมาะสม คือ 100:1.1:0.2 สำหรับอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 25.62 ซึ่งน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังมีสารอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yen and Brune (2007) ที่พบว่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 20-25

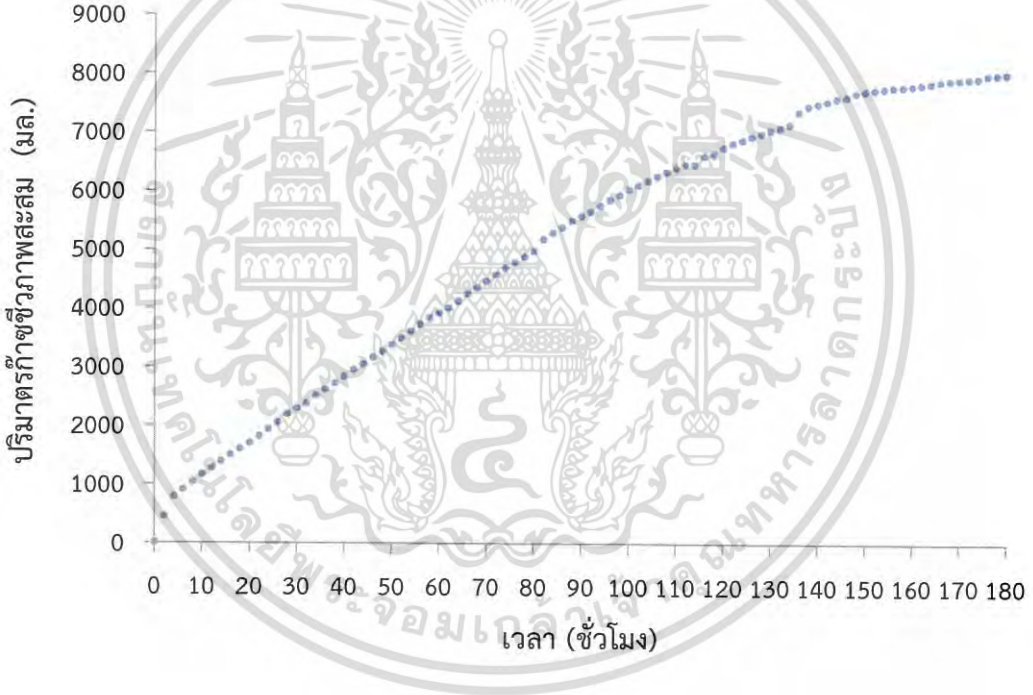
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	ค่าผลการทดลองที่ได้
ค่าพีเอช	4.0
ปริมาณคาร์บอน	3,100 มิลลิกรัม/ลิตร
ปริมาณไนโตรเจน	121 มิลลิกรัม/ลิตร
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	25.62
ปริมาณฟอสฟอรัส	73.44 ± 0.1808 มิลลิกรัม/ลิตร
ค่าซีโอดี	5,360 ± 791.9596 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยใช้ถังหมักไม่ใช้อากาศแบบ 1 ขั้นตอน

จากรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2 ภาคผนวก ข) แสดงอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยวัดจากอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าระยะแรกในช่วงเวลาสั้นๆ จะเกิดก๊าซชีวภาพขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากแบคทีเรียอยู่ในระยะปรับตัว (lag phase) ให้เข้ากับสภาพแวดล้อม ต่อมาจะมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นระยะที่แบคทีเรียแบ่งตัวอย่างรวดเร็ว (exponential phase) และนำสารอาหารไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ หลังจากนั้นแบคทีเรียจะมีอัตราการเกิดเท่ากับอัตราการตาย เข้าสู่ระยะ stationary phase แบคทีเรียใช้อาหารที่ถูกเติมเข้าไปถูกย่อยสลายจนหมด ทำให้เกิดอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และหยุดการผลิตก๊าซชีวภาพที่เวลา 180 ชม. โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ 9.44 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ณัฐพงศ์ และสุรีย์พร (2552)

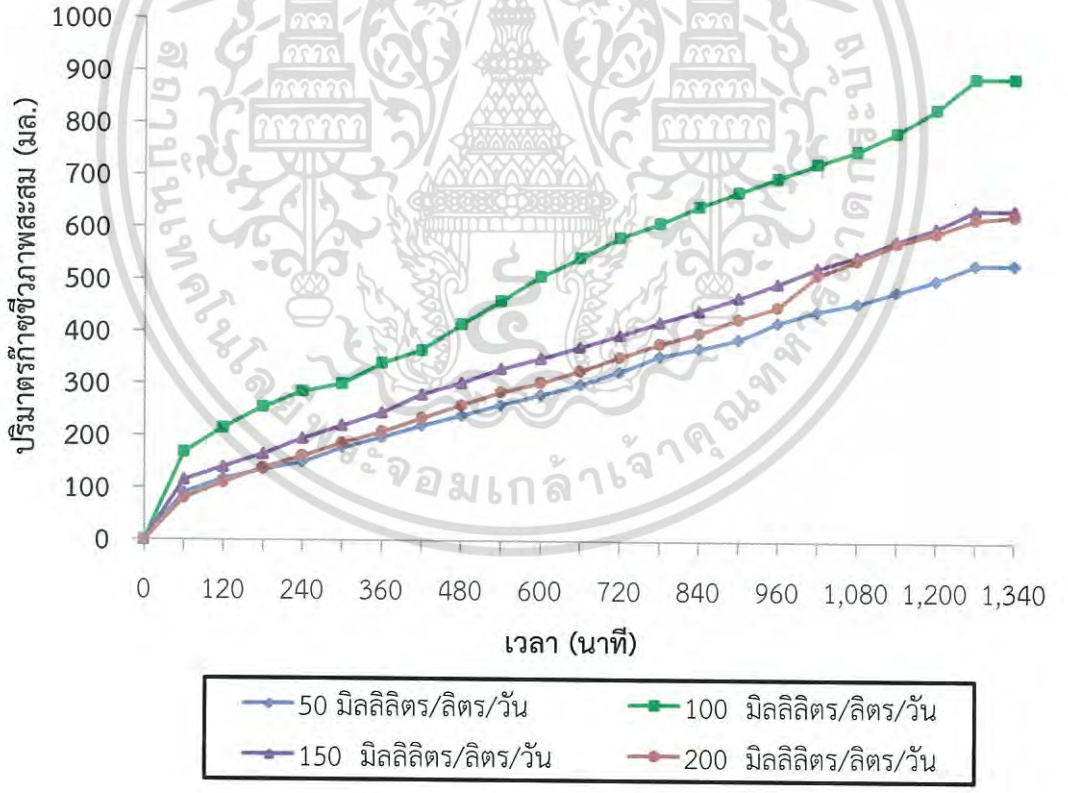


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาในการหมักต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาอัตราการเติมน้ำเสียที่เหมาะสมในการหมักก๊าซชีวภาพโดยถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 1 ขั้นตอน

จากรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตาราง ข-3 ถึง ตาราง ข-6 ภาคผนวก ข) แสดงอัตราการเติมน้ำเสียที่เหมาะสมในการหมักก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 1 ขั้นตอน พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ 1,340 นาที (22 ชม. 33 นาที) โดยอัตราการเติมน้ำเสียที่เหมาะสมในการหมักก๊าซชีวภาพ คือ 100 มิลลิลิตรต่อลิตรต่อวัน มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.74 ลิตรต่อวัน ซึ่งเป็นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด จากการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิธี One-way ANOVA พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติมน้ำเสียที่ 100 มิลลิลิตรต่อลิตรต่อวัน แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับอัตราการเติมน้ำเสียที่ 50, 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อลิตรต่อวัน (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค) โดยอัตราเติมน้ำเสีย 50, 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อลิตรต่อวัน ผลิตก๊าซชีวภาพได้ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณอาหารที่เติมมากไป จะส่งผลให้ค่า pH ลดลงมาก จนทำให้ระบบล้มเหลวเนื่องจาก methanogen ตาย ถ้าหากปริมาณอาหารน้อยไป แก๊สที่ผลิตได้จะน้อยตามไปด้วย เท่ากับว่าไม่ได้เดินระบบเต็มตามกำลังการผลิต ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่เกินไปโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงใช้อัตราการเติมน้ำเสีย 100 มิลลิลิตรต่อลิตรต่อวัน มาทำการทดลองในขั้นต่อไป



รูปที่ 4.2 ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นที่อัตราการเติมน้ำเสียต่างๆ

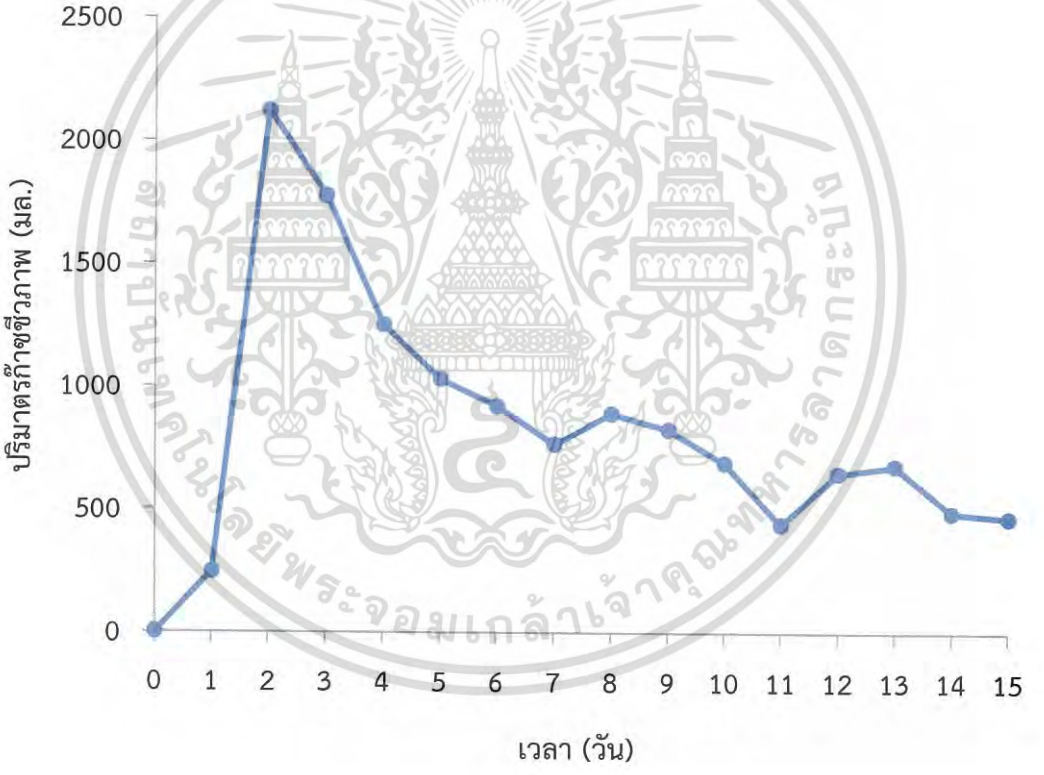
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบไม่ใช้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่อง 2 ขั้นตอน

การผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังหมักไม่ใช้อากาศแบบ 2 ขั้นตอน เติมเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง เติมน้ำเสีย 100 มิลลิลิตรต่อลิตรต่อวัน ทุกวัน (HRT 10 วัน) ได้ผลการทดลองดังนี้

4.4.1 ผลการศึกษาปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-7 ภาคผนวก ข) แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นในเวลา 15 วัน ช่วงวันที่ 1-2 จะเกิดก๊าซชีวภาพอย่างรวดเร็ว และจะมีแนวโน้มลดลงในช่วงวันที่ 2-7 และเริ่มคงที่ตั้งแต่วันที่ 7-15 ทั้งนี้ในช่วงวันที่ 1-7 ระบบถังหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอนยังไม่เข้าสู่ระยะ Stationary phase หลังจากวันที่ 7 จะเข้าสู่ระยะ Stationary phase จะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่คงที่ โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.8763 มิลลิลิตรต่อวัน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาในการหมักต่างๆ

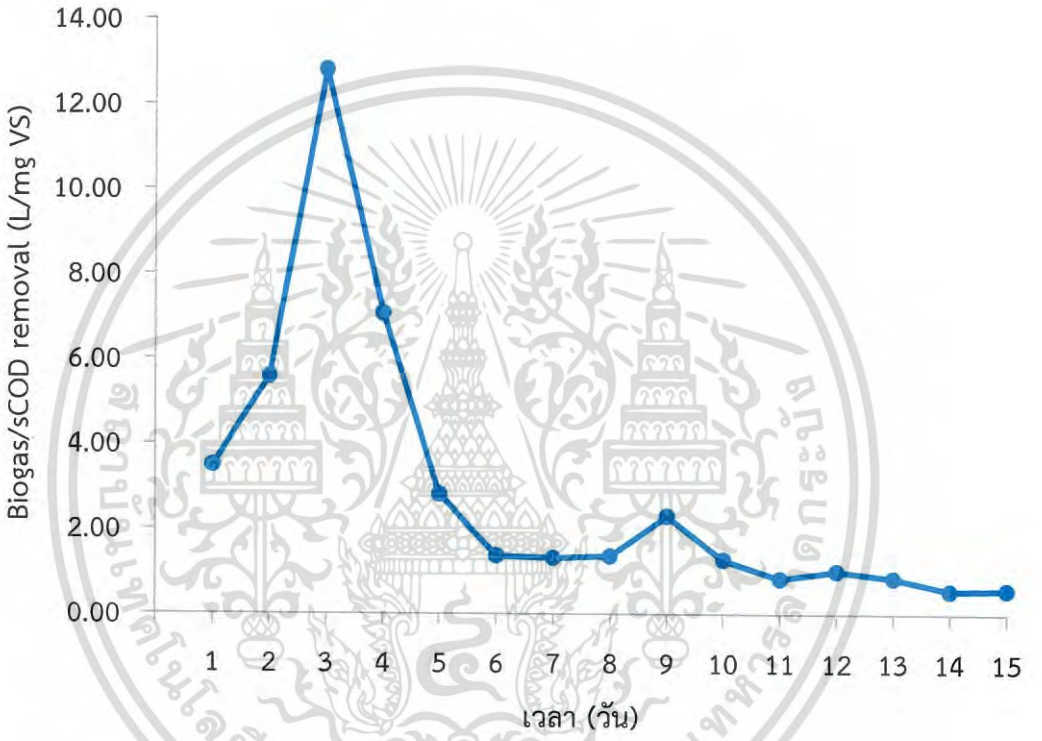
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณโดยนำปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันมาเปรียบเทียบกับค่าของแข็งระเหยง่าย หรือค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียที่ถูกกำจัด ได้ผลดังรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-8 ภาคผนวก ข) จะพบว่าปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อของของแข็งที่ถูกกำจัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 3 ของการทดลองซึ่งมีค่าประมาณ 5.63 L/mg VS จากนั้นจะมีแนวโน้มลดลง และในวันที่ 9-15 ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อของแข็งที่ถูกกำจัดมีแนวโน้มคงที่อัตรา 0.73 L/mg VS สอดคล้องกับงานวิจัยของ ฐิติวรรณและคณะ (2557)

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดที่เวลาในการหมักต่างๆ ในถังหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณโดยนำปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันมาเปรียบเทียบกับซีโอดีที่ละลายน้ำหรือค่าที่บ่งบอกถึงความสกปรกของน้ำเสียที่ถูกกำจัด ได้ผลดังรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-9 ภาคผนวก ข) จะพบว่าปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ละลายน้ำที่ถูกกำจัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 3 ของการทดลองซึ่งมีค่าประมาณ 12.82 L/mg sCOD จากนั้นจะมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม ในวันที่ 6-15 ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ละลายน้ำที่ถูกกำจัดมีแนวโน้มคงที่อัตรา 1.15 L/mg sCOD ซึ่งได้ผลการทดลองมีแนวโน้มเดียวกันกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ของงานวิจัยของ ฐิติวรรณและคณะ (2557)

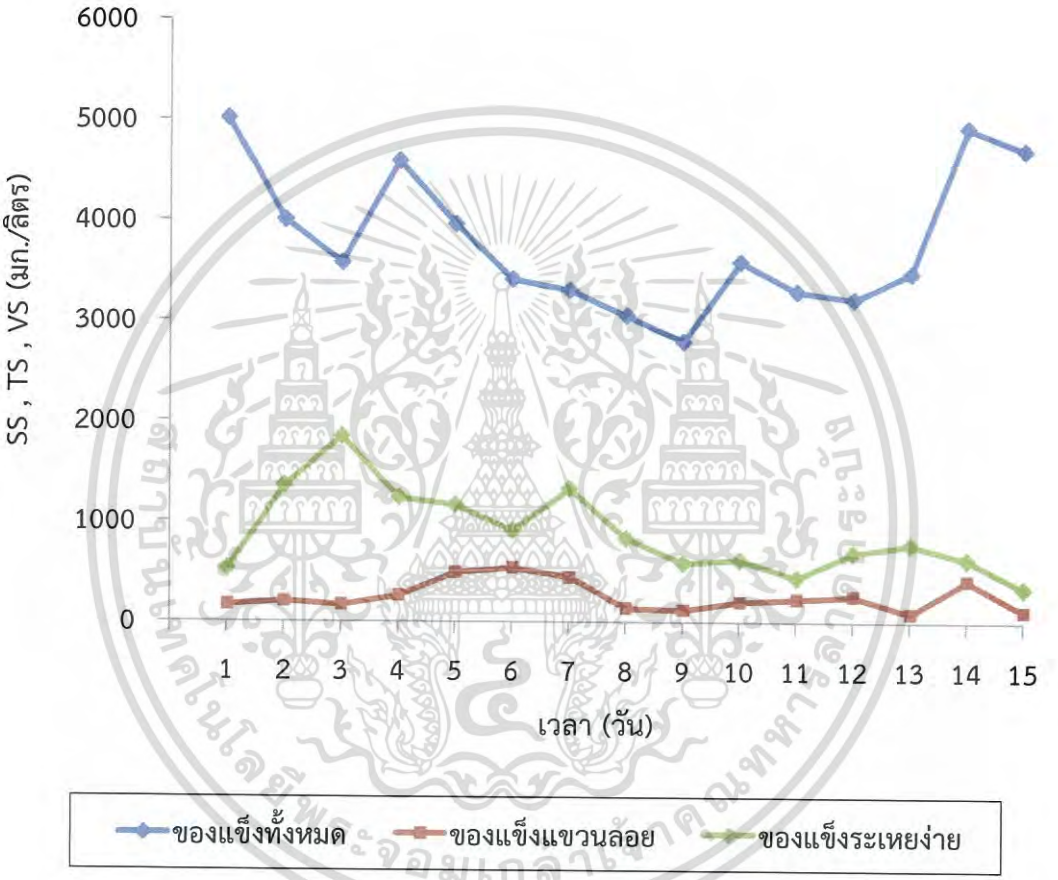


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ละลายน้ำที่ถูกกำจัด ที่เวลาในการหมักต่างๆ ในถังหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของแข็งภายในระบบ

จากรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-10 ถึง ข-12 ภาคผนวก ข) แสดงปริมาณของแข็งแขวนลอย ของแข็งระเหยได้ และของแข็งทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทนมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าค่อนข้างคงที่ แสดงให้เห็นว่าระบบการหมักมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และของแข็งระเหยได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dareioi *et al*. 2010



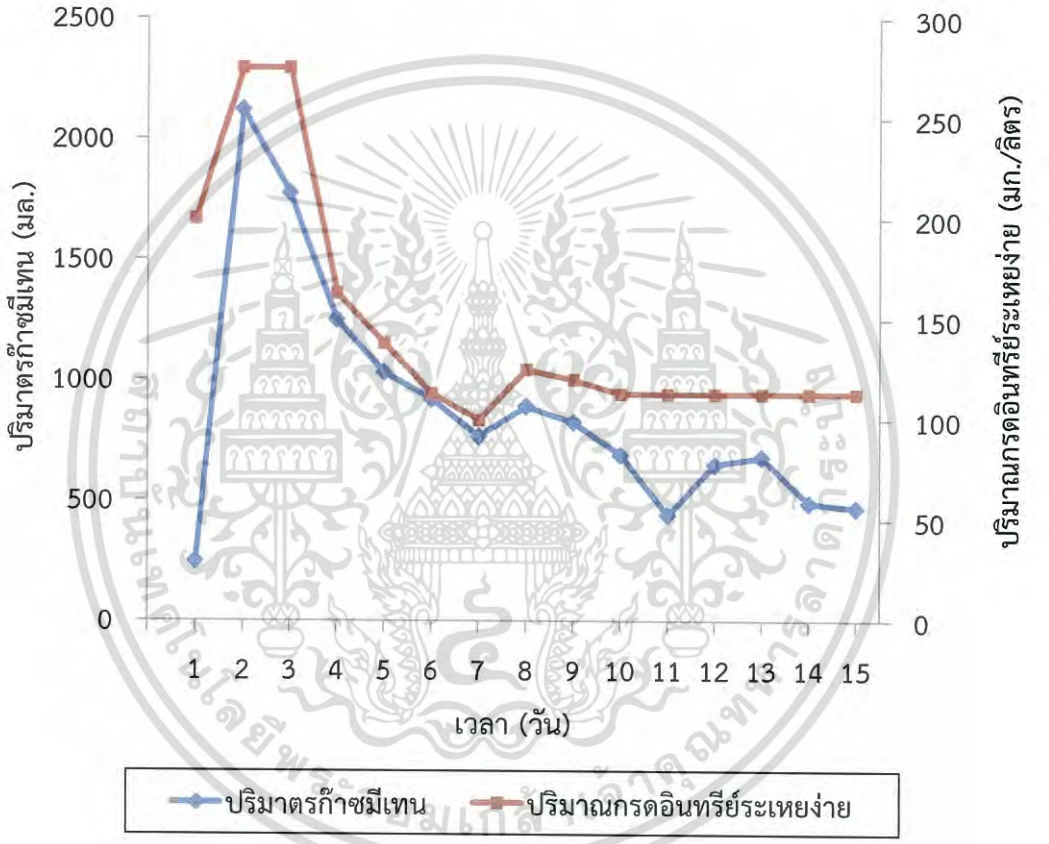
หมายเหตุ: ไม่มีการวัดพารามิเตอร์ในวันที่ 0 เนื่องจากเป็นการวัดพารามิเตอร์จากน้ำทิ้งของถังหมักก๊าซมีเทน โดยจะเกิดขึ้นเมื่อทำการหมักไปแล้ว 1 วัน

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่เวลาต่างๆ ในถังหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ

จากรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-13 ภาคผนวก ข) แสดงว่าในช่วง 1-3 วันแรก ระบบค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าสูง เนื่องจากมีการเติมสารอาหารจากขวดหมักกรดลงไปและเกิดก๊าซมีเทนน้อย และในวันที่ 4 พบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีแนวโน้มลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรก๊าซชีวภาพจะแปรตามปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ฐิติวรรณและคณะ (2557)



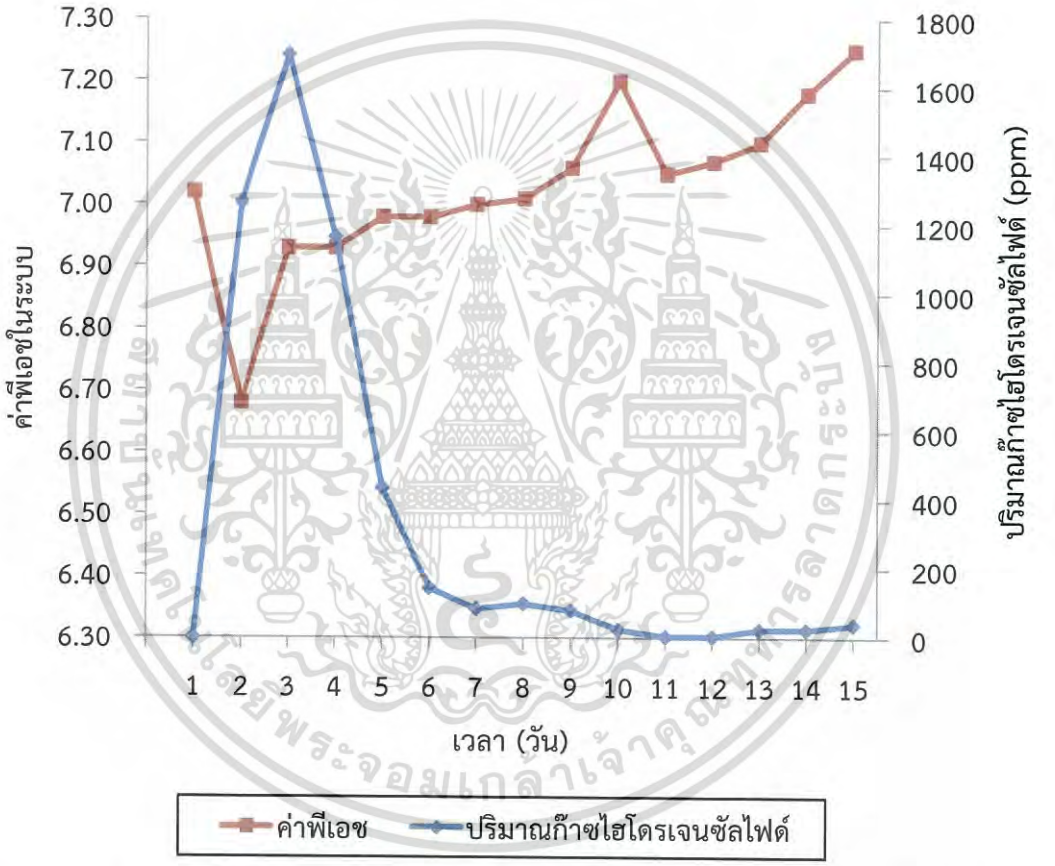
หมายเหตุ: ไม่มีการวัดพารามิเตอร์ในวันที่ 0 เนื่องจากเป็นการวัดพารามิเตอร์จากน้ำทิ้งของถังหมักก๊าซมีเทน โดยจะเกิดขึ้นเมื่อทำการหมักไปแล้ว 1 วัน

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซมีเทนกับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เวลาในการหมักต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4. ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบ

รูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-14 ภาคผนวก ข) แสดงค่าพีเอชและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เวลาในการหมักต่างๆ พบว่าพีเอชของระบบในถังหมักก๊าซมีเทนมีแนวโน้มลดลงในวันที่ 1-3 จากนั้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในวันที่ 3-4 และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ในวันที่ 4-15 มีค่าพีเอชเฉลี่ย 7.03 ซึ่งค่าพีเอชมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ ส่วนปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีค่าลดลง เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพีเอชที่เพิ่มขึ้นทำให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการแตกตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง (มินตราภาและอนุรักษ์, 2558) สอดคล้องกับงานวิจัยของ ฐิติวรรณและคณะ (2557)



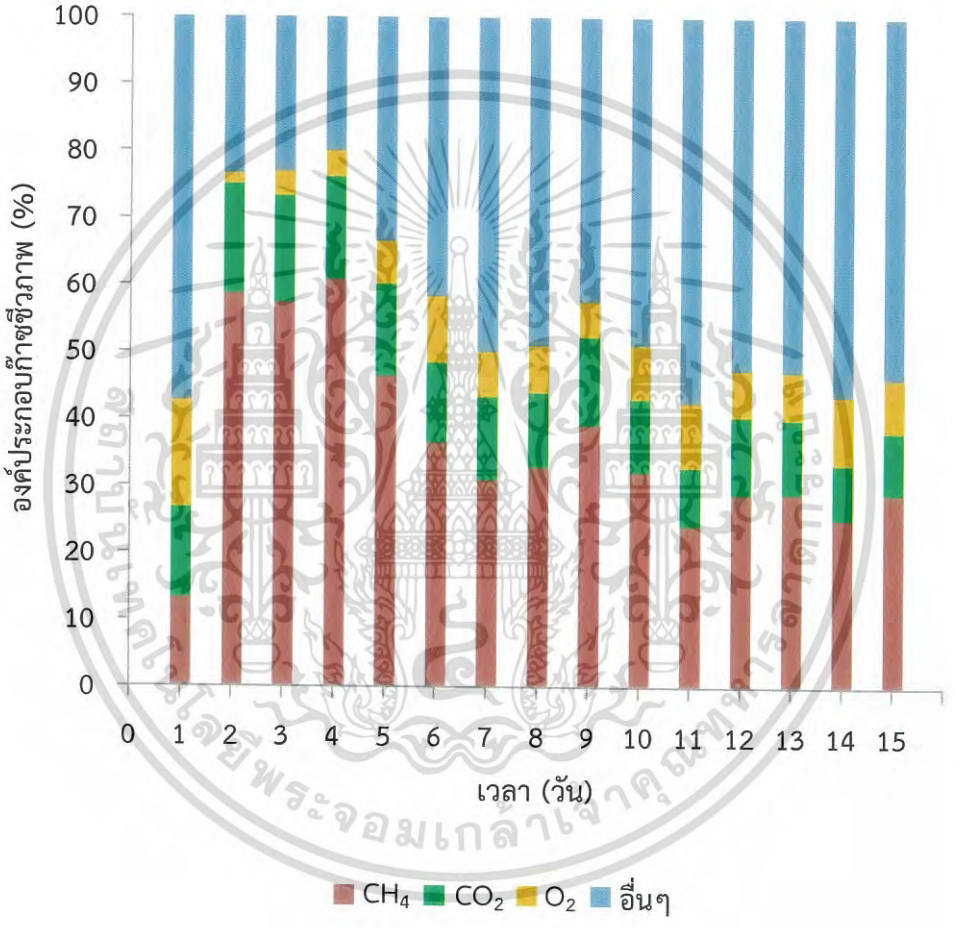
หมายเหตุ: ไม่มีการวัดพารามิเตอร์ในวันที่ 0 เนื่องจากเป็นการวัดพารามิเตอร์จากน้ำทิ้งของถังหมักก๊าซมีเทน โดยจะเกิดขึ้นเมื่อทำการหมักไปแล้ว 1 วัน

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เปลี่ยนแปลงในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

รูปที่ 4.9 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-15 ภาคผนวก ข) แสดงองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เวลาในการหมักต่างๆ พบว่าองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพมีค่า 24.1-60.8% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 8.7-13.7% ก๊าซออกซิเจนมีค่า 3.8-10.2% และก๊าซอื่นๆ มีค่า 20.1-56.5% ทั้งนี้มีปริมาณก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเวลาปั่นกวนทำให้เกิดช่องว่างในจุกซิลิโคนขึ้น ทำให้อากาศภายนอกเข้ามาเล็กน้อย นอกจากนี้การวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพได้ให้ก๊าซไหลผ่าน Na_2SO_4 เพื่อดูดความชื้น ทำให้มีอากาศที่อยู่ในหลอดดูดความชื้นปนเปื้อน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6 ผลการศึกษาสภาวะของของเหลวภายในถังอาหาร (Feed) ถังหมักกรด (Acid tank) และถังหมักก๊าซมีเทน (Methane tank)

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของเหลวภายในขวดอาหาร (Feed) ถังหมักกรด (Acid tank) และถังหมักก๊าซมีเทน (Methane tank)

พารามิเตอร์ที่วัด	ขวดอาหาร (Feed)	ถังหมักกรด (Acid tank)	ถังหมักก๊าซมีเทน (Methane tank)
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	6.14	6.13	7.25
อุณหภูมิ	30°C	35°C	35°C
ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids. SS)	756 ± 61.94 mg/L	481 ± 6.94 mg/L	109 ± 26.74 mg/L
ค่าของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	4,230 ± 65.57 mg/L	3,560 ± 324.50 mg/L	4,713 ± 170.39 mg/L
ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids, VS)	2,887 ± 113.72 mg/L	2,193 ± 202.57 mg/L	192 ± 14.43 mg/L
ค่าไนโตรเจนทั้งหมด	121 mg/L	-	264.99 mg/L
ค่าซัลเฟตทั้งหมด	62.3957 mg/L	-	6.1289 mg/L
ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด	5.8441 mg/L	-	91.1688 mg/L
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)	2,376 mg/L	2,088 mg/L	648 mg/L
ซีโอดีที่ละลายน้ำ (sCOD)	1,728 mg/L	1,008 mg/L	432 mg/L

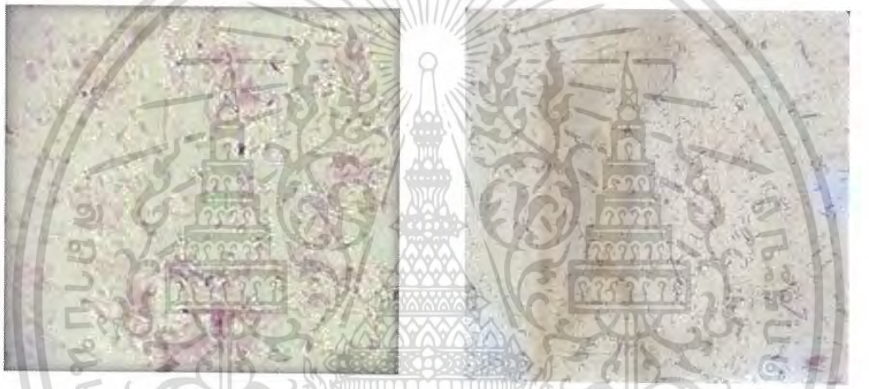
จากตารางที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-16 ถึง ข-23 ภาคผนวก ข) แสดงค่าพีเอชในขวดอาหาร มีค่าพีเอช 6.14 ขวดหมักกรดมีค่าพีเอช 6.13 และในขวดหมักก๊าซมีเทนมีค่าพีเอชเป็น 7.25 ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังมีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ในถังหมักกรด ทำให้มีค่าพีเอชเป็นกรด ส่วนในถังหมักก๊าซมีเทน จุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนจะใช้กรดอินทรีย์เปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพทำให้มีค่าพีเอชสูงขึ้น ค่าของแข็งแขวนลอยและค่าของแข็งทั้งหมดในขวดอาหารมีค่าเฉลี่ย 756 ± 61.94 mg/L และ 4,230 ± 65.57 mg/L ตามลำดับ และในขวดหมักกรดมีค่าเฉลี่ย 481 ± 6.94 mg/L และ 3,560 ± 324.50 mg/L ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ในขวดอาหารมีสถานะเป็นของเหลวซึ่งจุลินทรีย์ในขวดหมักกรดจะเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงจึงทำให้ค่าดังกล่าวมีค่าลดลง และในขวดหมักก๊าซมีเทนมีค่าของแข็งแขวนลอยมีค่า 109 ± 26.74 mg/L ซึ่งมีค่าลดลงจากขวดหมักกรด ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ในขวดหมักกรดใช้สารอินทรีย์เพื่อผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจึงทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยลดลง อย่างไรก็ตาม ค่าของแข็งทั้งหมดมีค่า 4,713 ± 170.39 mg/L ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากขวดหมักกรด ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ตายแล้วได้ปนออกมากับน้ำทิ้งจากถังหมักก๊าซมีเทนจึ่งทำให้ค่าของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเป็นร้อยละ 77.34 และพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (COD) และซีโอดีละลายน้ำ (sCOD) เป็นร้อยละ 72.73 และร้อยละ 75 ตามลำดับ

4.5 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology) ของเชื้อจุลินทรีย์

จากการวิเคราะห์วิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology) ของเชื้อจุลินทรีย์โดยการย้อมแกรมสี แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.10 (ก) พบว่าเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังติดสีแกรมลบ มีลักษณะกลม (coci) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเชื้อแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด และแท่งยาวซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเชื้อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน ส่วนรูปที่ 4.10 (ข) เชื้อจุลินทรีย์จากถังหมักก๊าซชีวภาพติดสีแกรมบวก มีลักษณะเป็นแท่งยาว (rod) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเชื้อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Chem, 2005)



(ก) (ข)

รูปที่ 4.11 ภายถ่ายเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการทดลองโดยการย้อมสีแกรม แล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ก) เชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง

(ข) เชื้อจุลินทรีย์จากถังหมักก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (effluent)

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (effluent) ของถังหมักก๊าซมีเทน

พารามิเตอร์ที่วัด	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ได้จากการทดลอง
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.5-9.0	7.25
อุณหภูมิ	ไม่เกิน 40°C	35°C
ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS)	50 mg/L	109 mg/L
ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen, N)	100 mg/L	264.99 mg/L
ค่าซัลเฟตทั้งหมด (Total sulfate, S)	1 mg/L	6.13 mg/L
ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus, P)	2 mg/L	91.17 mg/L
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)	120 mg/L	648 mg/L
ซีโอดีที่ละลายน้ำ (sCOD)	120 mg/L	432 mg/L

ที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3 (พ.ศ 2539) เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทอุตสาหกรรมและชุมชน

จากตารางที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-16 ถึง ข-23 ภาคผนวก ข) พบว่าน้ำทิ้งที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าของแข็งแขวนลอย ค่าไนโตรเจนทั้งหมด ค่าซัลเฟตทั้งหมด ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด ค่าซีโอดีและค่าซีโอดีที่ละลายน้ำ เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน ยกเว้นค่าความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิอยู่ในช่วงมาตรฐาน ดังนั้นควรทำการบำบัดน้ำทิ้งที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปังในสภาวะไร้อากาศ โดยน้ำเสียมีค่า C/N ratio เท่ากับ 25.62 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำมาหมักก๊าซชีวภาพ จากการทดลองขั้นแรกใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 1 ขั้นตอน พบว่าอัตราการเติมน้ำเสีย 100 มิลลิลิตรต่อลิตรต่อวัน เหมาะในการหมักก๊าซชีวภาพโดยให้ปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงสุด จึงได้นำผลการทดลองดังกล่าวมาใช้ในการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องสองขั้นตอน โดยขั้นตอนนี้ใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศกึ่งต่อเนื่อง 2 ขั้นตอน ทำการศึกษาเป็นเวลา 15 วัน, ระยะการกักเก็บ 10 วัน พบว่าในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าพีเอชอยู่ที่ 6.68-7.25 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ทำการวัดโดยเครื่อง Gas Data meter พบว่ามีสัดส่วนก๊าซมีเทน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซออกซิเจน และก๊าซอื่นๆ เท่ากับร้อยละ 24.1-36.23, 8.2-11.55, 1.5-7.31 และ 20.1-44.91 ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 0.883 ลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัด COD 72.73% ประสิทธิภาพการกำจัด sCOD 75% ซึ่งก่อนการหมักและหลังการหมักมีการศึกษาลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีการย้อมสีแกรม พบว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานขนมปัง ส่วนใหญ่มีลักษณะกลม และย้อมติดสีแดง (แกรมลบ) ซึ่งเป็นลักษณะของจุลินทรีย์ผลิตกรด ส่วนจุลินทรีย์ในถังหมักก๊าซมีเทน ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเส้นบาง ย้อมติดสีม่วง (แกรมบวก) ซึ่งเป็นลักษณะของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียร่วมกับวัตถุดิบอื่น
2) ควรศึกษาประเภทของจุลินทรีย์ในถังหมัก
3) ควรมีการไล่อากาศออกจากระบบถังหมักโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน
4) ควรเปลี่ยนใบพัดกวนเป็นแท่งแม่เหล็กกวน เพื่อลดการรั่วของก๊าซ
5) ควรป้องกันการปนเปื้อนจากอากาศภายนอก ในการหาองค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่อง Gas Data meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2554. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน (พลังงานก๊าซชีวภาพ) ชุดที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท เอเบิล คอนซัล-แตนท์ จำกัด.

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2539. ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. ฉบับที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์คณะรัฐมนตรีและราชกิจจานุเบกษา.

จีรสมัย ดลชม. 2551. ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ระเหยในระบบถังหมักแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.

ชไมพร สมจิตต์. 2555. การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนทางชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตเบียร์โดยการหมักแบบไม่ใช้แสง. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฐิติวรรณ กันเมียน, ณัฐพร ชัยธีระสุเวท, ณัฐวุฒิ ศรีคาดี และพิชามญชุ์ โรจนกุลสุวรรณ์. 2557. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกเผือกโดยใช้ถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 2 ขั้นตอน. โครงงานพิเศษ วิทยาศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ณัฐพงศ์ กลิ่นกรุ่น และสุรีย์พร ไตรภักดี. 2552. การผลิตแก๊สชีวภาพจากมันสำปะหลัง. โครงงานพิเศษ วิทยาศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ธิระศักดิ์ เสภากล่อม. 2552. ก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย เปลี่ยนวิกฤติเป็นโอกาส. โครงงานพิเศษ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

บุญรัตน์ พงษ์อนุวัฒน์, ศิริลักษณ์ ตั้งจิตพิทักษ์กุล และเสาวลักษณ์ แสงพิทักษ์. 2553. การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตไฮศกรีมและเศษอาหารโดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ. โครงงานพิเศษ วิทยาศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ปราโมทย์ ศิริโรจน์. 2551. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร. โครงงานพิเศษ วิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เพ็ชรรัตน์ เชาวกิจ. 2538. การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. โครงงานพิเศษ วิศวกรรมศาสตร-บัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มินตราภา เผ่าธิระยุทธ์ และอนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล. 2558. การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยสารละลาย Fe-EDTA. โครงงานพิเศษ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2553. เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซชีวภาพ. กรุงเทพฯ.

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

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2557. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียแถมได้ก๊าซชีวภาพ ตอน 10. [Online] Available: http://www.nstda.or.th/vdo-nstda/891----10 ค้นเมื่อวันที่ 1 ตุลาคม 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2554. การศึกษาความคุ้มค่าในการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในฟาร์มสุกรภายใต้กลไกการพัฒนาที่สะอาด. กรุงเทพฯ : สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร.

American Society for Testing and Materials. 2010. Annual book of ASTM standards .Section 11, Water and environmental technology. West Conshohocken : American Public Health Association.

American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards 2009 Section11 Water and environmental technology. West Conshohocken : American Public Health Association.

AOAC, International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission. 2006. AOAC International guidelines for laboratories performing microbiological and chemical analyses of food and pharmaceuticals. Gaithersburg : Md.

APHA, AWWA and WEF. 1995. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 19th Edition. USA : American Public Health Association .

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

Li, C., Champagne and Anderson, B.C. 2015. "Enhanced biogas production from anaerobic co-digestion of municipal wastewater treatment sludge and fat, oil and grease (FOG) by a modified two-stage thermophilic digester system with selected thermo-chemical pre-treatment". Renewable Energy. 83, 474-482.

Dalkılıc, K., and Ugurlu, A. 2015. "Biogas production from chicken manure at different organic loading rates in a mesophilic-thermopilic two stage anaerobic system". Bioscience and Bioengineering. 120, 315-322.

Dareioti, M.A. and Kornaros, M. 2014. "Effect of hydraulic retention time (HRT) on the anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes in a two-stage CSTR system". Bioresource Technology. 167, 407–415.

Dareioti, M.A., Dokianakis, S.N., Stamatelatou, K., Zafiri, C. and Kornaro, M. 2008. "Biogas production from anaerobic co-digestion of agroindustrial wastewaters under mesophilic conditions in a two-stage process". Desalination. 248, 891–906.

Dareioti, M.A., Dokianakis, S.N., Stamatelatou, K., Zafiri, C. and Kornaros, M. 2010. "Exploitation of olive mill wastewater and liquid cow manure for biogas production". Waste Management. 30, 1841–1848.

Liu, G., Zhang, R., El-Mashad, H.M. and Dong, R. 2009. "Effect of feed to Inoculums ratios on biogas yields of food and green wastes". Bioresource Technology. 100, 5103-5108.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

McCaarty P.L. 1964. Anaerobic waste treament fundamentals: part one, part three and part four. Public Work 95 (Part 1 September, 107-112; Part 3 November, 91-94; Part 4 December, 95-99.

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

Werner, U., Stohr, U., and Hees, N. 1989. Biogas Plant in Animal Husband 1 st edition Gemany : Friedr.

Yen, H.W. and Brune D.E. 2007. "Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane". Bioresource Technology. 98(8), 130-134.

Zhu, H., Stadnyk, A., Be´land, M. and Seto, P. 2007. "Co-production of hydrogen and methane from potato waste using a two-stage anaerobic digestion process". Bioresource Technology. 99, 5078-5084.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-1 การวิเคราะห์ค่าพีเอช

1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องวัดความเป็นกรด–เบส

2) บีกเกอร์

1.2 วิธีการวัด

1) ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างอิเล็กโทรดและคาโลเมลอิเล็กโทรดให้สะอาด โดยใช้กระดาษทิชชูชนิดเนื้อละเอียดซับน้ำให้แห้ง

2) ปรับเครื่องมือให้ได้ค่ามาตรฐานตามคำแนะนำในคู่มือของเครื่องนั้นๆ ด้วยสารละลายมาตรฐานที่มีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าน้ำเสียตัวอย่างที่ต้องการวัด

3) ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างอิเล็กโทรดอีกครั้ง ซับน้ำให้แห้ง

4) วัดค่าพีเอชของน้ำตัวอย่าง (โดยตัวอย่างที่นำมาวัดต้องมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสารละลายมาตรฐานในข้อ 2)

ก-2 การวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)

ของแข็งทั้งหมด (TS) หมายถึง ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ในภาชนะภายหลังจากระเหยน้ำออกจากตัวอย่างจนหมด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้นจนได้ปริมาณของของแข็งหรือสารทั้งหมด มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) จานระเหย (Evaporating dish)

2) เครื่องอังไอน้ำ (water bath)

3) เครื่องดูดอากาศ

4) เตาอบแห้ง

5) โถทำแห้ง (Desiccator)

6) เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง

2.2 วิธีวิเคราะห์

1) การเตรียมจานระเหย: จานที่ใช้ต้องสะอาดและนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งหาน้ำหนัก สมมติเป็น A มิลลิกรัม

2) เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำให้เหมาะสม โดยปกติใช้ 50 หรือ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3) ค่อยๆ รินตัวอย่างน้ำที่เขย่าให้เข้ากันแล้วลงในถ้วยระเหยที่ตั้งบนเครื่องอังน้ำเมื่อไอน้ำระเหยออกหมดแล้ว

4) ให้นำจานระเหยไปอบที่เตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง ชั่งหาน้ำหนัก สมมติเป็น B มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การคำนวณ

$$\text{ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{(B-A)}{C} \times 10^6$$

เมื่อ A = น้ำหนักจานระเหยอย่างเดียว (กรัม)
B = น้ำหนักจานระเหยและของแข็ง (กรัม)
C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

ก-3 การวิเคราะห์ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS)

ของแข็งระเหยง่าย (VS) หมายถึง ปริมาณของของแข็งที่สลายกลายเป็นไอไปได้ที่อุณหภูมิในช่วง 500±50 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่และไม่สลายไปเรียกว่า ของแข็งที่คงตัว ส่วนใหญ่จะเป็นสารอนินทรีย์

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) จานระเหย (Evaporating dish)
2) เครื่องอังไอน้ำ (water bath หรือ steam bath)
3) เครื่องดูดอากาศ
4) โถทำแห้ง (Desiccators)
5) เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง
6) เตาเผา

3.2 วิธีวิเคราะห์

1) เตรียมจานระเหย โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500±50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นในโถทำแห้งชั่งหาน้ำหนัก

2) ทำซ้ำข้อ 1) จนกระทั่งชั่งจานระเหยได้ค่าน้ำหนักคงที่ หรือน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 4

3) นำจานระเหยที่ชั่งแล้วไปหาปริมาณของแข็งทั้งหมด

4) นำจานระเหยที่ชั่งหาปริมาณของแข็งทั้งหมด สมมติเป็น A มิลลิกรัม แล้วไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500±50 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 30 นาที)

5) ปล่อยให้เย็นลงในโถทำแห้ง ชั่งหาน้ำหนักสารที่เหลืออยู่ สมมติเป็น B มิลลิกรัม

6) ทำซ้ำข้อ 4-5 จนกระทั่งน้ำหนักจานระเหยได้ค่าคงที่หรือน้ำหนักเปลี่ยนแปลง น้อยกว่าร้อยละ 4

3.3 การคำนวณ

$$\text{ของแข็งที่คงตัว (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{(B-A)}{C} \times 10^6$$

เมื่อ A = น้ำหนักจานระเหยอย่างเดียว (กรัม)
B = น้ำหนักจานระเหยและของแข็ง (กรัม)
C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-4 การวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS)

ของแข็งแขวนลอย (SS) หมายถึง ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สามารถกรองได้ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (whatman GF/C) เอสเอสมีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/ลิตร

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
2) ชุดกรองลดความดัน
3) เตาอบแห้ง
4) โถทำแห้ง (Desiccator)
5) เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง

4.2 วิธีวิเคราะห์

1) การเตรียมกระดาษกรอง: นำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งหาน้ำหนัก สมมติเป็น A มิลลิกรัม

2) เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำให้เหมาะสม โดยปกติใช้ 50 หรือ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3) เทลงในกรวยบุชเนอร์และเปิดเครื่องกรองแบบลดความดันด้วยแรงน้ำ จนน้ำแห้ง ล้างด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เปิดเครื่องทิ้งไว้ 3 นาที

4) นำไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5) ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง นากระดาษกรองไปชั่งหาน้ำหนัก สมมติเป็น B มิลลิกรัม

4.3 การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{(B-A)}{C} \times 10^6$$

เมื่อ C = น้ำหนักจานระเหยอย่างเดียว (กรัม)
D = น้ำหนักจานระเหยและของแข็ง (กรัม)
C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

ก-5 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี (โดยวิธีฟลักซ์แบบปิด)

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) ภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย (Digestion vessel) ควรใช้หลอดทดลองที่เป็นบอโรซิลิเคต ซึ่งมี 16×100 หรือ 20×150 หรือ 25×150 มิลลิเมตรพร้อมทั้งฝาจุกที่บุด้วย TFE

2) ฮีตติงบล็อก (heating block) เป็นอลูมิเนียมหล่อ (cast aluminum) มีช่องหลายๆ ช่อง ซึ่งมีความลึก 45 – 50 มิลลิเมตร เป็นช่องที่จะให้หลอดตั้งอยู่ได้

3). เครื่องให้ความร้อนหรือเตาอบ (block heater or oven) ให้ความร้อนอยู่ในช่วง 150 ± 2 องศาเซลเซียส

5.2 สารเคมี

1) สารละลายมาตรฐานโพลแทสเซียมไดโครเมต ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ชั่งสารละลายปฐมภูมิ (Primary standard) โพแทสเซียมไดโครเมต 4.913 กรัม (นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถทำให้แห้ง) เติมน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวริคซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ในเย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วเจือจางให้ปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

2) กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์

ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 8.8 กรัม ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ลิตร ทิ้ง ไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลายได้ทั้งหมดก่อนนำไปใช้

3) เฟอโรอินดิเคเตอร์

ละลายไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปต้าไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) 0.695 กรัม และ [1,10 ฟีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต 1,10 phenanthroline monohydrate ($C_{12}H_8H_2 \cdot N_2O$)] 1.485 กรัมใน น้ำกลั่น และเจือจางให้ปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

4) สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโนเนียมซัลเฟต (FAS) ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล

สารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต [$Fe(NH_4)_2 \cdot 6H_2O$] 19.6 กรัมในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตรให้ละลายทิ้งไว้ให้เย็น ปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร สารละลายนี้ต้องเทียบกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่นำมาใช้ เติมสารเคมีตามตาราง **ก-1** ในภาชนะย่อยสลายแต่ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วไทเทรตด้วย FAS ใช้เฟอโรอินดิเคเตอร์ประมาณ 1-2 หยด ไทเทรตจนถึงจุดยุติสีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

5) สารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต

สารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ($HOOCC_6H_4COOK$) ซึ่งอบที่ 120 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ 425 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นเจือจางจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

5.3 การคำนวณ $K_2Cr_2O_7$

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโนเนียมซัลเฟต (FAS) โมลาริตีของ FAS (ปริมาตรของ $K_2Cr_2O_7$ + 0.0167) / ปริมาณ FAS ที่ใช้ไทเทรต

ตาราง ก-1 ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและวารเคมีสาหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ

ขนาดของหลอดย่อยสลาย (มม.)	ตัวอย่างน้ำ (มล.)	สารละลายในการย่อยสลาย	กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ (มล.)	ปริมาตรทั้งหมด (มล.)
16×100	2.5	1.5	3.5	7.5
20×150	5.0	3.0	7.0	15.0
25×150	10.0	6.0	14.0	30.0

5.4 วิธีวิเคราะห์

1) ล้างหลอดย่อยสลายและฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริกร้อยละ 20 ก่อนนำไปใช้ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนสารอินทรีย์

2) เลือกใช้ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม ตามตาราง **ก-1**

3) กรองตัวอย่างน้ำด้วยเครื่องกรองลดความดัน นำสารตัวอย่างใส่ลงในหลอดย่อยสลาย เติมสารละลายที่ใช้ในการย่อยสลายซึ่งได้แก่ สารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดโครเมต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ให้ไหลลงก้นหลอดแก้ว เพื่อให้ชั้นกรดอยู่ในชั้นตัวอย่างน้ำและน้ำยาย่อยสลาย

5) ปิดจุกให้แน่น แล้วผสมสารละลายให้เข้ากันโดยการคว่ำหงายหลอดแก้ว

6) นำแล้วแก้วไปติดตั้งกับเครื่องย่อยสลาย (Block digester) หรือเตาอบ ซึ่งได้กำหนดอุณหภูมิไว้ 150 องศาเซลเซียส ก่อนใช้เวลารีฟลักซ์ 2 ชั่วโมง แล้วปล่อย ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

7) เปิดฝาจุกแล้วใส่แท่งแก้วที่หุ้มด้วยทีเอฟอี (TFA covered magnetic bar) เติมเฟอโรอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด คนโดยเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) อย่างเร็วขณะที่ไทเทรตด้วย 0.1 นอร์มัลเอฟเอเอส เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีแดงน้ำตาล

5.5 การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี , (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)} = \frac{(A-B)\times M \times 8{,}000}{C}$$

เมื่อ A = ปริมาณของเอฟเอเอสที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์ (มิลลิลิตร)
B = ปริมาณของเอฟเอเอสที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)
M = โมลาริตีของเอฟเอเอส (นอร์มอล)
C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

ก-6 การวิเคราะห์ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายโดยวิธีการไทเทรต (Volatile Fatty Acid)

6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องวัดค่าพีเอช
2) เครื่องกวนและแท่งแม่เหล็ก

6.2 สารเคมี

1) สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.5 โมลาร์
2) สารละลายมาตรฐานโซเดียมออกไซด์ 0.5 โมลาร์

6.3 วิธีวิเคราะห์

1) หาสภาพด่างทั้งหมด

ตวงน้ำตัวอย่างมา 50–200 มิลลิลิตร สมมติเป็น C ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 300 มิลลิลิตร วัดค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำ ไทเทรตตัวอย่างน้ำจนค่าพีเอชถึง 4 ด้วยสารละลายมาตราฐานซัลฟิวริก 0.5 โมลาร์ บันทึกปริมาณกรดมาตรฐานที่ใช้ สมมติเป็น A มิลลิลิตร

2) ต้มไล่กรดคาร์บอนิก

ไทเทรตตัวอย่างน้ำต่อไปจนค่าพีเอชถึง 3.3-3.5 ไม่ต้องบันทึกปริมาณกรดที่ใช้ จากนั้นนำไปต้มจนเดือดประมาณ 2-3 นาที กรดคาร์บอนิกจะถูกไล่ออกไป

3) ไทเทรตกลับ

ปรับค่าพีเอชให้เป็น 4 ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ จดปริมาตรสารละลายที่ใช้ไทเทรตกลับ ตั้งแต่ค่าพีเอช 4 ถึง 7 ซึ่งจะเป็นสภาพด่าง เนื่องจากกรดระเหยง่าย (Volatile Acid Alkalinity) สมมติปริมาณสารมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ สมมติเป็น B มล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 การคำนวณ

สภาพด่างทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตรในรูป $CaCO_3$)

$$= \frac{A \times \text{โมลาริตีของสารละลายมาตราฐานกรดวัลฟิวริก} \times 50 \times 1,000}{C}$$

สภาพด่างวีเอฟเอ (มิลลิกรัม/ลิตรในรูป $CaCO_3$)

$$= \frac{B \times \text{โมลาริตีของสารละลายมาตราฐานกรดวัลฟิวริก} \times 50 \times 1,000}{C}$$

เมื่อ A = ปริมาตรกรด (มิลลิลิตร)
B = ปริมาตรเบส (มิลลิลิตร)
C = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

ก-7 การวิเคราะห์ค่าออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีแอสคอบิกแอซิด

7.1 สารเคมี

1) กรดซัลฟูริก 5 นอร์มัล
เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 70 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร

2) สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต ($K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot \frac{1}{2}H_2O$)
จำนวน 1.3715 กรัม ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตรเติมน้ำจนครบ 500 มิลลิลิตร เก็บในขวดแก้ว

3) สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$)
จำนวน 20 กรัม ในน้ำ กลั่น 500 มิลลิลิตรเก็บในขวดแก้ว

4) สารละลายแอสคอบิก 0.1 โมลาร์
ละลายกรดแอสคอบิก 1.76 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร สารละลายนี้คงตัวอยู่ได้ประมาณ 1 สัปดาห์ และต้องเก็บในตู้เย็น

5) น้ำยารวม (Combined reagent)
ผสมน้ำยารวมเคมีในสัดส่วนสำหรับ 100 มิลลิลิตร. ของน้ำยารวมดังนี้

- กรดซัลฟูริก 5 นอร์มัล 50 มิลลิลิตร
- สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต 5 มิลลิลิตร
- สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 15 มิลลิลิตร
- กรดแอสคอบิก 30 มิลลิลิตร

6) สารละลายสต็อกฟอสเฟต

- สารละลายสต็อคฟอสเฟต
- ละลาย KH_2PO_4 219.5 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นเจือจางเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตรมีปริมาณฟอสเฟต 2.5 ไมโครกรัม

7) สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสารละลายจากข้อ 6 มา 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นครบ 1 ลิตร สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสเฟต 2.5 ไมโครกรัม

7.2 วิธีวิเคราะห์

1) การเตรียมกราฟมาตรฐานที่มีความเข้าข้นระหว่าง 0 – 60 มิลลิกรัม P/ลิตร

ปิเปต สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตมา 0, 2, 6, 10, 16 และ 24 มิลลิลิตรใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตรเติมน้ำยารวม 8.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วย น้ำกลั่นให้ได้ 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที จะได้สารละลายฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 0, 5, 15, 25 และ 40 ไมโครกรัม ฟอสฟอรัส นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเช่นเดียวกับตัวอย่าง

2) ปิเปตตัวอย่างมา 30.0 มิลลิลิตร เติมน้ำยารวม 8.0 มิลลิลิตร และปรับปริมาตร ด้วยน้ำกลั่นให้ ได้ 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที

3) วัดค่าการดูดกลื่นแสงที่ 880 นาโนเมตร นำไปคำนวณค่าฟอสเฟตจากกราฟมาตรฐาน

ก-8 การวิเคราะห์ค่าซัลเฟตด้วยวิธี Turbidimetric Method

8.1 อุปกรณ์และสารเคมี

1) เครื่องกวนแบบแม่เหล็กพร้อมแท่งแม่เหล็ก

2) เครื่องวัดความขุ่นแนฟฟิโลมิเตอร์

3) เครื่องแก้วต่างๆ

4) ผลึกแบเรียมคลอไรด์ $BeCl_2$ ขนาด 20 – 30 mesh

5) สารละลายมาตรฐานซัลเฟตสตอคเข้มข้น 1,000 มก/ล.

6) สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2.6H2O$) กับโซเดียมอะซิเทต ($CH_3COONa•3H_2O$)

8.2 วิธีการวิเคราะห์

1) ขั้นตอนการทำกราฟมาตรฐานซัลเฟต

โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานซัลเฟต 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 0 , 5 , 10 , 15 , 20 , 25 , 30 , 35 , 40 , 45 , 50 , 60 และ 70 มิลลิลิตร ใส่ขวด ปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เพื่อที่จะได้ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซัลเฟต 0 , 5 , 10 , 15 , 20 , 25, 30 , 35 , 40 , 45 , 50 , 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลาดับ

2) เทสารละลายมาตรฐานซัลเฟตใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายบัฟเฟอร์ผสมลงไป 20 มิลลิลิตร จากนั้นกวนสารละลายด้วย เครื่องกวนแบบแม่เหล็ก

3) ค่อยๆเติมผลึกแบเรียมคลอไรด์ประมาณ 0.2–0.3 มิลลิกรัม (ประมาณ 1 ช้อนเล็ก) ลงไป กวนผสมเป็นเวลา 1 นาที

4) นำสารละลายเทใส่หลอดใส่ตัวอย่างน้าเพื่อวัดค่าความขุ่นทุก 30 วินาที เป็น เวลา 4 นาที (การเกิดปฏิกิริยาและสารแขวนลอยในสารละลายจะเกิดประมาณ นาทีที่ 2 และลอยตัวอยู่ในน้าประมาณ 10 นาที)

5) ให้บันทึกผลค่าความขุ่นที่สูงที่สุดของการวัดแต่ละตัวอย่าง

6) นำน้ำตัวอย่างมา 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัฟเฟอร์ผสม 20 มิลลิลิตร กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแบบ แม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ค่อยๆเติมผลึกแบเรียมคลอไรด์ประมาณ 0.2 – 0.3 มิลลิกรัม (ประมาณ 1 ช้อนเล็ก) ลงไป กวนผสมเป็นเวลา 1 นาที

8) นำสารละลายเทใส่หลอดใส่ตัวอย่างน้ำเพื่อวัดค่าความขุ่นทุก 30 วินาที เป็น เวลา 4 นาที

9) ให้บันทึกผลค่าความขุ่นที่สูงที่สุดของการวัดแต่ละตัวอย่าง

10) ทำแบลงค์โดยใช้น้ำตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร เติมผลึกแบเรียมคลอไรด์ ประมาณ 0.2–0.3 มิลลิกรัม (ประมาณ 1 ช้อนเล็ก) ลงไป กวนผสมเป็นเวลา 1 นาที

11) นำสารละลายเทใส่หลอดใส่ตัวอย่างน้ำเพื่อวัดค่าความขุ่นทุก 30 วินาที เป็น เวลา 4 นาที

ก-9 วิธีการตรวจเชื้อที่ใช้ในถังผลิตก๊าซชีวภาพ

9.1 อุปกรณ์และสารเคมี

1) เชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในถังผลิตก๊าซชีวภาพ
2) สีย้อม Safranin, Crystal violet
3) น้ำยาแกรมไอโอดีน (Gram's iodine), แอลกอฮอล์
4) สไลด์
5) ลวดเขี่ยเชื้อ (loop)
6) ตะเกียงแอลกอฮอล์
7) กระดาษเช็ดเลนส์
8) กล้องจุลทรรศน์

ก. การเตรียมสไลด์

สไลด์ที่ใช้ย้อมสีแบคทีเรียต้องสะอาด วิธีทำความสะอาด ใช้นิ้วที่เปียกน้ำแตะสบู่หรือผงซักฟอก แล้วนำมาถูกบนผิวสไลด์ให้ทั่ว ทิ้งไว้พอหมาด ใช้ผ้านุ่มและสะอาดเช็ดคราบสบู่ออกให้หมด การตรวจสไลด์ว่าสะอาดหรือไม่ ทำได้โดยการหยดน้ำลงบนสไลด์ หากสไลด์สะอาดน้ำจะกระจายตัว

ข. การเตรียมเชื้อแบคทีเรียสำหรับการย้อมแกรม

หยดน้ำตัวอย่างลงบนสไลด์หนึ่งหยด นำลวดเขี่ยเชื้อที่เผาไฟแดงแล้วปล่อยไว้ในอากาศ 5-10 วินาที มาเขี่ยเชื้อให้กระจายเป็นแผ่นฟิล์มบางๆบนสไลด์ แล้วนำสไลด์ไปผ่านไฟ 2-3 ครั้ง

9.2 การย้อมสีแบบ gram stain

1) หยดสี crystal violet ลงบนสไลด์ให้ท่วมรอยที่สเมียร์ ทิ้งไว้ 1 นาที

2) ล้างออกด้วยน้ำยาแกรมไอโอดีน แล้วหยดน้ำยาแกรมไอโอดีนให้ท่วมรอยที่สเมียร์ แล้วทิ้งไว้ 1 นาที

3) ล้างน้ำยาแกรมไอโอดีนด้วยน้ำแล้วล้างอีกครั้งด้วยแอลกอฮอล์ 95% หรืออะซิโตนแอลกอฮอล์ จนน้ำที่ล้างไม่มีสีติดออกมา (ใช้เวลาไม่เกิน 20 วินาที ให้ล้างด้วยน้ำทันที)

4) ย้อมทับ (counterstain) ด้วยสี safranin นาน 1 นาที

5). ล้างออกด้วยน้ำสะอาด แล้วปล่อยให้สไลด์แห้งหรือซับให้แห้งด้วยกระดาษซับ

6) ตรวจผลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า และถ่ายรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมปัง

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	ผลการทดลอง
ค่าพีเอช	4.0
ปริมาณคาร์บอน	3,100 มิลลิกรัม/ลิตร
ปริมาณไนโตรเจน	121 มิลลิกรัม/ลิตร
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	25.6198
ปริมาณฟอสฟอรัส	73.44 ± 0.1808 มิลลิกรัม/ลิตร
ค่าซีโอดี	5,360 ± 791.9596 มิลลิกรัม/ลิตร

ตาราง ข-2 ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาต่างๆ ในการหมักแบบหนึ่งขั้นตอน

เวลา (นาที)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)
0	0
15	38
30	80
45	130
60	195
120	445
180	645
240	775
300	835
360	900
420	965
480	1,030
540	1,100
600	1,160
660	1,220
720	1,275
780	1,330
840	1,385
900	1,450
960	1,500
1,020	1,540
1,080	1,595
1,140	1,635

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 (ต่อ) ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาต่างๆ ในการหมักแบบหนึ่งขั้นตอน

เวลา (นาที)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)
1,200	1,695
1,260	1,750
1,320	1,810
1,380	1,870
1,440	1,930
1,500	1,990
1,560	2,045
1,620	2,060
1,680	2,190
1,740	2,240
1,800	2,280
1,860	2,310
1,920	2,370
1,980	2,460
2,040	2,510
2,100	2,560
2,160	2,615
2,220	2,670
2,280	2,720
2,340	2,780
2,400	2,830
2,460	2,890
2,520	2,950
2,580	3,000
2,640	3,045
2,700	3,100
2,760	3,160
2,820	3,215
2,880	3,260
2,940	3,360
3,000	3,380
3,060	3,480
3,120	3,490
3,180	3,550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 (ต่อ) ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาต่างๆ ในการหมักแบบหนึ่งขั้นตอน

เวลา (นาที)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)
3,240	3,605
3,300	3,665
3,360	3,720
3,420	3,780
3,480	3,840
3,540	3,890
3,600	3,920
3,660	3,960
3,720	4,005
3,780	4,060
3,840	4,120
3,900	4,180
3,960	4,250
4,020	4,350
4,080	4,350
4,140	4,395
4,200	4,465
4,260	4,525
4,320	4,575
4,380	4,630
4,440	4,690
4,500	4,740
4,560	4,780
4,620	4,830
4,680	4,880
4,740	4,930
4,800	4,975
4,860	5,130
4,920	5,180
4,980	5,220
5,040	5,290
5,100	5,330
5,160	5,380
5,220	5,420

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 (ต่อ) ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาต่างๆ ในการหมักแบบหนึ่งขั้นตอน

เวลา (นาที)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)
5,280	5,495
5,340	5,535
5,400	5,575
5,460	5,610
5,520	5,650
5,580	5,690
5,640	5,750
5,700	5,810
5,760	5,850
5,820	5,885
5,880	5,935
5,940	5,985
6,000	6,030
6,060	6,065
6,120	6,105
6,180	6,140
6,240	6,175
6,300	6,215
6,360	6,255
6,420	6,290
6,480	6,330
6,540	6,360
6,600	6,395
6,660	6,425
6,720	6,460
6,780	6,500
6,840	6,640
6,900	6,580
6,960	6,600
7,020	6,635
7,080	6,640
7,140	6,720
7,200	6,750
7,260	6,785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 (ต่อ) ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาต่างๆ ในการหมักแบบหนึ่งขั้นตอน

เวลา (นาที)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)
7,320	6,820
7,380	6,840
7,440	6,875
7,500	6,895
7,560	6,930
7,620	6,960
7,680	6,980
7,740	7,010
7,800	7,040
7,860	7,060
7,920	7,080
7,980	7,105
8,040	7,140
8,100	7,320
8,160	7,350
8,280	7,405
8,340	7,450
8,400	7,470
8,460	7,490
8,520	7,500
8,580	7,530
8,640	7,555
8,700	7,580
8,760	7,590
8,820	7,610
8,880	7,620
8,940	7,676
9,000	7,700
9,160	7,710
9,220	7,720
9,280	7,730
9,440	7,740
9,500	7,750
9,560	7,760

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 (ต่อ) ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เวลาต่างๆ ในการหมักแบบหนึ่งขั้นตอน

เวลา (นาที)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)
9,620	7,770
9,680	7,775
9,740	7,780
9,800	7,790
9,860	7,800
9,920	7,810
9,980	7,820
10,040	7,830
10,100	7,840
10,160	7,855
10,220	7,870
10,280	7,880
10,340	7,890
10,400	7,890
10,460	7,900
10,520	7,905
10,580	7,920
10,640	7,930
10,700	7,930
10,760	7,950
10,820	7,980
10,880	7,980
10,940	7,990
11,100	8,000
11,160	8,010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-3 ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ของอัตราการเติมน้ำเสียที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตรต่อลิตร

เวลา (นาที)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD.
0	0	0	0	0	0
5	15	60	0	25	31
10	25	60	10	32	26
15	45	70	15	43	28
20	60	80	25	55	28
30	80	95	35	70	31
60	110	120	60	97	32
120	140	140	90	123	29
180	160	170	100	143	38
240	190	200	120	170	44
300	220	220	140	193	46
360	240	250	155	215	52
420	280	280	180	247	58
480	300	305	200	268	59
540	330	330	215	292	66
600	350	350	230	310	69
660	375	370	250	332	71
720	400	390	285	358	64
780	430	410	310	383	64
840	450	435	325	403	68
900	475	460	340	425	74
960	510	480	360	450	79
1,020	540	510	380	477	85
1,080	560	535	395	497	89
1,140	590	565	410	522	98
1,200	615	590	425	543	103
1,260	670	605	435	570	121
1,340	670	605	435	570	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-4 ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ของอัตราการเติมน้ำเสียที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตรต่อลิตร

เวลา (นาที)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD.
0	0	0	0	0	0
5	10	5	5	7	3
10	20	10	25	18	8
15	40	35	25	33	8
20	70	70	30	57	23
30	90	75	45	70	23
60	125	210	70	135	71
120	150	280	90	173	97
180	175	335	100	203	120
240	200	370	110	227	132
300	200	400	130	243	140
360	250	430	140	273	146
420	270	460	155	295	154
480	300	530	170	333	182
540	320	600	190	370	210
600	345	670	195	403	243
660	370	715	210	432	258
720	395	770	240	468	273
780	410	810	260	493	284
840	440	845	275	520	293
900	470	870	285	542	299
960	500	895	315	570	296
1,020	530	920	340	597	296
1,080	560	940	370	623	290
1,140	615	955	395	655	282
1,200	690	970	415	692	278
1,260	790	990	440	740	278
1,340	790	990	440	740	278

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-5 ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ของอัตราการเติมน้ำเสียที่ปริมาตร 150 มิลลิลิตรต่อลิตร

เวลา (นาที)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD.
0	0	0	0	0	0
5	10	10	5	8	3
10	25	15	10	17	8
15	30	30	15	25	9
20	60	40	15	38	23
30	85	60	45	63	20
60	100	90	50	80	26
120	140	110	80	110	30
180	155	130	130	138	14
240	180	150	155	162	16
300	195	180	186	187	8
360	220	200	205	208	10
420	250	220	235	235	15
480	275	240	265	260	18
540	300	265	290	285	18
600	320	280	310	303	21
660	350	300	330	327	25
720	380	330	350	353	25
780	405	350	380	378	28
840	430	375	395	400	28
900	450	400	430	427	25
960	480	420	450	450	30
1,020	505	440	590	512	75
1,080	555	465	600	540	69
1,140	585	515	620	573	53
1,200	595	565	620	593	28
1,260	625	605	630	620	13
1,340	625	625	630	627	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-6 ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ของอัตราการเติมน้ำเสียที่ปริมาตร 200 มิลลิลิตรต่อลิตร

เวลา (นาที)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD.
0	0	0	0	0	0
5	10	260	0	90	147
10	25	270	10	102	146
15	45	280	25	117	142
20	60	300	30	130	148
30	85	305	45	145	140
60	110	340	70	173	146
120	140	360	95	198	142
180	160	385	110	218	146
240	180	410	120	237	153
300	210	435	145	263	152
360	235	460	160	285	156
420	260	480	180	307	155
480	280	530	200	337	172
540	310	540	210	353	169
600	335	555	225	372	168
660	360	570	240	390	167
720	380	590	270	413	163
780	410	610	300	440	157
840	430	630	310	457	162
900	455	650	320	475	166
960	505	670	335	503	168
1,020	535	690	350	525	170
1,080	555	710	360	542	175
1,140	585	730	375	563	178
1,200	615	745	390	583	180
1,260	665	760	400	608	187
1,340	665	760	400	608	187

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-7 ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่สะสมที่เวลาต่างๆ ในการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องสองขั้นตอน

วันที่	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)
1	245
2	2,120
3	1,775
4	1,250
5	1,030
6	920
7	765
8	890
9	825
10	690
11	440
10	690
11	440
12	650
13	680
14	490
15	470

ตาราง ข-8 ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อของแข็งระเหยที่ถูกย่อยสลาย

วันที่	ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (L/mg VS)
1	0.3045
2	4.2472
3	5.6355
4	2.3139
5	1.8130
6	1.3875
7	1.5098
8	1.2880
9	0.6712
10	0.8971
11	0.5262
12	0.8747

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-8 (ต่อ) ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อของแข็งระเหยที่ถูกย่อยสลาย

วันที่	ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (L/mg VS)
13	0.9532
14	0.6386
15	0.5281
ค่าเฉลี่ย	1.5726
S.D.	1.4927

ตาราง ข-9 ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีละลายน้ำที่ถูกย่อยสลาย

วันที่	ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อการกำจัดซีโอดีละลายน้ำ (L/mg SCOD)
1	3.5015
2	5.5940
3	12.8216
4	7.0791
5	2.8183
6	1.3707
7	1.3179
8	1.3658
9	2.3047
10	1.2829
11	0.8353
12	1.0162
13	0.8593
14	0.5607
15	0.5835
ค่าเฉลี่ย	2.8874
S.D.	3.3435

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-10 ค่าของแข็งทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาต่างๆ

วันที่	ค่าของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	5,010
2	4,000
3	3,575
4	4,590
5	3,960
6	3,410
7	3,305
8	3,050
9	2,795
10	3,590
11	3,295
12	3,220
13	3,480
14	4,930
15	4,713
ค่าเฉลี่ย	3,795
S.D.	708.2208

ตาราง ข-11 ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาต่างๆ

วันที่	ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	163
2	199
3	164
4	255
5	487
6	535
7	442
8	135
9	118
10	198
11	227
12	255

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-11 (ต่อ) ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาต่างๆ

วันที่	ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)
13	85
14	415
15	109
ค่าเฉลี่ย	252
S.D.	146.3840

ตาราง ข-12 ค่าของแข็งระเหยง่ายถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาต่างๆ

วันที่	ค่าของแข็งระเหยง่าย (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	525
2	1,355
3	1,840
4	1,235
5	1,160
6	905
7	1,325
8	830
9	585
10	620
11	440
12	690
13	770
14	625
15	340
ค่าเฉลี่ย	883
S.D.	416.7682

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-13 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายในถังหมักก๊าซมีเทนและปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น

วันที่	ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาตรก๊าซมีเทน (มิลลิลิตร)
1	200	245
2	275	2,120
3	275	1,775
4	163	1,250
5	138	1,030
6	113	920
7	100	765
8	125	890
9	120	825
10	113	690
11	113	440
12	113	650
13	113	680
14	113	490
15	113	470
ค่าเฉลี่ย	146	883
S.D.	58.1908	504.4016

ตาราง ข-14 ค่าพีเอชและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาต่างๆ

วันที่	ค่าพีเอช	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ppm)
1	7.02	0
2	6.68	1,265
3	6.93	1,695
4	6.93	1,165
5	6.98	435
6	6.98	145
7	7.00	85
8	7.01	100
9	7.06	80
10	7.20	25
11	7.05	5
12	7.07	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-14 (ต่อ) ค่าพีเอชและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาต่างๆ

วันที่	ค่าพีเอช	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ppm)
13	7.10	25
14	7.18	25
15	7.25	40
ค่าเฉลี่ย	7.03	340
S.D.	0.1354	556.6015

ตาราง ข-15 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่เวลาต่างๆ

วันที่	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)	ปริมาณความเข้มข้น (%)			
		CH_4	CO_2	O_2	อื่นๆ
1	245	13.2	13.5	15.9	57.4
2	2,120	58.6	16.4	1.5	23.5
3	1,775	57.3	15.9	3.7	23.1
4	1,250	60.8	15.3	3.8	20.1
5	1,030	46.4	13.7	6.4	33.5
6	920	36.5	11.9	9.9	41.7
7	765	30.9	12.4	6.7	50.0
8	890	32.8	11.2	7.0	49.0
9	825	39.1	13.2	5.2	42.5
10	690	32.1	10.9	8.0	49.0
11	440	24.1	8.7	9.6	57.6
12	650	28.8	11.6	6.9	52.7
13	680	28.9	11.1	7.0	53.0
14	490	25.1	8.2	10.2	56.5
15	470	28.9	9.3	7.8	54.0
เฉลี่ย	883	36.2	12.2	7.3	44.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-16 ของแข็งภายในระบบ

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1 (mg/L)	ครั้งที่ 2 (mg/L)	ครั้งที่ 3 (mg/L)	ค่าเฉลี่ย (mg/L)	S.D.
ถังอาหาร					
ของแข็งทั้งหมด	4,240	4,290	4,160	4,230	65.5744
ของแข็งแขวนลอย	827	713	727	756	61.9438
ของแข็งระเหยง่าย	2,760	2,920	2,980	2,887	113.7248
ถังหมักกรด					
ของแข็งทั้งหมด	3,290	3,920	3,470	3,560	324.4996
ของแข็งแขวนลอย	473	483	487	481	6.9389
ของแข็งระเหยง่าย	2,030	2,420	2,130	2,193	202.5669
ถังหมักก๊าซมีเทน					
ของแข็งทั้งหมด	4,620	4,910	4,610	4,713	170.3917
ของแข็งแขวนลอย	107	137	83	109	26.7360
ของแข็งระเหยง่าย	883	850	870	868	16.6233

ตาราง ข-17 ค่าไนโตรเจนของน้ำทิ้งออกจากถังเติมอาหารและถังหมักก๊าซมีเทน

	ความเข้มข้นของไนโตรเจน (มิลลิกรัม/ลิตร)
ถังเติมอาหาร (Feed)	121
ถังหมักก๊าซมีเทน (Methane tank)	264.99

ตาราง ข-18 กราฟมาตรฐานซัลเฟต

STD.	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าความขุ่น (NTU)
1	0	1.47
2	5	75.3
3	10	249
4	20	464
5	25	555
6	30	582

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-19 ค่าซัลเฟตของน้ำทิ้งออกจากถังเติมอาหารและถังหมักก๊าซมีเทน

	ค่าความขุ่น (NTU)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ถังเติมอาหาร (Feed)	22.9	22.4	20.1	21.8
ถังหมักก๊าซมีเทน (Methane tank)	134	130	138	134

จากกราฟมาตรฐานของสารละลายซัลเฟต จะได้สมการ y = 22.987x - 6.8858

จะได้ค่า $X = \frac{y+6.8858}{22.9870}$

Methane tank $= \frac{134+6.8858}{22.9870} = 6.1289$ mg/L

Feed tank $= \frac{21.8+6.8858}{22.9870} = 1.2779$ (เจือจาง 100 เท่า) = 62.3957 mg/L

ตาราง ข-20 กราฟมาตรฐานฟอสฟอรัส

STD.	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0	0
2	5	0.051
3	10	0.119
4	15	0.121
5	20	0.165
6	25	0.195

ตาราง ข-21 ค่าฟอสฟอรัส

	ค่าแสงส่องผ่าน				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	S.D
ถังเติมอาหาร (Feed)	0.018	0.012	0.032	0.021	0.0103
ถังหมักก๊าซมีเทน (Methane tank)	0.061	0.087	0.079	0.076	0.0133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟมาตรฐานของสารละลายฟอสฟอรัส จะได้สมการ y = 0.0077x + 0.0058

จะได้ค่า X = $\frac{y-0.0058}{0.0077}$

Methane tank = $\frac{0.076-0.0058}{0.0077}$ = 9.1169 (เจือจาง 10 เท่า) = 91.1688 mg/L

Feed tank = $\frac{0.021-0.0058}{0.0077}$ = 0.5844 (เจือจาง 10 เท่า) = 5.8441 mg/L

ตาราง ข-22 ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่ออกจากถังหมักต่างๆ

หลอด	ค่า COD (mg O_2/L)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
Blank	-	-	-	-	-
Control	60	60	60	60	0
Feed	2,160	2,808	2,160	2,376	374.1230
Acid Tank	1,944	2,160	2,160	2,088	124.7077
Methane Tank	648	648	648	648	0

ตาราง ข-23 ค่าซีโอดีละลายน้ำของน้ำทิ้งที่ออกจากถังหมักต่างๆ

หลอด	ค่า COD (mg O_2/L)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
Blank	-	-	-	-	-
Control	60	60	60	60	0
Feed	1,728	1,728	1,728	1,728	0
Acid Tank	1,080	1,296	6,48	1,008	329.9455
Methane Tank	432	432	432	432	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค-1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

Soure	DF	SS	MS	F	P
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ	3	163,414	54,471	3.29	0.116
Error	5	82,742	16,548		
Total	8	246,156			

หมายเหตุ ที่ระดับความเชื่อมัน 95%

ตาราง ค-2 ผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อน

อัตราการเติมน้ำเสีย (มล./ล./วัน)	**อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย (มิลลิลิตร)**	Grouping
100	890.0	A
150	626.7	A and B
200	552.5	B
50	532.5	B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้