

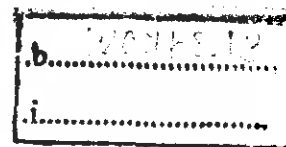
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการเกิดแก๊สชีวภาพ จากการหมักขยะเศษอาหารด้วยวิธีการหมักแบบไร้อากาศ

A STUDY OF BIOGAS FROM FOOD WASTE BY ANAEROBIC PROCESS



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 95162  
วัน,เดือน,ปี..... 2 1 พ.ศ. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF BIOGAS FROM FOOD WASTE BY ANAEROBIC PROCESS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING  
KINGMONGKUT'S INSTITUTE TECHNOLOGY LADKRABANG


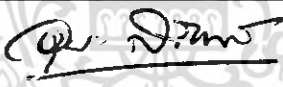

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

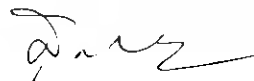
หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการเกิดแก๊สชีวภาพ จากการผลิตขยะเศษอาหารด้วยวิธีการหมักแบบไร้อากาศ

A STUDY OF BIOGAS FROM FOOD WASTE BY ANAEROBIC PROCESS

นักศึกษา นายชนกร พฤตวิโรดม รหัสประจำตัว 47010297  
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา  
อ.ที่ปรึกษา อ. ชลิตา อุตะเถา

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
อ. ชลิตา	อุตะเถา	
อ. อุบะ	ศิริแก้ว	
ผศ. ดร. อูมา	สิบลูเรือ	

ภาควิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

  
( ผศ.สุพจน์ ศรีนิล )

หัวหน้าภาควิศวกรรมโยธา  
วันที่ 14 เดือน มกราคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการเกิดแก๊สชีวภาพ จากการผลิตเศษอาหารด้วยวิธีการหมักแบบไร้อากาศ

**A STUDY OF BIOGAS FROM FOOD WASTE BY ANAEROBIC PROCESS**

นักศึกษา นายชนกร พงศ์วิโรดม  
อาจารย์ที่ปรึกษา อ. ชลิตา อุตะเกา  
ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา  
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ปีการศึกษา 2550

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการหมักแก๊สโดยใช้เศษอาหารที่เกิดขึ้นในโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยในส่วนของเศษอาหารได้นำเศษอาหารมาจากโรงอาหารคึก A โดยนำอาหารที่นำมาทำการหมักนั้นได้ทำการคัดแยกเศษขยะและนำเศษอาหารที่ได้ผ่านการคัดแยกแล้วนำมาทำการบดให้มีขนาดเล็กลง และทำการใส่ผสมกับจุลินทรีย์ในบ่อเกรอะด้านหลังคึกภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ทางด้านวิธีการบรรจุนั้นใช้อัตราส่วนระหว่างเศษอาหารและจุลินทรีย์ โดยใส่เศษอาหารปริมาณ 3 ส่วน ต่อปริมาณจุลินทรีย์ 1 ส่วน โดยจะทำการใส่ในปริมาณ 60 % ของเครื่องผลิตแก๊สมีเทนจากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลที่เกิดขึ้น

โดยการเก็บข้อมูลจากการทดลองนั้นแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเพื่อหาปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้น โดยทำการวิเคราะห์ค่าปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นมากที่สุดและเพียงพอต่อความต้องการ โดยปริมาณที่แก๊สเกิดขึ้นมากที่สุดคือในช่วง 7 วันแรก มีค่าปริมาณแก๊สสะสมอยู่ที่ 68 – 72 ลิตร โดยคิดจากอาหารจำนวน 0.65 ลบ.ม. โดยช่วงที่สองเพื่อทำการวิเคราะห์หาส่วนประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้น โดยทำการวิเคราะห์ แก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) โดยส่วนแรกได้ทำการเก็บค่าที่เกิดขึ้นทันที โดยมีค่ามีเทนอยู่ที่ 31 – 36% และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่าอยู่ที่ 619 – 1027 ppm จากนั้นได้ให้จุลินทรีย์ทำการปรับสภาพเป็นเวลาหนึ่งเดือน จึงทำการไหลคล้ายเศษอาหารและทำการวัดค่าอีกครั้งโดยค่ามีเทนอยู่ที่ 51 – 60% และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่าน้อยกว่า 60 ppm โดยมีปริมาณแก๊สสะสมในช่วง 6 วันที่ประมาณ 70 – 80 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title           A STUDY OF BIOGAS FROM FOOD WASTE BY ANAEROBIC PROCESS  
Name           MR. THANAKORN    PRUETHIWARODOM  
Field           CIVIL ENGINEER  
Department    CIVIL ENGINEER  
Faculty        ENGINEERING  
Advisor        CHALIDA        U-TAPAO

## ABSTRACT

This objective of this research is to study the fermentation of food waste from engineering department canteen at Kingmongkut's institute technology ladkrabang University. The food waste was taken from building A. After all inert materials (unable to be degraded by microorganism) were screened out from the feedstock, the feedstock was then grounded and mixed with seed sludge, which was taken from a digester nearby. The mixing ratio of seed sludge and food waste was 1:2 by weight (seed sludge: food waste). The experiment was carried out within the digester made of stainless steel. The total volume of digester is  $1.45 \text{ m}^3$  with effective volume of 60% of total volume. The fermentation was carried out in batch basis.

From the results of the study, the maximum biogas production rate was found at the 7<sup>th</sup> day of the fermentation of food waste. Total biogas production was 68-72 L by waste food is  $0.65 \text{ m}^3$  and methane content in biogas and H<sub>2</sub>S concentration was 31-38% and 1027 ppm respectively. After 1 month of the experiment another food waste was added into the digester. Methane was greatly increased to 51-60% which H<sub>2</sub>S concentration was reduced to 60 ppm total gas at 6 day is 70 – 80 L.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีขอขอบคุณ อาจารย์ชลิลา อยู่ตะเภา อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่ให้ความกรุณาอย่างมาก ที่ได้สละเวลา รวมทั้งแนะนำแนวทางการดำเนินงาน อีกทั้งชี้แนะ แนวทางการแก้ไขเมื่อมีปัญหาต่างๆ รวมทั้งยังคอยตักเตือนเมื่อข้าพเจ้าทำผิด รวมทั้งให้กำลังใจข้าพเจ้า เสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ พี่ชัยยา อำนวย, พี่ชญัญชนกกี ชีพสุมล, พี่ประพาส ทองรัมย์ ที่ได้ทำการศึกษา ค้นคว้าทางด้านการผลิตแก๊สชีวภาพโดยข้อมูลในวิทยานิพนธ์ของรุ่นพี่นั้นมีประโยชน์อย่างมากคือ ข้าพเจ้า อีกทั้งเรื่องหมักแก๊สชีวภาพที่รุ่นพี่ได้ทำไว้ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำการทดลองการหมักแก๊ส ชีวภาพได้จริง

ขอขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับบิดาและมารดา รวมถึงสมาชิกในครอบครัวทุกคน รวมทั้งพี่ๆ และน้องๆทั้งหลาย ที่มอบความรัก ความหวังใจ คอยเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา อีกทั้งเป็นที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าในยามที่ข้าพเจ้ามีปัญหา

สุดท้ายนี้ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความดีและก่อให้เกิดประโยชน์แก่ส่วนรวม คณะผู้วิจัยขอ มอบความดีทั้งปวงให้แก่บิดามารดา ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยส่งเสริมให้คณะวิจัยได้มีความรู้ ความสามารถและประสบความสำเร็จในการศึกษา

นายธนกร พฤติวิโรดม  
ผู้ประพันธ์

# สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอนุมัติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ฎ
	สารบัญรูป	ฏ
1	บทนำ	
	1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
	1.2 ปัญหาของโครงการวิจัย	2
	1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
	1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
	1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
	1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
	1.7 วรรณกรรมปริทัศน์	3
2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
	2.1 ทฤษฎีแก๊สชีวภาพ	5
	2.2 ลักษณะสมบัติน้ำเสีย	8
	2.3 การหายใจของจุลชีพ	9
	2.4 จุลชีววิทยาของถังย่อยแอนแอโรบิก	11
	2.5 จุลชีววิทยาและชีวเคมีของกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้อากาศ	13
	2.6 ประเภทของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้อากาศ	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

บทที่	เรื่อง	หน้า
2.7	กลไกการสร้างมีเทน	18
2.7.1.	ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซิส	18
2.7.2.	ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย	18
2.7.3.	ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ	19
2.7.4.	ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน	20
2.8	การออกแบบตั้งปฏิกิริยาชีวภาพสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพ	20
2.9	การประยุกต์ตั้งปฏิกิริยาสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพ	22
2.10	ถังเก็บพักแก๊สชีวภาพ	25
2.11	ปัจจัยสิ่งแวดล้อม	26
2.11.1.	อุณหภูมิ (Temperature)	26
2.11.2.	พีเอช (ph)	28
2.11.3.	กรดไขมันระเหยและสภาพต่าง (VFA)	28
2.11.4.	ความต้องการธาตุอาหาร (Nutrient Requirements)	28
2.11.5.	การผสม (Mixing)	30
2.11.6.	เวลาเก็บกัก (Retention Time)	31
2.11.7.	การเริ่มเดินระบบ (Start-up)	32
2.11.8.	สารพิษ (Toxic)	33
2.12	การเตรียมการก่อนการใช้แก๊สชีวภาพ	33
2.12.1.	การกำจัดน้ำในท่อส่งแก๊สชีวภาพ	33
2.12.2	ปรับลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	33
2.12.3.	การปรับลดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์	33
2.13	ผลเสียเมื่อปล่อยแก๊สชีวภาพทิ้งสู่บรรยากาศ	34
3	<b>ขั้นตอนการดำเนินงานและอุปกรณ์การวิจัย</b>	
3.1.	<b>อุปกรณ์และการเตรียมการก่อนการทำหมักแก๊ส</b>	35
3.1.1.	ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องหมักแก๊สชีวภาพ	35
3.1.2.	ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของเครื่องผลิตแก๊ส	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

บทที่	เรื่อง	หน้า
	3.1.3. ขยะเศษอาหารที่ใช้ในการหมักแก๊ส	38
	3.1.4. เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักแก๊สชีวภาพ	38
	3.1.5. การวัดปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้น	39
	3.1.6. การหาเปอร์เซ็นต์ของแก๊สที่เกิดขึ้น	39
	3.2. ขั้นตอนการดำเนินงาน	40
	3.2.1. การติดตั้งอุปกรณ์หมักแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร	40
	3.2.2. การทดสอบเครื่องหมักแก๊ส	40
	3.2.3. การซ่อมแซมเครื่องหมักแก๊ส	40
	3.2.4. การคำนวณอัตราส่วนเศษอาหาร และจุลินทรีย์	41
	3.2.5. การเตรียมเศษอาหาร	42
	3.2.6. การเตรียมจุลินทรีย์	43
	3.2.7. การหาปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น	43
	3.2.8. การกวนเศษอาหาร	44
	3.2.9. การวัดชนิดของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น	44
4	<b>ผลการทดลอง</b>	
	4.1 ผลการทดลองการหาปริมาตรแก๊ส	45
	4.2 ผลการทดลองหาคุณภาพของแก๊ส	47
5	<b>สรุปผลการทดลอง</b>	
	5.1 สรุปการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร	53
	5.2 สรุปการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารในการหมักแก๊สครั้งแรก	54
	5.3 สรุปการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารในการหมักแก๊สครั้งที่สอง	54
	5.4 สรุปผลการทดลองจากการทำการทดลองทั้งหมด	55

# สารบัญ(ต่อ)

บทที่	เรื่อง	หน้า
	บรรณานุกรม	56
	ภาคผนวก ก	59
	ภาคผนวก ข	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1	Organic gases produced through microbial activity in anaerobic digesters	8
2.2	Final electron carrier molecule, energy yield and cell (sludge) production	11
2.3	Growth yields (as % of COD removed)	11
2.4	ลักษณะสมบัติของแบคทีเรียบางกลุ่มในจินัส	15
2.5	สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ได้	17
2.6	Recommended volumetric organic loadings as a function of temperature for soluble COD substrate for 85% to 95% COD removal, Average sludge concentration is 25,000 mg/L	23
2.7	Applicable hydraulic retention time (HRT) for treatment of raw domestic wastewater in a 4 m-high UASB reactor	23
2.8	Upflow velocities and reactor heights recommended for UASB reactor	23
2.9	Optimum temperature ranges for the growth of methane-forming bacteria	26
2.10	Temperature range for methane production for municipal anaerobic digesters	27
2.11	Comparison of mesophilic and thermophilic digesters	27
2.12	Elementary composition of bacterial cells	29
2.13	Typical design parameters for anaerobic digester mixing systems	31
2.14	Approximate generation times of important groups of wastewater bacteria	32
2.15	เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของแก๊สชีวภาพกับแก๊สธรรมชาติ	34
2.16	คำแนะนำสำหรับการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพ	34
4.1	แสดงค่าโดยเฉลี่ยของปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น	46
4.2	แสดงค่าปริมาณแก๊สโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นก่อนปรับสภาพจุลินทรีย์	48
4.3	แสดงค่าคุณภาพแก๊สโดยเฉลี่ยก่อนปรับสภาพจุลินทรีย์	49
4.4	แสดงค่าปริมาณแก๊สโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังปรับสภาพจุลินทรีย์	50
4.5	แสดงค่าคุณภาพแก๊สโดยเฉลี่ยหลังปรับสภาพจุลินทรีย์	51

# สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
2.1	รูปแสดงขั้นตอนการเกิดแก๊สมีเทนเริ่มต้นจากสารประกอบโมเลกุลใหญ่	5
2.2	รูปแสดงการย่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่จะได้ผลผลิตเป็นสารอินทรีย์ที่มีพลังงานน้อยลง	9
2.3	รูปแสดงเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ ในรูป COD ในการหายใจแบบ Aerobic และ Anaerobic	10
2.4	รูปแสดงกลุ่มแบคทีเรียที่ใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพ	12
2.5	รูปแสดงขั้นตอนของปฏิกิริยาไม่ใช้อากาศ	16
2.6	รูปแสดงขั้นตอนการย่อยสลายไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต แบบไม่ใช้อากาศ	19
2.7	รูปแสดงถังปฏิกิริยาแบบ Single stage high-rate digester	21
2.8	รูปแสดงถังปฏิกิริยาแบบ Two-stage digester	21
2.9	Upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactor	22
2.10	รูปแสดงหลักการผลิตแก๊สชีวภาพแบบ Anaerobic baffled reactor (ABR)	24
2.11	รูปแสดงหลักการผลิตแก๊สชีวภาพแบบ Cover lagoon	24
2.12	รูปแสดงลักษณะการเก็บรวบรวมแก๊สชีวภาพแบบ Floating cover, Fixed cover และ Membrane cover	25
2.13	รูปแสดงรูปแบบถังรวบรวมแก๊สชีวภาพแบบ External floating cover	25
2.14	รูปแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์	27
2.15	รูปแสดงรูปแบบการผสมในถังย่อยแอนแอโรบิก	30
3.1	รูปแสดงด้านหน้าและรูปแปลนของเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพ	35
3.2	รูปแสดงรายละเอียดขนาดต่างๆ ของเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพ	36
3.3	รูปอธิบายรายละเอียดส่วนประกอบต่างๆของเครื่องหมักแก๊สชีวภาพ	36
3.4	รูปแสดงภาพตำแหน่งที่ตั้งของเศษอาหารบริเวณโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์	38
3.5	รูปแสดงภาพตำแหน่งที่ตั้งของเชื้อจุลินทรีย์บริเวณ โรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์	38
3.6	รูปแสดงเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น	39
3.7	รูปอธิบายรายละเอียดการทำการทดสอบการรั่วซึมด้วยน้ำ	40
3.8	รูปแสดงเครื่องหมักแก๊สหลังทำการซ่อมแซมส่วนต่างๆของเครื่องหมักแก๊ส	41
3.9	รูปแสดงปริมาณเศษอาหารและจุลินทรีย์ในเครื่อง	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.10	รูปแสดงการเตรียมเศษอาหารที่ทำการบรรจุในเครื่องหมักแก๊ส	42
3.11	รูปแสดงการจุลินทรีย์ที่ทำการบรรจุในเครื่องหมักแก๊ส	43
3.12	รูปแสดงการวัดค่าปริมาตรแก๊สโดยการแทนที่ของน้ำ	43
3.13	รูปแสดงเครื่องมือวัดปริมาตรความเข้มข้นของแก๊สและการทำการติดตั้ง	44
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันที่ทำการเก็บแก๊สและค่าปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้น	46
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันที่ทำการเก็บแก๊สและค่าปริมาตรแก๊สก่อนปรับสภาพจุลินทรีย์	48
4.3	แผนภูมิแสดงคุณภาพแก๊สก่อนปรับสภาพจุลินทรีย์	49
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันที่ทำการเก็บแก๊สและค่าปริมาตรแก๊สหลังจากปรับสภาพจุลินทรีย์	50
4.5	แผนภูมิแสดงคุณภาพแก๊สหลังปรับสภาพจุลินทรีย์	51

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันโลกของเรากำลังประสบภาวะขาดแคลนพลังงานและแก๊สธรรมชาติ โดยส่งผลกระทบต่อให้ราคาน้ำมันและราคาแก๊สสูงขึ้นมาก อีกทั้งปัญหาด้านขยะมูลฝอยที่มีมากขึ้นจนเป็นปัญหาอยู่ในปัจจุบัน เป็นผลทำให้เกิดปัญหาอีกหลายด้านตามมา ยกตัวอย่างเช่นปัญหาโลกที่ร้อนขึ้น และปัญหาเนื่องจากการกำจัดขยะมูลฝอยที่ไม่ถูกวิธี โดยเราสามารถแก้ปัญหเหล่านี้ได้ทางหนึ่งคือการใช้พลังงานทดแทน เช่นพลังงานทดแทนจากเศษอาหาร โดยพลังงานทดแทนจากเศษอาหารนั้นสามารถทำได้ง่าย ใช้งบประมาณในการลงทุนน้อย อีกทั้งขยะเศษอาหารเหล่านี้สามารถหาได้ไม่ยาก โดยสามารถหาได้จาก โรงอาหาร หรือตามบริเวณชุมชนต่าง วิธีการคือนำของเสียเหล่านั้นมาทำการหมัก เพื่อให้ได้แก๊สที่เรียกว่าแก๊สมีเทน(Methane) จากนั้นนำแก๊สที่ได้จากการหมักมาใช้เป็นพลังงานหมุนเวียน การนำแก๊สที่ได้จากการหมักมาทำการหุงต้มอาหาร หมุนเวียนกลับมาใช้ในครัวเรือน หรือนำกลับมาใช้ในการเผาทำลายขยะเอง โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายในเรื่องของราคาแก๊สหุงต้มที่ราคาแพงขึ้น อีกทั้งยังสามารถช่วยชาติลดค่าใช้จ่ายที่ต้องนำมากำจัดของเสียรวมทั้งขจัดปัญหาทางด้านกลิ่นเหม็นอีกทางหนึ่ง

จากปัญหากลิ่นเหม็นของขยะที่มีในปัจจุบัน โดยได้ทำการตรวจพบว่าแก๊สที่มีกลิ่นเหม็นเหล่านั้นได้มีแก๊ส  $H_2S$  (ไฮโดรเจนซัลไฟด์) เป็นส่วนประกอบหลัก โดยสารประกอบนี้เองที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก ทั้งในด้านกลิ่น และความเป็นพิษ มีคุณสมบัติในการกัดกร่อนโลหะต่างๆ อีกทั้งเป็นพิษอย่างมากต่อร่างกาย ซึ่งเป็นผลเสียอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการ เพื่อที่จะทำการกำจัดแก๊ส  $H_2S$  (ไฮโดรเจนซัลไฟด์) โดยวิธีที่ประหยัดและ ลดวิธีการรวมทั้งค่าใช้จ่ายมากที่สุด อีกทั้งส่งผลกระทบต่อธรรมชาติน้อยที่สุด โดยการวิจัยครั้งนี้จะได้นำตัวอย่างของการหมักแก๊สชีวภาพมาทำการปรับลดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีในปัจจุบัน โดยตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้ใช้ระบบไบโอแก๊ส ในการหมักแก๊สมีเทน ได้แก่ โรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานน้ำมันปาล์ม ฟาร์มหมู ฟาร์มไก่ และโรงงานอื่นๆ ที่มักมีของเสียที่มีปริมาณมาก

## 1.2 ปัญหาของโครงการวิจัย

ปัญหาจากของโครงการวิจัยนี้อันได้แก่ ข้อมูลและความรู้เกี่ยวกับการผลิตแก๊สมีเทน และการแยกแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของผู้ทำการทดลอง ผู้วิจัยโครงการต้องสอบถามจากผู้ที่มีความรู้และเชี่ยวชาญในด้านนี้จากหลายบุคคล เช่น จากอาจารย์ที่ปรึกษา อีกทั้งยังศึกษาจากอินเทอร์เน็ต และหนังสือเกี่ยวกับพลังงานทดแทน เป็นต้น

## 1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เป็นการศึกษาค้นคว้าและวิเคราะห์ ถึงวิธีการสกัดแยกแก๊ส  $H_2S$  (ไฮโดรเจนซัลไฟด์) ออกจากแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแก๊สมีเทน โดยคำนึงถึง วิธีการที่เหมาะสม ค่าใช้จ่าย โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสังคมปัจจุบันได้อย่างเหมาะสม

## 1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าลักษณะการเกิดแก๊สมีเทน และสัดส่วนของ แก๊ส  $H_2S$  (ไฮโดรเจนซัลไฟด์)
2. ทำการทดสอบการผลิตแก๊สมีเทนขึ้นมาจากการหมักของเศษอาหาร
3. ทำการทดสอบแก๊สมีเทนเพื่อหาปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊ส  $H_2S$  (ไฮโดรเจนซัลไฟด์)
4. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ รวมทั้งสรุปผลและทำการบันทึกผล

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาหาข้อมูล เกี่ยวกับแก๊สมีเทน รวมถึงวิธีการแยกแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์
2. จัดเตรียมสถานที่สำหรับทำการทดสอบแก๊สมีเทน
3. ทำการศึกษาทดสอบ และทำการซ่อมแซมเครื่องหมักแก๊สมีเทน
4. ทำการทดสอบการหมักแก๊สมีเทน และทำการเก็บค่าต่างๆที่ได้จากการหมัก
5. ทดลองการแยกสกัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ออกจากแก๊สมีเทน
6. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาวิธีในการนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
7. ทำรายงานสรุปผลการทดลอง

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เพื่อเพิ่มความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการ การหมักแก๊สมีเทนโดยใช้เศษอาหาร
2. ทราบขั้นตอนและวิธีการในการทำการหมักแก๊สชีวภาพได้
3. เข้าใจกระบวนการเกิดของแก๊ส และสามารถวิเคราะห์คุณภาพแก๊สได้
4. สามารถลดปริมาณขยะเศษอาหารที่เหลือใช้ ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน
5. เป็นการช่วยแก้ปัญหาเกี่ยวกับภาวะโลกร้อน และการใช้พลังงานทดแทน
6. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการศึกษาค้นคว้าในระดับต่อไป

## 1.7 วรรณกรรมปริทัศน์

จากการดำเนินงานของระบบผลิตแก๊สชีวภาพขนาด 100 ลบ.ม.พบว่าสามารถนำแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ไปใช้หุงต้มอาหารในครัวเรือนรอบๆฟาร์มประมาณ 250 ครัวเรือน ได้ตลอดทั้งปี ซึ่งสามารถทดแทนการใช้แก๊สหุงต้มขนาดมาตรฐาน ได้เฉลี่ยปีละ 3 ถัง/ครัวเรือน สามารถทดแทนแก๊สหุงต้มได้ประมาณ 11.25ตัน/ปี คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ประมาณ 187,500 บาท/ปี นอกจากนี้ยังพบว่าระบบดังกล่าวสามารถลดปัญหาของกลิ่นและการรบกวนคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติได้อีกด้วย [ที่มา: ศูนย์วิจัยและสาธิตพลังงานทดแทน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ]

จากการวิจัย ซึ่งได้ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 89 วัน พบว่าปริมาณแก๊สธรรมชาติจะมีปริมาณสูงสุดในวันที่ 13-20 ของการหมัก โดยมีปริมาณเท่ากับ 2,130 ลิตร ซึ่งเท่ากับ 15.16% ของก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมด และพบว่ามูลโคสด 1 ลิตร เมื่อนำมาหมักในถังปิดจะให้แก๊สชีวภาพโดยเฉลี่ยประมาณ 28 ลิตร และแก๊สชีวภาพที่ได้นั้นจะมีแก๊สมีเทนอยู่ถึง 68 % โดยปริมาตร [ที่มา: กรมอนามัยกระทรวงสาธารณสุข]

น้ำเสียจากโรงงาน โรงงานเอลทานอล แบ่งน้ำเสียออกเป็นสองส่วนคือ คือน้ำกากส่าจากการกลั่นสุรา และน้ำล้างขวด จะไหลรวมกันเข้าสู่ระบบหมักแบบ UASB โดยถังหมักกรดมีขนาดจุ 450 ม<sup>3</sup> และถังหมักมีเทนเป็นแบบ UASB มีขนาดจุ 3,000 ม<sup>3</sup> แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ผลิตไอน้ำ น้ำเสียที่ผ่านระบบหมักแล้วจะไหลลงบ่อหมักจุ 100,000 – 300,000 ม<sup>3</sup> จากนั้นน้ำเสียจากบ่อหมักจะถูกสูบไปกำจัดต่อโดยการทำปุ๋ยหมัก ความเข้มข้นสารอินทรีย์ในน้ำกากส่าแปรผันในช่วง 55,000 -- 150,000 มก/ล ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติกากน้ำตาลที่ใช้ในการผลิต อัตราป้อนสารอินทรีย์เหมาะสมอยู่ในช่วง 3 – 5 kgCOD/m<sup>3</sup>d ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ประมาณ 60% ที่อัตราป้อนสารอินทรีย์ 4.5 kgCOD/m<sup>3</sup>d ระบบหมักสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ประมาณ 3,200 ม<sup>3</sup>/วัน ซึ่งสามารถช่วยลดการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำประมาณ 30% คิดเป็นเงินประมาณ 1.5 ล้านบาท/ปี [ ที่มา : แนวทางการนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัย เชียงใหม่]

การหมักแก๊สชีวภาพจากโรงงานสุกร ที่ จ.กาญจนบุรี คุณ “กฤษฎา คุณากรประพันธ์” เจ้าของฟาร์มสุกรขุน กล่าวว่า ไบโอดีสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ 70% โดยขนาดการผลิตของฟาร์มสุกรแห่งนี้มีขนาด 500 ม<sup>3</sup> ใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรคิดเป็นปริมาณวันละ 80,000 ลิตร การใช้ระบบไบโอดีสามารถลดค่าใช้จ่าย ได้ประมาณวันละ 1,000 - 2,000 บาท หรือประมาณปีละประมาณ 600,000 บาท [ที่มา: เดลินิวส์ออนไลน์ ประจำวันอังคารที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2551]

ปัจจุบัน บริษัท ชลเจริญ จำกัด มีกำลังผลิต 240 ตันแ่ง/วัน ผลิตก๊าซชีวภาพได้วันละ 20,000 ลบ.ม./วัน สามารถนำไปทดแทนน้ำมันเตาในการอบแห้งแ่งได้ถึงวันละ 10,000 ลิตร ช่วยให้โรงงานสามารถประหยัดค่าน้ำมันเตาสูงได้ประมาณ 1.2 แสนบาท/วัน หรือประมาณ 28 ล้านบาท /ปี นอกจากนี้ ทางบริษัทฯ ยังเตรียมนำแก๊สที่เหลือมาผลิตไฟฟ้าใช้ภายในโรงงานอีกด้วย และจากการสำรวจพบว่า ยังมีโรงงานแ่งมันสำปะหลังจำนวน 43 แห่งทั่วประเทศที่ยังไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย ดังนั้น หากส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีดังกล่าว จะช่วยลดปริมาณของเสียได้ถึง 260 ล้าน ลบ.ม./ปี และช่วยประหยัดพลังงานในรูปของน้ำมันเตาได้ไม่ต่ำกว่าปีละ 1,400 ล้านบาท ” [ที่มา : ไทยพีอาร์ คอทเน็ต ประจำวันที่ 25 ตุลาคม 2549]

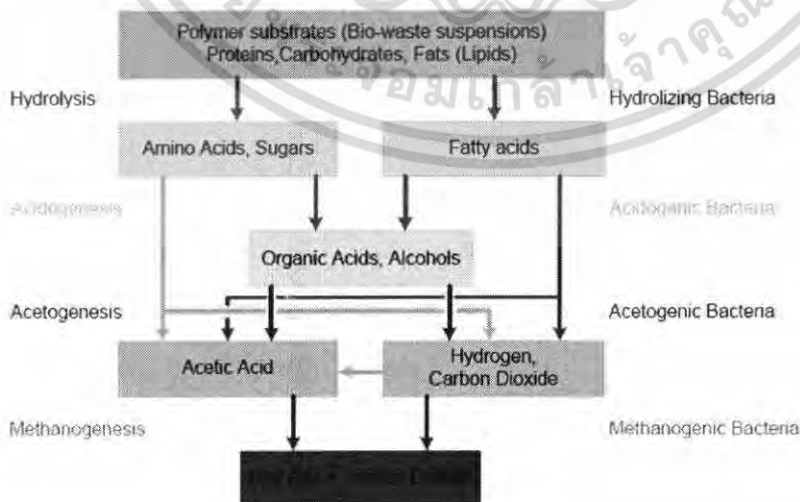
# บทที่ 2

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีแก๊สชีวภาพ (Biogas)

แก๊สชีวภาพ (Biogas) เป็นแก๊สที่เกิดจากการย่อยแบบแอนแอโรบิก แก๊สมีเทน (Methane) ซึ่งเป็นแก๊สที่มีประโยชน์ทางเศรษฐกิจและสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ แก๊สมีเทนบริสุทธิ์ให้ค่าความร้อนประมาณ  $35,800 \text{ kJ/m}^3$  แก๊สชีวภาพ (Biogas) ที่มีสัดส่วนแก๊สมีเทน 65% ให้ค่าความร้อนประมาณ  $22,400 \text{ kJ/m}^3$  ปริมาณความร้อนของแก๊สชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) หรือระดับความบริสุทธิ์ของแก๊สชีวภาพ แก๊สธรรมชาติที่ส่วนผสมของแก๊ส Methane, Propane และ Butane ให้ค่าความร้อนประมาณ  $37,300 \text{ kJ/m}^3$  (Metcalf & Eddy, 2003)

ในถังย่อยแอนแอโรบิก (Anaerobic digester) มีแก๊สอินทรีย์เกิดขึ้นจำนวนมากขึ้นอยู่กับลักษณะน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบ ขั้นตอนการเกิดแก๊สชีวภาพจากสารโมเลกุลใหญ่แสดงในรูปที่ 2.1 โดยส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ประมาณ 60-65% และ  $\text{CO}_2$  ประมาณ 35-38% ส่วนที่เหลือประมาณ 2% จะเป็นแก๊สอื่นๆ ซึ่งได้แก่  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{H}_2\text{S}$  สัดส่วนของแก๊สขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ในขณะที่ระบบ ได้แก่ อุณหภูมิ, องค์ประกอบของน้ำเสีย, pH, alkalinity, Hydraulic Retention Time (HRT), Solid Retention Time (SRT), สารพิษ, Nutrient & Trace element (Metcalf & Eddy, 2003; Gerardi, M. H., 2003)



รูปที่ 2.1 รูปแสดงขั้นตอนการเกิดแก๊สมีเทนจากสารประกอบโมเลกุลใหญ่ [ปฏิกรณ์ 2548]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเบี่ยงประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเดินระบบ จะส่งผลให้ระบบย่อยแอนแอโรบิกผลิตแก๊สสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) (ดูตารางที่ 2.1) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สมีเทนและสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound, VOC) VOC ประกอบด้วย กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA) สารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบซัลเฟอร์ (Volatile Sulfur Compound, VSC) สาร VSC เกิดจากการย่อยสารประกอบโปรตีน (Gerardi, M. H., 2003)

การเกิดแก๊สมีเทนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ ที่สภาวะมาตรฐาน (ความดันบรรยากาศ 1 atm และ 0°C) ระบบแอนแอโรบิกสามารถเปลี่ยนสารประกอบในรูป COD ไปเป็น CH<sub>4</sub> เท่ากับ 0.35L CH<sub>4</sub>/g COD (COD ของมีเทนคือปริมาณออกซิเจนที่ใช้สำหรับออกซิไดซ์มีเทนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ) ดังสมการที่ 1



จากสมการที่ 1 COD ต่อ โมลของมีเทนคือ 2(32 g O<sub>2</sub>/mole) = 64 g O<sub>2</sub>/mole CH<sub>4</sub> ที่สภาวะมาตรฐาน แก๊สมีเทนมีปริมาตรต่อหน่วยโมล 22.414 L ดังนั้นสมมูลของการเปลี่ยน COD เป็นแก๊สมีเทนเท่ากับ 22.414/64 = 0.35L CH<sub>4</sub>/g COD เราสามารถคำนวณปริมาตรของแก๊สมีเทนที่อุณหภูมิต่างๆ ได้จากสมการที่ 2

$$V = \frac{nRT}{P} \quad (2)$$

โดยที่  $V$  = volume of gas, L

$N$  = mole of gas, mole

$R$  = universal gas law constant, 0.082057 atm. L/mole.K

$T$  = temperature, K (273.15 + °C)

$P$  = absolute pressure, atm

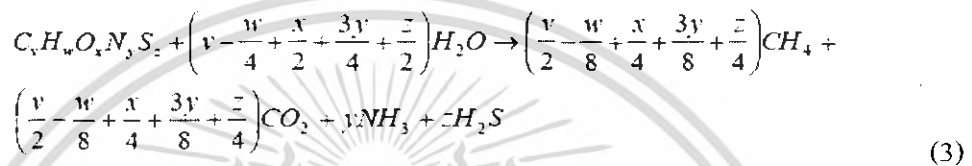
ดังนั้น ที่อุณหภูมิเดินระบบแอนแอโรบิก 35 °C

$$V = \frac{(1\text{mole})(0.082057\text{ atm.L / mole.K})(273.15 + 35)\text{K}}{1.0\text{atm}}$$

$$= 25.29\text{L}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ 1 จะได้ } CH_4 &= (25.29 \text{ L}) / (64 \text{ g COD/mole } CH_4) \\ &= 0.40 \text{ L } CH_4/\text{g COD} \end{aligned}$$

แก๊สชีวภาพมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบประมาณ 65% ดังนั้นปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมดเท่ากับ  $(0.40 \text{ L } CH_4/\text{g COD}) / 0.65 = 0.62 \text{ L biogas/ g COD}$  โดยถ้าในกรณีที่ทราบโครงสร้างทางเคมีของน้ำเสีย สามารถคำนวณปริมาณแก๊ส  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $NH_3$  และ  $H_2S$  ได้จากสมการที่ 3 โดยที่ไม่รวมธาตุอื่นๆ ที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์เซลล์ [Metcalf & Eddy, 2003]



$NH_3$  ที่เกิดขึ้นดังกล่าว จะเข้าทำปฏิกิริยากับ  $CO_2$  และเปลี่ยนไปเป็น  $NH_4^+$  และ  $HCO_3^-$  ดังสมการที่ 4



และสามารถคำนวณสัดส่วนโมลของแก๊ส  $CH_4$ ,  $CO_2$  และ  $H_2S$  ได้จากสมการที่ 5 - 7

$$f_{CH_4} = \frac{4v + w - 2x - 5y - 2z}{8(v - y + z)} \quad (5)$$

$$f_{CO_2} = \frac{4v + w + 2x - 5y + 2z}{8(v - y + z)} \quad (6)$$

$$f_{H_2S} = \frac{z}{8(v - y + z)} \quad (7)$$

ตารางที่ 2.1 Organic gases produced through microbial activity in anaerobic digesters

[Grady, C.P.L (1999)]

Name	Formula	VFA	VSC
Acetate	$\text{CH}_3\text{COOH}$	x	
Butyrate	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}_2\text{COOH}$	x	
Caproic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_2\text{COOH}$	x	
Formate	$\text{HCOOH}$	x	
Propionate	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$	x	
Succinate	$\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$	x	
Valeric acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}_2\text{COOH}$	x	
Methane	$\text{CH}_4$		
Dimethylamine	$\text{CH}_3\text{NHCH}_3$		
Ethylamine	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2$		
Methylamine	$\text{CH}_3\text{NH}_2$		
Propylamine	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$		
Pyridine	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$		
Trimethylamine	$\text{CH}_3\text{NCH}_3\text{CH}_3$		
Allyl mercaptan	$\text{CH}_2=\text{CHCH}_2\text{SH}$		x
Benzyl mercaptan	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{SH}$		x
Dimethyl sulfide	$(\text{CH}_3)_2\text{S}$		x
Ethyl mercaptan	$\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$		x
Methyl mercaptan	$\text{CH}_3\text{SH}$		x
Thiocresol	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{SH}$		x
Thioglycolic acid	$\text{HSCH}_2\text{COOH}$		x

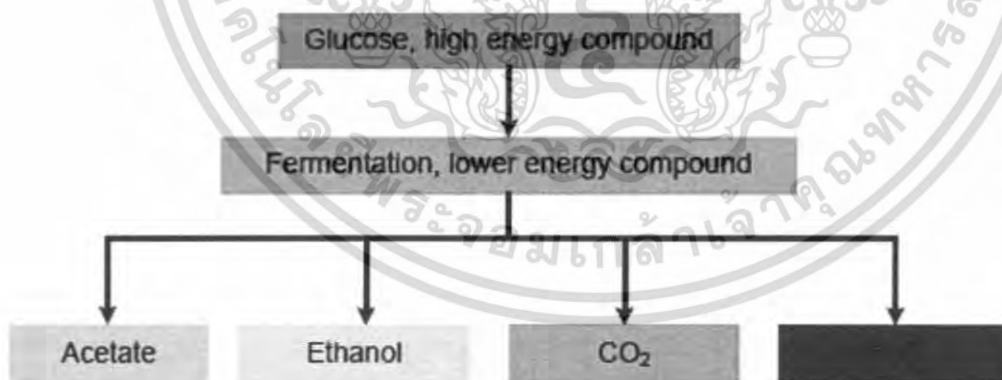
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ลักษณะสมบัติน้ำเสีย (Wastewater characteristics)

น้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดแบบแอนแอโรบิกเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพควรมีค่า COD มากกว่า 1,500 mg/L และอุณหภูมิสูง (25-35°C) ถ้าน้ำเสียมีค่า COD ต่ำกว่า 1,500 mg/L การเลือกใช้ระบบที่ใช้ออกซิเจนจะมีความเหมาะสมมากกว่า (Metcalf & Eddy, 2003) โดยทั่วไปน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีค่า COD สูงซึ่งสามารถที่จะนำระบบแอนแอโรบิกมาใช้ได้เป็นอย่างดี น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังมีค่า COD ประมาณ 12,000-35,000 mg/L [Annachhatre, A. P. and Amatya, P. L., 2000; Plevin, R. and Donnelly, D., 2004]

## 2.3 การหายใจของจุลชีพ (Microbial Respiration)

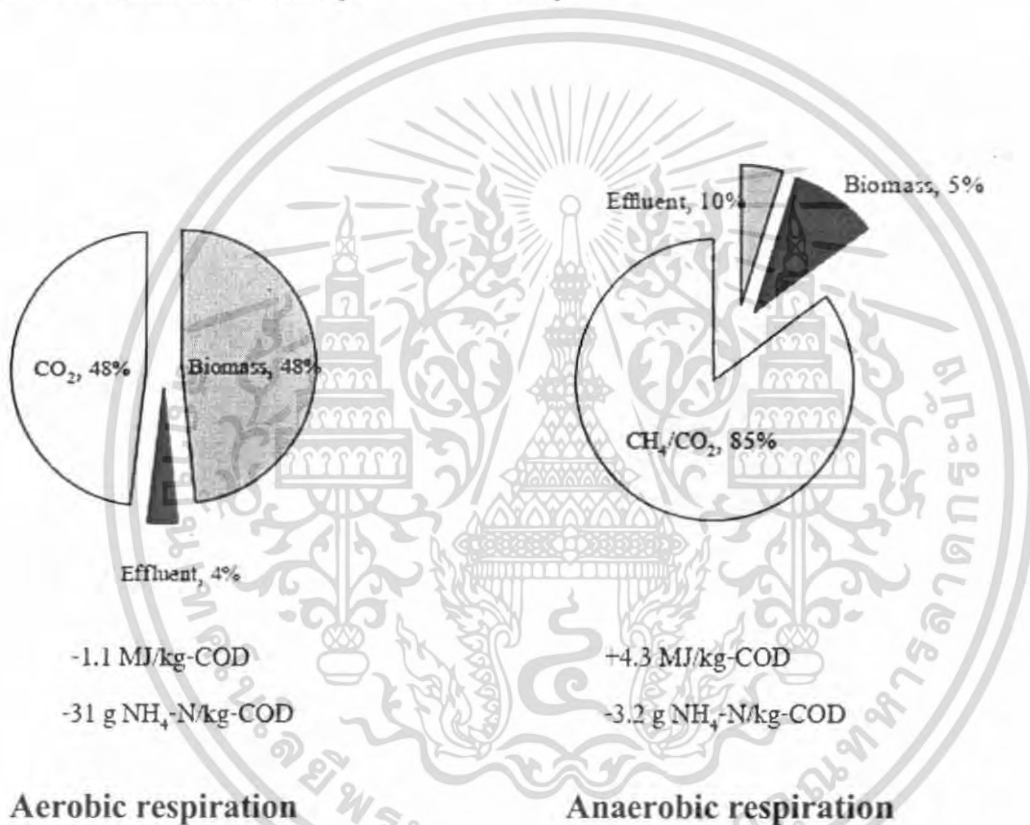
การหายใจเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของแบคทีเรีย เมื่อสารอาหารถูกย่อยสลายในเซลล์ จะได้พลังงานจากอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจากการทำลายพันธะสาร โมเลกุลใหญ่ที่มีพลังงานสูง (ดูรูปที่ 2.2) อิเล็กตรอนจะถูกส่งไปยังตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆหลายขั้นตอน ส่วนหนึ่งจะนำไปสร้าง Adenosine Triphosphate (ATP) เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการเติบโตและรักษาเซลล์ และอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในรูปของความร้อนในสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.2 รูปแสดงการย่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่จะได้ผลผลิตเป็นสารอินทรีย์ที่มีพลังงานน้อยลง [ปฏิกรณ์ 2548]

การหายใจโดยใช้  $O_2$  เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายเรียกว่า Aerobic respiration จะได้พลังงานในรูป ATP มากที่สุด (36 ATP จากกลูโคส 1 โมล) (สารโรจน์ สิริคันสนียกุล และ ประวิทย์ วงศ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานวิชาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาทันนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงคาเทพ, 2538) แบคทีเรียจะใช้พลังงานส่วนหนึ่งสำหรับการสร้างหรือการเติบโตของเซลล์ เมื่อเปรียบเทียบในรูปของค่า COD ที่ถูกใช้ไป พบว่าประมาณ 48-50% จะนำไปสร้างเป็นเซลล์ แต่การหายใจโดยไม่ใช้  $O_2$  (Anaerobic respiration) จะได้พลังงานต่ำ (2 ATP จากกลูโคส 1 โมล) และมีการสร้างเซลล์ประมาณ 5-10% และเปลี่ยนไปเป็นแก๊สชีวภาพประมาณ 85-90% (Kleerebezem, R and Macarie, H., 2003; Gerardi, M. H., 2003) (ดูรูปที่ 2.3) ลำดับพลังงานตัวรับอิเล็กตรอนสุดท้ายดังแสดงในตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบ Yield (สัดส่วนผลได้ของเซลล์ต่อสารอาหารที่ใช้) จากสารตั้งต้นในการย่อยแบบแอนแอโรบิกในรูปของค่า COD ที่ถูกใช้ไป



รูปที่ 2.3 รูปแสดงเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ ในรูป COD ในการหายใจแบบ Aerobic และ Anaerobic [ดร. มั่นสิน 2546]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 Final electron carrier molecule, energy yield and cell (sludge) production

[Visser A. (1994.)]

Final Electron Carrier Molecule	From of Respiration	Energy Yield Rank	g of Cell Produce/ g of COD degrade
O <sub>2</sub>	Aerobic or oxic	1	0.4-0.6
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Anaerobic or anoxic	2	~0.4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Anaerobic: sulfate reduction	3	0.04-0.1
Organic Molecule	Anaerobic: mixed acid and alcohol	4	0.04-0.1
CO <sub>2</sub>	Anaerobic: methane production	5	0.02-0.04

ตารางที่ 2.3 Growth yields (as % of COD removed) [Visser A. (1994.)]

Substrate (waste)	Yield
Alcohol	0.06-0.08
Carbohydrates	0.08-0.15
Organic acids	0.02-0.04
Proteins	0.03-0.06

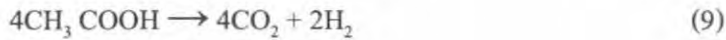
2.4 จุลชีววิทยาของถังย่อยแอนแอโรบิก (Microbiology of Anaerobic digester)

ในระบบย่อยแบบแอนแอโรบิก จะมีกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ใช่กลุ่มแบคทีเรียสำหรับสร้างแก๊สมีเทน ซึ่งจะเป็นส่วนการย่อยสลายสาร โมเลกุลและการหมัก (Fermentation) ซึ่งจะได้สารตั้งต้นสำหรับผลิตแก๊สมีเทน แบคทีเรียที่มีหน้าที่สร้างแก๊สมีเทน (Methane-Forming Bacteria) เป็นแบคทีเรียชนิดแอนแอโรบิกแท้ (Strict obligate anaerobe) รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการสร้างแก๊สมีเทนโดยมีกลูโคสเป็นสารตั้งต้น และแบคทีเรียซึ่งทำหน้าที่สร้างแก๊สมีเทนสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 Hydrogenotrophic Methanogens แบคทีเรียกลุ่มนี้เปลี่ยน CO<sub>2</sub> เป็น CH<sub>4</sub> และแบคทีเรียกลุ่มนี้ช่วยรักษาความดันของของแก๊สไฮโดรเจนให้มีค่าต่ำในถังย่อยแอนแอโรบิก ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้กรดอะซิติกสร้างแก๊สมีเทน ดังสมการที่ 8

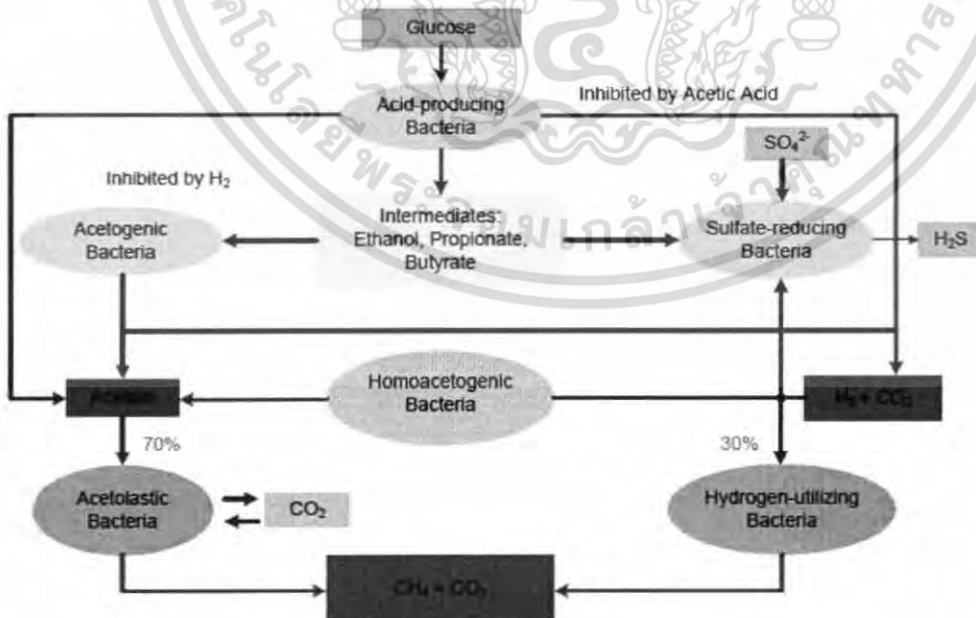


กลุ่มที่ 2 Acetotrophic Methanogens แบคทีเรียที่เรียกลูมนี้อาศัยเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็น  $\text{CH}_4$  และ  $\text{CO}_2$  ซึ่งกรดอะซิติกจะถูกเปลี่ยนไปเป็น  $\text{CH}_4$  โดยอาศัยแบคทีเรียที่เรียกลูมนี้อีก 1 บางชนิดยังสามารถใช้  $\text{CO}$  เพื่อสร้างมีเทนได้ด้วย ดังสมการที่ 9 และ 10



แบคทีเรียที่เรียกลูมนี้อีก 2 จะเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียที่เรียกลูมนี้อีก 1 ดังนั้นจึงเกิดการสะสมของไฮโดรเจนซึ่งส่งผลต่อการทำงานของตัวมันเองและแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติกชนิดอื่นๆ อีกด้วย

กลุ่มที่ 3 Methylotrophic Methanogens แบคทีเรียที่เรียกลูมนี้อาศัยสารที่มี Methyl group ( $\text{CH}_3$ ) เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิต  $\text{CH}_4$  ได้แก่ Methanol และ Methylamine [ $(\text{CH}_3)_3\text{-N}$ ] ดังสมการที่ 11 และ 12



รูปที่ 2.4 รูปแสดงกลุ่มแบคทีเรียที่ใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น [ปฏิกรณ์ 2548]  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 จุลชีววิทยาและชีวเคมีของกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้อากาศ

กระบวนการย่อยแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Digestion) หมายถึงการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียหรือในสลัดจ์ให้กลายเป็นแก๊สมีเทน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ มักหมายถึงการย่อยแบบไม่ใช้อากาศนั่นเองแก๊สมีเทนเป็นผลผลิตของกระบวนการไม่ใช้อากาศนี้เสมอ

กระบวนการไม่ใช้อากาศเกิดขึ้น 4 ขั้นตอนตามลำดับ ดังนี้

- ไฮโดรไลซิส
- การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)
- การสร้างอะซิเตท (Acetogenesis)
- การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

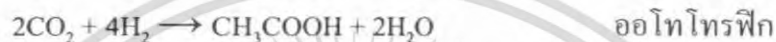
ขั้นตอนทั้ง 4 ต้องอาศัยแบคทีเรีย 3 ประเภท ได้แก่ แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid : VFA) แบคทีเรียสร้างอะซิเตท และแบคทีเรียสร้างมีเทน

## 2.6 ประเภทของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้อากาศ

1. แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenic Bacteria) ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยของกระบวนการไม่ใช้อากาศ กรดจะผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียไม่ใช้อากาศชนิดเด็ดขาด (Obligate Anaerobes) มากกว่าชนิด Facultative ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียชนิดเด็ดขาดมีจำนวนมากกว่าแบคทีเรียไม่ใช้อากาศชนิดเด็ดขาดที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหย ก็คือกลุ่ม Clostridium ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ จึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวกแป้งหรือโปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้มีหลากหลายชนิด เช่น กรดบิวทิริก กรดอะซิติก แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซิโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียในกลุ่ม Propionibacterium ที่ผลิตกรดพรอปิโอนิก (Propionic Acid) และกรดอะซิติกจากกรดแลกติก [Fenchel and Finlay 1995, Madigan และคณะ 1997]

2. แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) เมื่อผลิตจากแบคทีเรียสร้างกรดมีหลายชนิดดังที่กล่าวข้างต้น และบางชนิดยังเป็นสาร โมเลกุลใหญ่ที่แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้จึงต้องมีการเปลี่ยนสารเหล่านั้นให้กลายเป็นสารอาหารอย่างง่ายสำหรับแบคทีเรียที่สร้างมีเทนเพื่อให้สามารถดูดซึมเข้าไปใช้ได้ ในเซลล์ แบคทีเรียที่ย่อยกรดไขมันระเหย โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

1. แบคทีเรียผลิตอะซิเตทอย่างเคียว (Homoacetogenic Bacteria) แบคทีเรียชนิดนี้เป็นแบคทีเรียที่ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและผลิตกรดอะซิติกขึ้นมา (เป็นกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้อากาศ) ผ่านวิถีชีวเคมีที่เรียกว่า Acetyl-CoA ตัวอย่างแบคทีเรียชนิดนี้ ได้แก่ *Acetobacterium woodii* และ *Clostridium aceticum* สามารถเจริญเติบโตทั้งในแบบออโทโทรฟิก (autotrophic) คือใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอนและใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรดอะซิติก



อีกทั้งเจริญเติบโตในแบบเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic) ก็ได้ โดยการหมักน้ำตาลดั่งสมการข้างล่าง



แบคทีเรียที่อยู่ในจีนัส *Clostridium* พบอยู่ทั้งในกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดไขมันระเหยทั่วไป (Acidogenic Bacteria) และกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้จึงมีเมตาบอลิซึมหลายแบบดังแสดงใน ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของแบคทีเรียบางกลุ่มในจีนัส *Clostridium* [Medigan et al., 1997]

ลักษณะสำคัญ	ผลผลิตและลักษณะอื่น	ชนิด
<b>1. บ่อยคาร์บอนไฮเดรท</b>		
บ่มเยลลูลอสได้	อะซิเตท, แลกเตท,	<i>C. cellobioparum</i>
	ซัลซิเนท, ไฮโดรเจน, เอทธานอล,	<i>C. thermocellum</i>
	คาร์บอนไดออกไซด์	
บ่มน้ำตาล, แป้ง และ	ผลผลิตคือ อะเซโทท, บิวทานอล,	<i>C. butyricum</i>
เปกติน (pectin) ได้	เอทธานอล, ไฮโดรเจน, เอทธานอล,	<i>C. acetobutylicum</i>
บางชนิดครึ่ง	บิวทานอล, อะซิเตท, พรอพิโอเนท,	<i>C. pasteurianum</i>
ไนโตรเจนได้	ซัลซิเนท, ไฮโดรเจน,	<i>C. perfringens</i>
	คาร์บอนไดออกไซด์	<i>C. thermosulfurogenes</i>

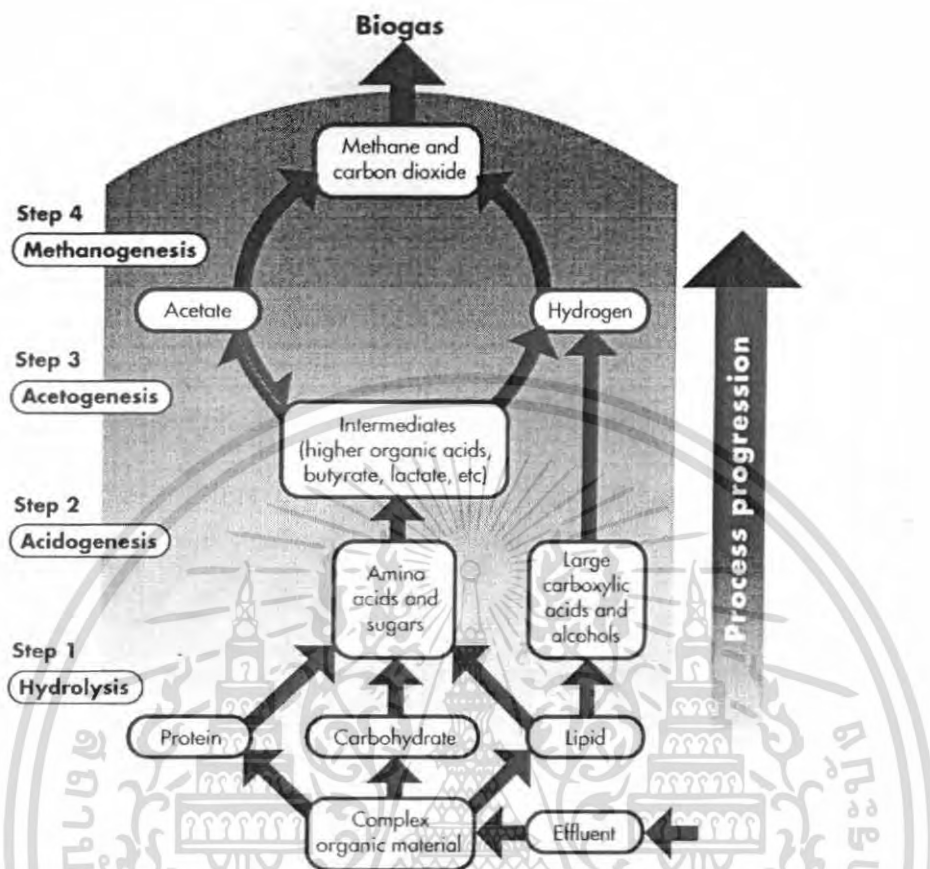
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของแบคทีเรียบางกลุ่มในจีนัส *Clostridium* [Medigan et al., 1997] (ต่อ)

ลักษณะสำคัญ	ผลผลิตและลักษณะอื่น	ชนิด
ย่อยน้ำตาลให้เป็นกรดอะซิติกได้	ผลิตอะซิเตทจากคาร์บอนไดออกไซด์	<i>C. acetivum</i>
		<i>C. thermoacetivum</i>
		<i>C. formicoacetivum</i>
ย่อยเฉพาะ pentoses หรือ methylpentoses ได้	ผลผลิตคือ อะซิเตท, พรอพิโอนัท, n- บิวทาเนออล, ไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์	<i>C. methylpentosum</i>
2. ย่อยโปรตีนและกรดอะมิโนได้	ผลผลิตคือ อะซิเตท, กรดไขมันระเหยง่าย, แอมโมเนีย, คาร์บอนไดออกไซด์, อาจให้ไฮโดรเจน	<i>C. sporogenes</i>
		<i>C. tetani</i>
		<i>C. botulinum</i>
อาจย่อยน้ำตาลได้	ผลผลิตคือ บิวทาเนออลและอะซิเตท อาจผลิตเอ็กโซทอกซิน (exotoxins)	<i>C. tetanomorphum</i>
ย่อยสารประกอบที่มีคาร์บอน 3 อะตอม	พรอพิโอนัท, อะซิเตทและคาร์บอนไดออกไซด์	<i>C. propionicum</i>
3. ย่อยคาร์บอนไฮเดรทหรือกรดอะมิโนได้	อะซิเตท, พรอพิโอนัท, มีไอโซบิวทาเนออล และ ไอโซวาเลอเรท (isovalerate) เล็กน้อย	<i>C. bifementaus</i>
4. ย่อยพิวรีน (Purine) ได้	อะซิเตท, purines, forming acetate, คาร์บอนไดออกไซด์, แอมโมเนีย	<i>C. acidurici</i>
5. ย่อยเอทราเนออลให้เป็นกรดไขมันได้	ใช้อะซิเตทเป็นสารรับอิเล็กตรอน	<i>C. kluyveri</i>

2. แบคทีเรียสร้างอะซิเตทที่ผลิตไฮโดรเจนได้ ( $H_2$ -Producing Acetogenic Bacteria )

แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือแอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร แล้วสร้างกรดอะซิติกและแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทนขึ้นมา ดังนั้นแบคทีเรียชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญ เพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดกับแบคทีเรียสร้างมีเทน อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียชนิดนี้จะไม่เจริญเติบโตเมื่ออยู่ตามลำพัง ทั้งนี้เพราะเมื่อมีการสะสมของแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมา (ทำให้มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง) ปฏิกริยาสร้างกรดอะซิติกจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกหยุดการเจริญเติบโต ดังนั้น จะต้องมีกำจัดการกำจัดไฮโดรเจนก่อนแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจึงจะเจริญเติบโตได้ แบคทีเรียสร้างมีเทนจึงเข้ามามีบทบาทในตรงนี้เพราะแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถบริโภคไฮโดรเจนได้



รูปที่ 2.5 รูปแสดงขั้นตอนของปฏิกิริยาไม่ใช้ออกซิเจน [Wheatley, A.D 1997]

การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียสร้างมีเทนให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน เรียกว่าความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Syntrophy และต่างก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าอยู่เพียงลำพัง นั่นคือ แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะสร้างอาหารให้แก่แบคทีเรียที่สร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนก็ช่วยทำลายแก๊สไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียที่สร้างกรดแบคทีเรียชนิดนี้อยู่ในกลุ่ม Syntrophomonas และกลุ่ม Syntrophobacter แบคทีเรีย Syntrophomonas wolfei ย่อยกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 4 ถึง 8 อะตอม ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแบคทีเรีย Syntrophobacter wolinii จะย่อยกรดพรอพิโอนิกให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เช่นกัน

3. แบคทีเรียสร้างมีเทนแบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเคมิคัล ไม้อาจทนต่อออกซิเจนได้แม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทโรโทรฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ดำรงชีวิตอยู่และเจริญเติบโต โดยได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ประมาณ 10 ชนิด เท่านั้น

สารอาหารชนิดอื่นนอกเหนือจากนี้ ไม่ว่าจะเป็นกรดไขมันระเหย เช่น บิวทิริก หรือ พรอพิโอนิก ซึ่งปกติเป็นสารอาหารของแบคทีเรียรีดิคัลซัลเฟต แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้

ตารางที่ 2.5 สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ได้ [Madigan และคณะ 1997]

สับสเตรทประเภทคาร์บอนไดออกไซด์	
คาร์บอนไดออกไซด์	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}; \Delta G^\circ = -131 \text{ kJ/reaction}$
ฟอร์มेट, $\text{HCOO}^-$	$4\text{HCOO}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}; \Delta G^\circ = -145 \text{ kJ/reaction}$
คาร์บอนมอนอกไซด์, $\text{CO}$	$4\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{CO}_2; \Delta G^\circ = -210 \text{ kJ/reaction}$
สับสเตรทประเภทแอมโมเนีย	
Methanol, $\text{CH}_3\text{OH}$	$4\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}; \Delta G^\circ = -319 \text{ kJ/reaction}$
Methylamine, $\text{CH}_3\text{NH}_2$	$4\text{CH}_3\text{NH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4\text{NH}_3; \Delta G^\circ = -230 \text{ kJ/reaction}$
Dimethylamine, $(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2^+$	$(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2\text{NH}_3; \Delta G^\circ = -230$
Trimethylamine, $(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+$	$4(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+ + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 9\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2 + 4\text{NH}_3; \Delta G^\circ = -666$
Methylmercaptan, $\text{CH}_3\text{SH}$	
Dimethylsulfide, $(\text{CH}_3)_2\text{S}$	
อะซิเตท	
Acetate, $\text{CH}_3\text{COO}^-$	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2; \Delta G^\circ = -31 \text{ kJ/reaction}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

95162

## 2.7 กลไกการสร้างมีเทน

ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่ไม่มีไนเตรตอยู่ด้วยจะมีแบคทีเรียอาศัยอยู่ในระบบร่วมกัน 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ แบคทีเรียสร้างกรด แบคทีเรียสร้างมีเทน และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต สาเหตุที่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศมีแบคทีเรียหลายกลุ่มอาศัยอยู่ร่วมกันเป็นเพราะแบคทีเรียสร้างมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้สารอาหารได้จำกัดชนิด ซึ่งมักเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก ทำให้แบคทีเรียสร้างกรดใช้สารอินทรีย์ได้ก่อนและเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ต่อจากนั้นแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนจึงใช้กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นนั้นต่อไป โดยสารอินทรีย์ที่เข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ จะถูกย่อยสลายผ่านขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

### ขั้นตอนที่ 1 "ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)"

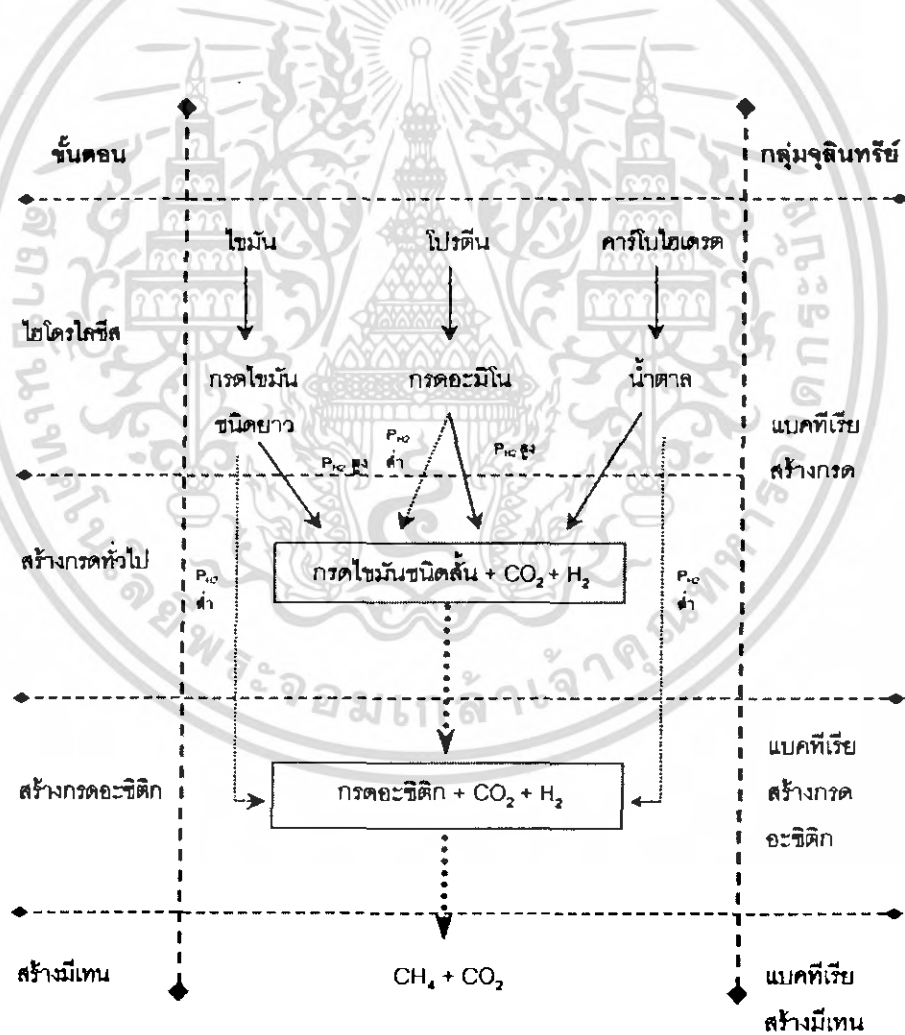
ไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาว ความล่าช้า ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาใช้ในการย่อย สลายดังกล่าว

### ขั้นตอนที่ 2 "การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)"

ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์ เพื่อไปใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid) เช่น กรดอะซิติก กรดบิวไทริก กรดพรอพิโอนิก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับ คาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็กและชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสับสเตรท และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นยกตัวอย่างเช่น กรดไขมันชนิดยาวจะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะย่อยสลายกลายเป็นกรดบิวไทริกและกรดพรอพิโอนิก เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง น้ำตาลถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านวิถี Embden-Meyerhof ภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่ถ้าไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูงผลผลิตที่ได้คือ กรดอะซิติก กรดพรอพิโอนิก กรดบิวไทริก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

### ขั้นตอนที่ 3 "การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis)"

แบคทีเรียอะเซโตจีนิก (แบคทีเรียสร้างอะซิติก) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน แบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสับสเตรตเฉพาะเจาะจงมากได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นสับสเตรตในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียอะเซโตจีนิก (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า  $2 \times 10^{-3}$  บรรยากาศ และต่ำกว่า  $9 \times 10^{-3}$  บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดบิวไทริกและกรดพรอพิโอนิก ตามลำดับ

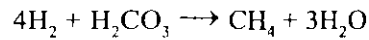
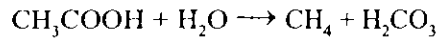


รูปที่ 2.6 รูปแสดงขั้นตอนการย่อยสลายไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต แบบไม่ใช้อากาศ

[Sam-Soon 1987]

## ขั้นตอนที่ 4 "การสร้างมีเทน"

กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้สร้างแก๊สมีเทนภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจนอย่างเค็ลขาด



กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดไขมันระเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติก หรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ นอกจากกรดอะซิติกและไฮโดรเจนแล้ว แบคทีเรียอาจใช้สับสเตรตอย่างง่ายอีกเพียงไม่กี่ชนิดในการผลิตมีเทน เช่นเมทานอล, กรดฟอร์มิก (HCOOH)



### 2.8 การออกแบบถังปฏิกริยาชีวภาพสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas bioreactor design)

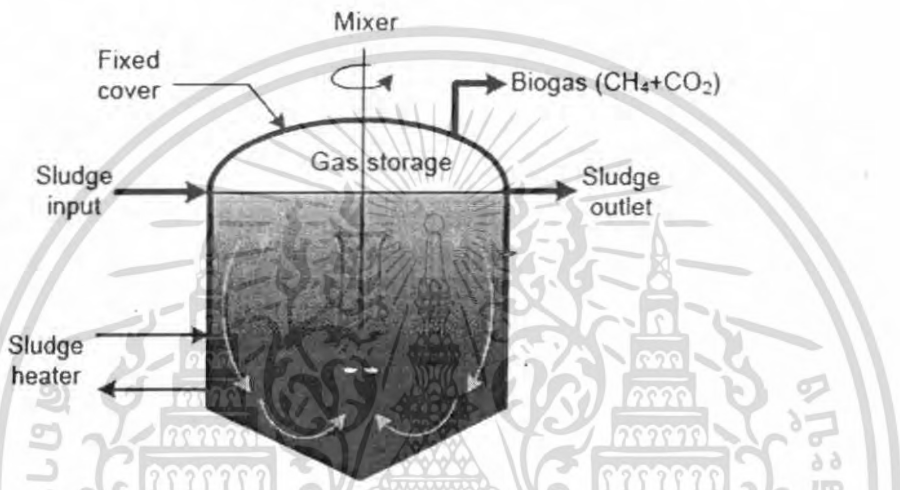
โดยพื้นฐานของการออกแบบถังปฏิกริยา (Reactor) ต้องอยู่บนพื้นฐานของความเข้าใจในหลักการทางชีวเคมีและจุลชีววิทยา ที่ผ่านมามีนักวิจัยไม่เข้าใจในหลักการอย่างถ่องแท้เท่าที่ควร จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อออกแบบถังปฏิกริยา ในการออกแบบขนาดของถังปฏิกริยา จะพิจารณาถึง Solid retention time, The use of the volumetric loading factor, Volatile solids destruction, Observed volume reduction และ Loading factors base on population (Metcalf & Eddy, 2003) โดยทั่วไปจะนิยมใช้ 2 หลักการแรกเพราะมีความสะดวกมากกว่า 3 วิธีการหลัง

**Bioreactor Configuration** รูปแบบถังปฏิกริยาสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพอาจออกแบบเป็นขั้นตอนเดียว (Single-stage) หรือสองขั้นตอน (Two-stage) (ดูรูปที่ 2.8 - 2.9) ซึ่งแต่ละรูปแบบสามารถแบ่งตามการบรรทุกและการเดินระบบได้ 2 ประเภทได้แก่

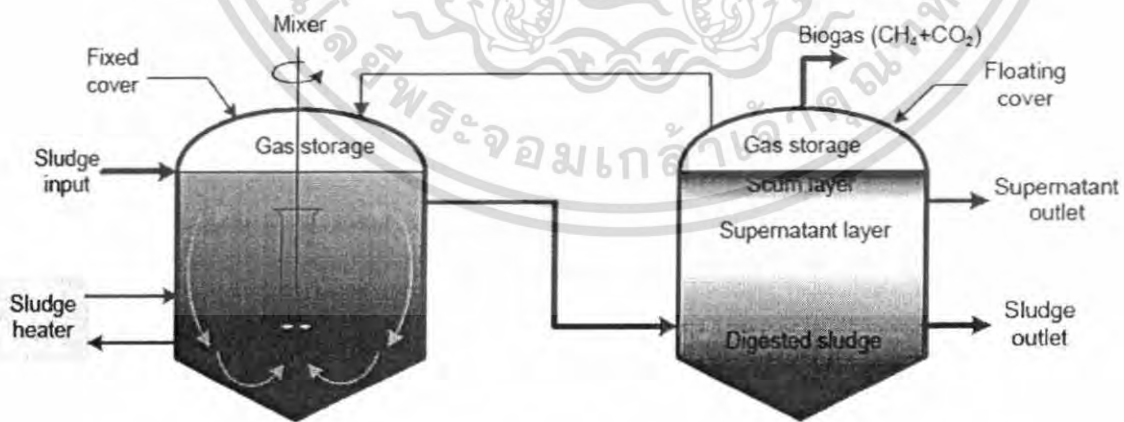
1. Low-Rate Digesters เป็นถังปฏิกริยาแบบพื้นฐาน มีระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time, HRT) 30-60 วัน การบรรทุก (Organic Loading Rate, OLR) 0.64-1.60 kg/m<sup>3</sup>-day การเดินระบบ อาจจะทำการผสม (Mixing), การเติมน้ำเสียและการเอาสลัดจ์ (Sludge) ออกเป็นครั้งคราว ถังปฏิกริยา

ชนิดนี้สามารถใช้ฝาปิดที่ลอยได้หรือแบบติดกับที่แต่การใช้ฝาปิดชนิดติดกับที่จะไม่สะดวกในการเดินระบบหรือการทำงานของตู้เดินระบบ (Reynolde, T. D. and Richards, P. A., 1996)

2. High-Rate Digesters ถึงปฏิกิริยาชนิดนี้มีระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 10-20 วัน ภาระบรรทุกทุก 2.4-6.4 kg/m<sup>3</sup>-day การเดินระบบจะทำการผสม, เติมน้ำเสียและการทิ้งสลัดจ์อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปถึงปฏิกิริยาชนิดนี้มักจะใช้ฝาปิดแบบติดกับที่ (Reynolde, T. D. and Richards, P. A., 1996)



รูปที่ 2.7 รูปแสดงถึงปฏิกิริยาแบบ Single stage high-rate digester [Cheynoweth 1987]

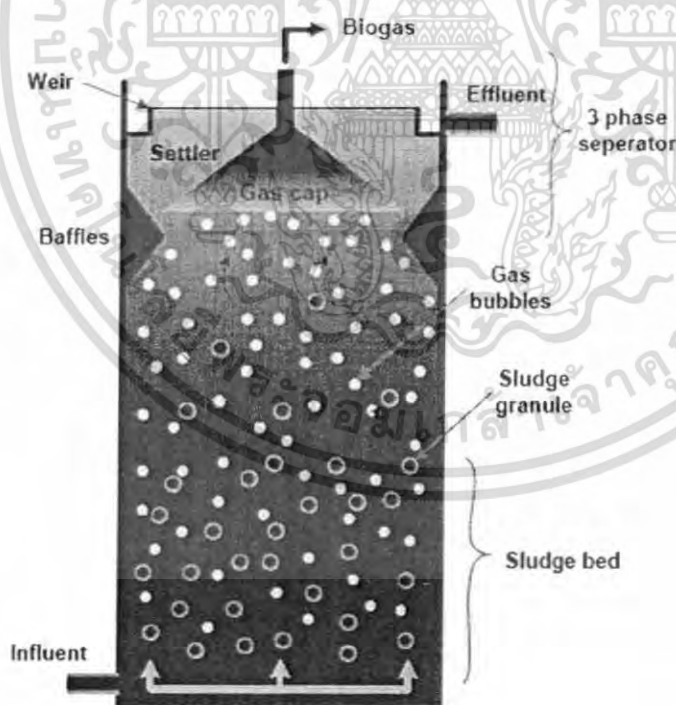


รูปที่ 2.8 รูปแสดงถึงปฏิกิริยาแบบ Two-stage digester [Cheynoweth 1987]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 การประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพ (Application of Biogas Reactor)

จากข้อมูลการสำรวจของ Kleerebezem, R. and Macarie, H. (2003) ซึ่งให้เห็นว่าถังปฏิกิริยา Upflow Anaerobic Sludge Bed (UASB) เป็นที่นิยมออกแบบและนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เป็นระบบที่มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งรูปแบบถังปฏิกิริยา กลไกทางชีวเคมีและชีววิทยา (ดูรูปที่ 2.10) ถังปฏิกิริยาชนิดนี้พบครั้งแรกประมาณปลายปี ค.ศ. 1970 โดย Lettinga และคณะ (ประเทศเนเธอร์แลนด์) (Metcalf & Eddy, 2003) ลักษณะถังปฏิกิริยาเป็นการรวมกันระหว่างส่วนที่เกิดปฏิกิริยาย่อยสลาย ส่วนการตกตะกอนและส่วนแยกแก๊ส (3 phase separator) การที่ระบบมีแบคทีเรียความเข้มข้นสูง (20,000-30,000 mgVSS/L) สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นประมาณ 5,000 mg COD/L ได้อย่างดีที่เวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time, HRT) 10 ชม. และอายุสัติจ (Solids Retention Time, SRT) 50 วัน ความไม่สัมพันธ์กันระหว่างค่า HRT กับ SRT เป็นผลให้ระบบ UASB มีความสามารถในการบำบัดมากกว่าระบบทั่วๆ ไป (Kleerebezem, R and Macarie, H., 2003) ค่าแนะนำสำหรับการออกแบบภาระบรรทุก เวลาเก็บกัก และความเร็วการไหลของระบบ UASB แสดงในตารางที่ 2.6, 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 Upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactor [Cheynoweth 1987]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 Recommended volumetric organic loadings as a function of temperature for soluble COD substrate for 85% to 95% COD removal, Average sludge concentration is 25,000 mg/L [A. P. and Amaty 2000]

Temperature, °C	Volumetric loading, kg sCOD/m <sup>3</sup> .d			
	VFA wastewater		Non-VFA wastewater	
	Range	Typical	Range	Typical
15	2-4	3	2-3	2
20	4-6	5	2-4	3
25	6-12	6	4-8	4
30	10-18	12	8-12	10
35	15-24	18	12-18	14
40	20-32	25	15-24	18

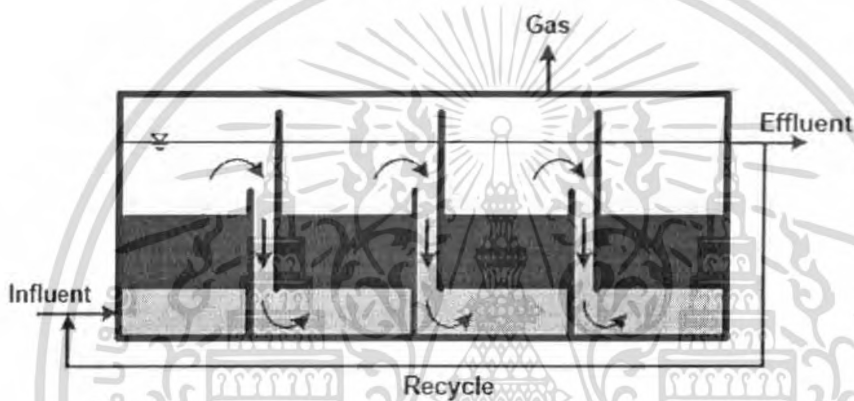
ตารางที่ 2.7 Applicable hydraulic retention time (HRT) for treatment of raw domestic wastewater in a 4 m-high UASB reactor [A. P. and Amaty 2000]

Temperature, °C	Average HRT, h	Max. HRT for 4-6 h peak, h
16-19	10-14	7-9
22-26	7-9	5-7
>26	6-8	4-5

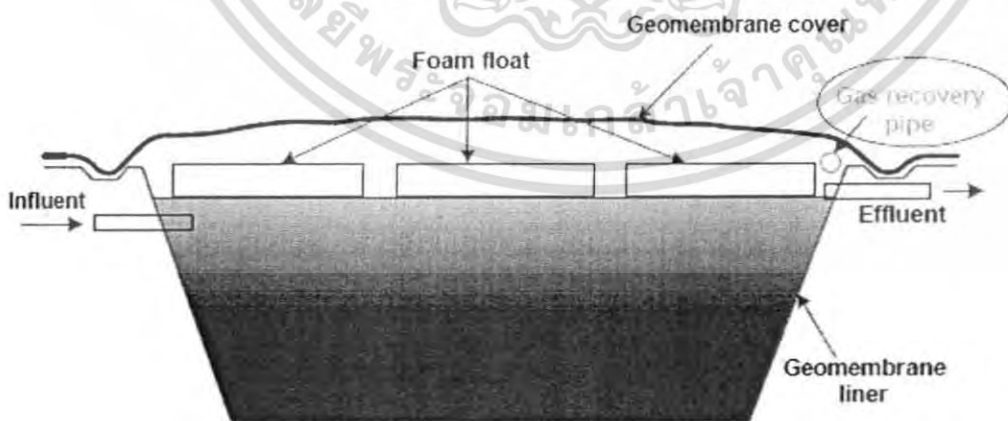
ตารางที่ 2.8 Upflow velocities and reactor heights recommended for UASB reactor [A.P.and Amaty 2000]

Wastewater type	Upflow velocity, m/h		Reactor height, m	
	Range	Typical	Range	Typical
COD nearly 100% soluble	1.0-3.0	1.5	6-10	8
COD partially soluble	1.0-1.25	1.0	3-7	6
Domestic wastewater	0.8-1.0	0.7	3-5	5

ทั้งนี้การเลือกรูปแบบถึงปฏิริยาคั้งตั้งอยู่บนพื้นฐานของความเหมาะสมทั้งทางวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และกฎหมาย สำหรับประเทศไทยเริ่มให้ความสำคัญกับการนำพลังงานจากน้ำเสียมาใช้ ประโยชน์ มากขึ้น โดยเฉพาะฟาร์มสุกรมีหน่วยงานของรัฐให้การสนับสนุนในการลงทุน รูปแบบถึง ปฏิริยาที่นิยมเรียกว่า Anaerobic Baffled Reactor (ABR) (ดูรูปที่ 2.11) หรือสถานประกอบการที่มี ระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Anaerobic pond สามารถปรับปรุงและแก้ไขให้สามารถนำแก๊สชีวภาพมาใช้ งานได้โดยคลุมบ่อด้วยแผ่นโพลีเอทิลีนซึ่งเรียกลังปฏิริยานี้ว่า Cover Lagoon นอกจากนี้จะได้แก๊สชีวภาพ มาใช้ประโยชน์แล้วยังสามารถช่วยลดกลิ่นเหม็นของระบบได้อีกด้วย (ดูรูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.10 รูปแสดงหลักการผลิตแก๊สชีวภาพแบบ Anaerobic baffled reactor (ABR) [ปฏิกรณ 2548]

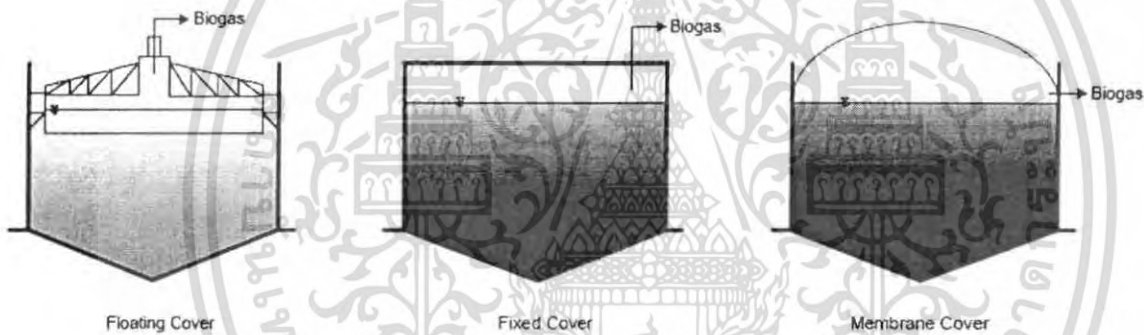


รูปที่ 2.11 รูปแสดงหลักการผลิตแก๊สชีวภาพแบบ Cover lagoon [ปฏิกรณ 2548]

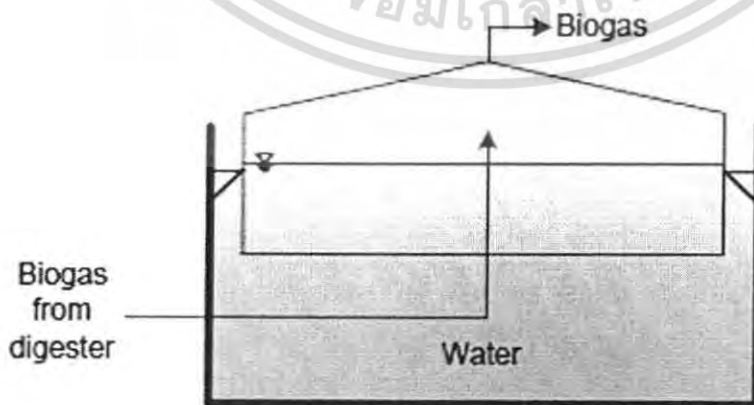
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 ถังเก็บพักแก๊สชีวภาพ (Biogas holder)

ในการเก็บรวบรวมแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมที่ตำแหน่งได้ฝาปิดถังปฏิกรณ์ ซึ่งพบได้ทั่วไป 3 รูปแบบ ได้แก่ Floating cover, Fixed cover และ Membrane cover (ดูรูปที่ 2.13) การเลือกใช้รูปแบบใดขึ้นอยู่กับขนาดถังปฏิกรณ์และความยากง่ายในการก่อสร้าง การใช้รูปแบบ Floating cover และ Membrane cover จะได้เปรียบในเรื่องการรักษาความดันของแก๊สภายในถังปฏิกรณ์ ทั้งนี้ต้องมีระบบป้องกันความดันภายในถังเก็บแก๊สเพิ่มขึ้นมากเกินไป เพื่อลดความดันของแก๊สที่มีมากเกินไป อาจจะไปเก็บในสถานะอัดความดันหรือเผาทั้งกลางแจ้ง (Biogas flare) ถังรวบรวมแก๊สชีวภาพ อาจแยกออกจากถังปฏิกรณ์ก็ได้ (ดูรูปที่ 2.14) วิธีดังกล่าวจะลดข้อจำกัดขนาดของถังรวบรวมแก๊สที่ต้องขึ้นกับขนาดถังปฏิกรณ์และมีความคล่องตัวหรือยืดหยุ่นในการควบคุมมากขึ้น (Metcalf & Eddy, 2003)



รูปที่ 2.12 รูปแสดงลักษณะการเก็บรวบรวมแก๊สชีวภาพแบบ Floating cover, Fixed cover และ Membrane cover [ปฏิกรณ์ 2548]



รูปที่ 2.13 รูปแสดงรูปแบบถังรวบรวมแก๊สชีวภาพแบบ External floating cover [ปฏิกรณ์ 2548]  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 ปัจจัยสิ่งแวดล้อม (Environmental Factors)

2.11.1. อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกตัวหนึ่งในการควบคุมกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนให้เกิดขึ้น โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการไม่ใช้ออกาศมีอยู่ 2 ช่วง คือ

- ช่วง 8 – 45°C เรียกว่า เมโซฟิลิก (mesophilic)
- ช่วง 40 – 70°C เรียกว่า เทอร์โมฟิลิก (thermophilic)

ตามปกติแล้ว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์จะเร็วขึ้น อัตราการเจริญเติบโตก็เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มสูงเกินกว่าที่เซลล์ทำงานได้ โปรตีนกรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์หลายส่วนจะถูกทำลายจนไม่อาจกลับคืนสภาพได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเพิ่มการเจริญเติบโตและการทำงานของเซลล์ได้จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านั้น การทำงานและการเจริญเติบโตจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วมาก

อุณหภูมิที่เดินระบบแอนแอโรบิกมี 2 ช่วง ได้แก่ 30 - 35°C และ 50 - 60°C โดยอุณหภูมิช่วง 40 - 50°C กลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตแก๊สมีเทนจะถูกยับยั้ง (Gerardi, M. H., 2003) ส่วนใหญ่จะเดินระบบที่อุณหภูมิ 30 - 35°C มากกว่า 50 - 60°C เนื่องจาก Thermophilic bacteria มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสิ่งแวดล้อม มักจะประสบปัญหาในการควบคุมระบบได้ง่ายกว่า Mesophilic bacteria รายละเอียดกลุ่มแบคทีเรียแสดงในตารางที่ 2.9 - 2.10 และเปรียบเทียบการเดินระบบระหว่าง Mesophilic digesters และ Thermophilic digesters แสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.9 Optimum temperature ranges for the growth of methane-forming bacteria [Speece, R.E 1996]

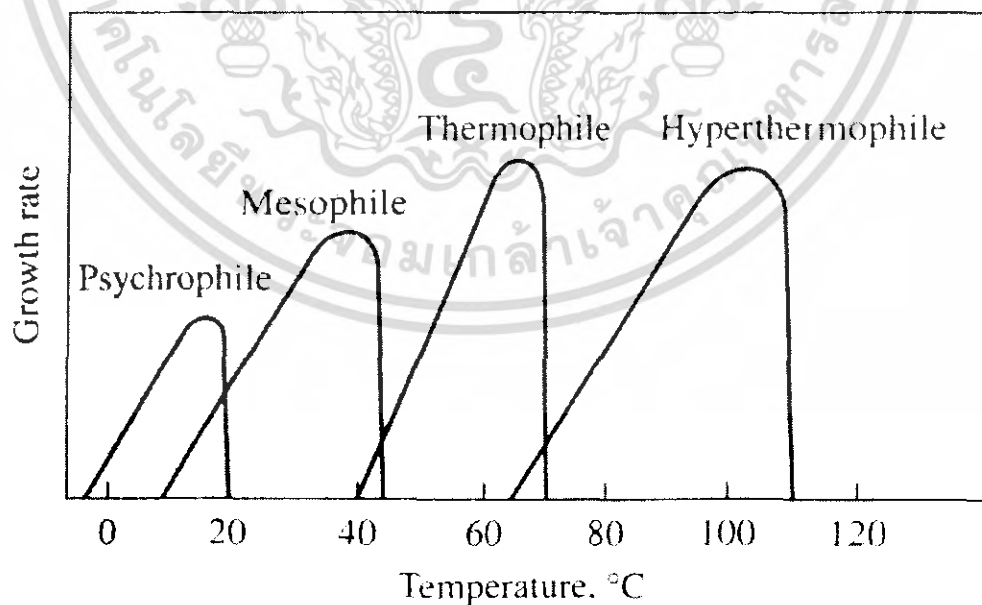
Bacteria Group	Temperature Range, °C
Psychrophiles	5-25
Mesophiles	30-35
Thermophiles	50-60
HyperThermophiles	>65

ตารางที่ 2.10 Temperature range for methane production for municipal anaerobic digesters [Speece, R.E 1996]

Temperature, °C	Methane Production
35	Optimum
32-34	Minimum
21-31	Little, digester going "sour"
<21	Nil, digester is "sour"

ตารางที่ 2.11 Comparison of mesophilic and thermophilic digesters [Speece, R.E 1996]

Feature	Mesophilic digester	Thermophilic digester
Loading rates	Lower	Higher
Destruction of pathogens	Lower	Higher
Sensitivity to toxicants	Lower	Higher
Operational costs	Lower	Higher
Temperature control	Less difficult	More difficult



รูปที่ 2.14 รูปแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์

[Rittmann และ McCarty 2001]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.11.2. พีเอช(pH)** จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชช่วงหนึ่ง ค่าพีเอชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดก็จะอยู่ในช่วงนี้ จุลินทรีย์ส่วนใหญ่มักมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงพีเอช 5 - 10 เพราะสภาพแวดล้อมส่วนใหญ่ในธรรมชาติมักมีพีเอชอยู่ในช่วง 5 - 10 จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีที่พีเอชต่ำกว่า 5 เรียกว่า Acidophiles เช่น ราและแบคทีเรียบางชนิด ส่วนพวกที่เจริญเติบโตได้ดีที่พีเอช 10 - 11 เรียกว่า Alkaliphiles พีเอชที่เหมาะสมต่อการกระบวนการไม่ใช้อากาศควรอยู่ระหว่าง 6.8 - 7.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ถ้าพีเอชน้อยกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว

**2.11.3. กรดไขมันระเหยและสภาพด่าง(VFA)** โดยปกติ กรดไขมันระเหย (VFA) ในดั่งบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่ทำงานได้ดีควรมีค่าประมาณ 20-200 มก.กรดอะซิติกต่อลิตร กรดไขมันระเหยที่สะสมจนมีความเข้มข้นสูงกว่าระดับที่กล่าวแสดงว่าระบบมีแบคทีเรียสร้างมีเทนน้อยเกินไปหรือแสดงว่าแบคทีเรียสร้างกรดผลิตกรด VFA ได้เร็วเกินไป กรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณว่าระบบกำลังเสียสมดุล เพราะทำให้พีเอชลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียสร้างมีเทนหรือแบคทีเรียสร้างกรด แม้ว่าแบคทีเรียสร้างกรดจะทนต่อกรดที่ผลิตขึ้นได้มากกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ตาม สังเกตได้จากแบคทีเรียสร้างกรดสามารถอยู่ได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า ดังนั้นสภาพด่างจึงแสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบซึ่งจะรักษาระบบให้มีพีเอชค่อนข้างคงที่และทนต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยได้ โดยทั่วไปกระบวนการไม่ใช้อากาศควรมีสภาพด่าง(Alkalinity) ประมาณ 1,500-2,000 มก./ล.สำหรับย่อยสลายหรือน้ำเสียเข้มข้นปริมาณสภาพด่างที่พอเพียงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของชีโอดีที่ย่อยสลายได้นอกจากจะดูสภาพด่างแล้ว ยังต้องพิจารณาอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยในรูปกรดอะซิติกต่อสภาพด่างด้วย โดยค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างน้อยกว่า 0.4 ถือได้ว่าระบบยังทำงานได้ดี แต่ถ้าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างสูงกว่า 0.8 แล้ว แสดงว่าระบบมีบัฟเฟอร์ต่ำ ควรหาสาเหตุที่ทำให้อัตราส่วนสูงขึ้นและแก้ไข เพราะพีเอชมีแนวโน้มลดลงจนระบบอาจล้มเหลวได้

**2.11.4. ความต้องการธาตุอาหาร (Nutrient Requirements)** ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แบคทีเรียมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 80% ส่วนที่เหลือ 20% ประกอบด้วยอินทรีย์สาร 90% และอนินทรีย์สาร 10% สูตรโครงสร้างอย่างง่ายของเซลล์ ( $C_5H_7O_2N$ ) จะมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบประมาณ 50% (คูตารางที่ 2.12) แต่ถ้าพิจารณารวมฟอสฟอรัสด้วย สูตรโครงสร้างจะเปลี่ยนเป็น  $C_{60}H_{87}O_{23}N_{12}P$  (องค์ประกอบจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและชนิดของแบคทีเรีย) [Metcalf & Eddy, 2003]

ตารางที่ 2.12 Elementary composition of bacterial cells [Speece, R.E 1996]

Element	Approximate Percent Composition
Carbon	50
Oxygen	22
Nitrogen	12
Hydrogen	9
Phosphorus	2
Sulfur	1
Potassium	1
Sodium	1
Calcium	0.5
Magnesium	0.5
Chloride	0.5
Iron	0.2
Other trace element	0.3

ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ Macronutrient และ Micronutrient ซึ่ง Macronutrient ถือได้ว่าเป็นธาตุอาหารหลักสำหรับการสังเคราะห์เซลล์ ได้แก่ C, N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na และ Cl ส่วน Micronutrient ได้แก่ Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu, Ni และ Vitamin ซึ่งมีบทบาทในกระบวนการสันดาปและการทำงานของเอนไซม์ของเซลล์ สัดส่วน COD: N: P ขึ้นอยู่กับภาระบรรทุกของระบบ โดยทั่วไป 1000: 7: 1 และ 350: 7: 1 สำหรับ น้ำเสียความเข้มข้นสูงและน้ำเสียความเข้มข้นต่ำตามลำดับ ทั้งนี้สามารถคำนวณธาตุอาหาร (N, P) ที่ต้องการได้โดยพิจารณาจากสัดส่วนองค์ประกอบของเซลล์ (ดูตัวอย่างการคำนวณ) โดยมีสมมติฐานการสร้างเซลล์สำหรับการหายใจแบบแอนแอโรบิกประมาณ 5% สำหรับ Micronutrient สามารถคำนวณความต้องการอย่างน้อยประมาณ 0.02-0.03 mg/g COD สำหรับ Fe, Zn และ 0.003-0.004 mg/g COD สำหรับ Mn, Mo, Se, Co, Cu, Ni [McCarty, P. L. and Rittmann, B. E., 2001]

### ตัวอย่างการคำนวณ

Influent COD = 10,000 mg/L

Treatment efficiency = 80%

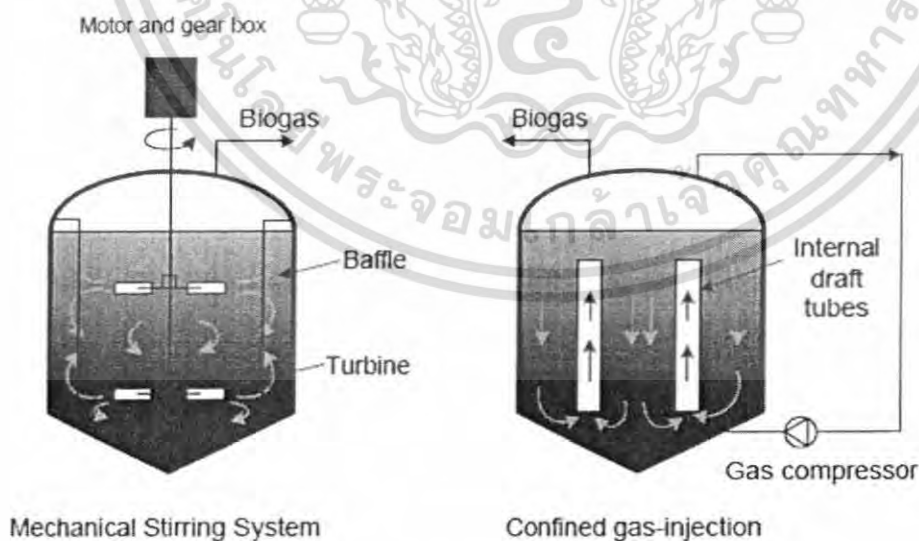
COD removed = 8,000 mg/L

Biomass growth  $(0.05 \times 8,000) = 400$  mg VSS/L

Nitrogen required  $(400 \times 0.12) = 48$  mg/L

Phosphorus required  $(400 \times 0.02) = 8$  mg/L

**2.11.5. การผสม (Mixing)** การผสมเป็นการทำให้แบคทีเรียมีโอกาสสัมผัสกับอาหาร(น้ำเสีย) มากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น ในกรณีน้ำเสียเป็งมันสำปะหลังจะลดการจับตัวกันเป็นก้อนเป็งซึ่งจะทำให้เกิดการย่อยเป็งได้รวดเร็วกว่า การผสมสามารถลดเวลาเก็บกักของถังปฏิกิริยาได้ วิธีการผสมโดยใช้ใบพัดกวนจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการผสมโดยหมุนเวียนแก๊สที่เกิดขึ้นภายในระบบ (ดูรูปที่ 2.15) การผสมสามารถเลือกรูปแบบได้ทั้งการผสมแบบต่อเนื่องและเป็นช่วงเวลา กลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตแก๊สมีเทนมีความไวต่อการผสมเร็ว (Rapid Mixed, Velocity gradient,  $G > 500 \text{ s}^{-1}$ ) มาก ควรหลีกเลี่ยงการผสมที่อาจทำให้แบคทีเรียที่ผลิตแก๊สมีเทนหลุดออกจากระบบ เพราะจะทำให้ระบบล้มเหลวได้ [Gerardi, M. H., 2003] ข้อกำหนดการออกแบบระบบการผสมสำหรับย่อยแบบแอนแอโรบิกแสดงในตารางที่ 2.13



รูปที่ 2.15 รูปแสดงรูปแบบการผสมในถังย่อยแอนแอโรบิก [Cheynoweth 1987]

## Advantages of Mixing Digester Content

1. Eliminating or reducing scum buildup
2. Eliminating thermal stratification or localized pockets of depressed temperature
3. Maintaining digester sludge chemical and physical uniformity throughout the tank
4. Rapid dispersion of metabolic wastes (products) produced during substrate digestion
5. Rapid dispersion of any toxic materials entering the tank (minimizing toxicity)
6. Prevent deposition of grit

ตารางที่ 2.13 Typical design parameters for anaerobic digester mixing systems [Speece, R.E 1996]

Parameter	Type of mixing system	Typical values
Unit power	Mechanical system	0.005-0.008 kW/m <sup>3</sup> of digester volume
Unit gas flow	Gas mixing	
	Unconfined	0.0045-0.005 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> .min
	Confined	0.005-0.007 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> .min
Velocity gradient, <i>G</i>	All	50-80 s <sup>-1</sup>
Turnover time of tank contents	Confined gas mixing and mechanical systems	20-30 min

2.11.6. เวลารักษากัก (*Retention Time*) มี 2 ตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับเวลาในถังปฏิบัติการ ได้แก่ Solid Retention Time (SRT) และ Hydraulic Retention Time (HRT) โดยที่ SRT เป็นเวลาเฉลี่ยที่แบคทีเรียอยู่ในถังปฏิบัติการ ส่วน HRT เป็นเวลาเฉลี่ยที่น้ำเสียหรือสลัดจ์อยู่ในถังปฏิบัติการ ตัวแปรทั้งสองอาจจะสัมพันธ์กันหรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการเดินระบบ

Methane-Forming Bacteria ต้องการเวลาสำหรับการฟักตัวและเพิ่มจำนวนมากกว่าแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจน (ดูตารางที่ 2.14) ดังนั้นการเดินระบบไม่ควรให้ SRT น้อยกว่า 10 วัน เนื่องจากอาจเกิดการชะล้าง (Washout) Methane-Forming Bacteria ออกจากระบบ SRT ถือได้ว่ามีความสำคัญกว่า HRT เพราะไม่ขึ้นกับลักษณะน้ำเสียหรือลักษณะของสลัดจ์ การเพิ่มตัวกลางเข้าไปในระบบทำให้ SRT เพิ่มขึ้นได้ ข้อดีของการเดินระบบที่ค่า SRT มาก ได้แก่ เพิ่มความสามารถในการบำบัด ลดขนาดถังปฏิบัติการ ลดผลกระทบจากภาวะรับภาระเกิน (Shock loading) หรือมีสารพิษที่เข้ามาปนกับน้ำเสีย การเพิ่ม

ค่า SRT อาจทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การเพิ่มขนาดถังปฏิกริยาและการเพิ่มความเข้มข้นของแบคทีเรียในระบบ ทั้งนี้ HRT มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยง่ายไปเป็นแก๊สมีเทน

ตารางที่ 2.14 Approximate generation times of important groups of wastewater bacteria [Speece,R.E 1996]

Bacterial group	Function	Approximate Generation Time
Aerobic organotrophs	Floc formation and degradation of soluble organics in the activated sludge and trickling filter processes	15-30 min
Facultative Anaerobic organotrophs	Floc formation and degradation of soluble organics in the activated sludge and trickling filter processes, hydrolysis and degradation of organics in the anaerobic digester	15-30 min
Nitrifying bacteria	Oxidation of $\text{NH}_4^+$ and $\text{NO}_2^-$ in the activated sludge and trickling filter processes	2-3 days
Methane-forming bacteria	Production of methane in the anaerobic digester	3-30 days

2.11.7. การเริ่มเดินระบบ (Start-up) การเริ่มเดินระบบสามารถดำเนินการได้ 2 ลักษณะได้แก่ การบ่มเพาะเชื้อขึ้นเองจากน้ำเสียที่มีอยู่แล้วซึ่งอาจจะใช้เวลาในการบ่มเพาะนานหลายเดือนและการนำเชื้อ (Seeds) มาจากระบบอื่นที่มีลักษณะน้ำเสียคล้ายคลึงกัน ซึ่งวิธีการหลังจะใช้เวลาในการเริ่มเดินระบบสั้นกว่าวิธีแรกแต่ยังคงใช้เวลามากกว่า 1 เดือน (Kleerebezem, R and Macarie, H., 2003) แหล่งเชื้อเบื้องต้นควรนำสลัดจ์มาจากถังตกตะกอนแรกและถังตกตะกอนที่ 2 ในสัดส่วนประมาณ 10: 1 (สลัดจ์จากถังตกตะกอนแรกจะมี Facultative Anaerobes ซึ่งจะทำหน้าที่ย่อยสาร โมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงจำนวนมาก ส่วนตะกอนจากถังตกตะกอนที่สองจะมี Anaerobes มากกว่าซึ่งรวมถึง Methane-Forming Bacteria) แม้ว่าสัดส่วนของสลัดจ์จากถังตกตะกอนจะน้อยกว่าแต่มีความเข้มข้นของแบคทีเรียมากกว่า

เนื่องจาก Methane-Forming Bacteria เป็นกลุ่มจุลชีพที่ไม่สามารถดำรงชีพในสภาวะที่มีออกซิเจนอิสระได้ ดังนั้นสลัดจ์จากระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์อาจจะมี ความเข้มข้นของ Methane-

Forming Bacteria คำ การป้อนสัจจากระบบแอกติเวตเค็ดสัจอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอ ในการเริ่มเดินระบบในระยะเริ่มต้นถ้าปริมาณของ Methane-Forming Bacteria ไม่มากพอจะมีการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA) ทำให้มีกลิ่นเปรี้ยว (Sour) อาจจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณ Methane-Forming Bacteria จากมูลวัวสด ป้อนด้วยอัตรา 5 L:10,000 L ของปริมาณถังปฏิกิริยา ป้อนต่อเนื่องจนทั้งระบบมีประสิทธิภาพเป็นที่พอใจ ก่อนการป้อนเชื้อจากแหล่งอื่นควรปรับอุณหภูมิของเชื้อไปที่ 35°C จะทำให้ระบบทำงานได้รวดเร็วขึ้น การดำเนินการช่วงการเริ่มเดินระบบจะต้องดำเนินการอย่างค่อยเป็นค่อยไปและต้องรักษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้คงที่ในช่วง 6.8-7.2 และ Alkalinity ประมาณ 1,500-3,000 mg/L [Gerardi, M. H., 2003; Metcalf & Eddy, 2003]

**2.11.8. สารพิษ (toxic)** สารที่เป็นพิษคือแบคทีเรียในระบบไม่ใช้ออกาศโดยเฉพาะแบคทีเรียสร้างมีเทนมีอยู่หลายชนิด ระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้นสารที่เป็นพิษบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณพอเหมาะ ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะกลายเป็นพิษได้

## 2.12 การเตรียมการก่อนการใช้แก๊สชีวภาพ

**2.12.1. การกำจัดน้ำในท่อส่งแก๊สชีวภาพ** ปกติแล้วแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้มักจะมีน้ำขึ้นสูงเกือบถึงจุดอ้อมตัว เมื่อแก๊สชีวภาพไหลผ่านท่อส่งแก๊สที่ฝังอยู่ในดินที่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้ความชื้น (ไอน้ำ) ในแก๊สชีวภาพกลั่นตัวเป็นหยดน้ำและสะสมจนเกิดเป็นอุปสรรคในการส่งแก๊สไปตามท่อได้ ดังนั้นต้องมีการติดตั้งเครื่องควบแน่น (Condenser, Cooler at 4 °C) ก่อนนำแก๊สชีวภาพไปใช้งาน

**2.12.2 ปรับลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์** การปรับลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากแก๊สชีวภาพนี้จะปฏิบัติก็ต่อเมื่อมีความจำเป็น เช่น ในกรณีที่แก๊สชีวภาพที่ได้มีสัดส่วนของแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) ต่ำมากจนอยู่ในระดับที่จุดไฟติดยาก คือประมาณเปอร์เซ็นต์ CH<sub>4</sub> น้อยกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ แต่ในระบบผลิตแก๊สชีวภาพสำหรับฟาร์มสุกรนั้นไม่มีปัญหาในเรื่องนี้ ดังนั้นการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จึงไม่จำเป็น

**2.12.3. การปรับลดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์** การปรับลดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ที่ปนเปื้อนในแก๊สชีวภาพนั้นมีคุณสมบัติเป็นแก๊สพิษและเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซัลฟูริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ซึ่งเป็นสาเหตุของฝนกรดหรือไอรกรดที่สามารถกัดกร่อนโลหะและวัสดุอุปกรณ์ได้ ดังนั้นการลดปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ในแก๊สชีวภาพก่อนการนำไปใช้ประโยชน์นั้นจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปและจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ใช้แก๊สด้วย

แก๊สชีวภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางเช่นเดียวกับแก๊สธรรมชาติ (ดูตารางที่ 2.15) ระดับความบริสุทธิ์ของแก๊สขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์และมาตรฐานของเครื่องจักรกล (ดูตารางที่ 2.16)

ตารางที่ 2.15 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของแก๊สชีวภาพกับแก๊สธรรมชาติ

Parameter	Unit	Natural Gas	Biogas (60% CH <sub>4</sub> , 38% CO <sub>2</sub> , 2% Other)
Calorific value (lower)	MJ/m <sup>3</sup>	36.14	21.48
Density	Kg/m <sup>3</sup>	0.82	1.21
Wobbe Index (lower)	MJ/m <sup>3</sup>	39.9	19.5
Max. ignition velocity	m/s	0.39	0.25
Theory air requirement	m <sup>3</sup> air/m <sup>3</sup> gas	9.53	5.71
Max. CO <sub>2</sub> conc. in stack gas	vol%	11.9	17.8
Dew point	°C	59	60-160

ตารางที่ 2.16 คำแนะนำสำหรับการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพ

Application	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Gas heater (boiler)	<1,000 ppm	no	recommended
Kitchen stove	Yes	no	recommended
Stationary engine (CHP)	<1,000 ppm	no	yes
Vehicle fuel	Yes	recommended	yes
Fuel Cell	Yes	yes	yes

### 2.13 ผลเสียเมื่อปล่อยแก๊สชีวภาพทิ้งสู่บรรยากาศ

เนื่องจากแก๊สชีวภาพที่ได้จากการหมักเศษอาหารหรือของเสียต่างๆ รวมทั้งน้ำเสียที่รวมกันหลายๆ โดยทำการเกิดแก๊สชีวภาพนั้น มีส่วนประกอบหลักเป็นแก๊สมีเทน(CH<sub>4</sub>) ซึ่งเป็นแก๊สที่ทำให้ก่อภาวะเรือนกระจกที่โดยส่งผลรุนแรงกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ประมาณ 25 เท่า ดังนั้น หากปล่อยแก๊สชีวภาพทิ้งสู่บรรยากาศจะเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดภาวะเรือนกระจกหรือเร่งให้โลก มีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมระบบไบโอแก๊ส และควบคุมการปล่อยน้ำเสียจากโรงงาน และชุมชนต่างๆ

## บทที่ 3

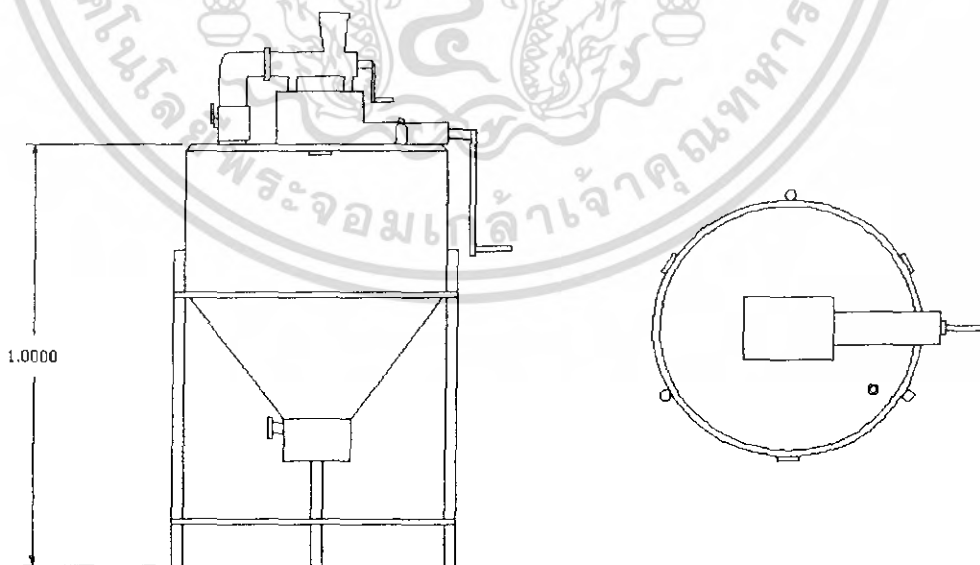
# ขั้นตอนการดำเนินงานและอุปกรณ์การวิจัย

### 3.1. อุปกรณ์และการเตรียมการก่อนการทำกรรมักแก๊ส

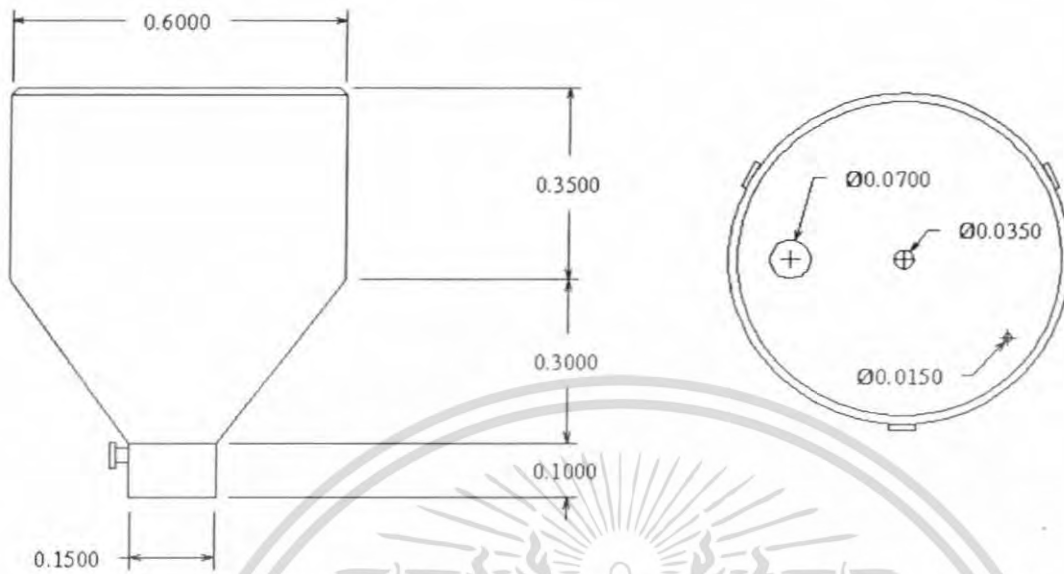
#### 3.1.1 เครื่องหมักแก๊สชีวภาพ

ทำการศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องหมักแก๊สชีวภาพ โดยหลักการของเครื่องหมักแก๊สชีวภาพคือ ทำการใส่อาหารและจุลินทรีย์ทางด้านวาล์วด้านบนของเครื่อง เมื่อทำการใส่อาหารเสร็จแล้วจึงทำการปิดวาล์วบริเวณด้านบนของเครื่องหมักก๊าซทำให้บริเวณตัวเครื่องอยู่ในสภาวะไร้อากาศ และเมื่อจะทำการนำอาหารออกจากเครื่อง สามารถทำได้โดยเปิดวาล์วทางด้านล่างของตัวเครื่องหมักก๊าซ ทำให้อากาศไม่สามารถเข้าไปในตัวเครื่องได้

ทำการตรวจสอบสภาพความพร้อมและทำความสะอาดของเครื่องหมักแก๊สชีวภาพ โดยทำการแยกส่วนประกอบของเครื่องหมักแก๊ส โดยเครื่องหมักแก๊สมีขนาด และส่วนประกอบของดังต่อไปนี้ ประกอบด้วย ระบบถังหมักแก๊สทั้งหมด 1 ชุดสำหรับหมักขยะเศษอาหารกับจุลินทรีย์ โดยเป็นการหมักแบบไร้อากาศ โดยส่วนด้านบนของบริเวณเครื่องหมักแก๊สนั้น ได้ติดตั้งเครื่องลำเลียงเศษอาหารไว้เพื่อให้ง่ายต่อการใส่เศษอาหารลงในตัวเครื่อง



รูปที่ 3.1 รูปแสดงด้านหน้าและรูปแปลนของเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพ



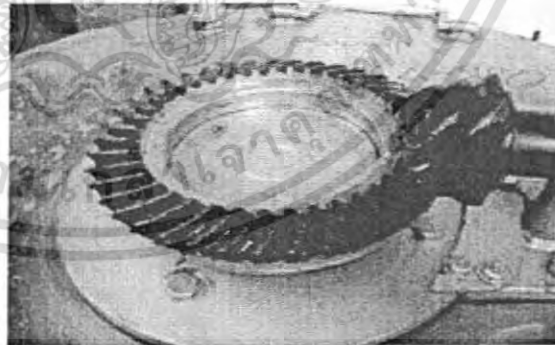
รูปที่ 3.2 รูปแสดงรายละเอียดขนาดต่างๆ ของเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพ

### 3.1.2 ชั้นส่วนและอุปกรณ์ของเครื่องผลิตแก๊ส

โดยในการออกแบบเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพนั้น ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่อง โดยบริเวณตัวเครื่องและอุปกรณ์ชั้นส่วนต่างๆ จะต้องเชื่อมติดกันแน่นสนิทแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักไม่สามารถรั่วไหลได้ อีกทั้งยังต้องมีความทนต่อการกัดกร่อนของแก๊ส  $H_2S$  ไฮโดรเจนซัลไฟด์ อีกทั้งยังสามารถซ่อมแซมหรือถอดเปลี่ยนได้โดยง่าย



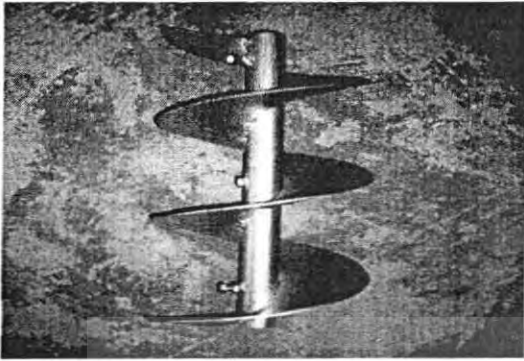
มือหมุนระบบกวน



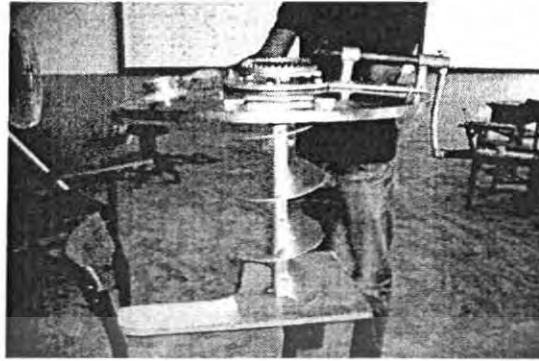
กลไกการกวน

รูปที่ 3.3 รูปอธิบายรายละเอียดส่วนประกอบต่างๆของเครื่องหมักแก๊สชีวภาพ

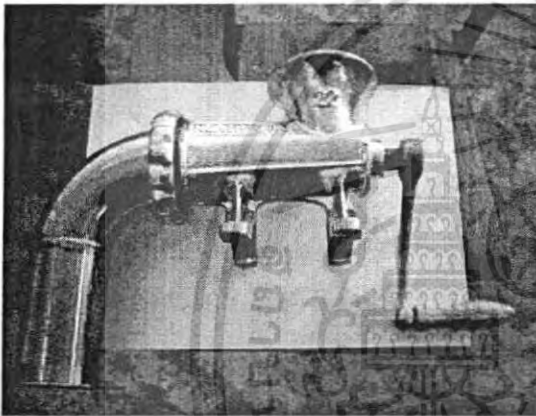
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



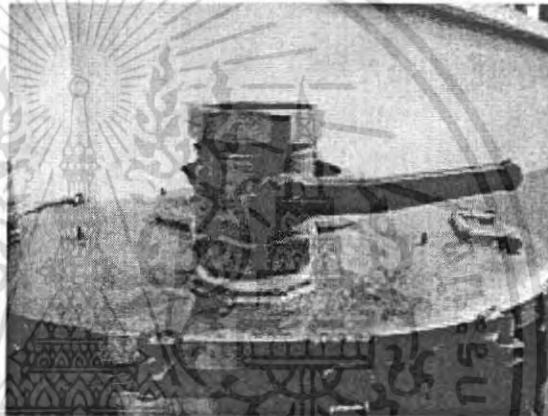
ใบพัดสำหรับบวน



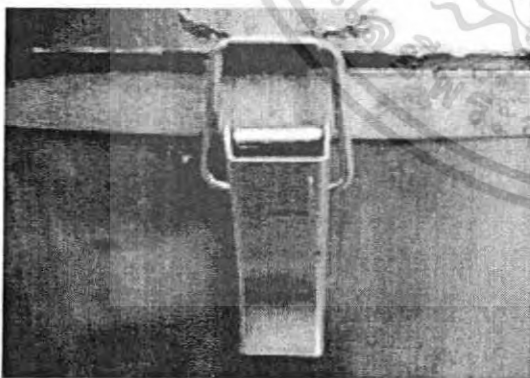
การติดตั้งระบบบวน



เครื่องลำเลียงเศษอาหาร



วาล์วปิดด้านบน



ตัวล็อกฝาเครื่อง



วาล์วปิด-เปิดถ่ายเศษอาหาร

รูปที่ 3.3 รูปอธิบายรายละเอียดส่วนประกอบต่างๆของเครื่องหมักแก๊สชีวภาพ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 ขยะเศษอาหารที่ใช้ในการหมักแก๊ส

ขยะเศษอาหารที่ใช้ในการทดลองหมักแก๊สชีวภาพในครั้งนี้ได้แก่ ขยะจากโรงอาหาร 1 ข้างอาคารเรียน A คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยนำมาทำการบดให้ละเอียด และทำการชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณที่แน่นอนก่อนทำการบรรจุลงในเครื่องหมักแก๊ส



รูปที่ 3.4 รูปแสดงภาพตำแหน่งที่ตั้งของเศษอาหารบริเวณ โรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์

### 3.1.4 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักแก๊สชีวภาพ

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้สำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ นำมาจากกากตะกอนของถังหมักแบบระบบ ไร้อากาศ ด้านหลังอาคารเรียนภาควิชาโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยนำมาทำการหาปริมาณก่อนทำการบรรจุลงในเครื่องหมักแก๊ส



รูปที่ 3.5 รูปแสดงภาพตำแหน่งที่ตั้งของเชื้อจุลินทรีย์บริเวณ โรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 การวัดปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้น

ปริมาณแก๊สที่เกิดจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศวัดได้โดยตรงจากเครื่องวัดปริมาณแก๊สที่ติดกับตัวเครื่องโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ (Fluid Displacement) โดยหน่วยเป็นลิตรต่อวัน โดยน้ำในขวดจะถูกแทนที่โดยแก๊สที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายเศษอาหาร โดยน้ำที่ใช้ในการวัดปริมาตรต้องทำการเติมกรดซัลฟูริกเจือจางเพื่อป้องกันการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำการติดตั้งเครื่องวัดปริมาตรก๊าซ โดยใช้ขวดพลาสติกขนาด 5 ลิตร โดยทำการทดสอบด้วยการอัดอากาศแล้วว่าไม่มีการรั่วซึม โดยการเก็บแก๊สใช้หลักการแทนที่ของน้ำ โดยเปรียบเทียบว่าน้ำหนักของน้ำที่เกินออกมาเท่ากับปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้น

### 3.1.6 การหาเปอร์เซ็นต์ของแก๊สที่เกิดขึ้น

สำหรับการหาเปอร์เซ็นต์ของแก๊สมีเทนและแก๊สอื่นๆ ที่เกิดจากการหมักแบบไร้อากาศ จะทำการเก็บตัวอย่างแก๊สไปวิเคราะห์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊ส (Biogas analyzer) ของ Geotechnical Instrument GA45 โดยวิธีการทำงานของเครื่องคือนำปลายท่อรับแก๊สของเครื่องวัดทำการต่อเข้ากับเครื่องหมักแก๊สชีวภาพ โดยเมื่อเปิดเครื่องเครื่องจะทำการดูดแก๊สเข้าไปและทำการประมวลผล โดยค่าที่ออกมานั้นจะแสดงปริมาณความเข้มข้นของแก๊สออกในในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์แก๊ส



รูปที่ 3.6 รูปแสดงเครื่องวัดเปอร์เซ็นต์แก๊สชีวภาพ (Biogas analyzer) ที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การแก้ไขเพิ่มเติมโดยไม่แจ้งผู้เกี่ยวข้องจะถือว่าผิดเงื่อนไขการรับประกันการดำเนินงาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

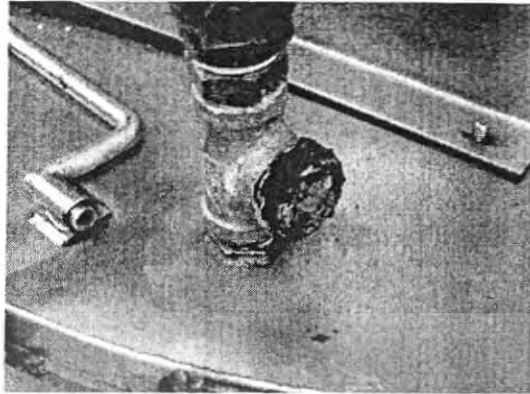
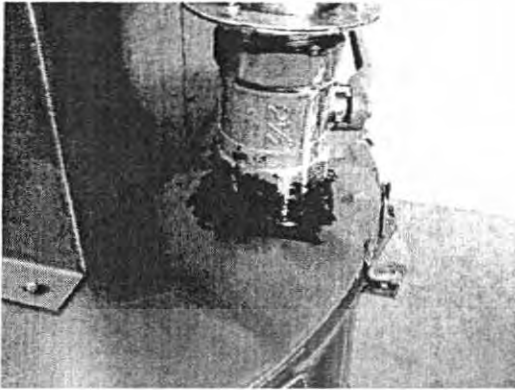
3.2.1. การติดตั้งอุปกรณ์หมักแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารโดยการติดตั้งอุปกรณ์หมักแก๊สนั้นต้องเป็นต้องติดตั้งให้มีชนิดแน่นสนิท โดยที่อากาศไม่เข้ามาผ่านเข้ามาได้ โดยเลือกสถานที่ใช้ทำการทดลองหมักแก๊ส โดยเลือกสถานที่ที่ใช้ทำการทดลองควรเป็นที่โล่งและเป็นบริเวณที่สามารถใช้ไฟฟ้าได้ เพื่อให้สะดวกต่อการทำงานและควรเป็นบริเวณที่มีน้ำและท่อระบายน้ำเพราะสามารถทำความสะอาดสถานที่ได้ง่าย โดยสถานที่เลือกทำการทดลองนั้น ได้เลือกบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ด้านหลังตึก CCA ฝั่งภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.2.2. การทดสอบเครื่องหมักแก๊สว่ามีการรั่วซึมของเครื่องหรือไม่โดยใช้น้ำเป็นการทดสอบในอันดับแรก โดยปรากฏว่าบริเวณฝาของตัวเครื่องที่เชื่อมต่อกับบริเวณตัวถังบรรจุเศษอาหารมีการรั่วของเครื่องหมัก โดยอาจเกิดจากการปิดที่ไม่สนิทกัน



รูปที่ 3.7 รูปอธิบายรายละเอียดการทำการทดสอบการรั่วซึมด้วยน้ำ

3.2.3. การซ่อมแซมเครื่องหมักแก๊ส โดยทำการเชื่อม สแตนเลสบริเวณฝาปิดของเครื่องหมักแก๊ส จากนั้นใช้ซิลิโคนแบบใส ทาเคลือบรอบบริเวณฝาปิด ส่วนบริเวณวาล์วปิดด้านบนและบริเวณข้อต่ออื่นๆของเครื่อง ได้ทำการใช้ซิลิโคนทาเคลือบไว้จากนั้นจึงนำไปทำการทดสอบด้วยการอัดลม และใช้เกจวัดความดันช่วยในการตรวจสอบ



รูปที่ 3.8 รูปแสดงเครื่องยนต์หลังทำการซ่อมแซมส่วนต่างๆของเครื่องยนต์

3.2.4. การคำนวณอัตราส่วนเศษอาหาร และจุลินทรีย์ ที่จะใช้ทำการหมักแก๊สชีวภาพ โดยใส่จุลินทรีย์ภายในเครื่องยนต์ โดยอัตราการใส่เศษอาหารต่อจุลินทรีย์ ได้ใช้อัตราส่วน เศษอาหารปริมาณ 3 ส่วน ต่อปริมาณจุลินทรีย์ 1 ส่วน โดยจะทำการใส่ในปริมาณ 60 %ของ เครื่องผลิตแก๊สมีเทน (ทฤษฎีโดย วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีแพร่)

ปริมาตรของถังหมักแก๊สมีความจุเท่ากับ	1.45 ลบ.เมตร
เศษอาหารที่บรรจุลงในเครื่องหมักแก๊สมีปริมาตรเท่ากับ	0.65 ลบ.เมตร
จุลินทรีย์ที่บรรจุลงในเครื่องหมักแก๊สมีปริมาตรเท่ากับ	0.16 ลบ.เมตร
ปริมาตรของที่ว่างของเครื่องหมักแก๊สหลังทำการบรรจุ	0.58 ลบ.เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



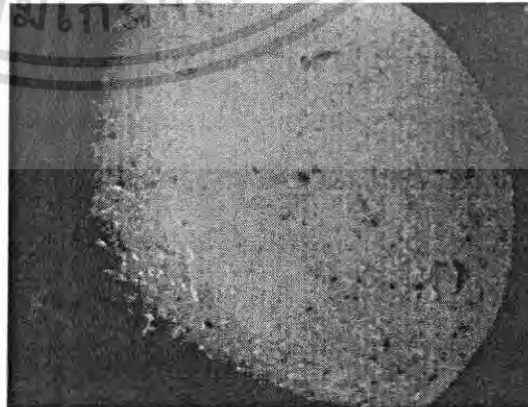
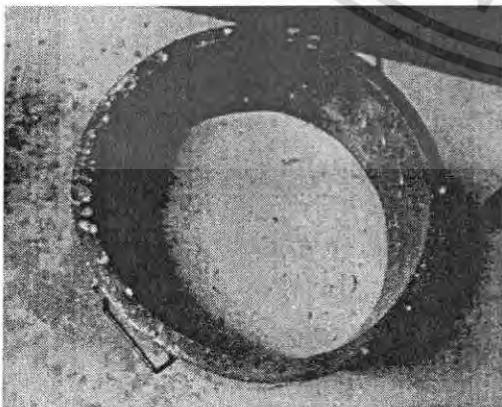
ปริมาณเศษอาหาร



ปริมาณจุลินทรีย์

รูปที่ 3.9 รูปแสดงปริมาณเศษอาหารและจุลินทรีย์ในเครื่อง

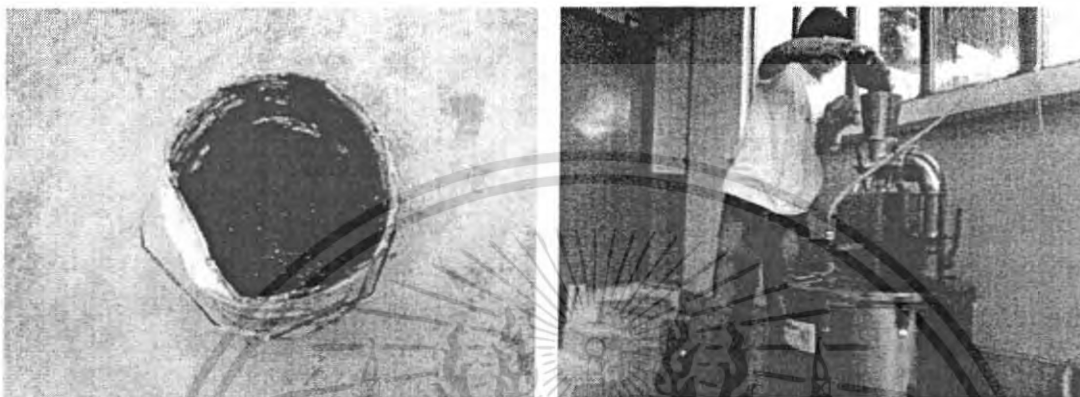
3.2.5. การเตรียมเศษอาหาร โดยทำการคัดแยกเศษขยะออกจากเศษอาหาร เมื่อได้เศษอาหารที่ผ่านการคัดแยกแล้ว จึงนำเศษอาหารมาบดให้ละเอียดเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่าย ในที่นี้ใช้เครื่องบดน้ำผลไม้เป็นเครื่องช่วยบดให้ละเอียด



รูปที่ 3.10 รูปแสดงการเตรียมเศษอาหารที่ทำการบรรจุในเครื่องหมักแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6. การเตรียมจุลินทรีย์ ที่ใช้ในการหมักแก๊ส โดยจะใช้จุลินทรีย์จากบ่อเกรอะ ก่อนทำการใส่ในเครื่องหมักแก๊สชีวภาพนั้น ได้ผสมน้ำเล็กน้อย เพื่อให้จุลินทรีย์อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว และสามารถรวมตัวเข้ากับเศษอาหารและเกิดแก๊สได้โดยง่าย



รูปที่ 3.11 รูปแสดงการจุลินทรีย์ที่ทำการบรรจุในเครื่องหมักแก๊ส

3.2.7. การหาปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของเศษอาหารนั้นทำการวัด โดยทำการติดตั้งสายยางบริเวณทางออกของแก๊ส เพื่อวัดปริมาณแก๊สตรงบริเวณปลายทางออกของแก๊ส โดยการเก็บแก๊สนั้นใช้หลักการแทนที่ของน้ำ (Fluid Displacement) โดยน้ำที่ใช้ในกระบวนการแทนที่น้ำจะทำการเติมกรดซัลฟูริกเจือจางเพื่อป้องกันการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยนำน้ำที่ถูกปริมาตรของแก๊สแทนที่นำไปทำการชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณของแก๊ส โดยใช้หน่วยเป็น ลิตร

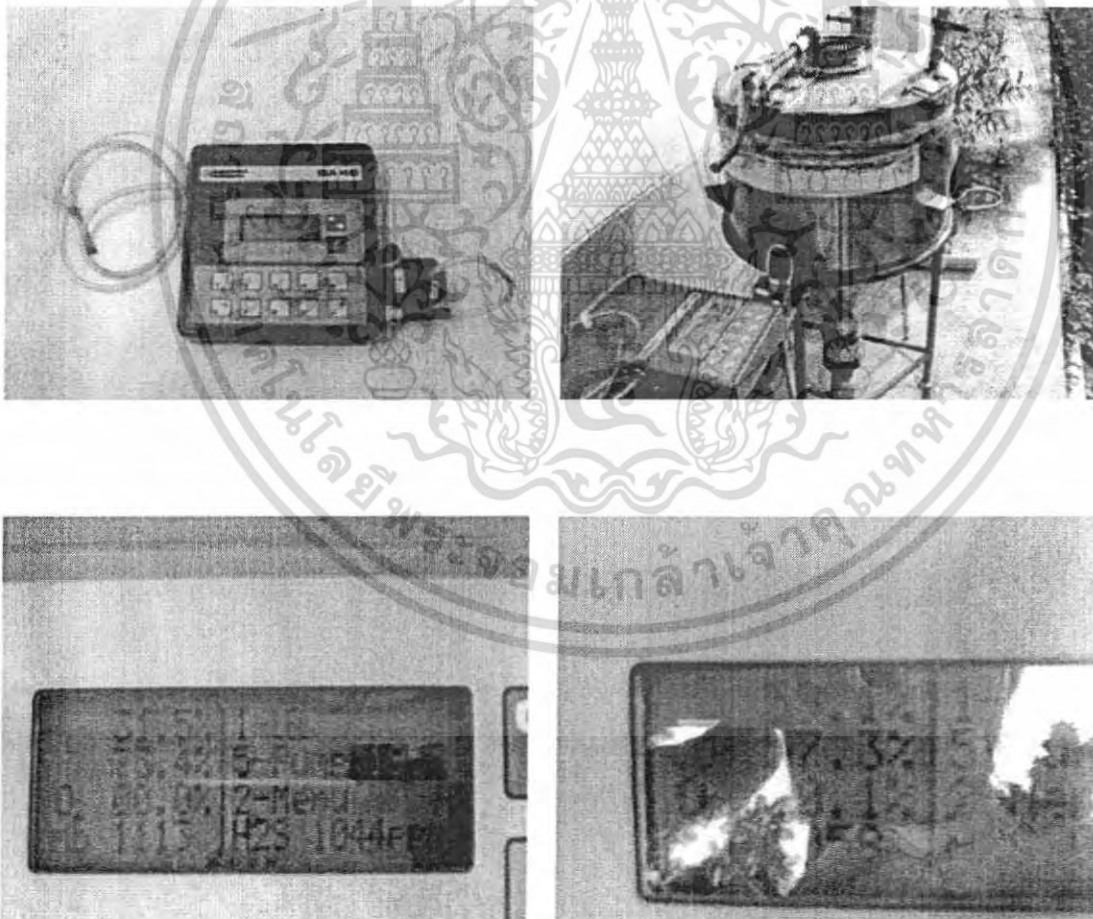


รูปที่ 3.12 รูปแสดงการวัดค่าปริมาตรแก๊ส โดยการแทนที่ของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.8. การกวนเศษอาหาร ทำการหมუნวนเศษอาหาร โดยใช้ใบพัดสำหรับกวน เพื่อให้ จุลินทรีย์และเศษอาหารรวมตัวกันได้ และสามารถย่อยอาหารได้เร็วขึ้น โดยการหมუნวน จุลินทรีย์และเศษอาหารนั้นจะทำ 2 เวลาคือ ช่วงเช้า เวลา 9.00 นาฬิกา และช่วงเย็น ประมาณ 16.00 นาฬิกา โดยการหมუნวนเศษอาหารนั้นจะใช้ใบพัดสำหรับกวนโดยจะกวน ครั้งละ 100 รอบ

3.2.9. การวัดชนิดของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น แก๊สชีวภาพที่ได้จากการหมักเศษอาหารโดยใช้ เครื่องวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สของ Geotechnical Instrument GA45 โดยวิธีการ ทำงานของเครื่องคือนำปลายท่อรับแก๊สของเครื่องวัดทำการต่อเข้ากับเครื่องหมักแก๊ส ชีวภาพ โดยเมื่อเปิดเครื่องเครื่องจะทำการดูดแก๊สเข้าไปและทำการประมวลผลโดยค่าที่ ออกมานั้นจะแสดงปริมาณความเข้มข้นของแก๊สออกในในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์แก๊ส



รูปที่ 3.13 รูปแสดงเครื่องมือวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สและการทำการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

## ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่เกิดขึ้น ทำการแบ่งผลการทดลอง ดังนี้

- ผลการทดลองหาปริมาณแก๊ส
- การทดลองหาคุณภาพของแก๊ส

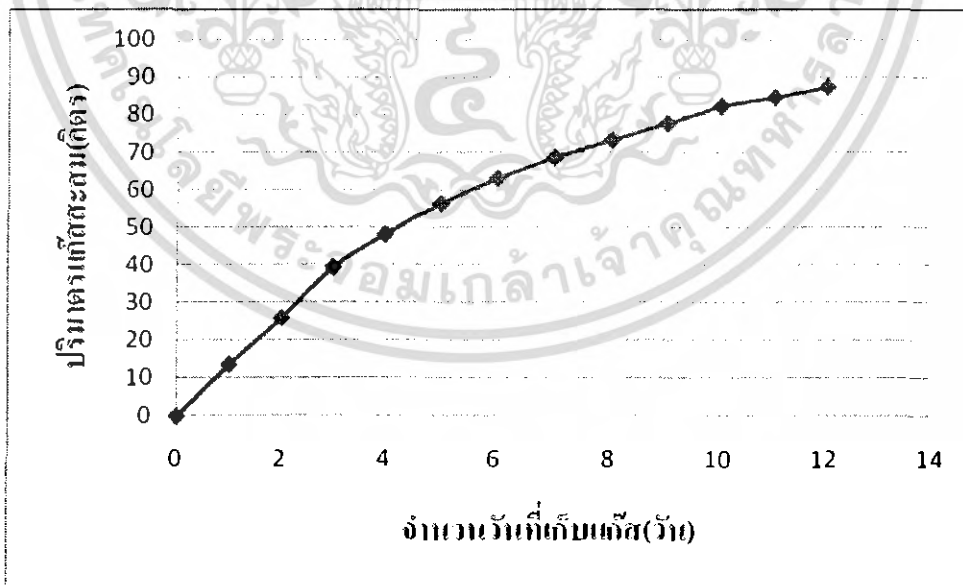
### 4.1 ผลการทดลองการหาปริมาณแก๊ส

จากการทำการหมักแก๊สชีวภาพในครั้งแรกนั้น ได้ทำการนำเศษอาหารมาบดให้ละเอียด โดยการบดครั้งนี้ได้ใช้เครื่องปั่นน้ำผลไม้ และทำการใส่ผสมกับจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ที่นำมานี้ได้นำมาจากบ่อเกรอะ โดยอัตราการใส่ส่วนผสมนั้น เป็นอัตราส่วน 3:1 โดยปริมาตร ทำการบรรจุเศษอาหารเป็นปริมาณ 3 ส่วนและจุลินทรีย์เป็นจำนวน 1 ส่วน คิดปริมาณการใส่เป็นปริมาณ 60% ของถังหมักแก๊สชีวภาพ โดยการบันทึกค่านั้นจะทำการบันทึก ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นหลังจากทำการใส่เศษอาหาร

จากการที่ได้ทำการทดลองทำการหมักเศษอาหารลงในเครื่องหมักแก๊สชีวภาพ การเก็บปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น โดยหลักการแทนที่ของน้ำ โดยเมื่อมีแก๊สเกิดขึ้นแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นจะเข้าไปแทนที่ของน้ำ ทำให้มีปริมาณของน้ำส่วนที่เกินออกมาเทียบเท่าปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้น จากนั้นนำน้ำที่ได้มาทำการชั่งน้ำหนักก็จะสามารถหาปริมาณที่เกิดขึ้นของแก๊สได้ การบันทึกผลการทดลอง ทำการบันทึกผลพร้อมทั้งทำกราฟเพื่อเปรียบเทียบปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นและทำการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าโดยเฉลี่ยของปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น

จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาณแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
0	0	0
1	13.68	13.68
2	12.34	26.02
3	13.42	39.44
4	8.73	48.17
5	8.36	56.53
6	6.73	63.26
7	5.46	68.72
8	4.65	73.37
9	4.42	77.79
10	4.64	82.43
11	2.35	84.78
12	2.68	87.46



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันที่ทำการเก็บแก๊ส และค่าปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิเคราะห์ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น

จากการทดลองครั้งแรกทำให้ได้ทราบถึงปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นหลังจากการทำกรหมักแก๊ส โดยหลังจากการเริ่มทำการหมักแก๊สชีวภาพ ปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นในช่วงแรกโดยเริ่มทำการวัด ปริมาณของแก๊สจะเกิดขึ้นมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นก็จะลดน้อยลงเรื่อยๆ

จากปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นนั้น จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟมีความชันมากในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 6 ซึ่งแตกต่างจากช่วงหลังวันที่ 6 โดยกราฟในส่วนของวันที่ 7 - 12 นั้นมีความชันน้อยลงมากแสดงให้เห็นว่าปริมาณของแก๊สมีการลดลง แต่เนื่องจากปริมาณของเศษอาหาร นั้นสามารถหาง่ายและมีปริมาณเพียงพอกับความต้องการที่จะใช้ทำการหมักแก๊ส ดังนั้นถ้าหากต้องการปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูง ควรทำการนำเศษอาหารเก่าออก และบรรจุเศษอาหารใหม่เข้าไป ทุกๆ 6 วัน

### 4.2 ผลการทดลองหาคุณภาพของแก๊ส

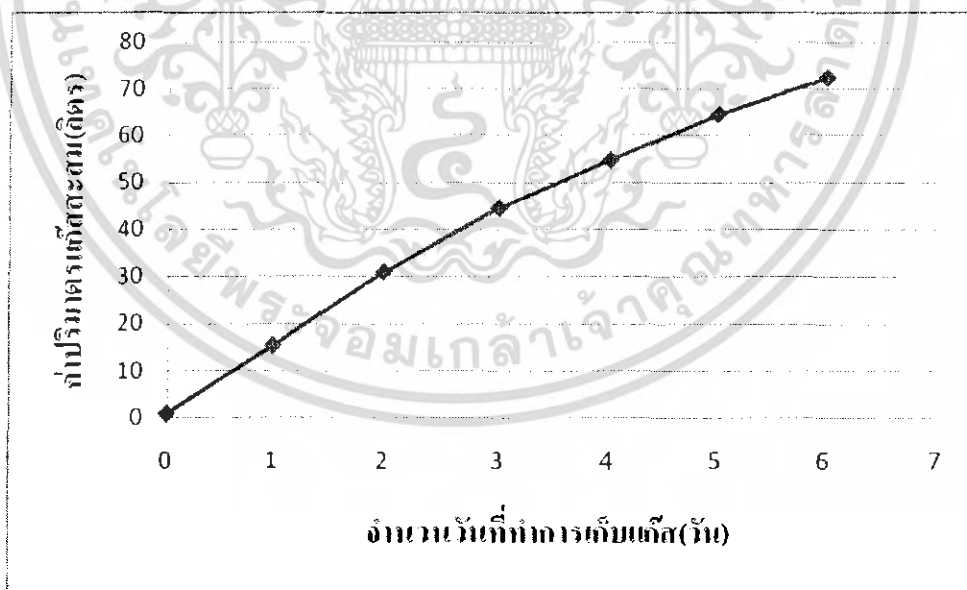
การทำกรทดลองครั้งที่สองนี้เป็นการทำการทดลองทดลองซ้ำอีกครั้งโดยใช้อุปกรณ์ เศษอาหารและจุลินทรีย์เห็นในการทดลองครั้งแรก แต่การเก็บค่าของแก๊สได้แตกต่างออกไปโดยการทำกรทดลองครั้งที่สองนี้ ได้ทำการเก็บค่าโดยใช้ระยะเวลา 6 วัน โดยจะทำการบันทึกค่าปริมาณของแก๊สและชนิดของแก๊สที่เกิดขึ้น โดยชนิดของแก๊สที่ทำการเก็บค่าได้แก่ แก๊สมีเทน (Methane), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ), และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์ข้อมูล โดยการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ

- ช่วงแรก ทำกรวัดปริมาณของแก๊สและชนิดของแก๊สที่เกิดขึ้นทันทีหลังจากทำการบรรจุเศษอาหารและจุลินทรีย์เสร็จ
- ช่วงที่สอง โดยทำการวัดปริมาณของแก๊สและชนิดของแก๊สที่เกิดขึ้นโดยให้เวลาจุลินทรีย์ในการเติบโตเป็นเวลา 1 เดือน หลังจากทำการใส่เศษอาหาร จากนั้นทำการวัดปริมาณของแก๊สและความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดขึ้น

#### 4.2.1 ผลการทดลองก่อนปรับสภาพจุลินทรีย์

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าปริมาณแก๊สโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นก่อนปรับสภาพจุลินทรีย์

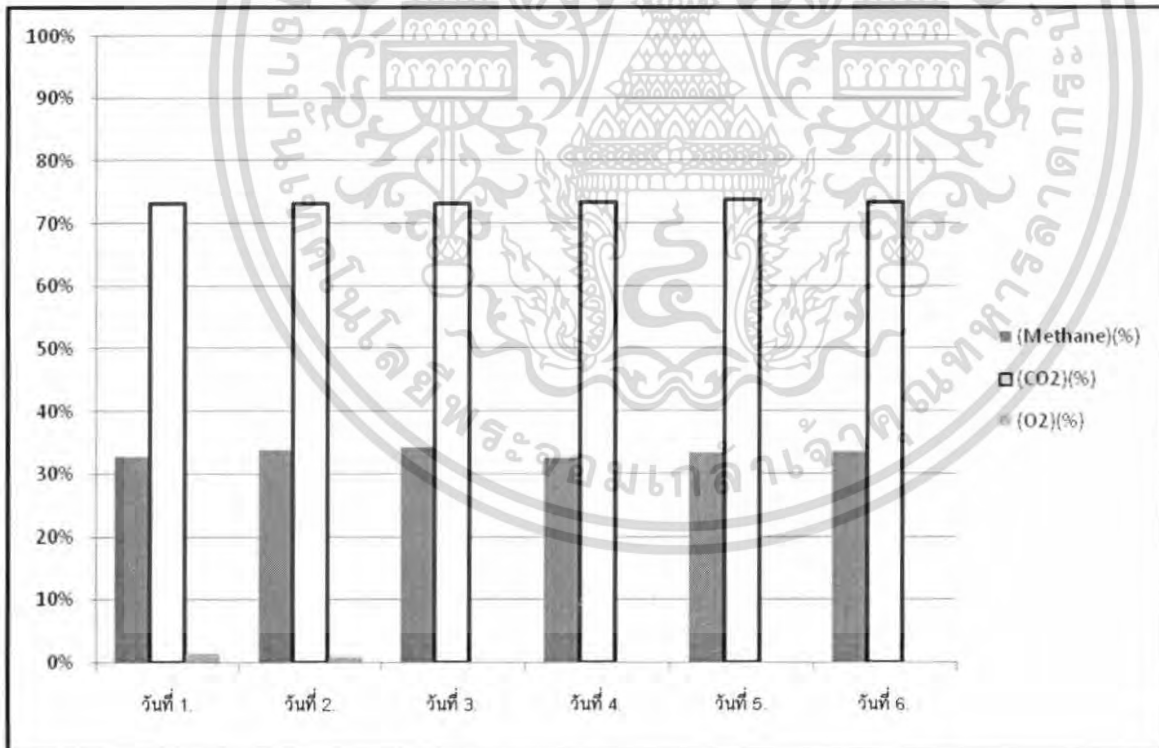
จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาณแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
0	0.00	0.00
1	14.43	14.43
2	15.64	30.07
3	13.55	43.63
4	10.09	53.71
5	9.74	63.45
6	7.91	71.36



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันที่ทำการเก็บแก๊ส และค่าปริมาณแก๊ส ก่อนปรับสภาพจุลินทรีย์

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคุณภาพแก๊สโดยเฉลี่ยก่อนปรับสภาพจุลินทรีย์

วันที่เริ่มวัดคุณภาพแก๊ส	แก๊สมีเทน	คาร์บอนไดออกไซด์	ออกซิเจน	H <sub>2</sub> S(ppm)
วันที่ 1.	32.78%	73.10%	1.50%	619
วันที่ 2.	33.84%	73.14%	0.80%	942
วันที่ 3.	34.26%	73.24%	0.10%	940
วันที่ 4.	32.55%	73.42%	0.01%	938
วันที่ 5.	33.28%	73.73%	0.01%	940
วันที่ 6.	33.62%	73.34%	0.01%	942



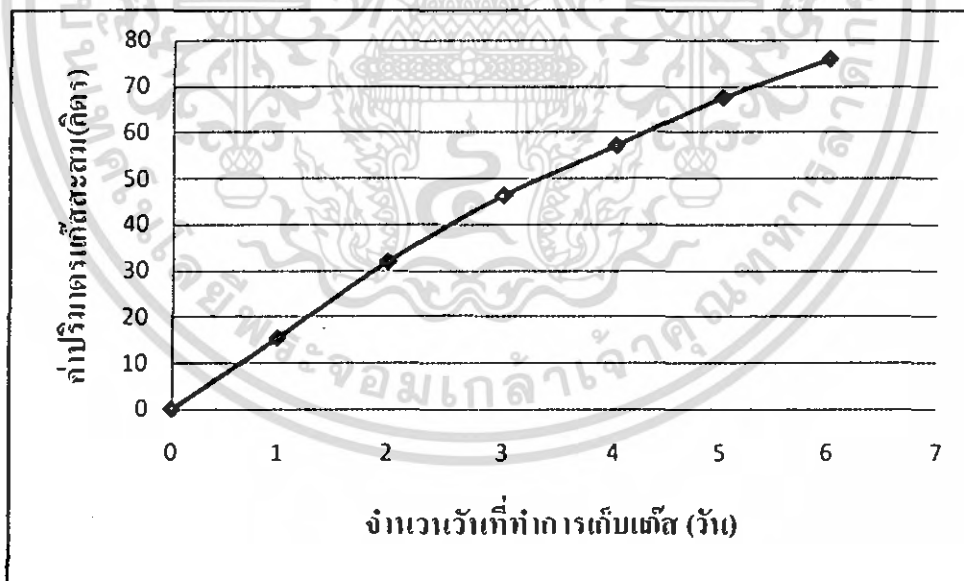
รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงคุณภาพแก๊สก่อนปรับสภาพจุลินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการทดลองหลังปรับสภาพจุลินทรีย์

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าปริมาณแก๊สโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นหลังปรับสภาพจุลินทรีย์

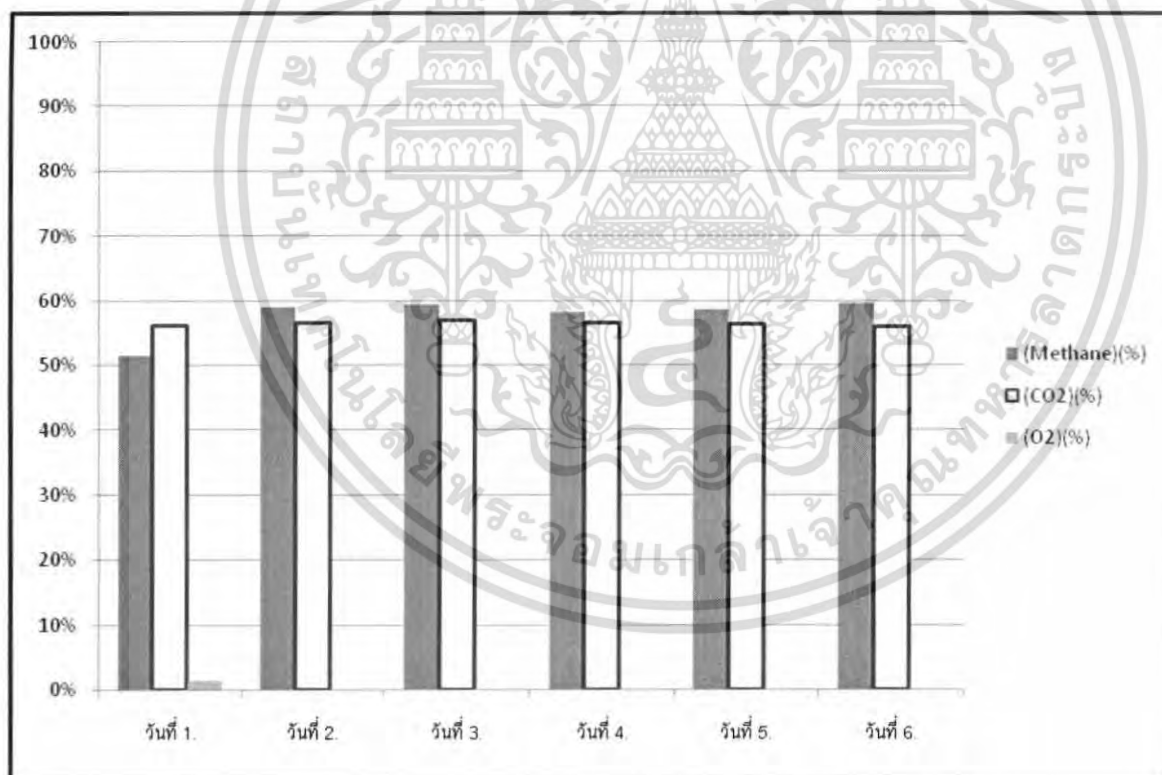
จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาณแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
0	0	0
1	15.35	15.35
2	16.64	31.99
3	14.42	46.41
4	10.73	57.14
5	10.36	67.5
6	8.42	75.92



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันที่ทำการเก็บแก๊ส และค่าปริมาณแก๊ส หลังจากปรับสภาพจุลินทรีย์

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าคุณภาพแก๊สโดยเฉลี่ยหลังปรับสภาพจุลินทรีย์

วันที่เริ่มวัดคุณภาพแก๊ส	แก๊สมีเทน	คาร์บอนไดออกไซด์	ออกซิเจน	H <sub>2</sub> S(ppm)
วันที่ 1.	51.45%	56.16%	1.50%	58
วันที่ 2.	58.99%	56.51%	0.12%	35
วันที่ 3.	59.39%	57.02%	0.01%	35
วันที่ 4.	58.18%	56.51%	0.01%	12
วันที่ 5.	58.69%	56.31%	0.01%	00
วันที่ 6.	59.69%	55.91%	0.01%	00



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงคุณภาพแก๊สหลังปรับสภาพจุลินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิเคราะห์คุณภาพแก๊สที่เกิดขึ้นหลังปรับสภาพจุลินทรีย์

โดยการบันทึกผลการทดลองครั้งที่สองนี้ เป็นผลการทดลองที่ได้จากการวัดปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นและชนิดของแก๊ส โดยทำการวัดค่าเป็นสองช่วง โดยช่วงแรกคือทำการวัดค่าหลังจากการบรรจุเศษอาหารทันที และเก็บค่าช่วงที่สองคือโดยปล่อยให้จุลินทรีย์เติบโตไปแล้วเป็นระยะเวลา 30 วัน และได้ทำการนำเศษอาหารเก่าออก และบรรจุเศษอาหารใหม่เข้าไป เป็นปริมาณหนึ่งในสามของปริมาณเศษอาหารเก่า จากการทำการวัดค่าปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้น โดยปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นยังคงเป็นไปตามแนวโน้มของผลการทดลองครั้งแรก โดยมีค่าปริมาณแก๊สสะสม 6 วันอยู่ที่ 71 – 76 ลิตร

การเปรียบเทียบชนิดของแก๊สที่เกิดขึ้นในสองช่วงที่ได้ทำการวัดค่า โดยค่าหลักที่ทำการวิเคราะห์ครั้งนี้ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของแก๊สมีเทน(Methane) และไฮโดรเจนซัลไฟด์( $H_2S$ ) โดยผลที่การทดลองครั้งแรกนั้นมีค่าปริมาณของแก๊สมีเทน (Methane) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 31 – 35 % และค่าไฮโดรเจนซัลไฟด์( $H_2S$ ) อยู่ที่ประมาณ 600 – 1000 ppm และผลการทดลองครั้งที่สองปรากฏว่าปริมาณของแก๊สมีเทน (Methane) เพิ่มขึ้นเป็น 51 – 60 % และปริมาณ  $H_2S$  ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ลดลงเหลือ 60 ppm จนกระทั่งไม่สามารถทำการวัดค่าได้ ทำให้เห็นว่าเมื่อแบคทีเรียสามารถปรับสภาพและโตเต็มที่แล้ว แบคทีเรียจะสามารถย่อยสลายเศษอาหารและสามารถเปลี่ยนสภาพของเสียนั้นให้กลายเป็นแก๊สมีเทนได้ และสามารถลดปริมาณของแก๊สพิษที่เกิดขึ้นจากเศษอาหาร ได้อีกทางหนึ่ง

# บทที่ 5

## สรุปผลการทดลอง

### 5.1 สรุปการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร

จากการทำการทดลองการหมักแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารนั้นเพื่อที่จะทำการศึกษาระบบการย่อยสลายของเศษอาหารโดยการใช้จุลินทรีย์ และกระบวนการเกิดแก๊สชีวภาพ รวมทั้งวิเคราะห์ปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้น ว่ามีลักษณะอย่างไร สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน ได้หรือไม่ และมีข้อดีข้อเสียอย่างไร จึงได้ทำการศึกษาหลักการทำงานของเครื่องหมักแก๊สชีวภาพรวมทั้งข้อมูลทางด้านทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดแก๊สแล้ว เพื่อให้การทดลองมีความถูกต้องแม่นยำและสามารถนำข้อมูลที่ได้ออกจากการทดลองไปใช้ในชีวิตประจำวัน หรือนำไปทำการศึกษาวิจัยต่อไปได้

หลังจากได้ทำการศึกษาหลักการทำงานของเครื่องหมักแก๊สชีวภาพ และศึกษาทฤษฎีในระบบกระบวนการย่อยสลายของเศษอาหาร โดยจุลินทรีย์แล้ว จึงได้ทำการนำเครื่องหมักแก๊สชีวภาพมาทำการหมักแก๊สให้เกิดขึ้นเพื่อดูว่าการเกิดของแก๊สนั้นได้เป็นไปตามทฤษฎีอย่างไร โดยก่อนทำการทดลองนั้นได้ทำการตรวจสอบสภาพของเครื่องหมักแก๊ส รวมทั้งทำการตรวจสอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดว่าอุปกรณ์ทั้งหมดนั้นอยู่ในสภาพที่ดีพร้อมที่จะทำการทดลองได้ จึงได้เริ่มลงมือทำการทดลอง โดยการทำการทดลองครั้งนี้ได้นำเศษอาหารจากโรงอาหารและจุลินทรีย์ มาทำการทดสอบการหมักเพื่อให้เกิดแก๊สชีวภาพและนำค่าที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ และเก็บข้อมูลไว้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

โดยการทำการทดลองการหมักแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารนั้นเพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจึงได้ ทำการแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกหลังจากทำการประกอบเครื่องวัดแก๊สจากนั้นใส่เศษอาหาร และจุลินทรีย์ครั้งแรกลงในเครื่องหมักแก๊สชีวภาพพร้อมทั้งการปรับสภาพและเริ่มทำการทดลอง จากนั้นทำการวัดค่าที่เกิดขึ้นจึงเริ่มบันทึกค่าผลการทดลองที่ได้ และช่วงที่ 2 คือหลังจากที่ได้ทำการบรรจุเศษอาหารและทำการปล่อยให้จุลินทรีย์ได้ทำการปรับตัวให้เข้ากับเศษอาหารเป็นเวลาทั้งสิ้น 1 เดือนจากนั้นจึงทำการทดลองใหม่อีกครั้งหนึ่งจากนั้นจึงทำการวัดค่าและบันทึกผลการทดลอง

## 5.2 สรุปการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารในการหมักแก๊สครั้งแรก

จากการทำการหมักแก๊สชีวภาพในครั้งแรกนั้น ได้ทำการนำเศษอาหารมาบดให้ละเอียดโดยการบดครั้งนี้ได้ใช้เครื่องปั่นน้ำผลไม้ และทำการใส่ผสมกับจุลินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่นำมาใช้นี้ได้นำมาจากบ่อเกรอะ โดยอัตราการใส่ส่วนผสมนั้น เป็นอัตราส่วน 3:1 โดยทำการบรรจุเศษอาหารเป็นปริมาณ 3 ส่วน และจุลินทรีย์เป็นจำนวน 1 ส่วน คิดปริมาณการใส่เป็นปริมาณ 60% ของถังหมักแก๊สชีวภาพ โดยจุลินทรีย์ที่มาจากบ่อเกรอะนั้น เมื่อนำมาทำการย่อยสลายเศษอาหาร จุลินทรีย์จะย่อยสลายเศษอาหารได้น้อยเนื่องจาก จุลินทรีย์ยังไม่สามารถปรับตัวเข้ากับเศษอาหารได้ ทำให้ค่าปริมาณของแก๊สมีเทน (Methane) มีค่าต่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 31 – 35 % และปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าประมาณ 13 – 14 ลิตรต่อวัน เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด ได้ทำการสร้างกรด (Acidogenesis), และให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา

ปริมาณของแก๊สที่ขึ้นในช่วงการหมักหมักครั้งแรก เกิดจากการหมักขยะเศษอาหารออกมาเฉลี่ยในช่วง 1 – 2 วันแรกมีปริมาณรวมกันเท่ากับ 26.02 ลิตร ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในช่วงวันที่ 3 – 4 มีปริมาณแก๊สรวมกันเท่ากับ 22.15 ลิตร ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในช่วงวันที่ 5 – 6 มีปริมาณแก๊สรวมกันเท่ากับ 15.09 ลิตร และปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในช่วงวันที่ 7 – 8 มีปริมาณแก๊สรวมกันเท่ากับ 10.11 ลิตร จะเห็นได้ว่าปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในวันที่ 7 - 8 มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้นในช่วงแรก อีกทั้งการหาเศษอาหารเพื่อที่จะนำมาทำการหมักสามารถทำได้โดยง่าย ดังนั้นการทำการบรรจุเศษอาหารใหม่และทำการนำเศษอาหารเก่าออกนั้น ควรกระทำทุกๆ 6 - 7 วันจะทำให้มีปริมาณการเกิดของแก๊สมากที่สุด และเป็นสามารถนำเศษอาหารที่ผ่านการหมักมาใช้เป็นปุ๋ยแก่พืชได้อีกทาง

## 5.3 สรุปการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารในการหมักแก๊สครั้งที่สอง

จากการทำการหมักแก๊สครั้งแรก โดยใช้จุลินทรีย์และเศษอาหาร โดยจุลินทรีย์ที่ได้ทำมาทำการหมักครั้งแรกนั้น ได้นำมาจากบ่อเกรอะ การที่จุลินทรีย์จะสามารถย่อยสลายเศษอาหารได้นั้นจำเป็นที่จะต้องให้จุลินทรีย์ทำการปรับสภาพ โดยจุลินทรีย์จะสามารถปรับสภาพเองได้แต่จำเป็นที่จะต้องใช้เวลาและการดูแลที่เหมาะสม โดยในการทดลองครั้งที่สองนี้ได้ให้จุลินทรีย์ทำการปรับสภาพโดยวิธีการทางธรรมชาติเป็นเวลา 1 เดือนจากนั้นจึงทำการทดลองซ้ำอีกครั้งหนึ่ง จึงทำการเก็บค่าปริมาณแก๊สและวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

โดยจากการทำการทดลองหมักแก๊สในครั้งแรก ทำให้ทราบว่าปริมาณการเกิดของแก๊สในช่วงเวลา 6 – 7 วันนั้นมีปริมาณสูงและเป็นปริมาณที่เพียงพอต่อการทำการวัดปริมาณ ดังนั้นการทำการทดลองครั้งที่สองนั้นจึงได้เก็บค่าปริมาณของแก๊สเป็นเวลาทั้งหมดเป็นเวลา 6 วัน โดยการทดลองครั้งนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ได้ทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณของแก๊สมีเทน (Methane) และ  $H_2S$  ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นหลัก โดยจากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสองนั้นแก๊สมีเทน (Methane) มีค่าปริมาณสัดส่วนแก๊สที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน 20 – 25 % และค่า  $H_2S$  ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในการทำการทดลองหมักครั้งที่สองนั้นมีค่าน้อยมาก

#### 5.4 สรุปผลการทดลองจากการทำการทดลองทั้งหมด

ปัจจุบันนี้การใช้แก๊สชีวภาพในประเทศไทยมีการขยายตัวสูงขึ้น ทำให้สามารถลดปัญหามลพิษที่มีผลต่อสภาพแวดล้อมได้ ซึ่งทำให้ของเสียเช่น เศษอาหารนั้นสามารถหาวิธีกำจัดได้อย่างถูกต้องเหมาะสมทำให้สามารถลดมลภาวะ และสามารถแก้ไขปัญหาด้านกลิ่น และพลังงานทดแทนได้เป็นอย่างดี นอกเหนือจากรักษาสภาพแวดล้อมแล้วยังได้ก๊าซชีวภาพมาเป็นแหล่งพลังงานในการหุงต้ม และให้แสงสว่างในครัวเรือนซึ่งจะช่วยให้ประหยัดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิง กากจากการหมักแก๊สชีวภาพนั้นยังสามารถนำมาทำปุ๋ยอินทรีย์ที่สามารถนำมาใช้ปรับปรุงดินเพิ่มผลผลิตพืชได้อีกด้วย หรือนำมาใช้ร่วมกับปุ๋ยเคมีเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพใช้ปุ๋ยเคมีให้เป็นประโยชน์กับพืชมากขึ้น

จากการทำการทดลองครั้งนี้ได้แสดงให้เห็นถึงวิธีการทำการหมักแก๊สชีวภาพโดยที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับชีวิตประจำวันได้ และได้ทำการบันทึกผลการทดลองไว้ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของแก๊สชีวภาพ โดยแสดงให้เห็นว่าการนำเศษอาหารเหลือใช้มาทำการผลิตแก๊สชีวภาพนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น นำแก๊สที่ได้นั้นนำมาทำการหุงต้มอาหารหรือนำมาหมุนเวียนกลับมาใช้ในครัวเรือน โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายในเรื่องของราคาแก๊สหุงต้มที่ราคาแพงขึ้น อีกทั้งยังสามารถช่วยชาติลดค่าใช้จ่ายที่ต้องนำมากำจัดของเสียเหล่านั้นอีกทางหนึ่ง

# บรรณานุกรม

## ภาษาไทย

1. ดร. มั่นสิน คັນทุลเวศม์ ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2546), คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่มที่ 1, 2. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
2. ดร. มั่นสิน คັນทุลเวศม์ (2542), เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1, 2. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. กรมส่งเสริมพลังงาน (2544), โครงการการจัดทำแนวทางการออกแบบวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงาน โดยระบบไม่ใช้ออกซิเจน. สำนักงานศึกษาค้นคว้าและพัฒนาพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
4. บุญมา ป่านประดิษฐ์ (2550), ถังหมักหมักสจรรย์เปลี่ยนขยะเป็นก๊าซชีวภาพ : คู่มือพึ่งตนเอง (BIOGAS)  
สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. ดร.สาโรจน์ ศิริสันสนียกุล และ ประวิทย์ วงศ์คงคาเทพ. (2538). วิศวกรรมเคมีชีวภาพพื้นฐาน 1. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. ปฏิกรณ์ แสนสิ่ง (2550), BIOGAS Energy from Biological Conversion of Organic Waste  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
7. โสภกา ชินเวชกิจวานิชย์ และ มั่นสิน คันทุลเวศม์ (2543) "ความสำคัญของสภาพด่างในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ" การประชุมวิชาการประจำปีระดับชาติ ครั้งที่ 13 สวสท. '43
8. อนุตร เปียงแก้ว "การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟตและชนิดของแหล่งคาร์บอน" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542.
9. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2545) "โครงการจัดทำแนวทางการออกแบบวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงานโดยระบบไม่ใช้ออกซิเจน", รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2
10. สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2540) "รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม"

## ภาษาต่างประเทศ

1. Cheynoweth, D.P. and Isaacson, R (1987), Editors "Anaerobic Digestion of Biomass", Elsevier Applied Science, London and New York.
2. Grady, C.P.L. Jr. and Lim, H.C (1980) "Biological Wastewater Treatment : " Theory and Applications" Marcel Dekker, Inc., New York and Basel
3. Grady, C.P.L. Jr., Daigger, G.T and Lim, H.C (1999) "Biological Wastewater Treatment: "Second Edition, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel
4. Rittmann, B.E and McCarty, P.L (2001) "Environmental Biotechnology: Principles and Applications" McGraw-Hill International Editions
5. Speece, R.E (1996) "Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters", Archae Press, Nashville, Tennessee
6. Visser A. (1994.) Anaerobic Treatment of Sulfate Containing Wastewaters. International Training Course on Anaerobic and Low Cost Treatment of Wastewater and Wastes. 10 to 21 October, 1994, Asian Institute of Technology. Thailand
7. Wheatley, A.D (1997) "Applications of Anaerobic Digestion for the Treatment of Industrial Wastewaters in Europe" Water and Environmental Management, 11, 39-46
8. Waste Solutions Ltd. (2001). Prospects for Biogas Harvesting at Sangan Wong Industries Co. Ltd (Thailand) [On-line]. Available: [http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/FS\\_211159673](http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/FS_211159673)
9. Barton, L.L, Editor (1995) "Sulfate Reducing Bacteria", Plenum Press, New York, London
10. Gerardi, M. H. (2003). The microbiology of anaerobic digesters. New Jersey: John Wiley & Son.
11. Kleerebezem, R. and Macaric, H. (2003). Treating industrial wastewater: Anaerobic digestion comes of age. AIChemJ. april: 56-64.
12. Reynolds, T. D. and Richards, P. A. (1996). Unit operations and processes in environmental engineering. Boston: PWS.
13. Plevin, R. and Donnelly, D. (2004). Converting waste to energy and profit: Tapioca starch power in Thailand [On-line]. Available: [http://palangthai.org/en/docs/KWTE\\_REW.pdf](http://palangthai.org/en/docs/KWTE_REW.pdf)
14. Wellinger, A. and Lindberg, A. (2005). Upgrading and utilization of biogas [On-line]. Available: <http://www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/Dokumente/Biogas%20upgrading.pdf>

15. Annachhatre, A. P. and Amatya, P. L. (2000). UASB Treatment of Tapioca Starch Wastewater. *J. Envir. Engrg.* 126 (12): 1149-1152.
16. Spiro, T. G. and Stigliani, W. M. (2003). *Chemistry of the environment.* (2nd ed.). New Jersey: Prentice Hall.
17. Harada H., Uemura S. and Komonoi K. Interaction Between Sulfate Reducing Bacteria and Methane Producing Bacteria in UASB Reactors Fed with Low Strength Wastes Containing Different Levels Of Sulfate. *Water Research.* Vol. 28, No. 2, 1994: 355-367.
18. Henzen, M and Harremoes, P 1983 "Anaerobic Treatment of Wastewater in Fixed Film Reactors- a Literature Review" *Water Science and Technology*, 15, 1
19. Hughes, D.E et al. Editors (1981) "Anaerobic Digestion 1981", Proceedings of the 2nd. International Symposium on Anaerobic Digestion, Travemunde, Federal Republic of Germany, 6-11 Sept. 1981 Elsevier Biomedical Press, Amsterdam, New York-Oxford
20. Lawrence, A.W (1971) "Application of Process Kinetics to Design of Anaerobic Processes " in *Anaerobic Biological Treatment Processes*, American Chemical Society Advanced in Chemical series 105: 163-189
21. Lawrence, A.W and McCarty, P.L (1969) "Kinetics of Methane Fermentation in Anaerobic Treatment" *J.WPCF*, 41(2) , R1-R17

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร



## ข้อมูลปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น 2 – 14 พฤศจิกายน 2550

วันที่ทำการวัดแก๊ส	จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาณแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
2 พฤศจิกายน 2550	0	0.00	0.00
3 พฤศจิกายน 2550	1	14.64	14.64
4 พฤศจิกายน 2550	2	13.20	27.84
5 พฤศจิกายน 2550	3	14.36	42.20
6 พฤศจิกายน 2550	4	9.34	51.54
7 พฤศจิกายน 2550	5	8.30	59.84
8 พฤศจิกายน 2550	6	6.68	66.53
9 พฤศจิกายน 2550	7	5.42	71.95
10 พฤศจิกายน 2550	8	4.62	76.57
11 พฤศจิกายน 2550	9	4.39	80.95
12 พฤศจิกายน 2550	10	4.73	85.69
13 พฤศจิกายน 2550	11	2.40	88.08
14 พฤศจิกายน 2550	12	2.73	90.82

## ข้อมูลปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น 16 - 28 พฤศจิกายน 2550

วันที่ทำการวัดแก๊ส	จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาณแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
16 พฤศจิกายน 2550	0	0.00	0.00
17 พฤศจิกายน 2550	1	14.36	14.36
18 พฤศจิกายน 2550	2	13.32	27.68
19 พฤศจิกายน 2550	3	13.41	41.09
20 พฤศจิกายน 2550	4	11.84	52.93
21 พฤศจิกายน 2550	5	9.45	62.38
22 พฤศจิกายน 2550	6	6.42	68.80
23 พฤศจิกายน 2550	7	5.31	74.11
24 พฤศจิกายน 2550	8	4.73	78.84
25 พฤศจิกายน 2550	9	4.31	83.15
26 พฤศจิกายน 2550	10	2.91	86.06
27 พฤศจิกายน 2550	11	1.35	88.41
28 พฤศจิกายน 2550	12	1.15	88.56

## ภาคผนวก ข

### วิเคราะห์คุณสมบัติแก๊ส



## ข้อมูลปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองวัดปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้น 16 – 22 เมษายน 2551

วันที่ทำการวัดแก๊ส	จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาตรแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
16 เมษายน 2551	0	0.00	0.00
17 เมษายน 2551	1	14.43	14.43
18 เมษายน 2551	2	15.64	30.07
19 เมษายน 2551	3	13.55	43.63
20 เมษายน 2551	4	10.09	53.71
21 เมษายน 2551	5	9.74	63.45
22 เมษายน 2551	6	7.91	71.36

## ข้อมูลคุณภาพแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดขึ้น 16 – 22 เมษายน 2551

วันที่วัดคุณภาพแก๊ส	แก๊สมีเทน	คาร์บอนไดออกไซด์	ออกซิเจน	H <sub>2</sub> S(ppm)
17 เมษายน 2551	32.78%	73.10%	1.50%	619
18 เมษายน 2551	33.84%	73.14%	0.80%	942
19 เมษายน 2551	34.26%	73.24%	0.10%	940
20 เมษายน 2551	32.55%	73.42%	0.01%	938
21 เมษายน 2551	33.28%	73.73%	0.01%	940
22 เมษายน 2551	33.62%	73.34%	0.01%	942

## ข้อมูลปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองวัดปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้น 16 – 22 พฤษภาคม 2551

วันที่ทำการวัดแก๊ส	จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาตรแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
16 พฤษภาคม 2550	0	0	0
17 พฤษภาคม 2550	1	15.35	15.35
18 พฤษภาคม 2550	2	16.64	31.99
19 พฤษภาคม 2550	3	14.42	46.41
20 พฤษภาคม 2550	4	10.73	57.14
21 พฤษภาคม 2550	5	10.36	67.5
22 พฤษภาคม 2550	6	8.42	75.92

## ข้อมูลคุณภาพแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดขึ้น 17 – 22 พฤษภาคม 2551

วันที่วัดคุณภาพแก๊ส	แก๊สมีเทน	คาร์บอนไดออกไซด์	ออกซิเจน	H <sub>2</sub> S(ppm)
17 พฤษภาคม 2550	51.45%	46.16%	1.50%	58
18 พฤษภาคม 2550	58.99%	56.51%	0.80%	35
19 พฤษภาคม 2550	59.39%	57.02%	0.10%	35
20 พฤษภาคม 2550	58.18%	56.51%	0.01%	12
21 พฤษภาคม 2550	58.69%	56.31%	0.01%	00
22 พฤษภาคม 2550	59.69%	55.91%	0.01%	00

## ข้อมูลปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น 3 – 9 มิถุนายน 2551

วันที่ทำการวัดแก๊ส	จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาณแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
3 มิถุนายน 2551	0	0.00	0.00
4 มิถุนายน 2551	1	15.75	15.75
5 มิถุนายน 2551	2	16.67	32.42
6 มิถุนายน 2551	3	14.65	47.07
7 มิถุนายน 2551	4	11.06	58.12
8 มิถุนายน 2551	5	10.29	68.41
9 มิถุนายน 2551	6	9.64	78.05

## ข้อมูลคุณภาพแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดขึ้น 4 – 9 มิถุนายน 2551

วันที่วัดคุณภาพแก๊ส	แก๊สมีเทน	คาร์บอนไดออกไซด์	ออกซิเจน	H <sub>2</sub> S(ppm)
4 มิถุนายน 2551	33.11%	73.89%	0.90%	600
5 มิถุนายน 2551	34.18%	72.82%	0.75%	914
6 มิถุนายน 2551	34.60%	72.40%	0.10%	912
7 มิถุนายน 2551	32.88%	74.12%	0.01%	910
8 มิถุนายน 2551	33.61%	73.39%	0.01%	912
9 มิถุนายน 2551	33.96%	73.04%	0.01%	914

## ข้อมูลปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น 3 – 9 กรกฎาคม 2551

วันที่ทำการวัดแก๊ส	จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาณแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
3 กรกฎาคม 2551	0	0	0
4 กรกฎาคม 2551	1	13.32	13.32
5 กรกฎาคม 2551	2	14.27	27.59
6 กรกฎาคม 2551	3	13.38	40.97
7 กรกฎาคม 2551	4	10.83	51.8
8 กรกฎาคม 2551	5	9.43	61.23
9 กรกฎาคม 2551	6	8.92	70.15

## ข้อมูลคุณภาพแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดขึ้น 4 – 9 กรกฎาคม 2551

วันที่วัดคุณภาพแก๊ส	แก๊สมีเทน	คาร์บอนไดออกไซด์	ออกซิเจน	H <sub>2</sub> S(ppm)
4 กรกฎาคม 2551	51.35%	46.26%	1.50%	48
5 กรกฎาคม 2551	58.87%	56.62%	0.12%	40
6 กรกฎาคม 2551	59.27%	57.12%	0.01%	37
7 กรกฎาคม 2551	58.07%	56.62%	0.01%	03
8 กรกฎาคม 2551	58.57%	56.42%	0.01%	00
9 กรกฎาคม 2551	59.57%	56.03%	0.01%	00

## ข้อมูลปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองวัดปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้น 11 – 17 กรกฎาคม 2551

วันที่ทำการวัดแก๊ส	จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาตรแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
11 กรกฎาคม 2551	0	0.00	0.00
12 กรกฎาคม 2551	1	14.89	14.89
13 กรกฎาคม 2551	2	16.14	31.03
14 กรกฎาคม 2551	3	13.99	45.02
15 กรกฎาคม 2551	4	10.41	55.43
16 กรกฎาคม 2551	5	10.05	65.48
17 กรกฎาคม 2551	6	8.17	73.64

## ข้อมูลคุณภาพแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดขึ้น 12 – 17 กรกฎาคม 2551

วันที่วัดคุณภาพแก๊ส	แก๊สมีเทน	คาร์บอนไดออกไซด์	ออกซิเจน	H <sub>2</sub> S(ppm)
12 กรกฎาคม 2551	32.95%	73.50%	1.50%	609.50
13 กรกฎาคม 2551	34.01%	72.98%	0.80%	928.00
14 กรกฎาคม 2551	34.43%	72.82%	0.10%	926.00
15 กรกฎาคม 2551	32.72%	73.77%	0.01%	924.00
16 กรกฎาคม 2551	33.45%	73.56%	0.01%	926.00
17 กรกฎาคม 2551	33.79%	73.19%	0.01%	928.00

## ข้อมูลปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น 11 – 17 สิงหาคม 2551

วันที่ทำการวัดแก๊ส	จำนวนวันที่ทำการวัดปริมาณแก๊ส(วัน)	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น(ลิตร)	ปริมาณแก๊สสะสม(ลิตร)
11 สิงหาคม 2551	0	0.00	0
12 สิงหาคม 2551	1	14.54	14.32
13 สิงหาคม 2551	2	30.01	29.47
14 สิงหาคม 2551	3	44.02	42.79
15 สิงหาคม 2551	4	54.97	52.84
16 สิงหาคม 2551	5	64.83	62.19
17 สิงหาคม 2551	6	74.11	70.95

## ข้อมูลคุณภาพแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักเศษอาหาร

ผลการทดลองความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดขึ้น 4 – 9 กรกฎาคม 2551

วันที่วัดคุณภาพแก๊ส	แก๊สมีเทน	คาร์บอนไดออกไซด์	ออกซิเจน	H <sub>2</sub> S(ppm)
4 กรกฎาคม 2551	51.40%	46.21%	1.30%	53.00
5 กรกฎาคม 2551	58.93%	56.57%	0.15%	37.50
6 กรกฎาคม 2551	59.33%	57.07%	0.01%	36.00
7 กรกฎาคม 2551	58.13%	56.57%	0.01%	7.50
8 กรกฎาคม 2551	58.63%	56.37%	0.01%	0.00
9 กรกฎาคม 2551	59.63%	55.97%	0.01%	0.00