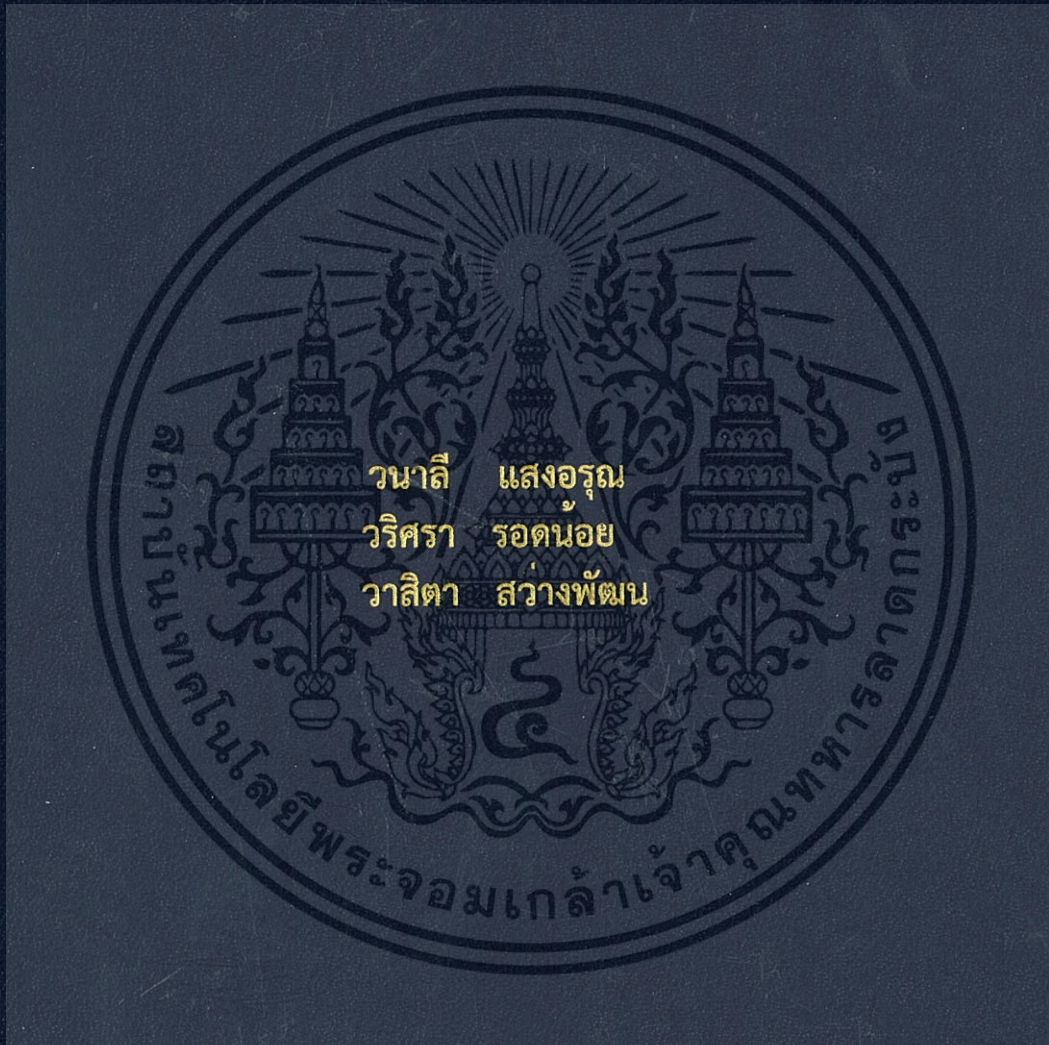


การผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมกันแบบไม่ใช้ออกซิเจน  
ของเศษอาหารและกากไขมันจากโรงอาหาร

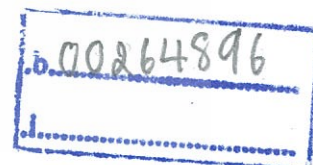
BIOGAS PRODUCTION BY ANAEROBIC CO-DIGESTION  
OF FOOD WASTE, OIL AND GREASE FROM CANTEEN



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมกันแบบไม่ใช้ออกซิเจน  
ของเศษอาหารและกากไขมันจากโรงอาหาร

BIOGAS PRODUCTION BY ANAEROBIC CO-DIGESTION  
OF FOOD WASTE, OIL AND GREASE FROM CANTEEN



TB00038

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# BIOGAS PRODUCTION BY ANAEROBIC CO-DIGESTION OF FOOD WASTE, OIL AND GREASE FROM CANTEEN



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมกันแบบไม่ใช้ออกซิเจนของเศษอาหารและกากไขมันจากโรงอาหาร	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนาถิ์ แสงอรุณ	รหัสนักศึกษา 56050751
	นางสาววิศรา รอดน้อย	รหัสนักศึกษา 56050752
	นางสาววาสิตา สว่างพัฒนา	รหัสนักศึกษา 56050753
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมกันแบบไม่ใช้ออกซิเจนของเศษอาหารและกากไขมันจากโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยใช้เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ ขนาด 4,100 ลิตร โดยเติมเศษอาหาร 28.5 กิโลกรัม และน้ำมันและไขมัน 1.5 กิโลกรัม ต่อน้ำประปา 60 ลิตร ทุกวันจันทร์ถึงศุกร์ ที่ระยะเวลาเก็บ 47 วัน โดยทำการศึกษาสภาวะการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ค่าพีเอช, ค่าสภาพความเป็นด่าง, ค่าของแข็งทั้งหมด, ค่าของแข็งระเหยง่าย, ค่ากรดไขมันระเหย, เปอร์เซ็นต์การกำจัดน้ำมันและไขมัน, อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ จากผลการศึกษาสภาวะในระบบพบว่า ของผสมในระบบมีค่าพีเอชเท่ากับ 6.90 - 8.80, สภาพความเป็นด่าง เท่ากับ 1,905.00 - 3,198.33 มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต, ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 12,705 - 27,566 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปริมาณของแข็งระเหยเท่ากับ 8,815 - 16,479 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ เท่ากับ 2,857.50 - 4,797.50 มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับกรดอะซิติก, ประสิทธิภาพในการกำจัดไขมัน เท่ากับ 55.65% และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 2.60 - 2.70 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดและกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัดเท่ากับ 7.39 - 20.52 ลิตรต่อกรัม และ 0.88 - 1.87 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ

คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ, การหมักร่วมกัน, เศษอาหาร, น้ำมันและกากไขมัน

Title	Biogas Production by Anaerobic Co-Digestion of Food Waste, Oil and Grease from Canteen	
Students	Miss Wanalee Saeng-Aroon	Student ID 56050751
	Miss Waritsara Rodnoi	Student ID 56050752
	Miss Wasita Sawangpatthana	Student ID 56050753
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2016	
Advisor	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon	

### Abstract

This special project studied biogas production by anaerobic co-digestion of food waste, oil and grease from canteen of Faculty of Science, KMITL using a 4,100 L biogas reactor. Food waste 28.5 kg, oil and grease 1.5 kg and tap water 60 kg were added into the reactor every working day (Monday - Friday) for hydraulic retention time (HRT) 47 days. The conditions during biogas production were investigated including pH, alkalinity, TS, VS, VFA, % removal of oil & grease, biogas production rate. The results showed that pH ranges and alkalinity of slurry in the reactor were 6.90-8.80, and 1,905.00 - 3,198.33 mg/L as CaCO<sub>3</sub>, respectively. Amount of total solid, volatile solids and volatile fatty acids were 12,705 - 27,566 mg/L, 8,815 - 16,479 mg/L and 2,857.50 - 4,797.50 mg/L as CH<sub>3</sub>COOH, respectively. The removal efficiency of oil & grease was 55.65%. Biogas production rates ranged from 2.60 to 2.70 m<sup>3</sup>/d. Biogas production rates to volatile solid removal and volatile fatty acid removal by weight were 7.39 - 20.52 L biogas/g VS removed and 0.88 - 1.87 L biogas/g VFA removed, respectively.

**Keywords :** biogas, co-digestion, food waste, oil and grease

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณ ดังนี้  
ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ให้ความช่วยเหลือเสนอแนะ แก้ไขปรับปรุง ให้ความอนุเคราะห์ และเอาใจใส่ในรายละเอียดของการทำโครงการพิเศษอย่างใกล้ชิด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการสอบโครงการพิเศษ และ ดร.เชิดศักดิ์ มณีรัตน์รุ่งโรจน์ กรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะ

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เรียนรู้การจัดการขยะและน้ำเสียชุมชน โดยความร่วมมือระหว่างสำนักสิ่งแวดล้อมกรุงเทพมหานคร และคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณพื้่นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือในการศึกษา และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเอื้ออำนวยในทุกๆด้าน

ขอขอบคุณพื้่นักวิทยาศาสตร์ภาควิชาชีววิทยา ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ การวิเคราะห์ทางชีววิทยา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ ให้ความรู้ อีกทั้งช่วยสนับสนุนในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบคุณร้านค้า และแม่บ้านประจำโรงอาหารใหม่ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกให้กับการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำสำนึกในพระคุณของทุกๆท่าน และขอถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ ให้กำลังใจและคำปรึกษาในการทำโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

วนาลี	แสงอรุณ
วรศรา	รอนน้อย
วาสิตา	สว่างพัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 ก๊าซชีวภาพ .....	3
2.1.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะปราศจากออกซิเจน .....	3
2.1.2 ปัจจัยและสภาพแวดล้อมต่างๆที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	7
2.1.3 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นิยมใช้ .....	11
2.1.4 การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพก่อนการนำไปใช้งาน.....	13
2.1.5 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ.....	14
2.2 ชยะอินทรีย์.....	15
2.2.1 สถานการณ์ชยะในประเทศไทย.....	15
2.2.2 แนวทางการนำกากไขมันไปใช้ประโยชน์.....	18
2.2.3 ผลกระทบของชยะมูลฝอยต่อสภาวะแวดล้อม.....	20
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>24</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	24
3.1.1 สารเคมี.....	24
3.1.2 อุปกรณ์.....	24
3.1.3 วัสดุดิบที่ป้อนเข้าระบบ.....	25
3.1.4 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.5 เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ.....	26
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง.....	26
3.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุป้อน.....	26
3.2.2 ศึกษาสภาวะของระบบในระหว่างการหมักและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	28
3.2.3 วิเคราะห์ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ภายในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ.....	29
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>30</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของเศษอาหารและกากไขมัน.....	30
4.2 ผลการศึกษาสภาวะในการหมักก๊าซชีวภาพ.....	31
4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบ.....	31
4.2.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นด่างทั้งหมดในระบบ.....	31
4.2.3 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ.....	32
4.2.4 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดในระบบ.....	33
4.2.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ.....	34
4.2.6 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมันในระบบ.....	35
4.3 ผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	35
4.3.1 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น.....	35
4.3.2 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหย .....	36
4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบรรยากาศกับปริมาณก๊าซชีวภาพ.....	39
4.3.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ.....	39
4.3.5 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำตะกอน (Slurry) และเปอร์เซ็นต์การกำจัด.....	40
4.4 ผลการวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ.....	41
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>42</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	42
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	42
เอกสารอ้างอิง .....	43
ภาคผนวก.....	47
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์ .....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ก-1 วิธีวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสถานะในระหว่างการหมัก.....	48
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง .....	54
ข-1 คุณลักษณะของเศษอาหารและกากไขมัน.....	54
ข-2 ผลการศึกษาสถานะในระหว่างการหมักก๊าซชีวภาพ.....	55
ภาคผนวก ค การคำนวณ.....	79
ค-1 การคำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน.....	79
ค-2 การคำนวณระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในระบบ.....	86
ค-3 การคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยและ กรดไขมันระเหย.....	87



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ระดับความเข้มข้นของธาตุต่างๆที่เหมาะสมและระดับความเข้มข้นที่เกิดการยับยั้ง.....	9
2.2 องค์ประกอบของน้ำมันและไขมันจากบ้านเรือน.....	17
3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์.....	27
4.1 คุณลักษณะของเศษอาหารและกากไขมัน.....	30
4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมันของวัสดุป้อนและน้ำตะกอน .....	35
4.3 แสดงผลการศึกษ้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหย เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ.....	38
4.4 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ .....	39
4.5 คุณลักษณะของน้ำตะกอน (Slurry) และเปอร์เซ็นต์การกำจัด .....	40
ข-1.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุป้อน.....	54
ข-1.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำตะกอน.....	54
ข-2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของวัสดุป้อน.....	55
ข-2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำตะกอน.....	56
ข-2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของวัสดุป้อน.....	57
ข-2.4 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำตะกอน.....	58
ข-2.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัสดุป้อน.....	59
ข-2.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำตะกอน.....	59
ข-2.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดของวัสดุป้อน.....	60
ข-2.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดของน้ำตะกอน.....	60
ข-2.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยของวัสดุป้อน.....	61
ข-2.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำตะกอน.....	62
ข-2.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมันของวัสดุป้อน.....	63
ข-2.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมันของน้ำตะกอน.....	63
ข-2.13 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในเวลา 24 ชั่วโมง .....	64
ข-2.14 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันช่วงระยะทดลอง .....	65
ข-2.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 1.....	66
ข-2.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 2.....	67
ข-2.17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 3.....	68
ข-2.18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 4.....	69
ข-2.19 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 5.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-2.20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 6.....	71
ข-2.21 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 7.....	72
ข-2.22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 8.....	73
ข-2.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 9.....	74
ข-2.24 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 10.....	75
ข-2.25 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 11.....	76
ข-2.26 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 12.....	77
ข-2.27 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพในระหว่างการหมัก .....	78
ค-1 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน.....	79
ค-2 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหย ที่ถูกกำจัด.....	86
ค-3 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกรดไขมันระเหย ที่ถูกกำจัด.....	87



# สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ.....	5
2.2 ลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน.....	6
2.3 ระบบกวนสมบูรณ์.....	11
2.4 ระบบแอนแอโรบิคคอนแทค.....	12
2.5 การจำลองภายในถัง Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB.....	12
2.6 การจำลองระบบย่อยสลัดจ์แบบราง (Plug Flow Digester).....	13
2.7 ปริมาณขยะในประเทศไทย เปรียบเทียบจากปี พ.ศ. 2551-2557.....	15
2.8 ข้อมูลองค์ประกอบขยะของกรุงเทพมหานคร ปีพ.ศ.2554.....	16
3.1 วัสดุคืบที่ป้อนเข้าระบบ.....	25
3.2 เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ.....	26
3.3 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	28
4.1 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของวัสดุป้อนและน้ำตะกอน ในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ.....	31
4.2 การเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นต่างของวัสดุป้อนและน้ำตะกอน ในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ.....	32
4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัสดุป้อนและน้ำตะกอน ในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ.....	32
4.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายของวัสดุป้อนและน้ำตะกอน ในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ.....	33
4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยของวัสดุป้อนและน้ำตะกอน ในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ.....	34
4.6 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	36
4.7 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด และกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด.....	37
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	39
4.9 ลักษณะเชื้อแบคทีเรียในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพโดยการย้อมสีแกรมแล้ว ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000X.....	41
ข-2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 1.....	66
ข-2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 2.....	67
ข-2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 3.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 4.....	69
ข-2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 5.....	70
ข-2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 6.....	71
ข-2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 7.....	72
ข-2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 8.....	73
ข-2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 9.....	74
ข-2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 10.....	75
ข-2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 11.....	76
ข-2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 12.....	77



## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TS	ของแข็งทั้งหมด
VS	ของแข็งระเหยง่าย
VFA	กรดไขมันระเหย
TN	ไนโตรเจนทั้งหมด
TOC	สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด
HRT	ระยะเวลาที่เก็บสารอินทรีย์ในระบบ
g	กรัม
kg	กิโลกรัม
m <sup>3</sup>	ลูกบาศก์เมตร
m <sup>3</sup> /d	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
L	ลิตร
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/L as CaCO <sub>3</sub>	มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต
mg/L as CH <sub>3</sub> COOH	มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับกรดอะซิติก
ppm	ส่วนในล้านส่วน
L CH <sub>4</sub> /g VS	ลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย
L CH <sub>4</sub> /g VFA	ลิตรมีเทนต่อกรัมกรดไขมันระเหย
°C	องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาด้านขยะและสิ่งปฏิกูลต่างๆในปัจจุบันเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข ปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศ นอกจากนี้ ยังส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและการพัฒนาของประเทศ ขยะจึงเป็นปัญหาสำคัญที่ทั่วโลกให้ความสนใจอย่างกว้างขวาง ปัจจุบันประชากรไทยกว่า 65 ล้านคน ผลิตขยะได้มากถึง 14 ล้านตันต่อปี อย่างไรก็ตาม การจัดการขยะทำได้ไม่ถึง 70% ของขยะที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดมูลฝอยตกค้างในสถานที่ต่างๆหรือถูกนำไปกองทิ้งไว้บนพื้นซึ่งไม่ถูกต้องตามหลักสุขาภิบาล ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) ในปี 2559 มีปริมาณมูลฝอยที่เก็บขนได้ 9,873 ตัน/วัน (กองนโยบายและแผนงานสำนักสิ่งแวดล้อม, 2559) และพบว่ามีปริมาณขยะอินทรีย์สูงสุดถึง 64 % (แผนปฏิบัติการ“ประเทศไทยไร้ขยะ”, 2559)

เศษอาหารเป็นขยะอินทรีย์ประเภทหนึ่งที่มีปริมาณมาก สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีความชื้นสูง เมื่อย่อยสลายเศษอาหารแบบไร้อากาศจะทำให้สารโมเลกุลขนาดใหญ่ถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยแบคทีเรียที่สร้างกรด จากนั้นเมทาโนเจนจะเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ กากไขมันที่เกิดขึ้นจากการประกอบอาหารยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ หากนำไปกำจัดไม่ถูกวิธีหรือเอาไปฝังกลบจะส่งกลิ่นเหม็น ซึ่งลักษณะทั่วไปของกากไขมันจะมีน้ำหนักรวมและลอยน้ำ เป็นอินทรีย์สารที่มีความเสถียรและย่อยสลายโดยแบคทีเรียได้ยาก อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยของนางพรพรและคณะ (2558) พบว่าการหมักเศษอาหารร่วมกับกากไขมันในสภาพไร้อากาศจะเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าเศษอาหารเพียงอย่างเดียว

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและกำจัดกากไขมันโดยการหมักเศษอาหารร่วมกับกากไขมันในสภาวะไร้อากาศและศึกษาสภาวะในระหว่างการหมัก โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งระเหยง่าย ค่าสภาพความเป็นด่าง กรดไขมันระเหย ปริมาณน้ำมันและไขมัน C/N ratio และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักเศษอาหารร่วมกับกากไขมัน
- 2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดกากไขมันด้วยกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ปรับสภาพจุลินทรีย์ในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพโดยเติมเศษอาหาร 28.5 กิโลกรัม ร่วมกับกากไขมัน 1.5 กิโลกรัม (Feed) โดยน้ำหนักเปียก ต่อน้ำประปา 60 ลิตร ในถังหมัก ก๊าซชีวภาพขนาด 4,100 ลิตร เป็นเวลา 23 วัน
- 2) ศึกษาคุณลักษณะของเศษอาหารและกากไขมัน ได้แก่ ความชื้น (Moisture content) และ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)
- 3) ศึกษาคุณลักษณะของส่วนผสมของเศษอาหารและกากไขมันก่อนเข้าระบบ (Feed) พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS) ปริมาณ กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids, VFA) และปริมาณน้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) โดยเก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 3 ครั้ง
- 4) เติมหาอาหาร (Feed) 90 กิโลกรัมต่อวัน เข้าระบบ และถ่ายน้ำตะกอน (Slurry) ออกจากระบบ ปริมาณเท่ากับที่เติม
- 5) คำนวณระยะเวลาที่เก็บสารอินทรีย์ในระบบ (HRT)
- 6) ศึกษาคุณลักษณะน้ำตะกอนที่ถ่ายออกจากระบบ (Slurry) โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ค่า ความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS) ปริมาณกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids, VFA) และปริมาณน้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) โดยเก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 3 ครั้ง
- 7) วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นใน 24 ชั่วโมง พร้อมบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ บรรยากาศ
- 8) ศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพโดยใช้เครื่อง Gas data meter

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ
- 2) ลดปริมาณขยะเศษอาหารและกากไขมัน
- 3) ช่วยลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน องค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ประมาณ 50-70 % และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ประมาณ 30-50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่นๆ เช่น ก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) และไอน้ำ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

#### 2.1.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะปราศจากออกซิเจน (Anaerobic digestion)

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการหมักของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน 2 กลุ่ม คือ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) และจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (methane-producing bacteria) หรือเมทาโนเจนซึ่งกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน (Breure and Van Andel, 1987) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

1) ไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) สารอินทรีย์ (เศษพืชผัก เนื้อสัตว์) มีองค์ประกอบสำคัญคือ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน แบคทีเรีย Hydrolytic bacteria จะปล่อยเอนไซม์เอกซ์ตราเซลลูลาร์ (extra cellular enzyme) มาช่วยย่อยโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อน ให้แตกลงเป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว (monomers) เช่น การย่อยสลายแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส การย่อยสลายไขมันเป็นกรดไขมัน และการย่อยโปรตีนเป็นกรดอะมิโน ดังสมการที่ 2.1-2.3



2) แอซิดิฟิเคชันหรือแอซิโดเจเนซิส (Acidification/Acidogenesis) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงเดี่ยว (monomers) ไปเป็นกรดไขมันที่ระเหยง่าย (volatile fatty acids) แอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และไฮโดรเจน โดย Acidogenic bacteria หรือ Acid forming bacteria ดังสมการที่ 2.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

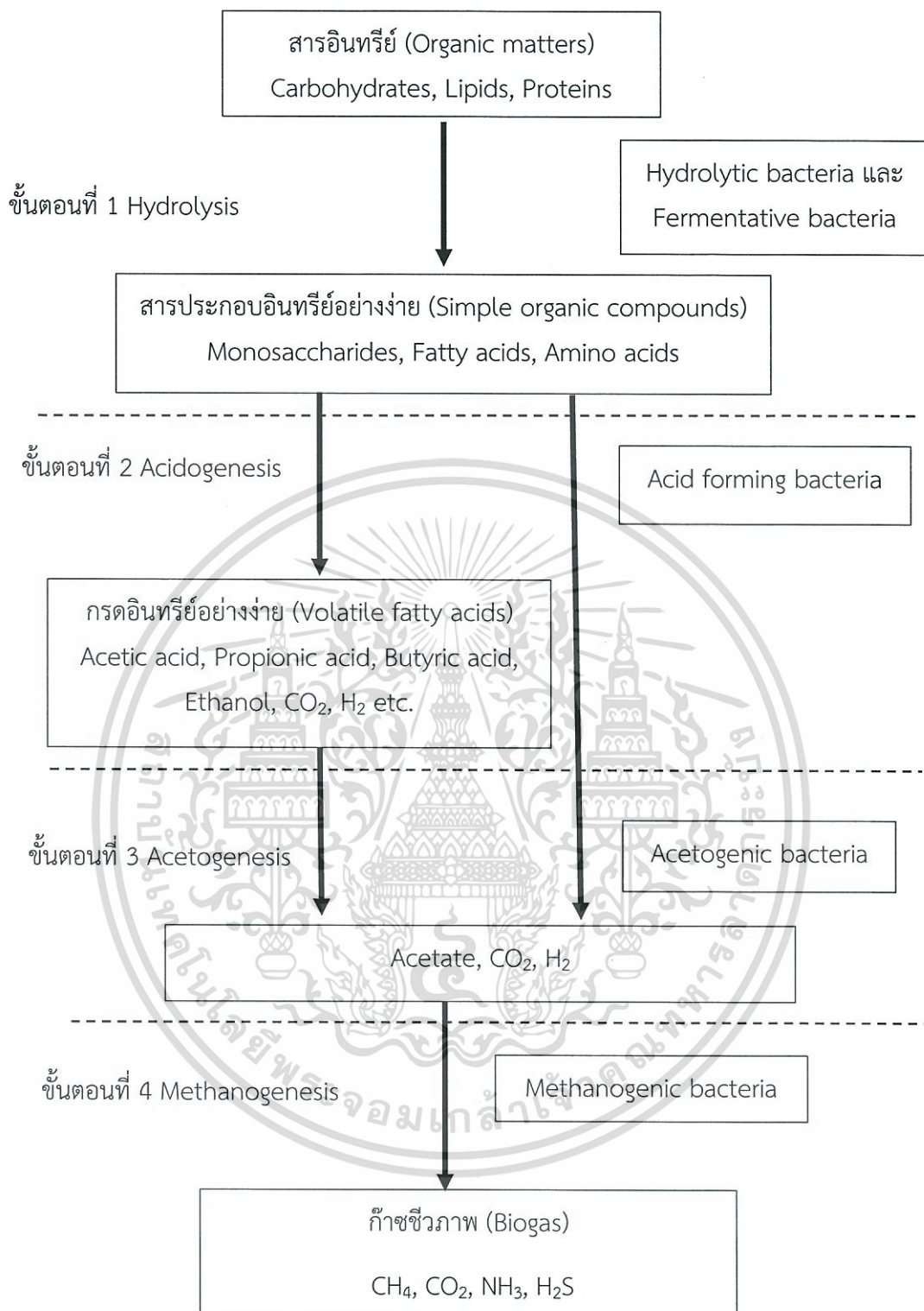
3) อะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) เป็นการเปลี่ยนกรดไขมันที่ระเหยง่าย และแอลกอฮอล์ เป็นกรดอะซิติกหรือเกลืออะซิเตต ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน โดย Acetogenic bacteria ดังสมการที่ 2.5-2.7



4) เมทาไนเซชัน หรือ เมทาโนเจเนซิส (Methanization/Methanogenesis) กรดอะซิติก และกรดอื่นๆ จากชั้นที่ 2 รวมถึงคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนบางส่วน จะเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนเป็นมีเทน โดยเมทาโนเจน (Methanogens) ดังสมการที่ 2.8-2.10



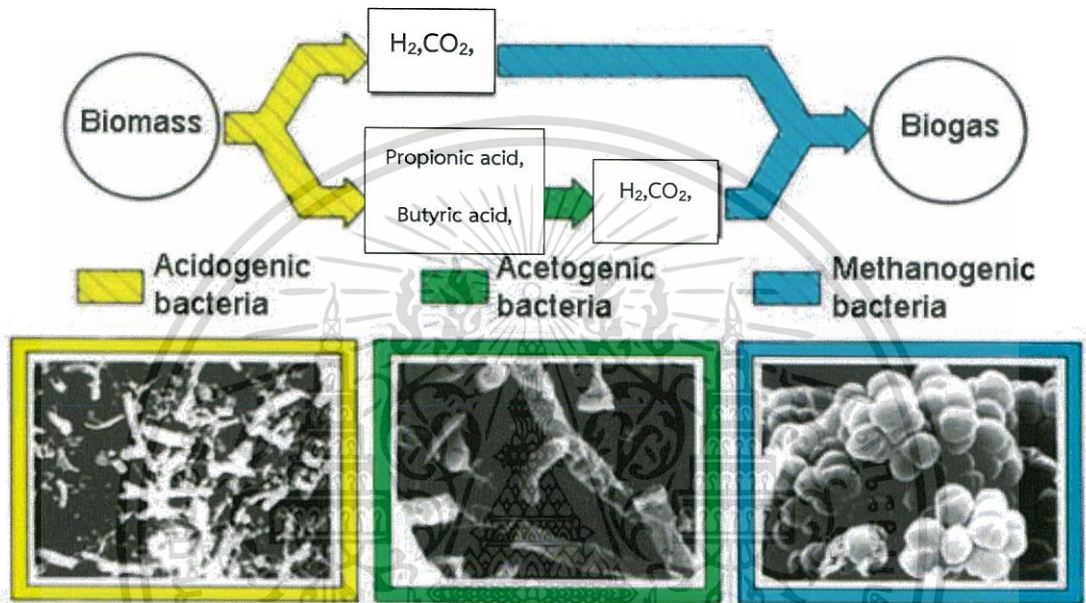
แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการสภาวะที่มีความดันย่อยของไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$  partial pressure) ที่สูง มีผลทำให้ปริมาณการเกิดกรดอะซิติกลดลง โดยสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดไพรูวอิกบิวทริก และเอทานอลเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบมีค่าพีเอชลดลง ไม่เหมาะสำหรับ Acetogenic bacteria แต่แบคทีเรีย Methanogens สามารถดึงไฮโดรเจนไปใช้งานได้ ทำให้มีค่าความดันย่อยของไฮโดรเจนลดลง Acetotrophic methanogens หรือ Acetate-bacteria ทำหน้าที่เปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นมีเทน ดังสมการที่ 2.8 เรียกกระบวนการนี้ว่า Decarboxylation



รูปที่ 2.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกาศ (Breure and Van Andel, 1987)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Methanogenic bacteria เป็นกลุ่มที่พบได้ที่ชั้นตะกอนของแม่น้ำลำคลอง มีทั้งชนิดแกรมบวก และแกรมลบ ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophs และ Acetotrophic methanogens หรือ Acetate splitting bacteria สามารถเปลี่ยนไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 2.10 เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ลดความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนในระบบเพื่อป้องกันการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ จุลินทรีย์ต่างๆในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Verma, 2002)

การจำแนกแบคทีเรีย โดยการย้อมสีวิธี Gram จัดเป็น differential stain การย้อมสีวิธีนี้จะแบ่งแบคทีเรียออกเป็น 2 พวก ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการติดสี แบคทีเรียที่ยังคงติดสี crystal violet (สีน้ำเงินหรือม่วง) หลังจากการล้างด้วยแอลกอฮอล์เรียกว่า "Gram-positive" ส่วนพวกที่ไม่ติดสีของ crystal violet แต่ติดสีที่ย้อมทับ (Counter stain) ของ Safranin (สีแดง) เรียกว่า "Gram-negative" การย้อมสี Gram ในขั้นแรกย้อม smear ด้วยสี crystal violet เซลล์แบคทีเรียทุกเซลล์บน smear จะติดสีน้ำเงินหรือม่วง เนื่องจากผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกมีผนังหนาจึงติดสี crystal violet ได้ดี และเมื่อเติมสารละลายไอโอดีนลงไปจะรวมกับสี crystal violet กลายเป็นผลึกที่มีโครงสร้างซับซ้อน (crystal violet iodine complex) ทำให้สีติดดียิ่งขึ้น ต่อมาเมื่อล้างเซลล์แบคทีเรียด้วย ethyl alcohol 95% ขั้นตอนนี้ แบคทีเรียแกรมลบซึ่งมีไขมันอยู่ในส่วนประกอบของผนังเซลล์มาก ไขมันจะถูกละลายออกมากับแอลกอฮอล์ ทำให้รูผนังเซลล์กว้างขึ้น ผลึกของสีจึงหลุดออกมากับผนังเซลล์ ตอนนี้แบคทีเรียแกรมลบจึงไม่ติดสี ส่วนแบคทีเรียแกรมบวกที่มีส่วนประกอบของผนังเซลล์ที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไขมันอยู่น้อย ผลึกของสียังคงติดแน่นอยู่ (crystal violet สีน้ำเงินหรือม่วง) ซึ่งต่อมาเมื่อย้อมทับด้วย Safranin (สีแดง) ผนังเซลล์ของแบคทีเรียพวกแกรมลบซึ่งเดิมไม่ติดสีจะติดสีแดงในชั้นตอนนี้จึงเห็นความแตกต่างระหว่างแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มอย่างชัดเจน

## 2.1.2 ปัจจัยและสภาพแวดล้อมต่างๆที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ มีดังต่อไปนี้

### 1) พีเอช (pH)

ค่า pH เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญกับการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน โดยมีรายงานว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนนี้ สามารถทำงานได้ดีในช่วง pH ระหว่าง 6.5-7.6 (Strik *et al.*, 2006) หากค่า pH สูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจะลดลงในบางกรณีอาจมีการควบคุมด้วยการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมคาร์บอเนตลงไปเพื่อปรับค่า pH เนื่องจากในสภาวะที่เป็นกรดหรือด่างจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย

### 2) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิที่แบคทีเรียเจริญเติบโตได้ สามารถแบ่งออกได้ 3 ช่วง ได้แก่ ไชโครฟิลิก (Psychrophilic) เป็นช่วงที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส มีโซฟิลิก (Mesophilic) เป็นช่วงที่มีอุณหภูมิระหว่าง 25-40 องศาเซลเซียส และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) เป็นช่วงที่มีอุณหภูมิระหว่าง 45-60 องศาเซลเซียส (El-Mashad *et al.*, 2004) อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ มี 2 ช่วง คือ มีโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก (Athanasouli *et al.*, 2012) แต่ช่วง Thermophilic มีข้อเสียคือ อุณหภูมิอาจเปลี่ยนแปลงหรือไม่คงที่ หากมีการจัดการระบบไม่ดี รวมทั้งการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงๆยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุม

### 3) สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

สภาพความเป็นด่างจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ให้แก่ระบบ ถ้าระบบมีค่าสภาพความเป็นด่างที่สูง แสดงว่าระบบบำบัดมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ได้ดี สามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่าง คงตัวได้นาน แต่ในทางตรงกันข้าม หากระบบมีสภาพความเป็นด่างต่ำ แสดงว่าการสะสมของกรดอินทรีย์ค่อนข้างสูง เป็นสัญญาณเตือนว่าระบบอาจเกิดการล้มเหลว

### 4) กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids, VFA)

กรดไขมันระเหย เช่น กรดบิวทิริก กรดโพรพิโนอิก และกรดวาเลอริก เป็นต้น หากพบว่าการสะสมของกรดไขมันระเหยในระบบปริมาณมาก มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ เนื่องจากกรดเหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์สารตัวกลาง (intermediates) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ระบบที่มีกรดไขมันระเหยสะสมในปริมาณมาก ในช่วงแรกกรดไขมันระเหยจะมีผลทำให้ค่าสภาพความเป็นด่างของระบบลดลง ต่อมาหากยังไม่มี การใช้ หรือกำจัดกรดไขมันระเหยให้มีปริมาณลดลง ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบก็จะต่ำลง ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่าง ลดลงต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยอาจพบในตัวอย่างที่ป้อนเข้าระบบก่อนแล้ว โดยจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดวัสดุที่ป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon/Nitrogen ratio, C/N ratio)

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน มีความสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เนื่องจากคาร์บอนและไนโตรเจนจะถูกแบคทีเรียนำไปสร้างเซลล์ใหม่ โดยช่วง C/N ratio ที่เหมาะสม คือ ช่วงระหว่าง 20-30 (Romano and Zhang, 2007; Kondusamy and Kamamdhad, 2014) ถ้า C/N ratio สูงเกินไป ปริมาณไนโตรเจนจะถูกใช้หมดไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ก๊าซชีวภาพมีปริมาณน้อยลง แต่ถ้ระบบมี C/N ratio ต่ำเกินไปจะทำให้ไนโตรเจนในระบบมีปริมาณมาก ซึ่งจะสะสมอยู่ในรูปของแอมโมเนีย ส่งผลให้ค่า pH สูงขึ้น อาจมากกว่า pH 8 ส่งผลให้แบคทีเรียไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ทำให้ระบบเกิดการล้มเหลว

#### 6) การยับยั้งและสารพิษ (Inhibiting and Toxic Materials)

สารบางชนิดหากมีสารปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นสูง จะส่งผลให้ระบบการทำงานแบบไม่ใช้ออกซิเจนล้มเหลวได้ ความเข้มข้นที่เหมาะสมและระดับความเข้มข้นที่เกิดการยับยั้งและเป็นพิษ แสดงดังตารางที่ 2.1

#### 7) ระยะเวลาที่กักเก็บสารอินทรีย์ในระบบ (Hydraulic retention time, HRT)

ระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์ในระบบ หมายถึง ระยะเวลาที่แบคทีเรียต้องการในการย่อยอาหารให้หมดไป ขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไป ซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน รวมถึงรูปแบบของระบบถังหมัก หากระยะเวลาในการกักเก็บสั้นไปก็จะมีเพียงพอสู่แบคทีเรียในการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ แบคทีเรียยังจะถูกถ่ายออกจากระบบเร็วเกินไป ส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียลดลงไป ทำให้แบคทีเรียที่เหลืออยู่ทำการย่อยไม่ทันและอาจทำให้ค่า pH ในถังหมักลดลง อย่างไรก็ตาม ถ้ระยะเวลาที่กักเก็บนานเกินไป จะทำให้เกิดตะกอนของสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายแล้วสะสมอยู่ ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่โดยไม่จำเป็น ระยะเวลาในการกักเก็บส่วนใหญ่จะประมาณ 14-60 วัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ ค่า TSC อุณหภูมิ ขนาด และปริมาณสารอินทรีย์ที่เติม ระยะเวลาในการกักเก็บนั้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าแบคทีเรียจะมีชีวิตได้นานเท่าไร โดยไม่มีการเติมอาหาร

ตารางที่ 2.1 ระดับความเข้มข้นของธาตุต่างๆที่เหมาะสมและระดับความเข้มข้นที่เกิดการยับยั้งและเป็นสารพิษ

สารตั้งต้น	ปริมาณที่ ต้องการ (mg/L)	สารยับยั้ง (mg/L)		ความเป็นพิษ (mg/L)
		Free ion	As carbonate	
Cr	0.005-50	28-300	530	500
Fe	1-10	-	1750	-
Ni	0.005-0.5	10-300	-	30-1,000
Cu	-	5-300	170	170-300
Zn	-	3-400	160	250-600
Cd	-	70-600	180	20-600
Pb	0.02-200	8-340	-	340
Na	-	5,000-30,000	-	60,000
K	-	2,500-5,000	-	-
Ca	-	2,500-7,000	-	-
Mo	0.05	-	-	-
Co	0.06	-	-	-
Se	0.008	-	-	-
Mn	0.005-50	1,500	-	-
HCN	0.0	5-30	-	-

ที่มา : Deublein and Steinhauser, 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8) ปริมาณของแข็ง (Total solid content, TSC)

ปริมาณของแข็งของสารอินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ ปริมาณของแข็งสูง (High-solid, TSC) สูงกว่า 20% และปริมาณของแข็งต่ำ (Low-solid, TSC) ต่ำกว่า 15% ถึงหมักที่ออกแบบสำหรับเติมสารอินทรีย์ High solid จะต้องใช้พลังงานมากกว่าในการสูบน้ำตะกอน (Slurry) แต่เนื่องจากในระบบ High solid ความเข้มข้นของน้ำในถังหมักสูงกว่าพื้นที่ที่ไซ้ก็จะน้อยกว่า ในทางกลับกัน ถึงหมัก Low solid สามารถใช้เครื่องสูบน้ำทั่วไปที่ใช้พลังงานน้อยกว่าสูบน้ำตะกอน แต่ก็ต้องใช้พื้นที่มากกว่าเนื่องจากปริมาตรต่อสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การที่น้ำตะกอนมีความใสกว่าก็ทำให้การหมุนเวียนและกระจายตัวของของแบคทีเรียและสารอินทรีย์ดีขึ้น และการที่แบคทีเรียสามารถสัมผัสสารอินทรีย์อย่างทั่วถึงก็ช่วยให้การย่อยและการผลิตก๊าซเร็วขึ้น

## 9) การคลุกเคล้า (Mixing)

การคลุกเคล้าตะกอนน้ำและสารอินทรีย์เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งเพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้เกิดก๊าซเร็วขึ้นและมากขึ้น นอกจากนี้ ยังป้องกันการตกตะกอนและตะกอนลอย (Scum) ซึ่งตะกอนอาจจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวจากถัง

## 10) รูปแบบการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ แบ่งเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

10.1) แบบเติมครั้งเดียว (Batch Operation) เป็นการเติมสารอินทรีย์ครั้งเดียวแล้วปล่อยให้สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายจนหมดแล้วจึงถ่ายออกจากระบบ และเติมสารอินทรีย์ลงใหม่ ระบบนี้เหมาะสำหรับวัตถุดิบปริมาณมากๆ แต่นานๆจะมีครั้ง การป้อนสารอินทรีย์แบบเติมครั้งเดียวมีประสิทธิภาพไม่ค่อยดีนัก ระบบไม่ค่อยคงที่ และปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ

10.2) แบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Operation) เป็นการเติมสารอินทรีย์เป็นประจำ วันเว้นวัน หรือวันเว้นสองวัน ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์และขนาดของถังหมัก ผลที่ได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแรก ปริมาตรก๊าซที่ได้ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากแบคทีเรียช่วยให้เกิดสภาวะคงตัว (Steady-State) ของระบบ ช่วยลดปัญหาที่เป็นสาเหตุจากการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบอย่างกะทันหัน

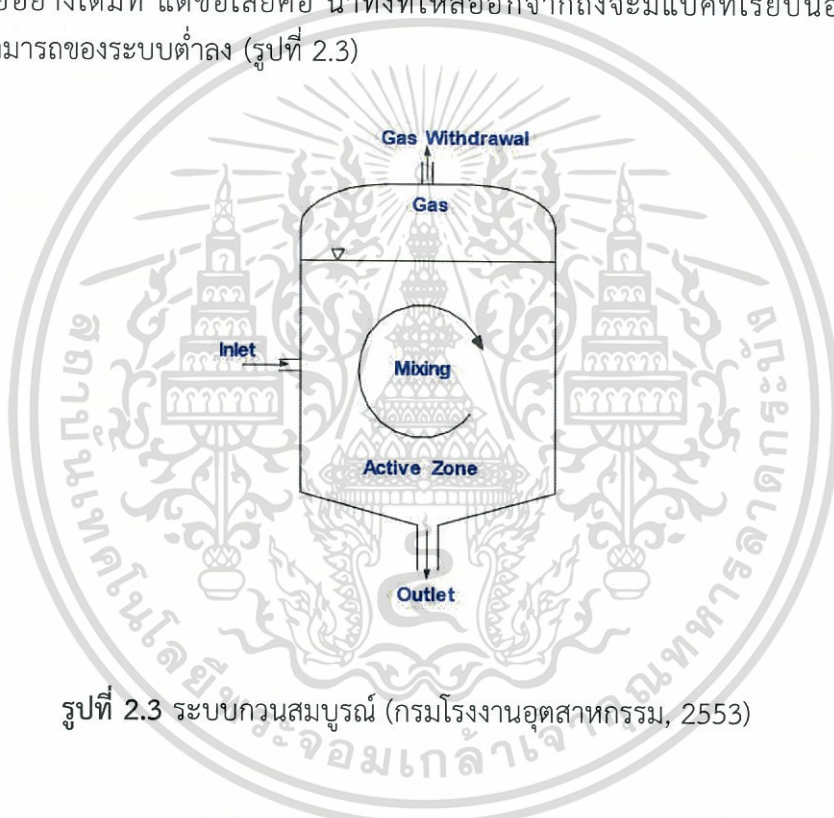
10.3) แบบต่อเนื่อง (Continuous Operation) เป็นการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบและดึงสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้วออกจากระบบอยู่ตลอดเวลา ด้วยอัตราการไหลเข้าและออกคงที่ ระบบนี้มีประสิทธิภาพสูง เหมาะกับโรงงานอุตสาหกรรม และชุมชนขนาดใหญ่ ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นค่อนข้างคงที่ตลอดเวลา

### 2.1.3 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นิยมใช้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ได้แก่

1) ระบบบ่อไร้อากาศ (Anaerobic Ponds) เป็นบ่อที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากค่าใช้จ่ายถูก แต่มีข้อเสียคือเกิดกลิ่นเหม็นรบกวน และใช้พื้นที่มาก

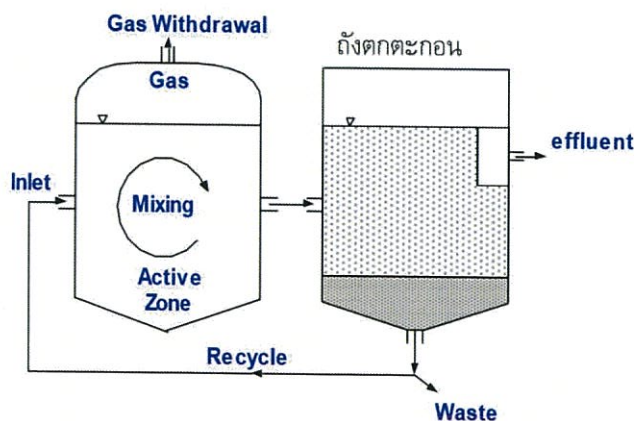
2) ระบบบ่อไร้อากาศแบบคลุมบ่อ (Anaerobic Covered Lagoons) เป็นระบบที่ดัดแปลงมาจากระบบบ่อไร้อากาศ โดยมีการคลุมบ่อเพื่อเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและนำไปใช้ประโยชน์ ข้อดีของระบบนี้คือ ไม่มีกลิ่นเหม็นรบกวนและสามารถใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพได้

3) ระบบกวนสมบูรณ (Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR) โดยทั่วไปมักเป็นถังเหล็กหรือถังคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายในถังมีการกวนผสมน้ำอย่างทั่วถึงเพื่อให้สารอาหารสัมผัสกับแบคทีเรียอย่างเต็มที่ แต่ข้อเสียคือ น้ำทิ้งที่ไหลออกจากถังจะมีแบคทีเรียปนออกไปด้วย ทำให้ความสามารถของระบบต่ำลง (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 ระบบกวนสมบูรณ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

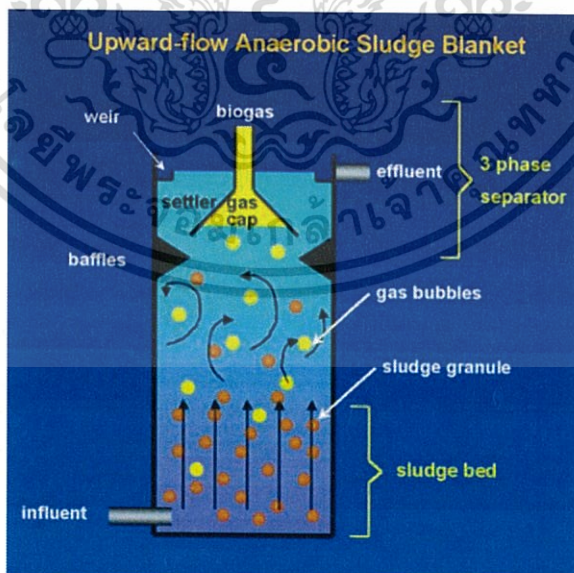
4) ระบบแอนแอโรบิคคอนแทค (Anaerobic Contact, AC) เป็นระบบที่พัฒนาจากระบบกวนสมบูรณ คือมีการนำน้ำที่ไหลออกจากระบบกวนสมบูรณไปแยกตะกอนออกโดยใช้ถังตกตะกอน แล้วสูบทะกอนกลับเข้าสู่ถังกวนสมบูรณเพื่อทำหน้าที่ผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 ระบบแอนแอรอบิคคอนแทค (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

5) ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) จะมีการใส่ตัวกลางซึ่งมักเป็นพลาสติก เพื่อให้แบคทีเรียยึดเกาะติด ไม่ไหลออกไปจากถังผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อน้ำไหลออกนอกถัง ระบบนี้จะทำให้ปริมาณของแบคทีเรียในระบบมีมาก สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี

6) ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) ระบบนี้เป็นที่นิยมอย่างมากทั่วโลก แบคทีเรียในระบบจะรวมตัวจับกันเป็นเม็ดคล้ายกับเม็ดแมงลัก ขนาด 0.4 – 2.0 มิลลิเมตร การรวมตัวของแบคทีเรียปริมาณมาก (ซึ่งแต่ละเซลล์ มีขนาดประมาณ 0.001 มิลลิเมตร) ทำให้ตะกอนเม็ดจมตัวและสะสมในระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้มาก ทำให้ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี (รูปที่ 2.5)

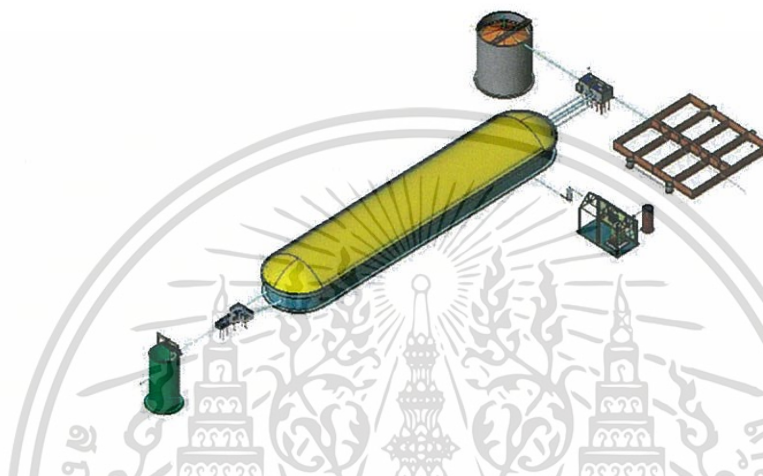


รูปที่ 2.5 การจำลองภายในถัง ระบบยูเอเอสบี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ระบบอีจีเอสบี (EGSB) ระบบนี้พัฒนาต่อเนื่องมาจากระบบยูเอเอสบี เพื่อให้สามารถทำงานได้ดีขึ้น โดยเน้นที่การสัมผัสและการถ่ายเทมวลสารระหว่างแบคทีเรียและสารอาหารให้ดีขึ้น แต่ระบบนี้ก็ต้องการการออกแบบและดูแลที่ดีขึ้น

8) ระบบย่อยสลายแบบราง (Plug Flow Digester) มักนิยมใช้ในฟาร์มหมู ซึ่งมีสารแขวนลอยสูง (รูปที่2.6)



รูปที่ 2.6 การจำลองระบบย่อยสลายแบบราง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

2.1.4 การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพก่อนการนำไปใช้งาน มีข้อที่ควรพิจารณาดังนี้ (พิชญ, 2554)

1) การดักน้ำในท่อส่งก๊าซชีวภาพ ปกติแล้วก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มักจะมี ความชื้นสูง เกือบถึงจุดอิ่มตัว เมื่อก๊าซชีวภาพไหลผ่านท่อส่งก๊าซที่ฝังอยู่ในดินที่มีอุณหภูมิต่ำ มักจะทำให้ ความชื้น (ไอน้ำ) ในก๊าซชีวภาพกลั่นตัวเป็นหยดน้ำและสะสมจนเกิดเป็นอุปสรรคในการส่งก๊าซไปตามท่อได้ ดังนั้น ต้องมีการติดตั้งชุดดักน้ำก่อนนำก๊าซชีวภาพไปใช้งาน

2) การปรับลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในก๊าซชีวภาพ จะทำก็ต่อเมื่อมี ความจำเป็น เช่น ในกรณีที่ก๊าซชีวภาพที่ได้มีสัดส่วนของก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ต่ำมากจนอยู่ในระดับที่จุด ไฟติดยาก คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์  $\text{CH}_4$  น้อยกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ หรือในกรณีที่ต้องการทำให้ก๊าซ ชีวภาพมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติ

3) การปรับลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ปนเปื้อนในก๊าซ ชีวภาพนั้นมีคุณสมบัติเป็นก๊าซพิษ และเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งเป็นสาเหตุของฝนกรดหรือไอกรดที่สามารถกัดกร่อนโลหะและวัสดุอุปกรณ์ได้ ดังนั้น การลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพก่อนการนำไปใช้ประโยชน์จะเป็นผลดีต่อ สิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป และจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2552)

1) นำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาหุงต้มในครัวเรือน เชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง และใช้กับเครื่องกลอุตสาหกรรม

2) นำก๊าซชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานกลไฟฟ้า ได้แก่ ใช้กับชุดเครื่องยนต์สันดาปภายในต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) หรือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) โดยผลิตพลังงานไฟฟ้า เพื่อใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับกิจกรรมการเลี้ยงสัตว์ภายในฟาร์ม หรือสามารถนำไปขับเครื่องสูบน้ำโดยตรง หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่ต้องการต้นกำลัง การนำก๊าซชีวภาพ ไปใช้ในเครื่องยนต์นั้น สามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน 4 รูปแบบ ได้แก่

- เครื่องยนต์เบนซิน หรือ ดีเซลขนาดเล็ก ได้แก่ เครื่องตัดหญ้า เครื่องยนต์ต้นกำลังที่มีขนาด 5-12 แรงม้า นำมาดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพร่วมกับน้ำมันเบนซินหรือดีเซล โดยการทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ประมาณ 80-90 %

- เครื่องยนต์ดีเซลขนาดกลาง นำมาดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพ ร่วมกับการใช้น้ำมันดีเซลโดยการทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ประมาณ 80%

- เครื่องยนต์เบนซิน หรือ ดีเซลขนาดกลางและใหญ่ นำมาดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้ 100 % มีประสิทธิภาพประมาณ 20-25%

- เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพโดยเฉพาะ (เครื่องนำเข้าจากต่างประเทศ) มีประสิทธิภาพประมาณ 40%

3) การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในการผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System) จะเป็นการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้า และความร้อนร่วมกัน ซึ่งเป็นระบบที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการใช้เชื้อเพลิงให้มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งรูปแบบการผลิตพลังงานไฟฟาร่วมกับความร้อนนี้อาศัยหลักการนำความร้อนที่เกิดขึ้นจากระบบการผลิตพลังงานกลและไฟฟ้ากลับมาผลิตเป็นพลังงานความร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น การใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นเครื่องต้นกำลังสำหรับผลิตพลังงานกล /ไฟฟ้า จะเกิดความร้อนในน้ำหล่อเย็นและส่วนของไอเสียเครื่องยนต์ การนำเอาความร้อนทั้งเหล่านี้กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการใช้พลังงานจากก๊าซชีวภาพดังกล่าวเพิ่มขึ้นสูงถึง 70-80% โดยการนำความร้อนทั้งดังกล่าวมาใช้ในการอบแห้ง หรือระบบทำความเย็นแบบดูดซึม

4) การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม การใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในการจัดการน้ำเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ก่อให้เกิดประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม ดังนี้

- ลดปัญหามลพิษทางน้ำ โดยสามารถบำบัดและลดสารปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ตามที่กฎหมายกำหนด

- ลดปัญหากลิ่นเหม็นและแมลง

- ลดการปล่อยทิ้งก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ เป็นการช่วยลดอัตราการเกิดภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น

5) การเกษตร การใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในการจัดการน้ำเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ก่อให้เกิดประโยชน์ด้านการเกษตร ดังนี้

- ผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อใช้ในการเพาะปลูกและปรับปรุงดิน ทั้งในรูปของปุ๋ยแห้งและ

ปุ๋ยน้ำ

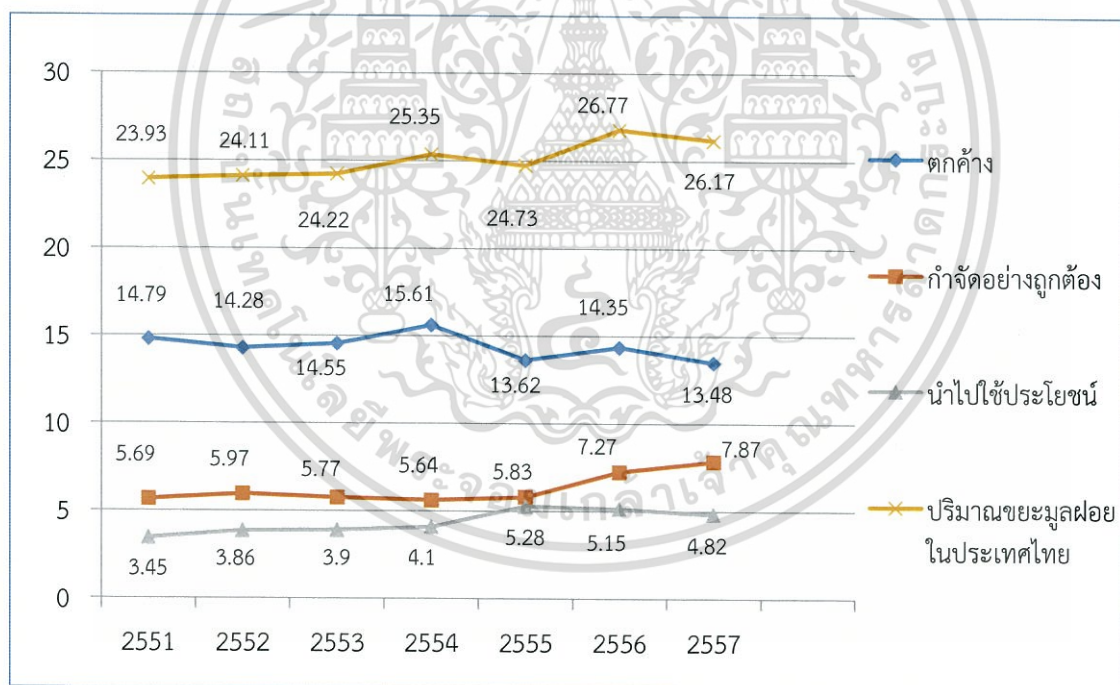
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การย่อยสลายอินทรีย์สารแบบไร้อากาศ ทำให้ปริมาณเชื้อโรคที่เป็นสาเหตุของโรคพืชบางชนิดลดลงและมีส่วนทำลายการงอกของเมล็ดวัชพืชอีกด้วย

## 2.2 ขยะอินทรีย์

### 2.2.1 สถานการณ์ขยะในประเทศไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2558)

ในปี พ.ศ. 2557 ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นจากชุมชนทั่วประเทศ มีปริมาณขยะสะสมประมาณ 14.80 ล้านตัน ปริมาณขยะที่เกิดขึ้นประมาณ 26.17 ล้านตัน ถูกนำไปใช้ประโยชน์ประมาณ 4.82 ล้านตัน โดยร้อยละ 15.06 หรือเฉลี่ย 3.94 ล้านตัน เป็นขยะที่เกิดขึ้นในกรุงเทพมหานคร ปริมาณขยะที่ถูกกำจัดอย่างถูกวิธีตามหลักวิชาการมีเพียง 7.877 ล้านตัน (ร้อยละ 30.10) ส่วนขยะที่เหลือจะกำจัดโดยการเผาทิ้ง กองทิ้งในบ่อดินเก่าหรือพื้นที่รกร้าง ปัจจุบันประเทศไทยมีสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยรวม 2,490 แห่ง แต่เป็นสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยแบบถูกต้องเพียง 466 แห่งหรือคิดเป็นร้อยละ 19 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 81 นั้นเป็นสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยแบบไม่ถูกหลักวิชาการ ประเทศไทยจึงมีขยะมูลฝอยสะสมในปริมาณสูง



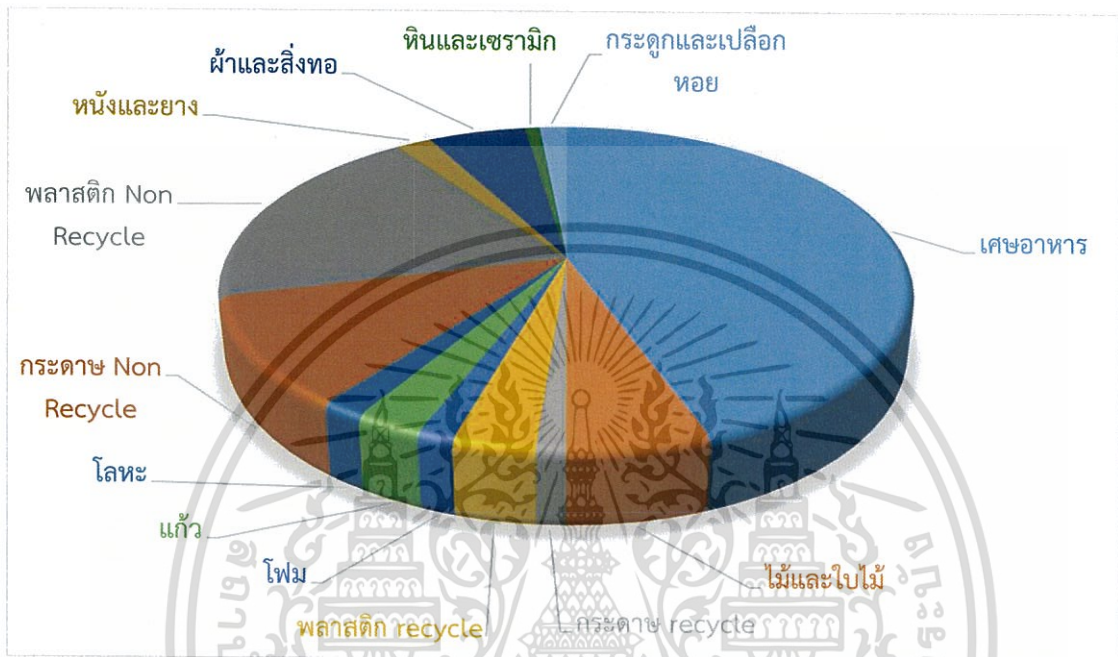
รูปที่ 2.7 ปริมาณขยะในประเทศไทย เปรียบเทียบจากปี พ.ศ. 2551-2557  
(กรมควบคุมมลพิษ, 2558)

จากข้อมูลปริมาณขยะในประเทศไทย เปรียบเทียบจากปี พ.ศ. 2551-2557 พบว่าระหว่างปี พ.ศ.2551 และ พ.ศ. 2554 ปริมาณขยะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับในปี พ.ศ. 2557 พบว่าปริมาณขยะมูลฝอยมีจำนวนน้อยกว่าปี พ.ศ. 2556 เนื่องจากการส่งเสริมให้ประชาชนคัดแยกขยะมูลฝอย

เพื่อลดปริมาณขยะมูลฝอย และขยะมูลฝอยส่วนหนึ่งได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ใหม่มากขึ้น ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) ขยะมูลฝอย

จากข้อมูลของสำนักสิ่งแวดล้อมกรุงเทพมหานคร (2554) พบว่าองค์ประกอบขยะมูลฝอยที่กรุงเทพมหานครเก็บรวบรวมได้ ประกอบด้วยเศษอาหาร ใบไม้ กิ่งไม้ ประมาณร้อยละ 50 ที่เหลือเป็นวัสดุรีไซเคิลร้อยละ 10 ขยะทั่วไปและขยะอันตรายร้อยละ 40 (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 ข้อมูลองค์ประกอบขยะของกรุงเทพมหานครปี พ.ศ. 2554 (สำนักสิ่งแวดล้อมกรุงเทพมหานคร, 2554)

ขยะอินทรีย์ส่วนใหญ่ถูกทิ้งร่วมกับขยะชุมชนทำให้เกิดการเน่าเหม็นและเป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรค ถ้ามีการคัดแยกอย่างมีประสิทธิภาพ ก็จะสามารถนำขยะอินทรีย์และขยะรีไซเคิลกลับมาใช้ประโยชน์ได้มากถึงร้อยละ 80 หรือประมาณ 7,000 ตันต่อวัน ทั้งยังเป็นการช่วยลดปริมาณขยะมูลฝอยที่จะไปฝังกลบและลดปัญหาโลกร้อนจากการฝังกลบขยะมูลฝอย

## 2) เศษอาหาร

ขยะเศษอาหารคือขยะที่เกิดจากการเหลือทิ้งภายในครัวเรือน สถานประกอบการหรือชุมชนในที่ต่างๆ โดยส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย เนื้อสัตว์ ข้าว ผลไม้ และผัก ซึ่งเป็นอินทรีย์วัตถุที่สามารถย่อยสลายเน่าเปื่อยได้ง่าย มีความชื้นสูง หากทิ้งไว้นานจะส่งกลิ่นเหม็นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเศษอาหารเหล่านี้เป็นขยะอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จำพวกไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน โดยสามารถย่อยสลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กได้ เมื่อเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะเกิดก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

ปัจจุบันมีการคิดค้นและพัฒนานำเศษอาหารมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพอย่างกว้างขวาง เนื่องจากองค์ประกอบของเศษอาหารสามารถย่อยสลายได้จึงมีความเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณขยะอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากบริโภคของประชากรในแต่ละวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดประโยชน์สูงสุด จากงานวิจัยของ Gustavsson *et al.* (2011) รายงานว่า วัตถุประสงค์หนึ่งในสามของการผลิตอาหารทั่วโลกกลายเป็นขยะทุกปี ซึ่งแหล่งอาหารเหล่านี้ได้กลายเป็นองค์ประกอบหลักของขยะมูลฝอยเทศบาล เมื่อเศษอาหารเกิดการเน่าเสียจะทำให้สภาพแวดล้อมของเมืองเสียไป แต่เศษอาหารเป็นขยะประเภทชีวมวล สามารถนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ส่งผลให้ลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิล

### 3) กากไขมัน

น้ำเสียจากบ้านเรือนที่มีน้ำมันและไขมันปนเปื้อนส่วนใหญ่มาจากการประกอบอาหาร ซึ่งกากไขมัน น้ำมันและไขมันจะถูกแยกออกจากน้ำเสียโดยบ่อดักไขมัน ลักษณะทั่วไปของน้ำมันและไขมันจะมีน้ำหนักเบาและลอยน้ำ เป็นอินทรีย์สารที่มีเสถียรภาพและย่อยสลายโดยแบคทีเรียได้ยาก โดยทั่วไปน้ำมันและไขมันเป็นองค์ประกอบในน้ำเสียชุมชนประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) องค์ประกอบของน้ำมันและไขมันจากบ้านเรือนแสดงในตารางที่ 2.2

ปริมาณน้ำมันและไขมันในน้ำเสียจากบ้านเรือนและการประกอบอาหารของบ้านเรือน มีประมาณ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากการคาดการณ์โดยการคำนวณประสิทธิภาพของบ่อดักไขมันที่ร้อยละ 60 พบว่าปริมาณไขมันจากบ่อดักไขมันของบ้านเรือนเท่ากับ 0.8 และ 0.2 กิโลกรัม/วัน-ครัวเรือน ขึ้นอยู่กับการติดตั้งและไม่ติดตั้งตะแกรงดักอาหาร ตามลำดับ

ปัจจุบันกากไขมันที่เกิดขึ้นจากการประกอบอาหารมีปริมาณมากขึ้น และเป็นปัญหาในการกำจัด โดยปริมาณกากไขมันจะเพิ่มตามขนาดของพื้นที่ร้านอาหาร จากผลการศึกษาของกรมควบคุมมลพิษ (2551) พบว่า ร้านอาหารขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่มีอัตราการเกิดกากไขมันเท่ากับ 1.5, 4.2 และ 19.2 กิโลกรัมต่อวัน (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ กากไขมันนี้หากนำไปกำจัดไม่ถูกวิธีหรือเอาไปฝังกลบจะส่งกลิ่นเหม็น ขณะที่น้ำชะกากไขมันที่เกิดขึ้นอาจปนเปื้อนสู่น้ำใต้ดินได้หรือถ้านำไปเผาอาจก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศได้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของน้ำมันและไขมันจากบ้านเรือน

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น
ความเป็นกรดต่าง (pH)	-	5-7
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	µS/cm	300 - 2,500
สี (Color)	ADMI	60 – 700
ไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)	mg/L	9 – 106
กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid)	%	0.02-85
น้ำมันและไขมัน* (Oil and Grease)	g/Kg wet	140-850

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของน้ำมันและไขมันจากบ้านเรือน (ต่อ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น
น้ำมันและไขมัน** (Oil and Grease)	mg/L	14 - 38,000
ฟอสฟอรัสรวม (Total phosphorus)	mg/L	0.13 - 100

หมายเหตุ \* กรณีตัวอย่างกากไขมัน มีลักษณะเป็นตะกอน (Sludge)

\*\* กรณีตัวอย่างกากไขมัน มีลักษณะเป็นของเหลว (Liquid)

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2551

### 2.2.2 แนวทางการนำกากไขมันไปใช้ประโยชน์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

กากไขมันที่ได้จากบ่อดักไขมันของแหล่งกำเนิดมลพิษต่างๆสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ เช่น เทียนหอม สบู่เหลวเพื่อการซักล้าง ไบโอดีเซล ปุ๋ยหมักและเชื้อเพลิงอัดแท่ง

#### 1) การทำเทียนหอมหรือเทียนแพนซีเพื่อการประดับตกแต่ง

นำกากไขมันสกปรกไปทำความสะอาด โดยการต้ม ตกตะกอนและกรองเอาสิ่งสกปรกต่างๆออกให้หมด หลังจากนั้นนำไปผสมกับพาราฟิน สี และกลิ่นตามความต้องการ ทำการหล่อขึ้นรูปในแม่พิมพ์และตกแต่งเพื่อความสวยงาม

#### 2) สบู่เหลวเพื่อการซักล้าง

นำกากไขมันสกปรกที่ดักได้จากบ่อดักไขมันไปทำความสะอาดเช่นเดียวกับการทำเทียนหอมและเทียนแพนซี แล้วจึงนำกากไขมันไปผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ น้ำสี และกลิ่น แล้วนำไปบรรจุลงขวด การแปรรูปสบู่เหลวเพื่อการซักล้าง

#### 3) การผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวิธีการทำปฏิกิริยากับสารเคมีชนิดต่างๆ ได้แก่ การทำปฏิกิริยาแบบเอสเทอร์ฟิเคชัน การทำปฏิกิริยาแบบทราน-เอสเทอร์ฟิเคชัน และแบบผสมโดยการทำปฏิกิริยาทั้งสองแบบต่อเนื่องกัน กรณีของการนำกากไขมันจากบ่อดักไขมันมาทำไบโอดีเซลพบว่ามีวิธีการที่เหมาะสมคือ การนำไปทำปฏิกิริยาแบบเอสเทอร์ฟิเคชัน

#### 4) การทำปุ๋ยหมัก

การนำกากไขมันไปหมักทำปุ๋ยโดยการผสมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งที่มีไนโตรเจน เช่น เศษหญ้า กากมะพร้าว และมูลโคแห้ง เป็นต้น จากงานวิจัยของ รัชกรและคณะ (2558) ในการผลิตปุ๋ยหมักร่วมจากกากตะกอนน้ำทิ้ง เศษผักและกากไขมัน พบว่าลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุก่อนการหมักนั้น กากไขมันมีความหนาแน่นมากที่สุด มีค่าพีเอชเป็นกรดจัด มีค่าอินทรีย์คาร์บอนสูง และเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนมากซึ่งมีแนวโน้มการย่อยสลายยาก แต่ก็สามารถนำกากไขมันไปใช้ประโยชน์ในการผลิตปุ๋ยหมักได้ การทำปุ๋ยหมักจากกากไขมันด้วยวัสดุผสมเพียงชนิดเดียว มักมีปัญหาเรื่องกลิ่น และไม่เป็นที่ไปตามมาตรฐานปุ๋ยตามที่กำหนด กระบวนการหมักร่วมกากไขมัน วัสดุเหลือใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในครัวเรือน ปูนขาว กากตะกอนต่างๆ กระจก ปลาป่น และหมักที่อุณหภูมิสูงประมาณ 55 องศาเซลเซียส ช่วยลดกลิ่นและปัญหาจุลินทรีย์ได้ ทำให้มีระดับธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้นและครบตามเกณฑ์

#### 5) การแปรรูปเป็นพลังงานทดแทน

สารในกลุ่มไขมันหรือกากไขมันเป็นกลุ่มที่มีพลังงานสูง ดังนั้น จึงมีนักวิจัยศึกษาการนำกากไขมันไปใช้ประโยชน์ในด้านนี้ได้หลายรูปแบบ เนื่องจากพลังงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันกำลังหมดไปอย่างรวดเร็ว การนำกากไขมันไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนแบ่งเป็น 3 แนวทาง ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

##### - การผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

เชื้อเพลิงอัดแท่ง คือเชื้อเพลิงผสมที่ได้จากกระบวนการผสมของกากไขมันและวัสดุ เผาขึ้นรูปให้เป็นของแข็งให้ความร้อนได้ จากการศึกษาของ อาณัฐและธนบรรจบ (2553) พบว่า สัดส่วนของเศษอาหาร : ผัก : หญ้า : กากไขมัน : แป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วน 4:3:1:1:1 ตามลำดับ ให้ความร้อน 7,070 cal/g

##### - การแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์

การแปรรูปเป็นน้ำมันสำหรับรถยนต์และเครื่องยนต์พบว่า กากไขมันสามารถแปรรูปได้ทั้งเป็นน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันชีวภาพที่ใช้ทดแทนน้ำมันเบนซิน จากการศึกษาศักยภาพในการนำกากไขมันเหลือทิ้งมาผลิตเป็นไบโอดีเซลของสหรัฐอเมริกา พบว่าเป็นไปได้สูง ทั้งในแง่นโยบายกฎหมายท้องถิ่น เศรษฐศาสตร์ ซึ่งมีราคาวัตถุดิบที่ถูก ขนส่งได้ง่าย และมีกากของเสียเหล่านี้ปริมาณมาก

Bailey (2007) นำกากไขมันมาผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยใช้กากไขมัน 150 กรัมเติมในปฏิกรณ์ เวลาหนึ่งชั่วโมงที่ 30 นาที โดยทดลองอยู่ภายใต้สภาวะความดันและอุณหภูมิสูง พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของการทดลองคือ ที่ 380 องศาเซลเซียส ความดันสุดท้ายในปฏิกรณ์ 195.81 บาร์ ได้ผลิตก้น้ำมันชีวภาพ 123.56 กรัมของกากไขมันที่เติมไฮโดรเจน ออกซิเจน และคาร์บอน และมีค่าความร้อน 32,551.33 กิโลจูล/กิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันเบนซิน

สำหรับการนำกากไขมันมาผลิตเป็นพลังงานเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลหรือการผลิตเป็นไบโอดีเซลนั้น กระบวนการที่ใช้ผลิตเป็นกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชัน จำนวนขั้นตอนหรือกระบวนการที่ใช้จะเพิ่มขึ้นตอนทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยหรือไม่และควรใช้ตัวเร่งชนิดใดกรดหรือด่างนั้น ควรพิจารณาจากลักษณะของกากไขมันเหลือใช้ตั้งต้น หากกากไขมันเหลือใช้มีกรดไขมันอิสระสูง ควรใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเพิ่มเติมเข้าไปอีกขั้นเป็นแบบสองขั้นตอน เพื่อให้ได้น้ำมันที่มีคุณภาพดีเป็นไปตามมาตรฐานมากขึ้น

##### - การแปรรูปเป็นก๊าซชีวภาพ

ด้วยคุณสมบัติของกากไขมันที่มีโมเลกุลประกอบด้วยสารอินทรีย์ไฮดรอกซิล มีปริมาณคาร์บอนสูง ดังนั้นนักวิจัยจึงสนใจนำมาย่อยสลายด้วยกระบวนการไร้อากาศ เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนซึ่งเป็นเชื้อเพลิงได้ จากการศึกษาศักยภาพผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมกันของของเสียจากภัตตาคารและความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลอง พบว่าการเพิ่มกากไขมันในระบบ

ทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นมากกว่า 100% สามารถลดขยะชีวภาพได้มากกว่า 1,000 ตันต่อเดือน ผลิตไฟฟ้าได้ 15 เมกะวัตต์ต่อวัน (Bailey, 2007)

การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากไขมันเหลือใช้เหมาะสำหรับการนำไปหมักร่วมกับขยะชีวภาพอื่นๆ โดยเฉพาะโปรตีน คาร์โบไฮเดรต เนื่องจากไขมันช่วยเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนได้ในระดับที่สูงขึ้น จะทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพหรือปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้มากขึ้น นอกจากนี้การหมักร่วมโปรตีนจะช่วยให้พีเอชของระบบหรือความเป็นกรดต่างสมดุล ให้สัดส่วนธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ ทำให้อัตราการผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น สำหรับการพัฒนาระบบการหมักร่วมกากไขมันเหลือใช้กับเศษอาหารจากครัวเรือนนั้น ควรพัฒนาด้านสายพันธุ์ของกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารชีวโมเลกุลแบบสายยาว เพื่อลดระยะเวลาและลดปริมาณกากตะกอน

### 2.2.3 ผลกระทบของขยะมูลฝอยต่อสภาวะแวดล้อม (เทศบาลทุ่งสง, 2554) มีดังนี้

#### 1) เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลง และพาหะของโรค

ขยะเศษวัสดุ ของเสีย มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น หากใช้วิธีกำจัดที่ไม่ถูกต้องเหมาะสมจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับขยะมูลฝอยจะขยายพันธุ์เพิ่มจำนวนมากขึ้น เพราะขยะมูลฝอยมีทั้งความชื้นและสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ใช้เป็นอาหาร ขยะอินทรีย์ที่ทิ้งค้างไว้จะเกิดการเน่าเปื่อยกลายเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลงวัน นอกจากนี้ ขยะที่ปล่อยทิ้งไว้นานๆ จะเป็นที่อยู่อาศัยของหนู ดังนั้น ขยะที่ขาดการเก็บรวบรวมและการกำจัด จึงทำให้เกิดเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ที่สำคัญของเชื้อโรค แมลงวัน หนู แมลงสาบ ซึ่งเป็นพาหะนำโรคมาลู่คน

#### 2) เป็นบ่อเกิดของโรค

การเก็บรวบรวมและการกำจัดขยะมูลฝอยไม่ดีหรือมีขยะมูลฝอยเหลือทิ้งค้างไว้ในชุมชน เป็นบ่อเกิดของเชื้อโรคต่าง ๆ เช่น ตับอักเสบบี เชื้อไทฟอยด์ เชื้อโรคเอดส์ ฯลฯ

#### 3) ก่อให้เกิดความรำคาญ

ขยะมูลฝอยเก็บรวบรวมได้ไม่หมดจะเกิดเป็นกลิ่นรบกวนกระจายอยู่ทั่วไป นอกจากนี้ฝุ่นละอองที่เกิดจากการเก็บรวบรวม การขนถ่าย และการกำจัดขยะยังก่อให้เกิดเหตุรำคาญ

#### 4) ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ขยะมูลฝอยเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดมลพิษของน้ำ มลพิษของดินและมลพิษของอากาศ เนื่องจากขยะตกค้างหรือไม่ถูกกำจัดอย่างถูกวิธี ถูกกองทิ้งไว้เมื่อมีฝนตกลงมา จะชะควมสกปรก เชื้อโรค สารพิษจากขยะไหลลงสู่แหล่งน้ำทำให้เกิดเน่าเสียได้ นอกจากนี้ ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพดินซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของขยะมูลฝอย ถ้าขยะมีซากถ่านไฟฉาย ซากแบตเตอรี่ ซากหลอดฟลูออเรสเซนต์มาก ก็จะส่งผลกระทบต่อปริมาณโลหะหนักพวกปรอท แคดเมียม และตะกั่วในดินมาก ส่งผลเสียต่อระบบนิเวศในดิน สารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยเมื่อมีการย่อยสลายจะทำให้เกิดสภาพความเป็นกรดในดิน และเมื่อฝนตกมาชะกองขยะมูลฝอยจะทำให้ น้ำเสียจากกองขยะมูลฝอยไหลปนเปื้อนดินบริเวณรอบๆ ทำให้เกิดมลพิษของดินรวมถึงการนำมูลฝอยไปฝังกลบหรือการนำไปทิ้งทำให้ของเสียอันตรายปนเปื้อนในดิน ถ้ามีการเผาขยะมูลฝอยกลางแจ้ง ทำให้เกิดควันที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารพิษปนเปื้อนส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอากาศเสีย นอกจากนี้ ยังเกิดกลิ่นเหม็นที่เกิดจากการเน่าเปื่อยและสลายตัวของสารอินทรีย์

#### 5) เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ

ขยะมูลฝอยปริมาณมาก ๆ ต้องสิ้นเปลืองงบประมาณในการจัดการอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ นอกจากนี้ ผลกระทบจากขยะมูลฝอยไม่ว่าจะเป็นน้ำเสีย อากาศเสีย ดินปนเปื้อนเหล่านี้ย่อมส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศ

#### 6) ทำให้ทัศนียภาพไม่ชวนมอง

หากเก็บขนขยะไม่ดี หรือไม่หมดจะก่อให้เกิดความไม่น่าดู ขาดความสวยงาม บ้านเมืองสกปรก และความไม่เป็นระเบียบ ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมการท่องเที่ยว

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Domingues *et al.* (2015) ศึกษาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของไขมันในนมบูด แยกย่อยโดยเอนไซม์ 2 ชนิด จากแบคทีเรีย *Geotrichum candidum* และ *Candida rugosa* ประเมินกลไกปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่ส่งผลกระทบต่อกรย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนพบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและโดยเฉพะการผลิตมีเทน ระบุว่ากรย่อยโดยเอนไซม์จากแบคทีเรีย *Candida rugosa* ให้ผลผลิตสูงสุด

Grosser และ Neczaj (2016) ศึกษาผลกระทบของการเพิ่มตะกอนไขมันเข้าไปในระบบการย่อยแบบกึ่งต่อเนื่องแบบไม่ใช้ออกซิเจนของตะกอนน้ำเสีย จากผลการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีขึ้น 28-82 % เมื่อเทียบกับการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนของตะกอนน้ำเสียเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของตะกอนไขมันส่งผลให้การกำจัดของแข็งระเหยเพิ่มขึ้นจาก 44.38 % เป็น 57.77 % และผลการวิเคราะห์ทางสถิติ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์เพียร์สันและ ANOVA ปัจจัยทางเดียวยืนยันการเพิ่มขึ้นของตะกอนไขมันมีผลโดยตรงต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน และยังพบว่ากรลดลงของกรตไขมันโซยาวไม่ได้มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของตะกอนไขมัน

Li *et al.* (2016) ศึกษาการหมักร่วมกันของกากตะกอนน้ำเสียกับเศษอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยทดสอบความแตกต่างของปริมาณของแข็งทั้งหมดในกากตะกอนน้ำเสีย พบว่าปริมาณของแข็งต่ำที่ 4.8% ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง โดยเพิ่มขึ้นจาก 0-100% แต่ไม่พบการทำงานร่วมกันระหว่างสารตั้งต้นทั้งสอง นอกจากนี้กรเติมเศษอาหารได้ผลการสะสมของกรตไขมันระเหยง่ายและผลผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ในขณะที่ปริมาณแข็งสูงที่ 14% มีสถานะเป็นต่าง และพีเอชอยู่ที่ 7.5 - 8.5 พบว่าสารตั้งต้นทั้งสองชนิดทำงานร่วมกันได้ดี ในการเพิ่มเศษอาหารในกากตะกอนน้ำเสียควรเพิ่มในอัตราส่วนของเศษอาหาร 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Malina and Yalcinkaya (2015) ประสิทธิภาพการย่อยร่วมของตะกอนน้ำเสียและกากไขมันที่ปราศจากน้ำ ประเมินการย่อยสลายสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดมีเทน พบว่ามีเทนเพิ่มขึ้นจาก 384 ml CH<sub>4</sub> / g VS เป็น 536 และ 641 ml CH<sub>4</sub> / g VS ที่ 0% , 25% และ 46% ของอัตราส่วนไขมันและอาหาร การย่อยจะไม่มีประสิทธิภาพที่ 70% ของอัตราส่วนไขมันในอาหาร การทดลองพบว่ากระบวนการย่อยอาหารที่พีเอชมากกว่า 2 จะทำให้การย่อยเกิดได้น้อยกว่าปกติ สามารถทำให้ระบบการย่อยดีขึ้นโดยการเพิ่มอาหารในการย่อยในบ่อหมักน้ำทิ้งเต็มอัตราเป็นเวลา 10 วัน และพบว่าประสิทธิภาพและเสถียรภาพการย่อยร่วมของกากไขมันเพิ่มขึ้น เมื่อใช้กากไขมันที่ปราศจากน้ำ โดยเทียบจากการศึกษาการย่อยร่วมของกากไขมันก่อนหน้านี้

Meng *et al.* (2015) ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของน้ำมันลอยจากเศษอาหารและความแตกต่างของความเข้มข้นที่ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัมต่อลิตร ในการผลิตก๊าซมีเทนชีวภาพและความเสถียรของระบบ ในการย่อยสลายชนิดเดียวและการย่อยสลายร่วมกันพบว่าได้ผลดีเมื่อย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน การย่อยสลายแบบเดี่ยวของน้ำมันลอยที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ผลของก๊าซมีเทนชีวภาพ, ของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยง่าย เท่ากับ 607.7-846.9 มิลลิกรัมต่อลิตร, 69.7-89 เปอร์เซ็นต์ และ 84.5-92.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การย่อยสลายร่วมกันของน้ำมันลอยกับเศษอาหารเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันลอย 5-30 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยง่าย เท่ากับ 70.7-86.1 เปอร์เซ็นต์และ 87.5-91.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Pastor *et al.* (2013) ประเมินความเป็นไปได้ของการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนชนิด มีโซฟิลิกส์ ในการบำบัดน้ำมันใช้แล้วและน้ำชะขยะโดยนำมาย่อยร่วมกับกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย ทดสอบศักยภาพก๊าซมีเทนทางชีวภาพ โดยสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน 2 ชนิด และตะกอนน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสีย พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพต่อกิโลกรัมของตะกอนที่มีความสดใหม่ที่ผลิตจากโรงบำบัดมีค่าเพียง 6.1 นอร์มอลลิตรต่อกิโลกรัม, น้ำชะขยะที่มีความสดใหม่พบว่ามีความต่ำ อยู่ที่เท่ากับ 12.4 นอร์มอลลิตรต่อกิโลกรัม และน้ำมันใช้แล้วที่มีความสดใหม่ไม่เกิน 47 วัน (จะไม่เกิดการสลายตัวแบบสมบูรณ์) มีค่าเท่ากับ 970.6 นอร์มอลลิตรต่อกิโลกรัม การหมักร่วมกันแบบไม่ใช้ออกซิเจนของกากตะกอนกับน้ำมันใช้แล้วในระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง มีช่วงมีโซฟิลิกส์ (38 องศาเซลเซียส) พบว่าเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมของน้ำมันที่ดีที่สุดอยู่ที่ 19 เปอร์เซ็นต์ ของของแข็งระเหยง่าย กระบวนการหมักร่วมกันสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดสารระเหยเพิ่มขึ้นถึง 11% และการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น 23.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันในโรงบำบัดน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น

Wu *et al.* (2015) ศึกษาการหมักร่วมกันของเศษอาหารและกากไขมันจากบ่อดักไขมันที่กำจัดน้ำมันออก เพื่อปรับปรุงผลผลิตก๊าซชีวภาพ โดยแบ่งปฏิบัติการแบบย่อยสลายอาหารและย่อยสลายร่วมกันระหว่างอาหารกับไขมันเป็น 3 ลักษณะคือ บ่อหมักมีโซฟิลิกส์ บ่อหมักแบบไร้อากาศ แบ่งเขตอุณหภูมิ บ่อหมักไร้อากาศแบ่งเขตอุณหภูมิแบบหมุนเวียน พบว่าการย่อยสลายร่วมกันสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ 19 เปอร์เซ็นต์ โดยในบ่อหมัก 2 แบบแรกมีผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 0.60 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และบ่อหมักชนิดที่ 2 จะมีปฏิกิริยาการผลิตมีเทนมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแรก ผลผลิตการเพิ่มขึ้นของมีก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจนประมาณ 1 โมลต่อโมลเฮกโซส การย่อยสลายร่วมกันค่าความเป็นต่างมากกว่าการย่อยสลายอาหารเพียงชนิดเดียว และส่งผลให้ค่าการสะสมของไขมันเพิ่มขึ้น บ่อหมักชนิดที่แรกลดกรดไขมันโซยาวได้มากกว่าสองแบบหลัง

**ชลธิชา และคณะ (2556)** ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยใช้เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ โดยทำการศึกษาสภาวะในระหว่างการหมัก ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ Total solids (TS), Volatile solids (VS), C/N ratio เป็นต้น วิเคราะห์ทั้งในส่วน of เศษอาหาร (Feed) และของเหลวที่ปล่อยออก (Effluent) พบว่า TS และ VS ของ Feed มีค่ามากกว่า TS และ VS ของ Effluent เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบใช้เศษอาหาร (Feed) ที่มีปริมาณของสารอินทรีย์สูงเป็นแหล่งอาหาร จึงเป็นผลให้ Effluent มีปริมาณของแข็งลดลง สำหรับ C/N ratio ของ Feed มีค่าอยู่ในช่วง 41.14 - 101.28 และ Effluent มีค่าอยู่ในช่วง 1.62-2.40 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 7.52 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

**นวพรรษ และคณะ (2558)** ศึกษาสภาวะและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกันของเศษอาหารและกากไขมันภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ โดยใช้เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพขนาด 3,100 ลิตร โดยช่วงแรก เติมเศษอาหาร 19.5 กิโลกรัม และกากไขมัน 0.5 กิโลกรัม ต่อ น้ำประปา 20 ลิตร ทุกวันจันทร์ พุธ และศุกร์ เป็นเวลา 69 วัน เพื่อปรับสภาพเชื้อจุลินทรีย์ และช่วงที่สอง เติมเศษอาหาร 19.5 กิโลกรัม และกากไขมัน 0.5 กิโลกรัม ต่อ น้ำประปา 80 ลิตร จากนั้นทำการศึกษาสภาวะในการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบพบว่า ของผสมในระบบมีค่า พีเอช เท่ากับ 7.61-7.84 สภาพความเป็นต่างเท่ากับ 3,604.04 - 4,188.67 mg/L as CaCO<sub>3</sub> ค่าของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 18,463-21,893 mg/L ค่าของแข็งระเหยง่าย เท่ากับ 10,175 - 11, 833 mg/L ค่ากรดไขมันระเหย เท่ากับ 827.43-1,063.89 mg/L as CH<sub>3</sub>COOH ประสิทธิภาพการกำจัดไขมัน เท่ากับ 98.60% และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 1.70-1.80 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งระเหยง่ายและกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัดไป คิดเป็น 19.19 - 22.12 L CH<sub>4</sub>/g VS และ 1.14-2.70 L CH<sub>4</sub>/g VFA โดยก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทน 50.2-56.1% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 32.4-39.0% และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 15-45 ppm จากการทดลองพบว่าระยะเวลากักเก็บ (HRT) เท่ากับ 31 วัน

**อภิพล และอรกานต์ (2556)** ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ปริมาณเศษอาหารต่างๆ โดยใช้เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ โดยมีอัตราส่วนเศษอาหารต่อน้ำ ดังนี้ 20:20, 40:40 และ 50:50 ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนเศษอาหารต่อน้ำ 40:40 มีการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด คือ 5.12-7.23 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมี HRT เท่ากับ 54 วัน ตลอดการทดลองมีค่าพีเอชและสภาพความเป็นต่างภายหลังการหมักอยู่ในช่วงระหว่าง 6.87-7.33 และ 1,185 - 6,633 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

#### 3.1.1 สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
2. กรดซัลฟิวริก (conc. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
3. เฮกเซน (Hexane) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
4. เอทานอล 95% (ethanol) องค์การสุรา กรมสรรพสามิต
5. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
7. โพแทสเซียมไนเตรต (KNO<sub>3</sub>) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

#### 3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่อง TOC Analyzer รุ่น TOC-VCSH บริษัท Shimdzu ประเทศญี่ปุ่น
2. เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น C860 version 1.2 บริษัท Hanna instruments ประเทศเบลเยียม
3. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ML 204/01 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
4. เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (Gas data meter) รุ่น GFM 416 บริษัท Best technic ประเทศอังกฤษ
5. เครื่องกวนแบบแม่เหล็กพร้อมแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer and Magnetic bar) รุ่น Fisher stirring hotplate บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เตาเผา (Muffle furnace) รุ่น Centroller P320 บริษัท Naberthem ประเทศเยอรมนี
7. ตู้อบ (Oven) รุ่น UN55 บริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
8. เครื่องกรองลดความดัน รุ่น Aspirator บริษัท Eyela Tokyo ประเทศญี่ปุ่น
9. เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator) รุ่น Aspirator A-3S บริษัท Eyela Tokyo ประเทศญี่ปุ่น
10. ชุดสกัดหาปริมาณไขมัน (Soxhlet Extraction)
11. เตาหลุม รุ่น Electromantle ME บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
12. เครื่องปั่นอเนกประสงค์ รุ่น HR21000 บริษัท ฟิลิปส์อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ประเทศไทย
13. เครื่องทำความเย็น (Cooling) รุ่น CTL 901 บริษัท Eyela Tokyo ประเทศญี่ปุ่น
14. โถดูดความชื้น (Desiccator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. ชามระเหย (Evarporating dishes) รุ่น Porcelain บริษัท HCT ประเทศเยอรมนี
16. กระจาดขกรองเซลลูโลส cellulose extraction thimbles บริษัท Whatman TM ประเทศอังกฤษ
17. ไซลิ่งคัฟิเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมโครเมตร (Syringe Filters) บริษัท CNW Technology ประเทศจีน

### 3.1.3 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ

เศษอาหารที่ใช้ในการทดลองเป็นอาหารที่เหลือจากการบริโภคของนักศึกษาและบุคลากร ส่วนกากไขมันได้มาจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยคัดแยก กระจุก เปลือกหอย และพลาสติก ซึ่งใช้เวลาในการย่อยสลายนาน ออกจากเศษอาหาร (รูปที่ 3.1)



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.1 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ

(ก) เศษอาหาร (ข) กากไขมัน

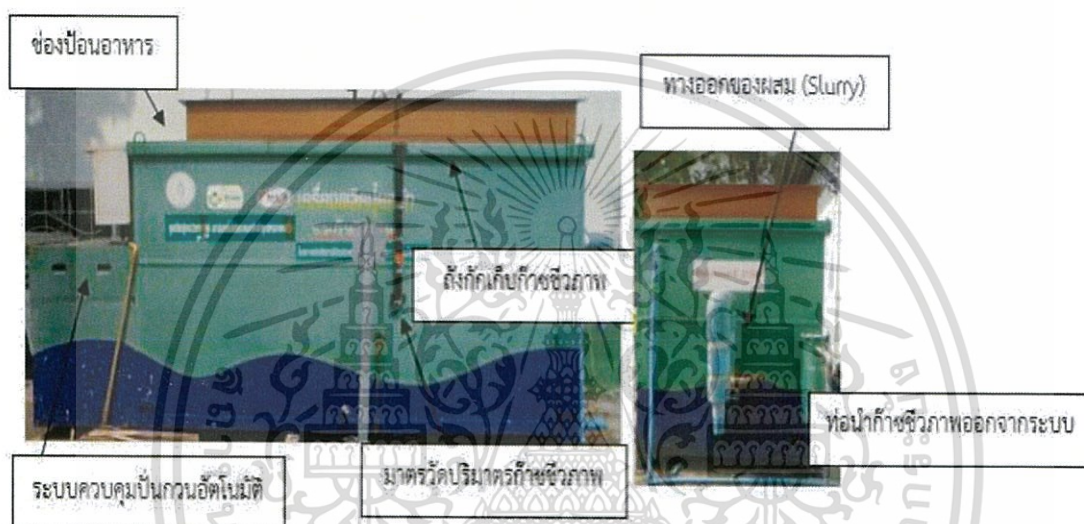
### 3.1.4 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพของเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไมโครไบโอเทค จำกัด ซึ่งมีการเดินระบบโดยการหมักด้วยเศษอาหารจากโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นระยะเวลาประมาณ 3 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ

เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการวิจัย ยี่ห้อ Cowtec รุ่น CT-100 ประเทศไทย ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์การเรียนรู้การจัดการขยะและน้ำเสียชุมชน โดยความร่วมมือระหว่างสำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร กับคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 1.47 เมตร ยาว 2.99 เมตร และสูง 0.95 เมตร มีปริมาตรความจุถังหมัก 4,100 ลิตร ปริมาตรความจุถังเก็บกักก๊าซ 3,500 ลิตร อัตรารองรับวัตถุดิบและผลิตปุ๋ยหมัก 80-100 กิโลกรัมต่อวัน ติดตั้งใบพัดที่ใช้ระบบปั่นกวาดด้วยระบบไฟฟ้าหรือมือหมุน ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(ก) (ข)  
รูปที่ 3.2 เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ  
(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง

## 3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

### 3.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุป้อน

1. สุ่มตัวอย่างเศษอาหารและกากไขมัน จากโรงอาหารของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกวันจันทร์ พุธ ศุกร์ จากนั้นนำเศษอาหาร 285 กรัม และกากไขมันปริมาณ 15 กรัม ผสมในน้ำประปา 600 กรัม (อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนักเปียก) และนำไปปั่นรวมกัน จะได้ปริมาณสุทธิเท่ากับ 900 กรัม

2. วิเคราะห์คุณลักษณะของเศษอาหารและกากไขมันโดยวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความชื้น (Moisture content) ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS) ปริมาณกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids, VFA) น้ำมันและไขมัน (Oils & Greases) อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOC) และไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen, TN) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

3. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

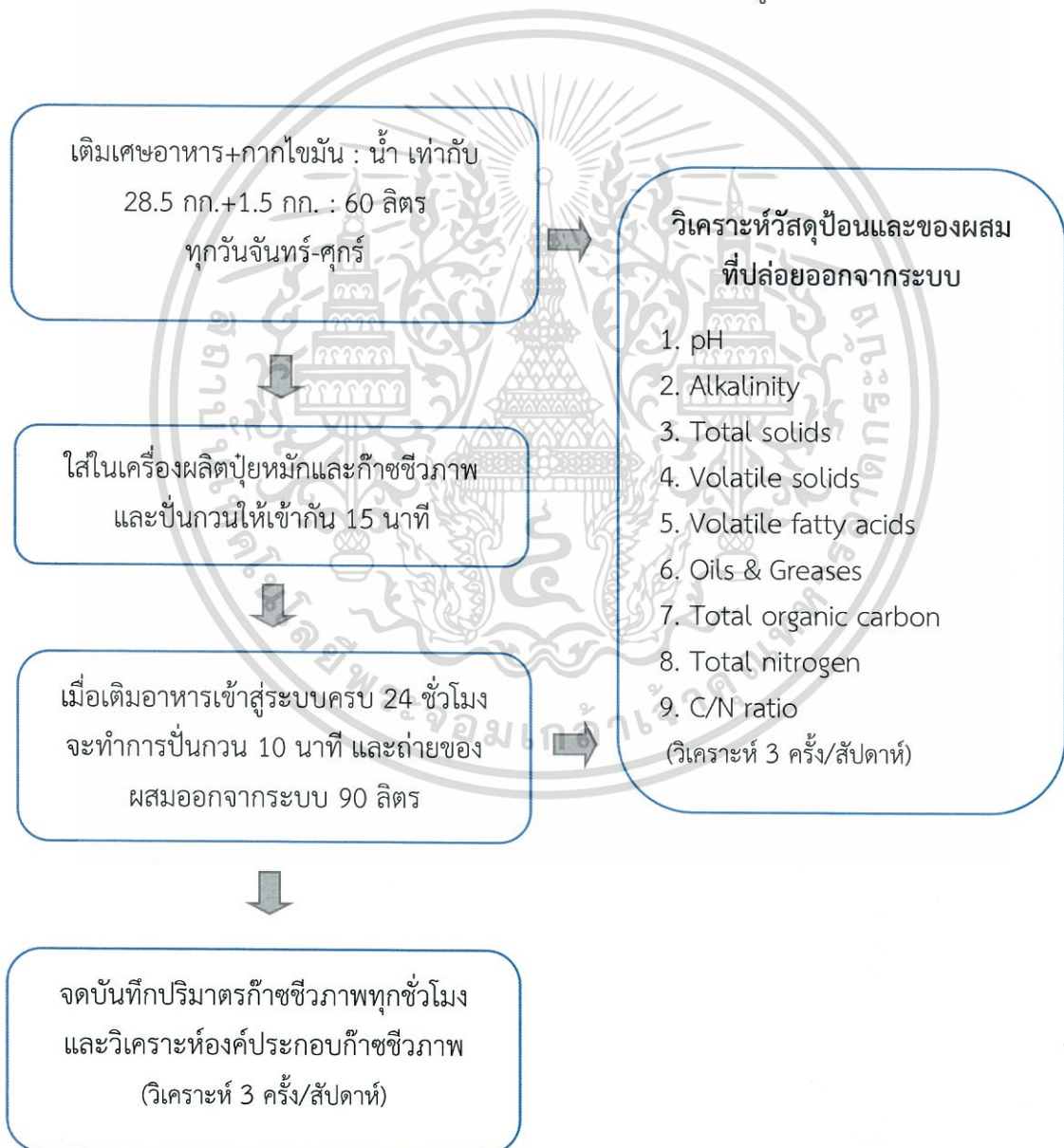
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	pH meter
ความชื้น (Moisture content)	อบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)	Titration โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)	อบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS)	เผาที่อุณหภูมิ 550 °C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acids, VFA)	Titration โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
น้ำมันและไขมัน (Oils & Greases)	Soxhlet Extraction Method โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2011) และ Partition Gravimetric Method โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC)	เครื่อง TOC Analyzer รุ่น TOC-VCSH
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen, TN)	เครื่อง TOC Analyzer รุ่น TOC-VCSH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ศึกษาสภาวะของระบบในระหว่างการหมักและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

โครงการพิเศษนี้ได้ใช้ถังหมักชีวภาพที่ใช้วัสดุป้อนเป็นเศษอาหารจากโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์และได้มีการปรับสภาพเชื้อจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับวัสดุป้อน (Feed) ที่เป็นเศษอาหารและกากไขมันมาประมาณ 3 เดือน จากนั้นได้ปรับสภาพเชื้อจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับวัสดุป้อน (Feed) โดยการเติมเศษอาหาร 28.5 กิโลกรัม กากไขมัน 1.5 กิโลกรัม และน้ำประปา 60 ลิตร ทุกวันจันทร์-ศุกร์ เป็นเวลา 23 วัน (1 สิงหาคม 2559 ถึง 31 สิงหาคม 2559) โดยทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้ใบพัดมอเตอร์ปั่นกวน เป็นเวลา 15 นาที เมื่อทำการหมักครบ 24 ชั่วโมง จะปั่นกวน 10 นาทีและถ่ายน้ำตะกอน (Slurry) ออกจากระบบ 90 กิโลกรัม จนก๊าซชีวภาพมีปริมาตรคงที่ จากนั้นทำการศึกษาสภาวะของระบบในระหว่างการหมักและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพดังนี้ (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เติมวัสดุป้อนของผสมเศษอาหารและกากไขมันต่อน้ำประปา ในอัตราส่วนเศษอาหาร 28.5 กิโลกรัม กากไขมัน 1.5 กิโลกรัม และน้ำประปา 60 ลิตร (7 กันยายน 2559 ถึง 3 ตุลาคม 2559) ทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้ใบพัดปั่นกวน เป็นเวลา 15 นาทีทุกครั้ง และก่อนเติมวัสดุป้อนในแต่ละครั้งจะต้องทำการถ่ายน้ำตะกอนออกจากระบบ (Slurry) เท่ากับปริมาณที่เติมวัสดุป้อน (Feed) ทุกครั้ง ตามวันทำการ (จันทร์-ศุกร์)

2. ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุป้อน (Feed) และน้ำตะกอนที่ปล่อยออกจากระบบ (Slurry) โดยทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acids, VFA) น้ำมันและไขมัน (Oils & Greases) อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) และไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen, TN) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 วิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์สัปดาห์ละ 3 ครั้ง (จันทร์, พุธ, ศุกร์)

3. ศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพโดยอ่านค่าจากสเกลบอกปริมาตรก๊าซของเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพทุกชั่วโมง พร้อมบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

4. ศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยใช้เครื่อง Gas data meter ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S)

5. คำนวณระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์ในระบบ (HRT)

### 3.2.3 วิเคราะห์ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ภายในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ

1. เก็บตัวอย่างของผสมที่ปล่อยออกจากเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ 100 มิลลิลิตร

2. นำมาตรวจสอบลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์โดยการย้อมสี Gram stain ตามวิธี Austrian

3. ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1,000 เท่า และบันทึกภาพ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษ้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและสภาวะในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารและกากไขมัน โดยใช้เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพขนาด 4,100 ลิตร ทำการทดลองโดยใช้เศษอาหารและกากไขมันจากโรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำการใส่เศษอาหาร 28.5 กิโลกรัม และกากไขมัน 1.5 กิโลกรัม โดยน้ำหนักเปียก ต่อ น้ำประปา 60 ลิตร ทุกวันจันทร์ถึงวันศุกร์ (ยกเว้นวันเสาร์-อาทิตย์) ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเศษอาหารและกากไขมัน

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเศษอาหารและกากไขมันแสดงในตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.1 ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของวัสดุป้อน

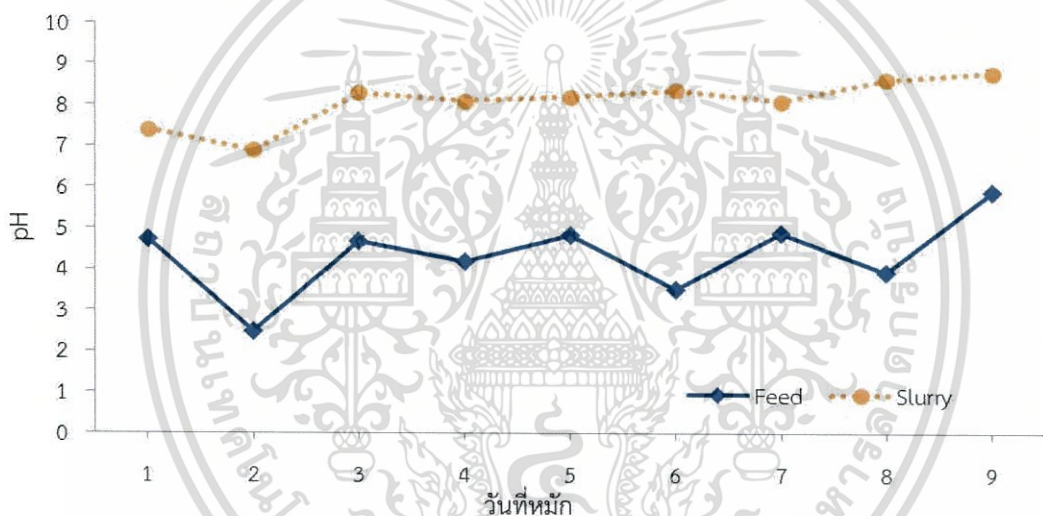
พารามิเตอร์	วัสดุป้อน
ความชื้น (Moisture content) (%)	90.68 ± 0.24
อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	7,422.33 ± 38.59
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) (mg/L)	159.93 ± 8.09
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	46.41 ± 2.29

จากการทดลองพบว่าวัสดุป้อนมีค่าอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดและไนโตรเจนทั้งหมดค่อนข้างสูง โดยมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน  $46.41 \pm 2.29$  ซึ่งเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553) ที่พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 40 ถึง 50

## 4.2 ผลการศึกษาสภาวะในการหมักก๊าซชีวภาพ

### 4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบ

จากรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.1 และ ข-2.2 ภาคผนวก ข) แสดงว่า ค่าพีเอชของวัสดุป้อน (Feed) มีค่าในช่วง 2.47-5.90 ส่วนพีเอชน้ำตะกอน (Slurry) มีค่าอยู่ในช่วง 6.90-8.80 ค่าพีเอชของน้ำตะกอน (Slurry) มีค่ามากกว่าพีเอชวัสดุป้อน (Feed) เนื่องจากจุลินทรีย์ได้ย่อยวัสดุป้อนให้เป็นกรดอินทรีย์ โดย Hydrolytic bacteria จากนั้นกลุ่ม Methanogen bacteria จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้พีเอชของน้ำตะกอน (Slurry) ที่ได้หลังจากผ่านการย่อยสลายมีพีเอชสูงขึ้น ซึ่งค่าพีเอชดังกล่าวอยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li *et al.* (2016) ศึกษาการหมักร่วมกันของกากตะกอนน้ำเสียกับเศษอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนในการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า พีเอชที่จุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่ในช่วง 7.5 - 8.5

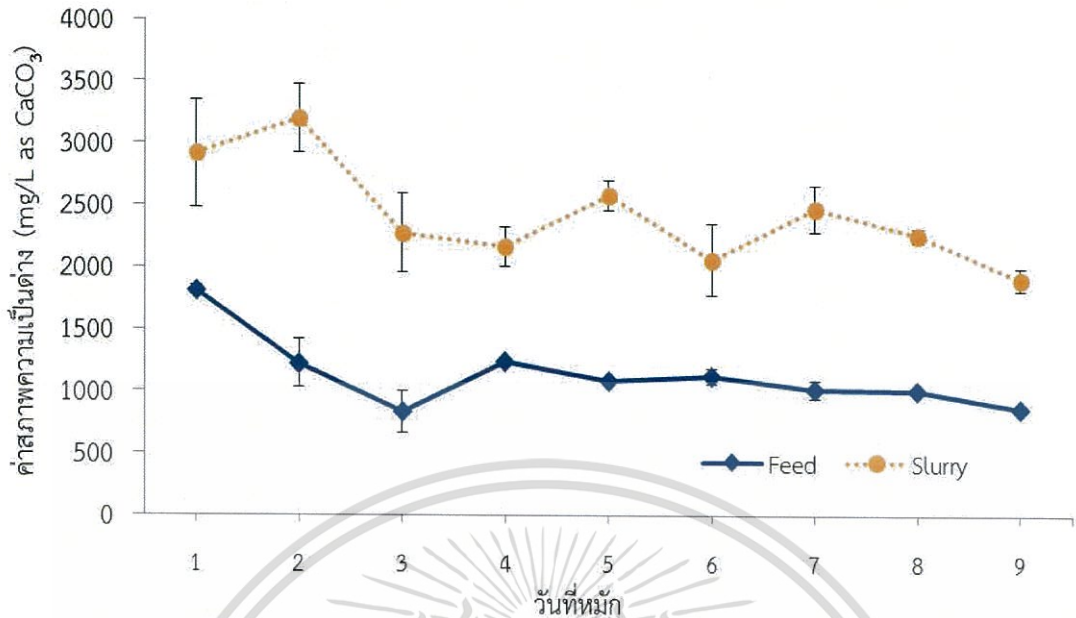


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของวัสดุป้อนและน้ำตะกอนในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ

### 4.2.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นด่างทั้งหมดในระบบ

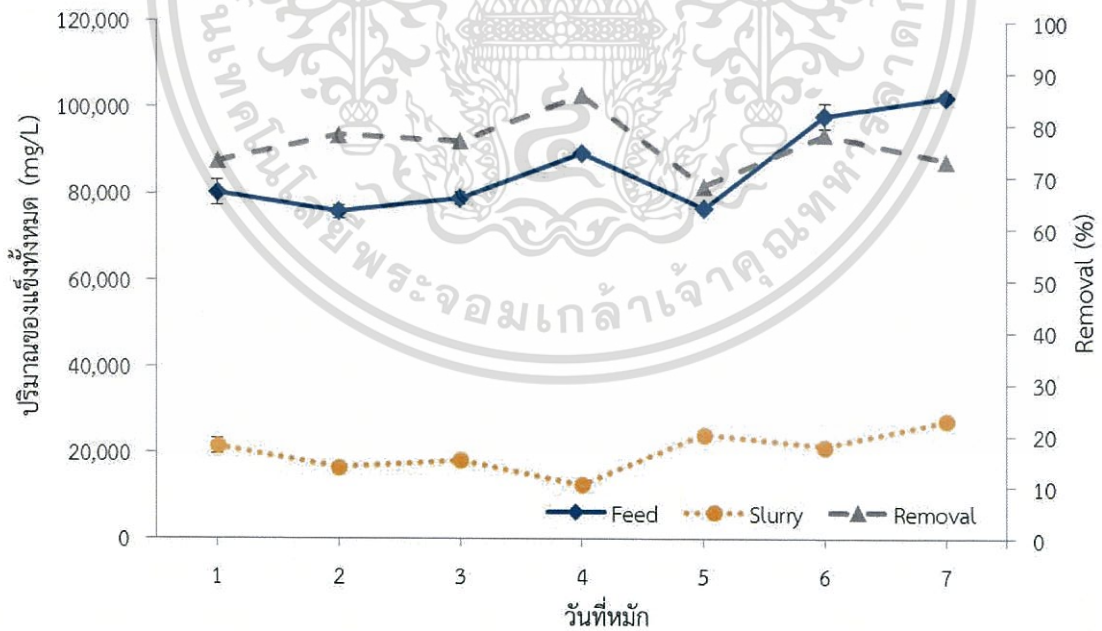
จากรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.3 และ ข-2.4 ภาคผนวก ข) แสดงค่าสภาพความเป็นด่างของวัสดุป้อน (Feed) มีค่าในช่วง 835.83 – 1,813.33 mg/L as CaCO<sub>3</sub> และน้ำตะกอน (Slurry) มีค่าในช่วง 1,905.00 – 3,198.33 mg/L as CaCO<sub>3</sub> จากผลการทดลองพบว่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำตะกอน (Slurry) มีค่ามากกว่าวัสดุป้อน (Feed) ซึ่งสอดคล้องกับค่าพีเอชของน้ำตะกอน (Slurry) ที่มากกว่าวัสดุป้อน โดยค่าสภาพความเป็นด่างที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทนคือ 1,000-5,000 mg/L as CaCO<sub>3</sub> (Osman and Delia, 2005) นั่นคือ สภาพความเป็นด่างของถังหมักในการทดลองนี้สามารถรักษาสมดุลความเป็นกรดต่างในระบบให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นด่างของวัสดุป้อนและน้ำตะกอนในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ

#### 4.2.3 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ

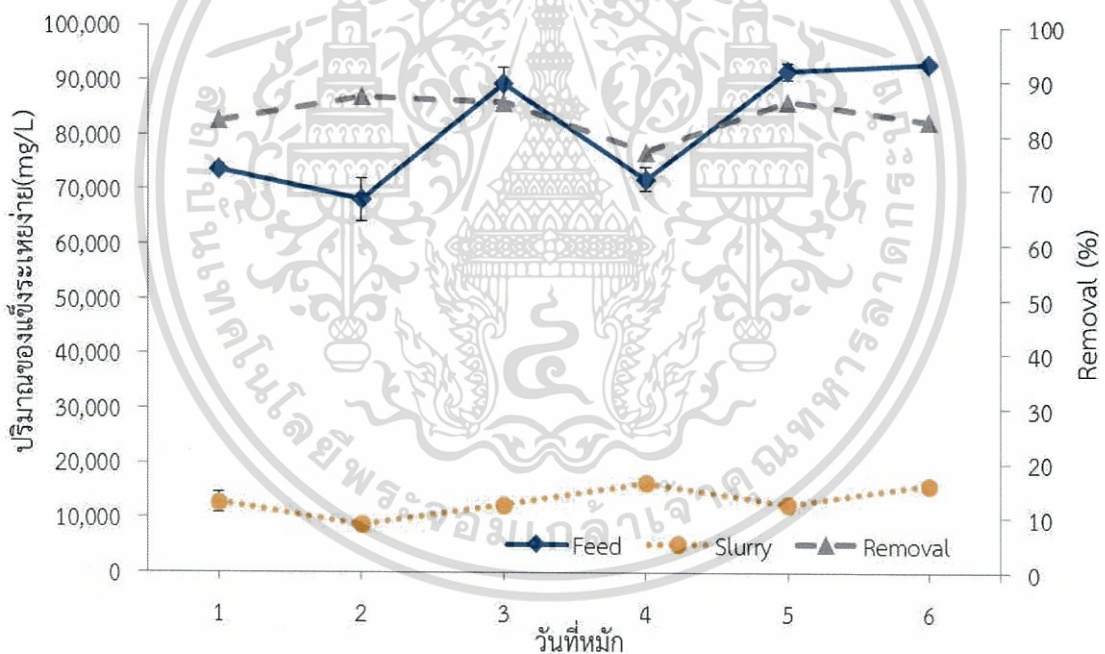


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัสดุป้อนและน้ำตะกอนในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.5 และ ข-2.6 ภาคผนวก ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งทั้งหมด (Total solid , TS) ของวัสดุป้อน (Feed) มีค่าเป็น 75,809 - 102,530 mg/L และน้ำตะกอน (Slurry) มีค่าเป็น 12,705 - 27,566 mg/L จากผลการทดลองพบว่า ค่าของแข็งทั้งหมดของวัสดุป้อน (Feed) มีค่าสูงกว่าของแข็งทั้งหมดของน้ำตะกอน (Slurry) เนื่องจากอินทรีย์สารในระบบเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายในสภาวะปราศจากออกซิเจนซึ่งผ่านกระบวนการต่างๆ ทำให้น้ำตะกอน (Slurry) ที่ปล่อยออกมาจากระบบมีโครงสร้างและโมเลกุลที่เล็กลงและถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และอื่นๆ ทำให้ค่าของแข็งทั้งหมดของน้ำตะกอนลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุที่ป้อนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของชลธิชาและคณะ (2556) โดยเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมด 76.17 % ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Meng *et al.* (2015) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักเศษอาหารร่วมกับน้ำมันลอยจากเศษอาหารพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด 70.7-86.1

#### 4.2.4 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดในระบบ



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายของวัสดุป้อนและน้ำตะกอนในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ

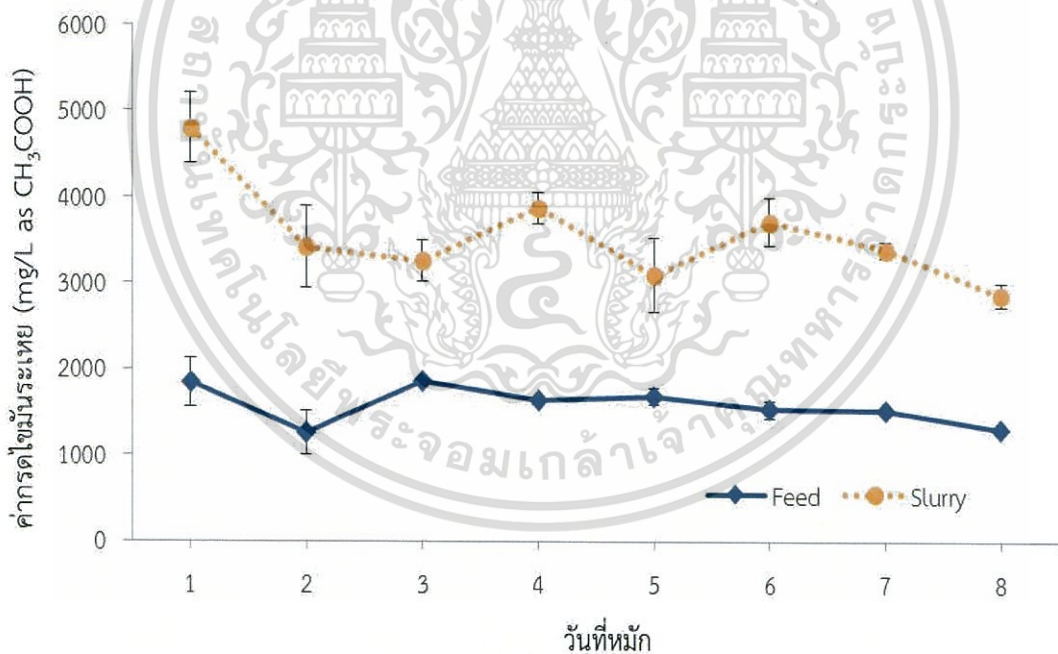
จากรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.7 และ ข-2.8 ภาคผนวก ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS) ของวัสดุป้อน (Feed) มีค่าเป็น 68,155 - 93,276 mg/L และน้ำตะกอน (Slurry) มีค่าเป็น 8,815 - 16,479 mg/L ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแข็งทั้งหมด และมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 83.64 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Meng *et al.* (2015) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวภาพโดยหมักเศษอาหารร่วมกับน้ำมันลอยจากเศษอาหารพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าอยู่ระหว่าง 87.5 - 91.4 %

#### 4.2.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ

จากรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.9 และ ข-2.10 ภาคผนวก ข) แสดงค่ากรดไขมันระเหยของวัสดุป้อน (Feed) อยู่ในช่วง 1,253.75 – 2,720.00 mg/L as  $\text{CH}_3\text{COOH}$  และน้ำตะกอน (Slurry) 2,857.50 – 4,797.50 mg/L as  $\text{CH}_3\text{COOH}$  จากผลการทดลองพบว่าค่ากรดไขมันระเหยของน้ำตะกอน (Slurry) มีค่ามากกว่าวัสดุป้อน (Feed) เนื่องจากน้ำตะกอนเกิดจากสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแบบไร้อากาศและเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยจึงทำให้น้ำตะกอนมีปริมาณกรดไขมันระเหยมากกว่าวัสดุป้อน จากนั้นกรดไขมันระเหยจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) โดย Acetogenic bacteria และถูกใช้เป็นส่วนตั้งต้นในการสร้างก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) โดย Methanogenic bacteria ต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนวพรระและคณะ (2558) ที่พบว่าน้ำตะกอนมีปริมาณกรดไขมันระเหยมากกว่าวัสดุป้อน



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยของวัสดุป้อนและน้ำตะกอนในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ

#### 4.2.6 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมันในระบบ

ตารางที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมันของวัสดุป้อนและน้ำตะกอน

วันที่	ปริมาณน้ำมันและไขมัน (mg/L)		% การกำจัด
	วัสดุป้อน (Feed)	น้ำตะกอน (Slurry)	
26-09-59	5,081 ± 283.58	3,165 ± 75.50	37.71
27-09-59	4,759 ± 107.77	1,569 ± 40.31	67.04
30-09-59	4,852 ± 403.05	2,303 ± 493.84	62.21
เฉลี่ย	5311 ± 264.80	2346 ± 203.21	55.65

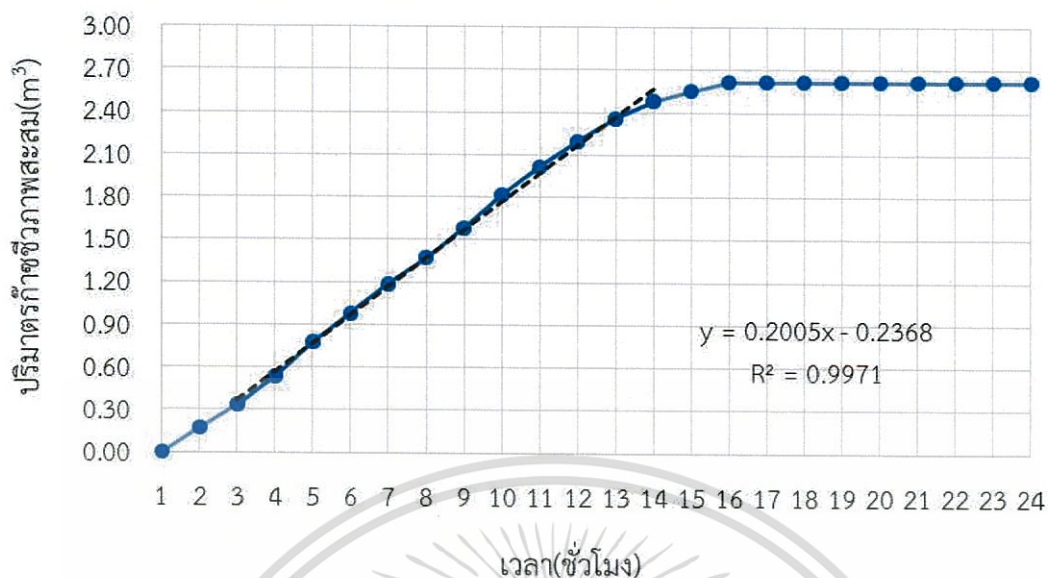
จากตารางที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.11 และ ข-2.12 ภาคผนวก ข) แสดงค่าปริมาณน้ำมันและไขมันของวัสดุป้อน (Feed) มีค่าในช่วง 4,759 - 5,081 mg/L และน้ำตะกอน (Slurry) มีค่าในช่วง 1,569 - 3,165 mg/L จากผลการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันและไขมันของวัสดุป้อน (Feed) มีค่ามากกว่าน้ำตะกอน (Slurry) เนื่องจากวัสดุป้อนมีส่วนประกอบของน้ำมันและไขมันจากเศษอาหารและไขมันจากบอดักไขมัน น้ำมันและไขมันในวัสดุป้อน (Feed) จะถูกย่อยสลายเป็นกรดไขมันและถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จึงทำให้น้ำตะกอน (Slurry) นั้นมีปริมาณน้ำมันและไขมันลดลง โดยประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันมีค่าเฉลี่ย 55.65% จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไขมันจากการหมักร่วมกันของเศษอาหารกับกากไขมันที่ได้จากงานวิจัยของนวพรพร และคณะ (2558) พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันเท่ากับ 98.60% จากการเติมไขมัน 5,207.15 mg/L ในถังหมักก๊าซชีวภาพ 3,100 ลิตร ระยะเวลาพักเก็บสารในระบบ 31 วัน มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 1.73 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการสูมตัวอย่างไขมันในระบบทำได้ยาก เนื่องจากไขมันจะลอยอยู่บนผิวหน้าทำให้หัวเคราะห้ผลคลาดเคลื่อนได้

#### 4.3 ผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ

##### 4.3.1 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

จากการวัดอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเฉลี่ยทุกๆ ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตลอดการทดลอง ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดที่ ข-2.13)

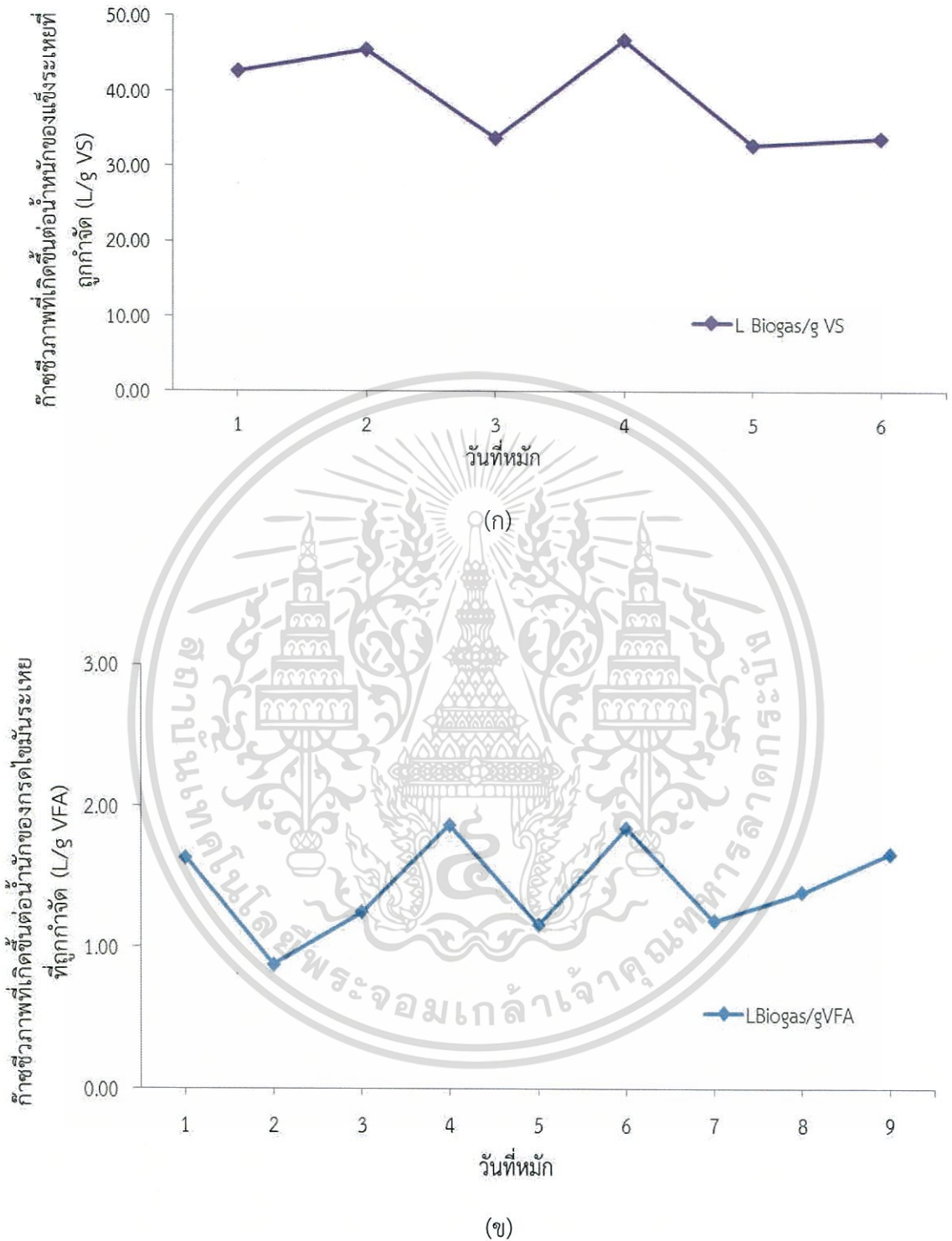
จากรูปที่ 4.6 พบว่าระบบเกิดการผลิตก๊าซชีวภาพที่ชั่วโมงที่ 2 และหยุดการผลิตที่ชั่วโมงที่ 16 โดยมีอัตราการผลิตอยู่ที่ 0.11 m<sup>3</sup>/hr และมีปริมาตรก๊าซชีวภาพเท่ากับ 2.62 m<sup>3</sup>/d แสดงว่าจุลินทรีย์ในระบบสามารถย่อยสลายเศษอาหารและกากไขมันให้เป็นก๊าซชีวภาพภายใน 16 ชั่วโมง จึงสามารถเพิ่มปริมาณการเติมวัสดุป้อนเพื่อลดระยะเวลาพักเก็บของระบบได้



รูปที่ 4.6 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

#### 4.3.2 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยและไขมันระเหย

จากผลการทดลอง พบว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด มีค่าอยู่ในช่วง 32.80-46.83 L biogas/g VS removed (รูปที่ 4.7 (ก)) ส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด มีค่าอยู่ในช่วง 0.88-1.87 L biogas/g VFA removed (รูปที่ 4.7 (ข)) ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.14 ภาคผนวก ข และตารางที่ ค-2 และ ค-3 ภาคผนวก ค) จากการเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักเศษอาหาร 20 กิโลกรัมเพียงอย่างเดียว จากงานวิจัยของ อภิพลและอรกานต์ (2556) พบว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัดมีค่าอยู่ในช่วง 7.39-20.52 L biogas/g VS removed ซึ่งมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเศษอาหารและกากไขมันจะช่วยเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนวพรรษและคณะ (2558) ที่พบว่ามีการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัดเท่ากับ 38.23 – 39.52 L biogas/g VS removed ซึ่งมีค่ามากกว่าการหมักเศษอาหารเพียงอย่างเดียวเช่นกัน



รูปที่ 4.7 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (ก) และกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด (ข)

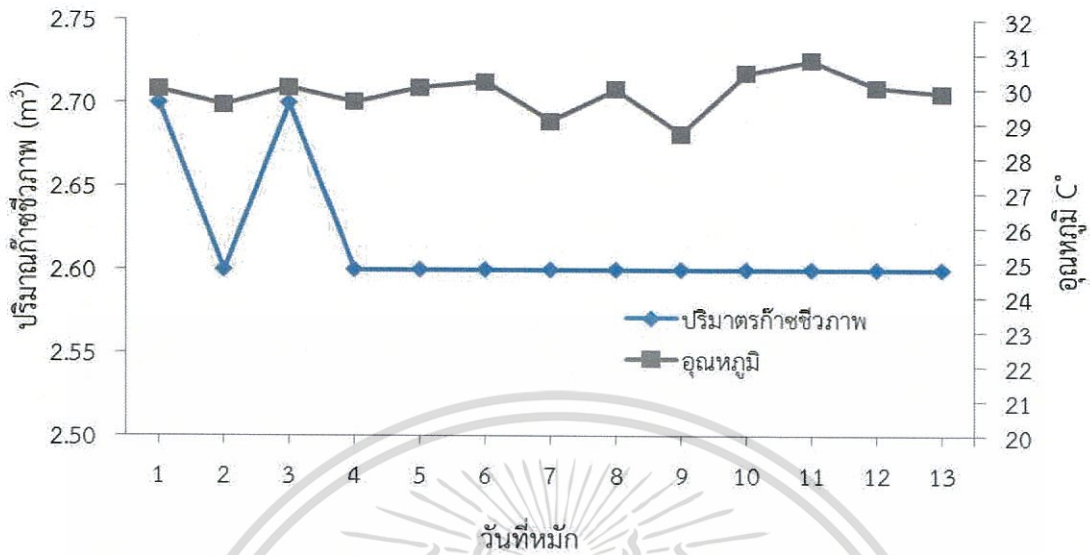
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

ครั้งที่	การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมัก ร่วมกันของเศษอาหารและกากไขมัน		การผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักเศษ อาหารเพียงอย่างเดียว	
	งานวิจัยนี้ L biogas/g Vs removed	นวพรรัชและคณะ (2558) L biogas/g Vs removed	อภิพลและ อรกานต์ (2556) L biogas/g Vs removed	ชลธิชาและคณะ (2556) L biogas/g Vs removed
1	45.50	38.89	7.39	25.17
2	33.78	38.23	13.92	25.43
3	46.83	39.38	13.63	-
4	32.80	39.43	8.26	-
5	33.71	39.14	11.37	-
6	-	39.24	-	-
เฉลี่ย	39.21	39.12	12.51	26.87

จากตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยกับงานวิจัยที่ใช้เศษอาหารในการหมักเพียงอย่างเดียวพบว่า งานวิจัยของชลธิชาและคณะ (2556) ที่ใช้เศษอาหาร 40 กิโลกรัมต่อน้ำประปา 40 ลิตร และงานวิจัยของอภิพลและอรกานต์ (2556) ที่ใช้เศษอาหาร 20 กิโลกรัมต่อน้ำประปา 20 ลิตร ทั้ง 2 งานวิจัยที่ใช้เศษอาหารในการหมักเพียงอย่างเดียวจะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของระเหยง่ายน้อยกว่างานวิจัยของนวพรรัชและคณะ (2558) ที่ใช้เศษอาหาร 19.5 กิโลกรัม หมักร่วมกับกากไขมัน 0.5 กิโลกรัม ต่อน้ำประปา 80 ลิตร และงานวิจัยนี้ที่ใช้เศษอาหาร 28.5 กิโลกรัมร่วมกับกากไขมัน 1.5 กิโลกรัม ต่อน้ำประปา 60 ลิตร แสดงให้เห็นว่าการใช้เศษอาหารหมักร่วมกับกากไขมันช่วยเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ จากงานวิจัยของ Meng *et al.* (2015) ได้ทำการศึกษการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักแบบไร้อากาศแบบเดี่ยวและร่วมกันของเศษอาหารและไขมันลอยจากเศษอาหาร จากผลการทดลองพบว่าไขมันลอยสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าเศษอาหารถึง 29.0 % แต่ใช้เวลาย่อยสลายนานกว่าเศษอาหารเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีข้อจำกัด (Cavaleiro *et al.*, 2013)

### 4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบรรยากาศกับปริมาณก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข- 2.15 ถึง ข-2.26 ภาคผนวก ข) แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพและอุณหภูมิบรรยากาศเฉลี่ย พบว่ามีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าระหว่าง 2.60-2.70 ลูกบาศก์เมตรและอุณหภูมิมีค่าระหว่าง 28.71-30.83 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในแต่ละวันค่อนข้างคงที่ เนื่องจากจุลินทรีย์ผลิตก๊าซชีวภาพเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 30-40 °C (El-Mashed *et al.*, 2004)

### 4.3.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ	ค่าเฉลี่ย
CH <sub>4</sub> (%)	49.63 ± 1.01
CO <sub>2</sub> (%)	35.00 ± 1.06
O <sub>2</sub> (%)	14.97 ± 0.06
H <sub>2</sub> S (mg/L)	40.00 ± 0.00

จากตารางที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.27 ภาคผนวก ข) แสดงผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Gas Data Meter พบว่ามีก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>), และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) มีค่าอยู่ระหว่าง 48.7-50.7% และ 34.2-36.2% ตามลำดับ โดยพบก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li *et al.* (2009) ที่พบว่ามีองค์ประกอบมีเทน 44% จากการหมักเศษอาหารร่วมกับปุ๋ยคอก และก๊าซเอทเธนเป็นเอทเธนที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าเหมาะแก่การใช้งานจริง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนไดซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) มีค่าเท่ากับ 40 mg/L และสอดคล้องกับงานวิจัยของอภิพลและอรกานต์ (2556) ที่วิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 52.8 % และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เท่ากับ 43.8 % ความเข้มข้นสูงสุดก๊าซของไฮโดรเจนไดซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่อนุญาตให้มีในพลังงานที่นำกลับมาใช้ใหม่ต้องไม่เกิน 500 mg/L (Pastor *et al.*, 2013) จากผลการทดลองพบว่ามีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากการปนเปื้อนของอากาศเข้าสู่ระบบในขณะที่เติมวัสดุป้อน

#### 4.3.5 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำตะกอน (Slurry) และ เปอร์เซ็นต์การกำจัด

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุป้อน (Feed) และน้ำตะกอน (Slurry) แสดงในตารางที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.1, ข-1.2, ข-2.5, ข-2.7 และ ข-2.11 ภาคผนวก ข )

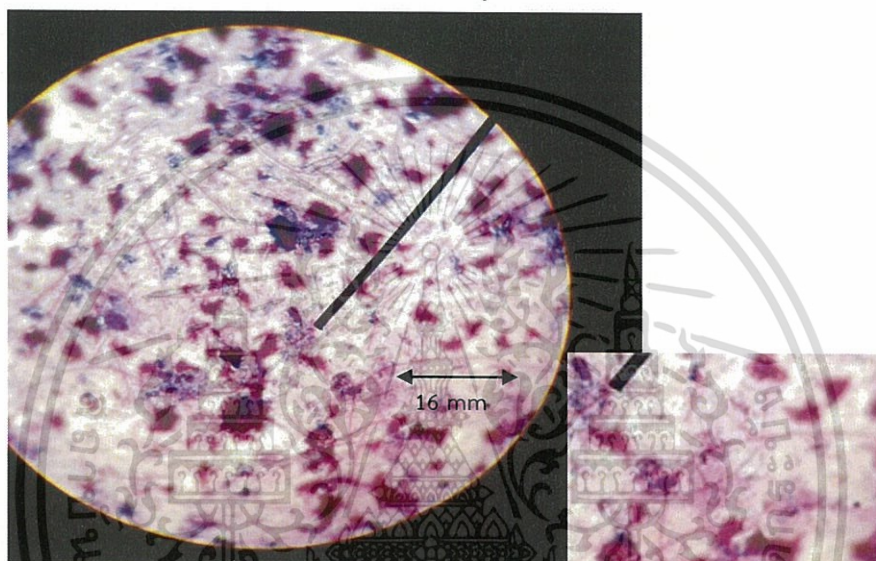
ตารางที่ 4.5 คุณลักษณะของน้ำตะกอน (Slurry) และเปอร์เซ็นต์การกำจัด

พารามิเตอร์	วัสดุป้อน (Feed)	น้ำตะกอน (Slurry)	% การกำจัด
ความชื้น (Moisture content) (%)	90.68 ± 0.24	97.75 ± 0.20	-
อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	7,422.33 ± 38.59	133.77 ± 42.88	98.20
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) (mg/L)	159.93 ± 8.09	255.23 ± 8.52	- 59.59
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	46.41 ± 2.29	0.52 ± 0.16	-
ของแข็งทั้งหมด (mg/L)	86,010	20,388.86	76.17
ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)	81,414	13,218.00	83.64
น้ำมันและไขมัน (mg/L)	5,311	2,346	55.65

จากผลการทดลองพบว่าน้ำตะกอน (Slurry) มีปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย และปริมาณน้ำมันและไขมันน้อยกว่าวัสดุป้อน (Feed) เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบจะถูกย่อยสลายในสภาวะที่ขาดออกซิเจนเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และอื่นๆ น้ำตะกอน (Slurry) จึงมีปริมาณของแข็งทั้งหมด, ปริมาณของแข็งระเหยง่าย และปริมาณน้ำมันและไขมันน้อยกว่าวัสดุป้อน และระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 76.17% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเหยง่ายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 83.64 และมีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันเท่ากับ 55.65 % โดยพบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด และการกำจัดของแข็งระเหยง่ายมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดี แต่ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันและไขมันมีค่าปานกลาง เนื่องจากการย่อยสลายไขมันเกิดได้ช้าทำให้ปริมาณไขมันและน้ำมันตกค้างในระบบ และระบบมีประสิทธิภาพการนำอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดไปใช้เท่ากับ 98.20% ส่วนไนโตรเจนทั้งหมดในระบบมีปริมาณเพิ่มขึ้น 59.59% (ตารางที่ 4.5) ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากระบบมีการย่อยสลายโปรตีนในเศษอาหารให้กลายเป็นไนโตรเจน

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 4.9 ลักษณะเชื้อแบคทีเรียในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพโดยการย้อมสีแกรมและส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า

ผลการศึกษาเชื้อแบคทีเรียในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพโดยการย้อมสีแกรมและส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า (รูปที่ 4.9) พบเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกที่มีลักษณะกลมและท่อนยาวคาดว่าน่าจะเป็นแบคทีเรียในกลุ่ม Methanogen และ Acetogenic bacteria ตามลำดับภายในเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ สอดคล้องกับงานวิจัยของชลธิชาและคณะ (2556) ใดๆก็ตาม ควรวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์ในการทดลองต่อไปในอนาคต

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกันของเศษอาหารและกากไขมันแบบไร้อากาศด้วยเครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ ปริมาตรความจุถังหมัก 4,100 ลิตร โดยเติมเศษอาหาร 28.5 กิโลกรัมและกากไขมัน 1.5 กิโลกรัม โดยน้ำหนักเปียก ต่อน้ำประปา 60 ลิตร ในอัตราส่วน 1:2 ในช่วงเวลา 11.00 – 12.00 น. พร้อมทั้งมีการปั่นกววนภายในถังหมัก 15 นาที เมื่อครบ 24 ชั่วโมงจะทำการถ่ายน้ำตะกอนออก (Slurry) ออกจากระบบเท่ากับปริมาณที่เติมวัสดุป้อน (Feed) ทุกครั้ง จากการคำนวณพบว่าระยะเวลาพักเก็บ (HRT) 47 วัน ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบพบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีค่า 6.9 – 8.8 สภาพความเป็นด่าง มีค่า 1,905.00 – 3,198.33 mg/L as CaCO<sub>3</sub> ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งที่ถูกระเหยที่ถูกกำจัด มีค่า 32.80 – 46.83 L biogas/g VS removed ส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพต่อกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด มีค่า 0.88 – 1.87 L biogas/g VFA removed และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 2.60 – 2.70 ลูกบาศก์เมตรต่อวันที่อุณหภูมิมีค่าระหว่าง 28.71 – 30.83 องศาเซลเซียส ก๊าซชีวภาพที่ได้มีปริมาณก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) 48.7 – 50.7 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) 34.2 – 36.2 % และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) 40 mg/L และจากการวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียในระบบพบแบคทีเรียแกรมบวก Acetogenic bacteria และ Methanogen

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพโดยแปรค่าอัตราส่วนเศษอาหารและไขมันเพิ่ม
2. ควรตรวจสอบฐานวิทยาของเชื้อจุลินทรีย์และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ในระบบ
3. ควรทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำทั้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ
4. ควรศึกษาคุณลักษณะของปุ๋ยหมักที่ได้

## เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2551. คู่มือแนวทางการจัดการน้ำมันและไขมันจากบ่อดักไขมันและการนำไปใช้ประโยชน์สำหรับบ้านเรือน. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2556. ปัญหาสิ่งแวดล้อมจากขยะมูลฝอย [ออนไลน์] สืบค้นจาก : <http://www.pcd.go.th>
- กรมควบคุมมลพิษ. 2558. สรุปสถานการณ์ขยะในประเทศไทยปี 2557. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2554. ก๊าซชีวภาพ. กระทรวงพลังงาน.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นิยมใช้. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ชลธิชา มะลิซ้อน, ชัยวัฒน์ เพชรโสม และชุลีพร จิตคงสง. 2556. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยใช้เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เทศบาลเมืองทุ่งสง. 2559. ผลกระทบของขยะมูลฝอยต่อสภาวะแวดล้อม. 2554. [ออนไลน์] สืบค้นจาก : [www.tungsong.com](http://www.tungsong.com) 12 เมษายน 2559.
- นวพรรษ ประจุมัย, มธุรินทร์ สิงห์เงา และศศิธร จันทร์เพชร. 2558. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากหมักร่วมกันของเศษอาหารและกากไขมันโดยใช้เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปวีณา ต่านกุล นักวิชาการสิ่งแวดล้อมชำนาญการ. 2559. แผนปฏิบัติการ “ประเทศไทย ไร้ขยะ” ตามแนวทาง “ประชารัฐ” ระยะ 1 พ.ศ. 2559 – 2560.
- รัชกร นามกร, สุเทพ ศิลปานันท์กุล และพิศิษฐ์ วัฒนสมบุรณ์. 2558. การผลิตปุ๋ยหมักร่วมจากกากตะกอนน้ำทิ้ง เศษผัก และกากไขมัน. ภาควิชาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์. 2552. การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร. 2554. คู่มือแนวทางการจัดการขยะมูลฝอยและสิ่งแวดล้อม โดยชุมชน. กรุงเทพมหานคร. มาตการพิมพ์.

อภิพล โรจนวิภาต และอรกานต์ ขอดแก้ว. 2556. การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยใช้เครื่องผลิตปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อานัฐ ตะปินตา และธรมบรรจบ อภิตกุล. 2553. การจัดการขยะภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทาอย่างครบวงจรและเหมาะสม. มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.

APHA, AWWA and WEF. 2012. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (22th ed.) : American Public Health Association, Washington DC, USA.

Athanasoulia, E., Melidis, P. and Aivasidis, A. 2012. Optimization of biogas production from waste activated sludge through serial digestion. Renewable Energy, 47, 147-151.

Baeyens, J., Su, H., Tan, T. and Zhang, C. 2014. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, 383-392.

Bailey, R.S. 2007. Coal Merchant in Knaresborough. North Yorkshire.

Breure, A.M. and van Andel, J.G. 1987. Microbiological impact on anaerobic digestion. Bioenvironment systems (D. L. Wise, Ed.) 2, 95-113. CRC Press, Florida, U.S.A.

Bueno, B.E., Domingues, R.F., Franzolin Neto, R., Kaminura, E.S., Ribeiro, R., Sanches, T., Silva, G.S. and Tommaso, G. 2015. Effect of enzymatic pretreatment on the anaerobic digestion of milk fat for biogas production. Food Research International, 73, 26-30.

Cavaleiro, A.J., Ferreira, T., Pereira, F., Tommaso, G. and Alves, M.M. 2013. Biochemical methane potential of raw and pre-treated meat-processing wastes. Bioresour Technol. 129, 519-525.

Deublein, D. and Steinhauser, A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resource. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. Germany.

Domingues, R.F., Sanches, T., Silva, G.S., Bueno, B.E., Ribeiro, R., Kamimura, E.S., Franzolin Neto, R. and Tommaso, G. 2015. Effect of enzymatic pretreatment on the anaerobic digestion of milk fat for biogas production. Food Research International, 73, 26-30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- El-Mashad, H.M., Zeeman, G., Van Loon, W.K.P., Bot, G.P.A. and Lettinga, G. 2004. Effect of Temperature and Temperature Fluctuation on Thermophilic Anaerobic Digestion of Cattle Manure. *Bioresource Technology*, 95, 191-201.
- Grosser, A. and Neczaj, E. 2016. Enhancement of biogas production from sewage sludge by addition of grease trap sludge. *Energy Conversion and Management* 125, 301-308.
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, R., van Otterdijk, R. and Meybeck, A. 2011. *Global Food Losses and Food Wastes: Extent, Cause and Prevention*. Interpack 2011. Dusseldorf, Germany, FAO.
- Jaffar, M., Chufo, A., Meng, Y., Li, X., Liu, S., Yuan Y., Zhu H. and Zou, D. 2015. Evaluation biomethane production from anaerobic mono-and co-digestion of food waste and floatable oil (FO) skimmed from food waste. *Bioresource Technology*, 185, 7-13.
- Wu, L.J., Kobayashi, T., Kuramochi, H., Li, Y.Y. and Xu, K.Q. 2016. Improved biogas production from food waste by co-digestion with de-oiled grease trap waste. *Bioresource Technology*, 201, 237-244.
- Kondusamy, D. and Kamamdhad, A.J. 2014. Pre-treatment and Anaerobic Digestion of Food Waste for High Rate Methane Production – A Review. *Environment Chemical Engineering*, 2, 1821-1830.
- Li, H., Liu, C., Liu C.H. and Zhang, Y. 2016. Improve biogas production from low-organic-content sludge through high-solids anaerobic co-digestion with food waste. *Bioresource Technology*, 219, 252-260.
- Li R., Chen S., Li X., Lar JS., He Y., Zhu B. 2009. Anaerobic codigestion of kitchen waste with cattle manure for biogas production. *Energy Fuel*, 23, 2225-8.
- Malina, J.F. and Yalcinkaya, S. 2015. Anaerobic co digestion of municipal wastewater sludge and un-dewater grease trap waste for assessing direct feed of grease trap waste in municipal digesters. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, 490-497.
- Meng, Y., Li, S., Yuan, H., Zou, D., Liu, B., Zhu, B., Chufo, A., Jaffar, M. and Li, X. 2015. Evaluating biomethane production from anaerobic mono- and co-digestion of food waste and floatable oil (FO) skimmed from food waste. *Bioresource Technology*, 185,7-13

- Osman, N.A. and Delia, T.S. 2005. Effect of alkalinity on the performance of a simulated landfill bioreactor digesting organic solid wastes. *Chemosphere*, 59, 871-879.
- Pastor, L., Pascual, A., Ruiz, B. and Ruiz, L. 2013. Co-digestion of used oils and urban landfill leaches with sewage sludge and the effect on the biogas production. *Applied Energy*, 107, 438-445.
- Romano, R.T. and Zhang, R. 2007. Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor. *Bioresource Technology*, 99, 631-637.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์

#### ก-1 วิธีวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสถานะในระหว่างการหมัก

##### ก-1.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

###### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช
2. บีกเกอร์
3. เครื่องกวนแม่เหล็กและแท่งเหล็ก

###### วิธีการทดลอง

1. ทำความสะอาดอิเล็กโทรดก่อนวัดค่าพีเอช โดยใช้ น้ำบริสุทธิ์ฉีดล้างให้ทั่ว เช็ดด้วยกระดาษทิชชู
2. เปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 15 นาที เพื่อให้สัญญาณเสถียร
3. การปรับเทียบค่าพีเอช โดยใช้บัฟเฟอร์ 7 เป็นจุดที่ 1 และใช้บัฟเฟอร์ 4 เป็นจุดที่ 2
4. วัดค่าพีเอชของตัวอย่าง โดยจุ่มอิเล็กโทรดลงในบีกเกอร์ตัวอย่างแล้วคนเบาๆ รอจนกว่าค่าพีเอช ไม่เปลี่ยนแปลงจึงอ่านค่า
5. ทำความสะอาดอิเล็กโทรดทุกครั้งหลังจากวัดค่าพีเอช โดยใช้ น้ำบริสุทธิ์ฉีดล้างให้ทั่ว ซับด้วยกระดาษทิชชู และเมื่อเสร็จปฏิบัติการต้องจุ่มอิเล็กโทรดในสารละลายสำหรับแช่อิเล็กโทรด

##### ก-1.2 ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)

###### หลักการ

ของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากสารตัวอย่างจนหมด แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักที่ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (Dessicator) แล้วชั่งน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น จะได้ปริมาณของแข็งทั้งหมด

###### เครื่องมือและอุปกรณ์

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

###### วิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมจานระเหย จานที่ใช้จะต้องอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน สมมติ = A กรัม
2. เลือกใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่อยๆรินน้ำตัวอย่างที่ต้องการหาของแข็งทั้งหมดใส่ในจานระเหย นำไประเหยน้ำออกให้หมดบน Water Bath หรือ Hot Plate นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักจานระเหยทันทีที่เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง สมมติ B กรัม น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นก็คือ น้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งคำนวณออกมาในรูปของมิลลิกรัมต่อลิตร

#### การคำนวณ

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

#### ก-1.3 ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS)

##### หลักการ

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

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. จานระเหยกระเบื้อง
2. เตาอบ ควบคุมอุณหภูมิที่ 103-105 องศาเซลเซียส
3. Water Bath
4. เติลิกเคเตอร์
5. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
6. เตาเผาควบคุมอุณหภูมิที่  $550 \pm 50$  องศาเซลเซียส

##### วิธีวิเคราะห์

1. นำจานระเหยที่ได้จากการหาของแข็งทั้งหมด (A กรัม) แล้วนำไปเผาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 550 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที)
2. ปล่อยให้เย็นลงเท่ากับอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่ (Fixed Solids) (B กรัม)

#### การคำนวณ

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

#### ก-1.4 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acids, VFA) และสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดพีเอช
2. เครื่องเซนติฟิวจ์
3. Hot plate และเครื่องกวนแม่เหล็ก

##### สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.05 N
2. สารละลายมาตรฐาน NaOH 0.05 N

##### วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร
2. วัดค่าพีเอช
3. หาความเป็นด่างโดยการไทเทรตตัวอย่างกับสารละลายมาตรฐาน  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.05 N จนพีเอชมีค่าเป็น 4.0 จดปริมาตรกรดที่ใช้ไป คำนวณความเป็นด่างทั้งหมด แล้วไทเทรตต่อไปจนพีเอชเป็น 3.5 (ทำการกวนสารตลอดเวลา)
4. ต้มไล่  $\text{CO}_2$  เป็นระยะเวลาประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน NaOH 0.05 N จนพีเอชเป็น 4 แล้วไทเทรตต่อไปจนพีเอชเป็น 7 (จดปริมาตรสารละลายมาตรฐานด่างที่ใช้ตั้งแต่พีเอช 4 ถึง 7)

##### การคำนวณ

$$\text{ความเป็นด่างทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร as CaCO}_3\text{)} = \frac{\text{NaOH, มล} \times \text{N NaOH} \times 50 \times 1000}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง, มล}}$$

#### ก-1.5 ปริมาณน้ำมันและไขมัน (Oil&Grease)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กรวยแยก ขนาด 250 มิลลิลิตร มีฝาปิดเทฟลอน
2. ขวดรูปชมพู่
3. อ่างน้ำร้อน
4. บีกเกอร์
5. กระดาษกรอง (whatman no.40)
6. เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH meter)
7. อุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน (soxhlet apparatus)
8. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
9. ตู้อบ (Oven)
10. โถดูดความชื้น (Desiccator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 11. กระดาษกรองเซลลูโลส (cellulose extraction thimbles)

### สารเคมี

1. กรด  $H_2SO_4$
2. เฮกเซน
3. โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ )

### วิธีวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างทำให้เป็นกรดที่พีเอช 2 หรือต่ำกว่าด้วยกรด  $H_2SO_4$
2. นำตัวอย่าง 100 มิลลิลิตรกรองผ่านผ้าขาวบางด้วยเครื่องกรองลดความดันแล้วจึงห่อผ้าขาวบางที่มีตะกอนอยู่ให้มิดชิด แล้วใส่ลงในหลอดสำหรับใส่ตัวอย่าง นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในชอคเลต
3. นำตัวอย่างน้ำที่กรองได้ เทลงในกรวยแยก ล้างภาชนะใส่ตัวอย่างด้วยเฮกเซน 20 มิลลิลิตร แล้วเทลงในกรวยแยก ปิดฝาและเขย่าแรงๆ 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น
4. นำตัวอย่างเดิมสกัดแยกตามวิธีข้างต้นอีก 2 ครั้ง ด้วยเฮกเซน 20 มิลลิลิตร ต่อ 1 ครั้ง แล้วเทรวมกันในขวดก้นกลมที่ชั่งน้ำหนักแล้ว (ขวดเดิม)
5. เติมตัวทำละลายเฮกเซนลงในขวดก้นกลมเพิ่ม 180 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางบนเตา
6. ประกอบชุดอุปกรณ์สกัดน้ำมันพร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควบแน่นและเปิดสวิทซ์ให้ความร้อน
7. ใช้เวลาในการสกัดนาน 4 ชั่วโมง โดยปรับความร้อนให้หยดของสารทำละลายกลั่นตัวจากอุปกรณ์ควบแน่นด้วยอัตรา 150 หยดต่ออนาที
8. เมื่อครบ 4 ชั่วโมง นำหลอดใส่ตัวอย่างออกจากชอคเลต ทิ้งให้ตัวทำละลายไหลจากชอคเลตลงในขวดก้นกลมจนหมด
9. ระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน
10. นำขวดก้นกลมไปอบหาปริมาณน้ำมันในตู้อบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส จนแห้งใช้เวลาประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
11. ชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาณน้ำมันจากสูตร

### การคำนวณ

$$\text{ปริมาณน้ำมันและไขมัน} = \frac{(A - B) \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง, มล}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ไชลิ่งค์ฟิลเตอร์ 0.45 ไมโครเมตร
2. ไวแอล ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. ปีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร
4. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร

#### สารเคมี

1. โพแทสเซียมไนเตรต ( $\text{KNO}_3$ )
2. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลต (KHP)
3. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ )
4. โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{NaCO}_3$ )

#### การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

สำหรับ TOC ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. อบโพแทสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลต (KHP) ที่อุณหภูมิ 105 – 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งโพแทสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลต (KHP) 0.2125 กรัม ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำอัลตราเพียวล

สำหรับ TN ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. นำ โพแทสเซียมไนเตรต ( $\text{KNO}_3$ ) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งโพแทสเซียมไนเตรต ( $\text{KNO}_3$ ) 0.7219 กรัม ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำอัลตราเพียวล

#### วิธีการทดลอง

1. กรองตัวอย่างด้วยไชลิ่งค์ฟิลเตอร์ 0.45 ไมโครเมตร ลงในขวดไวแอล
2. นำตัวอย่างวางในช่อง sample cover
3. ประมวลผลโดยเครื่อง TOC Analyzer

### ก-1.7 ความชื้น (Moisture content)

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
2. ตู้อบ

เอกสารนี้เป็น 3. เติลิกเค์เตอร์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่าง 5.0000 กรัม ใส่ลงในชามระเหย บันทึกน้ำหนัก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่
2. นำตัวอย่างที่อบแล้วใส่เตลิกเคเตอร์ ทิ้งให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ

### การคำนวณ

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

### ก-1.8 การตรวจเชื้อที่ใช้ในถังผลิตก๊าซชีวภาพ

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์
2. สไลด์
3. ลวดเขี่ยเชื้อ
4. ตะเกียงแอลกอฮอล์
5. กระจกเข็ดเลนส์

#### สารเคมี

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

#### วิธีการทดลอง

1. หยดสีย้อม Crystal violet ลงบนสไลด์ให้ท่วมรอยที่สเมียร์ทิ้งไว้ 1 นาที
2. ล้างออกด้วยน้ำยาแกรมไอโอดีน แล้วหยดน้ำยาแกรมไอโอดีนให้ท่วมรอยสเมียร์ทิ้งไว้ 1 นาที
3. ล้างน้ำยาแกรมไอโอดีนด้วยน้ำกลั่นแล้วล้างออกอีกครั้งด้วยแอลกอฮอล์ 95% จนน้ำที่ล้างไม่มีสีติดออกมา
4. ย้อมทับ (Counterstain) ด้วยสีย้อม Safranin ทิ้งไว้ 1 นาที
5. ล้างออกด้วยน้ำกลั่น แล้วปล่อยให้สไลด์แห้ง
6. ตรวจสอบผลโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่า และบันทึกภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## ผลการทดลอง

ข-1 คุณสมบัติของวัสดุป้อน (Feed) และน้ำตะกอน (Slurry)

ตารางที่ ข-1.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุป้อน

พารามิเตอร์	วัสดุป้อน			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ความชื้น (Moisture content) (%)	90.91	90.43	90.70	90.68	0.24
อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	7,379.00	7,435.00	7,453.00	7,422.33	38.59
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) (mg/L)	156.90	169.10	153.8	159.93	8.09
C/N ratio	47.03	43.97	48.46	46.41	2.29

ตารางที่ ข-1.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำตะกอน

พารามิเตอร์	น้ำตะกอน			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ความชื้น	97.75	97.55	97.94	97.75	0.20
อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	173.50	139.50	88.32	133.77	42.88
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) (mg/L)	264.30	247.40	254.00	255.23	8.52
C/N ratio	0.66	0.56	0.35	0.52	0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-2 ผลการศึกษาสภาวะในระหว่างการหมักก๊าซชีวภาพ

1) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

ตารางที่ ข-2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของวัสดุบ่อน

วันที่	พีเอช			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
07/09/59	4.75	4.71	4.71	4.72	0.02
09/09/59	2.50	2.40	2.50	2.47	0.06
10/09/59	4.80	4.60	4.60	4.67	0.12
14/09/59	4.20	4.10	4.20	4.17	0.06
16/09/59	4.80	4.90	4.80	4.83	0.06
26/09/59	3.50	3.50	3.50	3.50	0
27/09/59	4.90	4.80	4.90	4.87	0.06
30/09/59	4.00	3.90	3.90	3.93	0.06
03/10/59	5.90	5.90	5.90	5.90	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำตะกอน

วันที่	พีเอช			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
07/09/59	7.41	7.38	7.40	7.40	0.02
09/09/59	6.90	6.90	6.90	6.90	0
10/09/59	8.30	8.20	8.40	8.30	0.10
14/09/59	8.10	8.10	8.10	8.10	0
16/09/59	8.20	8.20	8.20	8.20	0
26/09/59	8.30	8.40	8.40	8.37	0.06
27/09/59	8.10	8.10	8.10	8.10	0
30/09/59	8.70	8.60	8.60	8.63	0.06
03/10/59	8.70	8.80	8.90	8.80	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3) การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมด

ตารางที่ ข-2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของวัสดุป้อน

วันที่	สภาพความเป็นด่าง (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )			ค่าเฉลี่ย (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
07/09/59	1,775.00	1,820.00	1,845.00	1,813.33	35.47
09/09/59	1,010.00	1,370.00	1,295.00	1,225.00	189.93
10/09/59	1,030.00	757.50	720.00	835.83	169.20
14/09/59	1,240.00	1,225.00	1,255.00	1,240.00	15.00
16/09/59	1,110.00	1,060.00	1,090.00	1,086.67	25.17
26/09/59	1,065.00	1,190.00	1,115.00	1,123.33	62.92
27/09/59	1,045.00	940.00	1,075.00	1,020.00	70.89
30/09/59	1,005.00	1,025.00	1,010.00	1,013.33	10.41
03/10/59	862.50	865.00	860.00	862.50	2.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.4 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำตะกอน

วันที่	สภาพความเป็นด่าง (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )			ค่าเฉลี่ย (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
07/09/59	2,420.00	3,120.00	3,207.50	2,915.83	431.63
09/09/59	3,475.00	2,930.00	3,190.00	3,198.33	272.60
10/09/59	1,927.50	2,550.00	2,352.50	2,276.67	318.10
14/09/59	2,215.00	1,990.00	2,302.50	2,169.00	161.21
16/09/59	2,570.00	2,710.00	2,470.00	2,583.33	120.55
26/09/59	2,250.00	2,210.00	1,730.00	2,063.33	289.37
27/09/59	2,260.00	2,590.00	2,585.00	2,478.33	189.10
30/09/59	2,210.00	2,245.00	2,325.00	2,260.00	58.95
03/10/59	1,810.00	1,910.00	1,995.00	1,905.00	92.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4) การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมด

ตารางที่ ข-2.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัสดุป้อน

วันที่	ของแข็งทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
09/09/59	81,436	73,950	85,474	80,287	2,855
10/09/59	82,492	60,382	84,552	75,809	1,457
14/09/59	79,050	80,540	77,656	79,082	1,442
26/09/59	86,150	99,800	86,398	89,428	175
27/09/59	77,616	78,384	74,114	76,705	543
30/09/59	100,326	104,560	89,792	98,226	2,994
03/10/59	102,268	101,526	103,796	102,530	1,157

ตารางที่ ข-2.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำตะกอน

วันที่	ของแข็งทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	% removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
09/09/59	23,748	20,698	20,480	21,642	1,827	73.04
10/09/59	16,652	16,720	16,626	16,666	49	78.02
14/09/59	18,126	18,376	18,386	18,296	147	76.86
26/09/59	12,864	13,444	11,808	12,705	829	85.79
27/09/59	23,186	24,960	24,884	24,343	1,003	68.26
30/09/59	20,450	21,892	22,170	21,504	923	78.11
03/10/59	26,786	27,940	27,972	27,566	676	73.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5) การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด

ตารางที่ ข-2.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดของวัสดุปุ๋ยมูล

วันที่	ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
09/09/59	77,150	68,238	76,004	73,797	810
10/09/59	78,008	54,092	72,366	68,155	3,989
26/09/59	82,086	99,800	86,398	89,428	3,049
27/09/59	72,866	73,596	69,520	71,994	2,173
30/09/59	96,286	98,504	80,704	91,831	1,568
03/10/59	95,960	91,884	91,984	93,276	71

ตารางที่ ข-2.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดของน้ำตะกอน

วันที่	ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	% removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
09/09/59	15,058	11,914	11,544	12,838	1,930	82.6
10/09/59	9,082	8,888	8,474	8,815	311	87.07
26/09/59	12,108	13,444	11,808	12,453	871	86.07
27/09/59	15,426	17,064	16,948	16,479	914	77.11
30/09/59	11,970	13,044	12,702	12,572	549	86.31
03/10/59	16,238	16,900	15,314	16,151	797	82.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6) การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหย

ตารางที่ ข-2.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยของวัสดุบ่อน

วันที่	กรดไขมันระเหย (mg/L as CH <sub>3</sub> COOH)			ค่าเฉลี่ย (mg/L as CH <sub>3</sub> COOH)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
07/09/59	2,662.50	2,730.00	2,767.50	2,720.00	53.21
09/09/59	1,515.00	2,055.00	1,942.50	1,837.50	284.90
10/09/59	1,545.00	1,136.25	1,080.00	1,253.75	253.79
14/09/59	1,860.00	1,837.50	1,882.50	1,860.00	22.50
16/09/59	1,665.00	1,590.00	1,635.00	1,630.00	37.75
26/09/59	1,597.50	1,785.00	1,672.50	1,685.00	94.37
27/09/59	1,567.50	1,410.00	1,612.50	1,530.00	106.33
30/09/59	1,507.50	1,537.50	1,515.00	1,520.00	15.61
03/10/59	1,293.75	1,297.50	1,290.00	1,293.75	3.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำตะกอน

วันที่	กรดไขมันระเหย (mg/L as CH <sub>3</sub> COOH)			ค่าเฉลี่ย (mg/L as CH <sub>3</sub> COOH)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
07/09/59	3,630.00	4,680.00	4,811.25	4,373.75	647.44
09/09/59	5,212.50	4,395.00	4,785.00	4,797.50	408.89
10/09/59	2,891.25	3,825.00	3,528.75	3,415.00	477.15
14/09/59	3,322.50	2,985.00	3,453.75	3,253.75	241.82
16/09/59	3,855.00	4,065.00	3,705.00	3,875.00	180.83
26/09/59	3,375.00	3,315.00	2,595.00	3,095.00	434.05
27/09/59	3,390.00	3,885.00	3,877.50	3,717.50	283.65
30/09/59	3,315.00	3,367.50	3,487.50	3,390.00	88.42
03/10/59	2,715.00	2,865.00	2,992.50	2,857.50	138.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7) การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมัน

ตารางที่ ข-2.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมันของวัสดุป้อน

วันที่	ไขมันและน้ำมัน (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
26/09/59	5,361	4,794	5,089	5,081	283.58
27/09/59	4,693	4,884	4,702	4,759	107.77
30/09/59	5,809	6,379	2,368	6,094	403.05

ตารางที่ ข-2.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันและไขมันของน้ำตะกอน

วันที่	ไขมันและน้ำมัน (mg/L)			ค่าเฉลี่ย (mg/L)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	% removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
26/09/59	3,240	3,089	3,165	3,165	75.50	37.71
27/09/59	1,540	3,357	1,597	1,569	40.31	67.04
30/09/59	2,872	1,986	2,051	2,303	493.84	62.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ ข-2.13 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในเวลา 24 ชั่วโมง

ชั่วโมงที่	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> /hr)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (m <sup>3</sup> )
1	0.00	0.00
2	0.17	0.17
3	0.16	0.33
4	0.20	0.53
5	0.25	0.78
6	0.20	0.98
7	0.21	1.18
8	0.18	1.37
9	0.21	1.58
10	0.23	1.81
11	0.20	2.02
12	0.18	2.20
13	0.16	2.36
14	0.12	2.48
15	0.07	2.55
16	0.06	2.62
17	0.00	2.62
18	0.00	2.62
19	0.00	2.62
20	0.00	2.62
21	0.00	2.62
22	0.00	2.62
23	0.00	2.62
24	0.00	2.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

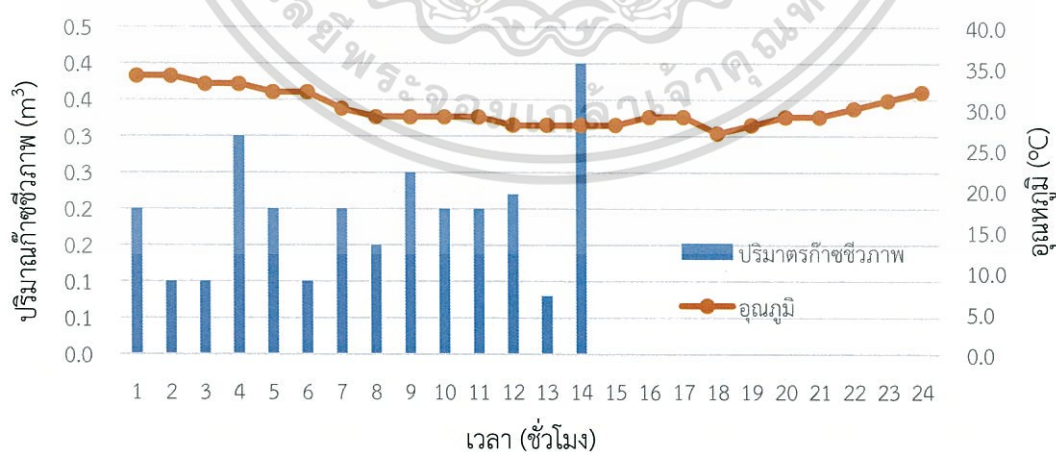
ตารางที่ ข-2.14 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันช่วงระยะทดลอง

วัน	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> /d)
1	2.70
2	2.60
3	2.70
4	2.60
5	2.60
6	2.60
7	2.60
8	2.60
9	2.60
10	2.60
11	2.60
12	2.60
13	2.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 1

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)
1	11.00	0.2	34.0	13	23.00	0.1	28.0
2	12.00	0.1	34.0	14	24.00	0.4	28.0
3	13.00	0.1	33.0	15	1.00	0.0	28.0
4	14.00	0.3	33.0	16	2.00	0.0	29.0
5	15.00	0.2	32.0	17	3.00	0.0	29.0
6	16.00	0.1	32.0	18	4.00	0.0	27.0
7	17.00	0.2	30.0	19	5.00	0.0	28.0
8	18.00	0.2	29.0	20	6.00	0.0	29.0
9	19.00	0.3	29.0	21	7.00	0.0	29.0
10	20.00	0.2	29.0	22	8.00	0.0	30.0
11	21.00	0.2	29.0	23	9.00	0.0	31.0
12	22.00	0.2	28.0	24	10.00	0.0	32.0
ผลรวม						2.7	
ค่าเฉลี่ย						2.7±0.12	30.0±2.09

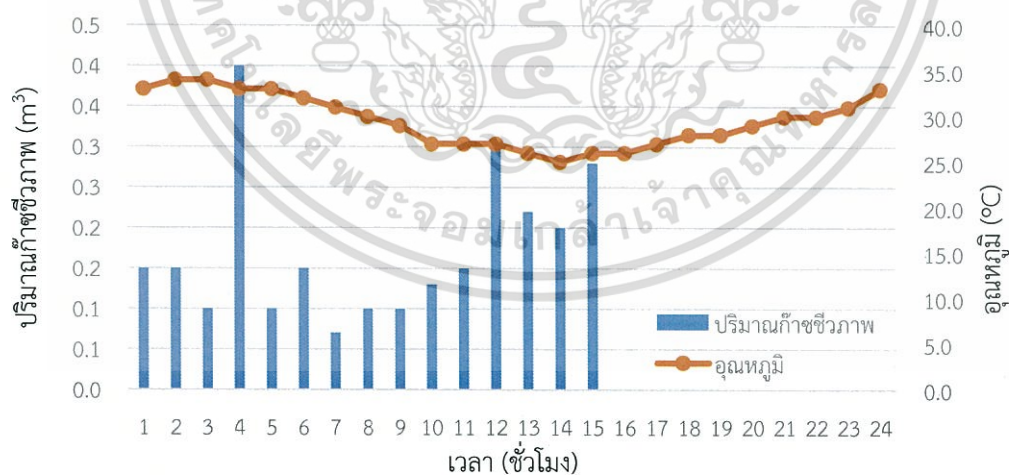


รูปที่ ข-2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 2

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)
1	11.00	0.2	33.0	13	23.00	0.2	26.0
2	12.00	0.2	34.0	14	24.00	0.2	25.0
3	13.00	0.1	34.0	15	1.00	0.3	26.0
4	14.00	0.4	33.0	16	2.00	0.0	26.0
5	15.00	0.1	33.0	17	3.00	0.0	27.0
6	16.00	0.2	32.0	18	4.00	0.0	28.0
7	17.00	0.1	31.0	19	5.00	0.0	28.0
8	18.00	0.1	30.0	20	6.00	0.0	29.0
9	19.00	0.1	29.0	21	7.00	0.0	30.0
10	20.00	0.1	27.0	22	8.00	0.0	30.0
11	21.00	0.2	27.0	23	9.00	0.0	31.0
12	22.00	0.3	27.0	24	10.00	0.0	33.0
ผลรวม						2.6	
ค่าเฉลี่ย						2.6±0.11	29.5±2.86

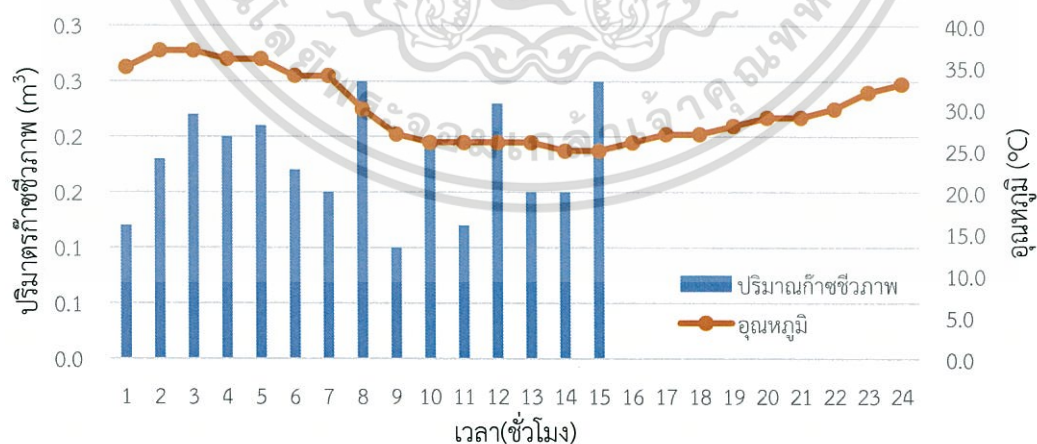


รูปที่ ข-2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.17 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 3

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )
1	11.00	0.1	35.0	13	23.00	0.2	26.0
2	12.00	0.2	37.0	14	24.00	0.2	25.0
3	13.00	0.2	37.0	15	1.00	0.3	25.0
4	14.00	0.2	36.0	16	2.00	0.0	26.0
5	15.00	0.2	36.0	17	3.00	0.0	27.0
6	16.00	0.2	34.0	18	4.00	0.0	27.0
7	17.00	0.2	34.0	19	5.00	0.0	28.0
8	18.00	0.3	30.0	20	6.00	0.0	29.0
9	19.00	0.1	27.0	21	7.00	0.0	29.0
10	20.00	0.2	26.0	22	8.00	0.0	30.0
11	21.00	0.1	26.0	23	9.00	0.0	32.0
12	22.00	0.2	26.0	24	10.00	0.0	33.0
ผลรวม						2.7	
ค่าเฉลี่ย						$2.7 \pm 0.10$	$30.0 \pm 4.19$

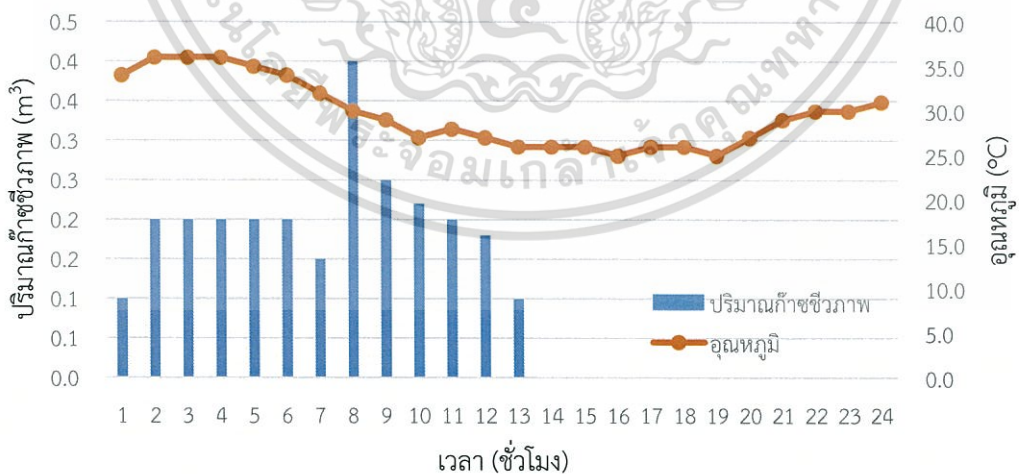


รูปที่ ข-2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 4

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตราการผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตราการผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)
1	11.00	0.1	34.0	13	23.00	0.1	26.0
2	12.00	0.2	36.0	14	24.00	0.0	26.0
3	13.00	0.2	36.0	15	1.00	0.0	26.0
4	14.00	0.2	36.0	16	2.00	0.0	25.0
5	15.00	0.2	35.0	17	3.00	0.0	26.0
6	16.00	0.2	34.0	18	4.00	0.0	26.0
7	17.00	0.2	32.0	19	5.00	0.0	25.0
8	18.00	0.4	30.0	20	6.00	0.0	27.0
9	19.00	0.3	29.0	21	7.00	0.0	29.0
10	20.00	0.2	27.0	22	8.00	0.0	30.0
11	21.00	0.2	28.0	23	9.00	0.0	30.0
12	22.00	0.2	27.0	24	10.00	0.0	31.0
ผลรวม						2.6	
ค่าเฉลี่ย						2.6±0.11	29.6±3.79

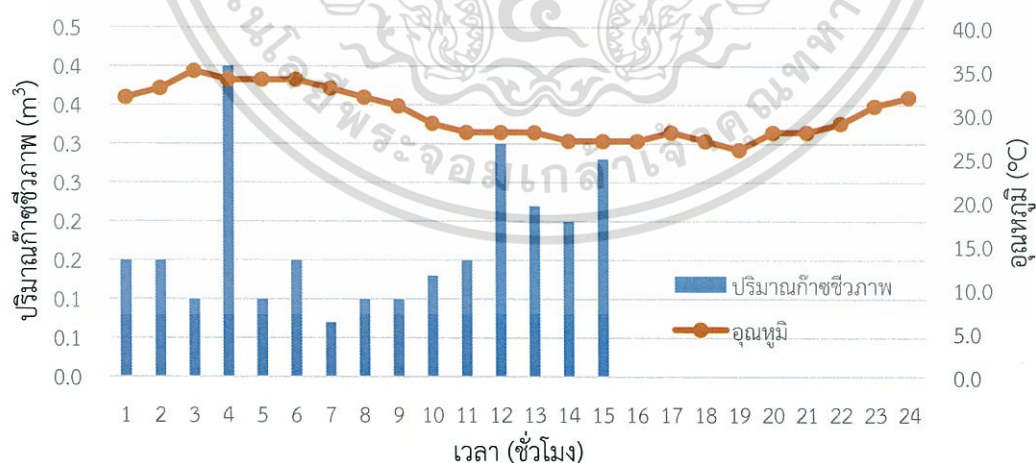


รูปที่ ข-2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.19 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 5

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)
1	11.00	0.2	32.0	13	23.00	0.2	28.0
2	12.00	0.2	33.0	14	24.00	0.2	27.0
3	13.00	0.1	35.0	15	1.00	0.3	27.0
4	14.00	0.4	34.0	16	2.00	0.0	27.0
5	15.00	0.1	34.0	17	3.00	0.0	28.0
6	16.00	0.2	34.0	18	4.00	0.0	27.0
7	17.00	0.1	33.0	19	5.00	0.0	26.0
8	18.00	0.1	32.0	20	6.00	0.0	28.0
9	19.00	0.1	31.0	21	7.00	0.0	28.0
10	20.00	0.1	29.0	22	8.00	0.0	29.0
11	21.00	0.2	28.0	23	9.00	0.0	31.0
12	22.00	0.3	28.0	24	10.00	0.0	32.0
ผลรวม						2.6	
ค่าเฉลี่ย						2.6±0.11	30.0±2.82

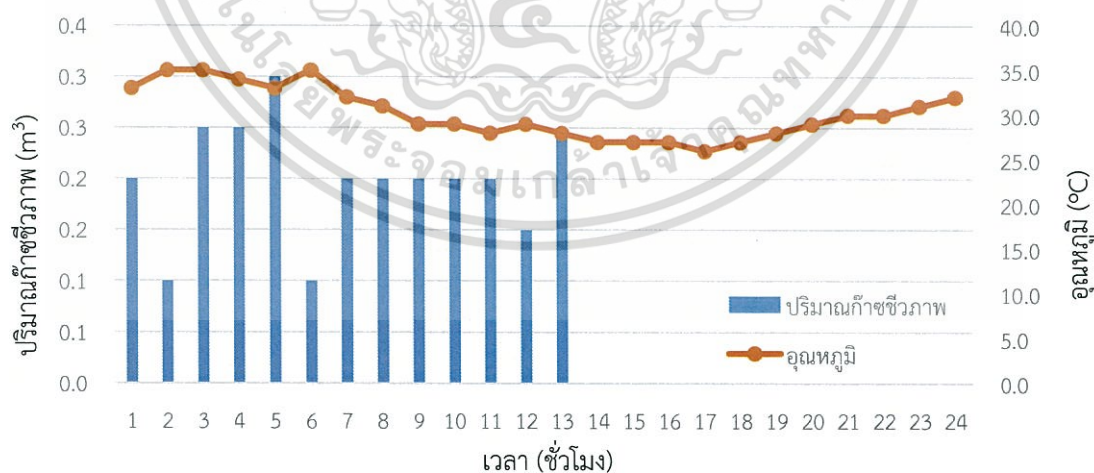


รูปที่ ข-2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 6

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )
1	11.00	0.2	33.0	13	23.00	0.3	28.0
2	12.00	0.1	35.0	14	24.00	0.0	27.0
3	13.00	0.3	35.0	15	1.00	0.0	27.0
4	14.00	0.3	34.0	16	2.00	0.0	27.0
5	15.00	0.3	33.0	17	3.00	0.0	26.0
6	16.00	0.1	35.0	18	4.00	0.0	27.0
7	17.00	0.2	32.0	19	5.00	0.0	28.0
8	18.00	0.2	31.0	20	6.00	0.0	29.0
9	19.00	0.2	29.0	21	7.00	0.0	30.0
10	20.00	0.2	29.0	22	8.00	0.0	30.0
11	21.00	0.2	28.0	23	9.00	0.0	31.0
12	22.00	0.2	29.0	24	10.00	0.0	32.0
ผลรวม						2.6	
ค่าเฉลี่ย						$2.6 \pm 0.11$	$30.2 \pm 2.84$

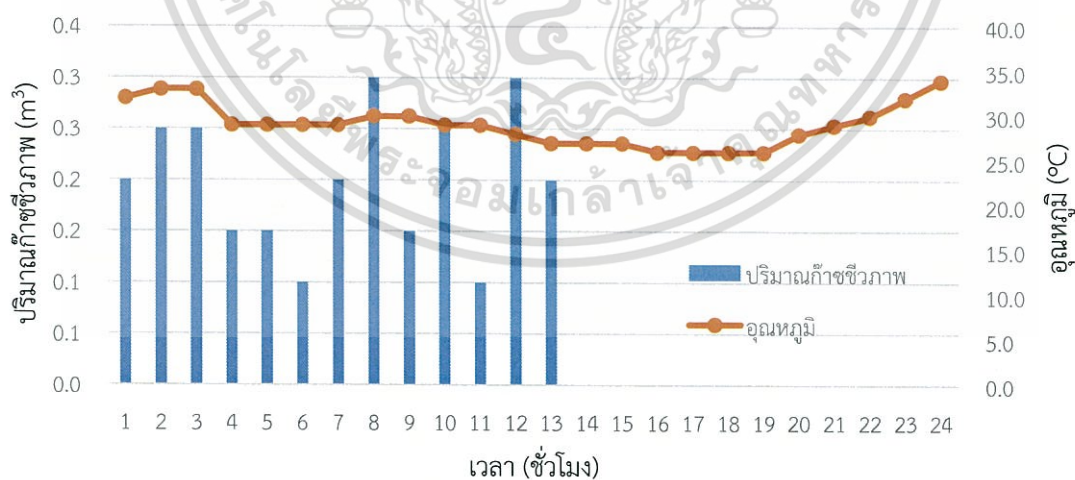


รูปที่ ข-2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.21 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 7

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)
1	11.00	0.2	32.0	13	23.00	0.2	27.0
2	12.00	0.3	33.0	14	24.00	0.0	27.0
3	13.00	0.3	33.0	15	1.00	0.0	27.0
4	14.00	0.2	29.0	16	2.00	0.0	26.0
5	15.00	0.2	29.0	17	3.00	0.0	26.0
6	16.00	0.1	29.0	18	4.00	0.0	26.0
7	17.00	0.2	29.0	19	5.00	0.0	26.0
8	18.00	0.3	30.0	20	6.00	0.0	28.0
9	19.00	0.2	30.0	21	7.00	0.0	29.0
10	20.00	0.3	29.0	22	8.00	0.0	30.0
11	21.00	0.1	29.0	23	9.00	0.0	32.0
12	22.00	0.3	28.0	24	10.00	0.0	34.0
ผลรวม						2.6	
ค่าเฉลี่ย						2.6±0.11	29.1±2.36

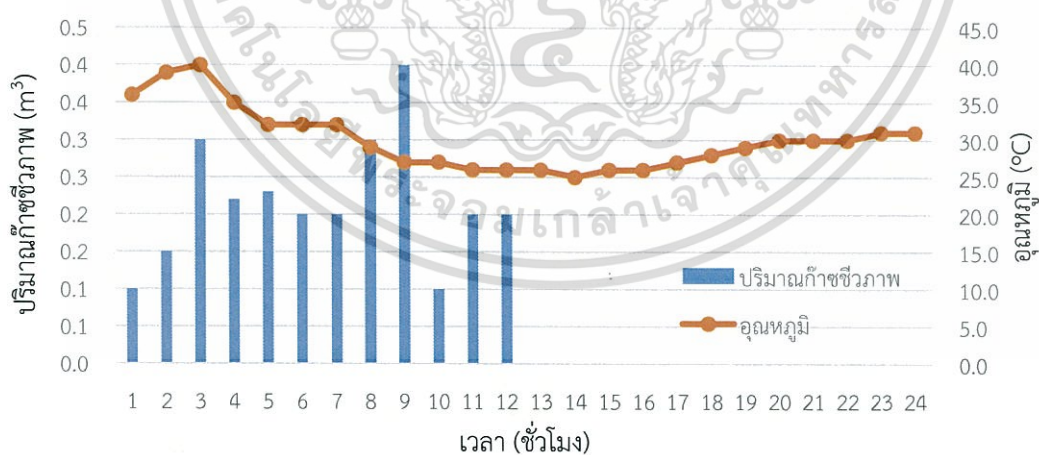


รูปที่ ข-2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 8

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )
1	11.00	0.1	36.0	13	23.00	0.0	26.0
2	12.00	0.2	39.0	14	24.00	0.0	25.0
3	13.00	0.3	40.0	15	1.00	0.0	26.0
4	14.00	0.2	35.0	16	2.00	0.0	26.0
5	15.00	0.2	32.0	17	3.00	0.0	27.0
6	16.00	0.2	32.0	18	4.00	0.0	28.0
7	17.00	0.2	32.0	19	5.00	0.0	29.0
8	18.00	0.3	29.0	20	6.00	0.0	30.0
9	19.00	0.4	27.0	21	7.00	0.0	30.0
10	20.00	0.1	27.0	22	8.00	0.0	30.0
11	21.00	0.2	26.0	23	9.00	0.0	31.0
12	22.00	0.2	26.0	24	10.00	0.0	31.0
ผลรวม						2.6	
ค่าเฉลี่ย						$2.6 \pm 0.13$	$30.0 \pm 4.14$

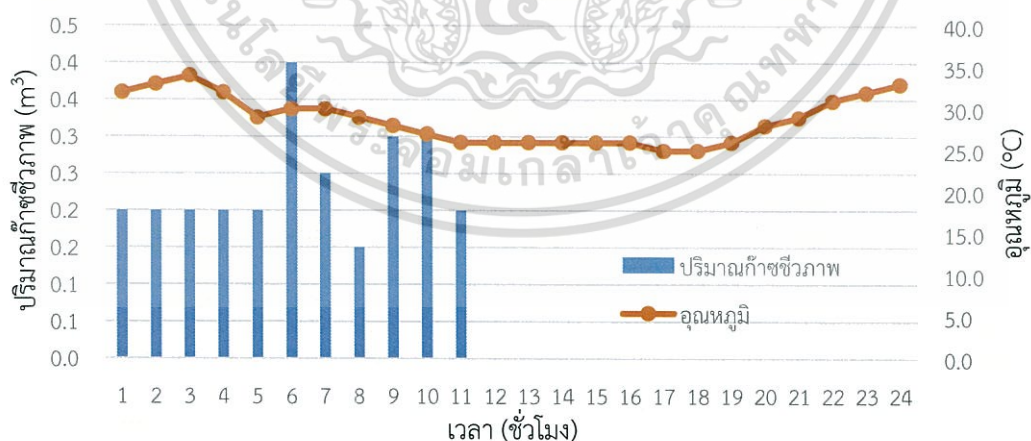


รูปที่ ข-2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 9

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )
1	11.00	0.2	32.0	13	23.00	0.0	26.0
2	12.00	0.2	33.0	14	24.00	0.0	26.0
3	13.00	0.2	34.0	15	1.00	0.0	26.0
4	14.00	0.2	32.0	16	2.00	0.0	26.0
5	15.00	0.2	29.0	17	3.00	0.0	25.0
6	16.00	0.4	30.0	18	4.00	0.0	25.0
7	17.00	0.3	30.0	19	5.00	0.0	26.0
8	18.00	0.2	29.0	20	6.00	0.0	28.0
9	19.00	0.3	28.0	21	7.00	0.0	29.0
10	20.00	0.3	27.0	22	8.00	0.0	31.0
11	21.00	0.2	26.0	23	9.00	0.0	32.0
12	22.00	0.0	26.0	24	10.00	0.0	33.0
ผลรวม						2.6	
ค่าเฉลี่ย						$2.6 \pm 0.13$	$28.7 \pm 2.87$

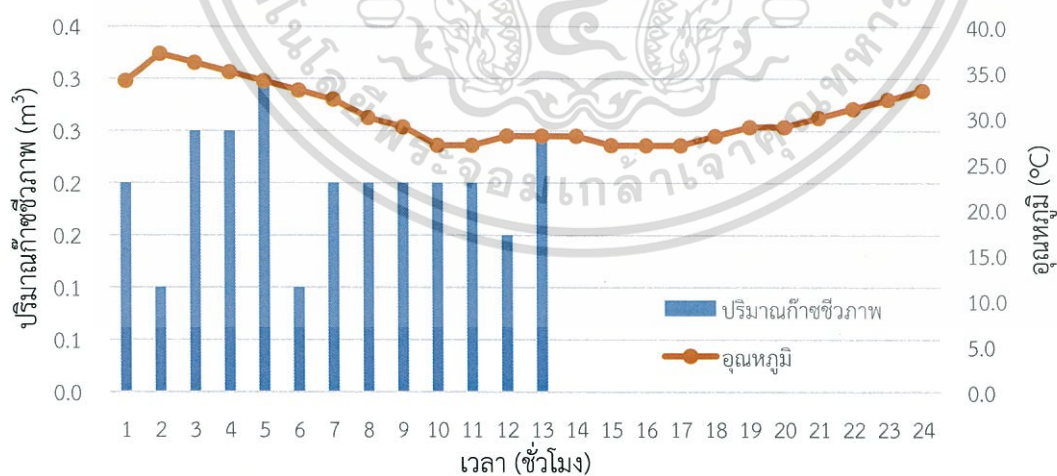


รูปที่ ข-2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.24 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 10

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )
1	11.00	0.2	34.0	13	23.00	0.3	28.0
2	12.00	0.1	37.0	14	24.00	0.0	28.0
3	13.00	0.3	36.0	15	1.00	0.0	27.0
4	14.00	0.3	35.0	16	2.00	0.0	27.0
5	15.00	0.3	34.0	17	3.00	0.0	27.0
6	16.00	0.1	33.0	18	4.00	0.0	28.0
7	17.00	0.2	32.0	19	5.00	0.0	29.0
8	18.00	0.2	30.0	20	6.00	0.0	29.0
9	19.00	0.2	29.0	21	7.00	0.0	30.0
10	20.00	0.2	27.0	22	8.00	0.0	31.0
11	21.00	0.2	27.0	23	9.00	0.0	32.0
12	22.00	0.2	28.0	24	10.00	0.0	33.0
ผลรวม						2.6	
ค่าเฉลี่ย						$2.6 \pm 0.11$	$30.5 \pm 3.15$

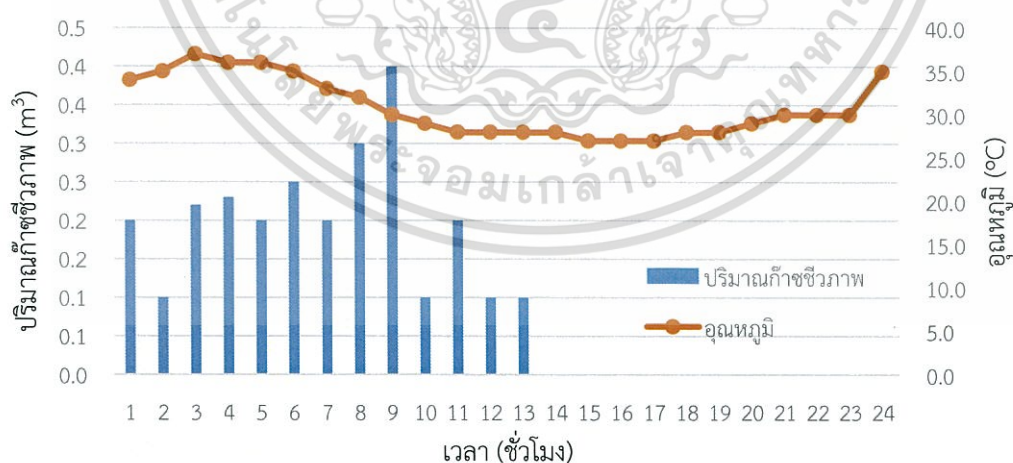


รูปที่ ข-2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.25 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 11

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ (m <sup>3</sup> )	T (°C)
1	11.00	0.2	34.0	13	23.00	0.1	28.0
2	12.00	0.1	35.0	14	24.00	0.0	28.0
3	13.00	0.2	37.0	15	1.00	0.0	27.0
4	14.00	0.2	36.0	16	2.00	0.0	27.0
5	15.00	0.2	36.0	17	3.00	0.0	27.0
6	16.00	0.3	35.0	18	4.00	0.0	28.0
7	17.00	0.2	33.0	19	5.00	0.0	28.0
8	18.00	0.3	32.0	20	6.00	0.0	29.0
9	19.00	0.4	30.0	21	7.00	0.0	30.0
10	20.00	0.1	29.0	22	8.00	0.0	30.0
11	21.00	0.2	28.0	23	9.00	0.0	30.0
12	22.00	0.1	28.0	24	10.00	0.0	35.0
ผลรวม						2.6	
ค่าเฉลี่ย						2.6±0.13	30.8±3.37

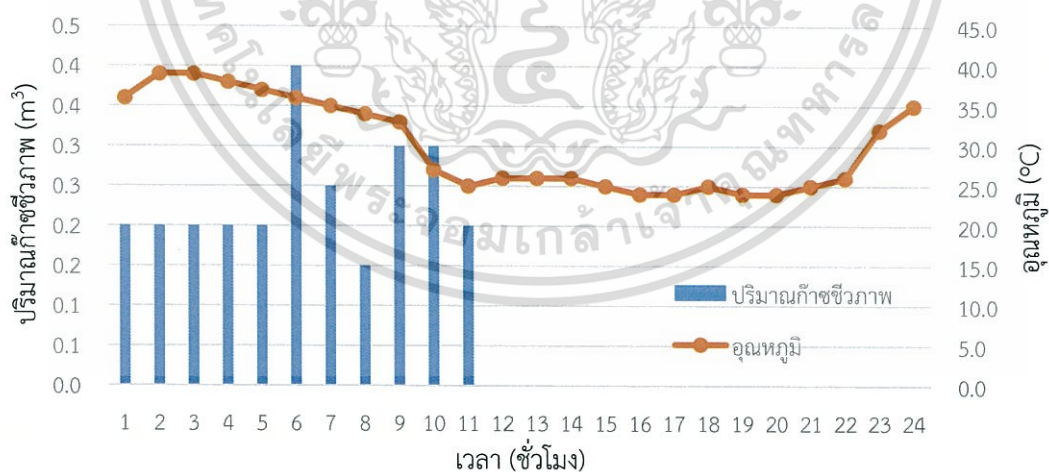


รูปที่ ข-2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.26 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 12

ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )	ชั่วโมงที่	เวลา (น.)	อัตรา การผลิตก๊าซ ( $m^3$ )	T ( $^{\circ}C$ )
1	11.00	0.2	36.0	13	23.00	0.0	26.0
2	12.00	0.2	39.0	14	24.00	0.0	26.0
3	13.00	0.2	39.0	15	1.00	0.0	25.0
4	14.00	0.2	38.0	16	2.00	0.0	24.0
5	15.00	0.2	37.0	17	3.00	0.0	24.0
6	16.00	0.4	36.0	18	4.00	0.0	25.0
7	17.00	0.3	35.0	19	5.00	0.0	24.0
8	18.00	0.2	34.0	20	6.00	0.0	24.0
9	19.00	0.3	33.0	21	7.00	0.0	25.0
10	20.00	0.3	27.0	22	8.00	0.0	26.0
11	21.00	0.2	25.0	23	9.00	0.0	32.0
12	22.00	0.0	26.0	24	10.00	0.0	35.0
ผลรวม						2.6	
ค่าเฉลี่ย						$2.6 \pm 0.13$	$30.0 \pm 5.68$



รูปที่ ข-2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ วันที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9) องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ ข-2.27 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพในระหว่างการหมัก

วันที่	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
07/09/59	48.7	36.2	15	40
09/09/59	49.5	34.6	15	40
14/09/59	50.7	34.2	14.9	40
ค่าเฉลี่ย	49.63 ± 1.01	35.00 ± 1.06	14.97 ± 0.06	40.00 ± 0.00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## การคำนวณ

## ค-1 การคำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ตารางที่ ค-1 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

พารามิเตอร์	วัสดุป้อน (Feed)	ของผสม (Slurry)
อินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC)	7422.33	133.77
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	159.93	255.23

หา C/N Ratio ของวัสดุป้อน

$$\text{C/N ratio} = \frac{\text{TOC (mg/L)}}{\text{TN (mg/L)}}$$

$$\text{C/N ratio} = \frac{7422.33}{159.93}$$

$$\text{C/N ratio} = 46.41$$

## สารละลายมาตรฐานของ TOC และ TN

TOC-V Cal Curve Information  
 TN std IC 0-500 ppm Pranee 15-9-59.2016\_09\_15\_10\_52\_47.cal

Date of Creation 9:11:32 15/9/2559  
 User Auto  
 System TOC-TN

## Cal. Curve

Sample Name: Untitled  
 Sample ID: Untitled  
 Cal. Curve: TN std IC 0-500 ppm Pranee 15-9-59.2016\_09\_15\_10\_52\_47.cal  
 Status Completed  
 Comment:

Type	Anal.
Standard	IC

Conc: 0.000ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	0.000	50uL	1	*****		15/9/2559 10:57:36
2	0.000	50uL	1	*****		15/9/2559 10:59:54

Mean Area 0.000  
 SD Area 0.000  
 CV Area 0.00%  
 Vial 1

Conc: 25.00ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	140.5	50uL	20	*****		15/9/2559 11:07:10
2	120.5	50uL	20	*****		15/9/2559 11:10:49

Mean Area 130.5  
 SD Area 14.14  
 CV Area 10.84%  
 Vial 3

Conc: 50.00ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	247.1	50uL	10	*****		15/9/2559 11:16:07
2	233.3	50uL	10	*****		15/9/2559 11:19:46

Mean Area 240.2  
 SD Area 9.758  
 CV Area 4.06%  
 Vial 3

Conc: 100.0ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	513.7	50uL	5	*****		15/9/2559 11:25:09
2	479.8	50uL	5	*****		15/9/2559 11:28:55

Mean Area 496.8  
 SD Area 23.97  
 CV Area 4.83%  
 Vial 3

Conc: 250.0ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	1177	50uL	2	*****		15/9/2559 11:34:18
2	1194	50uL	2	*****		15/9/2559 11:38:10

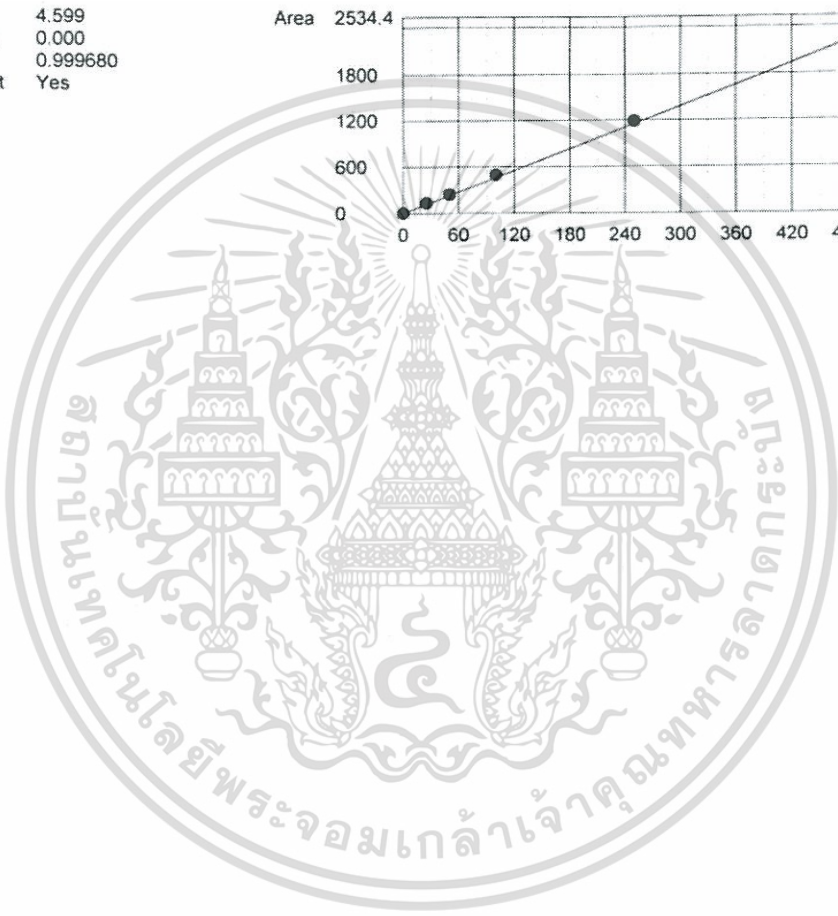
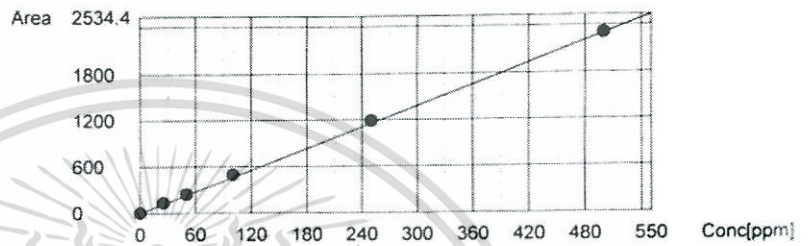
Mean Area 1186  
 SD Area 12.02  
 CV Area 1.01%  
 Vial 3

Conc: 500.0ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	2256	50uL	1	*****		15/9/2559 11:42:10
2	2352	50uL	1	*****		15/9/2559 11:45:21

Mean Area 2304  
 SD Area 67.88  
 CV Area 2.95%  
 Vial 3

Slope: 4.599  
 Intercept 0.000  
 $r^2$  0.999680  
 Zero Shift Yes



TOC-V Cal Curve Information  
Asi-TC-TN 0-1000 ppm Pranee 15-9-59 .2016\_09\_15\_09\_27\_40.cal

Date of Creation 8:59:30 15/9/2559  
User Auto  
System TOC-TN

Cal. Curve

Sample Name: Untitled  
Sample ID: Untitled  
Cal. Curve: Asi-TC-TN 0-1000 ppm Pranee 15-9-59 .2016\_09\_15\_09\_27\_40.cal  
Status Completed  
Comment:

Type	Anal.
Standard	TC

Conc: 0.000ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	0.000	20uL	1	*****		15/9/2559 9:32:26
2	0.000	20uL	1	*****		15/9/2559 9:34:41

Acid Add. 0.000%  
Mean Area 0.000  
SD Area 0.000  
CV Area 0.00%  
Vial 1

Conc: 50.00ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	125.9	20uL	20	*****		15/9/2559 9:42:50
2	84.48	20uL	20	*****		15/9/2559 9:46:38

Acid Add. 0.000%  
Mean Area 105.2  
SD Area 29.29  
CV Area 27.84%  
Vial 2

Conc: 100.0ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	223.9	20uL	10	*****		15/9/2559 9:52:47
2	173.8	20uL	10	*****		15/9/2559 9:56:40

Acid Add. 0.000%  
Mean Area 198.9  
SD Area 35.43  
CV Area 17.82%  
Vial 2

Conc: 200.0ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	435.5	20uL	5	*****		15/9/2559 10:02:58
2	356.8	20uL	5	*****		15/9/2559 10:07:00

Acid Add. 0.000%  
Mean Area 396.1  
SD Area 55.65  
CV Area 14.05%  
Vial 2

Conc: 500.0ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	943.3	20ul	2	*****		15/9/2559 10:13:31
2	894.2	20ul	2	*****		15/9/2559 10:17:46

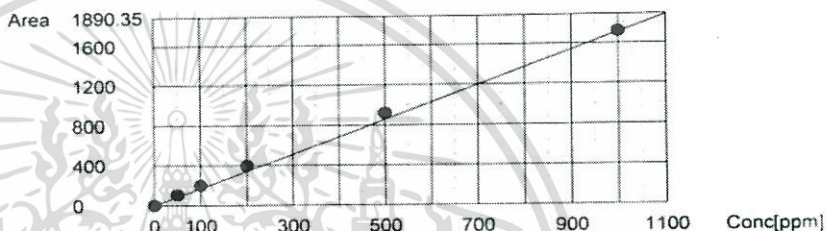
Acid Add. 0.000%  
Mean Area 918.8  
SD Area 34.72  
CV Area 3.78%  
Vial 2

Conc: 1000ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	1700	20ul	1	*****		15/9/2559 10:23:49
2	1737	20ul	1	*****		15/9/2559 10:27:20

Acid Add. 0.000%  
Mean Area 1719  
SD Area 26.16  
CV Area 1.52%  
Vial 2

Slope: 1.712  
Intercept 0.000  
r<sup>2</sup> 0.998517  
Zero Shift Yes



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOC-V Cal Curve Information  
std TN 0-500 ppm wanalee 15-9-59.2016\_09\_15\_12\_14\_23.cal

Date of Creation 12:03:10 15/9/2559  
User Auto  
System TOC-TN

## Cal. Curve

Sample Name: Untitled  
Sample ID: Untitled  
Cal. Curve: std TN 0-500 ppm wanalee 15-9-59.2016\_09\_15\_12\_14\_23.cal  
Status Completed  
Comment:

Type	Anal.
Standard	TN

Conc: 0.000ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	0.000	80uL	1	*****		15/9/2559 12:18:44
2	0.000	80uL	1	*****		15/9/2559 12:20:56

Acid Add. 0.000%  
Mean Area 0.000  
SD Area 0.000  
CV Area 0.00%  
Vial 1

Conc: 25.00ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	1087	80uL	20	*****		15/9/2559 12:30:30
2	768.0	80uL	20	*****		15/9/2559 12:35:45

Acid Add. 0.000%  
Mean Area 927.5  
SD Area 225.6  
CV Area 24.32%  
Vial 4

Conc: 50.00ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	1734	80uL	10	T*****		15/9/2559 12:44:07
2	1383	80uL	10	*****		15/9/2559 12:49:36

Acid Add. 0.000%  
Mean Area 1559  
SD Area 248.2  
CV Area 15.93%  
Vial 4

Conc: 100.0ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	2954	80uL	5	T*****		15/9/2559 12:58:00
2	2523	80uL	5	T*****		15/9/2559 13:04:10

Acid Add. 0.000%  
Mean Area 2739  
SD Area 304.8  
CV Area 11.13%  
Vial 4

Conc: 250.0ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	5637	80uL	2	TH*****		15/9/2559 13:12:34
2	5320	80uL	2	T*****		15/9/2559 13:23:16

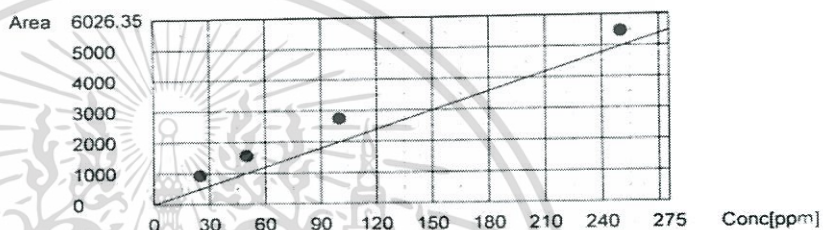
Acid Add. 0.000%  
Mean Area 5479  
SD Area 224.2  
CV Area 4.09%  
Vial 4

Conc: 500.0ppm

No.	Area	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Rem.	Ex.	Date / Time
1	9539	80uL	1	TH*****		15/9/2559 13:33:09
2	8374	80uL	1	TH*****		15/9/2559 13:50:10

Acid Add. 0.000%  
Mean Area 8957  
SD Area 823.8  
CV Area 9.20%  
Vial 4

Slope: 19.93  
Intercept 0.000  
r<sup>2</sup> 0.995430  
Zero Shift Yes



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค-2 การคำนวณระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในระบบ

คำนวณระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในระบบ

$$\text{จาก HRT} = \frac{V \text{ (ลูกบาศก์เมตร)}}{Q \text{ (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)}}$$

$$V = \text{ปริมาตรถัง (กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง)}$$

$$\text{แทนค่า } V = 1.47 \times 2.99 \times 0.95 = 4.18 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

$$Q = \text{อัตราการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ}$$

อัตราการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ เฉลี่ย 90 ลิตรต่อวัน (0.09 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)

$$\text{แทนค่า HRT} = \frac{4.18 \text{ ลูกบาศก์เมตร}}{0.09 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน}}$$

$$\text{HRT} = 47 \text{ วัน}$$

## ค-3 การคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของแข็งระเหยและกรดไขมันระเหยง่าย

ตารางที่ ค-2 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด

วันที่	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ	VS Removed (g)	L Biogas / g VS removed
09/09/59	2,600	60.96	42.65
10/09/59	2,700	59.34	45.50
26/09/59	2,600	76.98	33.78
27/09/59	2,600	55.52	46.83
30/09/59	2,600	79.26	32.80
03/10/59	2,600	77.13	33.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) คำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned}
 \text{ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด} &= \frac{\text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (L)}}{\text{น้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด (g)}} \\
 &= \frac{2600 \text{ L}}{60.96 \text{ g VS removed}} \\
 &= 42.65 \text{ L Biogas/ g VS removed}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ค-3 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด

วันที่	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (L)	VFA Removed (g)	L Biogas/g VFA removed
07/09/59	2,700	1,653.75	1.63
09/09/59	2,600	2,960.00	0.88
10/09/59	2,700	2,161.25	1.25
14/09/59	2,600	1,393.75	1.87
16/09/59	2,600	2,245.00	1.16
26/09/59	2,600	1,410.00	1.84
27/09/59	2,600	2,187.50	1.19
30/09/59	2,600	1,870.00	1.39
03/10/59	2,600	1,563.75	1.66

## 2) คำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด

$$\begin{aligned}
 \text{ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกรดไขมันระเหยที่ถูกกำจัด} &= \frac{\text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (L)}}{\text{น้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด (g)}} \\
 &= \frac{2600 \text{ L}}{2960.00 \text{ g VS removed}} \\
 &= 0.88 \text{ L Biogas/ g VS removed}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้