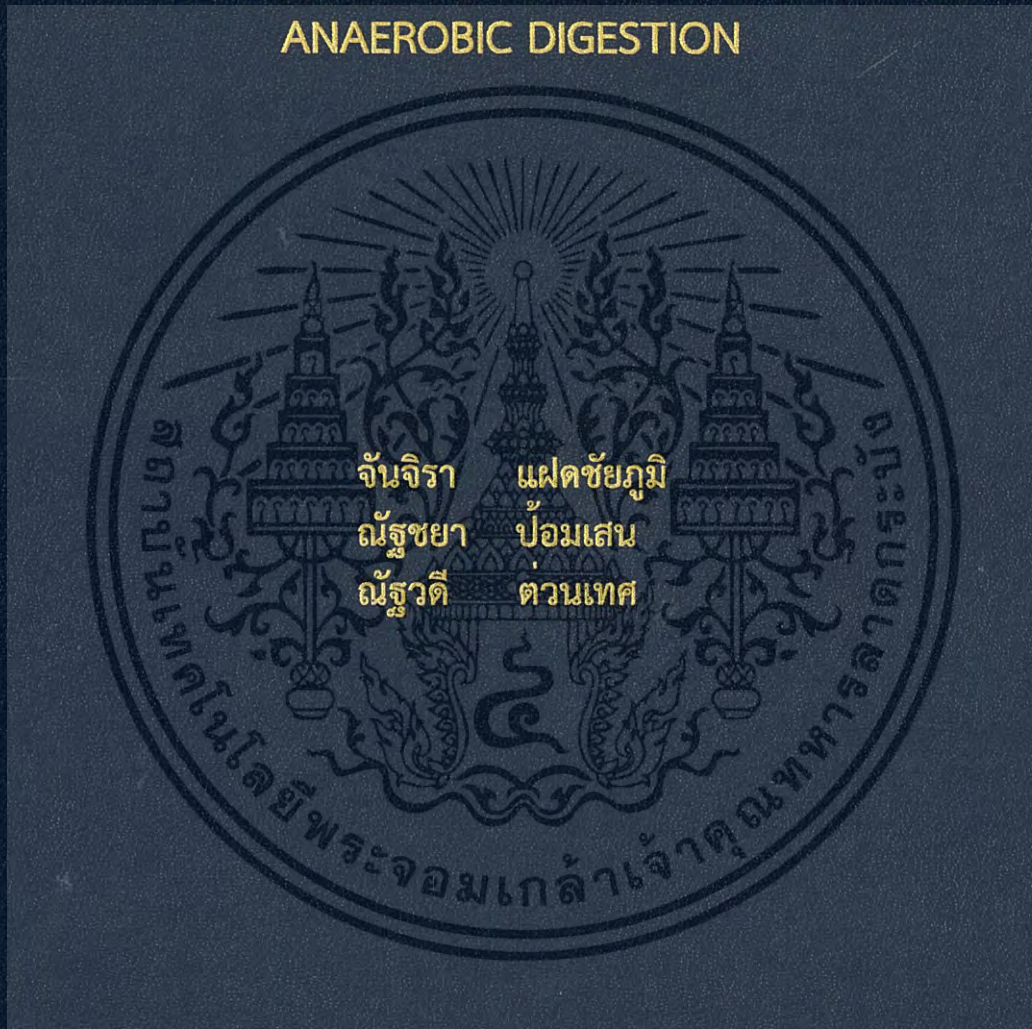


การศึกษาอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมใน  
การผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน

A STUDY ON OPTIMUM FEED RATE OF CASSAVA PULP  
FOR BIOGAS PRODUCTION USING TWO-STAGE  
ANAEROBIC DIGESTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมใน  
การผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน

A STUDY ON OPTIMUM FEED RATE OF CASSAVA PULP  
FOR BIOGAS PRODUCTION USING TWO-STAGE  
ANAEROBIC DIGESTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY ON OPTIMUM FEED RATE OF CASSAVA PULP  
FOR BIOGAS PRODUCTION USING TWO-STAGE  
ANAEROBIC DIGESTION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิต  
ก๊าซชีวภาพโดยวิธีหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน  
A STUDY ON OPTIMUM FEED RATE OF CASSAVA PULP  
FOR BIOGAS PRODUCTION USING TWO-STAGE  
ANAEROBIC DIGESTION

ชื่อนักศึกษา

นางสาวจันจิรา แผลดชัยภูมิ รหัสนักศึกษา 57050573  
นางสาวณัฐชยา บ่อมเสน รหัสนักศึกษา 57050593  
นางสาวณัฐวดี ต่วนเทศ รหัสนักศึกษา 57050601

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. สุวรรณีย์ จรรยาพูน

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร. ปราโมทย์ ศิริโรจน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ. พิศมัย ชัยรัตน์อุทัย ประธานกรรมการ	
ดร. เขียดศักดิ์ มณีรัตน์รุ่งโรจน์ กรรมการ	
ผศ. ดร. สุวรรณีย์ จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร. ปราโมทย์ ศิริโรจน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจันจิรา แผลดชัยภูมิ รหัสนักศึกษา 57050573 นางสาวณัฐชยา บ่อมเสน รหัสนักศึกษา 57050593 นางสาวณัฐวดี ต่วนเทศ รหัสนักศึกษา 57050601
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. ปราโมทย์ ศิริโรจน์

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยวิธีการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังหมักกรดมีปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนมีปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร มีการกวนผสมที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาทีและหยุดกวน 15 นาที ศึกษาสภาวะในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าสภาพความเป็นด่าง ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย กรดไขมันระเหยง่าย ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี ค่าคาร์บอนทั้งหมด ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยแปรค่าอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 30 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากผลการทดลองพบว่าอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมคือ 10 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าพีเอชในถังหมักกรด 3.84-4.10 และในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า 6.59-6.78 มีค่าสภาพความเป็นด่างในถังหมักก๊าซมีเทน  $1,019 \pm 4.52$  มิลลิกรัมต่อลิตรโดยแคลเซียมคาร์บอเนต ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายในถังหมักกรดมีค่า  $5,621.83 \pm 626.42$ ,  $5,100.92 \pm 601.02$  มิลลิกรัมต่อลิตรและในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า  $2,137.08 \pm 169.92$ ,  $1,323.50 \pm 175.02$  มิลลิกรัมต่อลิตรของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในถังหมักกรดมีค่า  $4,319.75 \pm 630.09$ ,  $4,173.25 \pm 627.92$  มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า  $1,011.00 \pm 143.03$ ,  $945.50 \pm 134.15$  มิลลิกรัมต่อลิตร กรดไขมันระเหยง่ายในถังหมักกรดมีค่า  $1,979.19 \pm 153.16$  มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า  $55.00 \pm 22.96$  มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีไอทีในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า  $4,189.97 \pm 260.68$  มิลลิกรัมต่อลิตร และ  $88.04 \pm 44.05$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ในถังหมักกรดมีค่า  $11.39 \pm 2.36$  และ  $0.43 \pm 0.04$  ในถังหมักก๊าซมีเทน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย  $4.39 \pm 1.14$  ลิตรต่อวัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 20.79-34.55 และ 13.81-22.60 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย และ 3,310.56-3,594.13 และ 2,198.21-2,429.63 มิลลิลิตรต่อกรัมของกรดไขมันระเหยง่าย ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ประกอบก๊าซมีเทน  $67.14 \pm 1.40\%$  ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  $31.51 \pm 1.58\%$  ก๊าซออกซิเจน  $1.14 \pm 0.31\%$  และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์  $31.79 \pm 7.75$  ส่วนในล้านส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
คำสำคัญ : กากมันสำปะหลัง, ก๊าซชีวภาพ, การย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	A Study on Optimum Feed Rate of Cassava Pulp for Biogas Production Using Two-Stage Anaerobic Digestion		
<b>Students</b>	Miss Junjira	Fadchayaphum	Student ID 57050573
	Miss Nutchaya	Pomsen	Student ID 57050593
	Miss Nuttawadee	Tuanted	Student ID 57050601
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2017		
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon		
<b>Co-advisor</b>	Dr. Pramote Sirirote		

### Abstract

This special project was studied optimum feed rate of cassava pulp to produce biogas using two-stage anaerobic digestion system in laboratory scale. The reactors contained two parts: acid tank with working volume of 27.73 liters and methane tank with working volume of 52.83 liters. Each tank was mixed with stirrer at the speeds of 10 rpm for 15 mins and 15 mins for stopped mixing. Conditions in acid tank and methane tank were investigated such as pH, Alkalinity (Alk), Total solids (TS), Volatile solids (VS), Total suspended solids (TSS), Volatile suspended solids (VSS), Volatile fatty acids (VFAs), Chemical oxygen demand (COD), Total organic carbon (TOC), including biogas compositions. The experiments were carried out by varying feed rate of cassava pulp at 5, 10, 30 % w/v. The results showed that 10% w/v of cassava pulp was the optimum feed rate. In this conditions, the pH values in acid and methane tanks were 3.83-4.10 and 6.59-6.78, respectively. Alkalinity value in methane tank was  $1,019 \pm 4.52$  mg/L as  $\text{CaCO}_3$ . The values of TS and VS were  $5,621.83 \pm 626.42$ ,  $5,100.92 \pm 601.02$  mg/L in acid tank and  $2,137.08 \pm 169.92$  mg/L,  $1,323.50 \pm 175.02$  mg/L in methane fermenter. The values of TSS and VSS were  $4,319.75 \pm 630.09$  mg/L,  $4,173.25 \pm 627.92$  mg/L in acid tank and  $1,011.00 \pm 143.03$  mg/L,  $945.50 \pm 134.15$  mg/L in methane tank. The concentrations of VFAs were  $1,979.19 \pm 153.16$  mg/L in acid tank and  $55.00 \pm 22.92$  mg/L in methane tank. COD values in acid tank and methane tank were  $4,189.97 \pm 260.68$  and  $88.04 \pm 44.05$ , respectively. C/N ratios in acid tank and methane tank were  $11.39 \pm 2.36$  and  $0.43 \pm 0.04$ , respectively. Average biogas production rate was  $4.39 \pm 1.14$  L/d. Average biogas production rates were 20.79-34.55 mL/g VS and 13.81-22.60 mL/g VFAs. Biogas contained  $67.14 \pm 1.40\%$  methane, carbon dioxide  $31.51 \pm 1.58\%$ , oxygen  $1.14 \pm 0.31\%$  and  $31.79 \pm 7.75$  ppm hydrogen sulfide

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือดังนี้

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ให้ความช่วยเหลือเสนอแนะ แก้ไขปรับปรุง ให้ความเอาใจใส่ และใส่ใจรายละเอียดของการทำโครงการพิเศษอย่างใกล้ชิด

ขอขอบคุณ ดร. ปราโมทย์ ศิริโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่อนุเคราะห์ถึงหมักในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการทำโครงการพิเศษนี้ และกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่องเพื่อให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ประธานกรรมการสอบโครงการพิเศษและ ดร. เชิดศักดิ์ มณีรัตน์รุ่งโรจน์ กรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะ

ขอขอบคุณ คุณศักรินทร์ บุญล้ำ ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือในการทำระบบเก็บก๊าซชีวภาพ และการดำเนินงานเกี่ยวกับระบบถังหมัก

ขอขอบคุณพี่นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมีและเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำ ความรู้ และช่วยสนับสนุนโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบคุณ บริษัท ราชสีมา กรีน เอ็นเนอร์ยี จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์กากมันสำปะหลัง และ บริษัท เพอร์ซิเดนท เบเกอร์ จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ในการหมักก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ในการดำเนินงานครั้งนี้

ขอขอบคุณพ่อ แม่ และเพื่อน ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำสำนึกถึงพระคุณของทุกๆท่าน และขอถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำโครงการพิเศษมา ณ โอกาสนี้ด้วย

จันจิรา	แฝดชัยภูมิ
ณัฐชยา	ป้อมเสน
ณัฐวดี	ต่วนเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>3</b>
2.1 ก๊าซชีวภาพ .....	3
2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพ .....	3
2.3 การผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะไร้อากาศ .....	6
2.3.1 ถังหมักแบบหนึ่งขั้นตอน .....	6
2.3.2 ถังหมักแบบสองขั้นตอน .....	6
2.4 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะไร้อากาศ .....	7
2.4.1 Non-methanogenic bacteria .....	7
2.4.2 Methanogenic bacteria .....	7
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ .....	7
2.5.1 ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม .....	7
2.5.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ .....	10
2.6 ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ .....	10
2.6.1 ด้านพลังงาน .....	10
2.6.2 ด้านสิ่งแวดล้อม .....	11
2.6.3 ด้านการเกษตร .....	11
2.6.4 ด้านอื่น ๆ .....	11
2.7 มັນสำปะหลัง .....	11
2.7.1 องค์ประกอบของมັນสำปะหลัง .....	12
2.7.2 ประโยชน์ของมັນสำปะหลัง .....	13
2.7.3 การใช้ประโยชน์จากแป้งมັນสำปะหลัง .....	13
2.8 กากมັນสำปะหลัง .....	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	16
<b>บทที่ 3</b> วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	<b>19</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี .....	19
3.1.1 สารเคมี .....	19
3.1.2 อุปกรณ์ .....	19
3.1.3 วัสดุดิบที่ป้อนเข้าระบบ .....	20
3.1.4 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง .....	21
3.1.5 ระบบถังหมัก .....	21
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง .....	25
3.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุป้อน .....	25
3.2.2 ศึกษาสถานะของระบบระหว่างการหมักและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ .....	26
3.2.3 วิเคราะห์ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ภายในหมักกรดและถังหมักก๊าซชีวภาพ .....	28
<b>บทที่ 4</b> ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	<b>29</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ของกากมันสำปะหลัง .....	29
4.2 ผลการศึกษาสถานะของเหลวภายในถังหมักกรด และถังหมักก๊าซมีเทนที่อัตราการ เติมกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	30
4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างในระบบ .....	30
4.2.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างในระบบ .....	31
4.2.3 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งทั้งหมดในระบบ .....	32
4.2.4 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดในระบบ .....	34
4.2.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในระบบ .....	35
4.2.6 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในระบบ .....	37
4.2.7 ผลการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนทั้งหมดในระบบ .....	38
4.2.8 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้องการ ออกซิเจนทางเคมีในระบบ .....	39
4.3 ผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นกากมัน สำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	41
4.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ .....	45
4.5 ผลการศึกษาเชื้อจุลินทรีย์ภายในระบบถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน .....	48
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	<b>49</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง .....	50
ภาคผนวก .....	52
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์ .....	53
ก-1 วิธีวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสภาวะในระยะปรับสภาพและระยะทดลอง .....	53
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง .....	65
ข-1 คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง .....	65
ข-2 คุณลักษณะของสารละลายกากมันสำปะหลัง (Feed) .....	65
ภาคผนวก ค การคำนวณ .....	89
ค-1 การคำนวณระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในสารระบบ .....	89
ค-2 การคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบ .....	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	3
2.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ.....	3
2.3 ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ .....	8
2.4 ความเข้มข้นของการกระตุ้นและการยับยั้งของโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ท ที่แตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวก .....	9
2.5 องค์ประกอบของน้ำสำหรับหมัก.....	12
3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์.....	25
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง .....	29
ก-1 ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่าง ๆ.....	62
ข-1.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง.....	65
ข-2.1 ผลการทดลองของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	65
ข-2.2 ผลการทดลองของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	66
ข-2.3 ผลการทดลองของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	67
ข-3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดของถังหมักกรดในระยะปรับสภาพ .....	68
ข-3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่างของถังหมักก๊าซมีเทนในระยะปรับสภาพ.....	69
ข-3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดของถังหมักกรดในระยะทดลอง .....	69
ข-3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่างของถังหมักก๊าซมีเทนในระยะทดลอง .....	71
ข-3.5 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างของถังหมักก๊าซมีเทน.....	74
ข-3.6 การเปลี่ยนแปลงของค่าของแข็งทั้งหมดในถังหมักกรด .....	74
ข-3.7 การเปลี่ยนแปลงของค่าของแข็งทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทน.....	75
ข-3.8 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยง่ายของถังหมักกรด .....	76
ข-3.9 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยง่ายของถังหมักก๊าซมีเทน .....	76
ข-3.10 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยของถังหมักกรด .....	77
ข-3.11 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยของถังหมักก๊าซมีเทน .....	78
ข-3.12 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของถังหมักกรด.....	79
ข-3.13 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของถังหมักก๊าซมีเทน .....	79
ข-3.14 การเปลี่ยนแปลงค่ากรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักกรด .....	80
ข-3.15 การเปลี่ยนแปลงค่ากรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักก๊าซมีเทน.....	81
ข-3.16 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักกรด .....	82
ข-3.17 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักก๊าซมีเทน.....	82
ข-3.18 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีของถังหมักกรด.....	83
ข-3.19 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีของถังหมักก๊าซมีเทน .....	84
ข-3.20 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซชีวภาพ.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-3.21 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	87
ค-2.1 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของ วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ .....	90
ค-2.2 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด.....	92
ค-2.3 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ต่อน้ำหนักกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกกำจัด .....	93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน .....	4
2.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่เป็นแบบมาตรฐาน .....	15
3.1 วัตถุประสงค์ที่ป้อนเข้าระบบ .....	20
3.2 ระบบการหมักแบบสองขั้นตอนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ .....	22
3.3 รายละเอียดถึงหมักแบบสองขั้นตอน .....	23
3.4 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ .....	24
3.5 แผนผังขั้นตอนระยะปรับสภาพของระบบ .....	26
3.6 แผนผังขั้นตอนระยะทดลองของระบบ .....	27
4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	30
4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	32
4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งทั้งหมดที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	33
4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยง่ายที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	34
4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	36
4.6 การเปลี่ยนแปลงค่ากรดไขมันระเหยง่ายที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	37
4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	41
4.8 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	42
4.9 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	42
4.10 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	44
4.11 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพภายในระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	46
4.12 ลักษณะเชื้อแบคทีเรียในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน โดยการย้อมสีแกรมแล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1,000 เท่า .....	48

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
Alk	ค่าสภาพความเป็นด่าง
TS	ค่าของแข็งทั้งหมด
VS	ค่าของแข็งระเหยง่าย
TSS	ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
VSS	ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย
VFAs	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย
COD	ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี
TKN	ค่าไนโตรเจนทั้งหมด
TOC	สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด
C/N	ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน
w/v	น้ำหนักต่อปริมาตร
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/L as CaCO <sub>3</sub>	มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต
L/d	ลิตรต่อวัน
ppm	ส่วนในล้านส่วน
A/F	อากาศต่อเชื้อเพลิง
m <sup>3</sup>	ลูกบาศก์เมตร
MJ/m <sup>3</sup>	เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร
kWh/m <sup>3</sup>	กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร
cm/s	เซนติเมตรต่อวินาที
°C	องศาเซลเซียส
kg/m <sup>3</sup>	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
mm	มิลลิเมตร
v/v	ปริมาตรโดยปริมาตร
g/L	กรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แนวโน้มของการใช้พลังงานในปัจจุบันถูกเปลี่ยนจากการใช้พลังงานสิ้นเปลือง เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิลไปเป็นการใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น แสงอาทิตย์ ลม หรือชีวมวล เนื่องจากพลังงานสิ้นเปลืองเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป และก่อให้เกิดมลพิษต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ก๊าซชีวภาพ จัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาด เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ วัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่ได้จากธรรมชาติที่มีอยู่ทั่วไป ทั้งครัวเรือน ชุมชน ฟาร์มปศุสัตว์และโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เศษอาหาร สิ่งปฏิกูล ขยะอินทรีย์ กากของเสียอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานในรูปของความร้อนและเชื้อเพลิงชีวภาพ เพื่อลดการใช้พลังงานฟอสซิล และลดมลพิษอากาศ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) การผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอนเป็นวิธีการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบขั้นตอนเดียว เนื่องจากถังหมักกรดและก๊าซมีเทนที่แยกออกจากกัน ทำให้สภาวะกรดที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นกรดอินทรีย์ไม่รบกวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนในถังหมักก๊าซชีวภาพที่เจริญได้ดีในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดต่างที่เป็นกลาง

มันสำปะหลังเป็นพืชทางเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากมีลักษณะทางภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกมันสำปะหลัง ประเทศไทยมีการผลิตและส่งออกแป้งมันสำปะหลัง มันสำปะหลังอัดเม็ดและมันเส้นไปยังประเทศต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก กระบวนการแปรรูปในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังก่อให้เกิดกากมันสำปะหลังที่เป็นของเสีย ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ โดยทั่วไปนิยมนำกากมันสำปะหลังมาใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ การผลิตเอทานอล รวมทั้งการผลิตก๊าซชีวภาพ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอน โดยแปรค่าสัดส่วนการเติมกากมันสำปะหลังที่มีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและสภาวะภายในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซชีวภาพ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอน

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันสำปะหลังเบื้องต้นตามวิธีมาตรฐาน ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต, ปริมาณแป้ง, ความชื้น, อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของกากมันสำปะหลังก่อนเข้าระบบ (Feed) ได้แก่ พีเอช, สภาพความเป็นกรดต่าง (ALK), ค่าของแข็งทั้งหมด (TS), ค่าของแข็งระเหยง่าย (VS), ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS), ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (VSS), ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFAs), ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD), ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)

1.3.3 เติมหากมันสำปะหลัง 1% (v/v) ในถังหมักกรด โดยผสมกากมันสำปะหลัง 10 กรัมปรับด้วยน้ำประปาให้มีปริมาตร 1 ลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นของเหลวในถังหมักกรดจะไหลลงในถังหมักก๊าซมีเทนในปริมาตรเดียวกัน โดยแปรค่าสัดส่วนการเติมหากมันสำปะหลังเป็น 5%, 10%, 30% โดยปริมาตร

1.3.4 วิเคราะห์ตัวอย่างของเหลว (Effluent) ที่เกิดจากกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศตามวิธีมาตรฐาน ได้แก่ พีเอช, สภาพความเป็นกรดต่าง (ALK), ค่าของแข็งทั้งหมด (TS), ค่าของแข็งระเหยง่าย (VS), ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS), ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (VSS), ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFAs), ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD), ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) โดยเก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 2 ครั้ง

1.3.5 วัดปริมาณก๊าซชีวภาพทุกวันโดยวิธีแทนที่ก๊าซมีเทนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2% (2% NaCl) และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Data Meter

1.3.6 คำนวนอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้พลังงานทดแทนที่มีราคาถูก

1.4.2 เป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียในภาคอุตสาหกรรม

1.4.3 ลดปัญหามลพิษจากของเสียอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ (Anaerobic bacteria) ในสภาวะที่ไร้อากาศ ประกอบด้วยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่และก๊าซอื่น ๆ อีกเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพแสดงดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
มีเทน (CH <sub>4</sub> )	50-70
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	30-40
ไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	5-10
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	1-2
ไอน้ำ	0.3
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S)	เล็กน้อย

ที่มา : บุญมา (2550)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติ	ค่าที่ได้
ค่าความร้อนโดยประมาณ	21 MJ/m <sup>3</sup> หรือ 5.96 kWh/m <sup>3</sup> (ที่ CH <sub>4</sub> 60 %)
ความเร็วเปลวไฟ	25 cm/s
อัตรา A/F ในทางทฤษฎี	6.19 m <sup>3</sup> (air)/m <sup>3</sup> (gas)
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 °C
อุณหภูมิจุดติดไฟของก๊าซมีเทน	600 °C
ค่าความจุความร้อน	1.6 Kg/m <sup>3</sup> - °C
ความหนาแน่น	1.15 kg/m <sup>3</sup>

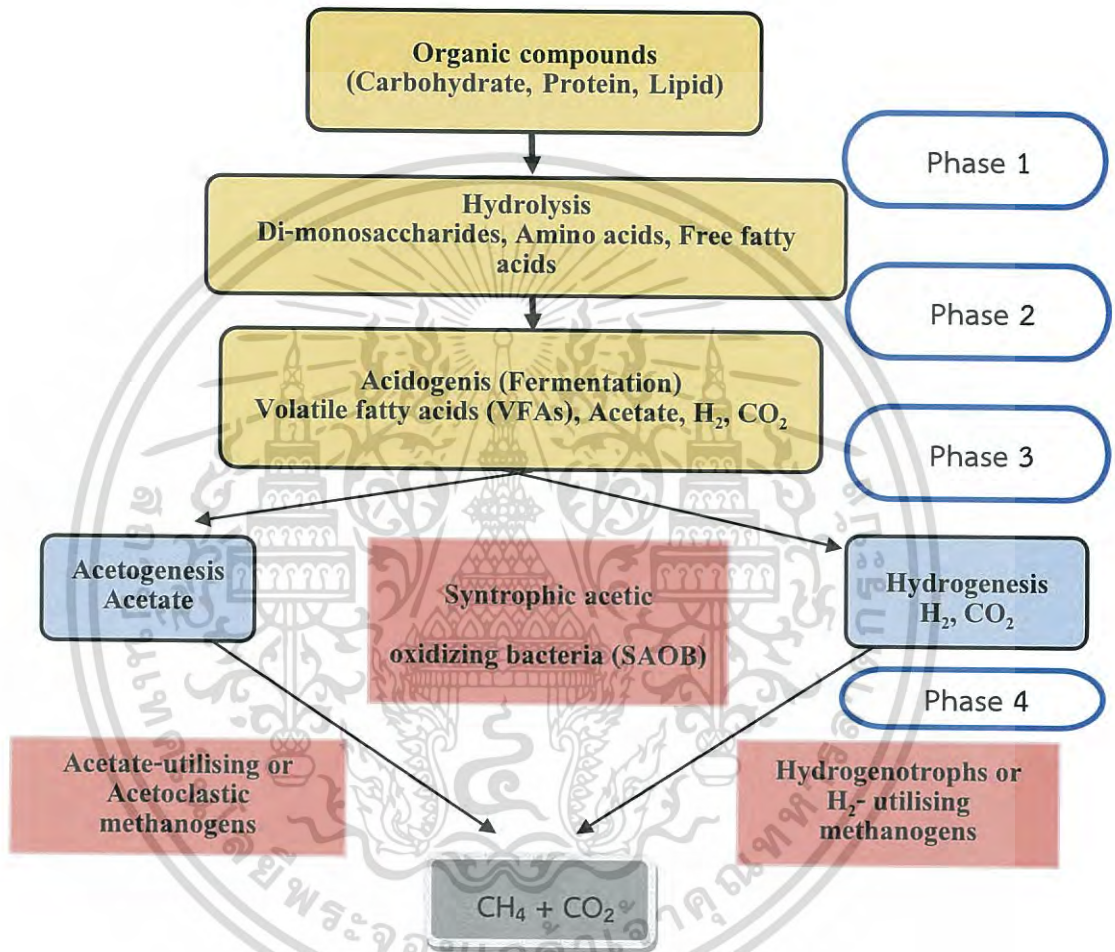
ที่มา : มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม (2553)

#### 2.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพ

การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศในการผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (รูปที่ 2.1) ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นที่ 1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)  
 ขั้นที่ 2 ปฏิกริยาอะซิโตเจเนซิส (Acidogenesis)  
 ขั้นที่ 3 ปฏิกริยาอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)  
 ขั้นที่ 4 ปฏิกริยามეთათอนเจเนซิส (Methanogenesis)



รูปที่ 2.1 การผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ  
 (Amaya et al. 2013)

ขั้นที่ 1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน ให้อยู่ในรูปโมเลกุลขนาดเล็กหรือโมเลกุลเดี่ยว (Monomer) เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมันและกลีเซอรอล เพื่อให้ง่ายต่อการลำเลียงเข้าสู่ภายในเซลล์ โดยปฏิกริยาขั้นนี้เกิดขึ้นภายนอกเซลล์ของจุลินทรีย์จำพวกไฮโดรไลติกแบคทีเรีย (Hydrolytic bacteria) และยังมีเอนไซม์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เซลลูเลส อะไมเลส และโปรติเอส โดยเอนไซม์เหล่านี้ถูกสร้างขึ้นโดยแบคทีเรียที่เกิดจากการหมัก (Fermentative bacteria) ปัจจัยต่างๆที่มีผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ สารพิษและลักษณะของเสีย ชนิดของเอนไซม์ ชนิดของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา โดยการทำงานของเอนไซม์นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ เอนไซม์ อุณหภูมิและการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น

ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) เป็นกระบวนการที่อะซิโดจีนิกแบคทีเรีย (Acidogenic bacteria) ในการหมักกรด เปลี่ยนกรดอะมิโนและน้ำตาลให้เป็นกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการเกิดมีเทน และสารตัวกลางที่จะถูกย่อยสลายได้ ได้แก่ กรดไพรูโวนิก กรดบิวทิริก แอลกอฮอล์ และคีโตน เช่น เอทานอล เมทานอล กลีเซอรอล อะซิโตน อะซิเตด และคาร์บอนไดออกไซด์

ขั้นที่ 3 ปฏิกิริยาอะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis) เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids) ได้แก่ กรดไพรูโวนิก กรดบิวทิริก และแอลกอฮอล์ให้เป็น อะซิเตด ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอะซิโตจีนิกแบคทีเรีย (Acetogenic bacteria) หรือแบคทีเรียที่สร้างอะซิเตดและไฮโดรเจน (Acetate and Hydrogen-producing bacteria) ได้แก่ *Syntrobacter wolinii* และ *Syntrophomonas wolfei* แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการความดันไฮโดรเจนที่ค่อนข้างสูง การเกิดอะซิเตดจะลดลง และยับยั้งจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดไพรูโวนิก กรดบิวทิริก และเอทานอลมากกว่ามีเทน อะซิโตจีนิกแบคทีเรียและเมทาโนเจนจะมีความสัมพันธ์ที่เอื้อกัน เมทาโนเจนจะช่วยให้เกิดความดันไฮโดรเจนต่ำ สำหรับอะซิโตจีนิกแบคทีเรียจะทำให้เกิดความดันไฮโดรเจนสูง อย่างไรก็ตาม อะซิโตจีนิกแบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้เร็วกว่าแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนมาก การทำงานของอะซิโตจีนิกแบคทีเรียเกิดขึ้นดังปฏิกิริยาที่ 2.1-2.3



โดยปฏิกิริยาอะซิโดเจเนซิสทำให้ไม่เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายและก๊าซไฮโดรเจน ในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งปฏิกิริยาในขั้นต่อไปได้

ขั้นที่ 4 ปฏิกิริยาเมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอะซิติกให้กลายเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนจีนิกแบคทีเรีย (Methanogenic bacteria) เป็นแบคทีเรียที่มีทั้งแกรมบวกและแกรมลบ ที่มีรูปร่างที่ต่างกัน มีการเจริญเติบโตช้ามาก และเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทนได้ดีที่สภาวะไร้อากาศเท่านั้น โดยเวลาที่จุลินทรีย์มีจำนวนเพิ่มเป็นสองเท่า เรียกว่า Generation time หรือ Doubling time อยู่ที่ 3 วัน ที่อุณหภูมิ 35 °C และ 5 วัน ที่อุณหภูมิ 10 °C ซึ่งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนประกอบด้วย 2 กลุ่ม คือ ไฮโดรจีโนโทรฟิกเมทาโนเจน (Hydrogenotrophic methanogens) และอะซิโตโทรฟิกเมทาโนเจน (Acetotrophic methanogens)

ก) ไฮโดรจีโนโทรฟิกเมทาโนเจน (Hydrogenotrophic methanogens) เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่เปลี่ยนไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นก๊าซมีเทน เรียกว่า ปฏิกิริยารีดักชันของ

คาร์บอนไดออกไซด์ ดังปฏิกิริยาที่ 2.4 ความดันไฮโดรเจนจะถูกรักษาให้อยู่ในระดับต่ำด้วยเมทาโนเจนซึ่งจำเป็นต่อการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยง่ายและแอลกอฮอล์ไปเป็นกรดอะซิเตต ก๊าซชีวภาพจะประกอบด้วยก๊าซมีเทนที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ประมาณ 1 ใน 3 ส่วน



ข) อะซิโตโทรฟิคเมทาโนเจน (*Acetotrophic methanogens*) หรืออะซิโตคลาสติกเมทาโนเจน (*Acetoclastic methanogens*) เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่สามารถเปลี่ยนอะซิเตตให้เป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่า ปฏิกิริยาอะซิโตคลาสติก (*Acetoclastic reaction*) ดังปฏิกิริยาที่ 2.5 ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเจริญเติบโตช้ามาก โดยจะใช้เวลาประมาณ 2-3 วันในการเพิ่มจำนวนให้เป็น 2 เท่า ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตคลาสติกจะแบ่งเป็น 2 จีนัส คือ เมทาโนซาร์ซินา (*Methanosarcina* sp.) และเมทาโนทริค (*Methanotrich* sp.) การผลิตก๊าซมีเทนจากอะซิเตต มีประมาณสองในสามของก๊าซมีเทนที่สร้างได้ทั้งหมด



## 2.3 การผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (เพ็ชรรัตน์, 2538)

2.3.1 ถังหมักแบบหนึ่งขั้นตอน (*One Phase Anaerobic Digestion*) เหมาะกับจุลินทรีย์ที่มีสภาวะในการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันไม่มาก วัสดุที่ย่อยสลายได้ง่ายและมีความเป็นกรดไม่มาก เนื่องจากการทำงานของระบบจะเกิดสภาวะที่สร้างกรดและสร้างมีเทนได้ในถังเดียวกัน การควบคุมระบบทำได้ยาก อาจทำให้ผลิตก๊าซมีเทนได้น้อย ข้อดี คือ เป็นระบบถังที่มีขั้นตอนง่ายไม่ซับซ้อนและราคาถูก ข้อเสีย คือ การควบคุมระบบทำได้ยาก มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพน้อย และเกิดการสะสมของตะกอน

2.3.2 ถังหมักแบบสองขั้นตอน (*Two Phase Anaerobic Digestion*) เป็นระบบที่มีการแยกการหมักออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะการทำงานของจุลินทรีย์ เพื่อควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับจุลินทรีย์แต่ละประเภท เนื่องจากการหมักอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ 2 ชนิด ซึ่งในการทำงานของจุลินทรีย์ดังกล่าวมีสภาวะที่แตกต่างกัน ระบบถังแบบสองขั้นตอนให้พีเอชเป็นตัวกำหนดและควบคุมแบคทีเรีย โดยถังแรกมีพีเอชอยู่ในช่วง 3.0-5.0 จะมีแบคทีเรียที่สร้างกรด ส่วนถังที่สองมีพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.0 จะมีแบคทีเรียที่สร้างมีเทน เหมาะกับวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากหรือมีความเป็นกรดสูง เนื่องจากการแบ่งถังหมักเป็นสองขั้นตอนทำให้ก๊าซไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นในถังใบแรกไม่เกิดการสะสมตัวจนเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทนในถังหมักใบที่สอง ข้อดีของระบบถังหมักแบบสองขั้นตอน คือ จุลินทรีย์ที่สร้างกรดสามารถเจริญเติบโตได้เต็มที่ ไม่มีผลรบกวนจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน ลดปัญหาการสูญเสียจุลินทรีย์ในการสร้างก๊าซมีเทนได้ และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูง ส่วนข้อเสีย คือ ต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์ถังหมักกรดและถังก๊าซมีเทน

## 2.4 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (ศุภาพพรและวสุ, 2553)

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีโครงสร้างซับซ้อนภายใต้สภาวะไร้อากาศจนได้ผลผลิตสุดท้ายอยู่ในรูปของก๊าซชีวภาพนั้น จำเป็นต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนมากเป็นแบคทีเรีย โดยเฉพาะในกลุ่ม Strictly facultative anaerobic bacteria ซึ่งส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการ Hydrolysis acidogenesis แบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ Non-methanogenic bacteria และ Methanogenic bacteria

**2.4.1 Non-methanogenic bacteria** เป็น Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอากาศและไม่มีอากาศ โดยจะได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์จากโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดไขมันระเหยง่าย กรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน แอมโมเนีย และซัลไฟด์ สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 4.0-6.5 ซึ่งจะทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีและมีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่ม Acidogenic bacteria และ Acetogenic bacteria มีการแบ่งจำนวนตัวเพิ่มเป็นสองเท่าภายใน 24 ชั่วโมง ได้แก่ Hydrolytic bacteria, Acid forming bacteria, Acetic acid producing bacteria

**2.4.2 Methanogenic bacteria** พบได้ตามธรรมชาติในชั้นตะกอนของแม่น้ำ ลำคลอง หรือในกระเพาะอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้อง แบคทีเรียกลุ่มนี้มีทั้งประเภทแกรมบวก และแกรมลบ ขึ้นอยู่กับชนิดของ Cell envelop ของแบคทีเรีย ซึ่งจะทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซมีเทน ส่วนมากจัดอยู่ในพวก Obligately anaerobic bacteria จะเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่ขาดออกซิเจน มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.0-7.8 ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้น้อย และมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน โดยเฉลี่ยต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 3 ถึง 5 วัน ที่อุณหภูมิ 35 °C จนถึงวันที่ 10 ที่อุณหภูมิ 10 °C เพื่อให้จำนวนแบคทีเรียเพิ่มเป็นสองเท่า ได้แก่ Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophs และ Acetotrophic methanogens หรือ Acetoclastic bacteria หรือ Splitting bacteria

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (จินตนา, 2552)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศขึ้นอยู่กับเชื้อจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือ เชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างกรดอินทรีย์ และเชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้สูงขึ้น จึงต้องควบคุมให้สภาวะเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้งสองกลุ่ม โดยจำแนกปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียออกเป็น 2 ประเภท คือ ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ

### 2.5.1 ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม

1) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) มีความสำคัญต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์และการเจริญเติบโตที่อาจแตกต่างกัน ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สร้างกรดจะสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 3.0-5.0 ส่วนเชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจะเจริญเติบโตได้ดีในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีเอช 6.5-8.0 ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจะมีความไวต่อค่าพีเอชมาก ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลงได้

2) อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศมีอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิที่ 30-35 °C (Mesophilic temperature) และช่วงอุณหภูมิที่ 50-60 °C (Thermophilic temperature) และในกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจะถูกยับยั้งในช่วงอุณหภูมิ 40-50 °C ส่วนใหญ่จะเดินระบบที่อุณหภูมิช่วง 30-35 °C มากกว่าที่อุณหภูมิช่วง 50-60 °C เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่ม Thermophilic bacteria มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยทางสภาพแวดล้อม จึงมักจะประสบปัญหาในด้านการควบคุมระบบการผลิตก๊าซ และยังเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบสูง มากกว่าแบคทีเรียกลุ่ม Mesophilic bacteria แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์

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

ที่มา : จินตนา (2552)

3) สารพิษและสารยับยั้ง สารที่เป็นพิษอาจจะอยู่ได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ทั้งนี้ผลของสารพิษมีตั้งแต่พิษโดยตรง (Toxic) จนถึงยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีสารเหล่านั้นก็อาจจะกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หากมีความเข้มข้นที่พอเหมาะ สารที่เป็นพิษหรือสารยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระบบการหมักแบบไม่ใช้อากาศแบ่งออกเป็น 6 กลุ่ม ดังนี้

ก) ไอออนบวก (Cations) ได้แก่ โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) แมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) และ แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ซึ่งมีความเข้มข้นที่เหมาะสมจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินไปเกินความจำเป็นจะส่งผลให้เป็นพิษต่อแบคทีเรีย ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ข) โลหะหนัก (Heavy metals) โดยทั่วไปโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียหรือของเสียอินทรีย์ มีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้อากาศ ได้แก่ แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม นิเกิล โคบอลต์ ทองแดง และโครเมียม โดยทองแดงจะมีผลต่อระบบมากที่สุด แม้ว่าโลหะหนักจะเป็นพิษ แต่โลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางประเภทยังมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เช่น นิเกิล หรือโคบอลต์ เป็นต้น แต่ต้องมีปริมาณที่ไม่มากเกินไป

ตารางที่ 2.4 ความเข้มข้นของการกระตุ้นและการยับยั้งของโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ทที่แตกต่างกันเป็นไอออนที่มีประจุบวก

ไอออนบวก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	สถานะกระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งรุนแรง
โซเดียม ( $\text{Na}^+$ )	100-200	3,500-5,500	8,000
โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ )	200-400	2,500-4,500	12,000
แมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ )	100-200	2,500-4,500	8,000
แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ )	75-150	1,000-1,500	3,000

ที่มา : จินตนา (2552)

ค) กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFAs) การสร้างกรดไขมันระเหยง่ายในปริมาณที่มากเกินไปอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีสารอินทรีย์เข้ามาในระบบในปริมาณมาก แบคทีเรียสร้างกรดก็จะสร้างกรดไขมันระเหยง่ายออกมาเป็นจำนวนมาก หากว่าระบบมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) หรือมีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ จะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของระบบลดลง เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทน วิธีการลดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทำได้โดยการเติมต่าง เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) การเพิ่มระยะเวลาในการหมักหรือการหมุนเวียน Effluent ให้เข้ามาในระบบ

ง) แอมโมเนีย (Ammonia,  $\text{NH}_3$ ) เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ โปรตีนและยูเรีย เป็นต้น โดยความเป็นพิษจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าความเข้มข้นสูงกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

จ) ซัลไฟด์ (Sulfide,  $\text{S}^{2-}$ ) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซัลไฟด์สามารถอยู่ในรูปที่เป็นทั้งสารละลายหรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) โดยสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟิวริกได้ ซึ่งแบคทีเรียสามารถอยู่ในสภาพที่มีซัลไฟด์ไม่เกิน 50-160 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเป็นพิษจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าความเข้มข้นมากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นพิษของซัลไฟด์สามารถทำให้ลดลงได้โดยการทำให้ซัลไฟด์อยู่ในรูปสารตกตะกอน นอกจากนี้ อาจทำการเจือจางน้ำเสียหรือแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ

ฉ) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนที่นำมาใช้คำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะเป็นปริมาณคาร์บอนและปริมาณไนโตรเจนที่ย่อยสลายได้เท่านั้น สำหรับกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 16-19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ลักษณะของของเสีย สามารถใช้สารอินทรีย์เป็นขั้วสเตรตได้ ดังนี้

ก) น้ำตาลที่มีโมเลกุลอย่างง่าย เช่น กลูโคส เป็นแหล่งของสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย โดยทั่วไปสามารถพบน้ำตาลเป็นองค์ประกอบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและของเสียจากเกษตรกรรม

ข) ของเสียที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ เช่น ของเสียจากโรงงานแปรรูปพืชผลทางการเกษตร

ค) ของเสียที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก มักอยู่ในโครงสร้างของพืช มีปริมาณมากในของเสียจากการเกษตรและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตเยื่อกระดาษหรือกระดาษ รวมทั้งในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร

ง) ของเสียและน้ำเสียจากพวกเศษอาหารมีคาร์โบไฮเดรตสูง โดยอยู่ในรูปน้ำตาลโมเลกุลอย่างง่าย แป้งและเซลลูโลส รวมทั้งมีไขมันและโปรตีนในปริมาณสูง แต่มีข้อเสีย คือ ของเสียจะมีความผันแปรของชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารอาหารที่เข้าระบบแตกต่างกัน ซึ่งแต่ละองค์ประกอบต้องการสภาวะแวดล้อมและกระบวนการทางชีวภาพในการผลิตก๊าซมีเทนที่แตกต่างกัน

### 2.5.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ

1) การกวนผสม เป็นการทำให้ส่วนผสมที่อยู่ในระบบให้มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึง ช่วยให้ของเสียที่เข้ามาใหม่เข้าไปแทนที่ของเสียที่ถูกใช้ไปแล้ว ส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้นและช่วยให้ระบบมีการย่อยสลายได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ การกวนยังช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกชั้นของของเสีย การกวนผสมสามารถลดเวลากักเก็บของถังปฏิกิริยาได้

2) อัตราการเติมสารอินทรีย์ มีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบ การเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นก๊าซมีเทนจะต้องมีความเข้มข้นของแบคทีเรียเหมาะสมกับปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบ จึงจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ หากมีสารอินทรีย์เข้ามาในระบบมากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง ในทางตรงกันข้ามหากมีสารอินทรีย์เข้ามาในระบบน้อยเกินไปจะผลิตก๊าซมีเทนได้น้อยทำให้ไม่คุ้มค่าในการลงทุน

3) เวลากักเก็บ เวลากักพักในระบบของการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน 2 ประเภท คือ 1) เวลากักพักของแข็งเป็นเวลาเฉลี่ยที่แบคทีเรียอยู่ในถังปฏิกิริยา 2) เวลากักพักน้ำเป็นเวลาเฉลี่ยที่น้ำเสียหรือสลัดจ์อยู่ในถังปฏิกิริยา ตั้งแต่เข้าจนกระทั่งออกมาจากระบบ ตัวแปรทั้งสองนี้อาจมีความสัมพันธ์กันหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการเดินระบบ ทั้งนี้การควบคุมระบบบำบัดจะใช้ค่าเวลากักพักน้ำเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากคำนวณได้ง่ายกว่าเวลากักพักตะกอน การควบคุมเวลากักพักมีความสำคัญต่อการเดินระบบเป็นอย่างมาก ถ้าเวลากักพักนานเกินไปจะทำให้การก่อสร้างระบบมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามหากใช้เวลากักพักสั้นเกินไป อัตราเร็วในการไหลของน้ำสูงจะทำให้แบคทีเรียหลุดออกจากระบบ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

## 2.6 ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

2.6.1 ด้านพลังงาน การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์มีอยู่ 3 ลักษณะ คือ

1) การนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิง เพื่อผลิตพลังงานความร้อน หรือการใช้รูปของความร้อนโดยตรง ซึ่งการนำก๊าซชีวภาพไปเผาไหม้ให้ความร้อนโดยตรงนั้น จะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง ใช้ในการทดแทนก๊าซหุงต้ม ฯลฯ

2) การนำไปใช้ในการผลิตพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้า เป็นการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ที่ได้รับความนิยมทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เนื่องจากพลังงานกล หรือพลังงานไฟฟ้าสามารถใช้ได้ง่าย โดยใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ที่มีอยู่หลายรูปแบบ เช่น เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซชีวภาพร่วมกับน้ำมันดีเซล เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้ 100% เครื่องยนต์เบนซินดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้ 100% และเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซโดยเฉพาะ

3) การผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration system) เป็นการผลิตพลังงานกล พลังงานไฟฟ้า และความร้อนร่วมซึ่งเป็นระบบที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการใช้เชื้อเพลิงให้มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อนเพียงอย่างเดียว

#### 2.6.2 ด้านสิ่งแวดล้อม (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์, 2553)

1) ลดปัญหามลพิษทางน้ำ โดยทำการบำบัดและลดสารปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำได้ตามที่กฎหมายกำหนด

2) ลดปัญหากลิ่นเหม็นและแมลง

3) ลดการปล่อยทิ้งก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ เป็นการช่วยลดอัตราการเกิดภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะโลกร้อน

#### 2.6.3 ด้านการเกษตร

1) การนำไปผลิตปุ๋ยอินทรีย์ ใช้ในการเพาะปลูกและปรับปรุงดิน ทั้งในรูปปุ๋ยแห้งและปุ๋ยน้ำ

2) การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ ทำให้ปริมาณเชื้อโรคที่เป็นสาเหตุของโรคพืชบางชนิดลดลงและมีส่วนทำลายการงอกเมล็ดของวัชพืช

2.6.4 ด้านอื่น ๆ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร การใช้เทคโนโลยีที่มีการจัดการของเสียอย่างครบวงจร มีการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้อย่างคุ้มค่า หรือมีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด นับเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.7 มันสำปะหลัง (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2553)

มันสำปะหลัง เป็นไม้พุ่มยืนต้นมีอายุได้หลายปี จัดอยู่ในวงศ์ (Family) Euphorbiaceae สกุล (Genus) *Manihot* ชนิด (Species) *esculenta* การปลูกมันสำปะหลังจะใช้ส่วนของลำต้นเป็นท่อนปักไปในดิน ตรงบริเวณรอยตัดที่ปักอยู่ในดินจะแตกเป็นราก ฝอย หลังจากปลูกได้ประมาณ 2 เดือนรากจะค่อยๆ สดสมแข็ง และมีขนาดโตขึ้น เรียกว่าหัวมันสำปะหลัง สามารถเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังหลังจากปลูก 6 เดือนโดยจะยึดอายุเก็บเกี่ยวไปได้ถึง 16 เดือน โดยส่วนตาที่อยู่ด้านข้างจะเจริญเติบโตออกมาเป็นลำต้นต่อไป สำหรับประเทศไทยนั้น ไม่มีหลักฐานที่แน่ชัดว่ามีการนำมันสำปะหลังเข้ามาปลูกเมื่อใด แต่คาดว่ามีการนำมันสำปะหลังมาจากประเทศมาเลเซียเมื่อปี พ.ศ. 2329 โดยมีชื่อเรียกว่า มันไม้ หรือมันสำโรง มันสำปะหลังมีชื่อเรียกทั่วไปในภาษาอังกฤษว่า แคสซาวา (Cassava) หรือทาพิโอกา (Tapioca) และมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta crantz*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มันสำปะหลังสามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ สามารถปลูกได้ทั่วไป ยกเว้นในแถบที่ชุ่มน้ำ ฝนตกหรือดินเกลือเค็ม ดังนั้น จึงพบการปลูกมันสำปะหลังได้ทั่วทุกภาค บริเวณที่มีการปลูกมากที่สุด คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออก มีผลผลิตทั่วประเทศอยู่ในระดับ 16 ถึง 18 ล้านตันหัวมันสดต่อปี ถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของโลกรายหนึ่ง (ทั่วโลกมีการผลิตหัวมันสำปะหลังสดประมาณ 160 ล้านตัน) นอกจากนี้ ยังเป็นพืชที่ทนต่อสภาพอากาศที่แห้งแล้งได้ดี

มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทย แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1) ชนิดหวาน (Sweet type) เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic acids, HCN) ต่ำ ไม่มีรสขม ใช้เพื่อการบริโภคของมนุษย์ มีทั้งชนิดเนื้อร่วนนุ่ม และชนิดเนื้อแน่น เหนียว แต่มีจำนวนน้อย

2) ชนิดขม (Bitter type) เป็นมันสำปะหลังที่มีกรดไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic acids, HCN) สูง มีความเป็นพิษ และมีรสขม ไม่เหมาะสำหรับการบริโภคของมนุษย์ หรือนำหัวมันสำปะหลังสดไปใช้ในการเลี้ยงสัตว์โดยตรง แต่จะใช้สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูป เช่น แป้งมัน มันอัดเม็ด และแอลกอฮอล์ เป็นต้น เนื่องจากมีปริมาณแป้งสูง มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นชนิดขมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูป

#### 2.7.1 องค์ประกอบของมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่สามารถเก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่เป็นสีเขียวแล้ว จะสะสมในรูปของคาร์โบไฮเดรต คือ แป้งไว้ในราก และการสะสมแป้งในรากมีความแตกต่างกัน เนื่องจากพันธุ์ของมันสำปะหลัง อายุเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยว และปัจจัยอื่น ๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของหัวมันสำปะหลังอาจจะแตกต่างกันไป โดยทั่วไปหัวมันสำปะหลังที่มีอายุ 12 เดือนที่ได้รับปริมาณน้ำฝนเพียงพอ และไม่มีฝนตกชุกขณะเก็บเกี่ยว จะมีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของมันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	ค่าที่ได้	องค์ประกอบ	ค่าที่ได้
หัวมัน	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง)	เนื้อมัน	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง)
น้ำ	60.21-75.32	แป้ง	71.90-85.00
เปลือก	4.08-14.08	โปรตีน	1.57-5.78
เนื้อ(แป้ง)	25.87-41.88	เยื่อใย	1.77-3.98
ไซยาไนด์ (ppm)	2.85-39.27	เถ้า	1.20-2.8
-	-	ไขมัน	0.06-0.043
-	-	คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59-8.66

ที่มา : มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย (2553)

### 2.7.2 ประโยชน์ของไขมันสำปะหลัง (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543)

การใช้ประโยชน์จากหัวมันสำปะหลังสดนั้นมีตั้งแต่การแปรรูปเบื้องต้นในระดับเกษตรกรจนใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ประโยชน์ของไขมันสำปะหลังแยกตามส่วนต่าง ๆ ของต้น ดังนี้

1) หัวสด ใช้เป็นอาหารมนุษย์ โดยการรับประทานสด ต้ม นึ่ง ย่าง อบ หรือเชื่อม ฯลฯ ใช้เป็นอาหารสัตว์ทั้งที่เป็นหัวสด หรือกากที่เหลือจากการทำแป้งเปลือกของหัว ใช้ส่งโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูป เช่น ทำแป้ง มันเส้น หรือมันอัดเม็ด

2) ใบ ใช้เป็นอาหารมนุษย์ รับประทานเป็นผักสด ต้มจิ้มน้ำพริก แกง ใช้เป็นอาหารสัตว์ในรูปแบบสด หรือตากแห้งผสมปนกับอาหารชั้นเลี้ยงสัตว์ และเป็นอาหารผสม

3) ลำต้น ใช้ทำท่อนพันธุ์ โดยการตัดออกเป็นท่อนๆ สามารถนำไปปลูกได้ ใช้เป็นอาหารสัตว์โดยทำการตัดส่วนยอดใบสด ใช้เลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้องโดยการตากแห้งให้เป็นอาหารหยาบ

4) เมล็ด ใช้สกัดน้ำมันที่มีคุณภาพดี สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยาได้

### 2.7.3 การใช้ประโยชน์จากแป้งมันสำปะหลัง (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543)

1) การบริโภคในครัวเรือน เป็นการใช้แป้งมันสำปะหลังมากที่สุด กล่าวคือ คนไทยบริโภคแป้งมันสำปะหลังประมาณ 7 กิโลกรัมต่อคนต่อปี ซึ่งจะเป็นการปรุงอาหารประจำวันในบ้านเรือน หรือร้านค้าทั่วไป

2) อุตสาหกรรมแป้งตัดแปรรูป แป้งที่ผลิตส่วนใหญ่จะถูกนำมาผลิตเป็นวัตถุดิบสำหรับปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้แป้งมีคุณสมบัติพิเศษ เช่น เหนียวขึ้น ทนความร้อนและทนกรดได้ดีขึ้น แป้งมันสำปะหลังเหมาะสำหรับการผลิตเป็นแป้งตัดแปรรูป เพราะแป้งมันของไทยมีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ เช่น โปรตีน ไขมัน ฯลฯ

3) อุตสาหกรรมผงชูรสและไลซีน ทั้งผงชูรสและไลซีน เป็นกรดอะมิโนที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของโปรตีน ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของโลก และมีการใช้แป้งเพื่อผลิตผงชูรส คิดเป็นปริมาณที่ใช้สูงสุดเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ส่วนไลซีนเป็นกรดอะมิโนที่จำเป็นต้องใช้ผสมอาหารสัตว์

4) อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน เช่น น้ำตาลกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส ซอร์บิทอล และอื่น ๆ ที่ได้จากการย่อยแป้งให้แตกลงเป็นหน่วยของน้ำตาลใช้ในอุตสาหกรรมขนมหวาน ลูกกวาด ยาสีฟัน และยา

5) อุตสาหกรรมอาหาร และสา쿠 อุตสาหกรรมทั่วไปจะใช้แป้งเป็นตัวทำให้เหนียว สร้างลักษณะเงาวาว และน้ำหนักให้กับเนื้ออาหาร ส่วนสาคุเป็นอุตสาหกรรมที่ทำจากการนำแป้งมาขึ้นรูป โดยเครื่องเขย่าให้จับกันเป็นก้อน และร่อนเพื่อคัดขนาดที่ต้องการคั่วและอบแห้งเป็นเม็ด เรียกว่า เม็ดสาคุ

6) อุตสาหกรรมกระดาษ กระดาษทุกแผ่น (ยกเว้นกระดาษบางชนิด เช่น กระดาษชำระ) มีแป้งเป็นตัวประสาน และเคลือบอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักกระดาษ

7) อุตสาหกรรมสิ่งทอ ในการเคลือบเส้นใยจากผ้าจำเป็นที่ต้องใช้แป้งเคลือบ ซึ่งนิยมใช้แป้งตัดแปรรูปโดยประมาณว่าปริมาณแป้งที่ใช้เท่ากับร้อยละ 1 ของน้ำหนักด้าย

8) อุตสาหกรรมไม้อัดและกาว แป้งผสมกับสารเคมีต่าง ๆ เป็นกาวติดกระดาษ เช่น กระดาษลูกฟูก รวมทั้งใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัดด้วย ไม้อัดหนึ่งแผ่นจะมีแป้งอยู่ 0.4 กิโลกรัม

9) อุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์ กรรมวิธีการผลิตแอลกอฮอล์โดยการย่อยสลายแป้งจากวัตถุดิบให้เป็นน้ำตาล แล้วนำไปหมักโดยยีสต์เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ เสร็จแล้วนำไปกรองและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลั่นเพื่อให้ได้แอลกอฮอล์ไร้น้ำ (แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ 99.5%) ซึ่งสามารถนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินชนิดธรรมดาเพื่อเพิ่มค่าออกเทนโดยผสมประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ใช้แทนน้ำมันเบนซินชนิดพิเศษ น้ำมันผสมแอลกอฮอล์นี้เรียกว่าแก๊สโซฮอล์ สามารถใช้กับรถยนต์ทั่วไปได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ และยังช่วยลดมลภาวะของอากาศเพราะไม่มีสารตะกั่ว

นอกจากนี้ ยังมีการใช้แบริ่งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีก เช่น ในการผลิตยาเม็ดเพื่อใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณในการทำอาหารสัตว์ เพื่อใช้เป็นตัวยึดเกาะซึ่งแนวโน้มการใช้แบริ่งมันสำปะหลังในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เหล่านี้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มปริมาณสูงขึ้น

## 2.8 กากมันสำปะหลัง (อุตสาหกรรมแบริ่งมันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2553)

กระบวนการผลิตแบริ่งมันสำปะหลังมีขั้นตอนดังนี้

### 1) การรับหัวมันสำปะหลัง

หลังจากหัวมันสำปะหลังถูกส่งมายังโรงงานโดยรถบรรทุก ผ่านขั้นตอนการชั่งน้ำหนัก และหัวมันสำปะหลังจะถูกสุมขึ้นมาเพื่อทดสอบหาปริมาณแบริ่งโดยอาศัยหลักการลอยตัวของวัตถุในของเหลว เพื่อตีราคาในการซื้อขาย หัวมันสำปะหลังจะถูกนำมาเทรวมกันไว้บนลานกองมันสำปะหลังที่เป็นพื้นคอนกรีต เพื่อรอเข้าสู่กระบวนการผลิตต่อไป

### 2) การเตรียมหัวมันสำปะหลังและทำความสะอาด

หัวมันสำปะหลังที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพแล้ว จะถูกส่งเข้าสู่เตาแบริ่งร้อนดินและทราย เพื่อแยกเอาดินออก จากนั้นลำเลียงเข้าสู่เครื่องล้างเพื่อทำความสะอาดหัวมันอีกครั้ง แล้วจึงนำเข้าสู่เครื่องสับและชุดเปลือกเพื่อให้หัวมันมีขนาดเล็กและแยกเอาเปลือกออกก่อนเข้าสู่เครื่องบด

### 3) การสับหัวมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังที่สะอาดจะถูกส่งไปยังเครื่องสับหัวมัน เพื่อสับหัวมันสำปะหลังให้เล็กลงขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว แล้วขึ้นมันสำปะหลังนี้จะตกเข้าสู่เครื่องชุดหรือบดหัวมันสำปะหลัง ซึ่งอยู่ด้านล่างทำให้ได้มันสำปะหลังมีขึ้นละเอียดยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดแบริ่ง

### 4) การสกัดแบริ่งมันสำปะหลัง

หลังจากนั้นมันบดจะถูกเติมน้ำและถูกนำเข้าสู่เครื่องสกัดแบริ่ง เพื่อสกัดแยกแบริ่งออกจากเซลลูโลส โดยทั่วไปจะเป็นการสกัดแบบหลายครั้ง โรงงานส่วนใหญ่จะใช้ชุดสกัด 3 ชุด แต่โรงงานขนาดใหญ่ อาจใช้ชุดสกัดถึง 4 ชุดต่อเนื่องกัน โดยชุดแรกซึ่งเป็นการสกัดหยาบจะใช้ตะแกรงขนาด 60-80 mesh และชุดสุดท้ายจะเป็นการสกัดละเอียดโดยใช้ผ้ากรองขนาด 90 mesh ในขั้นตอนนี้ โรงงานมีการเติมน้ำกำมะถัน เพื่อยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ซึ่งจะเปลี่ยนโมเลกุลของแบริ่งเป็นกรดแลคติก กากมันสำปะหลังจากขั้นตอนการสกัดแบริ่งจะมีน้ำอยู่ในปริมาณมาก และมีปริมาณแบริ่งเหลืออยู่ในกากมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลังจะถูกแยกออกจากน้ำแบริ่งเพื่อนำเข้าสู่เครื่องอัดกากและนำไปตากแดดเพื่อนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์หรือนำไปผสมกับมันเส้นเพื่อทำมันอัดเม็ดต่อไป

### 5) การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแบริ่ง

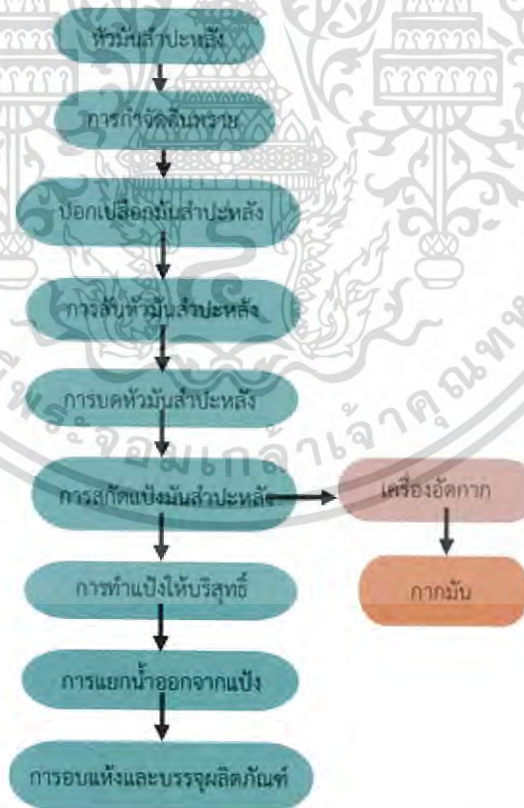
เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและปฏิกิริยาชีวเคมีจากจุลินทรีย์ซึ่งจะส่งผลให้คุณภาพของแบริ่งลดลง การผลิตแบริ่งมันสำปะหลังจึงต้องกระทำภายในเวลาอันสั้นที่สุด ดังนั้นในกระบวนการเพิ่มความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นของแป้ง จึงมักเป็นกระบวนการต่อเนื่องที่ไม่มีถึงพักเช่นเดียวกับกระบวนการอื่น ๆ น้ำแป้งที่ถูกแยกออกจากกากมันสำปะหลังจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องแยก (Separators) ซึ่งอาจเป็นเครื่องแยกชนิดหมุนเหวี่ยง (Centrifugal separators) หรือ ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) โดยโรงงานส่วนใหญ่จะใช้เครื่องแยกชนิดหมุนเหวี่ยง และเพื่อให้ได้แป้งมันสำปะหลังที่มีคุณภาพดีจึงมักใช้เครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงจำนวน 2 ชุดเพื่อแยกกากมันสำปะหลังออกให้หมดและทำให้น้ำแป้งเข้มข้น น้ำที่ใช้ในการล้างแป้งที่เติมในเครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงนี้อาจจะเป็นน้ำหรือน้ำก้ำมะถันก็ได้

6) การทำให้แป้งแห้งและการบรรจุผลิตภัณฑ์

น้ำแป้งจะถูกแยกน้ำออกจากแป้งโดยใช้เครื่องเซนติฟิวจ์ (Centrifuge) แป้งที่ถูกแยกเอาน้ำออกแล้วจะถูกพ่นเข้าสู่ท่อไอร้อนซึ่งมีลมร้อนประมาณ 200 องศาเซลเซียส จากเตาเผา เป่าเข้ามาด้วยความดันสูง ความแรงของลมจะพัดเอาแป้งขึ้นไปตามปล่องสูง แล้วตกมาสู่ไซโคลน (Cyclone) ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้แป้งแห้งเป็นช่วงเวลาดสั้นๆ เพื่อป้องกันการรวมตัวของแป้งเป็นเม็ดและเพื่อป้องกันการสลายตัวของแป้งอีกทางหนึ่งด้วย ลมร้อนที่ใช้ในการทำให้แป้งแห้งเกิดจากการเผาน้ำมันเตา และผ่านการกรองก่อนจะถูกเป่าเข้าสู่เครื่องอบแห้งเพื่อป้องกันแป้งถูกปนเปื้อนด้วยสิ่งสกปรก แป้งมันสำปะหลังที่ได้จากไซโคลนจะเป็นแป้งที่แห้งและละเอียด แต่ยังร้อนอยู่ ซึ่งจะต้องทำให้เย็นโดยทันที ด้วยการใช้ไซโคลนเย็น ก่อนจะถูกปล่อยลงสู่เครื่องร่อนแป้ง เพื่อให้อนุภาคของแป้งมีความสม่ำเสมอ แป้งที่แห้งแล้วจะถูกร่อนผ่านตะแกรงก่อนที่จะบรรจุลงสู่ไซโล และบรรจุแป้งลงถุง



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่เป็นแบบมาตรฐาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม ดัดแปลง (2549)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิรสมัย (2551) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ระเหยในระบบการหมักแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วยถังหมักก๊าซปริมาตร 2,000 ลิตร มีปริมาตรการหมัก 1,250 ลิตร และมีการกวนอย่างสมบูรณ์ เติมน้ำของเหลวกรดอินทรีย์เข้าสู่ถังหมักก๊าซ 16 ลิตรต่อวัน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ตามลำดับ ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 78 วัน คิดเป็นอัตราการป้อนสารอินทรีย์สาร (OLR) เท่ากับ 1.94, 2.11, 2.43 และ 2.72 กรัมซีโอดีต่อลิตร.วัน ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่าเมื่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในระบบเพิ่มขึ้น ปริมาณก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วยจนถึงระดับหนึ่ง คือที่ 50 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) มีปริมาตรของเหลวกรดอินทรีย์ระเหยเข้าระบบ 12,109 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุด 1,118.96 ลิตรต่อวัน ประกอบด้วยมีเทนร้อยละ 58.84 และมีประสิทธิภาพการกำจัด COD, BOD, TS, TVS, และ VFAs สูงสุดคือ 91.71, 91.18, 91.95, 94.40 และ 80.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาตรของเหลวกรดอินทรีย์ระเหยเข้าระบบ 15,713 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และมีประสิทธิภาพการกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลง คือ ระบบสามารถผลิตก๊าซได้เพียง 230.50 ลิตรต่อวัน ประกอบด้วยมีเทนร้อยละ 20.61 และมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำสุดเป็น 84.90, 84.06, 83.86, 92.20 และ 70.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ระบบมีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยค่อนข้างสูง จนเป็นสาเหตุที่ทำให้แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถทนต่อสภาพที่ไม่เหมาะสมได้และไม่ผลิตก๊าซมีเทนในที่สุด

พงษ์พันธ์และธนากร (2554) ศึกษาหัวเชื้อจุลินทรีย์และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมัน และศึกษาผลของอุณหภูมิและสภาพความเป็นกรด-ด่าง ที่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีปริมาณสูงสุด การออกแบบการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตอน ตอนที่ 1 เปรียบเทียบหัวเชื้อจุลินทรีย์จากฟาร์มสุกร, ฟาร์มวัว และโรงงานแป้งมันสำปะหลังในการผลิตก๊าซชีวภาพและปรับค่า pH เท่ากับ 7 (เป็นกลาง) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่าหัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานแป้งมันสำปะหลังเกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุด ตอนที่ 2 เป็นการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิ 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส และได้ควบคุมค่า pH เท่ากับ 7 (เป็นกลาง) พบว่า อุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพสูงที่สุดคือ 35 องศาเซลเซียส ตอนที่ 3 ทดลองโดยแปรค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5 จนถึง 10 โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1.0 จากผลการศึกษาพบว่าการใช้กากมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ ควรใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง และควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส ค่า pH เท่ากับ 8

สุรลักษณ์และสิรินทรเทพ (2557) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพที่เป็นแหล่งพลังงานทางเลือก โดยใช้หัวมันสำปะหลังดิบและกากมันสำปะหลัง ในระบบถังหมักขั้นตอนเดียวในระดับห้องปฏิบัติการ ที่มีปริมาตรในการหมัก 5-50 ลิตร ที่อุณหภูมิ 29-31 องศาเซลเซียส โดยไม่มีการกวน จากผลการศึกษาพบว่า ได้ก๊าซมีเทนที่มีศักยภาพสูงเพียงพอต่อการใช้เป็นแหล่งพลังงานจากหัวมันสำปะหลังดิบ ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยที่ผลิตได้ปริมาณมากและมีมูลค่าต่ำ จากกากมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานแป่งมันสำปะหลัง โดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน เมื่อผลิตมีเทนที่สภาวะเหมาะสมจากการศึกษาที่ปริมาตรหมัก 50 ลิตร ได้เปรียบเทียบการใช้หัวมันสำปะหลัง 2 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ CMR 35-22-196 (ระยอง 11) และระยอง 5 มีแป้งร้อยละ 25.56 และ 28.72 ตามลำดับ พบว่าหัวมันสำปะหลังที่เตรียมเป็นชิ้นหัวมันแห้งมีความชื้นร้อยละ 17.37 และ 14.18 ตามลำดับ ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 1.0 (จากผลการศึกษาช่วงร้อยละ 0.25-16.0) เต็มยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากการศึกษาแหล่งไนโตรเจนต่างกัน 3 ชนิด กิจกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์สิ้นสุดภายใน 38 วัน และ 35 วัน ตามลำดับ ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด 313 และ 304 ลิตร หรือ 363 และ 340 ลิตรต่อกิโลกรัมหัวมันสด ที่มีความชื้นร้อยละ 52 และ 56 ตามลำดับ เทียบเท่าปริมาณก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 626 และ 608 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมด ก๊าซชีวภาพมีมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุดร้อยละ 75.9 และ 76.0 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการหมัก 21 วัน และ 19 วัน ความเข้มข้นของมีเทนโดยรวมในปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดร้อยละ 52 และ 61 ซึ่งได้มีเทนทั้งสิ้น 161 และ 185 ลิตร เทียบเท่าปริมาณมีเทนทั้งหมดที่เกิดขึ้น 322 และ 370 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมด ตามลำดับ สำหรับการผลิตมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง ตัวอย่างกากมันสำปะหลังที่เลือกมาศึกษามีความชื้นร้อยละ 83 มีแป้งร้อยละ 24.40 เมื่อใช้กากมันสำปะหลังแห้งที่เตรียมมีความชื้นร้อยละ 15.19 ปริมาณของของแข็งทั้งหมดร้อยละ 1.0 จากผลการศึกษาช่วงร้อยละ 0.5-4.0 เต็มยูเรียร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากการศึกษาไนโตรเจนที่แตกต่างกัน 3 ชนิดในปริมาตรหมัก 50 ลิตร ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสิ้น 148 หรือ 69 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมด ได้มีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุดร้อยละ 75.40 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาการหมัก 38 วัน ความเข้มข้นของมีเทนโดยรวมในปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดร้อยละ 56 ซึ่งได้มีเทนทั้งสิ้น 82 ลิตร เทียบเท่าปริมาณมีเทนทั้งหมดที่เกิดขึ้น 165 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมด

**วิภาพรและคณะ (2559)** ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการ ระบบประกอบด้วยถังหมักสองถังคือ ถังหมักกรดมีปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนมีปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาทีและหยุดกวน 30 นาที เต็มกากมันสำปะหลัง 277.3 กรัม โดยปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำประปา (1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรด) ทุกวัน ในขณะที่เดียวกันสารละลายในถังหมักกรดจะถูกเติมลงในถังหมักก๊าซมีเทนในปริมาตรเดียวกันโดยใช้ปั๊ม ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน จากผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบกากมันสำปะหลังมีแป้ง  $90.47 \pm 14.70$  กรัมต่อลิตรต่อกิโลกรัมกากมันสำปะหลังโดยน้ำหนักเปียก หลังจากการหมักในสภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอนโดยใช้ระยะเวลาในการหมักของถังหมักกรด 28 วัน และถังหมักก๊าซมีเทน 74 วัน พบว่า กากมันสำปะหลังมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ  $19.69 \pm 0.19$  สภาวะไนถังกรดมีค่าพีเอช 3.32-3.40 และถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าพีเอช 6.67-7.40 ประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 88.15-93.18 เปอร์เซ็นต์ และการกำจัดของแข็งระเหยง่ายอยู่ในช่วง 94.41-97.16 เปอร์เซ็นต์ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ  $244.41 \pm 149.09$  มิลลิลิตรของก๊าซชีวภาพต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรัมของของแข็งระเหยง่าย และ  $2.83 \pm 0.63$  ลิตรของก๊าซชีวภาพต่อกรัมของกรดไขมันระเหย อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย  $6.50 \pm 2.05$  ลิตรต่อวัน หรือ  $23.44 \pm 7.39$  มิลลิลิตรของก๊าซชีวภาพต่อกรัมกากมันสำปะหลังโดยน้ำหนักเปียก โดยก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ประกอบด้วยก๊าซมีเทน  $58.08 \pm 8.37$  เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  $25.64 \pm 9.75$  เปอร์เซ็นต์ ก๊าซออกซิเจน  $2.30 \pm 2.09$  เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์  $414.75 \pm 258.15$  ส่วนในล้านส่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 สารเคมี

- 1) กรดซัลฟิวริก (conc.  $H_2SO_4$ ) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 2) กรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 4) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 5) โซเดียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 6) โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_3O_3$ ) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 7) โพแทสเซียมไนเตรด ( $KNO_3$ ) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 8) โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 9) โพแทสเซียมซัลเฟต ( $K_2SO_4$ ) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 10) คอปเปอร์ซัลเฟต ( $CuSO_4$ ) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 11) ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 12) เอธิลแอลกอฮอล์ 95% (Ethyl alcohol) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 13) ฟีนอล (Phenol) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 14) ไอร์ออนแอมโมเนียมซัลเฟต ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 15) 1,10-phenanthroline monohydrate ( $C_{12}H_{18}N_2 \cdot H_2O$ ) บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 16) ไอร์ออนซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 17) เมธิลเรด (Methyl red) บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 18) เมทิลีนบลู (Methylene blue) บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
- 19) กลูโคส (D-Glucose) เกรตดิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี

##### 3.1.2 อุปกรณ์

- 1) เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น Genesys 10S UV-Vis บริษัท Thermo Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น C860 version 1.2 บริษัท Hanna Instruments ประเทศเบลเยียม
- 3) เตาเผา (Muffle furnace) รุ่น Centroller P320 บริษัท Naberthem ประเทศเยอรมนี
- 4) ตู้อบ (Oven) รุ่น UN55 บริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ML 204/01 บริษัท Metter Toledo ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
- 6) เครื่องกรองลดความดัน รุ่น Aspirator บริษัท Evela Tokyo ประเทศญี่ปุ่น
- 7) เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (Gas data meter) รุ่น GFM 416 บริษัท Best Technic ประเทศอังกฤษ
- 8) ชุดเครื่องกลั่นเจลด้าล (Kjeldahl digestion apparatus รุ่น KI Cerhardt บริษัท Scientific Promotion Co.,Ltd. ประเทศไทย
- 9) หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ใช้แก้วที่ทำด้วยบอโรซิลิเกต (Borosilicate Culture tube) ขนาด 16x100 mm ที่มีฝาเกลียวชนิดทีเอฟอี (Tetrafluoroethylene, TFE)
- 10) ฮีตตั้งบล็อก (Heating Block) กล่องอลูมิเนียมจตัน ลึก 45-50 mm
- 11) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 12) กระจกกรองใยแก้ว เบอร์ 42 บริษัท Macherey-Nagel ประเทศเยอรมนี
- 13) เครื่องแก้วต่าง ๆ

### 3.1.3 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ (Feed)

กากมันสำปะหลังที่ได้จากบริษัท ราชสีมา กรีน เอ็นเนอร์ยี จำกัด จังหวัดนครราชสีมาโดยนำเปลือกมันสำปะหลังใส่ถุงพลาสติกที่มีซิปล็อคแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพ การเตรียมสารละลายกากมันสำปะหลัง โดยนำกากมันสำปะหลังมาละลายที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งน้ำหนักกากมันสำปะหลัง 50 กรัม ผสมน้ำประปาให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) เพื่อป้อนเข้าสู่ระบบในถังหมักกรด ดังแสดงในรูปที่ 3.1



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.1 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ

(ก) กากมันสำปะหลัง (ข) กากมันสำปะหลังผสมน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองได้มาจากหัวเชื้อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผักจากโรงงานผลิตขนมปัง โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ซึ่งถังหมักกรดเป็นเชื้อที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และถังหมักก๊าซชีวภาพนำเชื้อมาจากบ่อบำบัดน้ำเสียของบริษัท เพอร์ซิเดนท์ เบเกอร์ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรม เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร จากนั้นทำการปรับสภาพถังหมักกรดด้วยกากมันสำปะหลัง 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมเข้ากับหัวเชื้อที่ได้มาจากโรงงานผลิตขนมปัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และปรับด้วยน้ำประปาให้ได้ 27.73 ลิตร ส่วนถังหมักก๊าซมีเทนเติมหัวเชื้อเท่ากับปริมาตรบรรจุของถัง ปรับสภาพเป็นเวลา 1 สัปดาห์

### 3.1.5 ระบบถังหมัก

ถังหมักในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digestion) ที่มีการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) แสดงดังรูปที่ 3.2 ได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.ปราโมทย์ ศิริโรจน์ อาจารย์ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งประกอบด้วย ถังหมักกรด ถังหมักก๊าซมีเทน มอเตอร์ เครื่องตั้งเวลา และระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

1) ถังหมักกรด (Acid tank) ตัวถังทำด้วยสแตนเลส ความหนา 1 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 35.5 เซนติเมตร ความสูง 36.5 เซนติเมตร ด้านบนของตัวถังปิดด้วยแผ่นพลาสติกอะครีลิกใส ความหนา 8 มิลลิเมตร ยึดติดกับตัวถังด้วยน็อต และมีประเก็นยางเพื่อป้องกันการรั่วซึม โดยมีปริมาตรความจุ 36.14 ลิตร ปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร เจาะบริเวณตัวถังด้านข้างเป็นท่อต่อเข้ากับตัวถังหมักก๊าซ ส่วนทางด้านบนของตัวถังเจาะเป็นท่อสำหรับป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ระบบถังหมักและท่อของเหลวจากถังหมักกรดเข้าสู่ถังหมักก๊าซ ภายในตัวถังหมักมีการกวนผสมด้วยชุดสำหรับกวน โดยเพลลาของชุดกวนนี้ติดอยู่กับฝาถังของถังหมักด้วยลูกปืน และมีชุดประกอบเพลาลักษณะเป็นปลอกสวมตัวเพลลาอยู่ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เพลลาแกว่งขณะหมุนซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อถังหมักทำให้ถังรั่วซึมได้ เพลลาและชุดประกอบเพลลาเป็นสแตนเลส มีใบพัดติดอยู่ที่ปลายเพลลา 1 ชุด ซึ่งชุดสำหรับกวนต่อกับมอเตอร์ขนาด 25 วัตต์ โดยมีความเร็วในการหมุนประมาณ 10 รอบต่อนาที ซึ่งควบคุมด้วยการใช้เครื่องตั้งเวลา ตั้งไว้ให้ทำงาน 15 นาที และหยุดปั่นกวน 15 นาที เพื่อป้องกันไม่ให้อิทธิพลทำงานหนักเกินไป ดังแสดงรูปที่ 3.3 (ก)

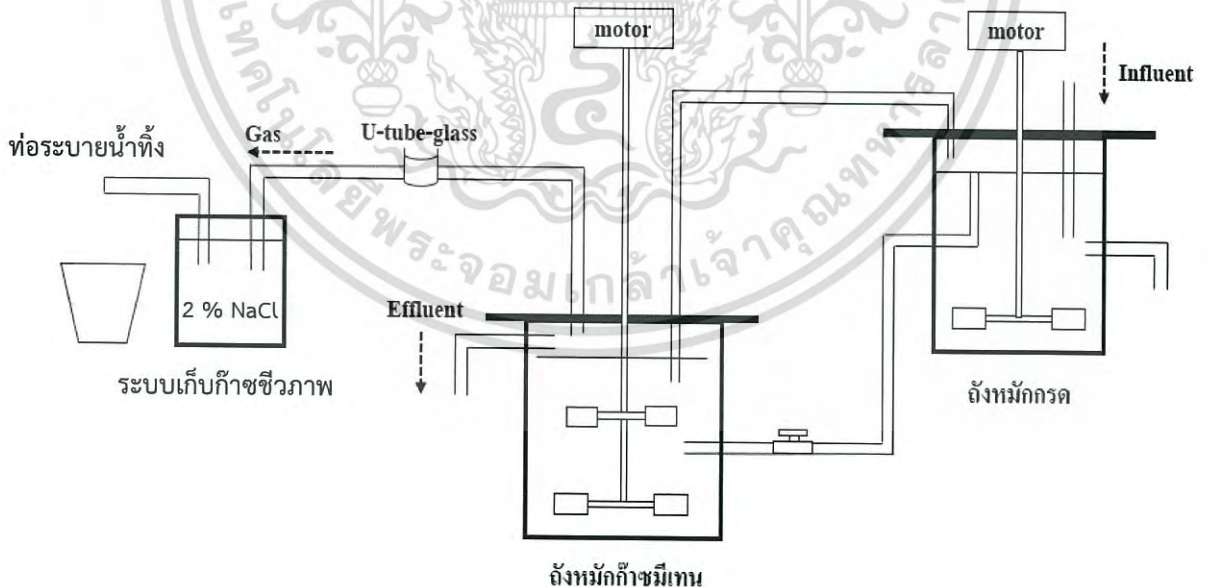
2) ถังหมักก๊าซมีเทน (Methane tank) ตัวถังทำด้วยสแตนเลส ความหนา 1 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 41.0 เซนติเมตร ความสูง 51.0 เซนติเมตร ด้านบนของถังปิดด้วยแผ่นพลาสติกอะครีลิกใส หนา 8 มิลลิเมตร ยึดติดกับตัวถังด้วยน็อต และมีประเก็นยางเพื่อป้องกันการรั่วซึม โดยมีปริมาตรความจุ 67.36 ลิตร ปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร เจาะถังด้านข้างเป็นท่อต่อของเหลวที่ล้นออกจากถัง ส่วนด้านบนของถังเจาะเป็นท่อนำก๊าซ ภายในถังหมักจะมีการกวนผสมด้วยชุดสำหรับกวนโดยที่เพลลาของชุดกวนนี้ติดอยู่กับฝาถังของถังหมักด้วยลูกปืน และมีชุดประกอบเพลาลักษณะเป็นปลอกสวมตัวเพลลาอยู่ เพื่อป้องกันไม่ให้เพลลาแกว่งขณะหมุนซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อตัวถังหมักทำให้ถังหมักรั่วซึมได้ เพลลาและชุดประกอบเพลลาเป็นสแตนเลส มีใบพัด 2 ชุดซึ่งติดอยู่ปลายเพลลา 1 ชุด และที่ระดับสูงกว่าปลายเพลลาอีก 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุด ซึ่งสำหรับกวนต่อกับมอเตอร์ขนาด 25 วัตต์ ที่มีความเร็วในการหมุนประมาณ 10 รอบต่อนาที ซึ่งควบคุมด้วยการใช้เครื่องตั้งเวลา ตั้งไว้ให้ทำงาน 15 นาที และหยุดปั่นกวน 15 นาที เพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนทำงานหนักเกินไป และก๊าซชีวภาพที่ได้จะถูกส่งผ่านสายยางไปยังระบบเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบและวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อไป แสดงดังรูปที่ 3.3 (ข)



(ก)



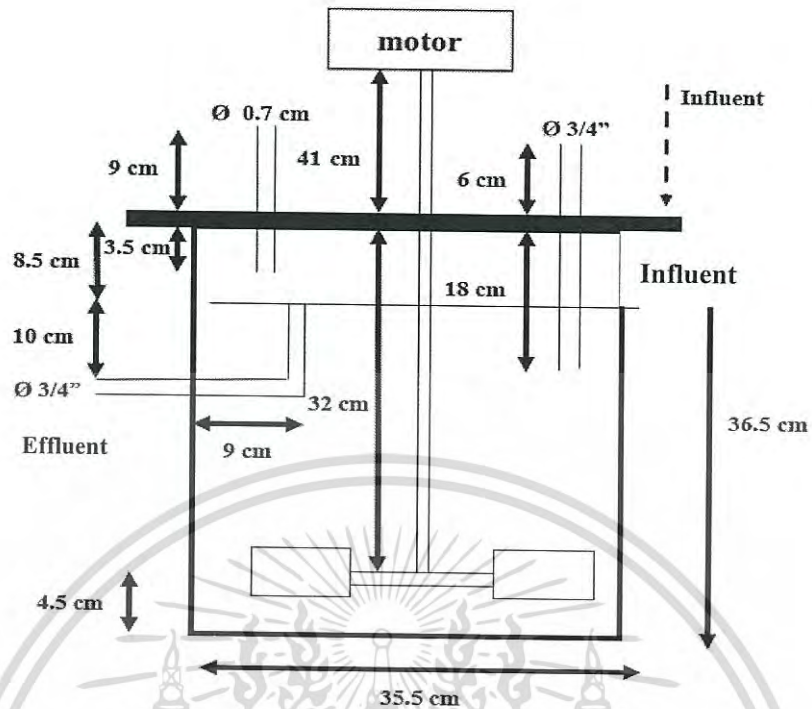
(ข)

รูปที่ 3.2 ระบบการหมักแบบสองขั้นตอนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

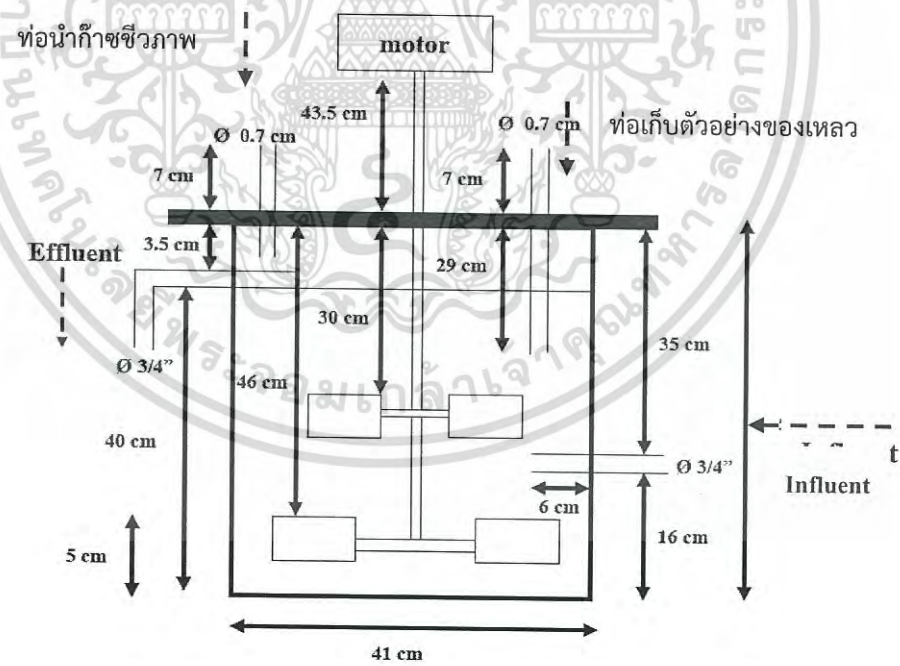
(ก) ถังหมักแบบสองขั้นตอน

(ข) แผนภาพของระบบถังหมักสองขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 รายละเอียดถังหมักแบบสองขั้นตอน

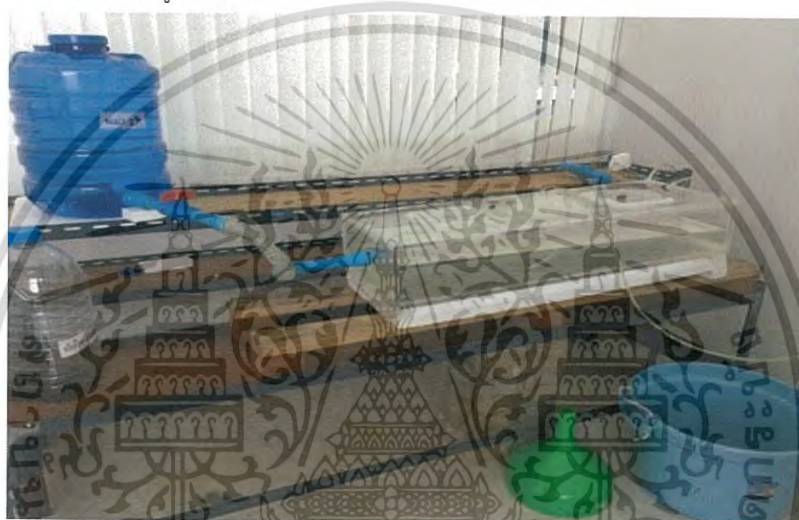
(ก) ถังหมักกรด (ข) ถังหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) มอเตอร์ (Motor) มอเตอร์ที่ใช้กวนเพื่อให้ของเหลวภายในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน มีการกวนผสมกัน มีขนาด 25 วัตต์ และขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดไฟ 220 โวลต์ รุ่น 4RK25GK-C บริษัท Oriental motor

4) เครื่องตั้งเวลา (Timer) เครื่องตั้งเวลาที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ต่อเข้ากับถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน มีลักษณะเป็นแผงวงจรไฟฟ้า รุ่น ES107 บริษัท Eurosonic

5) ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยพลาสติกอะคริลิกใส ขนาดความจุ 40 ลิตร และถังน้ำบรรจุ 2% NaCl 20 ลิตร ก๊าซชีวภาพที่ออกมาจากถังหมักก๊าซมีเทนจะเข้าสู่ทางด้านบนของถัง และ 2% NaCl จะถูกแทนที่ออกจากระบบทางท่อด้านล่าง วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยการวัดปริมาตร 2% NaCl ที่ถูกแทนที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

(ก) ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

(ข) แผนภาพระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุป้อน

1) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของกากมันสำปะหลังเบื้องต้น โดยทำการวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (pH), สภาพด่างทั้งหมด (Alkalinity, Alk), ความชื้น (Moisture content), ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen, TKN), ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS), ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS), ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solids, TSS), ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (Volatile suspended solids, VSS), กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFAs), ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD), ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate) และปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

2) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของสารละลายกากมันสำปะหลัง โดยทำการวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าสภาพการเป็นด่าง (Alkalinity, Alk), ความชื้น (Moisture content), ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS), ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS), ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solids, TSS), ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (Volatile suspended solids, VSS), กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFAs), ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	pH meter
สภาพด่างทั้งหมด (Alkalinity)	Titration โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ความชื้น (Moisture content)	อบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids)	ระเหยนํ้าออกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids)	เผาที่อุณหภูมิ 550 °C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solids)	กรองและอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids)	วิธีมาตรฐาน APHA (2012)

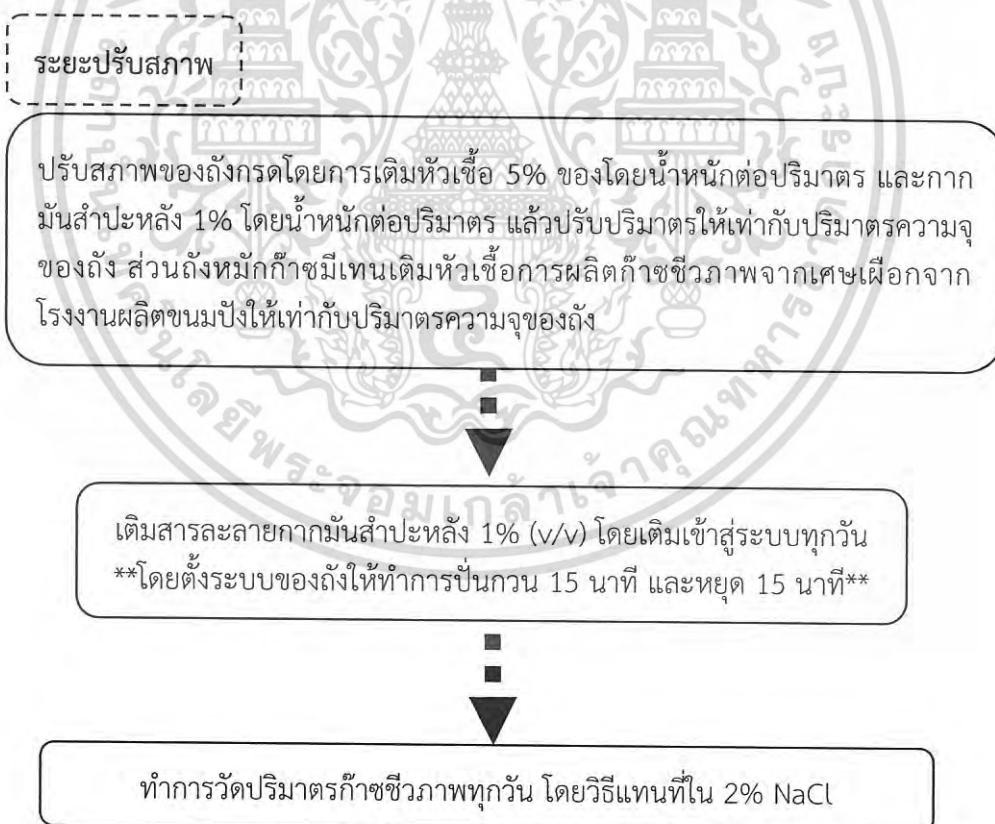
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand)	โดยวิธีมาตรฐาน APHA (2012)
ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate)	วิธีฟินอล-ซัลฟูริกแอซิด
ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch)	วิธีฟินอล-ซัลฟูริกแอซิด
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen)	Kjeldahl method

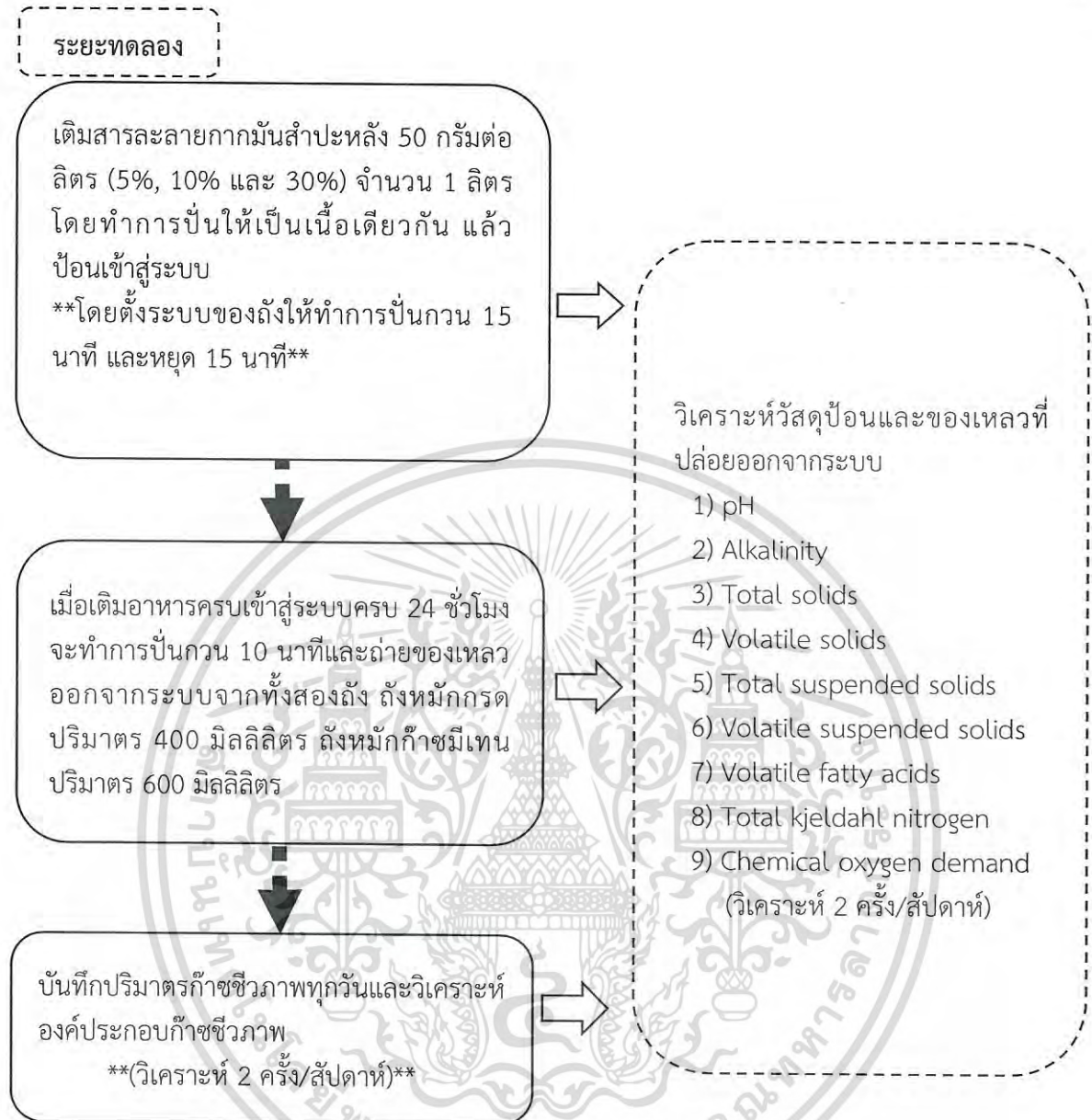
### 3.2.2 ศึกษาสถานะของระบบในระหว่างการหมักและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

การทดลองเริ่มต้นตั้งแต่เดือน 22 กันยายน 2560 สิ้นสุด 30 พฤศจิกายน 2560 ใช้เวลารวม 72 วัน การศึกษาสถานะของระบบในระหว่างการหมักแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ระยะเวลาปรับสภาพ เพื่อให้จุลินทรีย์คุ้นเคยกับวัสดุป้อน และระยะทดลอง ดังสรุปในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนระยะปรับสภาพของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แผนผังขั้นตอนระยะทดลองของระบบ

1) เติมวัสดุบดสารละลายกากมันสำปะหลัง 5%, 10% และ 30% (v/v) โดยตั้งระบบให้ปั่นกวน 15 นาที หยุด 15 นาที

2) ศึกษาคุณลักษณะของวัสดุบด (Feed) และน้ำตะกอนที่ปล่อยออกจากระบบ (Slurry) โดยทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH), สภาพต่างทั้งหมด (Alkalinity, Alk), ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS), ค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS), ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solids, TSS), ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (Volatile suspended solids, VSS), กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFAs), ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

kjeldahl nitrogen, TKN), ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD) ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์สัปดาห์ละ 2 ครั้ง

- 3) ศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำเพื่อวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพของระบบทุกวัน
- 4) ศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยใช้เครื่อง Gas data meter ได้แก่ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), ก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) วิเคราะห์สัปดาห์ละ 2 ครั้ง

### 3.2.3 วิเคราะห์ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ภายในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

- 1) เก็บตัวอย่างจากถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน
- 2) นำมาตรวจสอบลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์โดยการย้อมสี Gram stain ตามวิธี Austrian, (1960)
- 3) ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1,000 เท่า และบันทึกภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วย ถังหมักกรดมีปริมาตร 27.73 ลิตร ถังหมักก๊าซมีเทนมีปริมาตร 52.83 ลิตร เก็บก๊าซมีเทนโดยวิธีแทนที่ใน 2 % NaCl การทดลองแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการปรับสภาพของระบบเพื่อให้ระบบมีสภาพคงที่ ระหว่างวันที่ 22-28 กันยายน พ.ศ. 2560 และช่วงที่สอง เป็นช่วงทดลอง โดยแปรค่าการเติมกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นที่ 5, 10, 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเก็บตัวอย่างของเหลวจากถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนมาทำการวิเคราะห์ ได้ผลการศึกษาดังนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการป้อนเข้าสู่ระบบ (Feed) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.1 ภาคผนวก ข)

จากผลการศึกษาพบว่า ค่าพีเอชของกากมันสำปะหลังซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการป้อนเข้าระบบมีสภาพเป็นกรด เนื่องจากในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะมีการเติมกรดกำมะถันเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ กากมันสำปะหลังประกอบด้วย แป้งทั้งหมด  $78.23 \pm 9.26$  กรัมต่อลิตร คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด  $161.05 \pm 41.15$  กรัมต่อลิตร และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด  $40.91 \pm 0.06$  มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังคงมีปริมาณสารอาหารเพียงพอเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้ให้เป็นก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

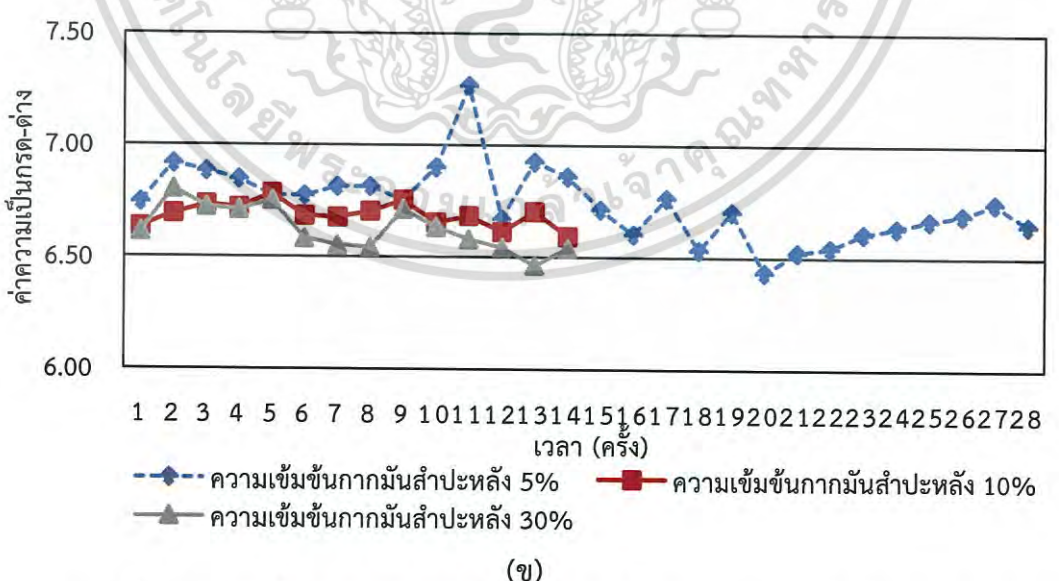
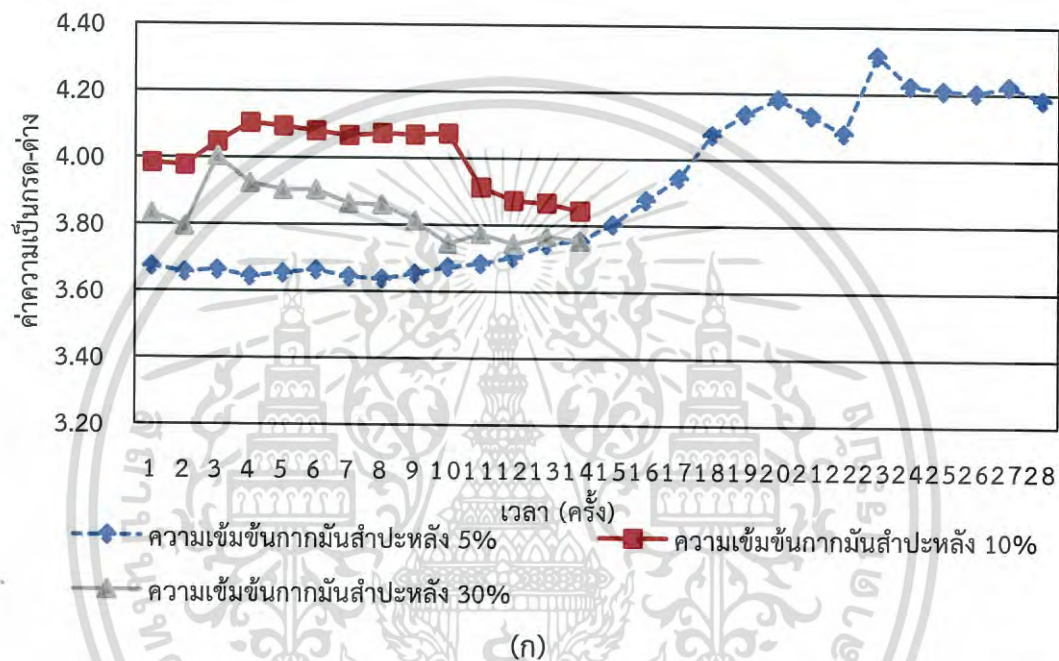
คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง	ค่าที่ได้
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	$3.35 \pm 0.02$
ความชื้น (Moisture content) (%)	$83.53 \pm 0.03$
ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (Total carbohydrate) (g/L)	$161.05 \pm 41.15$
ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch) (g/L)	$78.23 \pm 9.26$
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	$40.91 \pm 0.06$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการศึกษาสภาวะของเหลวภายในถังหมักกรด และถังหมักก๊าซมีเทน ที่อัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 5, 10, 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

### 4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ

การปรับสภาพของระบบ โดยป้อนกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อัตราการเติมที่ 1 ลิตรต่อวัน เป็นเวลา 7 วัน (22 กันยายน ถึง 1 ตุลาคม 2560) (ช่วงที่ 1) ได้ค่าพีเอชของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 3.70-3.90 และถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.72-7.01 จากนั้น จึงทำการทดลองในช่วงทดลองต่อไป



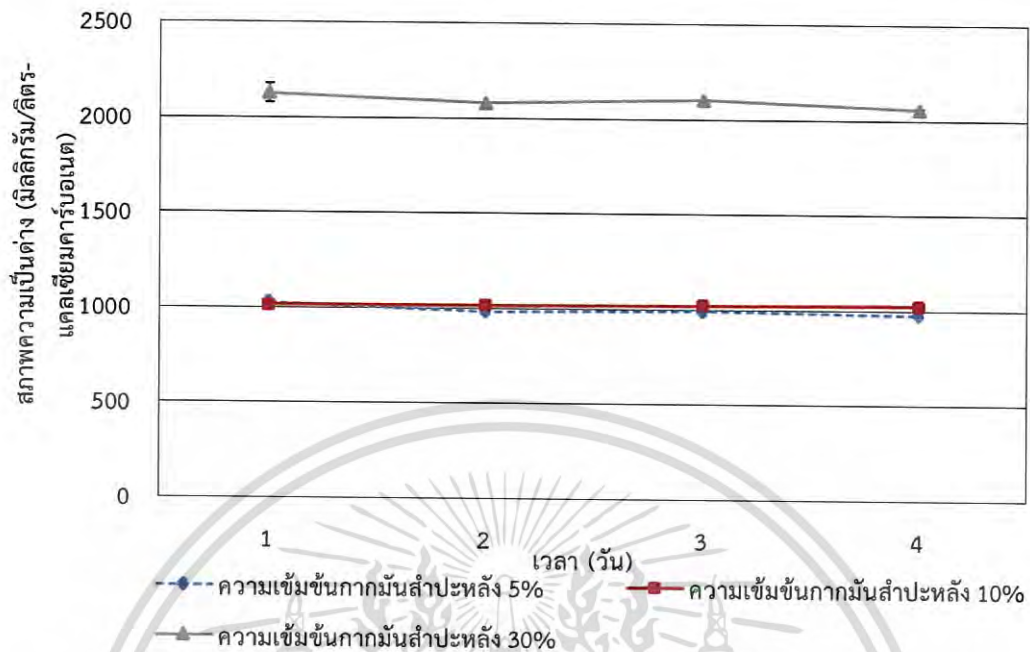
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ของ (ก) ถังหมักกรด และ (ข) ถังหมักก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2.1-ข-2.3 และ ข-3.1-ข.3.4 ภาคผนวก ข) แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในช่วงทดลอง พบว่าที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าพีเอชของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 3.64-4.31 และถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.43-6.92 ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าพีเอชของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 3.83-4.10 และค่าพีเอชของถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.59-6.78 และที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าพีเอชของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 3.74-4.00 และค่าพีเอชของถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.46-6.75 จากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชในถังหมักกรดมีค่าเป็นกรดเนื่องจาก Hydrolytic bacteria จะย่อยแบ่งในกากมันสำปะหลังให้เป็นกรดอินทรีย์ ส่วนพีเอชในถังหมักก๊าซชีวภาพจะมีค่าค่อนข้างเป็นกลาง เนื่องจาก Methanogen bacteria จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ นั่นคือ การเติมกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 5, 10, 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ยังคงมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วงเหมาะสมต่อการเจริญของ Hydrolysis bacteria และ Methanogen bacteria (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2552)

#### 4.2.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นต่างในระบบ

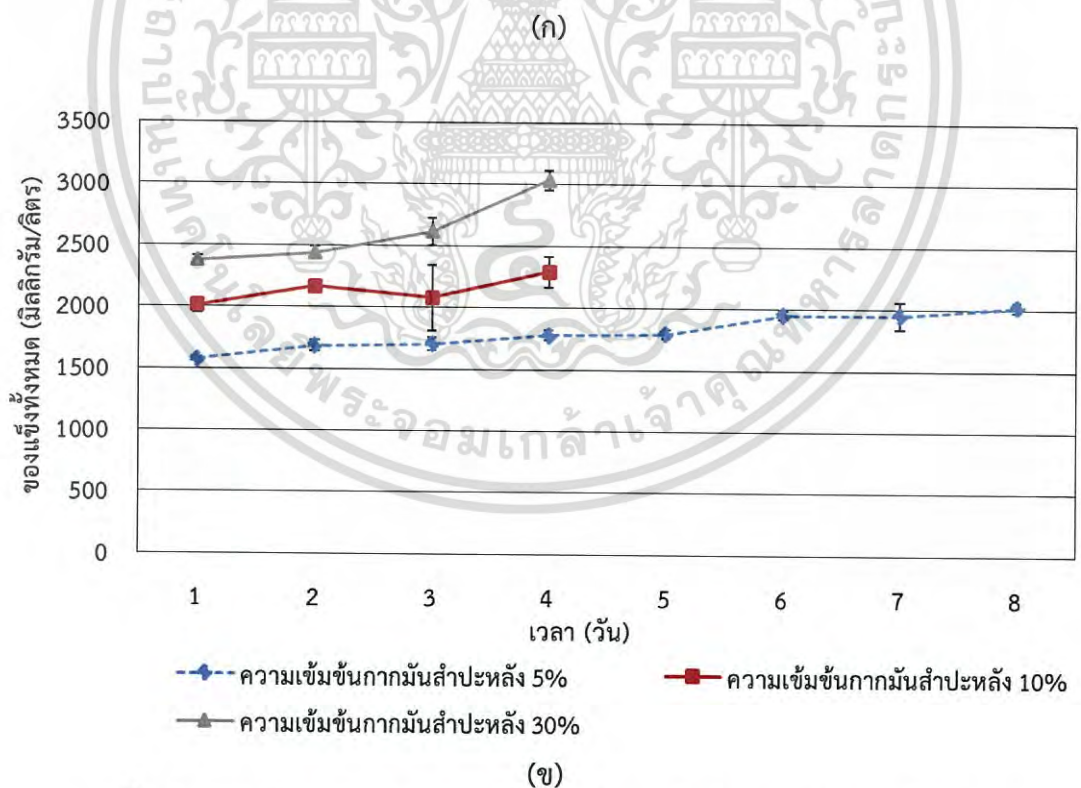
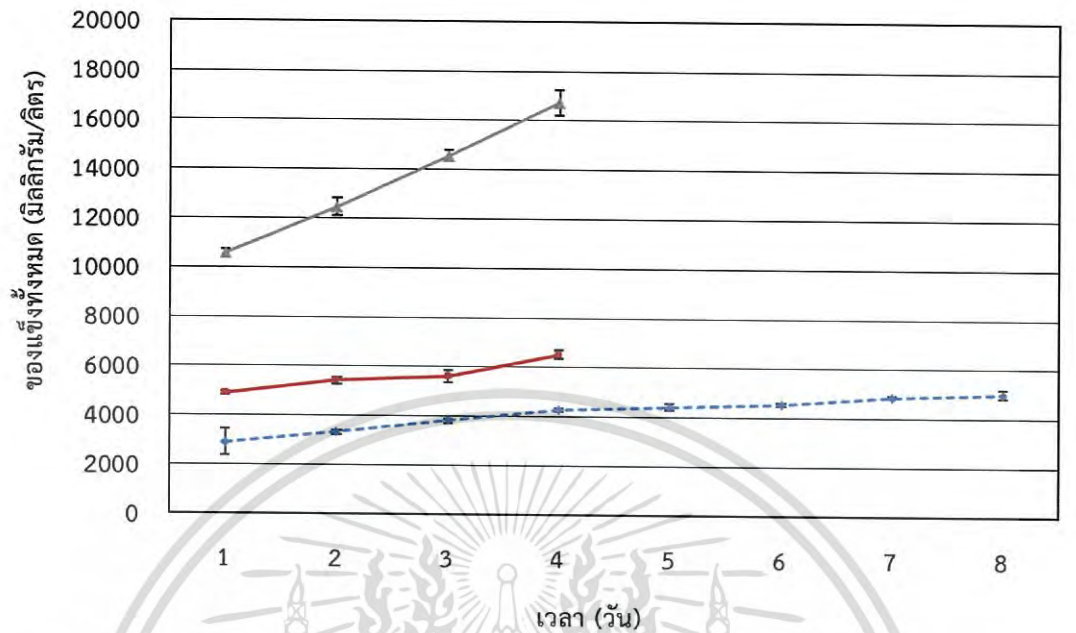
ค่าสภาพความเป็นต่างเป็นตัวบ่งบอกของเสถียรภาพในระบบ ถ้าระบบมีค่าสภาพความเป็นต่างสูงแสดงว่า ระบบบำบัดมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์สูง สามารถรักษาสภาพความเป็นต่างของระบบบำบัดให้คงตัวอยู่ได้นาน เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (free fatty acids) ในระบบก็ไม่ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลงได้ง่าย จากผลการทดลองพบว่า สภาพความเป็นต่างในถังหมักก๊าซชีวภาพที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าอยู่ในช่วง 974-1,035 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าอยู่ในช่วง 1,013-1,024 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าอยู่ในช่วง 2,056-2,185 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่กากมันสำปะหลัง 5% และ 10% เนื่องจากมีปริมาณแอมโมเนียเริ่มต้นที่สูงกว่า จึงถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอินทรีย์ในถังหมักกรดสูงกว่า และเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในถังหมักก๊าซชีวภาพ จึงทำให้มีสภาพความเป็นต่างเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.5 ภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่าค่าสภาพความเป็นต่างในถังหมักก๊าซมีเทนสอดคล้องกับผลของค่าความเป็นกรด-ด่างที่ได้จากการทดลอง และมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 1,000-3,000 มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ซึ่งเหมาะต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นต่างที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในถังหมักก๊าซมีเทน

#### 4.2.3 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งทั้งหมดในระบบ

จากรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.6 และข-3.7 ภาคผนวก ข) แสดงค่าของปริมาณแข็งทั้งหมดของถังหมักกรดที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรอยู่ในช่วง 2,914.67-5,004.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 1,575.33-2,022.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นกากมันปะหลังที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในถังหมักกรดอยู่ในช่วง 4,916.67-6,532.67 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 2,011.33-2,168.67 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นกากมันปะหลังที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าของแข็งทั้งหมดในถังหมักกรดอยู่ในช่วง 10,569.33-16,726.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 2,375.33-3,037.33 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่า ค่าของแข็งทั้งหมดของสารละลายกากมันสำปะหลังขึ้นอยู่กับอัตราการเติมกากมันสำปะหลัง โดยค่าของแข็งทั้งหมดในถังหมักกรดมีค่ามากกว่าถังหมักก๊าซมีเทน เนื่องจากสารอินทรีย์ในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศนั้น ทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดในถังหมักกรดได้เปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลให้เล็กลงและเปลี่ยนให้เป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และอื่น ๆ ทำให้ค่าของแข็งในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าของแข็งทั้งหมดน้อยกว่าในถังหมักกรด สอดคล้องกับงานวิจัยของวิภาพรและคณะ (2559)

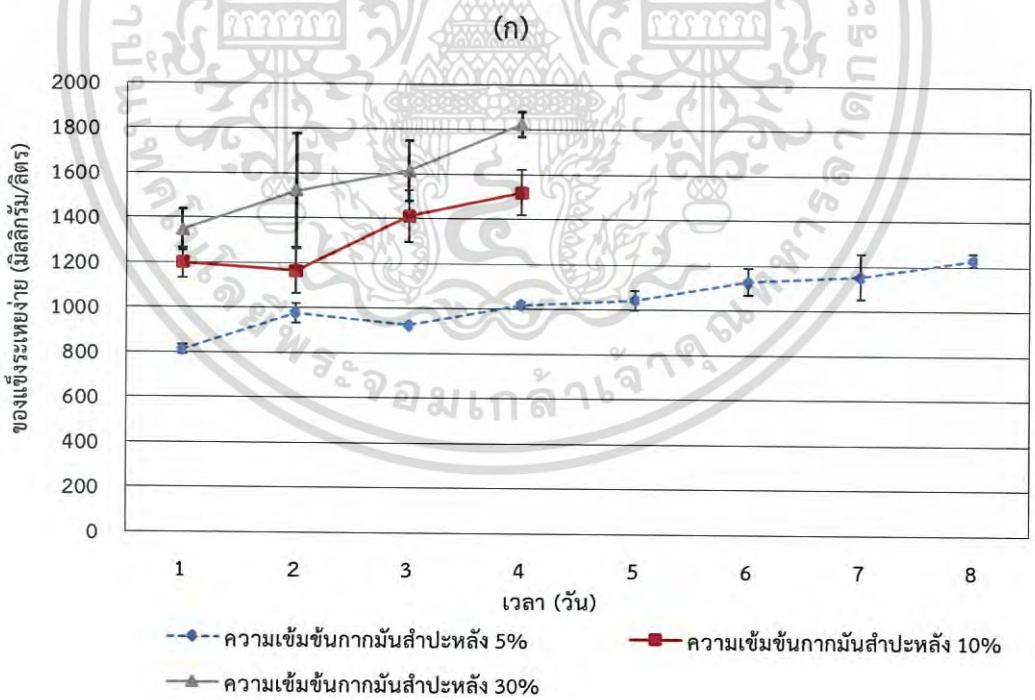
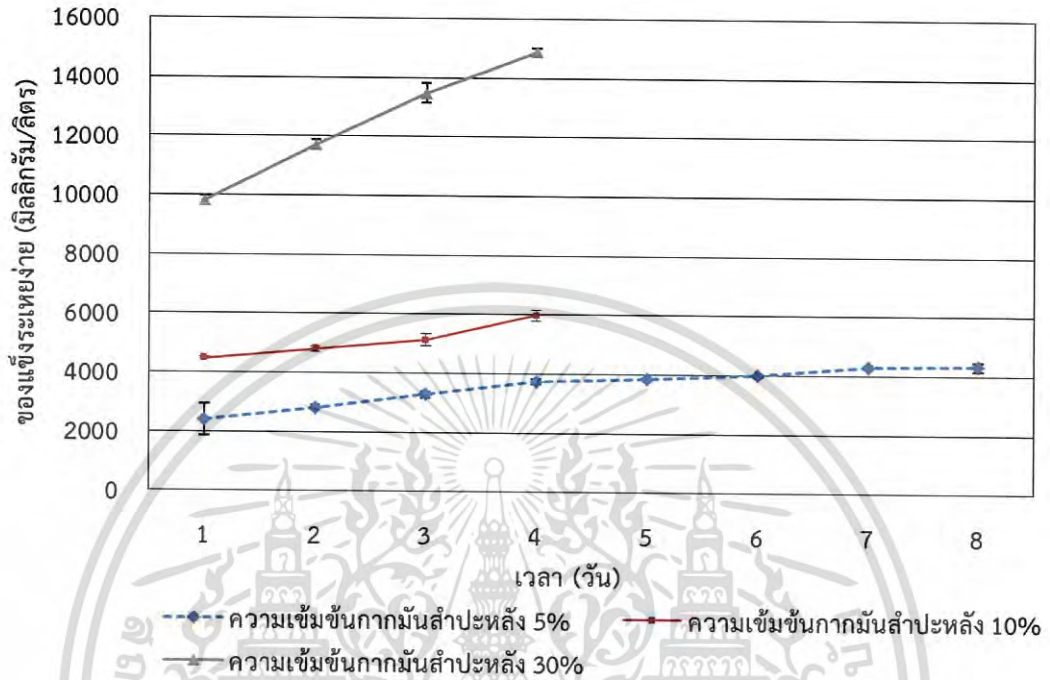


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งทั้งหมดที่ความเข้มข้นไขมันสำหรับ 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ของ (ก) ถังหมักกรด และ (ข) ถังหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยง่ายในระบบ

รูปที่ 4.4 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยง่ายในระบบถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน



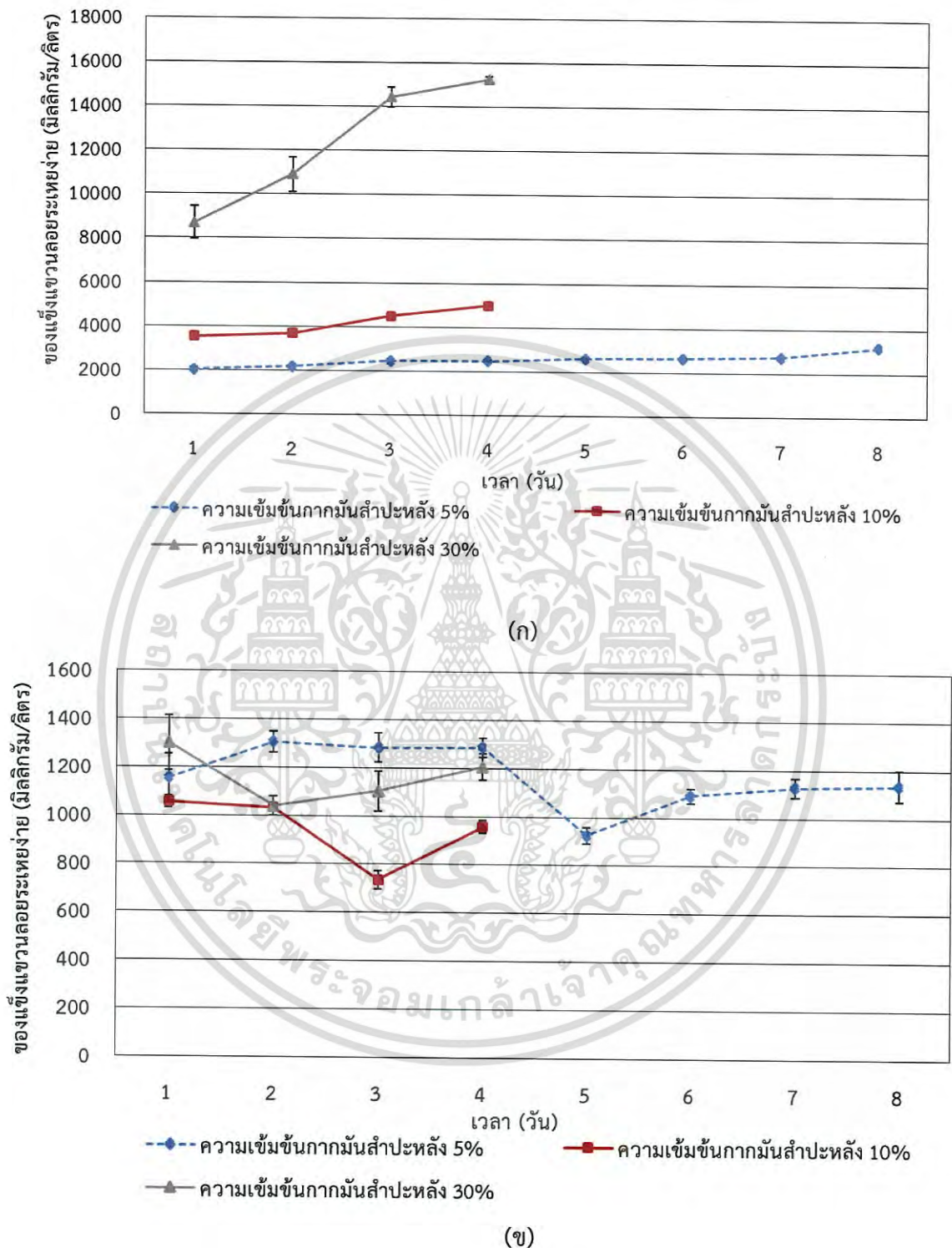
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยง่ายที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ของ (ก) ถังหมักกรด และ (ข) ถังหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่า ค่าของแข็งระเหยง่ายที่เปลี่ยนแปลงในถังหมักกรดที่ความเข้มข้นกากมันปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าอยู่ในช่วง 2,416.00-4,322.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 812.00-1,228.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นกากมันปะหลัง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 4,475.33-5,985.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 1,163.67-1,520.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นกากมันปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 9,802.67-14,886.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 1,346.33-1,824.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.8 และข-3.9 ภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่าค่าของแข็งระเหยง่ายในถังกรดจะมีค่าสูงกว่าในถังหมักก๊าซมีเทน เนื่องจากแบ่งในกากมันสำปะหลัง ส่วนในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าของแข็งระเหยง่ายมีค่าลดลง เนื่องจากแบ่งถูกย่อยสลายเป็นกรดไขมันระเหยง่าย สอดคล้องกับผลการทดลองของแข็งทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง

#### 4.2.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในระบบ

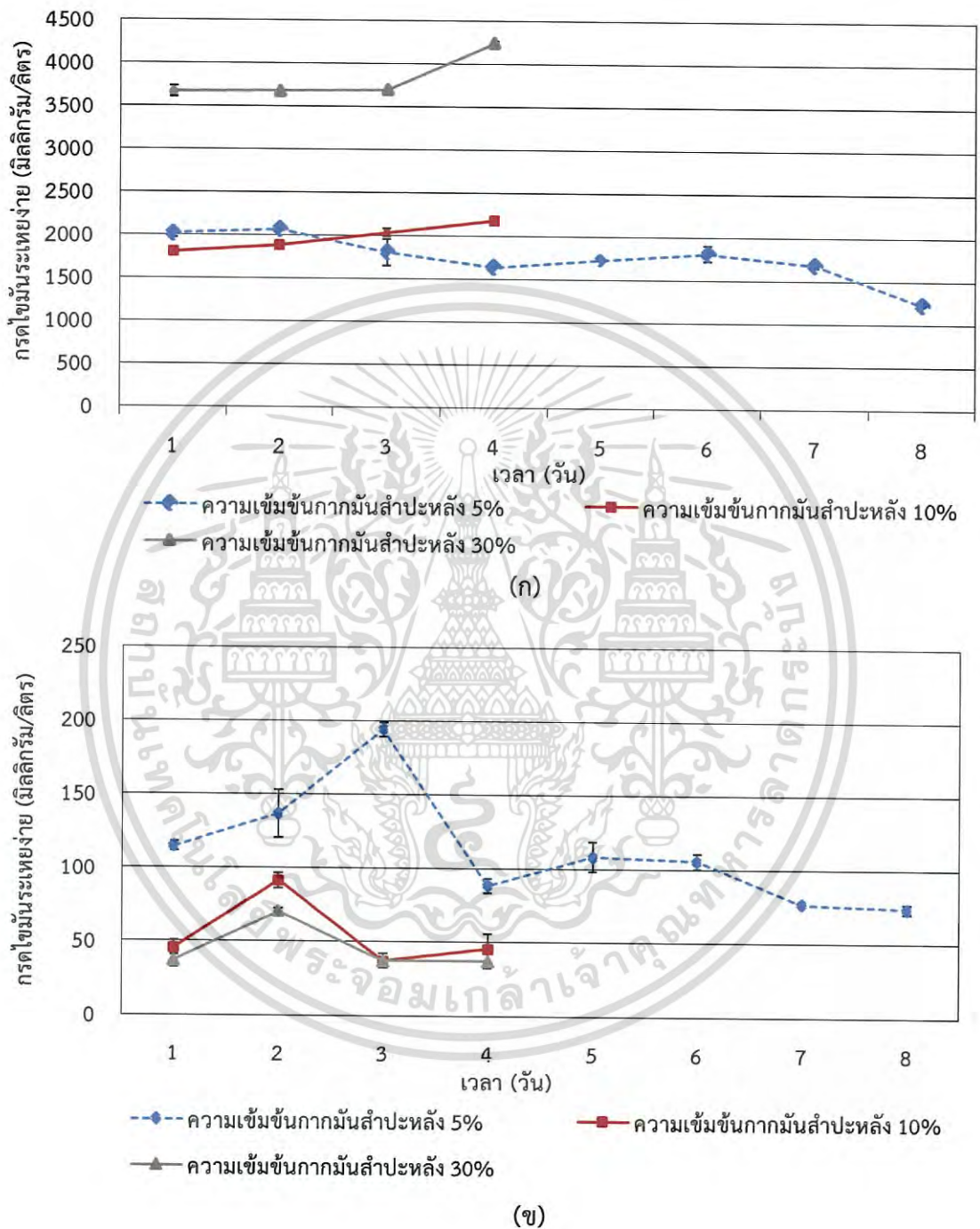
จากผลการทดลองพบว่าค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายที่เปลี่ยนแปลงในถังหมักกรดที่ความเข้มข้นกากมันปะหลังที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในถังหมักกรดอยู่ในช่วง 2,028.67-3,170.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 924.67-1,305.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นกากมันปะหลังที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 3,527.33-4,996.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 735.33-1,055.33 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นกากมันปะหลังที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 8,694.67-15,256.67 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 1,040.00-1,300.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.12 และ ข-3.13 ภาคผนวก ข) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งระเหยง่าย



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าของแข็งแวนลอยระยะเหยง่ายที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ของ (ก) ถังหมักกรด และ (ข) ถังหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.6 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่ากรดไขมันระเหยง่ายในระบบ



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่ากรดไขมันระเหยง่ายที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ของ (ก) ถังหมักกรด และ (ข) ถังหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.14 และ ข-3.15 ภาคผนวก ข) แสดงค่ากรดไขมันระเหยง่ายที่เปลี่ยนแปลงในถังหมักกรดที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรอยู่ในช่วง 1,228.00-2,068.57 mg/L as CH<sub>3</sub>COOH และถึงหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 74.00-194.28 mg/L as CH<sub>3</sub>COOH ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในถังหมักกรดอยู่ในช่วง 1,805.33-2,185.71 mg/L as CH<sub>3</sub>COOH และในถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 37.14-91.43 mg/L as CH<sub>3</sub>COOH และความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในถังหมักกรดอยู่ในช่วง 3,671.42-4,240.00 mg/L as CH<sub>3</sub>COOH และถึงหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 37.14-70.57 mg/L as CH<sub>3</sub>COOH โดยค่าการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักกรดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ เนื่องจากสารอินทรีย์ของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายได้เป็นกรดไขมันระเหยง่าย เช่น กรดอะซิติกและกรดบิวทริก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ตั้งต้นที่ส่งต่อไปยังถึงหมักก๊าซมีเทนเพื่อให้เมทาโนเจนย่อยไปเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของจิรสมัย (2551)

#### 4.2.7 ผลการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ

จากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ในถังหมักกรดที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรอยู่ในช่วง 4.81±1.82 มิลลิกรัมต่อลิตร และถึงหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.32±0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 11.39±2.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.43±0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 7.82±0.74 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.49±0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของถังหมักกรด

ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง (%)	ค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (mg/L)	ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)	ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5	34.93	7.94	4.81	1.82
10	41.29	3.72	11.39	2.36
30	39.99	5.15	7.82	0.74

ตารางที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของถังหมักก๊าซมีเทน

ความเข้มข้นของกากมันสำปะหลัง (%)	ค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (mg/L)	ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)	ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5	34.91	109.33	0.32	0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ความเข้มข้นของ กากมันสำปะหลัง (%)	ค่าคาร์บอน อินทรีย์ทั้งหมด (mg/L)	ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)	ค่าอัตราส่วน คาร์บอนต่อ ไนโตรเจน	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
10	41.89	91.19	0.43	0.04
30	42.71	87.53	0.49	0.01

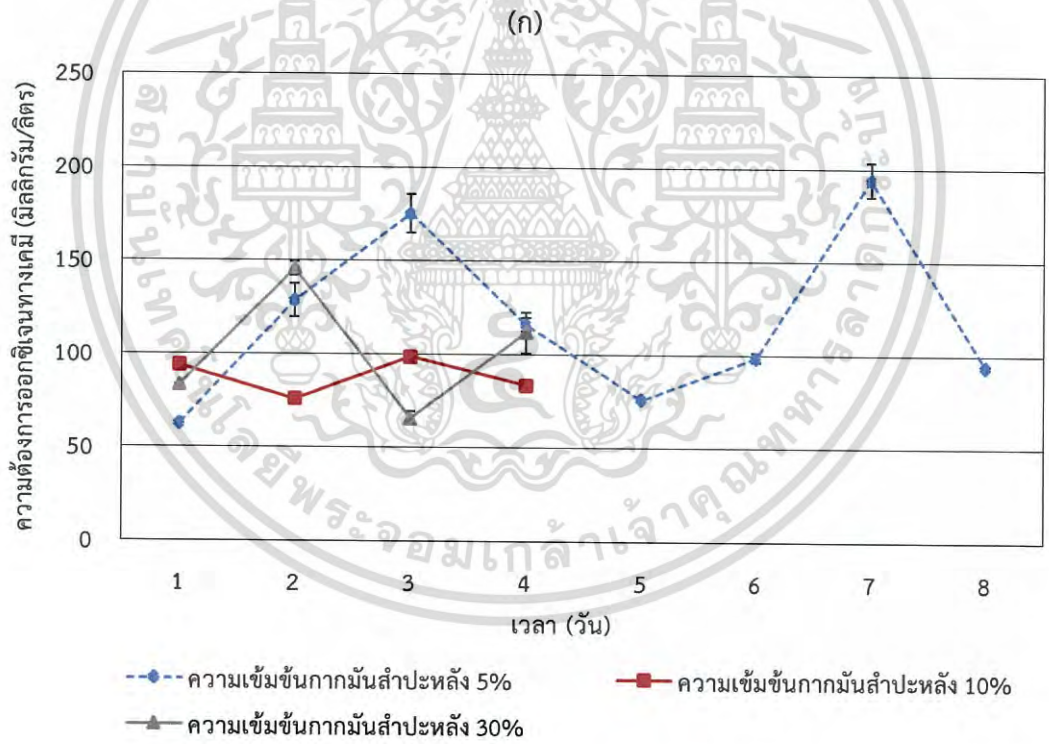
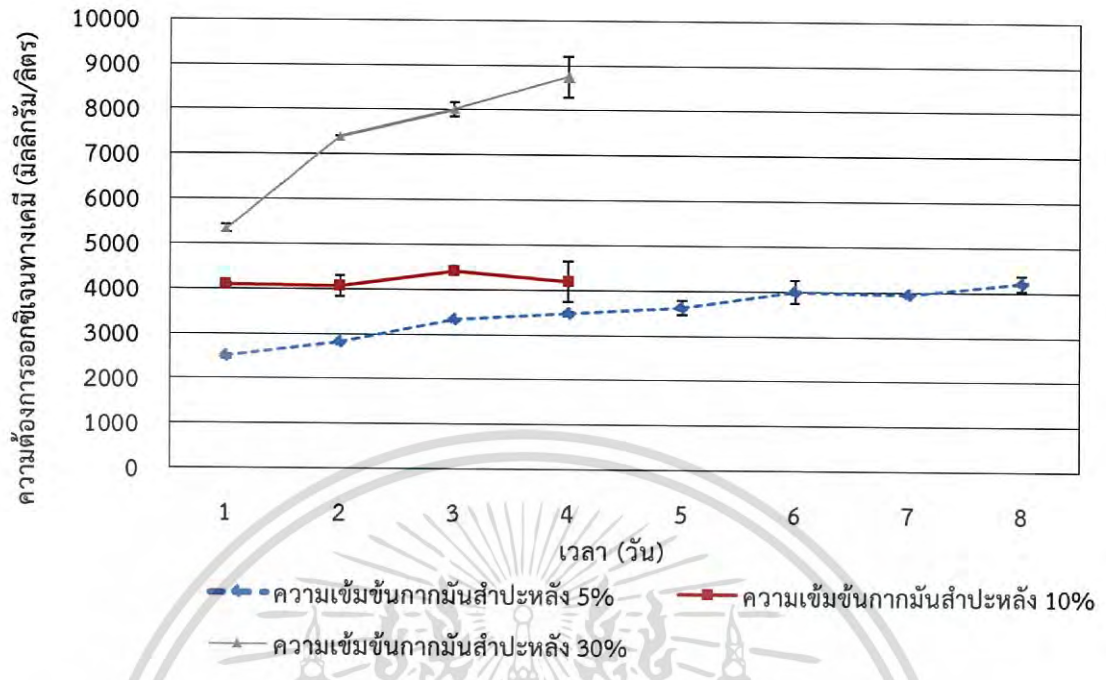
จากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เมื่อเติมกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าสูงกว่าการเติมกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 5 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการเจริญเติบโต ส่วนที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง เนื่องจากแบคทีเรียนำไปใช้ในการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้แหล่งคาร์บอนลดลง และไนโตรเจนถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ ทำให้ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลง โดยค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าน้อยกว่าในถังหมักกรด เนื่องจากสารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงว่ามีการย่อยสลายสารอินทรีย์เกือบหมด จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นก่อนเข้าระบบมีค่าต่ำกว่า 100 แสดงว่ากากมันสำปะหลังสามารถย่อยสลายง่าย

#### 4.2.8 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีในระบบ

จากผลการทดลองพบว่าค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีในถังหมักกรดที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 2,492.80-4,211.52 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 62.97-194.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 4,066.40-4,191.73 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 76.10-98.66 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นกากมันสำปะหลังที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของถังหมักกรดอยู่ในช่วง 5,339.84-8,753.66 มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 65.60-145.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.18 และ ข-3.19 ภาคผนวก ข)

ค่า COD ในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าต่ำกว่าในถังหมักกรด เนื่องจากสารอินทรีย์ในถังหมักกรดถูกเปลี่ยนกลายเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ น้ำทิ้งที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนที่เติมกากมันสำปะหลังเข้มข้นที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่า COD น้อยกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง จึงสามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ส่วนน้ำทิ้งที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนที่เติมกากมันสำปะหลังเข้มข้นที่ 5 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่า COD เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม น้ำทิ้งเหล่านี้สามารถนำไปเป็นปุ๋ยน้ำที่ใช้ในการเพาะปลูกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



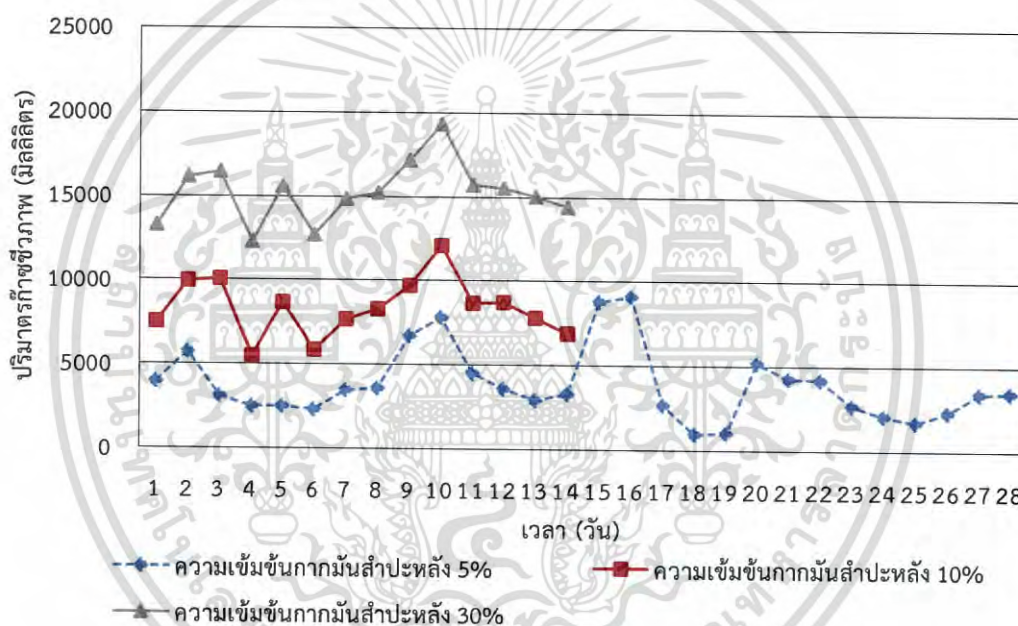
(ข)

รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ของ (ก) ถึงหมักกรด และ (ข) ถึงหมักก๊าซมีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 ผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5,10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

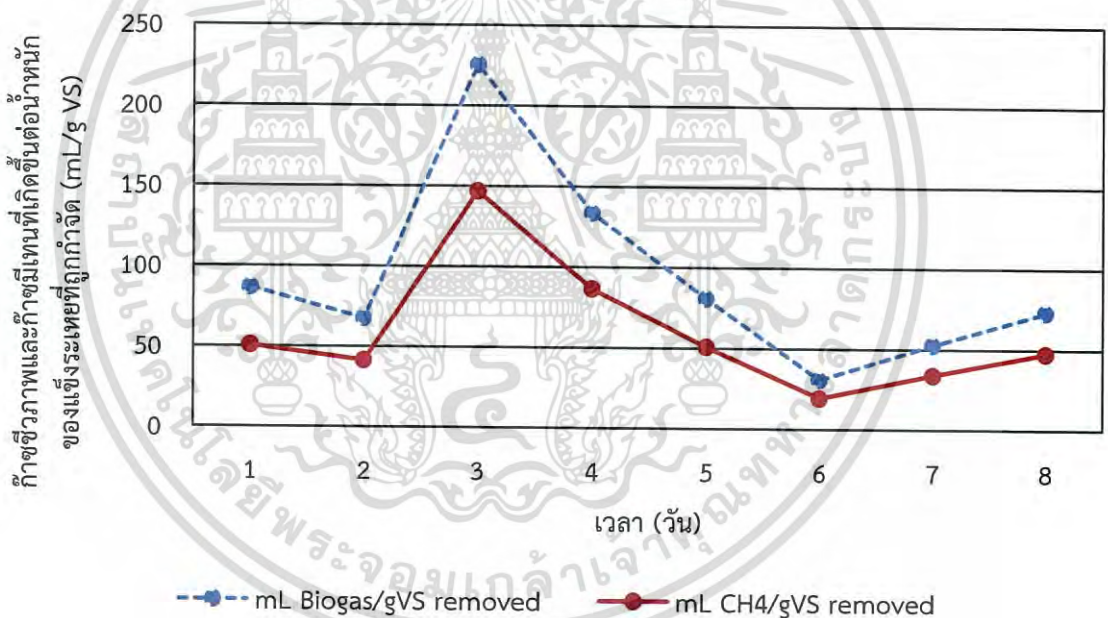
จากผลการทดลองอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผลิตก๊าซชีวภาพได้  $3,866.18 \pm 2,101.44$  มิลลิลิตรต่อวัน ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผลิตก๊าซชีวภาพได้  $4,393.57 \pm 1,142.38$  มิลลิลิตรต่อวัน และที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผลิตก๊าซชีวภาพได้  $6,850.71 \pm 489.59$  มิลลิลิตรต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.20 ภาคผนวก ข) จะเห็นได้ว่า แนวโน้มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้นตาม การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง เนื่องจากปริมาณแบง์ในกากมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทำให้จุลินทรีย์สามารถใช้ในการเปลี่ยนให้เป็นก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.8 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของแข็งระเหยง่ายและกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากรูปที่ 4.9 (ก) แสดงค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 30.71-225.54 และ 19.73-146.83 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2.2 ภาคผนวก ค) และ รูปที่ 4.10 (ก) แสดงค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกกำจัด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1,415.50-

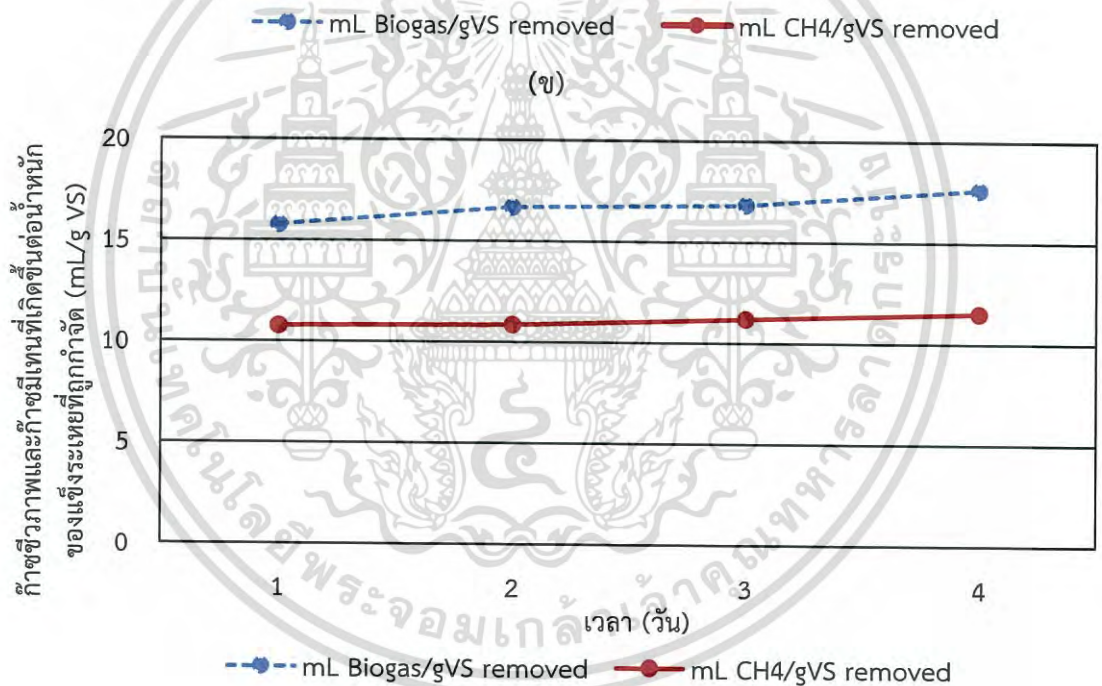
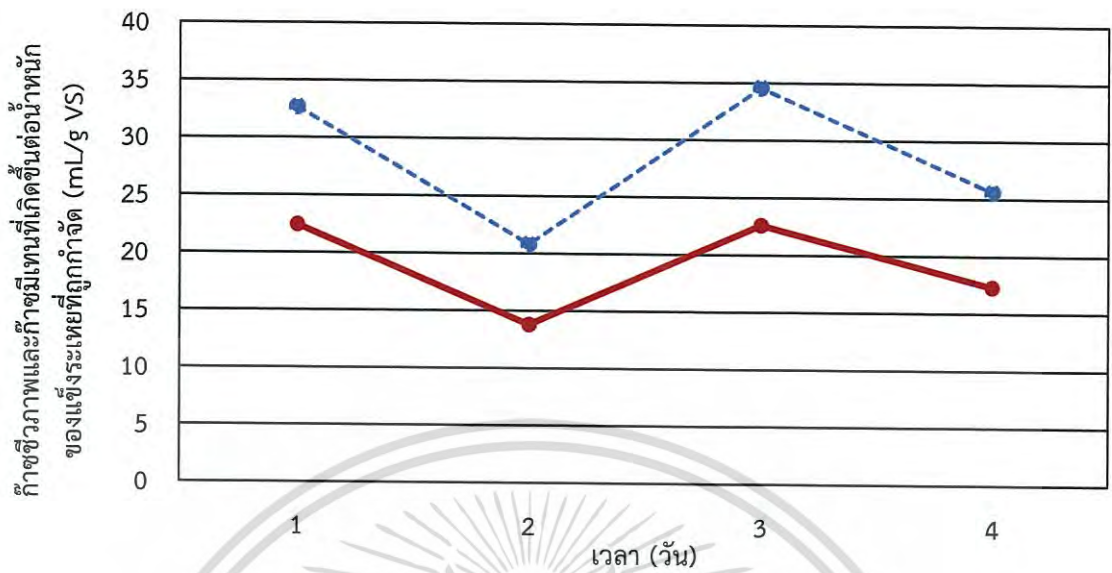
3,943.66 และ 884.69-2,585.53 มิลลิลิตรต่อกรัมของกรดไขมันระเหยง่าย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2.3 ภาคผนวก ค) รูปที่ 4.9 (ข) แสดงค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 20.79-34.55 และ 13.81-22.60 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2.2 ภาคผนวก ค) และ รูปที่ 4.10 (ข) แสดงค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกกำจัด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3,310.56-3,594.13 และ 2,198.21-2,429.63 มิลลิลิตรต่อกรัมของกรดไขมันระเหยง่าย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2.3 ภาคผนวก ค) และ รูปที่ 4.9 (ค) แสดงค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 15.77-17.61 และ 10.77-11.50 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2.2 ภาคผนวก ค) และ รูปที่ 4.10 (ค) แสดงค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกกำจัด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1,984.25-2,094.54 และ 1,290.66-1,430.57 มิลลิลิตรต่อกรัมของกรดไขมันระเหยง่าย (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-2.2 ภาคผนวก ค)



(ก)

รูปภาพที่ 4.9 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด

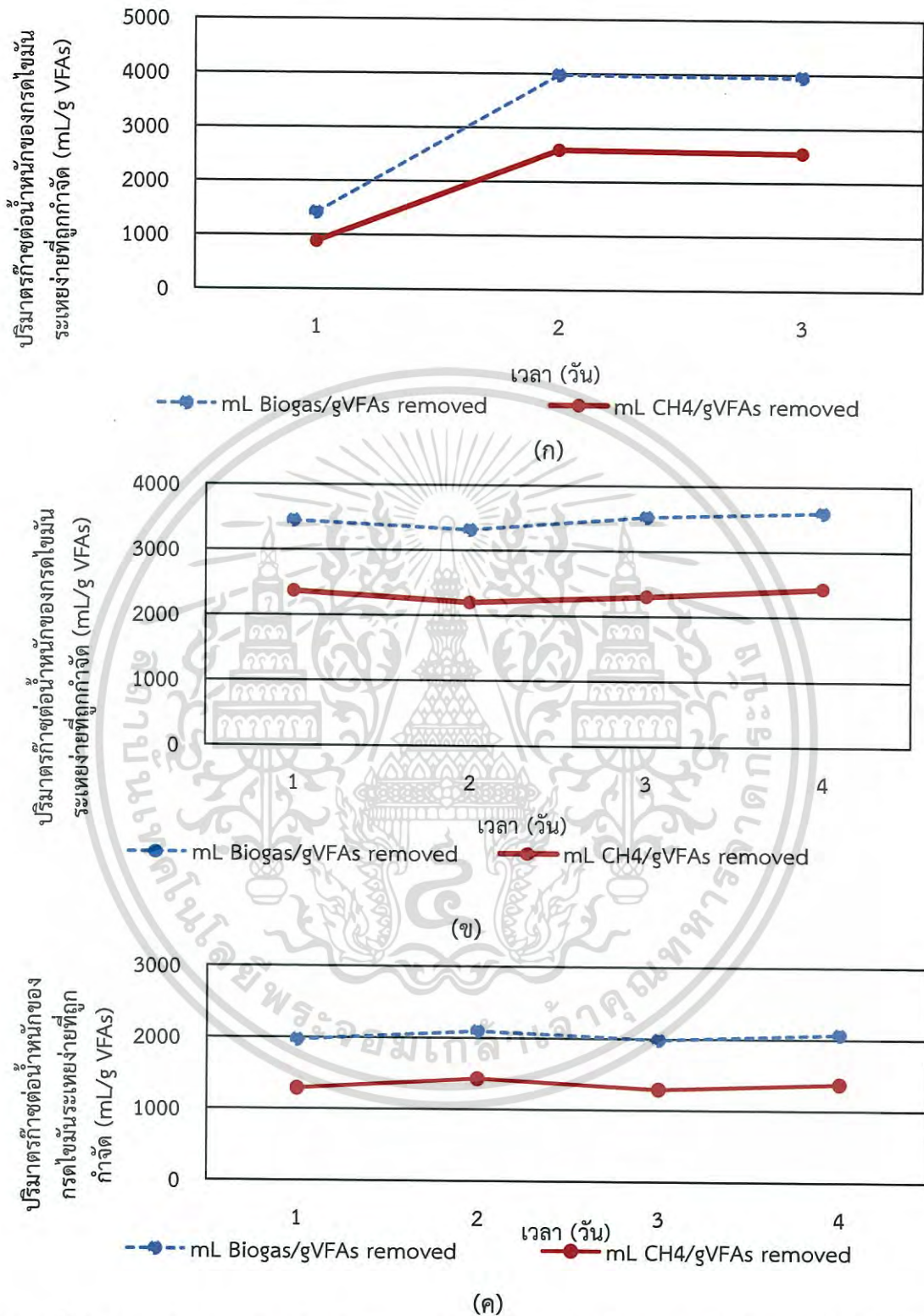
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปภาพที่ 4.9 (ต่อ) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (ก) ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ข) ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ (ค) ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพที่ 4.10 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกกำจัด (ก) ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ข) ที่ความเข้มข้นกากมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

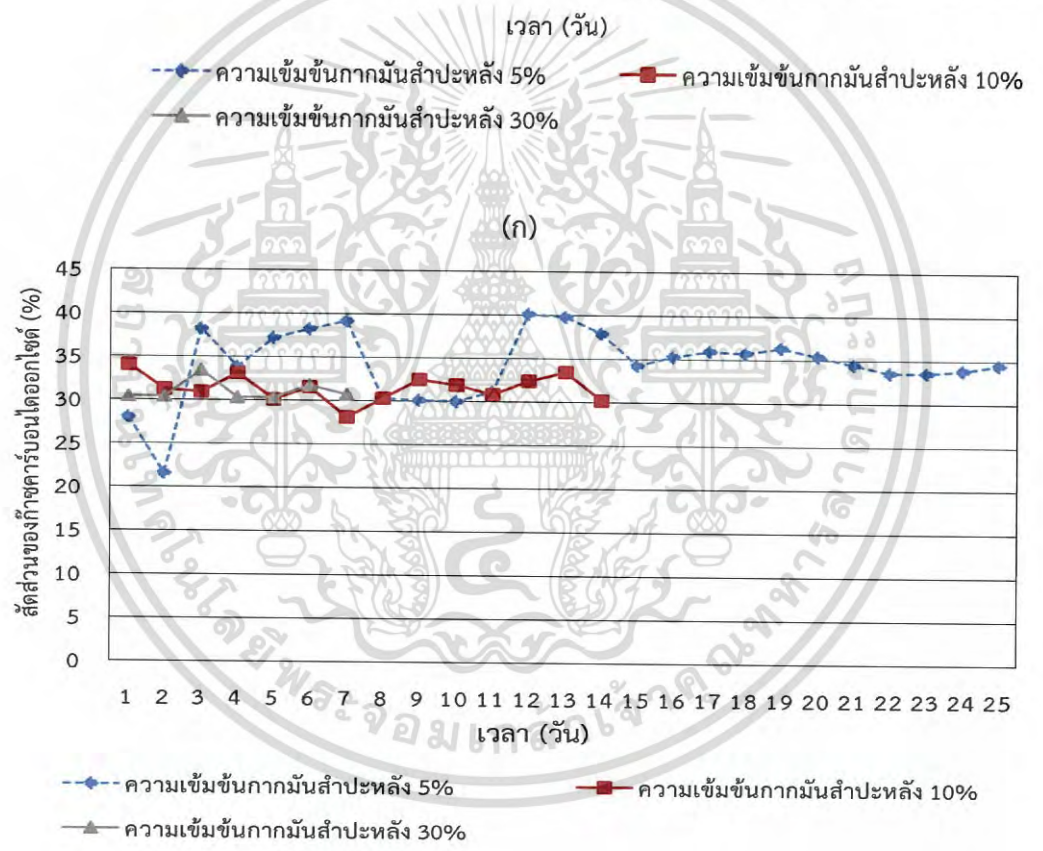
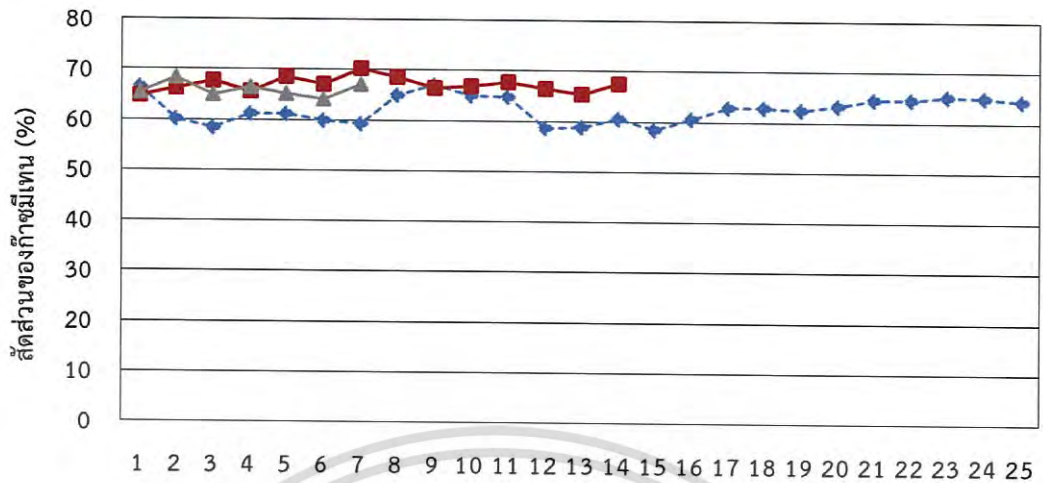
สำปะหลัง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ (ค) ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

จะเห็นได้ว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายที่การเติมกากมันสำปะหลัง 5% โดยปริมาตร มีค่าสูงกว่าที่การเติมกากมันสำปะหลัง 10% และ 30% โดยปริมาตร ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้แบ่งในกากมันสำปะหลังเป็นอาหาร แต่กากมันสำปะหลังเป็นของแข็งแขวนลอย ดังนั้น อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการสุ่มตัวอย่างในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อกรัมของกรดไขมันระเหยง่ายที่การเติมกากมันสำปะหลัง 10% โดยปริมาตร จะสูงกว่าที่ 5% และ 30% โดยปริมาตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่พบมากที่สุดได้ถึงหมักก๊าซมีเทน ซึ่งกรดไขมันระเหยง่ายนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพในที่สุด

#### 4.4 ผลการศึกษาขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

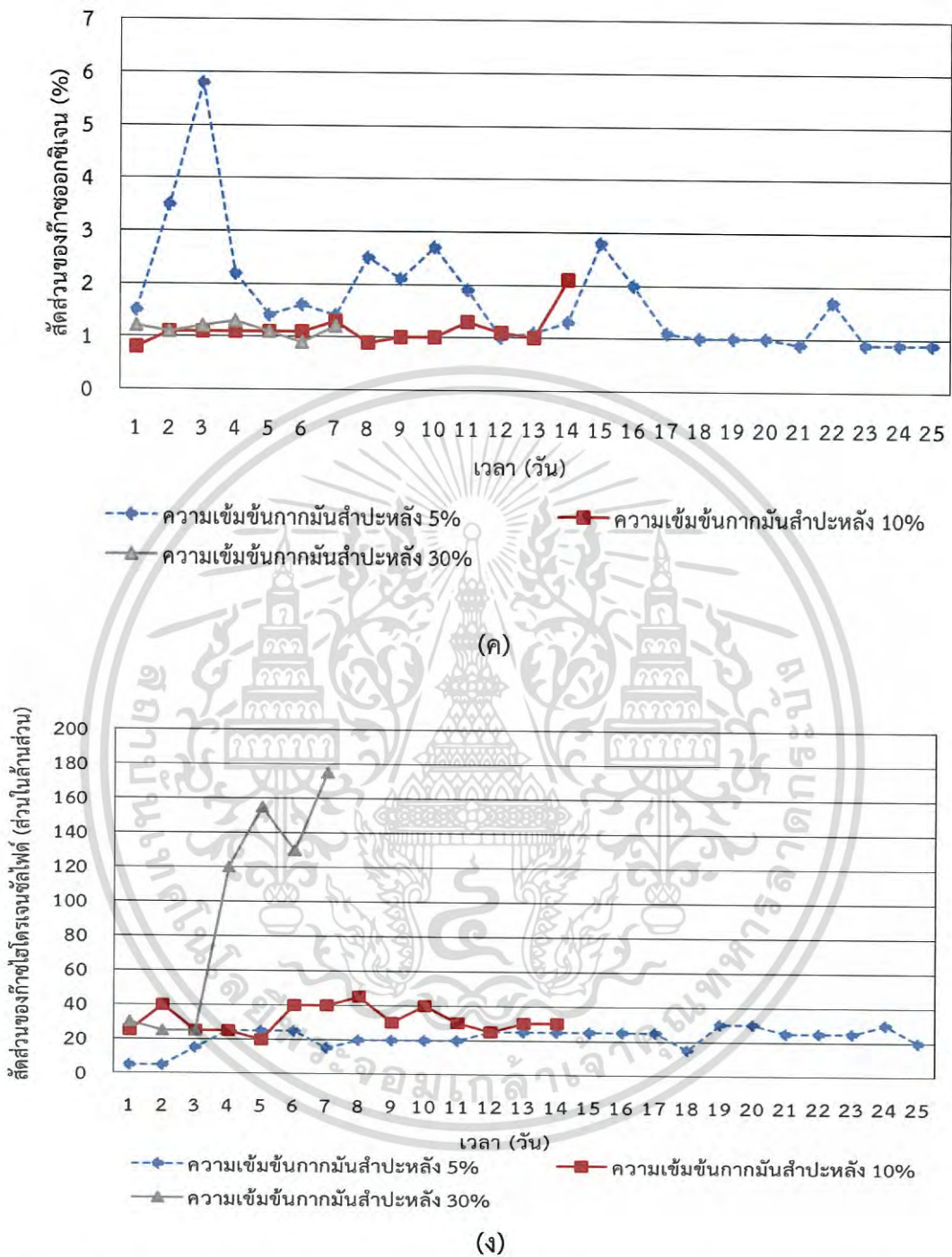
จากผลการศึกษาขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Data Meter พบว่าเมื่อป้อนกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรจะได้ค่ามีเทน ( $\text{CH}_4$ ) อยู่ในช่วง 58.50-66.60 เปอร์เซ็นต์ ค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) อยู่ในช่วง 21.60-39.80 เปอร์เซ็นต์ ค่าออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) อยู่ในช่วง 5.00-30.00 เปอร์เซ็นต์ และค่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) อยู่ในช่วง 5.00-30.00 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะได้ค่ามีเทน ( $\text{CH}_4$ ) อยู่ในช่วง 64.90-70.40 เปอร์เซ็นต์ ค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) อยู่ในช่วง 28.20-34.10 เปอร์เซ็นต์ ค่าออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) อยู่ในช่วง 0.80-2.10 เปอร์เซ็นต์ และค่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) อยู่ในช่วง 20-45 ส่วนในล้านส่วน และที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรจะได้ค่ามีเทน ( $\text{CH}_4$ ) อยู่ในช่วง 64.10-68.30 เปอร์เซ็นต์ ค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) อยู่ในช่วง 30.30-31.80 เปอร์เซ็นต์ ค่าออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) อยู่ในช่วง 0.90-1.30 เปอร์เซ็นต์ และค่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) อยู่ในช่วง 25-175 ส่วนในล้านส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.21 ภาคผนวก ข)

จากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงมาตรฐานคือ 50-70 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วง 30-40 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่ความเข้มข้นมากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (จินตนา, 2552) ทำให้ไม่มีผลต่อการกัดกร่อนอุปกรณ์ และมีปริมาณออกซิเจนเพียงเล็กน้อย อาจเกิดจากขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง ทำให้อากาศเข้าไปในระบบ อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ต่ำ ยังไม่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า กากมันสำปะหลังเหมาะสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ



(ข)  
รูปที่ 4.11 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพภายในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 (ต่อ) องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพภายในระบบ ที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5, 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ของ (ก) ก๊าซมีเทน (ข) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ค) ก๊าซออกซิเจน และ (ง) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 ผลการศึกษาเชื้อจุลินทรีย์ภายในถังหมักกรด (Acid tank) และถังหมักก๊าซมีเทน (Methane tank)

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของเชื้อจุลินทรีย์โดยการย้อมสีแกรม แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่าเชื้อจุลินทรีย์ในถังหมักกรดมีทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ รูปร่างของเชื้อจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นท่อนกลม ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นแบคทีเรียกลุ่ม Acetogenic bacteria เชื้อจุลินทรีย์ในถังหมักก๊าซมีเทนมีทั้งแกรมบวกและแกรมลบ รูปร่างของเชื้อจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นเส้นบาง ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นแบคทีเรียกลุ่ม Methanogen (Chem, 2005) ดังแสดงในรูปที่ 4.17



ถังหมักกรด

ถังหมักก๊าซมีเทน

รูปที่ 4.12 ลักษณะเชื้อแบคทีเรียในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนโดยการย้อมสีแกรมแล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1,000 เท่า

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การผลิตก๊าซชีวภาพโดยศึกษาอัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการ ระบบประกอบด้วย ถังหมักกรดมีปริมาตรการหมัก 27.73 ลิตร และถังหมักก๊าซมีเทนมีปริมาตรการหมัก 52.83 ลิตร มีการควบคุมอย่างสมบูรณ์ที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาทีและหยุดคววน 15 นาที การทดลองทำโดยซึ่งกากมันสำปะหลังที่ 50, 100 และ 300 กรัม ปั่นให้ละเอียดและปรับปริมาตรด้วยน้ำประปาให้ได้ปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร (จะได้ความเข้มข้นที่ 5, 10, 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) แล้วเติมในช่วงเวลา 09.00-09.10 น. ตั้งแต่วันที่ 22 กันยายน ถึง 29 พฤศจิกายน 2560 (ช่วงที่ 1-4) จากผลการทดลองพบว่า อัตราการเติมกากมันสำปะหลังที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการหมักก๊าซชีวภาพ มีค่าพีเอชในถังหมักกรด 3.83-4.10 และในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า 6.59-6.78 มีค่าสภาพการเป็นต่างในถังหมักก๊าซมีเทน  $1,019 \pm 4.52$  มิลลิกรัมต่อลิตรโดยแคลเซียมคาร์บอเนตของแข็งทั้งหมดในถังหมักกรดมีค่า  $5,621.83 \pm 626.42$  มิลลิกรัมต่อลิตรและในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า  $2,137.08 \pm 169.92$  มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งระเหยง่ายในถังหมักกรดมีค่า  $5,100.92 \pm 601.02$  มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า  $1,323.50 \pm 175.02$  มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในถังหมักกรดมีค่า  $4,319.75 \pm 630.09$  มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า  $1,011 \pm 143.03$  มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในถังหมักกรดมีค่า  $4,173.25 \pm 627.92$  มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า  $945.50 \pm 134.15$  มิลลิกรัมต่อลิตร กรดไขมันระเหยง่ายในถังหมักกรดมีค่า  $1,979.19 \pm 153.16$  มิลลิกรัมต่อลิตร และในถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า  $55 \pm 22.92$  มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทนมีค่า  $4,189.97 \pm 260.68$  มิลลิกรัมต่อลิตร และ  $88.04 \pm 44.05$  มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ในถังหมักกรดมีค่า  $11.39 \pm 2.36$  และ  $0.43 \pm 0.04$  ในถังหมักก๊าซมีเทน ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย  $4.39 \pm 1.14$  ลิตรต่อวัน และค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกกำจัดพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 20.79-34.55 และ 13.81-22.60 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย และ 3,310.56-3,594.13 และ 2,198.21-2,429.63 มิลลิลิตรต่อกรัมของกรดไขมันระเหยง่าย ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ประกอบด้วยก๊าซมีเทน  $67.14 \pm 1.40$  เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  $31.51 \pm 1.58$  เปอร์เซ็นต์ ก๊าซออกซิเจน  $1.14 \pm 0.31$  เปอร์เซ็นต์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์  $31.79 \pm 7.75$  ส่วนในล้านส่วน

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้วิธีการต้มกากมันสำปะหลังเพื่อสกัดแป้งออกจากเซลล์โลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2554. ก๊าซชีวภาพ. กระทรวงพลังงาน.
- จินตนา จิตรภูักดี. 2552. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและพัลส์สับปรดโดยการหมักแบบ 2  
ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมชีวภาพ  
ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าพระนครเหนือ.
- จิรสมัย ดลชม. 2551. ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ระเหยในระบบถังหมักแบบสอง  
ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา, มหาวิทยาลัยราช  
ภัฏพระนคร.
- ช่างต้น. 2552. ฐานข้อมูลการออกแบบ. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. [Online] Available:  
<http://enverionment.blogspot.com/2009/03/blog-post.html?m=1>. สืบค้นเมื่อวันที่  
20 ตุลาคม 2560.
- บุญมา ป่านประดิษฐ์. 2550. คู่มือพึ่งตนเองถึงหมักหัตถ์จรรยาเปลี่ยนขยะเป็นก๊าซชีวภาพ.  
กรุงเทพมหานคร.เกษตรกรรมธรรมชาติ.
- เพ็ชรรัตน์ เขาวกิจ. 2538. การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. โครงการพิเศษวิศวกรรมศาสตร  
บัณฑิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พงษ์พันธ์ พรหมพิทักษ์ และ ธนากร วงวัฒนาเสถียร. 2554. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซ  
ชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 25.
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2553. เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลและก๊าซ  
ชีวภาพ. กรุงเทพฯ.
- มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2553. มันสำปะหลังคือ. [Online]  
Available: [www.tapiocathai.org/C.html](http://www.tapiocathai.org/C.html). สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2560.
- มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2553. องค์ประกอบหัวมันสำปะหลัง. [Online]  
Available: [www.tapiocathai.org/D.html](http://www.tapiocathai.org/D.html). สืบค้นเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2560.
- วิภาพรและคณะ. 2559. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง โดยกระบวนการย่อยสลาย  
ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง.
- ศุภาพร หวังศิริเจริญ และ วสุ ปฐมอารีย์. 2553. จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตก๊าซ  
ชีวภาพ. บทความวิชาการวิทยาศาสตร์. สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย. 64(3), 70-74.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์. 2553. ก๊าซชีวภาพ ประโยชน์และผลตอบแทน.  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- สุรลักษณ์ รอดทอง และ สิรินทรเทพ เต่าประยูร. 2557. มีเทนจากหัวมันและกากมันสำปะหลังเพื่อ  
ใช้เป็นแหล่งพลังงาน. งานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม
- อารียา วิรัชวรกุล. 2546. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. 2553. กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง. [Online] Available: [www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail](http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail). สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม 2560.
- อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง. 2549. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศเพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพเชิงเศรษฐกิจ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- Amaya, O.M., Barragan, M.T.C. and Tapia, F.J.A. 2013. microbial biomass in batch and continuous system. [Online] Available: [www.intechopen.com/books](http://www.intechopen.com/books).
- Chem, Et. B.J. 2005. A simplified analysis of granule behavior in ASBR and UASB reactors treating low-strength synthetic wastewater. Environmental Engineering. 22, 566-590
- Chu, C.F., Xu, K.Q., Li, Y.Y., and Inamori, Y. 2012. Hydrogen and methane potential based on the nature of food waste materials in a two-stage thermophilic fermentation process. International journal of hydrogen energy. 37, 10611-10618.
- Khongklian, P., Kongjan, P. and O-Thong, S. 2015. Hydrogen and methane production from starch processing wastewater by thermophilic two-stage anaerobic digestion. Energy Procedia. 79, 827-832.
- Martin, J., A. F. Nunes, J. L. Andre and A. Vaz Portugal. 1993. The post-production system for cassava. [Online] Available: <http://www.fao.org>
- Pisutpaisal, N., Nathao, C. and Sirisukpoka, U. 2014. Biological Hydrogen and methane production in from food waste in two-stage CSTR. Energy Procedia. 50, 719-722.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์

ก-1 วิธีวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงสภาวะในระยะปรับสภาพและระยะทดลอง

ก-1.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter)
- 2) บีกเกอร์

วิธีการวิเคราะห์

- 1) ทำความสะอาดอิเล็กโทรดก่อนวัดค่าพีเอช โดยใช้น้ำบริสุทธิ์ฉีดล้างให้ทั่ว เช็ดด้วยกระดาษทิชชู
- 2) เปิดเครื่องทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที เพื่อให้สัญญาณเสถียร
- 3) การปรับเทียบค่าพีเอช โดยใช้บัฟเฟอร์ 7 เป็นจุดที่ 1 และใช้บัฟเฟอร์ 4 เป็นจุดที่ 2
- 4) วัดค่าพีเอชของตัวอย่าง โดยจุ่มอิเล็กโทรดลงในบีกเกอร์ตัวอย่างแล้วคนเบาๆ รอจนกว่าค่าพีเอชไม่เปลี่ยนแปลงจึงอ่านค่า
- 5) ทำความสะอาดอิเล็กโทรดทุกครั้งหลังจากวัดค่าพีเอช โดยใช้น้ำบริสุทธิ์ฉีดล้างให้ทั่ว ซับด้วยกระดาษทิชชู และเมื่อเสร็จปฏิบัติการต้องจุ่มอิเล็กโทรดในสารละลายสำหรับแช่อิเล็กโทรด

ก-1.2 สภาพด่างทั้งหมด (Alkalinity, Alk)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 2) เครื่องกวนแม่เหล็ก
- 3) บีกเกอร์
- 4) บิวเรต 50 มิลลิลิตร พร้อมชุดไทเทรต

สารเคมี

- 1) สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 0.01 นอร์มัล
- 2) สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์
- 3) สารละลายเมธิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์

วิธีการวิเคราะห์

- 1) บีบตัวอย่างน้ำ 50 มิลลิลิตร
- 2) เติมฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 3 หยด
- 3) ถ้าตัวอย่างน้ำมีสีชมพู ไตเตรตด้วยกรดซัลฟูริก 0.01 N จนกระทั่งสีชมพูหายไป
- 4) เติมเมธิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์ 3 หยด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ถ้าตัวอย่างน้ำมีสีเหลือง ไตเตรทต่อด้วยกรดซัลฟูริก 0.01 N จนกระทั่งสีเปลี่ยนเป็นสีส้ม
- 6) จดปริมาตรกรดซัลฟูริกที่ใช้ทั้งหมด

#### วิธีการคำนวณ

$$\text{สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. As CaCO}_3\text{)} = \frac{\text{มล.ของกรดซัลฟูริกที่ใช้ } X N X 50 X 1000}{\text{ปริมาตรน้ำหนัตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}}$$

$$\text{เมื่อ } N = \text{ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (นอร์มัล)}$$

#### ก-1.3 ความชื้น (Moisture content)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 2) เตาอบ ควบคุมอุณหภูมิที่ 103-105 องศาเซลเซียส
- 3) โถดูดความชื้น (Desiccator)

##### วิธีการวิเคราะห์

- 1) ชั่งตัวอย่าง 10 กรัม ใส่ลงในชามระเหย บันทึกน้ำหนัก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่
- 2) นำตัวอย่างที่อบแล้วใส่โถดูดความชื้น ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ

##### วิธีการคำนวณ

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

#### ก-1.4 ค่าของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS)

ของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ในภาชนะภายหลังจากระเหยน้ำออกจากตัวอย่างจนหมด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) แล้วชั่งน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้นจนได้ปริมาณของของแข็งทั้งหมด

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) จานระเหย (Evaporating dish)
- 2) เตาอบ ควบคุมอุณหภูมิที่ 103-105 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 4) เครื่องอังน้ำ (Water bath หรือ steam bath)
- 5) เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง

#### วิธีการวิเคราะห์

- 1) การเตรียมจานระเหย จานที่ใช้ต้องสะอาดและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอนสมมติเป็น A กรัม
- 2) เลือกใช้ปริมาตรน้ำตัวอย่างให้เหมาะสม
- 3) ค่อย ๆ รินน้ำตัวอย่างที่เขย่าให้เข้ากันแล้วลงในจานระเหย นำไประเหยน้ำออกให้หมดบน Water Bath หรือ Hot Plate
- 4) ให้นำจานระเหยไปอบที่เตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 5) ชั่งน้ำหนักจานระเหยทันทีที่เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง สมมติเป็น B กรัม
- 6) น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นก็คือ น้ำหนักของของแข็งทั้งหมด ซึ่งคำนวณออกมาในรูปของมิลลิกรัมต่อลิตร

#### วิธีการคำนวณ

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

#### ก-1.5 ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS)

ของแข็งระเหยง่าย หมายถึง ปริมาณของของแข็งที่สลายกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิในช่วง 500±50 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่และไม่สลายไปเรียกว่า ปริมาณของแข็งคงตัว (Fixed solids) ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) จานระเหย (Evaporating dish)
- 2) เตาเผาควบคุมอุณหภูมิที่ 500±50 องศาเซลเซียส
- 3) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 4) เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง

#### วิธีการวิเคราะห์

- 1) นำจานระเหยที่ได้จากการหาของของแข็งทั้งหมด (B กรัม) ในข้อ ก-2 แล้วนำไปเผาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่ตั้งอุณหภูมิ 500±50 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ปล่อยให้เย็นลงเท่ากับอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่ (Fixed solids)  
(C กรัม)

### วิธีการคำนวณ

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

### ก-1.6 ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS)

ของแข็งแขวนลอยหรือเอสเอส หมายถึง ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สามารถกรองได้ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Whatman GF/C) เอสเอสมีหน่วยเป็น มก./ลบ.ดม.

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 ซม.
- 2) กรวยบุชเนอร์ ความจุ 100 ลบ.ซม.
- 3) เครื่องดูดอากาศ
- 4) เตาอบแห้ง
- 5) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 6) เครื่องชั่งอย่างละเอียด

#### วิธีการวิเคราะห์

- 1) อบกระดาษกรองให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้งแล้วชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง
- 2) ทำซ้ำในข้อ 1 กระทั่งหาน้ำหนักกระดาษกรองได้ค่าคงที่หรือน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 4 สมมติว่าเป็น A มิลลิกรัม
- 3) เลือกปริมาณตัวอย่างน้ำ ซึ่งจะให้ค่าของแข็งซึ่งได้โดยประมาณอย่างน้อย 2.5 มิลลิกรัม (เพิ่มจากน้ำหนักของกระดาษกรอง)
- 4) วางกระดาษกรองลงในกรวยบุชเนอร์ซึ่งทำการต่อเข้ากับเครื่องดูดอากาศ
- 5) ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดาษกรองให้เปียกและให้ถูกดูดติดแน่นกับกรวยบุชเนอร์
- 6) กรองตัวอย่างน้ำในปริมาณที่ต้องการโดยอาศัยแรงดูดช่วย
- 7) ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างของแข็งที่ติดอยู่ข้างกรวยจนหมดและรอกกระดาษกรองแห้ง
- 8) ปิดเครื่องดูดอากาศ ใช้ปากคีบคีบกระดาษกรองใส่ภาชนะทนไฟ เช่น ถ้วยอะลูมิเนียม หรือกระเจกนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 9) นำไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 10) ทิ้งให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น และนำกระดาษกรองไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง
- 11) ทำซ้ำในข้อ 9), 10) กระทั่งหาน้ำหนักกระดาษกรองได้ค่าคงที่หรือน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 4 สมมติเป็น B มิลลิกรัม

#### วิธีการคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอย หรือ เอสเอส , มก./ลบ.ตม.} = \frac{(B-A) \text{ กรัม} \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิตร)}}$$

#### ก-1.7 ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (Volatile Suspended Solids, VSS)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 ซม.
- 2) เตาเผาควบคุมอุณหภูมิที่  $500 \pm 50$  องศาเซลเซียส
- 3) กรวยบุชเนอร์ ความจุ 100 ลบ.ซม.
- 4) เครื่องดูดอากาศ
- 5) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 6) เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง

##### วิธีการวิเคราะห์

- 1) นำกระดาษกรองที่ได้จากการหาของแข็งแขวนลอย ทั้งหมด (B กรัม) ในข้อ ก-4 แล้วนำไปเผาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่ตั้งอุณหภูมิ  $500 \pm 50$  องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที)
- 2) ปล่อยให้เย็นลงเท่ากับอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่ (Fixed solids) (C กรัม)

##### วิธีการคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B-C) \text{ กรัม} \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิตร)}}$$

#### ก-1.8 กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acid, VFA)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ขวดกลั่น ขนาด 800 มิลลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ปิเปต (Transfer pipette) ขนาด 5 มิลลิลิตร
- 3) อุปกรณ์กลั่น

#### สารเคมี

- 1) กรดซัลฟูริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 1:1
- 2) สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 นอร์มัล
- 3) สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

#### วิธีการวิเคราะห์

- 1) นำน้ำตัวอย่างมา 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดกลั่นขนาด 800 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และเติม H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1:1 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน
- 2) ต่อขวดกลั่นเข้ากับเครื่องกลั่น แล้วรอกจนกลั่นได้ 150 มิลลิลิตร
- 3) นำสารละลายที่กลั่นได้ไปไทเทรตกับ 0.1 NaOH โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ได้จุดยุติเป็นสีชมพู แล้วบันทึกค่า

#### วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{กรดระเหยง่าย มก./ล. (as CH}_3\text{COOH)} &= \frac{\text{มล.ของ NaOH} \times N \times 60,000}{0.7 \times \text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)}} \\ \text{เมื่อ } N &= \text{นอร์มัลลิตีของ NaOH} \\ 0.7 &= \text{อัตราส่วนการกลั่นได้ (recovery factor)} \\ &= 70\% \end{aligned}$$

ซึ่งหาได้จากการนำสารละลายดีออกกรดอะซิติกเจือจางให้มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับตัวอย่างแล้วนำไปกลั่นเหมือนตัวอย่าง แล้วคำนวณอัตราส่วนการกลั่นได้

#### ก-1.9 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)

ปริมาณ Amino Nitrogen ในรูปสารอินทรีย์ หรือรูปแอมโมเนียอิสระ และแอมโมเนียไนโตรเจน ในน้ำตัวอย่าง จะถูกเปลี่ยนมาอยู่ในรูปสารประกอบ Ammonium Sulfate [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] ภายใต้สภาวะที่มี H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> โดยมี CuSO<sub>4</sub> เป็นตัว Catalyst หลังจากนั้นทำการกลั่นเพื่อให้สารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตในสภาวะที่เป็นด่างให้กลายเป็นก๊าซแอมโมเนียม และดักจับแก๊สที่ออกมาด้วย Boric Acid จากนั้นนำสารละลาย (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>+NH<sub>3</sub>) ไปไทเทรตกับกรด H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.02 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ชุดเครื่องย่อยสลาย (Digestion apparatus) ประกอบด้วยขวดเจลดาทาล์ ขนาด 800 mL และเตาให้ความร้อน (Heating mental) ที่ให้ความร้อน ขนาด 300-400 °C
- 2) ชุดเครื่องกลั่นหาแอมโมเนีย
- 3) ขวดเจลดาทาล์ (Kjeldahl flask) ขนาด 800-1000 มิลลิลิตร
- 4) กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 25 , 50 , 100 มิลลิลิตร
- 5) ปิเปต (Transfer pipette) ขนาด 5 , 10 มิลลิลิตร
- 6) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 7) บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร

### สารเคมี

- 1) น้ำกลั่นที่ปราศจากแอมโมเนีย
- 2) สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)
- 3) -สารละลายเมธิลเรด 200 มิลลิกรัมในเอซิดแอลกอฮอล์ 95% 100 มิลลิลิตร และสารละลายเมธิลีนบลู 100 มิลลิกรัมในเอซิดแอลกอฮอล์ 95% 50 มิลลิลิตร นำทั้งสองชนิดมาผสมกัน สารละลายนี้ไม่ควรเก็บไว้เกิน 1 เดือน
- 4) สารละลายกรดบอริก (Boric acid solution)
- 5) -สารละลายกรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) 20 กรัมในน้ำกลั่น เจือจางให้เป็น 1 ลิตร
- 6) สารละลายย่อยสลาย (Digestion Reagent)
- 7) -ซึ่งสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต( $K_2SO_4$ ) 134 กรัม และสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต ( $CuSO_4$ ) จำนวน 7.3 กรัม นำมาผสมกัน และเติมน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร คนให้ทั่วกันจนสารละลายหมด จากนั้นค่อย ๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น จำนวน 134 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร สารละลายนี้ควรเก็บในที่อุณหภูมิ 20 °C เพื่อป้องกันการตกตะกอน
- 8) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) – โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ )
- 9) -สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 กรัมและสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 25 กรัมในน้ำกลั่น เจือจางเป็น 1 ลิตร

### วิธีการวิเคราะห์

- 1) เตรียมน้ำตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายย่อยสลาย (Digestion Reagent) 50 มิลลิลิตร เขย่าขวดเจลดาทาล์ เพื่อให้สารผสมเข้ากัน แล้วนำไปวางบนเตาย่อยสลาย
- 2) การต้มย่อยสลาย นำไปต้มให้เหลือปริมาตรประมาณ 10-20 มิลลิลิตร จึงปิดเตาแล้วทิ้งให้เย็น นำมาเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) – โซเดียม ไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ ) จำนวน 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปต่อเข้ากับเครื่องกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) การกลั่น นำขวดเจลด้าห์ลที่มีตัวอย่างไปประกอบชุดกลั่น โดยปลายของแท่งแก้วด้านที่ไอแก๊สออกมา ให้นำขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งมีสารละลายบอริก 50 มิลลิลิตร และหยดอินดิเคเตอร์ผสม 1-2 หยดลงในขวดรูปชมพู่ ไปรองรับไอน้ำที่กลั่นออกมา
- 4) การไทเทรต นำส่วนที่กลั่นได้ไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.02 นอร์มัล เมื่อถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง

#### วิธีการคำนวณ

$$\text{TKN (mg N/L)} = \frac{(A-B) \times 280}{V}$$

- เมื่อ A = ปริมาตรกรดซัลฟูริกที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)  
 B = ปริมาตรกรดซัลฟูริกที่ใช้กับแบลงค์ (มิลลิลิตร)  
 V = ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

#### ก-1.10 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต และปริมาณแป้ง โดยวิธีฟีนอล-ซัลฟูริกแอซิด (Phenol-Sulfuric acid)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) หลอดทดลอง
- 2) Water Bath
- 3) Hot plate
- 4) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 5) กระจกกรอง
- 6) กรวยกรอง

##### สารเคมี

- 1) ฟีนอล ( $C_6H_6O$ )
- 2) กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ )
- 3) กลูโคส ( $C_6H_{12}O_6$ )

##### วิธีการวิเคราะห์

##### วิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต

- 1) ชั่งตัวอย่าง 0.50-1.00 กรัม ผสมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
- 2) เติมสารละลายฟีนอล 1 มิลลิลิตร และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
- 3) ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) นำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานสารละลายกลูโคส

#### วิเคราะห์ปริมาณแป้ง

- 1) ชั่งตัวอย่าง 0.50-1.0 กรัม ผสมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
- 2) นำไปต้มเป็นเวลา 15 นาที กรองน้ำส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ต่อ
- 3) เติมสารละลายฟีนอล 1 มิลลิลิตร และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
- 4) ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร
- 5) นำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานสารละลายกลูโคส

#### ก-1.11 ความต้องการออกซิเจนทางเคมีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Chemical Oxygen Demand, COD)

ซีโอดี หรือ ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand, COD) เป็นดัชนีบอกลถึงความมเป็นพิษของแหล่งน้ำได้ ซีโอดีหาจากปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการเกิดการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำด้วยสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตมาตรฐานในสภาวะที่เป็นกรด มีซิลเวอร์ไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและกำจัดสารรบกวน เมื่อใช้อุณหภูมิสูง ทำการรีฟลักซ์ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ใช้แก้วที่ทำด้วยบอโรซิลิเกต (Borosilicate Culture tube) ขนาด 16x100 mm ที่มีฝาเกลียวชนิดทีเอฟอี (Tetrafluoroethylene, TFE)
- 2) ฮีทติ้งบล็อก (Heating block) กล่องอลูมิเนียมตัน ลึก 45-50 มิลลิเมตร มีรูขนาดพอดีกับหลอดแก้ว
- 3) ปิเปต (Transfer Pipette) ขนาด 2,5 มิลลิลิตร
- 4) บิวเรต ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 5) ขวดรูปชมพู่ ขนาด 125 มิลลิลิตร

#### สารเคมี

- 1) สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไดโครเมต เข้มข้น 0.1 N (Primary Standard Potassium Solution)

-นำ  $K_2Cr_2O_7$  อบแห้งใน  $130\text{ }^{\circ}C$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก  $K_2Cr_2O_7$  มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1000 มิลลิลิตร

- 2) กรดซัลฟูริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต (Conc. $H_2SO_4$  with silver sulfite)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) 8.8 กรัม ปรับด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% เป็น 1000 มิลลิลิตร

3) สารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตไทแทนต์ (Ferrous ammonium sulfate titrant) เข้มข้นโดยประมาณ 0.05 นอร์มัล

-ละลายไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ประมาณ 19.6 กรัม ในน้ำกลั่นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร ทำให้เย็นแล้วเจือจาง 1000 มิลลิลิตร

-สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardize) ก่อนใช้ทุกครั้ง ด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต โดยเติมสารเคมีทุกชนิดตามตารางที่ ก.1 ลงในหลอดแก้วตามขนาดที่ต้องการโดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่าง ทั้งให้เย็นแล้วนำมาไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตโดยใช้เฟอโรอิน (Ferroun) จำนวน 2-3 หยดเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติคือสีน้ำตาลแดง

4) สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator)

-ละลาย (1,10-phenanthroline monohydrate ( $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 1.485 กรัมและไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 0.695 กรัมในน้ำกลั่นเจือจางให้เป็น 100 มิลลิลิตร

5) สารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP)

-ชั่ง KHP จำนวน 4.25 กรัม ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ  $103^\circ\text{C}$  และทั้งให้เย็นในโถอบแห้งแล้วละลายในน้ำกลั่นเจือจางเป็น 1000 มิลลิลิตร สารละลายนี้มีซีไอดีเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.1 ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ

ขนาดของหลอด ย่อยสลาย	ปริมาตรตัวอย่าง น้ำ (มิลลิลิตร)	ปริมาตร $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ สำหรับ ย่อยสลาย (มิลลิลิตร)	สารละลายกรด ซัลฟิวริก (มิลลิลิตร)	ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)
16x100 mm	2.50	1.50	3.50	7.50
20x150 mm	5.00	3.00	7.00	15.00
25x150 mm	10.00	6.00	14.00	30.00

### วิธีการวิเคราะห์

- ล้างหลอดแก้วและฝาด้วยกรดซัลฟิวริก 20% ก่อนใช้งานทุกครั้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อน
- เลือกใช้ปริมาตรของน้ำตัวอย่างและสารเคมีที่เหมาะสม ตามตารางที่ ก.1
- กรองน้ำตัวอย่างด้วยเครื่องกรองลดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต เข้มข้น 0.1 N (Primary Standard Potassium Solution) จำนวน 1.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดย่อยสลาย ทุก ๆ หลอด
- 5) เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต จำนวน 3.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดย่อยสลาย ทุก ๆ หลอด โดยค่อย ๆ ใส่ให้กรดไหลลงตามข้างหลอดไปอยู่ด้านล่าง
- 6) ปิดฝาหลอดให้สนิท ค่อย ๆ เขย่าเพื่อให้สารผสมเข้ากันดี
- 7) นำหลอดย่อยสลายไปใส่ลงในฮีทตั้งบล็อคหรือตู้อบที่  $150.00 \pm 2.00$  °C แล้วต้ม เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง
- 8) เมื่อครบเวลา ให้นำหลอดทดลองออกจากฮีทตั้งบล็อค แล้วทำให้เย็นที่อุณหภูมิ
- 9) เติมน้ำจากหลอดย่อยสลายลงขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมน้ำ Ferriin Indicator 2-3 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานทิตเนียม FAS
- 10) เมื่อถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนจากเหลืองเป็นสีเขียวแกมน้ำเงิน และจุดยุติสีน้ำตาลปนแดง
- 11) บันทึกปริมาตรของสารมาตรฐานทิตเนียม FAS ที่ใช้ในการไทเทรต
- 12) นำค่าที่ได้ไปคำนวณ

#### วิธีการคำนวณ

$$\text{ซีโอดี (mg O}_2\text{/L)} = \frac{(A-B) \times N \times 8000}{V}$$

- เมื่อ
- A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์ (มิลลิลิตร)
  - B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)
  - N = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)
  - V = ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

#### ก-1.12 การตรวจเชื้อที่ใช้ในถังผลิตก๊าซชีวภาพ

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) กล้องจุลทรรศน์
- 2) สไลด์
- 3) ลวดเขี่ยเชื้อ (loop)
- 4) ตะเกียงแอลกอฮอล์
- 5) กระดาษเช็ดเลนส์

##### สารเคมี

- 1) สีย้อม Safranin
- 2) สีย้อม Crystal violet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) น้ำยาแกรมไอโอดีน
- 4) เอทิลแอลกอฮอล์ 95%

#### วิธีการทดลอง

##### การเตรียมเชื้อแบคทีเรียสำหรับย้อมแกรม

- 1) ความสะอาดสไลด์ที่ใช้ย้อมสีแบคทีเรีย
- 2) หยดน้ำตัวอย่างลงบนสไลด์ 1 หยด
- 3) นำขวดเชื้อเชื้อที่เผาไฟแดงแล้ว มาเชื้อเชื้อให้กระจายเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ แล้วนำสไลด์ไปผ่านไฟ 2-3 ครั้ง

##### การย้อมสีแบบ Gram stain

- 1) หยดสีย้อม Crystal violet ลงบนสไลด์ให้ท่วมรอยที่เสมียร์ทิ้งไว้ 1 นาที
- 2) ล้างออกด้วยน้ำยาแกรมไอโอดีน แล้วหยดน้ำยาแกรมไอโอดีนให้ท่วมรอยเสมียร์เป็นเวลา 1 นาที
- 3) ล้างน้ำยาแกรมไอโอดีนด้วยน้ำกลั่นแล้วล้างออกอีกครั้งด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95% จนน้ำที่ล้างไม่มีสีติดออกมา
- 4) ย้อมทับ (Counterstain) ด้วยสีย้อม Safranin ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาที
- 5) ล้างออกด้วยน้ำกลั่น แล้วปล่อยให้สไลด์แห้ง
- 6) ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า และบันทึกภาพ

## ภาคผนวก ข

## ผลการทดลอง

## ข-1 คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง

## ตารางที่ ข-1.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของกากมันสำปะหลัง

คุณลักษณะของกากมัน สำปะหลัง	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ความชื้น (Moisture content) (%)	83.50	83.52	83.56	83.53	0.03
ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (Total carbohydrate) (g/L)	176.98	191.85	114.32	161.05	41.15
ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch) (g/L)	85.39	67.77	81.53	78.23	9.26
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	40.96	40.85	40.92	40.91	0.06

## ข-2 คุณลักษณะของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (Feed)

## ตารางที่ ข-2.1 ผลการทดลองของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	4.20	4.20	4.21	4.20	0.01
ของแข็งทั้งหมด (Total solids) (mg/L)	4,978.00	4,586.00	5,136.00	4,900.00	283.17
ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) (mg/L)	4,596.00	4,510.00	4,048.00	4,384.67	294.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ข-2.1 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid) (mg/L as CH <sub>3</sub> COOH)	162.76	162.76	162.76	162.76	0.00
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl nitrogen) (mg/L)	2.74	3.02	2.74	2.84	0.16
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand) (mg/L)	629.76	629.76	629.76	629.76	0.00
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	34.95	34.95	34.95	34.95	0.00
อัตราส่วนคาร์บอน ต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	12.31				

ตารางที่ ข-2.2 ผลการทดลองของวัสดุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	4.15	4.16	4.15	4.15	0.01
ของแข็งทั้งหมด (Total solids) (mg/L)	15,852.00	17,150.00	15,790.00	16,264.00	767.92
ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) (mg/L)	15,130.00	16,396.00	15,250.00	15,592.00	698.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.2 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid) (mg/L as CH <sub>3</sub> COOH)	180.43	182.86	182.86	182.05	1.40
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl nitrogen) (mg/L)	1.76	2.58	2.55	2.30	0.47
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand) (mg/L)	1,952.26	2,330.11	2,204.16	2,162.18	192.39
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	40.31	40.31	40.31	40.31	0.00
อัตราส่วนคาร์บอน ต่อ ไนโตรเจน (C/N ratio)	17.53				

ตารางที่ ข-2.3 ผลการทดลองของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	4.00	4.01	4.01	4.01	0.01
ของแข็งทั้งหมด (Total solids) (mg/L)	45,508.00	48,206.00	45,450.00	46,388.00	1,574.70
ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids) (mg/L)	43,284.00	46,738.00	43,200.00	44,407.00	2,018.85
กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid) (mg/L as CH <sub>3</sub> COOH)	394.29	402.86	402.86	400.00	4.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.3 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl nitrogen) (mg/L)	2.64	2.64	2.64	2.64	0.00
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand) (mg/L)	7,872.00	6,486.53	7,116.29	7,158.27	693.69
คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon) (mg/L)	40.85	40.85	40.85	40.85	0.00
อัตราส่วนคาร์บอน ต่อ ไนโตรเจน (C/N ratio)	15.47				

### ข-3 ผลการศึกษาสถานะในระหว่างหมักก๊าซชีวภาพ

#### 1) การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง

ตารางที่ ข-3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดของถังหมักกรดในระยะปรับสภาพ

วิเคราะห์ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกากมันสำปะหลัง (% v/v)	พีเอช			ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	1	3.68	3.68	3.67	3.83
2		3.83	3.83	3.84	
3		3.83	3.83	3.82	
4		3.84	3.85	3.84	
5		3.84	3.85	3.84	
6		3.89	3.90	3.89	
7		3.90	3.91	3.90	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่างของถึงหมักก๊าซมีเทนในระยะปรับสภาพ

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	พีเอช			ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	1	7.01	7.00	7.01	6.82
2		6.81	6.81	6.82	
3		6.80	6.81	6.80	
4		6.80	6.80	6.81	
5		6.81	6.82	6.81	
6		6.82	6.81	6.82	
7		6.72	6.73	6.72	

ตารางที่ ข-3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดของถึงหมักกรดในระยะทดลอง

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	พีเอช			ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	5	3.67	3.68	3.67	3.89
2		3.66	3.65	3.66	
3		3.66	3.66	3.67	
4		3.64	3.65	3.64	
5		3.65	3.65	3.66	
6		3.66	3.67	3.66	
7		3.64	3.64	3.65	
8		3.64	3.64	3.63	
9		3.65	3.65	3.66	
10		3.67	3.68	3.67	
11		3.68	3.69	3.68	
12		3.70	3.71	3.70	
13		3.74	3.75	3.74	
14		3.75	3.76	3.75	
15		3.80	3.80	3.81	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.3 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	พีเอช			ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
16	5	3.88	3.87	3.88	3.89
17		3.94	3.95	3.94	
18		4.07	4.08	4.07	
19		4.14	4.13	4.14	
20		4.18	4.18	4.19	
21		4.13	4.14	4.13	
22		4.08	4.08	4.08	
23		4.31	4.32	4.31	
24		4.22	4.22	4.23	
25		4.21	4.21	4.21	
26		4.20	4.20	4.21	
27		4.22	4.23	4.22	
28		4.18	4.19	4.18	
29	10	3.98	3.99	3.98	3.99
30		3.98	3.98	3.97	
31		4.05	4.04	4.05	
32		4.10	4.11	4.10	
33		4.09	4.09	4.10	
34		4.08	4.08	4.08	
35		4.07	4.06	4.07	
36		4.07	4.07	4.08	
37		4.07	4.07	4.07	
38		4.07	4.08	4.07	
39		3.91	3.92	3.91	
40		3.87	3.87	3.88	
41		3.87	3.86	3.87	
42		3.84	3.85	3.84	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.3 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	พีเอช			ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
43	30	3.83	3.84	3.83	3.83
44		3.79	3.79	3.80	
45		4.00	4.01	4.00	
46		3.92	3.92	3.93	
47		3.90	3.90	3.91	
48		3.90	3.91	3.90	
49		3.86	3.87	3.86	
50		3.86	3.86	3.86	
51		3.81	3.81	3.82	
52		3.74	3.75	3.74	
53		3.77	3.78	3.77	
54		3.74	3.74	3.75	
55		3.77	3.77	3.76	
56		3.75	3.75	3.76	

ตารางที่ ข-3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่างของถังหมักก๊าซมีเทนในระยะทดลอง

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	พีเอช			ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	5	6.74	6.75	6.74	6.74
2		6.92	6.91	6.92	
3		6.88	6.89	6.88	
4		6.85	6.84	6.85	
5		6.77	6.78	6.77	
6		6.78	6.76	6.78	
7		6.81	6.81	6.82	
8		6.81	6.82	6.81	
9		6.75	6.76	6.75	
10		6.90	6.90	6.90	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.4 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกากมัน สำปะหลัง (% v/v)	พีเอช			ค่าเฉลี่ยทั้งหมด		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
11	5	7.27	7.27	7.26	6.74		
12		6.67	6.67	6.67			
13		6.93	6.92	6.93			
14		6.86	6.86	6.86			
15		6.71	6.72	6.71			
16		6.60	6.61	6.60			
17		6.76	6.76	6.77			
18		6.53	6.54	6.53			
19		6.70	6.71	6.70			
20		6.43	6.43	6.44			
21		6.52	6.53	6.52			
22		6.54	6.55	6.54			
23		6.61	6.60	6.61			
24		6.63	6.64	6.63			
25		6.67	6.66	6.67			
26		6.69	6.69	6.69			
27		6.74	6.75	6.74			
28		6.65	6.65	6.64			
29		10	6.63	6.64		6.63	6.68
30			6.69	6.70		6.69	
31	6.73		6.74	6.73			
32	6.72		6.72	6.72			
33	6.78		6.78	6.79			
34	6.68		6.68	6.69			
35	6.67		6.68	6.68			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.4 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกากมัน สำปะหลัง (% v/v)	พีเอช			ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
36	10	6.70	6.71	6.70	6.68
37		6.75	6.76	6.75	
38		6.65	6.65	6.66	
39		6.68	6.69	6.68	
40		6.61	6.62	6.61	
41		6.70	6.71	6.70	
42		6.59	6.60	6.59	
43		30	6.61	6.62	
44	6.80		6.81	6.80	
45	6.72		6.72	6.73	
46	6.71		6.71	6.71	
47	6.75		6.75	6.76	
48	6.58		6.58	6.59	
49	6.55		6.56	6.55	
50	6.54		6.54	6.55	
51	6.71		6.72	6.71	
52	6.63		6.63	6.64	
53	6.58		6.58	6.58	
54	6.54		6.54	6.55	
55	6.46		6.46	6.47	
56	6.54		6.54	6.54	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่าง

ตารางที่ ข-3.5 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความเป็นด่างของถังหมักก๊าซมีเทน

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	1,025	1,035	1,025	1,028.33	5.77
2		978	988	985	983.67	5.13
3		994	990	991	991.67	2.08
4		974	980	976	976.67	3.06
5	10	1,015	1,013	1,013	1,013.67	1.15
6		1,015	1,020	1,018	1,017.67	2.52
7		1,025	1,024	1,020	1,023.00	2.65
8		1,024	1,022	1,024	1,023.33	1.15
9	30	2,095	2,100	2,185	2,126.67	50.58
10		2,085	2,076	2,080	2,080.33	4.51
11		2,098	2,100	2,105	2,101.00	3.61
12		2,056	2,061	2,059	2,058.67	2.52

## 3) การเปลี่ยนแปลงของแข็งทั้งหมดในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

ตารางที่ ข-3.6 การเปลี่ยนแปลงของแข็งทั้งหมดของถังหมักกรด

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติม กากมันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	2,290	3,230	3,224	2,914.67	540.99
2		3,352	3,414	3,212	3,326.00	103.48
3		3,896	3,843	3,716	3,818.33	92.50
4		4,338	4,260	4,232	4,276.67	54.93
5		4,400	4,333	4,566	4,433.00	119.95
6		4,552	4,600	4,464	4,538.67	68.97
7		4,826	4,876	4,926	4,876.00	50.00
8		4,830	5,016	5,166	5,004.00	168.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.6 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติม กากมันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
9	10	4,982	4,862	4,906	4,916.67	60.71
10		5,286	5,486	5,510	5,427.33	122.99
11		5,454	5,490	5,888	5,610.67	240.85
12		6,426	6,746	6,426	6,532.67	184.75
13	30	10,766	10,516	10,426	10,569.33	176.16
14		12,873	12,318	12,194	12,461.67	361.58
15		14,694	14,324	14,688	14,568.67	211.91
16		16,168	17,178	16,832	16,726.00	513.28

ตารางที่ ข-3.7 การเปลี่ยนแปลงของแข็งทั้งหมดของถ้ำหมักก๊าซมีเทน

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	1,582	1,562	1,582	1,575.33	11.55
2		1,670	1,736	1,650	1,685.33	45.00
3		1,646	1,760	1,706	1,704.00	57.03
4		1,824	1,764	1,750	1,779.33	39.31
5		1,828	1,752	1,798	1,792.67	38.28
6		1,990	1,944	1,922	1,952.00	34.70
7		2,040	1,986	1,826	1,950.67	111.29
8		2,018	2,064	1,986	2,022.67	39.21
9	10	1,946	2,052	2,036	2,011.33	57.14
10		2,130	2,193	2,183	2,168.67	33.86
11		1,840	2,023	2,370	2,077.67	269.20
12		2,154	2,404	2,314	2,290.67	126.62
13	30	2,340	2,376	2,410	2,375.33	35.00
14		2,396	2,416	2,496	2,436.00	52.92
15		2,730	2,603	2,510	2,614.33	110.44
16		2,963	3,026	3,123	3,037.33	80.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4) การเปลี่ยนแปลงของแข็งระเหยง่ายในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

ตารางที่ ข-3.8 การเปลี่ยนแปลงของแข็งระเหยง่ายของถังหมักกรด

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	1,794	2,738	2,716	2,416.00	538.78
2		2,898	2,810	2,778	2,828.00	62.14
3		3,390	3,223	3,220	3,277.67	97.30
4		3,856	3,712	3,666	3,744.67	99.12
5		3,863	3,820	3,926	3,869.67	53.31
6		4,022	3,986	3,970	3,992.67	26.63
7		4,226	4,316	4,346	4,296.00	62.45
8		4,253	4,220	4,493	4,322.00	149.01
9		4,512	4,482	4,432	4,475.33	40.41
10		4,693	4,846	4,883	4,807.33	100.73
11	10	5,002	5,020	5,386	5,136.00	216.69
12		5,903	6,206	5,846	5,985.00	193.50
13		9,998	9,716	9,694	9,802.67	169.52
14		11,734	11,872	11,600	11,735.33	136.00
15		13,728	13,106	13,630	13,488.00	334.43
16		14,858	15,034	14,766	14,886.00	136.18

ตารางที่ ข-3.9 การเปลี่ยนแปลงของแข็งระเหยง่ายของถังหมักก๊าซมีเทน

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	836	806	794	812.00	21.63
2		928	992	1,010	976.67	43.10
3		933	926	920	926.33	6.51
4		1,034	1,004	1,014	1,017.33	15.28
5		1,014	1,094	1,018	1,042.00	45.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.9 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
6	5	1,180	1,062	1,142	1,128.00	60.23
7		1,226	1,036	1,196	1,152.00	102.14
8		1,230	1,198	1,256	1,228.00	29.05
9	10	1,120	1,246	1,231	1,199.00	68.83
10		1,278	1,103	1,110	1,163.67	99.08
11		1,351	1,340	1,543	1,411.33	114.16
12		1,418	1,526	1,616	1,520.00	99.14
13	30	1,256	1,440	1,343	1,346.33	92.05
14		1,368	1,814	1,382	1,521.33	253.552
15		1,736	1,470	1,636	1,614.00	134.36
16		1,766	1,876	1,830	1,824.00	55.24

## 5) การเปลี่ยนแปลงของแข็งแขวนลอยในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

ตารางที่ ข-3.10 การเปลี่ยนแปลงของแข็งแขวนลอยของถังหมักกรด

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งแขวนลอย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	2,026	2,168	2,002	2,065.33	89.72
2		2,276	2,372	2,232	2,293.33	71.59
3		2,454	2,500	2,612	2,522.00	81.26
4		2,534	2,601	2,580	2,571.67	34.27
5		2,714	2,764	2,750	2,742.67	25.79
6		2,788	2,760	2,743	2,763.67	22.72
7		2,810	2,820	2,833	2,821.00	11.53
8		3,210	3,234	3,340	3,261.33	69.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.10 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งแขวนลอย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
9	10	3,630	3,756	3,641	3,675.67	69.79
10		3,728	3,800	3,842	3,790.00	57.65
11		4,672	4,762	4,788	4,740.67	60.87
12		4,948	5,108	5,162	5,072.67	111.29
13	30	8,268	8,662	9,664	8,864.67	719.73
14		11,948	12,176	12,142	12,088.67	123.00
15		14,208	14,714	15,078	14,666.67	436.93
16		15,338	15,458	15,686	15,494.00	176.77

ตารางที่ ข-3.11 การเปลี่ยนแปลงของแข็งแขวนลอยของถังหมักก๊าซมีเทน

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งแขวนลอย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	1,672	1,648	1,583	1,634.33	46.05
2		1,544	1,472	1,474	1,496.67	41.00
3		1,514	1,536	1,568	1,539.33	27.15
4		1,428	1,412	1,452	1,430.67	20.13
5		1,020	984	1,014	1,006.00	19.29
6		1,202	1,194	1,182	1,192.67	10.07
7		1,478	1,300	1,520	1,432.67	116.80
8		1,466	1,400	1,294	1,386.67	86.77
9	10	1,176	1,124	1,140	1,146.67	26.63
10		1,086	1,048	1,056	1,063.33	20.03
11		748	762	864	791.33	63.32
12		994	1,062	1,072	1,042.67	42.44
13	30	1,368	1,286	1,554	1,402.67	137.32
14		1,234	1,214	1,362	1,270.00	80.30
15		1,198	1,094	1,274	1,188.67	90.36
16		1,208	1,276	1,298	1,260.67	46.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6) การเปลี่ยนแปลงของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

ตารางที่ ข-3.12 การเปลี่ยนแปลงของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของถังหมักกรด

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	5	1,998	2,136	1,952	2,028.67	95.76	
2		2,168	2,240	2,150	2,186.00	47.62	
3		2,364	2,403	2,578	2,448.33	113.98	
4		2,420	2,540	2,478	2,479.33	60.01	
5		2,603	2,650	2,600	2,617.67	28.04	
6		2,610	2,678	2,651	2,646.33	34.24	
7		2,742	2,701	2,770	2,737.67	34.70	
8		3,140	3,150	3,220	3,170.00	43.59	
9		3,420	3,612	3,550	3,527.33	97.99	
10	10	3,629	3,701	3,721	3,683.67	48.39	
11		4,478	4,499	4,481	4,486.00	11.36	
12		4,900	4,998	5,090	4,996.00	95.02	
13		30	8,138	8,412	9,534	8,694.67	739.68
14			10,592	11,802	10,336	10,910.00	783.03
15			13,984	14,434	14,864	14,427.33	440.04
16			15,166	15,182	15,422	15,256.67	143.41

ตารางที่ ข-3.13 การเปลี่ยนแปลงของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของถังหมักก๊าซมีเทน

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	1,235	1,185	1,044	1,154.67	99.05
2		1,350	1,260	1,306	1,305.33	45.00
3		1,216	1,306	1,330	1,284.00	60.10
4		1,286	1,248	1,328	1,287.33	40.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.13 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ของแข็งระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
5	5	884	938	952	924.67	35.91
6		1,126	1,066	1,086	1,092.67	30.55
7		1,108	1,102	1,172	1,127.33	38.80
8		1,148	1,194	1,066	1,136.00	64.84
9	10	1,028	1,078	1,060	1,055.33	25.32
10		1,026	1,040	1,032	1,032.67	7.02
11		710	716	780	735.33	38.80
12		928	966	982	958.67	27.74
13	30	1,272	1,204	1,424	1,300.00	112.64
14		998	1,046	1,076	1,040.00	39.34
15		1,098	1,022	1,190	1,103.33	84.13
16		1,150	1,206	1,260	1,205.33	55.00

## 7) การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยง่ายในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

ตารางที่ ข-3.14 การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยง่ายของถังหมักกรด

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	กรดไขมันระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	1,988.57	1,997.11	2,074.28	2,019.99	47.21
2		2,065.71	2,065.71	2,074.29	2,068.57	4.95
3		1,988.57	1,731.43	1,714.28	1,811.43	153.65
4		1,645.71	1,637.14	1,637.14	1,640.00	4.95
5		1,714.29	1,731.43	1,731.43	1,725.71	9.90
6		1,817.14	1,714.29	1,902.86	1,811.43	94.42
7		1,705.71	1,645.71	1,697.14	1,682.86	32.45
8		1,230.00	1,224.00	1,230.00	1,228.00	3.46
9	10	1,800.00	1,808.00	1,808.00	1,805.33	4.62
10		1,894.28	1,885.71	1,885.71	1,888.57	4.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.14 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	กรดไขมันระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
11	10	2,005.71	2,091.42	2,014.28	2,037.14	47.21	
12		2,177.14	2,185.71	2,194.28			2,185.71
13	30	3,737.14	3,625.71	3,651.42	3,671.42	58.35	
14		3,677.14	3,678.00	3,678.85			3,678.00
15		3,685.71	3,702.85	3,694.28			3,694.28
16		4,277.14	4,217.14	4,225.71			4,240.00

ตารางที่ ข-3.15 การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยง่ายของถั่วงอกข้าวมีเทน

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	กรดไขมันระเหยง่าย (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	5	118.27	112.23	113.05	114.52	3.27	
2		155.72	128.83	126.64			137.06
3		188.57	197.14	197.14			194.28
4		85.71	94.29	85.71			88.57
5		120.00	102.86	102.86			108.57
6		111.43	102.86	102.86			105.71
7		77.14	77.14	77.14			77.14
8		78.00	72.00	72.00			74.00
9	10	42.86	51.43	42.86	45.72	4.95	
10		94.29	85.71	94.29			91.43
11		42.86	34.29	34.29			37.14
12		34.29	51.43	51.43			45.71
13	30	42.86	34.29	34.29	37.14	4.95	
14		68.57	70.29	72.86			70.57
15		42.86	34.29	34.29			37.14
16		42.86	34.29	34.29			37.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8) การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนทั้งหมดในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

ตารางที่ ข-3.16 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักกรด

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	9.88	10.72	9.60	10.07	0.44
2		9.49	9.34	10.17	9.66	0.44
3		8.92	9.19	9.19	9.10	0.16
4		8.31	8.66	9.33	8.77	0.52
5		6.86	6.86	6.59	6.77	0.16
6		6.04	6.31	6.04	6.13	0.16
7		8.78	9.60	8.78	9.06	0.48
8		4.12	3.84	3.84	3.93	0.16
9	10	9.33	9.06	9.33	9.24	0.16
10		2.74	3.02	3.02	2.93	0.16
11		4.94	3.84	3.84	4.21	0.63
12		3.84	4.12	4.12	4.02	0.16
13		4.66	4.94	4.66	4.76	0.16
14		5.15	4.87	4.87	4.96	0.16
15		5.49	5.76	5.90	5.72	0.21
16		12.70	13.17	12.90	12.92	0.24
	30					

ตารางที่ ข-3.17 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนทั้งหมดของถังหมักก๊าซมีเทน

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	118.27	112.23	113.05	114.52	2.67
2		155.72	128.83	126.64	137.06	13.22
3		100.84	101.12	101.12	101.02	0.13
4		104.82	110.86	110.86	108.85	2.85
5		111.68	110.31	111.68	111.22	0.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.17 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกาก มันสำปะหลัง (% v/v)	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
6	5	107.02	104.82	107.02	106.28	1.03
7		95.22	95.22	95.49	95.31	0.13
8		99.88	100.98	100.16	100.34	0.47
9	10	110.03	110.58	110.58	110.40	0.26
10		96.59	96.86	96.59	96.68	0.13
11		89.18	94.12	90.28	91.19	2.12
12		91.38	91.10	91.10	91.19	0.13
13	30	89.18	89.73	89.45	89.45	0.22
14		88.70	86.50	87.33	87.51	0.91
15		87.26	86.98	87.26	87.17	0.13
16		85.34	86.43	86.16	85.98	0.46

## 9) การเปลี่ยนแปลงความต้องการออกซิเจนทางเคมีในถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน

ตารางที่ ข-3.18 การเปลี่ยนแปลงความต้องการออกซิเจนทางเคมีของถังหมักกรด

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติม กากมันสำปะหลัง (% v/v)	ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	2,519.04	2,519.04	2,440.32	2,492.80	45.45
2		2,558.40	2,952.00	2,952.00	2,820.80	0.00
3		3,345.60	3,345.60	3,345.60	3,345.60	0.00
4		3,506.04	3,424.32	3,503.04	3,477.80	46.34
5		3,778.56	3,463.68	3,621.12	3,621.12	157.44
6		3,896.00	4,290.24	3,817.92	4,001.60	253.05
7		3,936.00	3,936.00	3,936.00	3,936.00	0.00
8		4,014.72	4,290.24	4,329.60	4,211.52	171.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.18 (ต่อ)

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติม กากมันสำปะหลัง (% v/v)	ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
9	10	4,093.44	4,054.08	4,132.80	4,093.44	39.36
10		4,329.60	3,933.60	3,936.00	4,066.40	227.94
11		4,408.32	4,408.32	4,408.32	4,408.32	0.00
12		3,926.00	3,926.00	4,723.20	4,191.73	460.26
13	30	5,392.32	5,392.32	5,234.88	5,339.84	90.90
14		7,399.68	7,399.68	7,399.66	7,399.67	0.00
15		7,872.00	8,186.88	7,997.95	8,018.94	158.49
16		8,627.71	8,375.81	9,257.47	8,753.66	454.13

ตารางที่ ข-3.19 การเปลี่ยนแปลงความต้องการออกซิเจนทางเคมีของถังหมักก๊าซมีเทน

วิเคราะห์ ครั้งที่	อัตราส่วนการเติม กากมันสำปะหลัง (% v/v)	ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (mg/L)			ค่าเฉลี่ย ทั้งหมด (mg/L)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	5	62.98	62.95	62.98	62.97	0.02
2		133.82	133.82	118.08	128.58	9.09
3		181.06	163.31	181.06	175.14	10.24
4		118.08	118.08	111.78	115.98	3.64
5		75.57	77.15	75.57	76.10	0.91
6		96.04	100.76	99.19	98.66	2.40
7		204.93	188.93	188.93	194.26	9.24
8		94.46	94.46	92.89	93.94	0.91
9	10	89.74	80.29	83.45	83.94	0.91
10		157.44	173.18	173.18	157.10	0.91
11		125.95	125.95	125.95	125.95	2.40
12		62.98	62.98	47.23	57.73	0.00
13	30	83.44	83.44	83.44	83.44	0.00
14		147.99	147.99	141.69	145.89	3.64
15		67.70	61.40	67.70	65.60	3.64
16		105.48	124.48	105.48	111.82	10.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 10) การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ ข-3.20 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของก๊าซชีวภาพ

ระยะเวลา (day)	อัตราส่วนการเติมกากมัน สำปะหลัง (% v/v)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (mL/day)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (mL)
1		4,000	4,000
2		5,778	9,778
3		3,100	12,878
4		2,500	15,378
5		2,500	17,878
6		2,300	20,178
7		3,500	23,678
8		3,615	27,293
9		6,730	34,023
10		7,800	41,823
11		4,500	46,323
12		3,630	49,953
13		2,950	52,903
14		3,300	56,203
15	5	8,800	65,003
16		9,100	74,103
17		2,700	76,803
18		1,000	77,803
19		1,050	78,853
20		5,200	84,053
21		4,300	88,353
22		4,200	92,553
23		2,700	95,253
24		2,100	97,353
25		1,700	99,053
26		2,300	101,353
27		3,400	104,753
28		3,500	108,253

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.20 (ต่อ)

ระยะเวลา (day)	อัตราส่วนการเติมกากมัน สำปะหลัง (% v/v)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (mL/day)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (mL)
29		3,500	111,753
30		4,200	115,953
31		7,000	122,953
32		3,000	125,953
33		6,200	132,153
34		3,600	135,753
35		4,200	139,953
36	10	4,700	144,653
37		3,000	147,653
38		4,300	151,953
39		4,210	156,163
40		5,100	161,263
41		4,900	166,163
42		3,600	169,763
43		5,750	175,513
44		6,150	181,663
45		6,340	188,003
46		6,780	194,783
47		6,900	201,683
48		6,790	208,473
49		7,150	215,623
50	30	6,900	222,523
51		7,450	229,973
52		7,200	237,173
53		7,000	244,173
54		6,800	250,973
55		7,200	258,173
56		7,500	265,673

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 11) การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ ข-3.21 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกากมัน สำปะหลัง (% v/v)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
1		66.6	28.1	1.5	5
2		60.2	21.6	3.5	5
3		58.5	38.3	5.8	15
4		61.3	33.9	2.2	25
5		61.3	37.2	1.4	25
6		59.9	38.3	1.6	25
7		59.2	39.2	1.4	15
8		65.0	30.3	2.5	20
9		67.1	30.1	2.1	20
10		65.1	30.0	2.7	20
11		64.7	31.2	1.9	20
12		58.7	40.1	1.0	25
13	5	58.9	39.8	1.1	25
14		60.5	38.0	1.3	25
15		58.5	34.3	2.8	25
16		60.6	35.3	2.0	25
17		62.8	36.0	1.1	25
18		63.0	35.8	1.0	15
19		62.5	36.4	1.0	30
20		63.4	35.5	1.0	30
21		64.5	34.5	0.9	25
22		64.6	33.6	1.7	25
23		65.3	33.6	0.9	25
24		65.1	33.9	0.9	30
25		64.4	34.5	0.9	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.21 (ต่อ)

ครั้งที่	อัตราส่วนการเติมกากมัน สำปะหลัง (% v/v)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
26	10	64.9	34.1	0.8	25
27		66.2	31.3	1.1	40
28		67.8	31.0	1.1	25
29		65.6	33.2	1.1	25
30		68.7	30.1	1.1	20
31		67.2	31.6	1.1	40
32		70.4	28.2	1.3	40
33		68.7	30.3	0.9	45
34		66.4	32.5	1.0	30
35		67.0	31.9	1.0	40
36		67.7	30.9	1.3	30
37		66.4	32.4	1.1	25
38		65.4	33.5	1.0	30
39		67.6	30.2	2.1	30
40		65.5	30.5	1.2	30
41		68.3	30.4	1.1	25
42		65.1	33.5	1.2	25
43		66.5	30.3	1.3	120
44		65.3	30.3	1.1	155
45		64.2	31.8	0.9	130
46	67.2	30.8	1.2	175	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## คำนวณ

## ค-1 การคำนวณระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในสารระบบ

การคำนวณระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในระบบ

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

$$V = \text{ปริมาตรถังหมักกรด} (\pi r^2 h)$$

$$Q = \text{อัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าระบบ}$$

$$\begin{aligned} \text{ถังหมักกรด : แทนค่า } V &= \pi \times (17.75)^2 \times 28.02 \\ &= 27,734.14 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \\ &= 27.73 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

ในช่วงทำการทดลอง อัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าระบบ 1 ลิตรต่อวัน

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

$$\text{HRT} = 28 \text{ วัน}$$

$$\begin{aligned} \text{ถังหมักก๊าซมีเทน : แทนค่า } V &= \pi \times (20.5)^2 \times 40.014 \\ &= 52,810.17 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \\ &= 52.81 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

ในช่วงการทดลอง อัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าระบบ 0.5 ลิตรต่อวัน

$$\text{HRT} = \frac{52.81 \text{ ลิตร}}{0.5 \text{ ลิตรต่อวัน}}$$

$$\text{HRT} = 106 \text{ วัน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-2 การคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

ในช่วงทำการทดลอง ทำการป้อนวัตถุดิบเข้าระบบ (ความชื้น 83.53 เปอร์เซ็นต์) 50, 100, 300 กรัม ปรับด้วยน้ำประปาเป็น 1 ลิตร

ตารางที่ ค-2.1 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบ

เวลา (วัน)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (mL)	น้ำหนักของกากมันสำปะหลัง (g)	mL Biogas/g Biomass
1	4000.00		80.00
2	5778.00		80.00
3	3100.00		62.00
4	2500.00		50.00
5	2500.00		50.00
6	2300.00		46.00
7	3500.00		70.00
8	3615.00		72.30
9	6730.00		134.60
10	78.00		156.00
11	4500.00		90.00
12	3630.00		72.60
13	2950.00		59.00
14	3300.00		66.00
15	8800.00		176.00
16	9100.00		182.00
17	2700.00		54.00
18	1000.00		20.00
19	1050.00		21.00
20	5200.00		104.00
21	4300.00		86.00
22	4200.00		84.00
23	2700.00		54.00
24	2100.00		42.00
25	1700.00		34.00
26	2300.00		46.00
27	3400.00		68.00
28	3500.00		70.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2.1 (ต่อ)

เวลา (วัน)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (mL)	น้ำหนักของกากมันสำปะหลัง (g)	mL Biogas/g Biomass
29	3500.00	100	35.00
30	4200.00		42.00
31	7000.00		70.00
32	3000.00		30.00
33	6200.00		62.00
34	3600.00		36.00
35	4200.00		42.00
36	4700.00		47.00
37	3000.00		30.00
38	4300.00		30.00
39	4210.00		42.10
40	5100.00		51.00
41	4900.00		49.00
42	3600.00		36.00
43	5750.00		19.17
44	6150.00		20.50
45	6340.00		21.13
46	6780.00		22.60
47	6900.00		23.00
48	6790.00		22.63
49	7150.00		23.83
50	6900.00		23.00
51	7450.00		24.83
52	7200.00		24.00
53	7000.00		23.33
54	6800.00		22.67
55	7200.00		24.00
56	7500.00		25.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลัง

$$\begin{aligned} \text{ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักกากมันสำปะหลัง} &= \frac{\text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (mL)}}{\text{น้ำหนักแห้งของกากมันสำปะหลัง (g)}} \\ &= \frac{4,000 \text{ mL}}{50 \text{ g Biomass}} \\ &= 80 \text{ mL Biogas/g Biomass} \end{aligned}$$

ตารางที่ ค-2.2 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด

วันที่	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (%)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (mL)	%CH <sub>4</sub>	VS removed (g)	mL Biogas/gVS removed	mL CH <sub>4</sub> /gVS removed	
2/10/60	3	5	3100	58.5	35.73	86.77	50.76	
5/10/60	6		2300	61.3	34.08	67.49	41.37	
9/10/60	10		7800	65.1	34.58	225.54	146.83	
10/10/60	11		4500	64.7	33.67	133.64	86.46	
16/10/60	17		2700	62.8	33.43	80.77	50.73	
17/10/60	18		1000	63.0	32.57	30.71	19.34	
24/10/60	25		1700	64.4	32.32	52.60	33.87	
25/10/60	26		2300	65.1	31.57	72.86	47.43	
8/11/60	7	10	4700	68.7	143.93	32.65	22.43	
9/11/60	8		3000	66.4	144.28	20.79	13.81	
13/11/60	13		4900	65.4	141.81	34.55	22.60	
14/11/60	14		3600	67.6	140.72	25.58	17.29	
20/11/60	6		30	6790	68.3	430.61	15.77	10.77
21/11/60	7			7150	65.1	428.86	16.67	10.85
27/11/60	13	7200		66.5	427.93	16.83	11.19	
28/11/60	14	7500		65.3	425.83	17.61	11.50	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2.3 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักของกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกกำจัด

วันที่	เวลา (วัน)	ความเข้มข้นกากมันสำปะหลัง (%)	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (mL)	%CH <sub>4</sub>	VFAs removed (g)	mL Biogas/gVFAs removed	mL CH <sub>4</sub> /gVFAs removed
18/10/60	19	5	1,050	62.5	0.74	1,415.50	884.69
31/10/60	27		3,400	65.1	0.86	3,971.63	2,585.53
1/11/60	28		3,500	64.4	0.89	3,943.66	2,539.72
8/11/60	8	10	4,700	68.7	1.36	3,447.49	2,368.43
9/11/60	9		3,000	66.4	0.91	3,310.56	2,198.21
14/11/60	12		5,100	65.4	1.45	3,519.55	2,301.79
15/11/60	13		4,900	67.6	1.36	3,594.13	2,429.63
21/11/60	7	30	7,150	65.5	3.63	1,970.47	1,290.66
22/11/60	8		6,900	68.3	3.29	2,094.54	1,430.57
28/11/60	13		7,200	65.1	3.63	1,984.25	1,291.75
29/11/60	14		7,500	66.5	3.63	2,066.93	1,374.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้