

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนชีวภาพจากผักตบชวาที่ผ่าน  
การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกโดยการหมักแบบไร้อากาศ

BIOHYDROGEN AND BIOMETHANE PRODUCTION FROM  
WATER HYACINTH VIA ANAEROBIC DIGESTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2562 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIOHYDROGEN AND BIOMETHANE PRODUCTION FROM  
WATER HYACINTH VIA ANAEROBIC DIGESTION



YAOWAPHA HARIWONGSAKUL  
WATHANYA WICHAINPLA  
SORNTANUN CHUDUANG

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายใน  
ACADEMIC YEAR 2019 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ      การผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนชีวภาพจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกโดยการหมักแบบไร้อากาศ  
 BIOHYDROGEN AND BIOMETHANE PRODUCTION FROM WATER HYACINTH VIA ANAEROBIC DIGESTION

ชื่อนักศึกษา      เยาวพา    หริวงศ์สกุล    รหัสนักศึกษา 59050600  
                           วทันยา    วิเชียรผลา    รหัสนักศึกษา 59050604  
                           ศรธัญญ์    ชูดวง            รหัสนักศึกษา 59050617

ปริญญา      วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
 ภาควิชา      เคมี  
 คณะ      วิทยาศาสตร์  
 มหาวิทยาลัย      สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)  
 ปีการศึกษา      2562  
 อาจารย์ที่ปรึกษา      ผศ.พิสมัย    ชัยรัตน์อุทัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ประธานกรรมการ	
ดร.กสินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการ	
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนชีวภาพจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกโดยการหมักแบบไร้อากาศ Biohydrogen and Biomethane production from Water Hyacinth via Anaerobic Digestion
ชื่อนักศึกษา	เยาวพา หริวงศ์สกุล รหัสนักศึกษา 59050600 วทันยา วิเชียรผลา รหัสนักศึกษา 59050604 ศรณัญญ์ ชูดวง รหัสนักศึกษา 59050617
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

### บทคัดย่อ

โครงการนี้ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวาต่อปริมาตรสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งใช้ในการปรับสภาพผักตบชวาเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างผักตบชวาต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตั้งแต่ 1:10, 1:20, 1:30, และ 1:40 โดยใช้ผักตบชวา 10 กรัม TVS (น้ำหนักจริงที่ซั่ง 12.82 กรัม) หมักในขวดหมักขนาด 1 ลิตร (กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ) พบว่าอัตราส่วนระหว่างผักตบชวาต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ 1:10, 1:20, 1:30, และ 1:40 มีไฮโดรเจนเกิดขึ้น 141.35, 161.92, 111.28, 143.79 มิลลิลิตร ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า 1:20 สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ดีที่สุด ส่วนการผลิตก๊าซมีเทน มีมีเทนเกิดขึ้น 625.39, 628.27, 1059.83, 111.59 มิลลิลิตร ตามลำดับ พบว่า 1:30 สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดีที่สุด

**คำสำคัญ :** กรดซัลฟิวริก กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ การผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีเทน ผักตบชวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Biohydrogen and Biomethane production from Water Hyacinth via Anaerobic Digestion	
<b>Students</b>	Ms. Yaowapha Hariwongsakul	Student ID 59050600
	Ms. Wathanya Wichainpla	Student ID 59050604
	Ms. Sorntanun Chuduang	Student ID 59050617
<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>	2019	
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Pitsamai Chairat-utai	

### Abstract

This special project studied the optimal ratio between Water Hyacinth and 2 percent sulfuric acid solution by volume that is used to condition the Water Hyacinth to precursor of biogas production. Prepared the ratio of Water Hyacinth and 2 percent sulfuric acid solution by volume as follows 1:10, 1:20, 1:30, 1:40 and used Water Hyacinth 10 grams TVS (actual weight is 12.82 grams). Fermented them in the 1 liter bottle (anaerobic fermentation process), the ratio of Water Hyacinth and 2 percent sulfuric acid solution by volume as follows 1:10, 1:20, 1:30, 1:40 produced Hydrogen up to 141.35, 161.92, 111.28, 143.79 mL and produced Methane up to 625.39, 628.27, 1059.83, 111.59 mL respectively. So 1:20 can produce hydrogen the best and 1:30 can produce methane the best.

**Keywords :** Anaerobic fermentation process, hydrogen and methane gas, Sulfuric acid, Water Hyacinth

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือดังนี้ ขอขอบพระคุณ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ที่คอยให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ที่ช่วยชี้แนะถึงข้อบกพร่อง ให้คำแนะนำ และตรวจสอบโครงการพิเศษนี้เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชุติมา จารุศิริพจน์ อาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้สถานที่และอุปกรณ์ในการทำปฏิบัติการ และคอยให้คำแนะนำมาตลอดการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ โรงงานผลิตเส้นไหมชื่อเอง จังหวัดนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียมาใช้ในการปฏิบัติการโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้สถานที่และอุปกรณ์ในการทำปฏิบัติการโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ รวมถึงบุคลากรของคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา รวมถึงบุคคลทุกคนในครอบครัว ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อน ๆ และสัตว์เลี้ยง รวมทั้งบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ

เยาวพา หริวงศ์สกุล

วทันยา วิเชียรผลา

ศรณัญญ์ ชูดวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 ผักตบชวา.....	3
2.1.1 เกี่ยวกับผักตบชวา.....	3
2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา.....	3
2.1.3 แหล่งที่พบ.....	4
2.1.4 ถิ่นกำเนิดและการแพร่กระจายของผักตบชวา.....	4
2.1.5 ประโยชน์ของผักตบชวา.....	4
2.1.6 ปัญหาที่เกิดจากผักตบชวา.....	5
2.2 ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose).....	6
2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	7
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....	8
2.2.3 ลิกนิน (Lignin).....	9
2.3 วิธีการปรับสภาพสารตั้งต้น (Substrate Pretreatment Method).....	10
2.3.1 การปรับสภาพด้วยวิธีการทางกายภาพ (Physical Pretreatment).....	11
2.3.1.1 การใช้แรงทางกล (Mechanical Communication).....	12
2.3.1.2 การใช้ความร้อน (Thermal Pretreatment).....	12
2.3.2 การปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Pretreatment).....	13
2.3.2.1 การปรับสภาพด้วยโอโซน (Ozonolysis).....	13
2.3.2.2 การปรับสภาพด้วยด่าง (Alkali Pretreatment).....	13
2.3.2.3 การปรับสภาพด้วยกรด (Acid Pretreatment).....	13
2.3.3 การปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมีฟิสิกส์ (Physicochemical Pretreatment).....	14
2.3.3.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam Explosion).....	14
2.3.3.2 การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (Ammonia fiber explosion, AFEX).....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3.3 การระเบิดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2 explosion) .....	16
2.3.3.4 การปรับสภาพด้วยน้ำร้อน (Liquid hot water).....	16
2.3.3.5 การย่อยเปียก (Wet oxidation).....	16
2.3.3.6 การปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave pretreatment) .....	16
2.3.3.7 การปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasonic pretreatment)...	16
2.3.4 การปรับสภาพด้วยวิธีการชีวภาพ (Biological Pretreatment) .....	17
2.4 การผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas Production).....	17
2.4.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ .....	17
2.4.1.1 ขั้นตอนไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) .....	18
2.4.1.2 ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ (Acidogenesis).....	19
2.4.1.3 ขั้นตอนการผลิตกรดอะซิติก (Acetogenesis).....	19
2.4.1.4 ขั้นตอนผลิตมีเทน (Methanogenesis).....	20
2.4.2 การผลิตไฮโดรเจน .....	20
2.4.2.1 กลไกการผลิตไฮโดรเจน .....	20
2.4.2.2 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจน .....	23
2.4.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจน .....	23
2.4.3 การผลิตมีเทน.....	24
2.4.3.1 กลไกการผลิตมีเทน.....	25
2.4.3.2 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตมีเทน .....	25
2.4.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตมีเทน.....	26
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>31</b>
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี .....	31
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	31
3.1.2 สารเคมี.....	31
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	32
3.2.1 การเตรียมผักตบชวา .....	32
3.2.2 การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์.....	32
3.2.3 ขั้นตอนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนแบบสองขั้นตอน .....	32
3.3 วิธีการวิเคราะห์ .....	37
3.3.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวา.....	37
3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์ .....	37
3.3.3 การวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนและมีเทน.....	38
3.3.3.1 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์.....	38
3.3.3.2 การทำการพม่ามาตรฐานก๊าซไฮโดรเจน.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก 3.3.3.2 การทำการพม่ามาตรฐานก๊าซไฮโดรเจน..... 38

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3.3 การทำกราฟมาตรฐานก๊าซมีเทน .....	39
3.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารละลายก่อนและหลังการหมัก .....	40
3.3.4.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างสารละลายก่อนหมักก๊าซไฮโดรเจน .....	40
3.3.4.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างสารละลายหลังหมักก๊าซไฮโดรเจน .....	41
3.3.4.2.1 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ .....	41
3.3.4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างสารละลายหลังหมักมีเทน .....	41
3.3.4.3.1 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ .....	41
3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยวิธีโครมาโตกราฟี .....	42
3.4.5.1 การทำกราฟมาตรฐาน .....	42
3.4.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์หลังหมักก๊าซชีวภาพ .....	43
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล .....</b>	<b>44</b>
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผักตบชวา .....	44
4.2 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์ .....	45
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์แบบแห้ง .....	45
4.2.2 สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์แบบเปียก .....	45
4.3 การหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนแบบไร้อากาศ .....	45
4.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย .....	49
4.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายหลังหมักไฮโดรเจน .....	49
4.5 การวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์หลังหมักก๊าซมีเทน .....	50
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>51</b>
เอกสารอ้างอิง .....	52
ภาคผนวก .....	59
ภาคผนวก ก .....	60
ภาคผนวก ข .....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมการปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพแบบไม่ใช้แสง.....	22
3.1 รายละเอียดปริมาณสารตั้งต้น จุลินทรีย์ และสารละลายกรด ที่ใช้ในการทดลอง .....	33
3.2 วิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของผักตบชวา.....	37
3.3 วิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์.....	38
3.4 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนและมีเทน .....	38
3.5 พื้นที่ได้กราฟของก๊าซไฮโดรเจนมาตรฐานที่ความเข้มข้น 100%, 50% และ 25%.....	39
3.6 พื้นที่ได้กราฟของก๊าซมีเทนมาตรฐานที่ความเข้มข้น 100%, 50% และ 25% .....	40
3.7 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสารละลายตัวอย่างก่อนและหลังหมักไฮโดรเจน .....	41
3.8 วิธีวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของสารละลายตัวอย่างหลังหมักมีเทน .....	42
3.9 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน.....	42
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของผักตบชวา .....	44
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์แบบแห้ง .....	45
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์แบบเปียก .....	45
4.4 ปริมาณของแข็งระเหยง่ายหลังหมักก๊าซ .....	50
ข-1 ข้อมูลดิบแสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวา .....	70
ข-2 ข้อมูลดิบแสดงค่า COD ผักตบชวา.....	70
ข-3 ข้อมูลดิบแสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนจุลินทรีย์ .....	71
ข-4 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ค่า COD ก่อนเดินระบบ .....	72
ข-5 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ค่า COD หลังหมักไฮโดรเจน .....	73
ข-6 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ค่า COD หลังหมักมีเทน .....	74
ข-7 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ค่า VFA.....	75
ข-8 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมัก เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน .....	75
ข-9 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 1 .....	79
ข-10 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 2.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-11 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 3.....	80
ข-12 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 1.....	80
ข-13 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 2.....	81
ข-14 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 3.....	81
ข-15 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 1.....	82
ข-16 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 2.....	82
ข-17 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 3.....	83
ข-18 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 1.....	83
ข-19 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 2.....	84
ข-20 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 3.....	84
ข-21 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 1.....	85
ข-22 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 2.....	85
ข-23 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 3.....	86
ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลองจากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน.....	86
ข-25 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 1.....	96
ข-26 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 2.....	98
ข-27 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 3.....	100
ข-28 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 1.....	101
ข-29 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 2.....	103
ข-30 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 3.....	104
ข-31 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 1.....	105
ข-32 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 2.....	108
ข-33 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 3.....	109
ข-34 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 1.....	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-35 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 2.....	113
ข-36 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 3.....	115
ข-37 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 1.....	116
ข-38 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 2.....	118
ข-39 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 3.....	120
ข-40 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ของแข็งระเหยง่ายตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ หลังหมักก๊าซชีวภาพ .....	152



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในผนังเซลล์พืช.....	7
2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	7
2.3 โครงสร้างการเกิดพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลส.....	8
2.4 โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส.....	9
2.5 โครงสร้างของลิกนิน.....	10
2.6 การย่อยสลายโครงสร้างพอลิโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ประเภทลิกโนเซลลูโลส.....	11
2.7 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ.....	18
2.8 การย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่.....	19
2.9 การย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็กให้เป็นกรดอินทรีย์.....	19
2.10 การเปลี่ยนกรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์เป็นกรดอะซิติก.....	20
2.11 การผลิตแก๊สมีเทนจากขั้นตอน Methanogenesis.....	20
2.12 การผลิตไฮโดรเจนชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง.....	22
2.13 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ.....	25
3.1 แผนผังแสดงวิธีการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนแบบสองขั้นตอน.....	35
3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ได้กราฟและความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนมาตรฐาน.....	39
3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ได้กราฟและความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมาตรฐาน.....	40
4.1 ความสัมพันธ์ปริมาณซีโอทีในแต่ละชุดการทดลอง.....	46
4.2 ความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันที่ระเหยง่ายในแต่ละชุดการทดลอง.....	47
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซไฮโดรเจนกับระยะเวลาในการหมัก ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	47
4.4 ความสัมพันธ์ปริมาณก๊าซมีเทนกับระยะเวลาในการหมัก ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	48
4.5 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดในแต่ละชุดการทดลองหลังหมักก๊าซไฮโดรเจน.....	49
4.6 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดในแต่ละชุดการทดลองหลังหมักก๊าซมีเทน.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-1 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจน control ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	122
ข-2 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจน control ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	123
ข-3 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจน control ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	124
ข-4 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	125
ข-5 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	126
ข-6 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	127
ข-7 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	128
ข-8 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	129
ข-9 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	130
ข-10 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:30 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	131
ข-11 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:30 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	132
ข-12 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:30 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	133
ข-13 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:40 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-14 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:40 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	135
ข-15 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:40 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	136
ข-16 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทน control ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	137
ข-17 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทน control ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	138
ข-18 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทน control ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	139
ข-19 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	140
ข-20 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	141
ข-21 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	142
ข-22 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	143
ข-23 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	144
ข-24 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	145
ข-25 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:30 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	146
ข-26 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:30 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-27 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:30 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	148
ข-28 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:40 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	149
ข-29 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:40 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	150
ที่ ข-30 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:40 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ.....	151



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ผักตบชวาเป็นวัชพืชที่มีถิ่นกำเนิดมาจากประเทศบราซิล สามารถแพร่ขยายได้อย่างรวดเร็วและทนต่อสภาพแวดล้อม ทำให้มีผักตบชวาลอยเต็มพื้นผิวแม่น้ำลำคลอง ก่อให้เกิดปัญหาในการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ และแม้ใช้ค่าใช้จ่ายในการกำจัดเป็นจำนวนมากก็ยังไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ จึงเป็นปัญหาใหญ่สำหรับผู้ที่ใช้แหล่งน้ำ ในประเทศไทยการหาวิธีนำผักตบชวามาทำประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่าจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้ผักตบชวามีปริมาณลดลง ขณะเดียวกัน ประเทศไทยและประเทศส่วนใหญ่ในโลกใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลัก ปัจจุบัน ปริมาณความต้องการใช้พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ตามจำนวนประชากร และการเติบโตทางเศรษฐกิจแต่เชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักของมนุษย์นั้นมีจำกัด ในปัจจุบันมนุษย์พบว่าปริมาณสำรองเชื้อเพลิงฟอสซิลกำลังจะหมดไปในอีกไม่ถึงศตวรรษ จากปริมาณเชื้อเพลิงที่ลดลงอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน ประกอบกับความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น จึงได้มีการหาพลังงานทดแทนมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง ได้มีนักวิจัยศึกษาการนำหญ้ามาหมักโดยผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยกรดและด่างเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตให้ได้อากาศชีวภาพ (Cui and Shen, 2012) เนื่องจากภายในโครงสร้างของพืชที่มีองค์ประกอบของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งเรียกรวมว่าสารลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) การใช้กรดและด่างในการปรับสภาพเป็นการกำจัดลิกนิน และทำให้โครงสร้างที่เป็นผลึกแตกออก ทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายเป็นน้ำตาลมากขึ้น (วนิดา และคณะ, 2553) ผักตบชวานับเป็นสารลิกโนเซลลูโลสชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในอนาคต โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา โดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการผลิตมีเทน โดยทั้งสองขั้นตอนใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแป้งข้าวเจ้า เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ ก่อนที่จะทำการหมักนั้นจะต้องนำผักตบชวามาผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก (Sulfuric) ซึ่งมีความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร เพื่อให้การหมักเกิดได้ดี จำเป็นต้องศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพที่มีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวาต่อปริมาตรสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งใช้ในการปรับสภาพผักตบชวา เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างผักตบชวา:ปริมาตรกรดซัลฟิวริก 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตั้งแต่ 1:10, 1:20, 1:30, และ 1:40 โดยใช้ผักตบชวา 10 กรัม TVS (น้ำหนักจริงที่ชั่ง 12.82 กรัม) หมักในขวดหมักขนาด 1 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของผักตบชวาต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
2. ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีเทน โดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ทำการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ร่วมกับการปรับสภาพด้วยความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยปรับเปลี่ยนปริมาณผักตบที่ใช้ต่อสารละลายกรดเป็น 1:10 1:20 1:30 1:40 โดยใช้ผักตบ 10 กรัม TVS (น้ำหนักจริงที่ชั่ง 12.82 กรัม)
2. ทดลองผลิตไฮโดรเจนและมีเทนโดยวิธีการหมักแบบไร้อากาศโดยใช้แบคทีเรียผสมในขวดหมักแบบแบทช์โดยใช้พีเอช 5.5 ปริมาณจุลินทรีย์ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
3. วัดปริมาณก๊าซที่ได้วิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของผลผลิตไฮโดรเจนที่ได้จากการหมัก
4. ทดลองผลิตมีเทนจากสารละลายที่ได้จากการหมักโดยเติมเชื้อจุลินทรีย์เพื่อผลิตมีเทนลงในขวดปริมาณ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดปริมาณก๊าซที่ได้และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของผลผลิตมีเทนที่ได้จากการหมัก

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้ผักตบชวาให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นการกำจัดผักตบชวาที่ได้ประโยชน์
2. ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง ปริมาณผักตบชวาและปริมาณสารละลายกรดซัลฟิวริก 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เพื่อใช้ในการหมัก เพื่อให้ผลิตก๊าซชีวภาพให้ได้สูงสุด
3. สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปปรับใช้กับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ผักตบชวา

ผักตบชวาจัดได้ว่าเป็นพืชน้ำที่ก่อให้เกิดปัญหามากมาย ตลอดเวลาที่มันแพร่กระจายไปในประเทศต่าง ๆ กว่า 50 ประเทศในเขตร้อนและกึ่งร้อนทั่วโลกนั้น มันได้สร้างความลำบากและก่อให้เกิดปัญหามานับการแก่งการต่าง ๆ ที่ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ ในประเทศไทย เรียกวัชพืชนี้ว่า "ผักตบชวา" เพราะมีลักษณะคล้ายผักตบไทย ซึ่งนำเข้ามาจากชวา และในปัจจุบันได้ระบาดแพร่หลายไปแทบทุกจังหวัดแม้ว่าจะได้มีการออก พรบ. สำหรับกำจัดผักตบชวาตั้งแต่ปีพ.ศ. 2456 แต่การระบาดของผักตบชวาก็ไม่ได้หยุดลงแค่นั้น แต่กลับมีการระบาดอย่างกว้างขวางและรุนแรงขึ้นจนถึงกับมีการรณรงค์เพื่อป้องกันกำจัดผักตบชวา จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมชลประทาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิต กรมประมง กรุงเทพมหานคร และองค์กรส่วนภูมิภาคต่าง ๆ ที่ได้ดำเนินการอยู่เป็นประจำ (วงศ์ผกา และปาริชาติ, 2542)

#### 2.1.1 เกี่ยวกับผักตบชวา

ผักตบชวา (*Water Hyacinth*, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Soloms) เป็นพืชน้ำซึ่งจัดเป็นพืชประเภทใบเลี้ยงเดี่ยวอยู่ในวงศ์ Pontederiaceae คนไทยเรียกชื่อผักตบชวาแตกต่างกันไปตามท้องถิ่น ภาคกลางเรียก สะวะ ผักปอด ผักตบปอง ภาคใต้เรียก ผักตบ ภาคเหนือเรียก ผักบัวลอย และภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียก ผักโป่ง ผักบ่ง ผักปอง (คณะอนุกรรมการประสานงานวัชพืชน้ำ, 2521)

#### 2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำประเภทใบเลี้ยงเดี่ยว และเป็นพืชน้ำล้มลุก มีลำต้นสั้นสูงประมาณ 30 - 90 เซนติเมตร แตกใบเป็นกอลอยไป รากแตกออกจากลำต้น มักจะมีสีม่วงดำ มีไหล ซึ่งเกิดตามซอกใบแล้วเจริญเป็นต้นอ่อนที่ปลายไหล ถ้าลำต้นก็จะหยั่งรากลงดิน เป็นวัชพืชที่ร้ายแรงในแหล่งน้ำทั่วไป ใบกว้างใหญ่ มีรูปร่างค่อนข้างกลม ส่วนฐานใบเว้าเข้าหาก้านใบ มีหูใบ ส่วนของใบจะพองออกแผ่นใบคล้ายรูปหัวใจ ก้านใบพองออกตรงช่องกลาง ภายในมีลักษณะเป็นรูพรุนช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ ดอกออกเป็นช่อที่ปลายยอดเป็นแบบช่อเชิงลด (spike) ช่อหนึ่ง ๆ มีดอกย่อย 6 - 30 ดอก เป็นสีฟ้าอมม่วง ออกดอกปลายฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน กลีบบนขนาดใหญ่ และมีแต้มสีเหลืองกลางกลีบฐานกลีบดอกหลอมรวมกันเป็นรูปกรวย กลีบเลี้ยงและกลีบดอกหลอมรวมกันเป็นสีม่วง ก้านช่อดอกยาวประมาณ 15 - 30 เซนติเมตร ผลแบบแห้งแตก (capsule) แบ่งเป็น 3 พู มีเมล็ดเป็นจำนวนมาก เมล็ดกลมอยู่ภายในผล ขยายพันธุ์ด้วยการแยกต้นอ่อนที่ปลายไหลไปปลูก (สุชาติ, 2542)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 แหล่งที่พบ

ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4 - 10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 องศาเซลเซียส และในต้นพืชจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 ประกอบด้วย ไนโตรเจนร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ 96 ซึ่งในปัจจุบันพบว่ามีการแพร่กระจายของผักตบชวาอยู่ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่าง ๆ ในหลายจังหวัดทั่วประเทศ (เปล่งศักดิ์, 2546)

### 2.1.4 ถิ่นกำเนิดและการแพร่กระจายของผักตบชวา

เมื่อปี พ.ศ. 2367 นักพฤกษศาสตร์และนายแพทย์ชาวเยอรมันชื่อ Karl von Martius ได้พบผักตบชวาในขณะที่ทำการสำรวจพันธุ์พืชในบราซิล และประเทศต่าง ๆ ในทวีปอเมริกาใต้ ณ แหล่งกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้นั้น ผักตบชวาไม่ได้ก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เลย ทั้งนี้เนื่องจากในถิ่นกำเนิดของมันมีศัตรูตามธรรมชาติที่เป็นกลไกในการควบคุมความสมดุลตามธรรมชาติอยู่แล้ว เช่น แมลง โรค และศัตรูอื่น ๆ แต่เมื่อถูกนำไปจากถิ่นกำเนิดซึ่งปราศจากศัตรูธรรมชาติ ผักตบชวาจึงเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและก่อให้เกิดปัญหาที่ร้ายแรงตามมายังพื้นที่ที่ผักตบชวาเดินทางไปถึง ในปี 2424 ชาวดัตช์ที่ปกครองประเทศอินโดนีเซียได้นำผักตบชวา ซึ่งขณะนั้นมีปลูกกันเฉพาะในสวนพฤกษชาติในหลายประเทศในทวีปยุโรป เข้ามายังประเทศอินโดนีเซียเพราะผักตบชวามีดอกสีฟ้าเป็นช่อตั้งสวยงามคล้ายคลึงกับดอก Hyacinth ซึ่งเป็นไม้ประดับของประเทศในเขตอบอุ่น คำว่า Water Hyacinth อันเป็นชื่อสามัญภาษาอังกฤษของผักตบชวา ก็ถือกำเนิดมาจากคำนี้เอง เมื่อแรกนำเข้าก็ได้ปลูกเลี้ยงไว้อย่างดีในสวนพฤกษชาติที่เมืองโบกอร์ แต่ต่อจากนั้นไม่นาน ก็แพร่กระจายไปตามลำน้ำต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว ในปี 2444 ได้มีการนำผักตบชวาจากประเทศอินโดนีเซียเข้ามาปลูกในวังสระประทุม เพราะเห็นว่าดอกผักตบชวาสวยงามสามารถใช้ประดับสระน้ำได้ดี แต่ภายหลังเกิดน้ำท่วมวังสระประทุม ผักตบชวาหลุดลอยออกไปสู่ลำคลองภายนอก แล้วเริ่มระบาดไปตามที่ต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเพียง 12 ปี หรือในปี 2456 ผักตบชวาก็ได้กระจายไปทั่วประเทศก่อให้เกิดปัญหาต่อการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำอย่างกว้างขวาง จนมีความจำเป็นที่ต้องตราพระราชบัญญัติสำหรับกำจัดผักตบชวาออกมา (มุสดี และคณะ, 2554)

### 2.1.5 ประโยชน์ของผักตบชวา

ผักตบชวาสามารถนำมาทำประโยชน์ได้อย่างมากมาย เช่น ทำเป็นอาหารรับประทานได้ โดยใช้ ยอดอ่อน ใบอ่อน และดอกอ่อนของผักตบชวา นำมาเป็นอาหารของสัตว์ได้ เช่น หมู ไก่ วัว แพะ และแกะ ใช้ทำปุ๋ยหมัก เนื่องจากมีธาตุโพแทสเซียม (K) ค่อนข้างสูง และเมื่อนำไปผสมกับดินหมัก แล้วทำการวิเคราะห์พบว่าปริมาณไนโตรเจน (N) ประมาณร้อยละ 2.05 ฟอสฟอรัส (P) ประมาณร้อยละ 1.1 และโพแทสเซียม (K) ประมาณร้อยละ 2.5 ซึ่งธาตุเหล่านี้มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ใช้เพาะเห็ดได้ โดยใช้ผักตบชวาที่แก่แล้วมาตากแห้งนำไปปลูกเห็ดฟางได้ สามารถนำมาแปรรูปทำเป็นผลิตภัณฑ์จักสานต่าง ๆ นอกจากนี้ผักตบชวายังช่วยแก้ปัญหาน้ำเสียได้ โดยจะช่วยดูดซับความสกปรกในแหล่งน้ำ และสามารถนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นพลังงานที่กำลังเป็นที่ต้องการเป็นอย่างมากในปัจจุบัน (บรรยงค์, 2544)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.6 ปัญหาที่เกิดจากผักตบชวา

ผักตบชวาก่อให้เกิดปัญหาแก่งการที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ (บรรยงค์, 2544) ดังนี้

### การชลประทาน

ผักตบชวาเมื่ออยู่ในแหล่งน้ำจะขัดขวางการไหลของน้ำ และลดการไหลของน้ำลงประมาณ 40% นอกจากนี้ส่วนต่าง ๆ ของผักตบชวาที่จมลงใต้น้ำก่อให้เกิดอุปสรรคกับการระบายน้ำของฝาย ประตูระบายน้ำ และอื่น ๆ ทำให้ทางเดินของน้ำเกิดการตื้นเขินเร็วกว่าปกติ และทำให้เกิดน้ำท่วมในหน้าน้ำ การระเหยของน้ำในที่มีผักตบชวาจะสูงกว่าในที่ไม่มีผักตบชวาประมาณ 3 - 8 เท่า โดยในพื้นที่ 1 ตารางเมตร ผักตบชวาสามารถระเหยน้ำได้สูงถึง 0.35 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทำให้แหล่งน้ำแห้งเร็วกว่าปกติ

### การไฟฟ้าพลังน้ำ

ในอ่างเก็บน้ำที่มีผักตบชวามาก ความจุในการเก็บน้ำจะลดลงจากการที่ผักตบชวาตายทับถมกัน ทำให้อ่างเก็บน้ำตื้นเขิน และยังเพิ่มอัตราการระเหยน้ำ ทำให้น้ำหมดไปโดยเปล่าประโยชน์อย่างรวดเร็ว แย่งเนื้อที่การเก็บกักน้ำของอ่างเก็บน้ำ ทำให้เก็บรักษาน้ำได้น้อยลง

### การกสิกรรม

ผักตบชวาที่ลอยมากับกระแสน้ำแย่งน้ำและอาหารจากพืชที่ปลูก ทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาแก่น้ำขุ่นขึ้นน้ำ เพราะผักตบชวาจะลอยมาทับต้นข้าว ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ต้นข้าว แพร่ผักตบชวาที่ไหลมาตามน้ำยังเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ศัตรูพืชนานาชนิด เช่น หนู ซึ่งมีปริมาณมาก เมื่อแพร่ผักตบชวาไปติดที่ใด หนูและศัตรูอื่น ๆ ก็ทำความเสียหายแก่พืชผลของเกษตรกร นอกจากนี้ยังทำให้การพัฒนาแหล่งน้ำได้ผลไม่เต็มตามเป้าหมาย เป็นเหตุให้เกิดผลกระทบกระเทือนต่อการกสิกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อกสิกรปลูกพืชลงไปแล้ว และหวังว่าจะได้รับน้ำจากการชลประทาน แต่ผักตบชวาเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้กสิกรไม่ได้รับน้ำตามที่คาดไว้ เป็นเหตุให้พืชผลเสียหาย

### การประมง

ผักตบชวาที่ขึ้นหนาแน่นเป็นอุปสรรคแก่การเจริญเติบโตของปลาและการจับปลา ผักตบชวาไม่เพียงแต่ลดผลผลิตของปลาเท่านั้น แต่ปลาที่จับได้ยังมีขนาดเล็กลงด้วย ปริมาณผักตบชวาที่ลอยอยู่อย่างหนาแน่นบนผิวน้ำ จะทำให้แสงสว่างในน้ำลดลง เป็นผลให้พืชที่เป็นอาหารปลาขนาดเล็ก (ไฟโตแพลงตอน - Phytoplankton) มีปริมาณน้อยลง ไฟโตแพลงตอนนี้เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดก๊าซออกซิเจนในน้ำ ซึ่งจำเป็นแก่การหายใจของปลาและสัตว์น้ำทุกชนิด นอกจากนี้ยังทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน เป็นการลดที่อยู่อาศัยของปลา ซึ่งพื้นน้ำที่มีผักตบชวาขึ้นอยู่อย่างหนาแน่นและน้ำไม่มีการไหล จะมีปลาหรือสัตว์น้ำอาศัยอยู่น้อยกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การสาธารณสุข

ผักตบชวาเป็นที่อาศัยของสัตว์น้ำซึ่งบางชนิดเป็นพาหะนำโรค เช่น หอยชนิดหนึ่งคือ หอยไบธินีเย (Bithynia) ซึ่งเป็นพาหะนำโรคพยาธิใบไม้ในตับ และเป็นที่อาศัยของลูกน้ำของยุงนำโรคเท้าช้าง ลูกน้ำของยุงชนิดนี้สามารถใช้ปากเจาะไชรากผักตบชวาเพื่อใช้เป็นที่พักอาศัย นอกจากนี้ที่ค้างตามซอกใบก็เป็นที่อยู่อาศัยของยุงอื่น ๆ เมื่อขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น ผักตบชวาเป็นตัวการทำให้การกำจัดหอย (ซึ่งเป็นพาหะสำคัญในการนำโรค) โดยการไต่ยากำจัดเป็นไปได้โดยยากและสิ้นเปลืองมาก เนื่องจากผักตบชวาจะดูดยาไว้ส่วนหนึ่ง ส่วนที่เหลือมีน้อยจนไม่สามารถจะทำอันตรายกับหอยได้ นอกจากนี้ ผักตบชวายังเป็นตัวกั้นไม่ให้ยาถูกพ่นลงใต้น้ำได้สะดวก ดังนั้น การไต่ยาในการกำจัดหอยจึงต้องเพิ่มปริมาณมากขึ้น ซึ่งจะเป็นอันตรายแก่คนและสัตว์อื่น ๆ รวมถึงยังเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ร้าย เช่น งูพิษ ซึ่งเป็นอันตรายต่อราษฎร เมื่อแพผักตบชวาลอยไปติดเรือแพหรือท่อน้ำ นอกจากนี้ หนูที่อยู่บนแพผักตบชวาก็อาจแพร่เชื้อโรคกาฬโรคได้

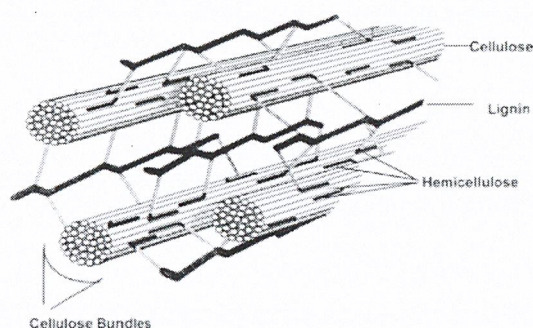
## การคมนาคมทางน้ำ

ผักตบชวาเป็นอุปสรรคสำคัญที่กีดขวางการสัญจรทางน้ำในคลองบางแห่ง โดยเฉพาะในช่วงที่อัตราการไหลของน้ำต่ำ ทำให้การสัญจรทางน้ำเป็นไปได้ยาก ไม่ว่าจะเป็นเรือที่มีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ก็ตาม คลองธรรมชาติบางแห่ง เช่น คลองสามจุ่น ในเขตโครงการสามชุก จังหวัดอุทัยธานี มีผักตบชวาขึ้นหนาแน่นปะปนกับต้นลำเจียก ปิดกั้นการสัญจรทางน้ำโดยเด็ดขาด แม้แต่ในแม่น้ำใหญ่ ๆ บางสาย เช่น แม่น้ำสะแกกรัง จังหวัดอุทัยธานี ในบางฤดูก็มีผักตบชวาอยู่อย่างหนาแน่น

## 2.2 ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose)

ในโครงสร้างของพืชประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ หลายอย่าง เมื่อพิจารณาในส่วนของเส้นใยจะพบว่าลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก จัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ที่สามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเซลลูโลส และลิกนินจะอยู่รวมกันที่บริเวณผนังเซลล์และเนื้อเยื่อชั้นในของเซลล์ โดยมีเฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมเซลลูโลสและลิกนินเข้าไว้ด้วยกัน องค์ประกอบแต่ละชนิดจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ทำให้เส้นใยที่อยู่ในผนังเซลล์มีความแข็งแรงสูง โดยทั่วไปจะพบเซลลูโลสร้อยละ 40 - 60 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 20 - 30 และลิกนินร้อยละ 15 - 30 (Lee et al., 2008) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ในผนังเซลล์พืช เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะมีการจัดเรียงตัวดังรูปที่ 2.1 เซลลูโลสแต่ละโมเลกุลจะเกิดการรวมตัวกันเป็นมัดของเซลลูโลส ซึ่งมีลิกนินล้อมรอบอยู่ (Sjostrom, E. 1981)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

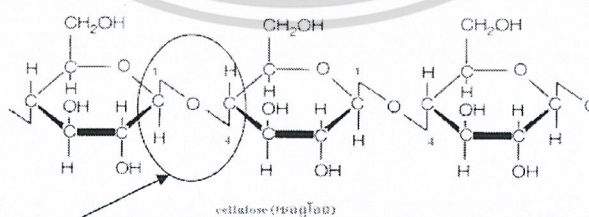


รูปที่ 2.1 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในผนังเซลล์พืช

ที่มา : Ballesteros and Oliva, 2004

### 2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่พบมากในวัสดุประเภทลิกนินเซลลูโลส โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ของพืช อยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) สายยาว มีมวลโมเลกุลสูง ไม่มีเกลียว ไม่มีกิ่งก้านสาขา และเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (homo-polymer) โดยทั่วไปในธรรมชาติจะพบเซลลูโลส 2 แบบ คือ ส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) เซลลูโลสเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ที่มีน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) จำนวน 1,000 - 10,000 โมเลกุลประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ เบต้า-ดี-กลูโคไพราโนส ( $\beta$ -D-Glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก ( $\beta$ -1,4-glycosidic bond) ดังรูปที่ 2.4 โดยสูตรเคมีของเซลลูโลสคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  เมื่อ n คือ จำนวนหน่วยของน้ำตาลกลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส เซลลูโลสเป็นสารอินทรีย์ที่พบมากในธรรมชาติ โดยพบปริมาณ 45% ของสารอินทรีย์ในธรรมชาติทั้งหมด โดยส่วนใหญ่จะพบเซลลูโลสสะสมในบริเวณผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง ภายในโมเลกุลของเซลลูโลสจะมีการเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ส่งผลทำให้เซลลูโลสสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ช้า



$\beta$ -1,4 glycosidic linkage

### รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา : วรรณภา, 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยา โดยจะจับกับ ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N) และ ซัลเฟอร์ (S) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (H - bond) ได้ ดังรูปที่ 2.3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวจึงสูงมาก การที่จะแยกองค์ประกอบเหล่านี้ออกจากกันได้จึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการทางเคมีเข้ามาช่วย เซลลูโลสมักจะสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ เซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักเฉลี่ยต่างกันการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพจึงจำเป็นที่จะต้องมีการนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนสภาพวัตถุดิบให้เหมาะต่อการนำไปย่อยให้เป็นน้ำตาลด้วยการใช้กรดหรือเอนไซม์ (น้ำย่อย) แล้วเข้าสู่กระบวนการหมักต่อไป (วิไลวรรณ, 2552)

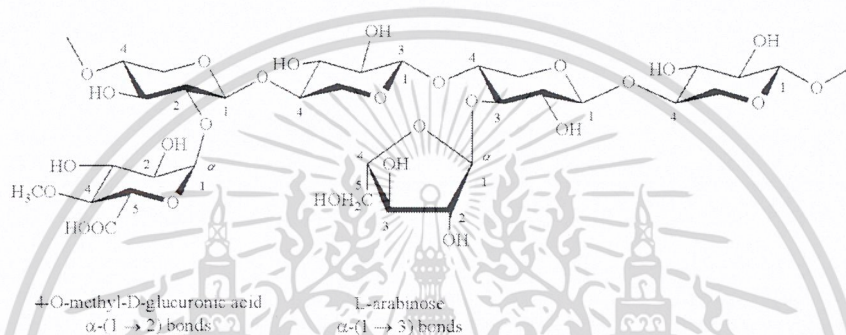


### 2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ซึ่งเป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) ของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ หลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส (glucose) แมนโนส (mannose) ไซโลส (xylose) และอะราบินอส (arabinose) ซึ่งพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน (xylan) แมนแนน (mannan) กาแลกแตน (galactan) และอะราบินแนน (arabinan) (Bastawdeet *al.*, 1992)

องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4 ไกลโคซิดิก ( $\beta$ -1,4-glycosidic bond) (Browning, 1963) พบในไม้เนื้อแข็งมากกว่าไม้เนื้ออ่อน ทั้งนี้ไม่ค่อยพบเฮมิเซลลูโลสที่มีไซโลสเพียงชนิดเดียวในธรรมชาติ จึงมักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาลชนิดอื่น ๆ อาจมีไม่ว่า น้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแล็กโทส (galactose) หรือกลูโคส (glucose) มาต่อกันเป็นโซ่หลักไปใช้

และมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นโซ่สาขา หรือโซ่แขนง ได้แก่ น้ำตาลอะราบินโนส (arabinose) กรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid) และมีส่วนของลิกนินจับตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) เฮมิเซลลูโลสจัดเป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ที่ไม่ละลายน้ำ ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว จะย่อยสลายได้ง่ายด้วยสารละลายกรดหรือเบสที่เจือจางหรือเอนไซม์ เพราะเฮมิเซลลูโลสมีรูปร่างไม่แน่นอน ไม่เป็นเส้นตรงและมีลำดับหน่วยย่อยของน้ำตาลเป็นแบบสุ่ม จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายได้ง่าย (Dhepe *et al.*, 2012) มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส

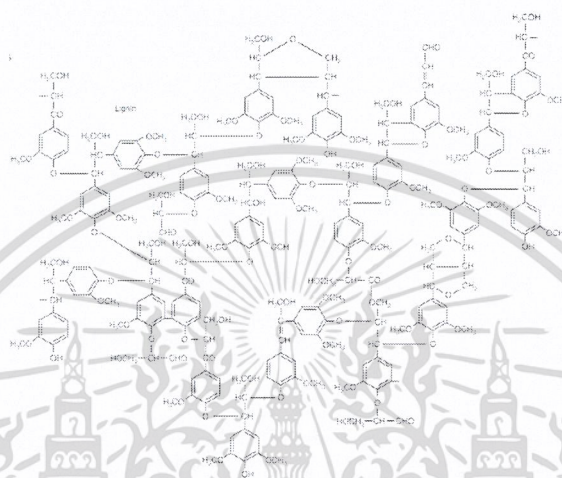
ที่มา : Dhepe *et al.*, 2012

### 2.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเนื้อเยื่อพืช โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรง จะอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เป็นส่วนป้องกันเซลลูโลสไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ เป็นส่วนประกอบของเปลือก ชิง หรือส่วนที่เป็นเยื่อใยของราก ลำต้น และจะถูกสร้างจากส่วนโคนต้นไปสู่ยอด เมื่อพืชมีอายุมากขึ้น ปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย ลิกนินเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทใยอาหาร (dietary fiber) ที่ไม่ให้พลังงาน เป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติก (aromatic) ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ประกอบด้วยคาร์บอน (carbon) ไฮโดรเจน (hydrogen) และออกซิเจน (oxygen) รวมกันเป็นหน่วยย่อย เรียกว่า ฟีนอลิกโพลีเมอร์ (phenolic polymer) มีมวลโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้างสามมิติ โครงสร้างภายในเชื่อมต่อกันด้วยพันธะอีเธอร์ (Ether) หรือ คาร์บอน ระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ (Polymer) ชนิดอื่น ๆ มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย โดยปกติลิกนินจะไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูง ขณะที่บางส่วนในกลุ่มของอัล

คาล์นลิกนิน (alkaline Lignin) สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย กลุ่มไดออกเซน (dioxane) ไพริดีน (pyridine) และสารละลายเบสเจือจางได้ นอกจากนี้ เมื่อมีการเติมหมู่เมทิล (methylation) และไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่อะซิติล (acetylation) แทนที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนวงแหวนเบนซีน (Benzene) ในโครงสร้างของ ลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) ที่มีความยาวคลื่นสูงสุด 280 นาโนเมตร ทั้งนี้การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ก็เป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ให้แก่โครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงได้เช่นกัน (Floch *et al*, 2015)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน

ที่มา : Floch *et al.*, 2015

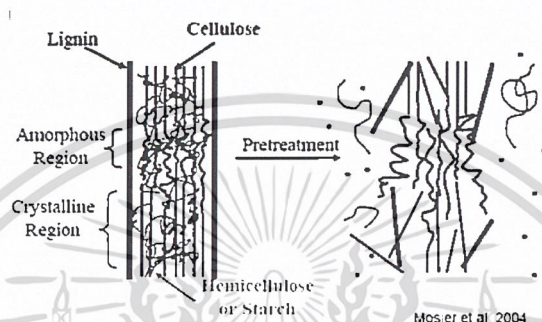
### 2.3 วิธีการปรับสภาพสารตั้งต้น (Substrate Pretreatment Method)

กระบวนการหมักในขั้นตอนการสังเคราะห์กรด (acidogenic fermentation) ของวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส ทำให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนลดลง สามารถส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในบางส่วน และยังทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายโมเลกุลของเซลลูโลสเกิดขึ้นแบบไม่สมบูรณ์ (Hendriks and Zeeman, 2009) เนื่องจากเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันที่ดี ซึ่งภายในโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส มีการเชื่อมต่อแบบครอสลิงกิง (Cross-Linking) ทำให้ปัจจัยทางชีวภาพไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสลดลงมาก (Zheng *et al*, 2009) นอกจากนี้แล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ได้แก่ ขนาดของอนุภาค ความชื้น และลิกนินของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ผลึกของเซลลูโลส และระดับการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization) (Fan *et al.*, 1980; Puri, 1984; Danilenko *et al.*, 1993) รวมถึงปัจจัยอื่นๆ ทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบไม่สมบูรณ์ จึงทำให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนลดลงได้เช่นกัน (Teli *et al.*, 2014)

ดังนั้น การปรับสภาพสารตั้งต้นจึงมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักเพื่อการสังเคราะห์กรด (acidogenic fermentation) ให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพมากขึ้น (Cheng *et al*, 2009) ก่อนที่จะทำการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จะต้องมีการปรับสภาพสารตั้งต้นก่อน ซึ่งช่วยในการย่อยสลายผนังเซลล์ของวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร กากตะกอน และของเสียในชุมชน (Hsu *et al*, 1980; Mood *et al*, 2013) การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ส่งผลให้โมเลกุลของเซลลูโลสที่ถูกป้องกันโดย ลิกนินหลุดออกอย่างอิสระในสารละลาย (Wang *et al*, 2013) แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การย่อยสลายโครงสร้างผลึกโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส  
ที่มา : Mosier *et al*, 2005

นอกจากนี้การปรับสภาพสารตั้งต้นจะช่วยในการย่อยสลายโครงสร้างผลึกของโมเลกุลเซลลูโลส เพิ่มความพรุนของวัสดุ และลดระดับการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization) จึงทำให้ การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis) มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น (Sun and Cheng, 2002; Zheng *et al.*, 2009; Mosier *et al.*, 2005) ดังนั้น หากความเข้มข้นของ ปริมาณกลูโคสที่ใช้ในการย่อยเพิ่มสูงขึ้น สามารถทำให้เชื้อจุลินทรีย์แปลงสภาพเป็นไพรูเวท (Pyruvate) และไฮโดรเจนชีวภาพได้โดยผ่านทางฟอร์เมตไลเอส (Pyruvate: Formate Lyase) หรือ ผ่านทางเอนไซม์เฟอร์รีดอกซินออกซิไดร์เรดักเทส (Pyruvate: Ferredoxin Oxido-Reductase) (Datar *et al.*, 2007; Zhang and Shahbazi, 2011).

วิธีที่ใช้การปรับสภาพสารลิกโนเซลลูโลส แบ่งเป็น การปรับสภาพสารตั้งต้นทางกายภาพ การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี การปรับสภาพทางเคมี และการปรับสภาพทางชีวภาพ (Nguyen *et al*, 2008; Pan *et al*, 2010) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 การปรับสภาพด้วยวิธีการทางกายภาพ (Physical Pretreatment)

การปรับสภาพสารตั้งต้นด้วยวิธีทางกายภาพเป็นการลดขนาดของวัตถุดิบชีวมวล ทำให้ เส้นใยของเซลลูโลสแตกออก และลดโครงสร้างที่เป็นผลึก จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้เอนไซม์ สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น โดยการใช้การปรับสภาพเชิงกล การปรับสภาพโดยใช้ความร้อน การแช่แข็งและการละลาย การใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และรังสีอัลตราซาวด์ (Ultrasound) (Taherzadeh and Karimi, 2008; Sun and Cheng, 2002; Hendriks and Zeeman, 2009; Mood *et al*,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานคือเอกสารนี้ของหน่วยงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์โดยไม่ผ่านการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2013) สำหรับการปรับสภาพสารตั้งต้นทางกายภาพด้วยวิธีเชิงกลจะนิยมใช้มากที่สุด (Ntaiko *et al.*, 2010)

### 2.3.1.1 การใช้แรงทางกล (Mechanical Communication)

การใช้แรงทางกลทำให้สารตั้งต้นมีขนาดเล็กลง สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทุบ การบด การโม่ การเขย่าวัตถุดิบ เป็นต้น มีผลทำให้ความเป็นผลึกลดลง และเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น ความสามารถในการลดขนาดจะขึ้นอยู่กับขนาดสุดท้ายของวัสดุ และคุณสมบัติของวัสดุนั้น ซึ่งวัตถุดิบโดยทั่วไปหลังจากบดหยาบจะมีขนาด 10 - 30 มิลลิเมตร และหลังจากบดละเอียดจะมีขนาดประมาณ 0.2 - 2 มิลลิเมตร (Sun and Cheng, 2002)

### 2.3.1.2 การใช้ความร้อน (Thermal Pretreatment)

การปรับสภาพโดยใช้ความร้อนกับวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) เพื่อช่วยในการสลายผนังเซลล์ที่ยึดติดอยู่กับองค์ประกอบของโมเลกุลเซลลูโลสให้หลุดออกจากกัน สามารถช่วยเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารอินทรีย์ได้ (Appels *et al.*, 2008; Assawamongkholsiri *et al.*, 2013) ปัจจัยสำคัญที่ใช้ทำลายพันธะและสลายผนังเซลล์โดยใช้ความร้อนในการปรับสภาพสารตั้งต้น จะใช้อุณหภูมิในช่วง 150 - 200 องศาเซลเซียส (Appels *et al.*, 2008) จากการพิจารณาเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 160 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการย่อยสลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส อย่างไรก็ตาม หากอุณหภูมิสูงเกิน (ประมาณ 400 องศาเซลเซียส) สามารถเร่งการก่อตัวของสารยับยั้ง ซึ่งได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbons) สารประกอบฟีนอล (Phenolic) ฟอร์ฟูรัล (Furfurals) และไฮโดรเมทิลเพอร์ฟูรัล (hydroxymethyl-furfural) เป็นต้น สารยับยั้งเหล่านี้อาจรบกวนการทำงานของจุลินทรีย์ในระหว่างการผลิตปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การย่อยสลายอาหาร และกระบวนการหมัก ดังนั้น จึงทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพได้ (Johnson *et al.*, 2013; Brebu and Vasile, 2010; Chen *et al.*, 2013).

นอกจากนี้การปรับสภาพสารตั้งต้นโดยใช้ความร้อนยังนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง จากงานวิจัยของ Elbeshbishy *et al.* (2011) กล่าวว่า เมื่อให้ความร้อนแก่เศษอาหาร ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการหมักเพื่อการผลิตไฮโดรเจน จะทำให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นร้อยละ 66.7 (70 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งที่ระเหย) เมื่อเทียบกับสารตั้งต้นที่ยังไม่ทำการปรับสภาพ (42 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งที่ระเหย) และ Kim *et al.* (2009) พบว่า เมื่อให้ความร้อนแก่เศษอาหารที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที จะทำให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นร้อยละ 2,103 ของตัวอย่างที่ทำการปรับสภาพ (96 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งที่ระเหย) เมื่อเทียบกับสารตั้งต้นที่ยังไม่ทำการปรับสภาพ (4.4 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งที่ระเหย)

Bao *et al.* (2013) ศึกษาการให้ความร้อนแก่แป้งข้าวโพดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที ทำให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับแป้งข้าวโพดที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ แม้ว่าการใช้วิธีการปรับสภาพสารตั้งต้นด้วยความร้อนจะส่งผลในเชิง

บวก แต่ก็ต้องระมัดระวังไม่ให้อุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพสูงจนเกินไป ไม่เพียงแต่สิ้นเปลืองพลังงานเพียงอย่างเดียว แต่อาจจะทำให้เกิดการก่อตัวของสารยับยั้งที่สามารถลดการผลิตไฮโดรเจนได้ (Xiao and Liu, 2006)

### 2.3.2 การปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Pretreatment)

#### 2.3.2.1 การปรับสภาพด้วยโอโซน (Ozonolysis)

โอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ (Oxidant) ที่มีประสิทธิภาพเป็นตัวช่วยในการลดขนาดของชีวมวล (Kaur *et al.*, 2012) และสามารถทำให้เกิดการแตกตัวของลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของสารตั้งต้นเพื่อให้เอนไซม์ สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Vidal and Molinier, 1988) Yang *et al.* (2012) ทำการศึกษาการปรับสภาพภาคตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนด้วยโอโซน ( $O_3$ ) ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักเพื่อการผลิตกรด (acidogenic fermentation) พบว่า อัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 11.25 เป็น 19.57 (ปริมาณโอโซนที่ใช้ 0.15 กรัมต่อของแข็งแห้ง 1 กรัม) และอัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น วิธีนี้มีจุดเด่นคือ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเอาลิกนินออกได้ดี ไม่มีสารพิษที่จะไปยับยั้งการทำปฏิกิริยาในส่วนต่าง ๆ กระบวนการนี้สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ผลเสียของวิธีนี้คือ ค่าใช้จ่ายที่สูงมาก (Sun and Cheng, 2002)

#### 2.3.2.2 การปรับสภาพด้วยด่าง (Alkali Pretreatment)

การใช้ด่างในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบมีผลต่อวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส และผลของด่างที่ใช้ในกระบวนการปรับสภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณของลิกนินที่มีอยู่ในวัสดุด้วย (McMillan, 1994) ด่างจะทำให้วัสดุเกิดการพองตัว ความพรุนของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการกำจัดสายโซ่ที่เชื่อมต่อกัน การใช้ด่างเจือจางในวัสดุลิกโนเซลลูโลสมีผลทำให้โมเลกุลภายในเกิดการบวม เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยา ลดความเป็นโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ลดระดับความเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ เกิดการแยกตัวของโครงสร้างระหว่างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส และเป็นการแยกองค์ประกอบหรือทำลายโครงสร้างของลิกนิน อย่างไรก็ตามการใช้ด่างปรับสภาพมักจะไม่ผลต่อวัสดุพวกไม้เนื้ออ่อน ต่างที่นิยมใช้ในการปรับสภาพ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $NH_4OH$ ) Kim *et al.* (2008) ได้ศึกษาการปรับสภาพข้าวบาร์เลย์ด้วยแอมโมเนีย พบว่าการใช้แอมโมเนียที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการปรับสภาพ 24-72 ชั่วโมง สามารถสกัดแยกเอาส่วนของลิกนินออกได้ร้อยละ 50-66

#### 2.3.2.3 การปรับสภาพด้วยกรด (Acid Pretreatment)

กระบวนการปรับสภาพโดยใช้กรดนั้นมีจุดประสงค์คือเพื่อให้ได้น้ำตาลจากวัสดุชีวมวลในปริมาณที่สูง ชนิดของกรดที่นำมาปรับสภาพมีมากมายหลายประเภท ได้แก่ กรดซัลฟิวริก ไฮโดรคลอริก ไนตริก หรือฟอสฟอริก ในกระบวนการแปลงสภาพสามารถใช้ได้ทั้งกรดเข้มข้น และเจือจางเพื่อเพิ่มการทำงานของกระบวนการไฮโดรไลซิส (Palmqvist and Hahn-

Hagerdal., 2002) ในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ การใช้กรดเจือจางเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจศึกษากันมากและแพร่หลายที่สุด (Mussatto *et al.*, 2005) การใช้กรดเจือจางเพื่อปรับสภาพ วัสดุที่อุณหภูมิที่เหมาะสมโดยใช้กรดซัลฟิวริกหรือกรดฟอสฟอริกมักจะถูกใช้สำหรับการเปลี่ยนวัสดุ พวกลิกโนเซลลูโลส ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลส ไปเป็นน้ำตาลที่ละลายได้ ตามด้วยการ ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อให้เกิดเป็นกลูโคส (Silverstein *et al.*, 2007) ในการ ใช้กรดเจือจางจะมีอยู่ 2 รูปแบบที่ใช้ คือ (1) ปริมาณสารตั้งต้นน้อย (ร้อยละ 5 - 10 โดยน้ำหนัก) ที่ อุณหภูมิสูง ( $T > 433$  องศาเซลวิน) และ (2) ปริมาณสารตั้งต้นมาก (ร้อยละ 10 - 40 โดยน้ำหนัก) ที่ อุณหภูมิต่ำ ( $T < 433$  องศาเซลวิน)

โดยทั่วไปแล้วพบว่า เมื่อทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูง และเวลาที่ใช้น้อยกว่าจะ มีผลทำให้พบปริมาณไซโลสสูง และการทำงานของเอนไซม์สามารถทำงานได้ดีกว่า ที่อุณหภูมิสูงการ ใช้กรดเจือจางพบว่ามีผลต่อการเพิ่มการย่อยเซลลูโลส ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นและความ เข้มข้นที่ใช้โดยส่วนใหญ่ร้อยละ 80 และ 95 ของน้ำตาลในเฮมิเซลลูโลสสามารถได้คืนมาโดยการใช้ กรดเจือจางในการปรับสภาพจากการใช้วัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นสารตั้งต้น นอกจากนั้นความเข้มข้น ของกรดและอุณหภูมิที่ใช้เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดสารที่เป็นพิษ อุณหภูมิที่เหมาะสม (ต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส) ได้มีการพิสูจน์ว่าเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเฮมิเซลลูโลส ในอีก ด้านหนึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 160 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อเซลลูโลสมากกว่า ซึ่งพบว่าจะมีการ เกิดปริมาณน้ำตาลที่สูงและมีการสลายส่วนประกอบของลิกนิน (McMillan *et al.*, 1994) การ ทำงานของกรดเจือจางในการแปลงสภาพจะมีผลไปยังกระบวนการไฮโดรไลซิสขององค์ประกอบของ เฮมิเซลลูโลสที่สามารถผลิตเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว การมีอยู่ของเซลลูโลส เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยา โดยเอนไซม์โดยที่มีการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและส่วนที่เป็นลิกนิน โดยทั่วไปแล้วการใช้กรดเจือจางผสม กับวัสดุชีวมวลและทำที่อุณหภูมิสูงที่ 160 - 220 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาสั้นๆที่ไปไฮโดรไลซ์เฮมิ เซลลูโลสให้เป็นไซโลสและน้ำตาลตัวอื่นและจากนั้นจะมีการทำลายไซโลสให้เป็นเพอฟูรัล กระบวนการไฮโดรไลซิสโดยไม่ผ่านการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนพบว่าผลผลิตที่ได้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 20 ในขณะที่เมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้วได้ผลผลิตมากกว่าร้อยละ 90 (Hamelinck *et al.*, 2005)

### 2.3.3 การปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมีฟิสิกส์ (Physicochemical Pretreatment)

#### 2.3.3.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam Explosion)

วิธีการระเบิดด้วยไอน้ำหรือที่เรียกว่า ออโตไฮโดรไลซิส (Autohydrolysis) เป็นวิธี ที่ได้รับความนิยมในการปรับสภาพสารตั้งต้นประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic) (McMillan, 1994) การระเบิดด้วยไอน้ำโดยส่วนใหญ่จะใช้ที่อุณหภูมิในช่วง 160 - 260 องศาเซลเซียส ภายใต้ ความดัน 0.63 - 4.82 เมกะปาสคาล ในภาชนะปิดที่อ้อมด้วยไอน้ำ เป็นระยะเวลา 30 วินาที ถึง 20 นาที (Hendriks and Zeeman, 2009; Mosier *et al.*, 2005; Sun and Cheng, 2002; Taher-zadeh and Karimi, 2008). หลังจากนั้นก็ลดความดันลงทันที โดยการระบายไอน้ำออกสู่บรรยากาศ ทำให้สารตั้งต้นที่ผ่านการปรับสภาพเกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส และโครงสร้างของลิกนินจะ

เปลี่ยนแปลงไป (Schultz *et al.*, 1983; Sun and Cheng, 2002; Hendriks and Zeeman, 2009) ส่งผลให้เอนไซม์สามารถเข้าทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในกระบวนการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Schultz *et al.*, 1983; Hendriks and Zeeman, 2009; Mosier *et al.*, 2005; Sun and Cheng, 2002)

ปัจจัยที่มีผลในกระบวนการปรับสภาพด้วยวิธีนี้คือ เวลาที่ใช้ อุณหภูมิ ขนาดของวัสดุตั้งต้นที่ใช้ และปริมาณความชื้นที่อยู่ในสารตั้งต้น (Duff and Murray, 1996) ในการสลายเฮมิเซลลูโลสและการเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส สามารถเกิดได้ภายใต้สภาวะอย่างใดอย่างหนึ่งดังนี้ คือ สภาวะที่ใช้อุณหภูมิสูง แต่ใช้เวลาน้อย (270 องศาเซลเซียส, 1 นาที) และที่สภาวะการใช้อุณหภูมิต่ำและใช้เวลานาน (190 องศาเซลเซียส, 10 นาที) จากการศึกษาของ Wright (1998) พบว่า การใช้อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาสั้น จะส่งผลให้เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสและการเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสได้สูง นอกจากนี้การเติมกรด เช่น กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) หรือการเติมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำยังมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการไฮโดรไลซิส และเป็นการลดการเกิดสารยับยั้งปฏิกิริยาอื่นที่สำคัญ และยังเป็นการทำให้มีการกำจัดเฮมิเซลลูโลสได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

Datar *et al.* (2007) ทำการศึกษาการระเบิดด้วยไอน้ำของข้าวโพด ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักด้วยกากตะกอนจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่า ข้าวโพดที่มีการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที (ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด) มีอัตราการผลิตไฮโดรเจนสูง Li and Chen (2007) ทำการศึกษาการระเบิดด้วยไอน้ำของฟางข้าวโพดก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์โคลอสตรีเดียม (*C. butyricum* AS1.209) พบว่า อัตราการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 9 มิลลิลิตรต่อกรัมฟางข้าวโพดที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ เป็น 68 มิลลิลิตรต่อฟางข้าวโพด 1 กรัมที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ภายใต้ความดัน 1.5 เมกะปาสคาล เป็นระยะเวลา 10 นาที

### 2.3.3.2 การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (Ammonia fiber explosion, AFEX)

วิธีการระเบิดด้วยแอมโมเนียเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปในการปรับสภาพวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) (Sun and Cheng, 2002) จะใช้แอมโมเนียเหลว (Liquid Ammonia) ที่อุณหภูมิระหว่าง 60 - 120 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน ในระยะเวลาหนึ่ง แล้วลดความดันลงอย่างรวดเร็ว (Sun and Cheng, 2002; Keshwani, 2009; Taherzadeh and Karimi, 2008; Zhang and Shahbazi, 2011) โดยวัตถุประสงค์ที่ผ่านกระบวนการนี้จะมียอดการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่มีผลต่อปริมาณของเฮมิเซลลูโลส (ไม่เหมาะสมกับพืชที่มีลิกนินอยู่มาก) ในกระบวนการนี้สามารถนำแอมโมเนียกลับมาใช้ใหม่ได้ และไม่ก่อให้เกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปรับสภาพด้วยวิธีอื่น เช่น การระเบิดด้วยไอน้ำจะได้อัตราการผลิตของตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Slurry) สามารถทำการแยกส่วนของแข็งและของเหลวออกจากกันได้ ในขณะที่การระเบิดด้วยแอมโมเนียจะให้ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพเป็นของแข็งเท่านั้น (Alvira *et al.*, 2010)

### 2.3.3.3 การระเบิดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> explosion)

วิธีการนี้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสร้างกรดคาร์บอนิก ในการเพิ่มปฏิกิริยา ย่อยสลายขั้นต่อไปนิยมใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ร่วมด้วย อาทิ เอทานอล (Ethanol) ช่วยในการกำจัด สารประเภทลิกนิน แต่วิธีการนี้ได้ผลผลิตต่ำกว่าการใช้ไอน้ำหรือแอมโมเนีย แต่ไม่เกิดตัวขัดขวางการ ทำงานของเอนไซม์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิสเหมือนวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ (Ragg and Fields, 1987)

### 2.3.3.4 การปรับสภาพด้วยน้ำร้อน (Liquid hot water)

วิธีการนี้เป็นอีกกระบวนการที่มีการใช้น้ำร้อนแทนไอน้ำ ซึ่งจะดำเนินการอย่างช้า ๆ และไม่ต้องการสารเคมีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ต้องอาศัยความดันเพื่อควบคุมสถานะของน้ำใน สภาวะของเหลว อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 160 - 240 องศาเซลเซียส เพื่อสลายเฮมิเซลลูโลส ทำให้ เข้าถึงเซลลูโลสได้ดีขึ้น และทำให้การย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้น 2 - 5 เท่า (Hendriks and Zeeman, 2009 อ้างถึงใน วนิดา, 2553) ตัวอย่างที่ได้หลังจากการปรับสภาพจะอยู่ในรูปแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว (slurry) โดยส่วนที่เป็นของแข็งส่วนใหญ่จะเป็นเซลลูโลส ส่วนของเหลวส่วนใหญ่เป็นเฮมิเซลลูโลส และเกิดน้ำตาลบางส่วน ทั้งนี้ควรมีการปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 4 - 7 เนื่องจากว่าในช่วงดังกล่าวทำให้ เฮมิเซลลูโลสยังคงอยู่ในรูปของโอลิโกเมอร์ (oligomer form) ช่วยลดปัญหาการเกิดรวมตัวเกิด เป็นโพลิเมอร์ใหม่อีกครั้ง (Mosier *et al.*, 2005)

### 2.3.3.5 การย่อยเปียก (Wet oxidation)

วิธีการนี้ใช้ออกซิเจน และอากาศเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา นิยมใช้ถังหมัก ชีวภาพในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำกว่าได้แรงดัน และเวลาสั้น โดยทั่วไปจะใช้เวลา 10 - 15 นาที อุณหภูมิ 170 - 200 องศาเซลเซียส และความดันระหว่าง 10 - 12 บาร์ ของออกซิเจน (Ogbonna *et al.*, 2001) จากงานวิจัยของ Mishima *et al.* (2006) พบว่ามีประสิทธิภาพในการแยกเฮมิเซลลูโลสและ ลิกนิน ทำให้ปริมาณเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น นิยมใช้ในการผลิตเอทานอลในขบวนการหมักแบบการย่อย ให้เป็นน้ำตาลพร้อมการหมัก (Simultaneous saccharification and fermentation, SSF)

### 2.3.3.6 การปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave pretreatment)

วิธีการปรับสภาพโดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟจัดเป็นวิธีการทางกายภาพร่วมกับทาง เคมี เนื่องจากว่ามีการใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ และส่วนที่ใช้สารเคมีเจือจางในการแช่วัสดุ การ ให้อุณหภูมิจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ ใช้เวลาระหว่าง 5 - 20 นาที (Keshwani, 2009) จากการศึกษเบื้องต้นของ เวสาร์ช และรัชพล (2555) และ Zhu *et al.* (2006) พบว่าการใช้คลื่น ไมโครเวฟร่วมกับสารละลายต่างมีประสิทธิภาพในการปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟมากกว่า สารละลายกรด

### 2.3.3.7 การปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasonic pretreatment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนวิธีการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ยังมีรายงานเกี่ยวกับวิธีดังกล่าวนี้ แต่ผลการค้า ไม้ว่าที่ได้จากการใช้คลื่นอัลตราซาวด์พบว่าส่งผลให้เกิดการย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ได้ไปใช้

มากขึ้น จากงานวิจัยของ Yachmenev *et al.* (2009) พบว่าคลื่นอัลตราซาวด์มีผลทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของวัสดุได้มากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลาย

### 2.3.4 การปรับสภาพด้วยวิธีการชีวภาพ (Biological Pretreatment)

การปรับสภาพโดยวิธีการทางชีวภาพสำหรับวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulos) สามารถใช้จุลินทรีย์ประเภทที่ย่อยเนื้อไม้ ได้แก่ ราสีน้ำตาล (Brown-rot Fungi) ราสีขาว (White-rot Fungi) และราย่อยไม้เนื้ออ่อน (soft-rot fungi) ในการปรับสภาพเพื่อย่อยสลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส (Sun and Cheng, 2002, Keshwani, 2009) ราสีขาวและราย่อยไม้เนื้ออ่อน จะย่อยสลายทั้งลิกนินและเซลลูโลส ส่วนราสีน้ำตาลจะย่อยสลายเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ (Sun and Cheng, 2002) กระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพนอกจากจะช่วยย่อยสลายลิกนิน และเซลลูโลสแล้วยังช่วยทำลายผนังเซลล์ (Appels *et al.*, 2008) นอกจากนี้ การใช้จุลินทรีย์เหล่านี้ในการปรับสภาพยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยวัตถุดิบด้วยเอนไซม์ และการผลิตพลังงานชีวภาพที่เพิ่มขึ้นได้ ราสีขาวที่นิยมใช้ในการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ *Phanerochaete chrysosporium*, *Ceriporia lacerata*, *Cyathus stercoleris*, *Ceriporiopsis subvermispota*, *Pycnoporus cinnabarinus* และ *Pleurotus ostreatus* เป็นจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Kumar *et al.*, 2011; Sreenath *et al.*, 2001; Slininger *et al.*, 1982) ข้อดีของกระบวนการนี้คือใช้พลังงานน้อย ไม่ใช้สารเคมีในกระบวนการ ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม อัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำ ทำให้ต้องใช้เวลานานในการย่อยสลาย และใช้พื้นที่ในการผลิตมาก การย่อยสลายโครงสร้างของเนื้อไม้ที่เป็นสารลิกโนเซลลูโลสของราสีน้ำตาลจะใช้ทั้งกลไกที่ใช้เอนไซม์และไม่ใช้เอนไซม์ โดยปกติการย่อยสลายเนื้อไม้ของราสีน้ำตาลจะมีเอนไซม์ย่อยเซลลูโลส แต่ไม่มีเอนไซม์ที่ใช้ย่อยลิกนิน ส่วนราสีขาวสามารถย่อยไม้เนื้อแข็งได้ ซึ่งมีทั้งเอนไซม์ที่ใช้ย่อยเซลลูโลสและลิกนิน และมีศักยภาพในการย่อยสลายโครงสร้างของสารลิกโนเซลลูโลสทุกส่วนภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ส่วนราย่อยไม้เนื้ออ่อนส่วนใหญ่ย่อยสลายเนื้อไม้ที่มีความชื้นมาก และมีองค์ประกอบลิกนินน้อย (Goodell *et al.*, 2008)

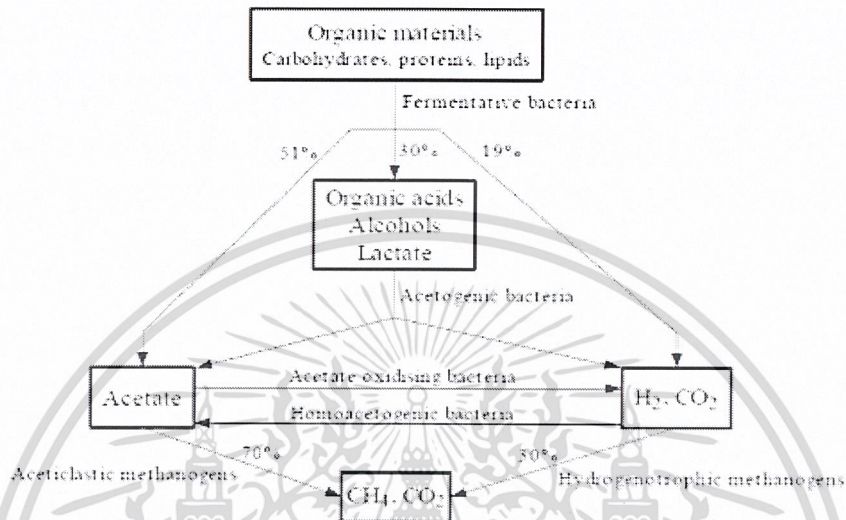
## 2.4 การผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas Production)

แก๊สที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการย่อยสลายอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน แก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊สหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) ประมาณ 50 – 80 % และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ประมาณ 30 – 50 % ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) และไอน้ำ

### 2.4.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ เป็นกระบวนการทางชีวภาพที่ซับซ้อน โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตแบบไม่ใช้อากาศหลายชนิด (Anaerobic Microorganisms) ซึ่งจะปลดปล่อยเอนไซม์เพื่อก่อปฏิกิริยาชีวเคมีให้ย่อยสลายอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ไปเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กและสุดท้ายเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอื่น ๆ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาชีวเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน มีขั้นตอนการทำงาน 4 ขั้นตอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



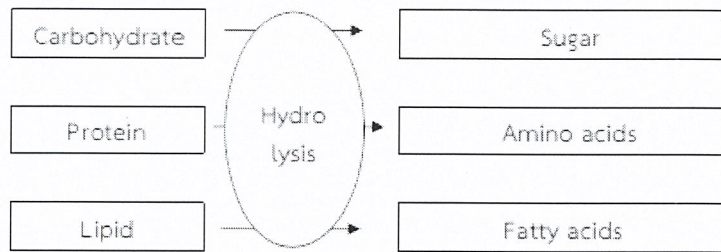
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ

ที่มา : Boe, 2005

#### 2.4.1.1 ขั้นตอนไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ขั้นตอนไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันโซ่ยาว ตามลำดับ ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรีย เนื่องจากสารอินทรีย์มีขนาดโมเลกุลใหญ่เกินกว่าที่แบคทีเรียจะดูดซึมเข้าเซลล์ จึงอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียผลิตและปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) ใช้ในการย่อยสลายสารดังกล่าวให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง (รูปที่ 2.8) แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่าไฮโดรไลซิงแบคทีเรีย (Hydrolyzing bacteria)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่

ที่มา : นคร, 2553

#### 2.4.1.2. ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ (Acidogenesis)

ขั้นตอนการผลิตกรดเป็นขั้นตอนการย่อยสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิส เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน โดยแบคทีเรียสร้างกรด (Acid forming bacteria) ดูดซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงาน สารอาหารต่าง ๆ จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่าย เช่น อะซิติก บิวทิริก โพรพิโอนิก เป็นต้น นอกจากนี้ยังผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (รูป 2.9) ขั้นตอนนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่าการหมัก (Fermentation)



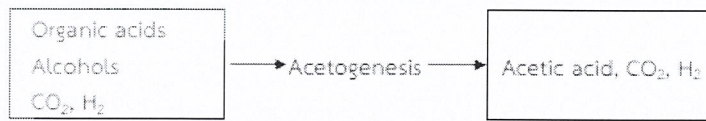
รูปที่ 2.9 การย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็กให้เป็นกรดอินทรีย์

ที่มา : นคร, 2553

#### 2.4.1.3. ขั้นตอนการผลิตกรดอะซิติก (Acetogenesis)

ขั้นตอนการผลิตกรดอะซิติกเป็นขั้นตอนที่แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (Acetogenic bacteria) จะทำการย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ได้แก่ กรดแลคติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก เป็นต้น และแอลกอฮอล์ไปเป็นกรดอะซิติก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนกรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์เป็นกรดอะซิติก

ที่มา : นคร, 2553

#### 2.4.1.4 ขั้นตอนผลิตมีเทน (Methanogenesis)

ขั้นตอนสุดท้ายคือขั้นตอนการผลิตมีเทนโดยกลุ่มจุลินทรีย์เมทาโนเจน (Methanogens) หรือกลุ่มจุลินทรีย์สร้างแก๊สมีเทน (Methane forming bacteria) โดยใช้กรดอะซิติก แก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ สร้างแก๊สมีเทน ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอย่างเด็ดขาด ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การผลิตแก๊สมีเทนจากขั้นตอน Methanogenesis

ที่มา : นคร, 2553

#### 2.4.2 การผลิตไฮโดรเจน

ในปัจจุบันการผลิตไฮโดรเจนในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้วิธีทางเคมี เช่น การผลิตไฮโดรเจนจากก๊าซธรรมชาติโดยผ่านกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam Reforming) และวิธีการทางไฟฟ้า เช่น การแยกสลายน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolysis) แต่ต้นทุนในกระบวนการผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการเหล่านี้ค่อนข้างสูง และต้องใช้พลังงานในกระบวนการผลิตสูงมาก ก่อให้เกิดอุปสรรคในการพัฒนานำเอาไฮโดรเจนมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกใหม่ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงหันมาพัฒนาการผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการทางชีวภาพ หรือไฮโดรเจนชีวภาพ (มยุรา และรุ่งทิพย์, 2556)

##### 2.4.2.1 กลไกการผลิตไฮโดรเจน

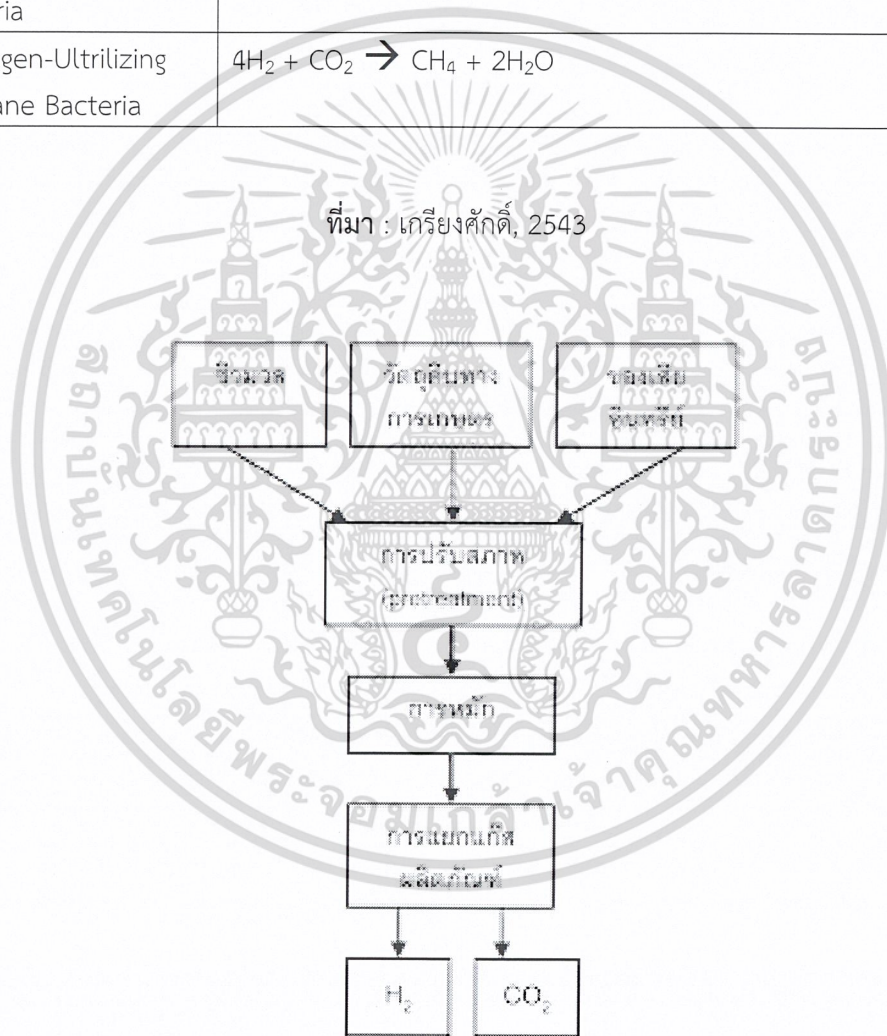
การผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกภาค จากขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ แบคทีเรียกลุ่ม acidogenic bacteria จะทำงานในขั้นตอนกระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) หรือเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง (Dark-fermentation process) ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงนี้ทำให้ได้ผล ไฮโดรเจนถึง 4 โมลต่อ 1 โมเลกุลของ

กลูโคส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายกลูโคส 1 โมล ที่เหมาะสมต่อการนำไปผลิตไฮโดรเจนคือ อะซิเตท 2 โมล และ ไฮโดรเจน 4 โมล แบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (dark fermentation) โดยใช้สับสเตรทที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ ซึ่งปฏิกิริยาการหมักสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน คือ อุณหภูมิปานกลาง 25 - 40 องศาเซลเซียส (mesophilic) อุณหภูมิสูง 40 - 65 องศาเซลเซียส (thermophilic) อุณหภูมิสูงมาก 65 - 80 องศาเซลเซียส (extreme thermophilic) และอุณหภูมิสูงมาก ๆ คือ มากกว่า 80 องศาเซลเซียส (hyper thermophilic) ในขณะที่ระบบการผลิตไฮโดรเจนโดยการแยกสลายด้วยแสงแบบทางตรงและทางอ้อม (direct และ indirect photolysis) สามารถผลิตไฮโดรเจนบริสุทธิ์ได้ แต่กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง (dark fermentation) จะผลิตก๊าซชีวภาพแบบผสม ซึ่งมีไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก กากตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสีย (anaerobic sludge) ประกอบไปด้วยเชื้อจุลินทรีย์หลากหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียในกลุ่ม *Clostridium* sp., *Escherichia coli*, และ *Enterobacter* sp. (Nandi and Sengupta, 1998; Das and Veziroglu, 2001). แบคทีเรียดังกล่าวนี้พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ตะกอนดิน ตะกอนน้ำเสีย ปุ๋ยหมัก และมูลสัตว์ การเตรียมเชื้อตั้งต้นซึ่งเป็นจุลินทรีย์ในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อเป็นเชื้อตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจน จำเป็นต้องมีการเพิ่มศักยภาพของจุลินทรีย์โดยการกำจัดจุลินทรีย์อื่นที่ไม่ต้องการ เช่น จุลินทรีย์ผลิตมีเทน (methanogenic bacteria) วิธีการที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียมเชื้อตั้งต้น เป็นการอาศัยความแตกต่างของคุณสมบัติทางกายภาพของจุลินทรีย์ ได้แก่ความสามารถในการสร้างเอ็นโดสปอร์ ซึ่งแบคทีเรียผลิตไฮโดรเจนในกลุ่ม *Clostridium* มีความสามารถในการสร้างเอ็นโดสปอร์เพื่อปกป้องเซลล์เมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น มีความเป็นกรดสูง (พีเอช 3.0 - 4.0) มีความเป็นเบสสูง (พีเอช 10.0) หรือสูงเกินไป อุณหภูมิสูง (100 - 204 องศาเซลเซียส) และการเติมสารยับยั้งบางชนิด เช่น 2-bromoethanesulfonic acid (BESA) การผลิตไฮโดรเจนโดยจุลินทรีย์ในกากตะกอนที่ผ่านการเตรียมก่อนนำมาใช้ต้องการสารอาหารบางชนิด (micronutrient) เพื่อช่วยในกระบวนการเมแทบอลิซึม การเจริญ และกิจกรรมของเซลล์ ซึ่งการเติมสารอาหารนอกจากจะช่วยเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์แล้วยังสามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนได้ (Lay, 2001)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมการปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพแบบไม่ใช้แสง

ชื่อแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง	สมการปฏิกิริยาเคมี
Acid Forming Bacteria	$C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow 2CH_3COOH \text{ (Acetic)} + 2CO_2 + 4H_2$ $C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH \text{ (Butyric)} + 2CO_2 + 2H_2$ $C_6H_{12}O_6 + H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH \text{ (Propionic)} + 2H_2O$
Acetogenic Bacteria	$2CH_3CH_2COOH \text{ (Propionic)} + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$ $CH_3CH_2CH_2COOH \text{ (Butyric)} + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$
Acetoclastic Methane Bacteria	$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$
Hydrogen-Ultrilizing Methane Bacteria	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$



รูปที่ 2.12 การผลิตไฮโดรเจนชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

ที่มา: Hallenbeck and Benemann, 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2.2 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจน

จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ โดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ แบคทีเรียพวกไร้อากาศแบบแฟคัลเททีฟ (Facultative Anaerobe) ได้แก่ *Escherichia coli*, *Enterobacter* และ *Citrobacter* และแบคทีเรียพวกไร้อากาศอย่างแท้จริง (Strict Anaerobe) ได้แก่ *Clostridium* และ *Rumen Bacteria* โดยสามารถใช้จุลินทรีย์ในรูปของสายพันธุ์เดี่ยวและกลุ่มจุลินทรีย์เพื่อผลิตไฮโดรเจนได้ ข้อดีของการใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์เดี่ยวเป็นหัวเชื้อในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ คือ สามารถผลิตไฮโดรเจนจากสารตั้งต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัด คือ จะต้องรักษาสภาวะปลอดเชื้อระหว่างการผลิต โดยแบคทีเรียพวก *Clostridium* และ *Enterobacter* ได้มีการนำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจน โดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงอย่างแพร่หลาย ส่วนการใช้กลุ่มจุลินทรีย์เป็นหัวเชื้อในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพนั้นไม่จำเป็นต้องควบคุมสภาวะปลอดเชื้อ การมีจุลินทรีย์หลายประเภททำงานร่วมกันซึ่งอาจส่งผลให้สามารถผลิตไฮโดรเจนชีวภาพในปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลาย โดยเฉพาะวัตถุดิบราคาถูก เช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (ชนิษฐา, 2553)

### 2.4.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจน

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน จะต้องควบคุม และรักษาสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ เพื่อจุลินทรีย์จะได้เจริญเติบโตแล้วผลิตก๊าซไฮโดรเจน เพื่อให้จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องควบคุมจุลินทรีย์ให้อยู่ในสภาวะที่สมดุล จึงจะต้องควบคุมปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ดังนี้

#### อุณหภูมิ (temperature)

จุลินทรีย์จะสามารถเจริญได้ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันแบ่งเป็น 3 ช่วง ดังนี้ ไชโคฟิลิก (Psychrophilic) อุณหภูมิตั้งแต่ 0 - 20 องศาเซลเซียส มีโซฟิลิก (Mesophilic) อุณหภูมิตั้งแต่ 20 - 42 องศาเซลเซียส และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) อุณหภูมิตั้งแต่ 42 - 75 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและชนิดของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์กลุ่มไร้อากาศอย่างแท้จริง และจุลินทรีย์กลุ่มไร้อากาศแบบแฟคัลเททีฟสามารถเจริญและผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิในช่วง 25 - 40 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวพบว่าเชื้อ *Clostridium* sp. และ *Enterobacter*. จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 35 - 40 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิเหล่านี้อยู่ในช่วงมีโซฟิลิก เป็นช่วงอุณหภูมิปานกลาง (มยุรา และ รุ่งทิพย์, 2556)

#### ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน จะต้องรักษาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เพราะเมื่อแบคทีเรียเจริญ กรดอินทรีย์ระเหยจะถูกสร้างและสะสมเพิ่มมากขึ้น พีเอชจึงลดต่ำอย่างรวดเร็ว พีเอชที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนขึ้นกับกลุ่มของจุลินทรีย์ในกลุ่มสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ในการค้า  
ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงจะมีพีเอชที่เหมาะสมในช่วง 7.0 - 8.0 ส่วนจุลินทรีย์กลุ่มไร้อากาศอย่างแท้จริง และจุลินทรีย์กลุ่มไร้อากาศแบบแฟคัลเททีฟพีเอชที่เหมาะสมในช่วง 5.5 - 6.0 (มยุรา และ รุ่งทิพย์, 2556)

### ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid, VFA)

กรดอินทรีย์ระเหยเกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียพวกสร้างกรด ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยจะมีส่วนสำคัญต่อพีเอชของระบบ คือ เมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้น พีเอชจะต่ำลง ระดับของกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ที่มีค่าเกิน 800 mg/ml หรืออัตราส่วนของกรดโพพิโอนิก ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ ) ต่อกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) เกิน 1.4 g/L ทำให้ระบบหมักเกิดการล้นเหลว อย่างไรก็ตามแม้ว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยจะมีปริมาณมาก จุลินทรีย์บางชนิดยังสามารถเจริญและผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ (มยุรา และ รุ่งทิพย์, 2556)

### อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบการหมัก หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากแบคทีเรียบางส่วนถูกทำลายไปเพราะสภาพที่ไม่สมดุล ในทางตรงกันข้าม หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อยเกินไป จะทำให้การใช้ถังหมักไม่เต็ม ประสิทธิภาพ ไม่คุ้มค่าในการลงทุน และยังส่งผลให้แบคทีเรียในระบบปรับตัวเข้ากับสภาพสารอินทรีย์ที่มีปริมาณต่ำ ซึ่งอาจจะทำให้ระบบล้นเหลวตามมา แต่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามธรรมชาติและชนิดของสับสเตรท จึงจำเป็นต้องมีการปรับค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ให้เหมาะสมตามชนิดของสับสเตรทที่ใช้ด้วย (อลิศรา และ สุรีย์วัลย์, 2554)

### ระยะเวลาเก็บกัก (hydraulic retention time, HRT)

เป็นปัจจัยที่ใช้การควบคุมประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง โดยปกติจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจน จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนในช่วง 1 - 2 วันของการหมัก ซึ่งอัตราเร็วของการย่อยสลายเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง การผลิตก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่สั้นทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์มีค่าลดลง ระยะเวลาการเก็บกักที่เหมาะสมของเชื้อกลุ่มแฟคัลเททีฟจะมีค่าประมาณ 12 ชั่วโมง (มยุรา และ รุ่งทิพย์, 2556)

### 2.4.3 การผลิตมีเทน

การผลิตมีเทนจากแบคทีเรียสามารถใช้ผลผลิตทางการเกษตรหรือของเสียจากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ตัวอย่างเช่น น้ำเสียจากโรงเลี้ยงสัตว์ (Largus *et al.*, 2004) น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Chen *et al.*, 2003) municipal solid waste, gricultural waste เป็นต้น และเนื่องจากมีเทนสามารถผลิตได้จากสารตั้งต้นหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารตั้งต้นจำพวกกรดไขมันระเหยง่าย จึงทำให้กลุ่มผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำน้ำหมักที่เหลือจากการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนมาเป็นสับเซตรทในการผลิตมีเทน ซึ่งจะช่วยลดปัญหาน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจน และได้พลังงานทดแทนอีกชนิดหนึ่ง คือ มีเทน

#### 2.4.3.1 กลไกการผลิตมีเทน

การผลิตมีเทนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกาศ จากขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ การผลิตมีเทนนั้นเกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 4 ที่เรียกว่ากระบวนการ Methanogenesis เป็นการเปลี่ยนกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดไปเป็นก๊าซมีเทนถึง 70 % โดย Methane forming bacteria (Polprasert, 1996) และอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนโดย Hydrogen-utilizing methane bacteria แบคทีเรียที่สร้างมีเทนมีการเจริญเติบโตได้ช้า และสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ

ที่มา: Energy Delta Institute, 2557

#### 2.4.3.2 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตมีเทน

จุลินทรีย์กลุ่ม Aceticlastic Methanogens จะมีความสามารถเปลี่ยนได้เฉพาะกรดอะซิติกไปเป็นแก๊สมีเทนตามสมการ (2.1) ซึ่งได้แก่ จุลินทรีย์ในตระกูล *Methanosaeta* spp. ในขณะที่กลุ่มจุลินทรีย์ Hydrogenotrophic Methanogens ซึ่งได้แก่ จุลินทรีย์สายพันธุ์ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งที่หมักได้แต่โดยสังเขป และต้องขึงอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

*Methanobrevibacter arborophilus* สามารถเปลี่ยนแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นแก๊สมีเทน ส่วนจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Methanosarcina* spp. นั้นสามารถใช้ได้ทั้งกรดอะซิติก แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน (Stams *et al.*, 2005)



### 2.4.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตมีเทน

#### อุณหภูมิ

ปัจจัยสำคัญในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยที่อุณหภูมินั้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย อุณหภูมิที่เหมาะสมมีอยู่ 2 ช่วง คือ อุณหภูมิระหว่าง 30 - 40 องศาเซลเซียส (Mesophilic temperature) จุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงนี้ เรียกว่า Mesophilic Bacteria และอุณหภูมิระหว่าง 50 - 60 องศาเซลเซียส (Thermophilic temperature) จุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงนี้ เรียกว่า Thermophilic Bacteria (Kim *et al.*, 2008) แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจะหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิต่ำหรือสูงเกินไป เนื่องจากจุลินทรีย์จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิเพียง 2 - 3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทนอย่างมาก ดังนั้น การรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอจึงมีความสำคัญมากกว่าการควบคุมให้ระบบมีอุณหภูมิอยู่ในจุดที่ให้อัตราการย่อยสลายสูงสุด โดยในการเดินระบบควรมีการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของระบบเปลี่ยนแปลงมากกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อวัน (เฉลิมเดช, 2553)

#### ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

Methane Forming Bacteria นั้นไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างและเนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรด และแบคทีเรียสร้างมีเทน สามารถทำงานร่วมกันได้จึงต้องรักษาสภาวะสภาวะที่จะทำให้เกิดก๊าซมีเทนได้นั้นควรมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.5 - 7.5 (Acher และ Kirsop, 1991) เมื่อค่าพีเอชลดต่ำกว่า 6.5 จะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย วิธีแก้ไขเมื่อค่าพีเอชมีแนวโน้มว่าจะลดลง คือ การเติมสารเพื่อเพิ่มความเป็นด่างลงไป เช่น เติมหินปูน สาเหตุที่ทำให้ค่าพีเอช ลดลงนั้น มีผลมาจากปริมาณสารอินทรีย์มากเกินไป ดังนั้น ทางแก้ไขที่ดีที่สุด คือ หยุดทำการป้อนชั่วคราวหรือลดอัตราการป้อน (จารุวรรณิ, 2551)

จารุวรรณิ (2551) ได้ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย กระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นแบบกะที่พีเอช 6, 6.5, 7 และ 7.5 ถึงปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 1.8 ลิตรต่อวัน ที่พีเอชเท่ากับ 7 และสามารถกำจัดซีโอดีและไขมันเท่ากับร้อยละ 37.5 และ 32.4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กรดไขมันระเหยง่าย

กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA) เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทริก กรดโพรพิโอนิก กรดฟอร์มิก เป็นต้น การที่พบกรดเหล่านี้ในปริมาณมากเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ เนื่องจากกรดเหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์สารตัวกลางที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ระบบที่มีการสะสมของกรดระเหยง่ายในปริมาณที่มาก ช่วงแรกกรดระเหยจะมีผลทำให้สภาพต่างของระบบลดลง ต่อมาถ้ายังไม่มีการใช้หรือบำบัดกรดระเหยง่าย ให้มีปริมาณน้อยลงอีกพีเอชของระบบก็จะลดต่ำลง และถ้าพีเอชมีค่าลดต่ำกว่า 6.7 จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน โดยปกติระดับกรดระเหยง่ายที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 50 - 500 มิลลิกรัมต่อลิตรของ  $\text{CH}_3\text{COOH}$  ซึ่งค่าสูงสุดที่ยอมให้มีในระบบเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรของ  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (เกรียงศักดิ์, 2543)

### ความเป็นพิษ

ปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่มีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของ Methane Forming Bacteri ส่วนแอมโมเนียจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งก็จะมีผลกระทบต่อแบคทีเรีย ในขณะที่โปรตีนถูกย่อยสลายนั้น ไนโตรเจนจะถูกปล่อยออกมาในรูปของแอมโมเนีย ซึ่งแอมโมเนียนี้สามารถอยู่ได้ในหลายรูปแบบ เช่น แอมโมเนียอิสระ หรือประจุของแอมโมเนีย โดยขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่าง ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 7.2 จะมี  $\text{NH}_4^+$  มากกว่า แต่ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7.2 จะมี  $\text{NH}_3$  มากกว่า ซึ่งจะยับยั้งการทำงานและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์มากกว่า  $\text{NH}_4^+$  แอมโมเนียเมื่ออยู่ในรูป  $\text{NH}_3$  จะเป็นพิษก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในรูปของ  $\text{NH}_4^+$  จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นสูงเท่ากับ 7,000 - 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Sterling *et al.*, 2001) ส่วนซัลไฟด์ถูกสร้างขึ้นมาโดยการเปลี่ยนจากซัลเฟตที่มีอยู่ในสารละลาย และโดยการย่อยสลายของโปรตีน เฉพาะซัลไฟด์ที่ถูกดูดซึมผ่านเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรียเท่านั้นที่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร แบคทีเรียจะหยุดการเจริญเติบโต การเติมโลหะหนัก เช่น เหล็ก เพื่อไปจับตัวซัลไฟด์จะเป็นการลดความเข้มข้นลง ทำให้ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นลดลง ทั้งนี้แบคทีเรียสร้างมีเทนมีความต้องการธาตุจำเป็น 4 ชนิด คือ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ในปริมาณที่ต่ำมาก หากในระบบมีปริมาณโลหะหนักสูงเกินไป จะเกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบบำบัด

### อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน

แบคทีเรียที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลายนั้นต้องการแร่ธาตุอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและแพร่ขยาย ธาตุอาหารที่จำเป็น ได้แก่ คาร์บอน และไนโตรเจน ถ้ามีปริมาณไนโตรเจนน้อยเกินไป แบคทีเรียไม่สามารถสร้างเอนไซม์ออกมา ซึ่งเอนไซม์นี้มีความสำคัญในการย่อยสลายคาร์บอน แต่ถ้ามีปริมาณไนโตรเจนมากเกินไป โดยเฉพาะอยู่ในรูปของแอมโมเนียก็จะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20:1 และ 30:1 วัตถุที่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนเกิน 30:1 จะต้องมีการเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูพี่เลี้ยงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจนลงไป เช่น ยูเรีย หรือมูลไก่ เป็นต้น ธาตุบางตัว เช่น ฟอสฟอรัส อาจจะมีการเติมลงไปเพื่อช่วยในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (จารุวรรณ, 2551)

### การกวนผสม

เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในระบบเกิดการคลุกเคล้าผสมกัน เป็นเนื้อเดียวกัน และเกิดการกระจายการสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์และจุลินทรีย์มากขึ้น ทำให้ระบบเกิดภาวะเสถียรและไม่ทำให้เกิดฝ้า (Scum) ที่ระดับผิว ช่วยให้อุณหภูมิภายในถังมีความสม่ำเสมอ การกระจายของสารพิษเบาบางลง และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าที่ไม่มีการกวนผสม ถ้ากวนผสมไม่เพียงพอ อาจมีการตกตะกอนบางส่วน ทำให้ปริมาตรใช้งานของถังปฏิกรณ์ลดลง และระยะเวลาเก็บกักลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ หากมีการกวนผสมมากเกินไป จะรบกวนการทำงานของจุลินทรีย์ การกวนต่อเนื่องตลอดเวลาอย่างช้า ๆ จะให้ผลดีกว่าการกวนเร็ว (สมฤดี, 2551)

### ระยะเวลาในการกักเก็บ (Hydraulic retention time, HRT)

เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้อากาศ อัตราเร็วของการย่อยสลายเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์ จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นก็ลดลงจนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่จุลินทรีย์ถูกล้างออกจากระบบ (Wash out) ในอัตราที่เร็วกว่าการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ (Yilmazer and Yenigum, 1999) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้ สามารถแก้ไขการที่จุลินทรีย์ถูกล้างออกจากระบบได้โดยการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักให้นานขึ้น (Wen *et al.*, 1999) นอกจากนี้ ระยะเวลาเก็บกักจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก กล่าวคือ ระยะเวลาเก็บกักเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมักสามารถหาได้โดยการหารปริมาตรถังหมัก ด้วยปริมาตรของเสียที่เติมลงในถังหมักต่อหน่วยเวลา

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cheng *et al.* (2009) ศึกษาผลกระทบการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไฮโดรเจน ร่วมกับมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) จากผักตบชวาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy Conversion Efficiency) โดยทำการย่อยสลายกลูโคส และไซโลสจากเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ 2 ขั้นตอน เพื่อผลิตไฮโดรเจน ร่วมกับมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ตามหลักทฤษฎีไบโอฟักตบชวาที่ใช้เป็นสารตั้งต้นสามารถผลิตไฮโดรเจน และมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ในปริมาณสูงสุดมีค่าเท่ากับ 303 และ 211 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งที่ระเหยทั้งหมด ตามลำดับ ซึ่งตามหลักทฤษฎีทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากร้อยละ 19.1 ของการผลิตไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว เป็นร้อยละ 63.1 จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการปรับสภาพไบโอฟักตบชวาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ร่วมกับเอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) ในการผลิตไฮโดรเจน (51.7 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งที่ระเหยทั้งหมด) และมีเทน (143.4 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งที่ระเหยทั้งหมด) จะช่วยเพิ่มการแปลงพลังงานจากร้อยละ 3.3 ของการผลิตไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว

การคำนวณหาปริมาณของเสียที่เติมลงในถังหมักต่อหน่วยเวลา

ลิกนิน และถ้าจะมีปริมาณน้อย ทำให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนสูงสุด ในขณะที่รากของ ผักตบชวาจะพบปริมาณเถ้ามาก ส่วนปริมาณของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสพบน้อยสุด ทำให้อัตรา การผลิตไฮโดรเจนและมีเทนต่ำลง

Cathryn. *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาศักยภาพทางชีวภาพของวัชพืชน้ำ 3 ชนิดคือผักตบชวา สาหร่ายคาบอมบ้ำ และจอกหูหนู เป็นสารตั้งต้นสำหรับการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยชุดการ ทดลองย่อย 4 ชุด โดยประเมินจากผลผลิต และร้อยละของก๊าซชีวภาพจากพืชแต่ละชนิด และอัตรา การย่อยสลายของแต่ละชุด การทดสอบศักยภาพทางชีวภาพ (BMP) ขนาดเล็กจำนวน 56 ชุด (100 มิลลิลิตร) ถูกออกแบบมาเพื่อทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย และผลกระทบของการอบแห้ง และการเติมสารอาหาร ผลของการย่อยสลายแสดงให้เห็นว่าทั้งผักตบชวา และสาหร่ายคาบอมบ้ำมี ค่าศักยภาพย่อยสลายและผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 267 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และ 221 ลิตรต่อ กิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ แก๊สชีวภาพที่ได้เป็นมีเทนประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จอกหูหนู สามารถย่อยสลายและให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพ 155 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย และอยู่ในรูป ก๊าซมีเทนประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

รัชพล (2554) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรไลเสท (Hydrolysate) จาก ผักตบชวา ทำการปรับสภาพโดยใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมีที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ 1. แชน้ำเปลา 2. แชนสารละลายกรด 3. แชนสารละลายด่าง โดยพบว่าการปรับสภาพด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ร่วมกับหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง จะได้ไฮโดรไลเสท (Hydrolysate) ที่มีลักษณะของโครงสร้างและองค์ประกอบเส้นใยสูงที่สุด โดยมีเฮ มิเซลลูโลส เซลลูโลส และ ลิกนิน คิดเป็นร้อยละ 23.16, 47.38 และ 3.71 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับ วิธีการอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณน้ำตาลและสารประกอบอนุพันธ์ที่เป็นพิษจากกระบวนการ ปรับสภาพ เช่น เฟอร์ฟูรัล (Furfural) และ 5-ไฮดรอกซิลเมทิลเฟอร์ฟูรัล (5-Hydroxymethyl-Furfural) มีปริมาณน้อยมาก

มาลินี (2556) ได้ทำการศึกษาศักยภาพของวัชพืชน้ำ คือ ผักตบชวา ในการเป็นวัตถุดิบใน กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เพื่อเพิ่มอัตราการไฮโดรไลซิสของมวลชีวภาพโดยเซลลูเลส เอนไซม์ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการปรับสภาพมวลชีวภาพเบื้องต้นด้วยการใช้ไมโครเวฟ และมี การติดตามประสิทธิภาพของการปรับสภาพมวลด้วยการวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ จากนั้นได้มีการทำ การทดลองในถังหมักแบบกะซึ่งได้มีการติดตามผลผลิตและคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จาก ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพมวลเบื้องต้นแล้ว จากผลการศึกษาพบว่าผักตบชวานั้นสามารถถูกย่อย สลายได้ดี และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 290 ลิตรต่อกิโลกรัมมวลผักตบชวา โดยมีปริมาณก๊าซ มีเทนประมาณ 55% นอกจากนี้ยังพบว่าผักตบชวาที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วนั้น มี ความสามารถในการผลิตก๊าซที่สูงขึ้นถึงกว่า 36.15% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

เวสารัช และรัชพล (2555) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพผักตบชวาและจอกหู อกสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ร่วมกับด่าง และทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยานการค่า ไมโครเวฟที่ผลิตก๊าซชีวภาพที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว โดยใช้เอนไซม์เพื่อผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ โดยตัวอย่างไปใช้

ผักตบชวาและจอกเฉพาะส่วนของใบ ปรับสภาพตัวอย่างโดยใช้วิธีทางกายภาพ ใช้คลื่นไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 360, 600, 800 ร่วมกับทางเคมี ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เพื่อให้โครงสร้างภายในเหมาะสมต่อการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis) พบว่า กำลังไฟฟ้าและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นมีผลในทางลบต่อปริมาณ องค์ประกอบทางเคมีและน้ำหนักของตัวอย่าง เมื่อพิจารณาเฉพาะเซลลูโลส พบว่า ตัวอย่างเริ่มต้นให้ ปริมาณเซลลูโลสสูงสุด (75.25 + 2.21 ของน้ำหนักแห้ง) แตกต่างจากวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับ ขั้นตอนการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing Sugar) โดยการย่อยด้วยเอนไซม์ที่ความเข้มข้น 1000 ยูนิต ต่อกรัมสารตั้งต้น ได้แก่ 1. เซลลูโลส (Cellulose) 2. ไซลานเนส (Xylanase) 3. เซลลูโลสร่วมกับไซ ลานเนส (Cellulose + Xylanase) 4. ไซลานเนสตามด้วยเซลลูโลส (Xylanase / Cellulose) พบว่าให้ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการไฮโดรไลซิสด้วยเซลลูโลสที่เวลา 48 ชั่วโมง ให้ผลผลิตน้ำตาลสูงสุดคิดเป็น 0.24 + 0.33 กรัมต่อสารตั้งต้น และเหลือองค์ประกอบเซลลูโลสเพียง ร้อยละ 47.63 + 0.37 ของน้ำหนักแห้ง

สกุรัตน์ และคณะ (2559) ได้ทำการปรับสภาพผักตบชวาเพื่อนำไปผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) โดยจะทำการปรับสภาพผักตบชวาทั้งหมด 4 วิธี ได้แก่ การปรับสภาพด้วยความร้อน การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) และการปรับสภาพด้วยความร้อนร่วมกับกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) และโซเดียมไฮ ดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) พบว่า วิธีการปรับสภาพด้วยความร้อนร่วมกับกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) และความร้อนร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการปรับสภาพผักตบชวาก่อนจะเข้าสู่กระบวนการหมัก ก๊าซไฮโดรเจนเนื่องจากให้ค่าซีไอดีละลายหลังการปรับสภาพสูงสุดคือมีค่าเท่ากับ 6510.13 และ 6992.37 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Visva and Ajay (2017) ได้ศึกษาผลของเทคนิคการปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีทางกายภาพ 4 แบบ คือ เตอบลร้อน ไมโครเวฟ หม้อนึ่งไอน้ำ และอ่างน้ำร้อน ในกระบวนการไฮโดรไลซิสการวิ เเคราะห์องค์ประกอบและลักษณะของผักตบชวา เพื่อหาเทคนิคการปรับสภาพความร้อนที่มี ประสิทธิภาพมากที่สุดที่แสดงถึงการละลายที่ดีขึ้น การปรับสภาพที่สูงที่สุดคือเตอบลร้อนรองลงมา คือไมโครเวฟ อ่างน้ำร้อน และหม้อนึ่งไอน้ำ จากนั้นนำผักตบชวาไปศึกษาศักยภาพทางชีวเคมีในการ หมักของก๊าซมีเทน (BMP) ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่าผักตบชวาที่ผ่านการ ปรับสภาพมีการผลิตก๊าซมีเทนสะสมได้ 3039 + 32 มิลลิลิตร  $\text{CH}_4/\text{g}$  VS โดยการอบผักตบชวาที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าการผลิตก๊าซมีเทนสะสมของผักตบชวาที่ไม่ ผ่านการปรับสภาพ 2396 + 19 มิลลิลิตร  $\text{CH}_4/\text{g}$  Vs ในระยะเวลา 35 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Hot Plate ยี่ห้อ Wisd รุ่น MHS-20A
2. เตาเผาอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ Carbolite Furnaces รุ่น CSF 1100
3. ตู้อบ ยี่ห้อ memmert รุ่น UF5 และ ยี่ห้อ Heraeus รุ่น D- 6450 Hanau
4. พีเอชมิเตอร์ (pH meter) ยี่ห้อ ADWA รุ่น AD1040
5. เครื่องเขย่า
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ Mettler toledo
7. เครื่องหมุนเหวี่ยง ยี่ห้อ Orto alresa รุ่น digicen21
8. เครื่อง GC รุ่น HP 6890 บริษัท Agilent Version N.06.07
9. ตู้ดูดควัน (Hood) ยี่ห้อ FLEXLAB
10. โถดูดความชื้น (Desiccator)
11. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ยี่ห้อ Heto
12. ขวดหมักขนาด 1000 ลิตร (Duran)
13. ไชรินจ์พลาสติก
14. หลอดสูญญากาศ(หลอดเก็บก๊าซ)
15. เครื่องแก้วต่างๆ เช่น กระจบอกตวง ขวดปรับปริมาตร ขวดรูปชมพู่ ปีกเกอร์ ปิเปต
16. อุปกรณ์อื่นๆ เช่น ซ้อนตักสาร ฟอยล์อลูมิเนียม ถาด กระดาษวัดพีเอช พาราฟิล์ม หลอดcentrifuge Septum

##### 3.1.2 สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก 98% ( $H_2SO_4$ ) ยี่ห้อ LOBA CHEMIE และ QRèC เกรตวิเคราะห
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ LOBA CHEMIE เกรตวิเคราะห
3. โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) ยี่ห้อ QRèC เกรตวิเคราะห
4. ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $AgSO_4$ ) ยี่ห้อ SDFCL เกรตวิเคราะห

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ( $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ยี่ห้อ LOBA CHEMIE เกรด วิเคราะห์
6. กรดฟอสฟอริกเข้มข้น ( $\text{H}_3\text{PO}_4$  conc.) ยี่ห้อ Ajax Finechem เกรดวิเคราะห์
7. สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์
8. ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์
9. กรดแอสติค

### 3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.2.1 การเตรียมผักตบชวา

นำผักตบชวามาล้างเศษดินและสิ่งสกปรกออก หั่นให้มีขนาด ประมาณ 10 เซนติเมตร จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ บดและร่อนให้ได้ขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร เก็บไว้ในถุงปิดสนิท

#### 3.2.2 การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์

นำตะกอนจุลินทรีย์จากถังหมักของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB (Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket) ของโรงงานผลิตเส้นหมี่ขอเอง จำกัด ตั้งอยู่ที่ อ.สามพราน จังหวัด นครปฐม ซึ่งเก็บตะกอนในวันที่ 7 สิงหาคม 2562 มาล้างตะกอนด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง จากนั้นทิ้งให้ ตกตะกอนแล้วดูดน้ำออกให้เหลือเพียงตะกอนจุลินทรีย์ แบ่งตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน แล้วเก็บไว้ในตู้เย็นที่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตไฮโดรเจน ส่วนตะกอนที่เหลือนั้นใช้เป็นหัว เชื้อสำหรับการผลิตมีเทน

#### 3.2.3 ขั้นตอนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนแบบสองขั้นตอน

สกุลรัตน์ (2559) ได้ศึกษาวิธีการปรับสภาพผักตบชวาศด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรก่อนนำไปผลิต ไฮโดรเจน พบว่าวิธีการปรับสภาพด้วยความร้อนร่วมกับสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และหมักโดยใช้จุลินทรีย์แบบแห้งให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเมื่อนำมาเดินระบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะปรับสภาพผักตบชวาศด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ในการทดลองใช้ขวดหมักขนาด 1000 มิลลิลิตร ใส่ผักตบชวา 10 กรัม TVS (12.82 กรัม) ลงในขวดหมักทุกขวด เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 โดยปริมาตร ปริมาตร 100 200 300 และ 400 มิลลิลิตรลงในแต่ละขวด เพื่อให้มีอัตราส่วนผักตบต่อสารละลายเท่ากับ 1:10 1:20 1:30 และ 1:40 ตามลำดับ (รายละเอียดการทดลองดังตารางที่ 3.1) นำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยตั้งอุณหภูมิอ่างไว้ที่  $100 \pm 10$  องศาเซลเซียส รอจนกระทั่งสารละลายมีอุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส เริ่มจับเวลา ทั้งไว้เป็นเวลา 60 นาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่

อุณหภูมิห้อง (แต่ละอัตราส่วนทำการทดลองอัตราส่วนละ 3 ข้ำ) โดยรายละเอียดปริมาณสารตั้งต้น สารละลายกรด และปริมาณจุลินทรีย์ สภาวะที่ใช้ในการทดลอง แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดปริมาณสารตั้งต้น จุลินทรีย์ และสารละลายกรด ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่าง		ปริมาณ ผักตบชวา (กรัม)	ปริมาณ จุลินทรีย์ (กรัม)	ปริมาตร สารละลายกรด ซัลฟิวริกเข้มข้น 2% โดยปริมาตร	pH ที่ใช้ผลิต ไฮโดรเจน	pH ที่ใช้ผลิต มีเทน
control	ครั้งที่ 1	12.84	56.63	0	5.50	6.89
	ครั้งที่ 2	12.82	56.58	0	5.56	6.82
	ครั้งที่ 3	12.82	56.59	0	5.53	6.80
1:10	ครั้งที่ 1	12.82	56.58	100	5.52	6.91
	ครั้งที่ 2	12.82	56.59	100	5.53	6.80
	ครั้งที่ 3	12.82	56.59	100	5.58	6.83
1:20	ครั้งที่ 1	12.82	56.58	200	5.52	6.82
	ครั้งที่ 2	12.82	56.58	200	5.52	6.83
	ครั้งที่ 3	12.82	56.59	200	5.56	6.82
1:30	ครั้งที่ 1	12.84	56.66	300	5.58	6.88
	ครั้งที่ 2	12.82	56.59	300	5.52	6.81
	ครั้งที่ 3	12.82	56.59	300	5.52	6.80
1:40	ครั้งที่ 1	12.82	56.59	400	5.50	6.80
	ครั้งที่ 2	12.82	56.59	400	5.52	6.82
	ครั้งที่ 3	12.82	56.59	400	5.58	6.82

เมื่อทำการปรับสภาพผักตบชวาเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (โดยการอบในเตาอบ) โดยความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้หมักมีค่าประมาณ 5000 มิลลิกรัม TVS ต่อลิตร (56.58 กรัม) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เกือบถึง 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับพีเอชให้เป็น 5.5 ด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ เมื่อปรับพีเอช ได้แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1000 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนแล้วเปิดสารละลายตัวอย่างมา 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร หยดกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1-2 หยด (ให้มีพีเอช <2) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนเป็น 100 มิลลิลิตรนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นเพื่อใช้วิเคราะห์ COD, ปิดฝาขวดหมักให้แน่นด้วยแผ่นซิลิโคน และ

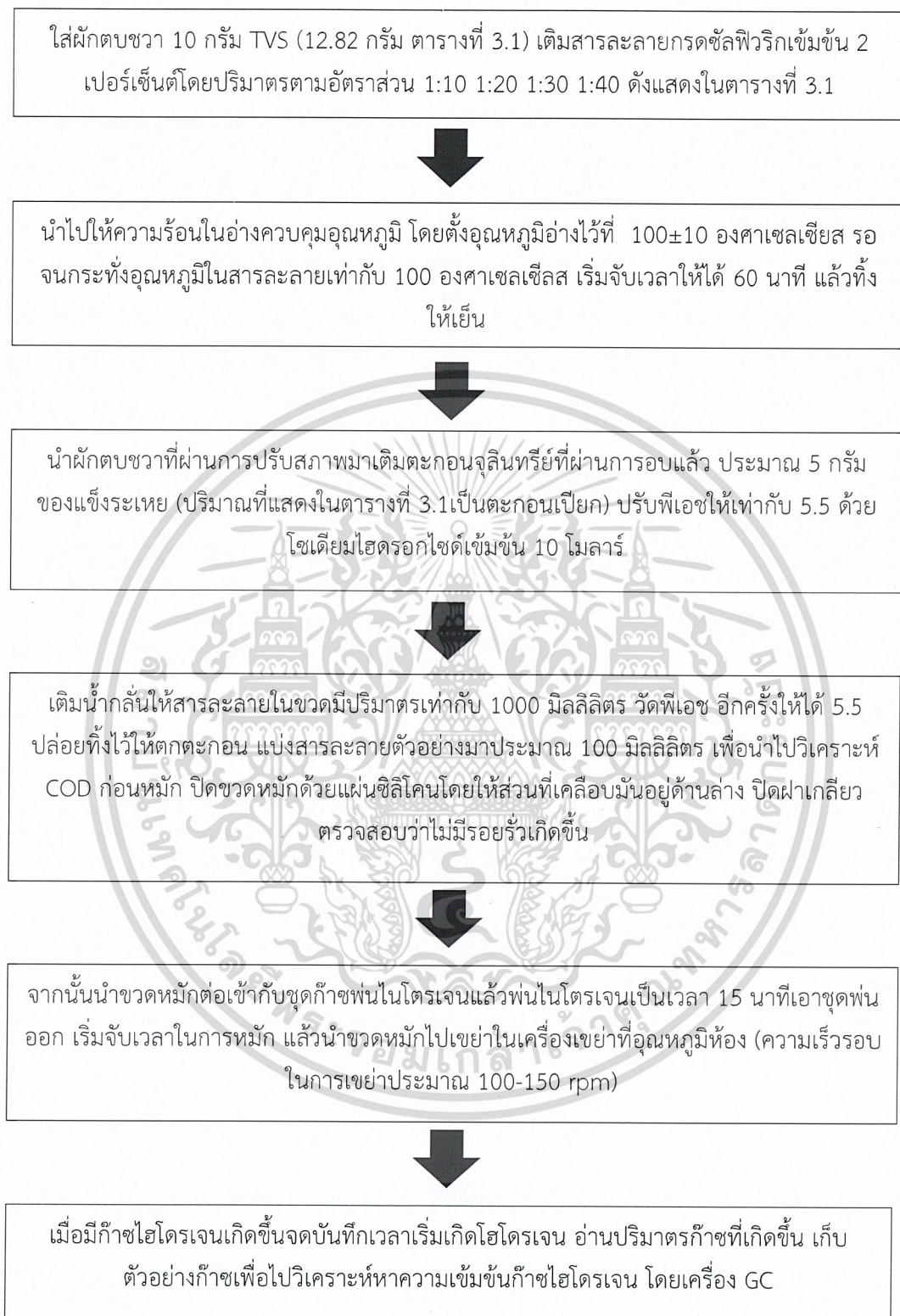
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเวลา 15 นาที นำไปเขย่าที่เครื่องเขย่า (ความเร็วรอบประมาณ 150 rpm) เริ่มจับเวลาในการหมักหลังจากปั่นไนโตรเจนเสร็จ จับเวลาเมื่อมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น บันทึกเวลาที่เริ่มเกิดนับแต่ปั่นไนโตรเจนเสร็จ อ่านปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น เก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนเพื่อไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจน จากนั้นวัดปริมาตรก๊าซและเก็บตัวอย่างก๊าซทุกๆ วัน หรือทุกๆ 24 ชั่วโมง

เมื่อไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น นำขวดหมักออกจากเครื่องเขย่า เก็บตัวอย่างก๊าซในขวดไปวิเคราะห์ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจน ทิ้งไว้ให้สารละลายในขวดตกตะกอน วัดพีเอชของสารละลายในขวด จากนั้นเปิดขวดหมักแล้วเก็บสารละลายตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 หรือ 2 หยด ลงในตัวอย่างที่ปิเปตมา (ให้มีพีเอช < 2) ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ COD และเก็บสารละลายตัวอย่างอีก 90 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ total VFA และ VFA โดยเครื่อง GC จากนั้นเติมจุลินทรีย์ที่ไม่ได้ผ่านการอบด้วยความร้อนปริมาณประมาณ 100 มิลลิลิตร ซึ่งเทียบเท่ากับตะกอนจุลินทรีย์ 5 กรัม TVS ซึ่งก่อนทำการทดลองได้วิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยของตะกอนที่เตรียมไว้ต่อปริมาตรตะกอน แล้วคำนวณ เป็นปริมาณตะกอนที่ต้องการ หลังจากเติมจุลินทรีย์แล้ว นำไปปรับพีเอชให้เป็น 6.8 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ ทำการปิดฝาด้วยแผ่นซิลิโคน ตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีรอยรั่ว และนำไปต่อเข้ากับชุดพ่นก๊าซไนโตรเจน ทำการพ่นไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที นำไปเขย่าที่เครื่องเขย่า เริ่มจับเวลาในการหมัก บันทึกเวลาที่เริ่มเกิดก๊าซมีเทน อ่านปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น เก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นก๊าซมีเทนโดยใช้เครื่อง GC จากนั้นวัดปริมาตรก๊าซและเก็บตัวอย่างก๊าซทุกๆ วัน หรือทุกๆ 24 ชั่วโมง ทำเหมือนกันทุกขวดการทดลอง รายละเอียดการหมักมีเทนดังแสดงในตารางที่ 3.1

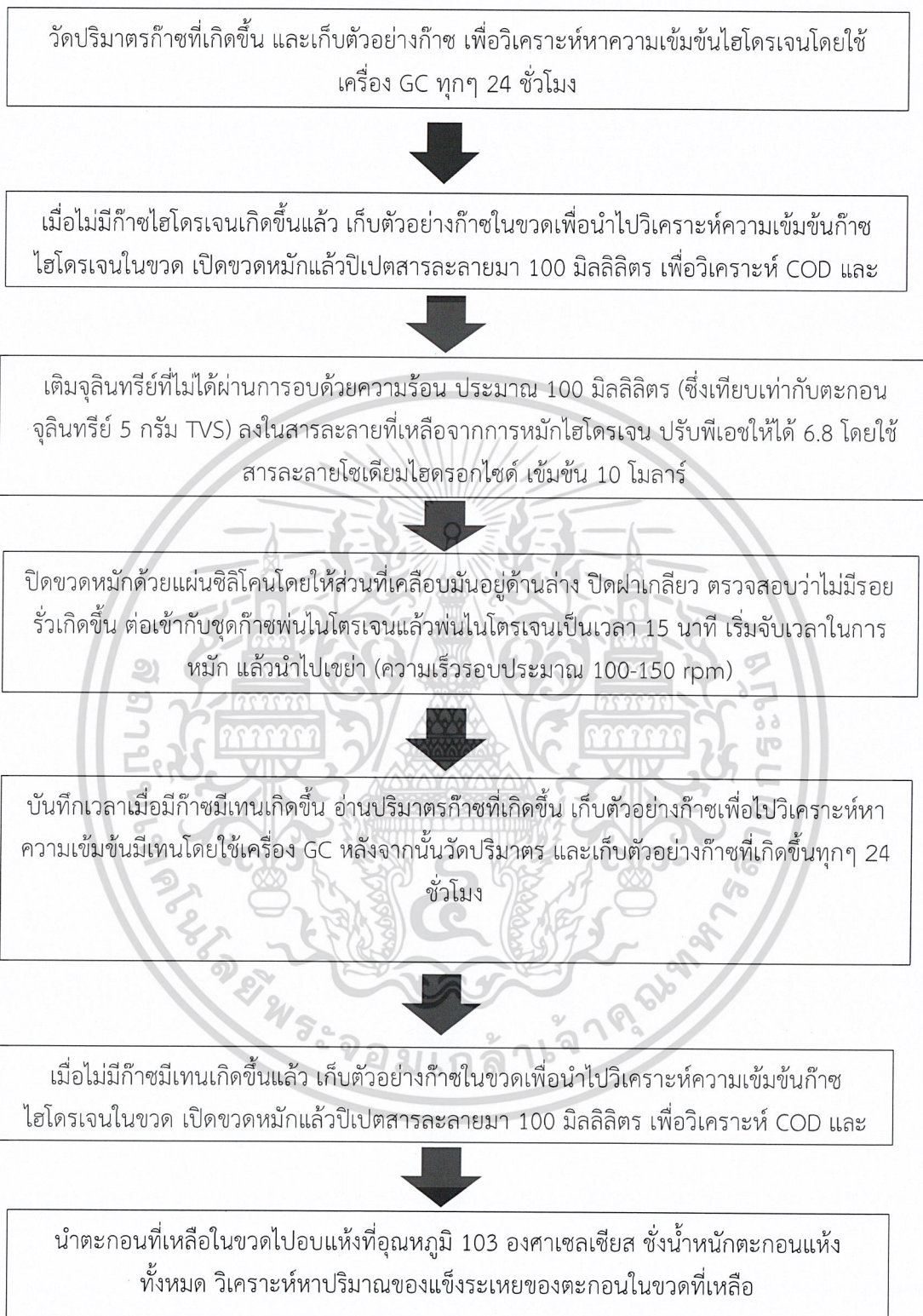
เมื่อไม่มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้น นำขวดหมักออกจากเครื่องเขย่า ทิ้งไว้ให้ตกตะกอน วัดพีเอชของสารละลายในขวด จากนั้นเปิดขวดหมักแล้วเก็บสารละลายตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 หรือ 2 หยด ลงในตัวอย่างที่ปิเปตมา (ให้มีพีเอช < 2) ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ COD เก็บตัวอย่างอีกประมาณ 20-30 มิลลิลิตร เติมกรดฟอสฟอริกเข้มข้น ให้ตัวอย่างมีพีเอชเท่ากับ หรือน้อยกว่า 2 นำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนขนาดเล็กออก กรองด้วยหัวกรองขนาด 0.22 ไมครอน นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ VFA โดยใช้เครื่อง GC จากนั้นนำสารละลายในขวดไปกรองตะกอนที่อยู่ในขวดออก หาน้ำหนักแห้งของตะกอนทั้งหมดโดยนำตะกอนไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส และหาปริมาณของแข็งระเหยของตะกอนในขวดหมัก หลังการหมัก ขั้นตอนการวิจัยได้สรุปไว้ในรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงวิธีการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนแบบสองขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 (ต่อ) แผนผังแสดงวิธีการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนแบบสองขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการวิเคราะห์

#### 3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวา

นำผักตบชวามาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี สมบัติที่วิเคราะห์ได้แก่ ความชื้น (Moisture), ของแข็งทั้งหมด (Total Solid; TS), ของแข็งระเหยง่าย (Total Volatile Solid; TVS) ของแข็งคงตัว (Fixed Solid), ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen; TKN), ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus; TP) ใช้วิธีวิเคราะห์ตาม Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของผักตบชวา

สมบัติทางกายภาพและเคมี	วิธีการวิเคราะห์
ความชื้น (Moisture)	Gravimetric Method
ของแข็งทั้งหมด (TS)	อบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส (2540 B)
ของแข็งระเหยง่าย (TVS)	เผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550± 50 องศาเซลเซียส (2540 E)
ของแข็งคงตัว	เผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550± 50 องศาเซลเซียส
ไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)	Kjeldahl Method (4500-N <sub>org</sub> C)
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	การย่อยด้วยกรดและหาปริมาณอโรฟอสเฟตด้วยวิธีการแอสคอบิก (4500-E)
ซีโอดี (COD)	Closed reflux, Titrimetric method (5220 C)

หมายเหตุ: รายละเอียดการทดลองอยู่ในภาคผนวก ก

#### 3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์

นำตะกอนจุลินทรีย์มาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติที่วิเคราะห์ได้แก่ ความชื้น (Moisture), ของแข็งทั้งหมด (Total Solid; TS), ของแข็งระเหยง่าย (Total Volatile Solid; TVS) ของแข็งคงตัว (Fixed Solid) ใช้วิธีวิเคราะห์ตาม Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater ดังแสดงในตารางที่ 3.3

### ตารางที่ 3.3 วิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์

สมบัติทางกายภาพ	วิธีการวิเคราะห์
ความชื้น (Moisture)	Gravimetric Method
ของแข็งทั้งหมด (TS)	อบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส (2540 B)
ของแข็งระเหยง่าย (TVS)	เผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ $550 \pm 50$ องศาเซลเซียส (2540 E)
ของแข็งคงตัว	เผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ $550 \pm 50$ องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: รายละเอียดการทดลองอยู่ในภาคผนวก ก

### 3.3.3 การวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนและมีเทน

#### 3.3.3.1 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

การเก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนทำการเก็บโดยใช้ไซริงค์ขนาด 60 มิลลิลิตรติดเข็ม เจาะลงไปใต้แผ่นซิลิโคนที่ปิดขวดหมัก (Septum) รอกจนกระทั่งไม่มีก๊าซดันออกมา ซึ่งหมายถึงความดันในขวดหมักเท่ากับความดันบรรยากาศ อ่านปริมาตรก๊าซที่วัดได้ หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างก๊าซไฮโดรเจนลงในหลอดเก็บก๊าซแล้วนำไปไว้เก็บไว้ในตู้เย็น นำก๊าซตัวอย่างมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นไฮโดรเจนด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) ของบริษัท Agilent รุ่น 6890 โดยสภาวะ (Condition GC) ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.4

#### ตารางที่ 3.4 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนและมีเทน

สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์	
อุณหภูมิของเตาอบ (Oven temperature)	80 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของหัวฉีด (Injector temperature)	80 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเครื่องตรวจจับ (Detector temperature)	200 องศาเซลเซียส
อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (Carrier gas)	13 มิลลิลิตรต่อนาที

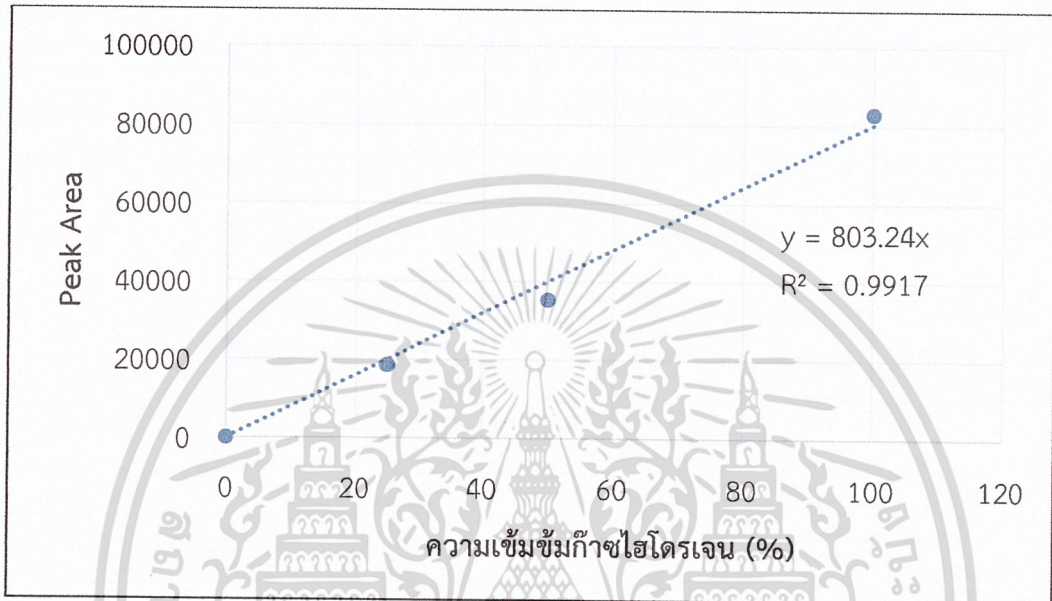
#### 3.3.3.2 การทำกราฟมาตรฐานก๊าซไฮโดรเจน

กราฟมาตรฐานเตรียมได้โดยการนำไซริงค์ดูดก๊าซไฮโดรเจนจากถังก๊าซไฮโดรเจนมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 99.999 เปอร์เซ็นต์ออกจากถัง 5 และ 2.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเก็บก๊าซ จากนั้นนำไซริงค์ดูดก๊าซมีเทนจากถังก๊าซมีเทนมาตรฐานความเข้มข้น 99.999 ปริมาณ 5 และ 7.5

มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเก็บก๊าซที่มีก๊าซไฮโดรเจนอยู่แล้ว ซึ่งชุดของก๊าซไฮโดรเจนมาตรฐานนี้จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเวลาผ่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 เติมน้ำมัน 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากนั้นใช้ไซริงค์ขนาด 3 มิลลิลิตร ดูดก๊าซจากหลอดเก็บ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซที่เตรียมไว้แต่ละความเข้มข้นฉีดเข้าไปในเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี ส่วนก๊าซไฮโดรเจนมาตรฐาน ความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ใช้ไซริงค์ขนาด 3 มิลลิลิตร ดูดก๊าซไฮโดรเจนจากถังไฮโดรเจน มาตรฐานที่มีความเข้มข้น 99.999 เปอร์เซ็นต์ นำไปฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟีทันที ตัวอย่าง การวิเคราะห์ดัง ตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนมาตรฐาน

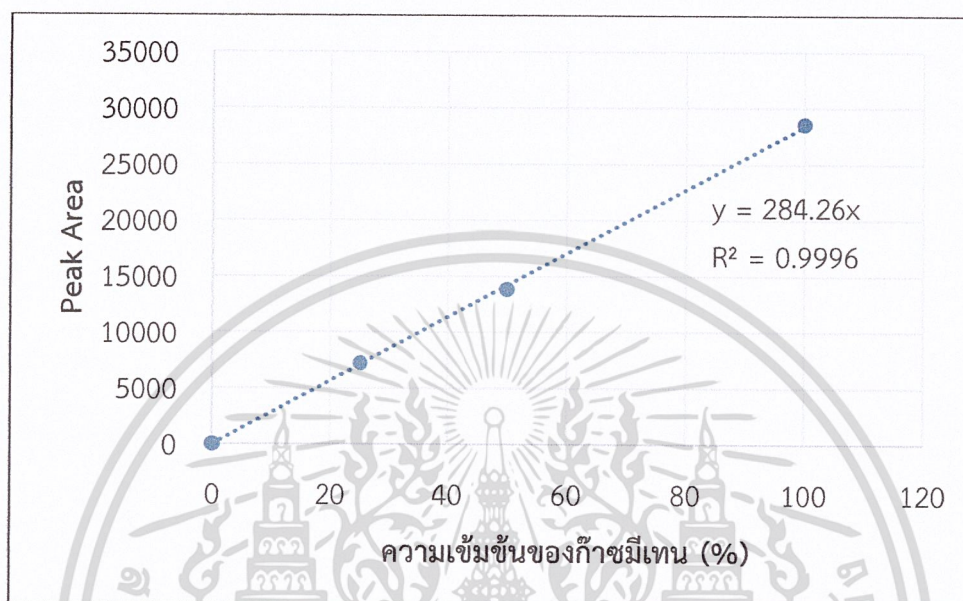
ตารางที่ 3.5 พื้นที่ใต้กราฟของก๊าซไฮโดรเจนมาตรฐานที่ความเข้มข้น 100%, 50% และ 25%

ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน (%)	Peak Area
100	83037.9
50	35446.6
25	18658.6

### 3.3.3.3 การทำกราฟมาตรฐานก๊าซมีเทน

กราฟมาตรฐานของมีเทนเตรียมได้โดยการนำไซริงค์ดูดก๊าซไฮโดรเจนจากถังก๊าซไฮโดรเจนมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 99.999 เปอร์เซ็นต์ออกจากถัง 2.5 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเก็บก๊าซ จากนั้นนำไซริงค์ดูดก๊าซมีเทนจากถังก๊าซมีเทนมาตรฐาน 7.5 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดเก็บก๊าซที่มีก๊าซไฮโดรเจนจากถังก๊าซไฮโดรเจนมาตรฐาน ตามลำดับ ซึ่งชุดของก๊าซมีเทนมาตรฐานนี้ จะมีความเข้มข้น 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากนั้นใช้ไซริงค์ขนาด 3 มิลลิลิตร ดูดก๊าซจาก

หลอดเก็บก๊าซที่เตรียมไว้แต่ละความเข้มข้นฉีดเข้าไปในเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟฟี ส่วนก๊าซมีเทนมาตรฐานความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ใช้ไซริงค์ขนาด 3 มิลลิลิตร ดูดก๊าซไฮโดรเจนจากถังมีเทนมาตรฐาน นำไปฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟฟีทันที ตัวอย่างการวิเคราะห์ดัง ตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมาตรฐาน

ตารางที่ 3.6 พื้นที่ใต้กราฟของก๊าซมีเทนมาตรฐานที่ความเข้มข้น 100%, 50% และ 25%

ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (%)	Peak Area
100	28584.6
50	13837.6
25	7223.2

### 3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติของสารละลายก่อนและหลังการหมัก

#### 3.3.4.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างสารละลายก่อนหมักก๊าซไฮโดรเจน

ตั้งขวดหมักทิ้งไว้ให้ตกตะกอนแล้วเปิดสารละลายตัวอย่างมา 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร หยดกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1-2 หยด ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนเป็น 100 มิลลิลิตรนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เพื่อใช้วิเคราะห์ COD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.8 วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของสารละลายตัวอย่างหลังหมักมีเทน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ซีโอดี(COD)	Closed reflux, Titrimetric method (5220 C)
กรดไขมันระเหยง่าย(VFA)	Distillation Method

หมายเหตุ: รายละเอียดการทดลองอยู่ในภาคผนวก ก

#### 3.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยวิธีโครมาโตกราฟี

การเก็บตัวอย่างสารละลายเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA) โดยการนำสารละลายที่ได้หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนและหลังหมักมีเทนปรับพีเอชให้เป็น 2 ด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็ว 3500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วทำการกรองผ่านตัวกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน หรือ 0.22 ไมครอน หลังจากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น Nexis GC-2030 คอลัมน์ DB-624 โดยสภาวะ (Condition) ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.9

#### ตารางที่ 3.9 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน

สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์	
อุณหภูมิของคอลัมน์ (Column temperature)	80-200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของหัวฉีด (Injector temperature)	240 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของเครื่องตรวจวัด (Detector temperature)	240 องศาเซลเซียส
อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (Carrier gas flow)	24 มิลลิลิตรต่อนาที

##### 3.3.5.1 การทำกราฟมาตรฐาน

ในการทำกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย นั้นสามารถเตรียมได้โดยเจือจางความเข้มข้นสารมาตรฐานที่ประกอบด้วยกรดไขมันระเหยง่าย 10 ชนิด C1 – C8 ความเข้มข้น 10 มิลลิโมล เจือจางให้มีความเข้มข้น 5-10 มิลลิโมล จากสารละลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิโมลในน้ำ จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยฉีดสารมาตรฐานความเข้มข้นต่างๆ เข้าไปในเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี เพื่อหาพื้นที่ใต้กราฟ (Peak area) โดยระยะเวลาที่เกิดพีค (Peak) ของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Retention time) จะอยู่ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยช่วงเวลาจะเรียงตามมวลโมเลกุลที่น้อยที่สุดไปมากที่สุด จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เอกสารที่เผยแพร่ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับความเห็นชอบจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่หรือดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์หลังหมักก๊าซชีวภาพ

เมื่อไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นตั้งขวดหมักทิ้งไว้ให้ตกตะกอน จากนั้นดูดสารละลายออกจนเกือบหมดให้เหลือเพียงตะกอนจุลินทรีย์ (อาจใช้วิธีการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แทนได้) เตะกอนจุลินทรีย์ลงในภาชนะแล้วนำไปอบจนตะกอนจุลินทรีย์แห้งแบ่งตะกอนจุลินทรีย์แห้งมาประมาณ 1-5 กรัม เพื่อนำไปหา ของแข็งระเหยง่าย (TVS) ของตะกอนที่เหลือในขวด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของผักตบชวา

ผักตบชวาที่นำมาทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ได้นำผักตบชวาล้างเศษดินและสิ่งสกปรก นำไปบดและผ่านการร่อนจนมีขนาด 2.0 มิลลิเมตร เก็บไว้ในถุงปิดสนิท จากนั้นจึงนำมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของผักตบชวาโดยมีพารามิเตอร์ที่จะทำการวิเคราะห์ดังนี้ ความชื้น (Moisture content) ของแข็งทั้งหมด (Total solids) ของแข็งคงตัว (Fixed solids) ของแข็งระเหยง่าย (Total volatile solids) ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus) ซีโอดี (Dissolved Chemical Oxygen Demand) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 (ผลดังภาคผนวกตารางที่ ข-1 และ ตารางที่ ข-2)

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของผักตบชวา

สมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ผลการวิเคราะห์
ความชื้น (%)	7.53 ±0.07
ของแข็งทั้งหมด (%)	92.47 ±0.07
ของแข็งระเหยง่าย (%)	84.36 ±0.11
ของแข็งคงตัว (%)	15.64 ±0.11
ไนโตรเจนทั้งหมด (%)	1.93 ±0.17
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (%)	0.26 ±0.06
ซีโอดี (mg O <sub>2</sub> /mg)	0.90 ±0.04

จากตารางที่ 4.1 ทำให้ทราบว่าผักตบชวามีปริมาณความชื้นร้อยละ 7.53 ของแข็งทั้งหมดร้อยละ 92.47 ของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 84.36 ของแข็งคงตัวร้อยละ 15.64 ไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 1.93 ฟอสฟอรัสทั้งหมด 0.26 และซีโอดีเท่ากับ 0.90 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อมิลลิกรัมตัวอย่าง โดยมีอัตราส่วนระหว่าง COD:N:P เท่ากับ 3.46:7.43:1 ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำมาหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากกว่าอัตราส่วนที่กำหนดไว้ โดยระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนควรมีอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:2:0.4 (Metcalf และ Eddy, 2004)

## 4.2 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์

### 4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์แบบแห้ง

ตะกอนจุลินทรีย์ที่นำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ได้ผ่านการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง ทิ้งให้ตกตะกอนแล้วดูดน้ำออกให้เหลือเพียงตะกอนจุลินทรีย์ แปะตะกอนจุลินทรีย์ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บรักษาตะกอนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์แบบแห้งมีพารามิเตอร์ที่จะทำการวิเคราะห์ได้แก่ ความชื้น (Moisture content) ของแข็งทั้งหมด (Total solids) ของแข็งระเหยทั้งหมด (Total volatile solids) ของแข็งคงตัว (Fixed solids) ผลของการวิเคราะห์แสดงตามตารางที่ 4.2 (ผลดังภาคผนวกตารางที่ ข-3) พบว่าตะกอนจุลินทรีย์มีปริมาณความชื้นร้อยละ 89.43 ของแข็งทั้งหมดร้อยละ 10.57 ของแข็งระเหยทั้งหมดร้อยละ 83.55 และของแข็งคงตัวร้อยละ 16.45

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์แบบแห้ง

สมบัติทางกายภาพ	ผลการวิเคราะห์
ความชื้น (%)	89.43 ±0.06
ของแข็งทั้งหมด (%)	10.57 ±0.06
ของแข็งระเหยทั้งหมด (%)	83.55 ±0.77
ของแข็งคงตัว (%)	16.45 ±0.77

### 4.2.2 สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์แบบเปียก

ตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาวิเคราะห์ เป็นตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่ได้ผ่านการอบด้วยความร้อน ถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์แบบเปียกมีพารามิเตอร์ที่จะทำการวิเคราะห์ได้แก่ ของแข็งทั้งหมด (Total solids) และของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Total volatile solids) ผลการวิเคราะห์แสดงตามตารางที่ 4.3 (ผลดังภาคผนวกตารางที่ ข-3) พบว่าตะกอนจุลินทรีย์แบบเปียกมีของแข็งทั้งหมดร้อยละ 4.84 กรัม/มิลลิลิตร และของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดร้อยละ 2.76 กรัม/มิลลิลิตร

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์แบบเปียก

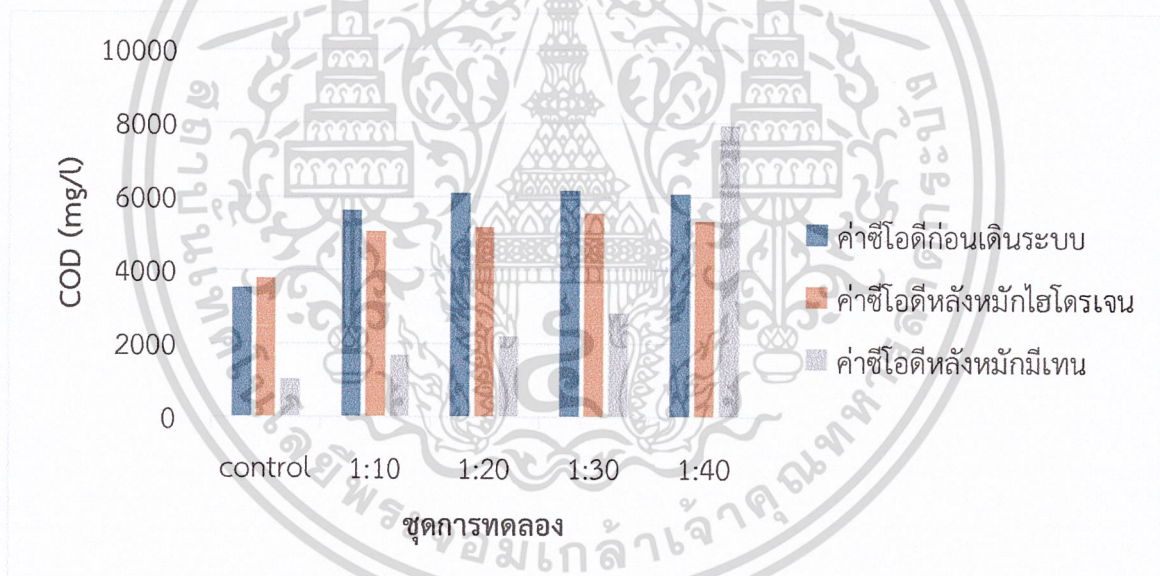
สมบัติทางกายภาพ	ผลการวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (กรัม/มิลลิลิตร)	4.84 ±0.36
ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (กรัม/มิลลิลิตร)	2.76 ±0.24

## 4.3 การหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนแบบไร้อากาศ

ในระหว่างที่ทำการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน จากการใส่ผักตบชวาและสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยแบ่งเป็น 4 ชุดการทดลองตามอัตราส่วน 1:10 1:20 1:30 1:40 โดยใช้ผักตบชวา 10 กรัม เตินระบบด้วยตะกอนจุลินทรีย์แบบแห้ง และเดินระบบด้วยตะกอนจุลินทรีย์แบบเปียกหลังหมักก๊าซไฮโดรเจนเพื่อผลิตก๊าซมีเทน จะต้องทำการวิเคราะห์ปริมาณซีไอดี (Dissolved Chemical Oxygen Demand) ก่อนเดินระบบ หลังหมักก๊าซไฮโดรเจน หลังหมักก๊าซ

มีเทน และทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันที่ระเหยง่ายหลังหมักก๊าซไฮโดรเจน และหลังหมักก๊าซมีเทน ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.1

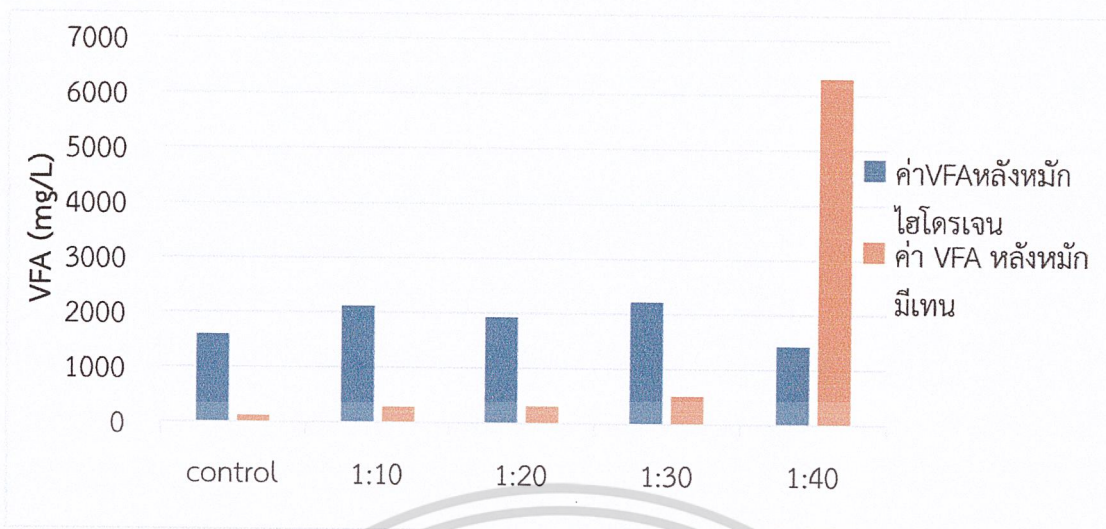
จากรูปที่ 4.1 การหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน ตามชุดการทดลองที่มีอัตราส่วนระหว่างผักตบชวาต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ได้แก่ 1:10 1:20 1:30 1:40 และชุดควบคุม โดยใช้ผักตบชวา 10 กรัม และเดินระบบด้วยตะกอนจุลินทรีย์ ผลการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีก่อนเดินระบบมีค่าเท่ากับ 5629, 6110, 6175, 6123 และ 3523 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูป (ผลตั้งภาคผนวกตารางที่ ข-4) ผลการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีหลังการหมักไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 5057, 5174, 5564, 5343 และ 3783 ตามลำดับ (ผลตั้งภาคผนวกตารางที่ ข-5) และผลการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีหลังการหมักก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับ 1694.20, 2206.40, 2836.80, 7945.67 และ 1037.53 ตามลำดับ ดังรูป (ผลตั้งภาคผนวกตารางที่ ข-6) พบว่าค่าซีโอดีหลังการหมักมีปริมาณลดลง ยกเว้นอัตราส่วน 1:40 ค่าซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้นอาจเกิดจากปริมาณเซลล์จุลินทรีย์ที่สะสมในระบบ และผักตบชวาที่ไม่ถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (ดังรูปที่ 4.2) ที่มีค่ามากที่สุด แสดงว่าการนำไปใช้ในการเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพเกิดได้ไม่ดี



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ปริมาณซีโอดีในแต่ละชุดการทดลอง

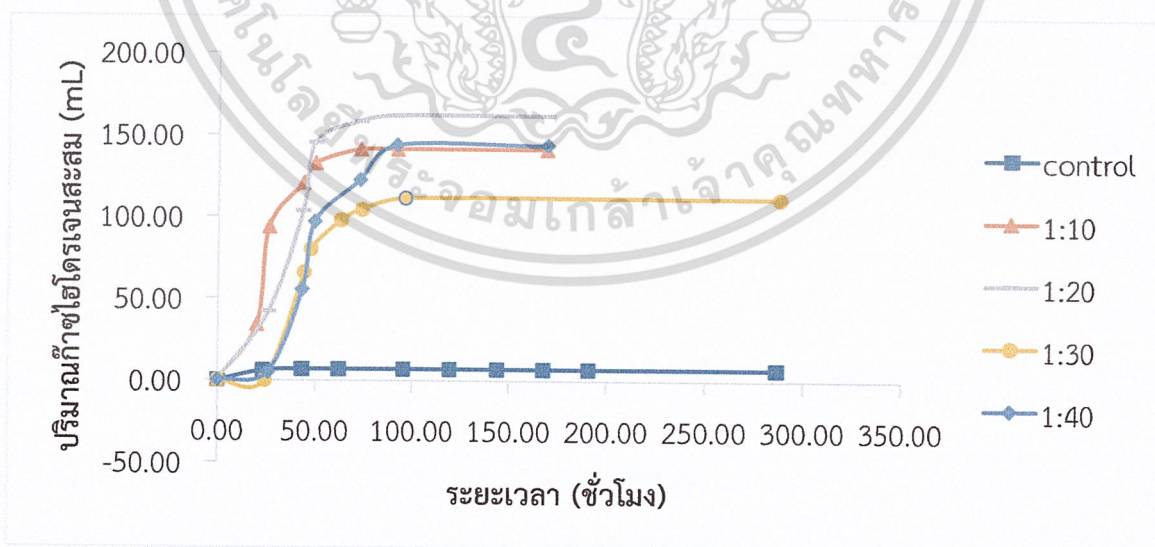
หมายเหตุ : เป็นครั้งการทดลองที่เกิดปริมาณก๊าซสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันที่ระเหยง่ายในแต่ละชุดการทดลอง  
 หมายเหตุ : เป็นครั้งการทดลองที่เกิดปริมาณก๊าซสูงที่สุด

จากรูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันที่ระเหยง่ายหลังหมักไฮโดรเจน ของชุดการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 1:20 1:30 1:40 และชุดควบคุม มีค่าเท่ากับ 2117.48, 1933.35, 2227.96, 1427 และ 1601.92 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันที่ระเหยง่ายหลังหมักมีเทน มีค่าเท่ากับ 284.42, 310.02, 509.12, 6299.96 และ 116.62 ตามลำดับ ดังรูป (ผลดังภาคผนวกตารางที่ ข-7) การหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน เมื่อทำการหมักจะมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น โดยทำการวิเคราะห์ก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวัน ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.3



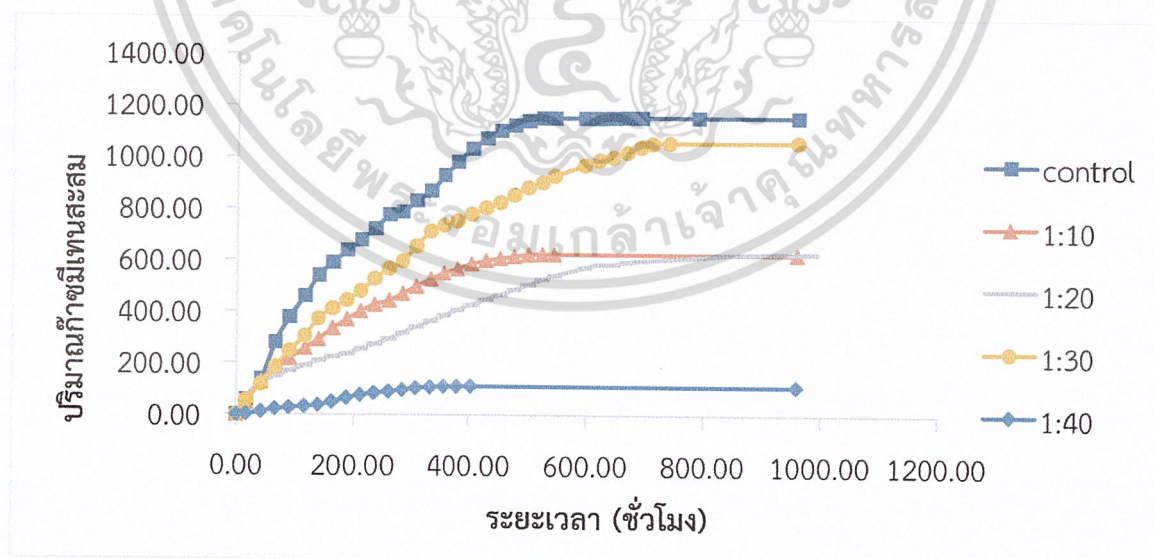
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกิดก๊าซไฮโดรเจนกับระยะเวลาในการหมัก ที่อัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 หมายเหตุ : เป็นครั้งการทดลองที่เกิดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสูงที่สุด  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพและความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น พบว่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนไม่ได้สัมพันธ์กับปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง เพราะจากกระบวนการ การเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์จะเกิดก๊าซชีวภาพชนิดอื่นๆร่วมด้วยเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ กรดไขมันชนิดสั้น (Short fatty acid) ดังสมการ



โดยในชุดการทดลองที่มีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนสูงที่สุด คือ ชุดการทดลองที่อัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่อัตราส่วน 1:40 ชุดการทดลองที่ 1:10 ชุดการทดลองที่ 1:30 และชุดควบคุม ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 161.92, 143.79, 141.35, 111.28 และ 6.95 มิลลิลิตร ตามลำดับ (ผลดังภาคผนวกตารางที่ ข-7) สำหรับผลการผลิตก๊าซมีเทน ผลดังรูปที่ 4.4 โดย ชุดการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 1:20 1:30 1:40 และชุดควบคุม ปริมาณก๊าซมีเทนเท่ากับ 625.39, 628.27, 1059.83, 111.59 และ 1156.24 มิลลิลิตร ตามลำดับ พบว่า ชุดควบคุม เกิดก๊าซ มีเทนสูงกว่าผักตบชวาที่ทำการปรับสภาพ โดยอัตราส่วนที่ปริมาณก๊าซมีเทนใกล้เคียงชุดควบคุมคือ อัตราส่วน 1:30 ผลดังรูปที่ 4.4 ผลของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น สอดคล้องกับปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (ผลดังรูปที่ 4.5 - 4.6) โดยปริมาณกรดอะซิติก ในชุดควบคุม สูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆทำให้ในช่วงแรก จุลินทรีย์กลุ่มมีเทนสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน จึงทำให้ก๊าซมีเทนในชุดควบคุมสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ขณะที่กรดบิวไทรกที่อัตราส่วน 1:30 จะสูงกว่า ที่อัตราส่วนอื่นๆ รวมทั้งชุดควบคุมเล็กน้อย ซึ่งกรดบิวไทรก จะต้องถูกย่อยสลายเปลี่ยนรูปเป็นอะซิติกก่อน จากนั้น จุลินทรีย์กลุ่มมีเทนจึงจะนำไปใช้ได้ (ผลดังรูปที่ 4.5)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ปริมาณก๊าซมีเทนกับระยะเวลาในการหมัก ที่อัตราส่วนต่างๆ  
หมายเหตุ : เป็นครั้งการทดลองที่เกิดปริมาณก๊าซมีเทนสูงที่สุด

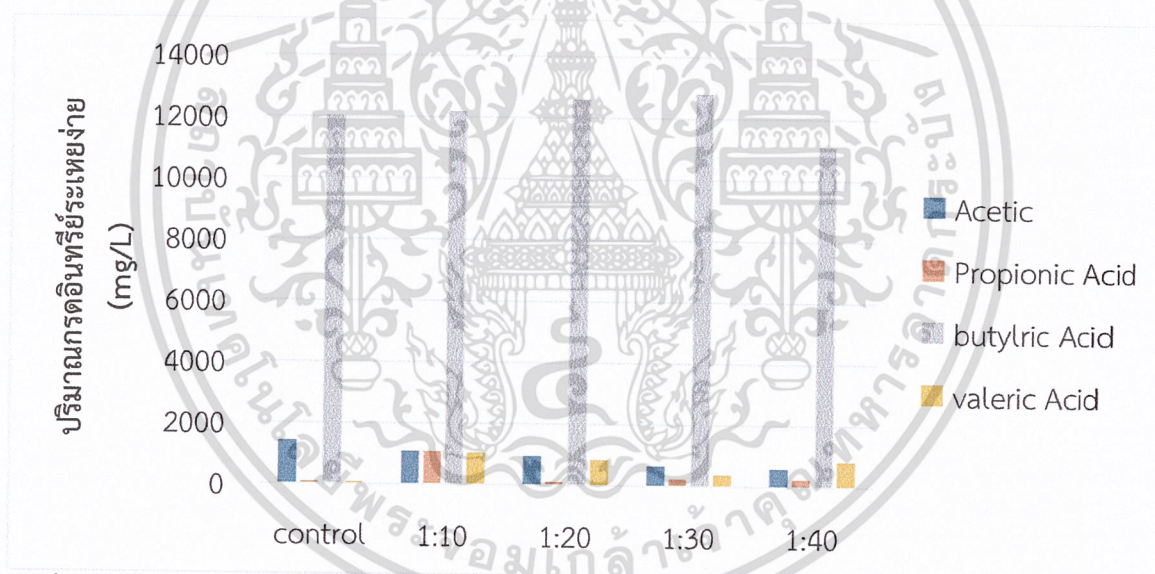
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย

##### 4.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายหลังหมักไฮโดรเจน

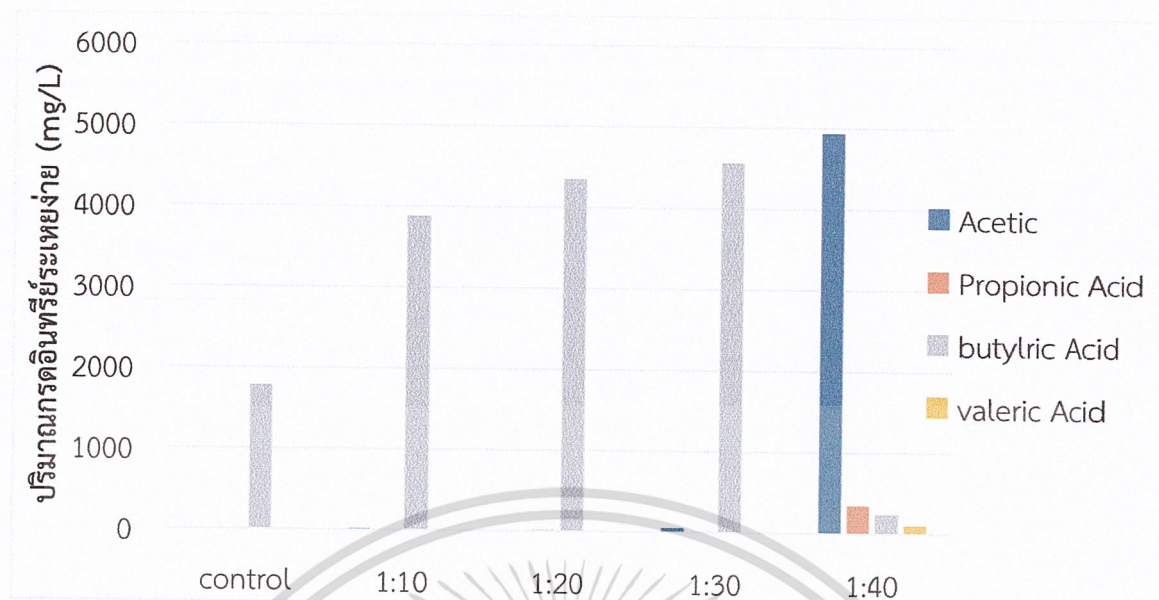
การเก็บตัวอย่างสารละลายเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA) โดยการนำสารละลายที่ได้หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจน ไปวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

จากรูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันที่ระเหยง่ายหลังหมักไฮโดรเจน ของชุดการทดลองที่อัตราส่วน 1:10 1:20 1:30 1:40 และชุดควบคุม มีปริมาณกรดบิวทริกสูงกว่ากรดอินทรีย์อื่น ๆ มีค่าเท่ากับ 12186.61, 12601.49, 12808.40, 11118.85 และ 12029.84 ตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่อัตราส่วน 1:30 สูงที่สุด และอัตราส่วน 1:40 น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณมีเทนที่เกิดโดยปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นคือ 625.39, 628.27, 1059.83 และ 111.59 ที่อัตราส่วน 1:10 1:20 1:30 1:40 ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วน 1:30 ผลิตก๊าซมีเทนได้มากที่สุด และอัตราส่วน 1:40 ผลิตก๊าซมีเทนได้น้อยที่สุด เนื่องจากกรดบิวทริกและกรดไขมันชนิดอื่นๆถูกแบคทีเรียเปลี่ยนรูปไปเป็นกรดอะซิติกเสียก่อนจากนั้นแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเทนจะเปลี่ยนกรดอะซิติกไปเป็นก๊าซมีเทน ดังรูปที่ 4.5 -4.6 (ผลดังภาคผนวกรูปที่ที่ ข-1 - รูปที่ ข-30)



รูปที่ 4.5 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดในแต่ละชุดการทดลองหลังหมักก๊าซไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแต่ละชนิดในแต่ละชุดการทดลองหลังหมักก๊าซมีเทน

#### 4.5 การวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์หลังหมักก๊าซมีเทน

เมื่อไม่มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นนำตะกอนจุลินทรีย์มาวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Total volatile solids) โดยที่อัตราส่วน 1:20 ปริมาณของแข็งระเหยง่ายจะมีปริมาณสูงกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้น เท่ากับ 628.27 มิลลิลิตร ซึ่งน้อยกว่าชุดควบคุมที่มีก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 1156.24 มิลลิลิตร (ผลดังรูปที่ 4.4) แสดงว่าจุลินทรีย์นำสารอาหาร (substrate) ไปสร้างไบโอเซลล์ (Biocell) มากกว่าการเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซมีเทน

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของแข็งระเหยง่ายหลังหมักก๊าซมีเทน (TVS)

ตัวอย่าง	ผลการวิเคราะห์
ชุดควบคุม (%)	69.92 ±0.19
อัตราส่วน 1:10 (%)	77.00 ±0.73
อัตราส่วน 1:20 (%)	80.27 ±0.30
อัตราส่วน 1:30 (%)	65.28 ±0.46
อัตราส่วน 1:40 (%)	64.31 ±0.52

หมายเหตุ : เป็นข้อมูลจากการทดลองที่เกิดปริมาณก๊าซสูงที่สุด(รายละเอียดดูในภาคผนวกตารางที่ ข-40)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวาต่อปริมาณสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งใช้ในการปรับสภาพผักตบชวาเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างผักตบชวาต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

โครงการนี้ได้ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างผักตบชวาต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตั้งแต่ 1:10, 1:20, 1:30, 1:40 และชุดควบคุม โดยใช้ผักตบชวา 10 กรัม TVS หมักในขวดหมักขนาด 1 ลิตร ในการการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากผักตบชวาโดยการหมักแบบไร้อากาศนำตะกอนจุลินทรีย์มาใช้ในการเดินระบบ จากการทดลองได้ผลสรุปดังนี้

1. จากการวิเคราะห์อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวาต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 1:10 1:20 1:30 1:40 สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 141.35, 161.92, 111.28 และ 143.79 ตามลำดับ พบว่าที่อัตราส่วน 1:20 สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากที่สุด คือ 161.92 มิลลิลิตร อัตราส่วน 1:30 ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้น้อยที่สุด คือ 111.28 มิลลิลิตร

2. จากการวิเคราะห์อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวาต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 1:10 1:20 1:30 1:40 สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 625.39, 628.27, 1059.83 และ 111.59 ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วน 1:30 ผลิตก๊าซมีเทนได้มากที่สุด และอัตราส่วน 1:40 ผลิตก๊าซมีเทนได้น้อยที่สุด

3. ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนพบว่าชุดควบคุมสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าอัตราส่วนระหว่างผักตบชวาต่อปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน 1:10 1:20 1:30 1:40 เนื่องจากกรดซัลฟิวริกสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งในขวดที่มีกรดซัลฟิวริกอาจเปลี่ยนรูปไปเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าเกิดก๊าซมีเทน

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรควบคุมอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการหมักก๊าซชีวภาพ
2. ตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการหมัก ควรเป็นตะกอนที่ผ่านการอบใหม่ทุกครั้ง
3. เมื่อเก็บก๊าซควรทำการวิเคราะห์ทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่ม 4. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรังสิต. 4: 297-298.
- ชนิษฐา หมูโสภัญ. 2553. “ไบโอไฮโดรเจน พลังงานทางเลือกใหม่.” *วารสารศูนย์บริการวิชาการ* ปีที่ 18: 16-19.
- คณะอนุกรรมการประสานงานวิจัยฯ และคณะกรรมการสาขาเกษตรศาสตร์ และชีววิทยา. 2521. เอกสารเรื่องผักตบชวา. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- จารุวรรณ เรืองคง. 2551. “การศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เฉลิมเดช ณ ลำพูน. 2553. “การศึกษาผลของอัตราส่วนสารอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกลีเซอรอล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.” กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นคร ทิพย์าวงศ์. 2553. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- บรรยงค์ แบบประเสริฐ. 2544. “ประโยชน์และโทษของผักตบชวา.” *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*.ปีที่ 49 ฉบับที่ 156.
- ปาริชาติ ธาราพัตราพร และวงศ์ผกา วงศ์รัตน์. 2542. การศึกษาบรรจุภัณฑ์จากผักตบชวา. นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร.
- เปล่งศักดิ์ ภูจักร. 2546. “การใช้เรซินผักตบชวาบำบัดสีจากน้ำเสียย้อมผ้า.” วิทยานิพนธ์ปริญญาสาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- มยุรา ศรีกัลยานุกูล และรุ่งทิพย์ กาวารี. 2556. “รายงานผลการวิจัยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากมูลสุกรโดยใช้กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน.” มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- มุสดี และคณะ. 2554. “คู่มือการจัดการผักตบชวา”. นครปฐม : สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 5.
- มาลินี ศรีอริยพันธ์. 2556. “รายงานการวิจัยการศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการปรับสภาพชีวมวลเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา.” กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- รัชพล พะวงศ์รัตน์. 2554. “การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรไลเสทผักตบชวาโดยหมอนึ่งไอน้ำแรงดันสูงเพื่อผลิตเอทานอล.” *Veridian E-Journal, SU Vol.4 No.1:* 891-901.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วนิดา ปานอุทัย, นิคม แหลมสัก, สาโรจน์ ศิริคັນสนียกุล, วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา และประมุข ภาวะกุลสุขสถิตย์. 2553. “การผลิตเอทานอลจากไม้ยูคาลิปตัสโดยกระบวนการย่อยเป็น น้ำตาลและหมักพร้อมกัน.” หน้า 392-400. ในการประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48. กรุงเทพฯ: สาขาอุตสาหกรรมเกษตร , มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วรรณมา ตูยธัญ. 2551. *เคมีอาหารของคาร์โบไฮเดรต*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิไลวรรณ ลีนะกุล. 2552. “ผลของการทำปฏิกิริยาด้วยกรดเจือจางกับไม้ไผ่ต่อการผลิตเอทานอล.”วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงานบัณฑิตวิทยาลัย , มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เวสราวิช สุนทรชัยบูรณ์ และรัชพล พะวงศรีรัตน์. 2555. “การปรับสภาพผักตบชวา (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) และจอก (*Pistia stratiotes* L.) ด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับต่าง และกระบวนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ เพื่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์.” *Sakon nakon graduate studies Journal*, Vol.10 No. 45: 173-184.
- สกุลรัตน์ เอียดนัย, ธัญญลักษณ์ หนูสงค์, สุวรินทร์ พงษ์กลิ่น และเนรัชชา ความ่วง. 2559. “การศึกษา การปรับสภาพผักตบชวาเพื่อการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ.” *ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยศิลปากร.*
- สมฤดี ฤทธิยากุล. 2551. “ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและผลพลอยได้จากการหมักมูลสุกร ร่วมกับสาหร่ายหนามจากทะเลสาบสงขลา.” *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.*
- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 2520. *เอกสารวิชาการเรื่องผักตบชวา: โครงการ ป้องกันกำจัดผักตบชวาที่วราชอาณาจักร*. กรุงเทพฯ:
- สุชาติ ศรีเพ็ญ, คุณหญิง. 2542. *พรรณไม้ในประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์ พับลิชชิ่ง.
- อลิศรา เรืองแสง และสุรีย์วัลย์ สิทธิจินดา. 2554. “รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่องการผลิต ไฮโดรเจนจากกลีเซอรอลเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลภายใต้อุณหภูมิห้องในถัง ปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ anaerobic sludge blanket (UASB).” *มหาวิทยาลัยขอนแก่น.*
- Alvira, P.E. Tomas-Pejo, M. Ballesteros. and M.J. Nergro. 2010. “Pretreatment technology for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review.” *Bioresour. Technol.* 101, 4851-4861.
- Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., Dewil, R. 2008. “Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge.” *Prog. Energy Combust. Sci.* 34, 755-781.
- Archer, D.B., and Kirsep, B.H. 1991. *The microbiology and control of anaerobic Digestion*: In A.W. ed. *Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology*. London: Elsevier Applied Science Publisher.

- Assawamongkholisiri, T., Reungsang, A., Pattra, S. 2013. "Effect of acid, heat and combined acid-heat pretreatments of anaerobic sludge on hydrogen production by anaerobic mixed cultures." *Int. J. Hydrog. Energy* 38, 6146-6153.
- Ballesteros, M. and Oliva, JM. 2004. "Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process (SSF) with *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875." *Process Biochemistry*. 39: 1843-1848.
- Bao, M.D., Su, H.J., Tan, T.W. 2013. "Dark fermentative bio-hydrogen production: effects of substrate pre-treatment and addition of metal ions or L-cysteine." *Fuel* 112, 38-44.
- Bastawdeet, K.B. 1992. "Xylan structure, microbial xylanases and their mode of action." *World J. of Microbiol. and Biotechnol.* 8 : 355-368.
- Boe, K. 2005. "Online monitoring and control of the biogas process. PhD dissertation, Department of Environmental Engineering." *Technical University of Denmark*.
- Brebu, M. and Vasile, C. 2010. "Thermal Degradation of Lignin—Review." *Cellulose Chemistry and Technology* 44, 353-363.
- Browning, B.L. 1963. *Method in wood chemistry*. Interscience Publishers, New York, London. 389-407.
- Cathryn, O'Sullivan. Beth, Rounsefell, Alistair, Grinham, William, Clarke and James, Udy. 2010. "Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba Caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*)." *Ecological Engineering* 36 (10): 1459-1468.
- Chen, R., Wang, Y.Z., Liao, Q., Zhu, X., Xu, T.F. 2013. "Hydrolysates of lignocellulosic materials for biohydrogen production." *BMP Reports* 46 (5), 244-251.
- Chen W, Han S, Sung S. 2003. "Sodium Inhibition of Thermophilic Methanogens." *Journal of Environmental Engineering*. 129(6), 506-512
- Cheng, J., Xie, B., Zhou, J., Song, W and Cen, K. 2009. "Cogeneration of H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from water hyacinth by two-step anaerobic fermentation." *international journal of hydrogen energy*. 35, 3029 – 3035.
- Cui, Maojin and Shen, Jianquan. 2012. "Effects of acid and alkaline pretreatments on the biohydrogen production from grass by anaerobic dark fermentation." *Journal of Fuel and Energy Abstracts*
- Danilenko, A.N., Bogomolov, A.A., Yuryev, V.P., Dianova, V.T., Bogatyrev, A.N. 1993. "Effect of the polymerisation degree, moisture content, and temperature on kinetics of hydrolysis of corn starch by alpha-amylase." *Starch/Stärke* 45 (2), 63-65.
- Datar, R., Huang, J., Maness, P.C., Mohagheghi, A., Czernik, S., Chornet, E. 2007. "Hydrogen production from the fermentation of corn stover biomass pretreated with a steam-explosion process." *Int. J. Hydrog. Energy* 32, 932-939.

Dhepe, P.L. and Sahu, R. 2012. "One pot and single step hydrolytic process for the conversion of lignocellulose into value added chemicals." **Carbohydrate Research**. 9, 375-378.

Duff, S. J. B. & Murray, W. D. 1996. "Bioconversion of forest products industry waste cellulose to fuel ethanol: a review." **Bioresource Technology**, 55, 1-33.

Elbeshbishy, E., Hafez, H., Dhar, B.R., Nakhla, G. 2011. "Single and combined effects of various pretreatment methods for biohydrogen production from food waste." **Int. J. Hydrog. Energy** 36, 11379-11387

Energy Delta Institute: Energy Business School. 2557. "กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ."

Fan, L.T., Lee, Y.H., Beardmore, D.H. 1980. "Mechanism of the enzymatic hydrolysis of cellulose: effects of major structural features of cellulose on enzymatic hydrolysis." **Biotechnol. Bioeng.** 22 (1), 177-199.

Floch, A.L., Jourdes, M. and Teissedre P.L. 2015. "Polysaccharides and lignin from oak wood used in cooperage: Composition, interest, assays: A review." **Carbohydrate Research**. 417, 94 – 102

Goodell, B., Qian, Y., and Jellison, J. 2008. "Fungal Decay of Wood: Soft Rot—Brown Rot—White Rot." **ACS Symposium Series**, Vol. 982, pp 9–31.

Hamelinck, C. N., van Hooijdonk, G., & Faaij, A. P. 2005. "Ethanol from lignocellulosic biomass: Techno-economic performance in short, middle, and long term." **Biomass and Bioenergy**. 28(4), 384-410.

Hendriks, A.T.W.M., Zeeman, G. 2009. "Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass." **Bioresour. Technol.** 100, 10-18.

Hsu, T.A., Ladisch, M.R., Tsao, G.T. 1980. "Alcohol from cellulose." **Chemistry Technol.** 10, 315-319.

Johnsson, L.J., Alriksson, B., Nilvebrant, N.O. 2013. "Bioconversion of lignocellulose: inhibitors and detoxification." **Biotechnol. Biofuels** 6 (16), 1e10.

Kaur, U., Oberoi, H.S., Bhargav, V.K., Sharma-Shivappa, R., Dhaliwal, S.S. 2012. "Ethanol production from alkaline and ozone-treated cotton stalks using thermotolerant *Pichia kudriavzevii* HOP-1." **Ind. Crops Prod.** 37 (1), 219 - 226.

Keshwani, D.R. 2009. "Microwave pretreatment of switchgrass for bioethanol production." Thesis Dissertation, North Carolina State University.

Kim, D.H., Kim, S.H., Shin, H.S. 2009. "Hydrogen fermentation of food waste without inoculum addition." **Enzyme Microbiol, Technol.** 45, 181-187.

Kim, T.H., F. Taylor and K.B. Hicks. 2008. "Bioethanol Production from Barley Hull Using SSA (Soaking in Aqueous Ammonia) Pretreatment." **Bioresource Technology**. 99,5694-5702.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม

Kumar S, Singh, S.P., Mishra, I.M. and Adhikari, D.K. 2011. "Continuous ethanol fermentation process for the production of ethanol from lignocellulosic biomass." **Bioresour. Technol.** 122, 100-106.

- production by *Kluyveromyces* sp. IPE453 immobilized on bagasse chips in packed bed reactor.” **Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels**, 2 (1), 1-6.
- Largus TA, Khursheed K, Muthanna HAD, Brian AW, Espinosa RD. 2004. “Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater.” **Trends in Biotechnology**. 22 (9), 477-485.
- Lay, J.J. 2001. “Biohydrogen generation by mesophilic anaerobic fermentation of microcrystalline cellulose.” **Biotechnol, Bioeng**. 74(4), 280–287.
- Lee, J.S., B. Parameswaran., J.P. Lee and S.C. Park. 2008. “Recent Developments of Key Technologies on Cellulosic Ethanol Production.” **Journal of Scientific & Industrial Research**. 67, 865-873.
- Li, D., Chen, H. 2007. “Biological hydrogen production from steam-exploded straw by simultaneous saccharification and fermentation.” **Int. J. Hydrog. Energy** 32, 1742-1748.
- McMillan, J.D. 1994. Pretreatment of lignocellulosic biomass. In: Himmel, M.E., Baker, J. O., Overend, R.P. (Eds.), **Enzymatic Conversion of Biomass for Fuels Production**. American Chemical Society, Washington, DC, 292–324
- Mishima, D., M. Tateda. M. Ike and M. Fujita. 2006. “Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes.” **Bioresour. Technol**. 97(16): 2166-2172.
- Mood, S.H., Golfeshan, A.H., Tabatabaei, M., Jouzani, G.S., Najafi, G.H., Gholami, M., Ardjmand, M. 2013. “Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment.” **Renew. Sustain. Energy Rev**. 27, 77-93.
- Mosier N, Wyman C, Dale B, Elander R, Lee YY, Holtzapple M, Ladisch MR. 2005. “Features of Promising Technologies for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass.” **Bioresource Technology**. 96(6): 673-686.
- Mussatto, S.I., G. Dragone and I.C. Roberto. 2005. “Influence of the toxic compounds present in brewer’s spent grain hemicellulosic hydrolysate on xylose-to-xylitol bioconversion by *Candida guilliermondii*”. **Process Biochemistry**. 40, 3801–3806.
- Nguyen, T.A.D., Han, S.J., Kim, J.P., Kim, M.S., Oh, Y.K., Sim, S.J. 2008. “Hydrogen production by the hyperthermophilic eubacterium, *Thermotoga neapolitana*, using cellulose pretreated by ionic liquid.” **Int. J. Hydrog. Energy** 33, 5161-5168.
- Ntaikou, I., Antonopoulou, G., Lyberatos, G. 2010. “Biohydrogen production from biomass and wastes via dark fermentation: a review.” **Waste Biomass Valoris**. 1, 21-39.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ogbonna, J. C., H. Mashima and H. Tanaka. 2001. "Scale up of fuel ethanol production from sugar beet juice using loofa sponge immobilized bioreactor." **Bioresources Technology**. 76:1-8.
- Palmqvist, E. and Hahn-Hagerdal, B. 2002. "Fermentation of Lignocellulosic Hydrolysates." I: Inhibition and Detoxification. **Bioresource Technology** . 7, 17-24.
- Polprasert C. 1996. **Organic Waste Recycling and Management**. England: John Wiley & Sons.
- Puri, V.P. 1984. "Effect of crystallinity and degree of polymerization of cellulose on enzymatic saccharification." **Biotechnol. Bioeng**. 26 (10), 1219-1222.
- Ragg, P. L. and Fields, P. R. 1987. "The development of a process for the hydrolysis of lignocellulosic waste." **Phil Trans R Soc Lond A321**, 537-547.
- Schultz, T.P., Biermann, C.J., McGinnis, G.D. 1983. "Steam explosion of mixed hardwood chips as a biomass pretreatment." **Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev**. 22 (2), 344 - 348.
- Silverstein, R.A., Chen, Y., Sharma-Shivappa, R.R., Boyette, M.D., Osborne, J. 2007. "A comparison of chemical pre-treatment methods for improving saccharification of cotton stalks." **Bioresource Technology**. 98, 3000-3011.
- Sjostrom, E. 1981. **Wood chemistry fundamentals and applications**. London: Academic press Inc. p 51-70.
- Slininger, P.J., R.J. Bothast, J.E. van Cauwenberge and C.P. Kurtzman. 1982. "Conversion of D-xylose to ethanol by the yeast *Pachysolen tannophilus*." **Biotechnol. Bioeng**. 24, 371-384.
- Sreenath, H.K., R.G. Koegel., A.B. Moldes., T.W. Jeffrie and R.J. Straub. 2001. "Ethanol Production from Alfalfa Fiber Fraction by Saccharification and Fermentation." **Proc. Biochem**. 36, 1199-1204.
- Stams AJM, Plugge CM, de Bok FAM, van Houten BHGW, Lens P, Dijkman H & Weijma J. 2005. "Metabolic interactions in methanogenic and sulfate-reducing bioreactors." **Water Sci Technol** 52: 13–20.
- Sterling Jr., Lacey, R.E., Engler, C.R. and Ricke, S.C. 2001. "Effects of ammonia nitrogen on H. and CH<sub>4</sub> Production during anaerobic digestion of dairy cattle manure." **Bioresource Technology**. 77: 9-18
- Sun, Y. and Cheng, J. 2002. "Hydrolysis of lignocellulosic materials for bioethanol production: review." **Bioresource Technology**. 83, 1-11.
- Taherzadeh, M.J., Karimi, K. 2008. "Pretreatment of lignocelluloses wastes to improve ethanol and biogas production: a review." **Int. J. Mol. Sci**. 9, 1621-1651.
- Teli, A., Ficara, E., Malpei, F. 2014. "Bio-hydrogen production from cheese whey by dark fermentation." **Chem. Eng. Trans**. 37, 613-618.

- Vidal, P.F., Molinier, J. 1988. "Ozonolysis of lignin-Improvement of in vitro digestibility of poplar sawdust." **Biomass** 16 (1), 1 - 17.
- Visva Bharati Barua, Ajay S. Kalamdhad. 2017. "Effect of various types of thermal pretreatment techniques on the hydrolysis, compositional analysis and characterization of water hyacinth." **Bioresource Technology**, 227:147-154.
- Wang, Z., Zhu, J.Y., Fu, Y., Qin, M., Shao, Z., Jiang, J., Yang, F. 2013. "Lignosulfonate mediated cellulase adsorption: enhanced enzymatic saccharification of lignocelluloses through weakening nonproductive binding to lignin." **Biotechnol. Biofuels** 6, 156.
- Wen, C., Huang, X., and Gian, Y. 1999. "Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration." **Process Biochemistry**. (35): 335-340.
- Wright JD. 1998. "Ethanol from biomass by enzymatic hydrolysis." **Chem Eng Prog.** 84, 62-74.
- Xiao, B.Y., Liu, J.X. 2006. "Effects of thermally pretreated temperature on biohydrogen production from sewage sludge." **J. Environ. Sci.** 18 (1), 6-12.
- Yachmenev, V., Condon, B., Klasson, T. and Lambert, A. 2009. "Acceleration of enzymatic hydrolysis of corn stover and sugar cane bagasse by low intensity uniform ultrasound." **J. Biobased Mater. Bioenergy.** 3, 25-31
- Yang, S.S., Guo, W.Q., Cao, G.L., Zheng, H.S., Ren, N.Q. 2012. "Simultaneous waste activated sludge disintegration and biological hydrogen production using anozone/ultrasound pretreatment." **Bioresour. Technol.** 124, 347 - 354.
- Yilmazer, G., and Yenigum, O. 1999. "Two-phase anaerobic treatment of cheese whey." **Water Science and Technology.** 40 (1): 289-295.
- Yoshiharu N, Paul L, Henri C. 2002. "Crystal Structure and Hydrogen-Bonding System in Cellulose I $\alpha$  from Synchrotron X-ray and Neutron Fiber Diffraction." **Journal of American Chemistry Society.** 124 (31), 9074-9082.
- Zhang, B., Shahbazi, A. 2011. "Recent developments in pretreatment technologies for production of lignocellulosic biofuels." **J. Pet. Environ. Biotechnol.** 2 (2), 1-8.
- Zheng, Y., Pan, Z., Zhang, R. 2009. "Overview of biomass pretreatment for cellulosic ethanol production." **Int. J. Agric. Biol. Eng.** 2 (3), 51-68.
- Zhu, S., Wu, Y., Yu, Z., Wang, C., Yu, F., Jin, S., Ding, Y., Chi, R., Liao, J. and Zhang, Y. 2006. "Comparison of three microwave / chemical pretreatment process for enzymatic hydrolysis of rice straw." **Biosyt. Eng.** 93, 279-283.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์

การวิเคราะห์ความชื้น ของแข็งทั้งหมด (TS) และ ของแข็งระเหยง่าย (TVS) ในตัวอย่างผักตบชวา

การวิเคราะห์ความชื้น ของแข็งทั้งหมด (TS) และ ของแข็งระเหยง่าย (TVS) ในตัวอย่างผักตบชวา สามารถวิเคราะห์ตามขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมจานระเหยเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ทำซ้ำข้อ 1 จนกระทั่งจานระเหยมีน้ำหนักคงที่หรือน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 4 บันทึกน้ำหนักจานระเหย (D)
3. ชั่งตัวอย่างผักตบชวาประมาณ 1-5 กรัม ลงในจานระเหยบันทึกน้ำหนักรวมของตัวอย่างผักตบชวาและจานระเหยเป็นน้ำหนักก่อนอบ (W1)
4. นำจานระเหยที่มีตัวอย่างผักตบชวาไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักทันทีหลังเย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง
5. ทำซ้ำในข้อ 4 จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 4 บันทึกเป็นน้ำหนักหลังอบ (W2) นำไปคำนวณหาความชื้น และของแข็งทั้งหมด (TS)
6. นำจานระเหยที่มีตัวอย่างผักตบชวาที่อบแล้ว เข้าเตาเผา ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผา เมื่อไม่ร้อนจัดมาก จากนั้นทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นชั่งน้ำหนักทันทีที่เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง และบันทึกน้ำหนัก
7. ทำซ้ำในข้อ 6 จนน้ำหนักคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 4 บันทึกเป็นน้ำหนักหลังเผา (W3)
8. คำนวณหาร้อยละของปริมาณของแข็งระเหยง่าย และของแข็งคงตัว

การวิเคราะห์ความชื้น ของแข็งทั้งหมด (TS) และ ของแข็งระเหยง่าย (TVS) ของตะกอนจุลินทรีย์

การวิเคราะห์ความชื้น ของแข็งทั้งหมด (TS) และ ของแข็งระเหยง่าย (TVS) ตะกอนจุลินทรีย์สามารถวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ตัวอย่างผักตบชวา แต่ใช้ตัวอย่างประมาณ 10 กรัม สามารถวิเคราะห์ตามขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมจานระเหย เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ทำซ้ำข้อ 1 จนกระทั่งจานระเหยมีน้ำหนักคงที่หรือน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 4 บันทึกน้ำหนักจานระเหย (D)
3. ชั่งตะกอนจุลินทรีย์ประมาณ 10 กรัม ลงในจานระเหยบันทึกน้ำหนักรวมของตัวอย่างผักตบชวาและจานระเหยเป็นน้ำหนักก่อนอบ (W1)
4. นำจานระเหยที่มีตะกอนจุลินทรีย์ไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักทันทีหลังเย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง
5. ทำซ้ำในข้อ 4 จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 4 บันทึกเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น

ทั้งน้ำหนักหลังอบ (W2) นำไปคำนวณหาความชื้น และของแข็งทั้งหมด (TS) รังที่มีการนำไปใช้

6. นำจานระเหยที่มีตะกอนจุลินทรีย์ที่อบแล้ว เข้าเตาเผา ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผา เมื่อไม่ร้อนจัดมาก จากนั้นทิ้งให้เย็น ในโถดูดความชื้นชั่งน้ำหนักทันทีที่เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง และบันทึกน้ำหนัก
7. ทำซ้ำในข้อ 6 จนน้ำหนักคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 4 บันทึกเป็นน้ำหนักหลังเผา (W3)
8. คำนวณหาร้อยละของปริมาณของแข็งระเหยง่าย และของแข็งคงตัว

### การคำนวณปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\% \text{ ความชื้น} = \frac{(W1 - W2) \times 100}{(W1 - D)}$$

เมื่อ D = น้ำหนักภาชนะ (กรัม)

W1 = น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)

W2 = น้ำหนักหลังอบ (กรัม)

### การคำนวณปริมาณของแข็งทั้งหมด

ปริมาณของแข็งทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\% \text{ TS} = \frac{(W2 - D) \times 100}{(W1 - D)}$$

### ปริมาณของแข็งระเหยง่าย

ปริมาณของแข็งระเหยง่าย สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ TVS} = \frac{(W2 - W3) \times 100}{(W2 - D)}$$

เมื่อ W2 = น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

W3 = น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปริมาณของแข็งคงตัว

ปริมาณของแข็งคงตัว สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\% \text{ ของแข็งคงตัว} = \frac{(W3-D) \times 100}{(W2-D)}$$

## การวิเคราะห์ COD ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Close Reflux method)

### อุปกรณ์

1. หลอดย่อยน้ำตัวอย่าง (digestion vessel)
2. บิวเรต (burette)
3. ปิเปต (pipette)
4. ตู้อบ (dry oven)
5. ขวดรูปชมพู่

### สารเคมี

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) โดยอบแห้งที่ 150 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมงแล้วทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง (desiccator)
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ )
3. ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ )
4. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ )
5. เฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ )
6. 1-10 phenanthroline monohydrate

### วิธีเตรียมสารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริกเอเจนต์  
เตรียมโดย เติมซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) จำนวน 5.5 กรัม ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ ) 1 กิโลกรัม (หรือ ซิลเวอร์ซัลเฟต 10 กรัม / กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1

### ลิตร

หรือละลาย  $Ag_2SO_4$  24 กรัมลงในกรดซัลฟิวริกขนาด 2.5 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ละลาย)

2. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) 0.034726 M  
เตรียมโดย ชั่งโพแทสเซียมไดโครเมตที่อบแห้งแล้วที่ 150 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง จำนวน 10.216 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.10 M  
เตรียมโดย ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) จำนวน 39.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เย็น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร (สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตนี้  
ต้องทำการตรวจหาความเข้มข้นที่แน่นอนทุกครั้งก่อนนำไปใช้)

4. สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์

เตรียมโดย ละลาย 1-10 phenanthroline monohydrate จำนวน 1.485 กรัม และ  
เฟอร์รัสซัลเฟต( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) จำนวน 695 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตร  
เป็น 100 มิลลิลิตร

5. สารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนพาทาเลตความเข้มข้น 5000 mg/L

ชั่ง KHP จำนวน 4.250 g ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสและทำให้  
เย็นในโถดูดความชื้นแล้วละลายในน้ำกลั่นเจือจางเป็น 1 L สารละลายนี้มีซีไอดีเท่ากับ  
5000 mgO<sub>2</sub>/L หรือมีค่าเท่ากับ 11.76 mgO<sub>2</sub>/mg

วิธีวิเคราะห์

1. ปิเปิดน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดย่อยน้ำตัวอย่าง (digestion vessel) เติม  
สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) 0.034726 M จำนวน 6  
มิลลิลิตร จากนั้นค่อยๆเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเอเจนต์ จำนวน 14 มิลลิลิตร  
ลงไปหลอด (สำหรับอัตราส่วน น้ำตัวอย่างต่อปริมาตรสารเคมี จะขึ้นอยู่กับขนาด  
ของหลอดที่ใช้)
2. ทำการปิดฝาหลอดให้แน่นทันทีหลังเติมกรด เพื่อป้องกันไอกรดระเหยจากหลอด และ  
ทำการผสมตัวอย่างกับสารเคมีให้เข้ากันโดยกลับหลอดสองสามครั้ง จากนั้นนำหลอด  
ใส่ใน rack แล้วนำเข้าตู้อบ (dry oven) ที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. เมื่อครบ 2 ชั่วโมงแล้วให้น้ำ rack ออกจากตู้อบ ทิ้งให้เย็น แล้วเทตัวอย่างลงในขวดรูป  
ชมพู่ นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.10 M  
โดยใช้เฟอร์โรอินเป็นอินดิเคเตอร์ ที่จุดยุติ (end point) จะเปลี่ยนจากสีเขียวแกมน้ำ  
เงินเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

วิธีการทำแบล็งค์ (blank)

- เตรียมแบล็งค์เหมือนกับตัวอย่างทุกประการเพียงแต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่าง

วิธีการตรวจสอบหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต  
(FAS) (standardization)

ปิเปิดสารมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำกลั่น  
10 มิลลิลิตร และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 14 มิลลิลิตร (เตรียมเหมือนกับตัวอย่างทุกประการ เพียงแต่ใช้  
น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างและไม่ต้องนำเข้าตู้อบ) จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น หยดเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด  
แล้วนำมาไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.10 M  
คำนวณความเข้มข้นของ FAS จากสูตร

Molarity of FAS solution =

$$\frac{\text{ml } K_2Cr_2O_7 \times N \text{ ของ } K_2Cr_2O_7}{\text{ml FAS}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

COD (mg O<sub>2</sub>/l) =

$$\frac{(A - B) \times M \times 8000}{ml \text{ ตัวอย่าง}}$$

### การวิเคราะห์กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

ด้วยวิธี Direct titration method

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องหมุนเหวี่ยง
2. ขวดเจลดาทาล
3. เม็ดแก้ว
4. กระบอกตวงขนาด 50 มิลลิลิตร
5. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
6. บิวเรต

สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1+1)
2. น้ำยามาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์
3. ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์
4. กรดแอสติค 2000 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

วิธีเตรียมสาร

1. กรดแอสติค 2000 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร  
โดยละลายกรดแอสติคเข้มข้น 1.9 มิลลิลิตรในน้ำกลั่นแล้วทำให้เป็น 1 ลิตร ไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N  
ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
3. การเตรียม H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(1+1)  
ตวง H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 25 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร
4. Potassium hydrogen phthalate solution 0.05N  
นำ Potassium hydrogen phthalate 15 กรัม อบที่ 120 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งประมาณ 10±0.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับเป็น 1 ลิตร

วิธีการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์

นำสารละลาย Potassium hydrogen phthalate solution 0.05N 40 มิลลิลิตร ใส่

ขวดรูปชมพู่จากนั้นใส่ ฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด นำไปไทเทรต 0.1N NaOH จนเป็นสีชมพูอ่อน

คำนวณหาความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ไม่ว่ากรณีใดๆ หงสน อักทงหามมเหตุดแบล้งเนอหหาและตอองอั่งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั่งที่ม่การนำปะใช้

Normality NaOH =

$$\frac{\text{ml สารละลาย NaOH} \times 60000 \times N \text{ ของ NaOH}}{\text{ml ตัวอย่างน้ำ} \times f}$$

A= กรัมของ

Potassium

hydrogen phthalate solution

B= ml ของ Potassium hydrogen phthalate solution

C= ml ของ NaOH

### วิธีวิเคราะห์

- นำตัวอย่างน้ำเหวี่ยงในเครื่องหมุนเหวี่ยง 3500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที ตวงใส่ขวดเจลดาทาล 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร ใส่เม็ดแก้ว 3-4 เม็ด (หรือวัสดุซึ่งคล้ายกัน เช่น clay chips) เพื่อป้องกันการเดือดพุ่ง แล้วเติม  $\text{H}_2\text{SO}_4(1+1)$  5 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากันเพื่อให้กรดกระจายโดยทั่วถึง แล้วนำไปต่อเข้ากับเครื่องกลั่น
- กลั่นด้วยอัตรา 5 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บส่วนที่กลั่นได้ 150 มิลลิลิตร มาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟธาลินเป็นอินดิเคเตอร์ การไทเทรตถ้าทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 95 องศาเซลเซียส เมื่อถึงจุดยุติจะได้สีชมพูอ่อน

วิธีหาค่ารีโคเวอริแฟกเตอร์ (Recovery factor)

นำแอสติคที่เตรียมไว้ 100 มิลลิลิตรใส่ในขวดเจลดาทาล แล้วเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร นำไปกลั่นแล้วไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.1 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์(a)

นำแอสติคที่เตรียมไว้ 100 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.1 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์(b)

คำนวณหารีโคเวอริแฟกเตอร์(f)

$$f = \frac{a}{b}$$

โดยที่ a = ความเข้มข้นกรดแอสติคที่กลั่น

b = ความเข้มข้นกรดแอสติคก่อนกลั่น

การคำนวณกรดระเหยง่าย(คิดในรูปของกรดแอสติค มก/ลบ.ตม)

กรดระเหย =

$$\frac{A \times B}{204.2 \times C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์หากรดอินทรีย์ระเหยง่าย

ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องเซนติพีวจ์
2. เครื่องกลั่น
3. เครื่องวัดพีเอช

การทดลอง

1. นำตัวอย่างที่เป็นของเหลวมากรองด้วยฟิลเตอร์ขนาด 0.45 ไมครอน เก็บใส่ภาชนะเพื่อเตรียมไปวิเคราะห์โดยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี
2. นำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟียี่ห้อ SHIMADZU รุ่น Nexis GC-2030 คอลัมน์ DB-624 ยี่ห้อ Agilent Technologies โดยมีสถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

อุณหภูมิของคอลัมน์ (Column Temperature) = 80 – 200 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของหัวฉีด (Injection Temperature) = 240 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของเครื่องตรวจจับ (Detector Temperature) = 240 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (Carrier gas flow) = 24 มิลลิลิตรต่อนาที

Detector = FID Detector

Carrier gas = Helium

## การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ซึ่งปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ได้นั้นเป็นผลรวมของแอมโมเนีย ไนโตรเจน และอินทรีย์ไนโตรเจน มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

การเตรียมเครื่องมือหรือการกลั่นล้างเครื่องมือ

เติมน้ำปราศจากแอมโมเนีย 300 มิลลิลิตร ลงในขวดเจตาห์ล เพื่อทำการกลั่นล้างเครื่องมือการย่อยตัวอย่าง

1) ใส่ตัวอย่างผู้ذبขวา 0.1 กรัม ละเติมน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตรลงในขวดเจตาห์ลที่ผ่านการกลั่นล้างแล้ว จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำสารละลายสำหรับย่อยสลาย (50 มิลลิลิตรละลายใส่เศษ กระเบื้อง 3-4 ชิ้น ผสมตัวอย่างให้เข้ากัน

2) ต้มเคี่ยวตัวอย่างจนมีปริมาตรเหลือประมาณ 25 มิลลิลิตร จนสังเกตเห็นควันสีขาว ปรากฏขึ้น (หากตัวอย่างมีสารอินทรีย์อยู่สูง ควันจะเป็นสีดำ) หลังจากนั้นให้ต้มต่อไปอีกประมาณ 30 นาที ขณะที่ทำการย่อยสลายตัวอย่างไปเรื่อยๆ ตัวอย่างที่มีความขุ่นหรือมีสีจะเปลี่ยนเป็นสารละลายใส หรือมีสีฟางซีดๆ

3) เติมน้ำกลั่นปราศจากแอมโมเนียลงไป 75-100 มิลลิลิตร แกว่งขวดเจตาห์ลให้ สารละลายผสมกัน

4) จากนั้นหยดฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด แกว่งขวดเจตาห์ลให้สารละลายผสมกัน เอียง ขวดเจตาห์ลและ ค่อยๆ เติมน้ำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไฮโอซัลเฟต 50 มิลลิลิตร เพื่อให้เกิดชั้นของค่างที่กั้นขวด

เอกสาร 6) ต่อขวดกับเครื่องกลั่น และแกว่งขวดให้สารละลายผสมกันอย่างสมบูรณ์ นำหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกลั่น

1) ใช้สารละลายอินดิเคน บอริกแอซิด จำนวน 50 มิลลิตร ซึ่งอยู่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิตร ต่อเข้ากับปลายของชุดกลั่นเพื่อเก็บของเหลวที่กลั่นได้ โดยควบคุมอัตราการกลั่นให้อยู่ ระหว่าง 6-10 มิลลิตรต่อนาที

2) เก็บส่วนที่กลั่นออกมาจนได้ปริมาตรทั้งหมดเป็น 200 มิลลิตร แล้วจึงตึงปลาย หลอดชุดกลั่นให้ พันผิวสารละลาย ทำการกลั่นต่อประมาณ 2 นาที เพื่อทำความสะอาดคอนเดนเซอร์ และหลอดชุด กลั่น

3) นำส่วนที่กลั่นได้นี้ไปหาปริมาณไนโตรเจนโดยการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน กรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มอล เมื่อถึงจุดยุติจะได้สีม่วงอ่อน

4) นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

การความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก

กรณีที่ใช้สารละลายกรดมาตรฐาน 0.1 นอร์มอล ใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต C05 0.05 นอร์ มอล ปริมาตร 40 มิลลิตร กรณีที่ใช้สารละลายมาตรฐาน 0.02 นอร์มอล ใช้ สารละลายโซเดียม คาร์บอเนต 15 มิลลิตร ทำการไทเทรตโดยวิธี Potentiome titration โดยใช้ สารละลายกรด มาตรฐานเป็นไทเตรนต์ ไทเทรตจนพีเอชประมาณ 5 ยกอิเล็คโทรสขึ้นล่างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นต้มไล่ คาร์บอนไดออกไซด์โดยปิดบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟิวส์ขึ้นเล็กน้อย ต้มให้เดือด ค่อยๆ ประมาณ 3 - 5 นาที ทิ้งให้เย็นทำการไทเทรตต่อจนถึงจุดสมมูลที่พีเอช 4.2 สามารถคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริกจากสมการ

$$\text{ความเข้มข้นของ } \text{H}_2\text{SO}_4 = \frac{A \times B}{53 \times C}$$

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมด} = \frac{(A-B) \times N \times 14 \times 1000}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง } g} \times 100$$

A = ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับตัวอย่าง (mL)

B = ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับแบลงค์ (mL)

N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก

### การหาปริมาณฟอสฟอรัสและฟอสเฟต

การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดจะใช้วิธีการย่อยด้วยกรดผสม ระหว่างกรดซัลฟิวริกและ กรดไนตริก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเตรียมกราฟมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต จำนวน 10 20 30 และ 40 มิลลิลิตร ใส่ลงใน ขวดรูปชมพู่ เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรประมาณ 50 มิลลิลิตร ชุดสารละลายมาตรฐานนี้มีความ เข้มข้น 0.50 1.00 1.50 2.00 ไมโครกรัม กรมฟอสฟอรัสต่อลิตร.ตามลำดับ
2. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร และกรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร
3. ใส่เม็ดแก้วลงไป 3-5 เม็ด
4. ต้มสารละลายบนเตาให้ความร้อน ให้มีปริมาตรเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร
5. ต้มต่อไปอย่างระมัดระวัง จนได้สารละลายไม่มีสี (สังเกตระดับสารละลายอยู่ที่ระดับ ครึ่งเม็ดแก้ว) ทิ้งให้เย็น
6. เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ลงไปในสารละลาย
7. หยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 1 หยด
8. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6 นอร์มอล ที่ละหยด หรือสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 นอร์มอล หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นน้อยกว่า 1 นอร์มอล จน สารละลายมีสีชมพูอ่อนๆ
9. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับ ปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
10. เทสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตแต่ละความเข้มข้น ลงในขวด รูปชมพู่ จากนั้นให้ เติมน้ำยารวม จำนวน 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดสีอย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที นำไป วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร
11. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้กับความเข้มข้นด้วยวิธี Linear regression หรือผู้วิเคราะห์อาจหาความสัมพันธ์จากเครื่องวัดการดูดกลืนแสงโดยตรงก็ได้

#### การวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 1) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างผักตบชวา 10.0 มิลลิกรัม และเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ใส่ ลงในขวดรูปชมพู่
  - 2) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร และกรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร
  - 3) ใส่เม็ดแก้วลงไป 3 - 5 เม็ด
  - 4) ต้มสารละลายบนเตาให้ความร้อน ให้มีปริมาตรเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร และทำการ ต้มต่อไป อย่างระมัดระวัง จนได้สารละลายไม่มีสี (สังเกตระดับสารละลายอยู่ที่ระดับครึ่งเม็ดแก้ว) ทิ้ง ให้เย็น
  - 5) เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ลงไปในสารละลาย
  - 6) หยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 1 หยด
  - 7) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6 นอร์มอล ที่ละหยด หรือสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 นอร์มอล หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นน้อยกว่า 1 นอร์มอล จน สารละลายมีสีชมพูอ่อนๆ
  - 8) กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับ ปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
  - 9) ปิเปตตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการย่อยและปรับปริมาตรแล้ว จำนวน 25 มิลลิลิตร ลง ในขวดรูป ชมพู่ จากนั้นให้เติมน้ำยารวม จำนวน 4 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดสีอย่าง น้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความ คลื่น 880 นาโนเมตร
- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10) บันทึกค่าความเข้มข้นที่วัดได้ หรือนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในตัวอย่างจากกราฟมาตรฐานที่ได้เตรียมไว้ ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการนี้

ฟอสฟอรัสทั้งหมด =

$$\frac{\text{ความเข้มข้นที่คำนวณได้ (us) x 100}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง (g)}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลดิบแสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฝักตบชวา

ครั้งที่	%ความชื้น	%ของแข็งทั้งหมด	%ของแข็งระเหยง่าย	%ของแข็งคงตัว	%TKN	%TP
1	7.54	92.46	84.24	15.76	2.06	0.30
2	7.60	92.40	84.38	15.62	1.99	0.29
3	7.79	92.59	84.46	15.54	1.73	0.18
เฉลี่ย	7.53	92.47	84.36	15.64	1.93	0.26
SD	0.07	0.07	0.11	0.11	0.17	0.06

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลดิบแสดงค่า COD ฝักตบชวา

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ฝักตบชวาถุงที่ 1	0.85	0.87	0.93	0.88	0.04
ฝักตบชวาถุงที่ 2	0.79	0.90	0.97	0.89	0.09
ฝักตบชวาถุงที่ 3	0.92	0.88	0.96	0.92	0.04

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลดิบแสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนจุลินทรีย์

ตัวอย่าง	ครั้งที่	% ความชื้น	% ความชื้น เฉลี่ย	SD	% ของแข็ง ทั้งหมด	% ของแข็ง ทั้งหมด เฉลี่ย	SD	%ของแข็ง ระเหยง่าย	% ของแข็ง ระเหย ง่ายเฉลี่ย	SD	% ของแข็ง คงตัว	%ของแข็ง คงตัวเฉลี่ย	SD
ตะกอน จุลินทรีย์ แบบแห้ง	1	89.39	89.43	0.06	10.61	10.57	0.06	84.10	83.55	0.77	15.90	16.45	0.77
	2	89.48			10.52			83.00			17.00		
ตัวอย่าง	ครั้งที่	ความชื้น (กรัม/ มิลลิตร)	ความชื้นเฉลี่ย (กรัม/ มิลลิตร)	ของแข็ง ทั้งหมด (กรัม/ มิลลิตร)	ของแข็งทั้งหมด เฉลี่ย(กรัม/ มิลลิตร)	ของแข็ง ระเหยง่าย (กรัม/ มิลลิตร)	SD	ของแข็ง ระเหย ง่ายเฉลี่ย (กรัม/ มิลลิตร)	SD	ของแข็ง คงตัว (กรัม/ มิลลิตร)	ของแข็งคง ตัวเฉลี่ย (กรัม/ มิลลิตร)	SD	
ตะกอน จุลินทรีย์ แบบเปียก	1	-	-	-	-	5.16	0.36	3.02	0.24	2.76	0.24		
	2	-	-	-	-	4.46		4.84		2.69			
	3	-	-	-	-	4.91		2.56					

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ค่า COD ก่อนเดินระบบ

ชุดการทดลอง	ครั้งที่	Control	อัตราส่วน			
			1:10	1:20	1:30	1:40
ชุดที่ 1	1	3627	5538	6084	6396	6162
	2	3471	5733	6123	6084	5967
	3	3523	5616	6123	6175	6123
	เฉลี่ย	3523	5629	6110	6175	6084
	SD	90.07	98.15	22.52	192.38	103.18
ชุดที่ 2	1	2964	5733	5928	5733	6240
	2	2925	5772	5889	5694	6318
	3	3003	5694	5889	5694	6318
	เฉลี่ย	2964	5733	5902	5707	6292
	SD	39.00	39.00	22.52	22.52	45.03
ชุดที่ 3	1	2262	3900	3120	5031	3432
	2	2340	3822	3081	5070	3588
	3	2496	3978	3081	-	3492
	เฉลี่ย	2366	3900	3094	5050.50	3504
	SD	119.15	78.00	22.52	27.85	78.69

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ค่า COD หลังหมักไฮโดรเจน

ชุดการทดลอง	ครั้งที่	Control	อัตราส่วน			
			1:10	1:20	1:30	1:40
ชุดที่ 1	1	4251	4992	5109	5538	5265
	2	3510	5109	5148	5577	5343
	3	3588	5070	5265	5577	5421
	เฉลี่ย	3783	5057	5174	5564	5343
	SD	407.18	59.57	81.18	22.52	78.00
ชุดที่ 2	1	3309.6	5831.2	5122	5122	5516
	2	3270.2	5910	5161.4	5279.6	5673.6
	3	3546	5910	5122	5200.8	5516
	เฉลี่ย	3375.27	5883.73	5135.13	5200.8	5568.53
	SD	149.12	45.50	22.75	78.80	90.99
ชุดที่ 3	1	2994.4	4964.4	5319	5003.8	4964.4
	2	3152	5200.8	5437.2	5082.6	5003.8
	3	2836.8	5161.4	5397.8	5122	4925
	เฉลี่ย	2994.4	5108.87	5384.67	5069.47	4964.4
	SD	157.60	126.65	60.18	60.18	39.40

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ค่า COD หลังหมักมีเทน

ชุดการทดลอง	ครั้งที่	Control	อัตราส่วน			
			1:10	1:20	1:30	1:40
ชุดที่ 1	1	954.6	1733.6	2245.8	2876.2	7958.8
	2	1300.2	1694.2	2167	2797.4	7919.4
	3	866.8	1654.8	2206.4	2836.8	7958.8
	เฉลี่ย	1037.53	1694.2	2206.4	2836.8	7945.67
	SD	230.86	39.4	39.4	39.4	22.75
ชุดที่ 2	1	590.4	1889.3	2243.52	2597.76	3306.24
	2	708.48	1889.3	2164.8	2597.76	3227.52
	3	905.28	1889.3	2243.52	2558.4	3227.52
	เฉลี่ย	734.72	1889.3	2217.28	2584.64	3253.76
	SD	159.07	0	45.45	22.72	45.45
ชุดที่ 3	1	1023.4	2164.8	2715.84	2794.56	2873.28
	2	1023.4	2046.72	2715.84	2794.56	2912.64
	3	1023.4	2086.08	2715.84	2715.84	3070.08
	เฉลี่ย	1023.4	2099.2	2715.84	2786.32	2952
	SD	0	60.12	0	45.45	104.14

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ค่า VFA

ชุดการทดลอง	ครั้งที่	Control	Control เฉลี่ย	อัตราส่วน							
				1:10	1:10เฉลี่ย	1:20	1:20 เฉลี่ย	1:30	1:30เฉลี่ย	1:40	1:40เฉลี่ย
หลังหมักไฮโดรเจน	1	1601.92	1530.43	2117.48	2319.97	1933.35	2083.16	2227.96	2131.64	1427	1784.48
	2	1969.06		3294.39		2776.88		2574.93		2739.01	
	3	1020.3		1548.04		1539.24		1592.02		1187.42	
หลังหมักมีเทน	1	145.06	116.62	332.77	284.42	324.24	310.02	554.62	509.12	7798.86	6299.96
	2	85.33		315.7		290.11		435.17		5512.11	
	3	119.46		204.78		315.71		537.56		5588.9	

ตารางที่ ข-8 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตรที่เกิด (mL)	ปริมาตรสะสม(mL)	ปริมาตรที่เกิด (mL)	ปริมาตรสะสม(mL)	ปริมาตรที่เกิด (mL)	ปริมาตรสะสม(mL)	ปริมาตรที่เกิด (mL)	ปริมาตรสะสม(mL)	ปริมาตรที่เกิด (mL)	ปริมาตรสะสม(mL)
0	1	0	00.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	2	0	00.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	3	0	00.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00

ตารางที่ ข-8 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
24	1	49	49.00	104	104.00	106	106.00	11	11.00	52	52.00
	2	22	22.00	21	21.00	94	94.00	81	81.00	86	86.00
	3	0	0.00	21	21.00	13	13.00	30	30.00	20	20.00
48	1	6	55.00	178	282.00	214	320.00	226	237.00	243	295.00
	2	18	40.00	0	21.00	14	108.00	48	129.00	5	91.00
	3	0	0.00	10	31.00	13	26.00	45	75.00	58	78.00
72	1	0	55.00	32	314.00	30	350.00	58	295.00	69	364.00
	2	0	40.00	0	21.00	0	108.00	-	-	-	-
	3	0	0.00	0	31.00	12	38.00	32	107.00	45	123.00
96	1	0	55.00	22	336.00	16	366.00	39	334.00	64	428.00
	2	0	40.00	0	21.00	0	108.00	35	164.00	12	103.00
	3	0	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-
120	1	0	55.00	0	336.00	-	-	0	334.00	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	0	0.00	-	-	-	-	-	-	44	167.00

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-8 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
144	1	0	55.00	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
168	1	0	55.00	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	0	0.00	0	31.00	0	38.00	0	107.00	0	167.00
192	1	0	55.00	0	336.00	0	366.00	-	-	0	428.00
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
216	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	0	40.00	0	21.00	0	108.00	0	164.00	0	103.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
240	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-8 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
264	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
288	1	0	55.00	-	-	-	-	0	334.00	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 1

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.20	7577.00	12.64	6.19	6.19	226.96	1.01	0.50	0.50
43.22	7577.00	12.64	0.76	6.95	226.96	1.01	0.06	0.56
62.07	7577.00	12.64	0.00	6.95	226.96	1.01	0.00	0.56
95.43	7577.00	12.64	0.00	6.95	226.96	1.01	0.00	0.56
119.43	7577.00	12.64	0.00	6.95	226.96	1.01	0.00	0.56
143.90	7577.00	12.64	0.00	6.95	226.96	1.01	0.00	0.56
167.50	7577.00	12.64	0.00	6.95	226.96	1.01	0.00	0.56
190.88	7577.00	12.64	0.00	6.95	226.96	1.01	0.00	0.56
286.62	613.97	0.79	0.00	6.95	0.00	0.00	0.00	0.00
ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.27	3634.07	4.50	0.99	0.99	296.13	1.05	0.23	0.23
34.55	1217.90	1.51	0.27	1.26	205.57	0.73	0.13	0.36
58.42	0.00	0.00	0.00	1.26	0.00	0.00	0.00	0.36
82.52	0.00	0.00	0.00	1.26	0.00	0.00	0.00	0.36
209.08	159.77	0.20	0.00	1.26	146.80	0.52	0.00	0.36

ตารางที่ ข-10 ข้อมูล  
ดิบการวิเคราะห์ก๊าซ  
ไฮโดรเจนชีวภาพชุด  
ควบคุม ครั้งที่ 2

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 3

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
--------------	--------------------------	-----------------	------------------------	--------------------------------	---------------------------	-------------------	-------------------------	---------------------------------

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
49.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
73.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
97.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
527.57	7.70	0.01	0.00	0.00	331.53	1.16	0.00	0.00

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 1

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.03	18406.85	32.91	34.23	34.23	0.00	0.00	0.00	0.00
26.25	38040.00	48.76	59.49	93.72	1169.60	5.01	6.12	6.12
43.68	37486.78	48.05	26.91	120.62	0.00	0.00	0.00	6.12
49.87	29553.23	37.88	12.12	132.75	0.00	0.00	0.00	6.12
73.25	31673.20	39.11	8.60	141.35	345.90	1.36	0.30	6.42
92.08	31673.20	39.11	0.00	141.35	345.90	1.36	0.00	6.42
169.25	18343.60	22.65	0.00	141.35	0.00	0.00	0.00	6.42

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 2

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.28	533.50	0.66	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
34.62	36427.67	45.15	6.77	6.81	0.00	0.00	0.00	0.00
58.42	0.00	0.00	0.00	6.81	0.00	0.00	0.00	0.00
82.52	0.00	0.00	0.00	6.81	0.00	0.00	0.00	0.00
209.25	651.07	0.81	0.00	6.81	29.50	0.10	0.00	0.00

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 2

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.92	32042.13	39.59	8.31	8.31	240.67	0.82	0.17	0.17
48.87	35175.76	43.46	4.35	12.66	495.76	1.70	0.17	0.34
146.50	855.93	1.10	0.00	12.66	10.83	0.04	0.00	0.34

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 1

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26.05	30962.06	39.69	42.07	42.07	82.63	0.35	0.38	0.38
43.37	39371.30	50.47	61.57	103.64	0.00	0.00	0.00	0.38
49.68	35408.78	45.39	41.76	145.40	0.00	0.00	0.00	0.38
73.02	35156.83	43.41	13.02	158.42	86.63	0.36	0.11	0.48
91.88	17754.87	21.92	3.51	161.92	0.00	0.00	0.00	0.48
169.17	26484.07	32.70	0.00	161.92	0.00	0.00	0.00	0.48

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 2

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.07	262.27	0.33	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
34.38	23526.97	29.16	21.58	21.64	0.00	0.00	0.00	0.00
58.17	35347.07	43.81	6.13	27.78	0.00	0.00	0.00	0.00
82.27	0.00	0.00	0.00	27.78	0.00	0.00	0.00	0.00
208.85	815.23	1.01	0.00	27.78	10.07	0.04	0.0001	0.0001

ตารางที่ ข-17 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 3

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.72	28044.03	34.65	4.50	4.50	110.96	0.38	0.05	0.05
48.65	36368.26	44.93	5.84	10.35	55.68	0.19	0.02	0.07
66.55	32779.66	42.18	5.06	15.41	0.00	0.00	0.00	0.07
146.40	830.63	1.07	0.00	15.41	10.83	0.04	0.00	0.07

ตารางที่ ข-18 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 1

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.10	300.83	0.50	0.06	0.06	43.75	0.20	0.02	0.02
44.03	23411.53	39.07	66.02	66.08	0.00	0.00	0.00	0.02
47.37	14800.60	24.70	14.08	80.15	0.00	0.00	0.00	0.02
62.93	18245.63	30.45	17.66	97.81	0.00	0.00	0.00	0.02
73.80	18721.66	31.24	6.56	104.37	0.00	0.00	0.00	0.02
96.28	22977.76	38.34	6.90	111.28	0.00	0.00	0.00	0.02
288.02	7706.36	9.51	0.00	111.28	0.00	0.00	0.00	0.02

ตารางที่ ข-19 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 2

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.85	56.40	0.07	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
34.18	37850.40	46.91	21.58	21.61	0.00	0.00	0.00	0.00
58.00	42041.73	52.11	25.01	46.62	0.00	0.00	0.00	0.00
82.02	39424.20	48.87	17.10	63.72	0.00	0.00	0.00	0.00
209.07	496.67	0.62	0.00	63.72	8.00	0.03	0.00	0.00

ตารางที่ ข-20 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 3

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.52	2948.06	3.64	1.09	1.09	32.90	0.11	0.03	0.03
48.45	36025.70	44.51	20.03	21.12	0.00	0.00	0.00	0.03
66.30	38175.43	49.12	15.72	36.84	0.00	0.00	0.00	0.03
146.42	22168.06	28.53	0.00	36.84	0.00	0.00	0.00	0.03

ตารางที่ ข-21 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 1

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25.82	7606.90	9.75	5.07	5.07	73.93	0.32	0.16	0.16
43.07	29360.83	37.64	50.43	55.50	0.00	0.00	0.00	0.16
49.42	29649.60	38.01	41.43	96.93	0.00	0.00	0.00	0.16
72.78	30084.90	37.14	25.63	122.56	117.97	0.49	0.34	0.50
91.58	26864.77	33.17	21.23	143.79	0.00	0.00	0.00	0.50
169.28	19948.33	24.63	0.00	143.79	0.00	0.00	0.00	0.50

ตารางที่ ข-22 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 2

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.62	24.90	0.03	0.0040	0.00	4.97	0.02	0.0023	0.0023
33.95	27604.33	34.22	24.98	24.98	0.00	0.00	0.0000	0.0023
57.80	24176.40	29.97	1.50	26.48	0.00	0.00	0.0000	0.0023
81.78	32222.27	39.94	4.79	31.27	0.00	0.00	0.0000	0.0023
208.98	6509.90	8.10	0.00	31.27	0.00	0.00	0.0000	0.0023

ตารางที่ ข-23 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 3

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.30	307.20	1.05	0.21	0.21	17.56	0.06	0.01	0.01
48.23	29873.16	102.35	59.36	59.57	0.00	0.00	0.00	0.01
66.07	30201.85	105.89	47.65	107.22	0.00	0.00	0.00	0.01
96.23	32455.90	113.79	50.07	157.29	353.03	1.24	0.54	0.56
146.17	3486.06	4.49	0.00	157.29	17.10	0.06	0.00	0.56

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตรที่เกิด (mL)	ปริมาตรสะสม(mL)	ปริมาตรที่เกิด (mL)	ปริมาตรสะสม(mL)	ปริมาตรที่เกิด (mL)	ปริมาตรสะสม(mL)	ปริมาตรที่เกิด (mL)	ปริมาตรสะสม(mL)	ปริมาตรที่เกิด (mL)	ปริมาตรสะสม(mL)
0	1	0	00.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	2	0	00.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	3	0	00.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
24	1	174	174.00	91	91.00	160	160.00	142	142.00	35	35.00
	2	53	53.00	59	59.00	90	90.00	31	31.00	49	49.00
	3	-	-	184	184.00	184	184.00	137	137.00	178	178.00
48	1	150	324.00	107	198.00	103	263.00	100	242.00	47	82.00
	2	53	106.00	42	101.00	86	176.00	32	63.00	0	49.00
	3	22	22.00	177	361.00	100	284.00	136	273.00	90	268.00
72	1	182	506.00	81	279.00	37	300.00	90	332.00	38	120.00
	2	54	160	64	165.00	81	257.00	32	95.00	44	93.00
	3	20	42.00	200	561.00	111	395.00	131	404.00	110	378.00
96	1	143	649.00	90	369.00	39	339.00	97	429.00	15	135.00
	2	56	216.00	71	236.00	95	352.00	35	130.00	44	137.00
	3	6	48.00	124	685.00	143	538.00	141	545.00	139	517.00
120	1	133	782.00	81	450.00	39	378.00	104	533.00	20	155.00
	2	56	272.00	31	267.00	85	437.00	35	165.00	47	184.00
	3	3	51.00	128	813.00	119	657.00	155	700.00	142	659.00

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
144	1	135	917.00	76	526.00	42	420.00	127	660.00	19	174.00
	2	62	334.00	34	301.00	88	525.00	35	200.00	47	231.00
	3	7	58.00	121	934.00	103	760.00	149	849.00	133	792.00
168	1	122	1039.00	95	621.00	56	476.00	145	805.00	52	226.00
	2	58	392.00	31	332.00	47	572.00	34	234.00	46	277.00
	3	7	65.00	119	1053.00	89	849.00	76	925.00	118	910.00
192	1	106	1145.00	71	692.00	43	519.00	93	898.00	64	290.00
	2	58	450.00	33	365.00	46	618.00	34	268.00	44	321.00
	3	7	72.00	92	1145.00	82	931.00	78	1003.00	126	1036.00
216	1	105	1250.00	67	759.00	45	564.00	100	998.00	62	352.00
	2	58	508.00	30	395.00	42	660.00	33	301.00	42	363.00
	3	8	80.00	90	1235.00	86	1017.00	74	1077.00	79	1115.00
240	1	99	1349.00	53	812.00	40	604.00	103	1101.00	44	396.00
	2	60	568.00	33	428.00	46	706.00	36	337.00	43	406.00
	3	7	87.00	90	1325.00	75	1092.00	44	1121.00	50	1165.00

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
264	1	136	1485.00	49	861.00	40	644.00	103	1204.00	36	432.00
	2	64	632.00	33	461.00	49	755.00	37	374.00	44	450.00
	3	4	91.00	65	1390.00	65	1157.00	52	1173.00	51	1216.00
288	1	89	1574.00	49	910.00	44	688.00	108	1312.00	37	469.00
	2	63	695.00	34	495.00	45	800.00	38	412.00	43	493.00
	3	-	-	73	1463.00	49	1206.00	57	1230.00	51	1267.00
312	1	76	1650.00	45	955.00	37	725.00	99	1411.00	36	505.00
	2	59	754.00	32	517.00	44	844.00	35	447.00	44	537.00
	3	-	-	66	1529.00	48	1254.00	49	1279.00	48	1315.00
336	1	73	1723.00	48	1003.00	38	763.00	104	1515.00	35	540.00
	2	58	812.00	18	535.00	46	890.00	36	483.00	46	583.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
360	1	127	1850.00	40	1043.00	35	798.00	39	1554.00	16	556.00
	2	59	871.00	22	557.00	46	936.00	33	516.00	43	626.00
	3	-	-	97	1626.00	55	1309.00	50	1329.00	51	1366.00

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
384	1	86	1936.00	30	1073.00	34	832.00	41	1595.00	1	557.00
	2	42	913.00	2	559.00	45	981.00	34	550.00	44	670.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
408	1	87	2023.00	32	1105.00	36	868.00	43	1638.00	4	561.00
	2	38	951.00	-	-	44	1025.00	37	587.00	40	710.00
	3	-	-	87	1713.00	55	1364.00	49	1378.00	45	1411.00
432	1	72	2095.00	23	1128.00	36	904.00	44	1682.00	-	-
	2	22	973.00	-	-	40	1065.00	32	619.00	47	757.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
456	1	55	2150.00	19	1147.00	34	938.00	54	1736.00	-	-
	2	31	1004.00	-	-	40	1105.00	33	652.00	48	805.00
	3	-	-	68	1781.00	38	1402.00	44	1422.00	43	1454.00
480	1	42	2192.00	15	1162.00	35	973.00	52	1788.00	-	-
	2	21	1025.00	-	-	30	1135.00	33	685.00	47	852.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
504	1	34	2226.00	14	1176.00	33	1006.00	51	1839.00	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	55	1836.00	32	1434.00	37	1459.00	39	505.83
528	1	23	2249.00	5	1181.00	35	1041.00	35	1874.00	-	-
	2	21	1046.00	0	559.00	38	1173.00	30	715.00	47	899.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
552	1	0	2249.00	2	1183.00	26	1067.00	43	1917.00	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	11	1847.00	-	-	7	1466.00	22	1515.00
576	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	33	1079.00	-	-	35	1208.00	32	747.00	42	941.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
600	1	0	2249.00	-	-	48	1115.00	65	1982.00	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	15	1862.00	-	-	12	1478.00	24	1539.00

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
624	1	0	2249.00	-	-	21	1136.00	35	2017.00	-	-
	2	32	1111.00	-	-	25	1233.00	25	772.00	45	986.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
648	1	4	2253.00	-	-	0	1136.00	22	2039.00	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	6	1868.00	-	-	0	1478.00	12	1551.00
672	1	4	2257.00	-	-	19	1155.00	30	2069.00	-	-
	2	26	1137.00	-	-	15	1248.00	15	787.00	45	1031.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
696	1	0	2257.00	-	-	10	1165.00	33	2102.00	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	12	1880.00	-	-	37	1515.00	54	1605.00
720	1	-	-	-	-	-	-	22	2124.00	-	-
	2	18	1155.00	-	-	-	-	-	-	9	1040.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
744	1	-	-	-	-	14	1179.00	7	2131.00	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	4	1519.00	29	1634.00
768	1	-	-	-	-	-	-	3	2134.00	-	-
	2	28	1183.00	-	-	-	-	-	-	13	1053.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
792	1	0	2257.00	-	-	15	1194.00	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	20	1654.00
816	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	23	1206.00	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
840	1	-	-	-	-	18	1212.00	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	7	1661.00

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
864	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	29	1235.00	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
888	1	-	-	-	-	9	1221.00	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	0	1248.00	0	787.00	0	1053.00
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
912	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	12	1247.00	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	0	1880.00	0	1434.00	0	1519.00	0	1661.00
936	1	-	-	-	-	6	1227.00	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
960	1	0	2257.00	0	1183.00	-	-	-	-	0	561.00
	2	3	1250.00	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-24 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง จากการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	ชุดควบคุม		ชุดการทดลองที่ 1 (1:10)		ชุดการทดลองที่ 2 (1:20)		ชุดการทดลองที่ 3 (1:30)		ชุดการทดลองที่ 4 (1:40)	
		ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)	ปริมาตร ที่เกิด (mL)	ปริมาตร สะสม(mL)
984	1	-	-	-	-	0	1227.00	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1008	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	3	1253.00	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1032	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1056	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1080	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	0	1253	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-25 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 1

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
174	124.80	0.15	0.27	0.27	8029.23	33.05	57.51	57.51
150	0.00	0.00	0.00	0.27	13026.68	53.63	80.44	137.95
182	0.00	0.00	0.00	0.27	19013.05	78.27	142.45	280.40
143	83.10	0.12	0.17	0.44	19729.13	68.77	98.34	378.74
133	0.00	0.00	0.00	0.44	17833.43	62.16	82.68	461.42
135	0.00	0.00	0.00	0.44	16907.86	58.94	79.57	540.98
122	0.00	0.00	0.00	0.44	11622.68	40.51	49.43	590.41
106	0.00	0.00	0.00	0.44	13020.47	45.55	48.28	638.69
105	0.00	0.00	0.00	0.44	10743.50	37.58	39.46	678.15
99	0.00	0.00	0.00	0.44	12520.95	43.80	43.36	721.51
136	0.00	0.00	0.00	0.44	11580.16	40.51	55.09	776.60
89	0.00	0.00	0.00	0.44	3462.56	12.11	10.78	787.38
76	0.00	0.00	0.00	0.44	15583.93	56.43	42.89	830.27
73	0.00	0.00	0.00	0.44	14985.25	54.26	39.61	869.88
127	0.00	0.00	0.00	0.44	13365.37	47.22	59.97	929.86
86	0.00	0.00	0.00	0.44	17312.20	61.17	52.61	982.46
87	0.00	0.00	0.00	0.44	16484.03	58.24	50.67	1033.13

ตารางที่ ข-25 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 1 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
72	0.00	0.00	0.00	0.44	17565.60	56.80	40.90	1074.03
55	0.00	0.00	0.00	0.44	16635.80	53.80	29.59	1103.62
42	0.00	0.00	0.00	0.44	15727.80	50.86	21.36	1124.98
34	0.00	0.00	0.00	0.44	15868.73	51.32	17.45	1142.43
23	0.00	0.00	0.00	0.44	13962.40	49.12	11.30	1153.73
0	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	1153.73
0	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	1153.73
0	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	1153.73
4	0.00	0.00	0.00	0.44	10046.30	34.42	1.38	1155.10
4	0.00	0.00	0.00	0.44	8286.93	28.39	1.14	1156.24
0	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	1156.24
0	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	1156.24
0	0.00	0.00	0.00	0.44	16561.53	56.60	0.00	1156.24

ตารางที่ ข-26 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 2

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.10	0.00	0.00	0.00	0.00	16405.26	56.21	29.79	29.79
47.68	0.00	0.00	0.00	0.00	20025.37	70.21	37.21	67.00
65.85	0.00	0.00	0.00	0.00	20970.87	73.53	39.70	106.71
95.72	0.00	0.00	0.00	0.00	19540.03	68.51	38.36	145.07
120.12	0.00	0.00	0.00	0.00	19348.50	67.84	37.99	183.06
144.02	0.00	0.00	0.00	0.00	18112.20	63.50	39.37	222.43
167.87	0.00	0.00	0.00	0.00	19473.83	68.47	39.71	262.14
192.28	0.00	0.00	0.00	0.00	16778.77	59.00	34.22	296.36
214.27	0.00	0.00	0.00	0.00	16007.30	56.28	32.64	329.01
239.50	1209.30	1.70	1.02	1.02	15222.20	52.02	31.21	360.22
263.38	0.00	0.00	0.00	1.02	14938.77	51.06	32.68	392.90
287.32	0.00	0.00	0.00	1.02	16402.03	56.06	35.32	428.21
311.43	0.00	0.00	0.00	1.02	16613.23	55.20	32.57	460.78
336.18	0.00	0.00	0.00	1.02	16589.47	55.12	31.97	492.75
359.57	0.00	0.00	0.00	1.02	17214.63	57.20	33.75	526.50
383.20	0.00	0.00	0.00	1.02	15894.46	52.81	22.18	548.69
407.50	0.00	0.00	0.00	1.02	15732.50	53.86	20.47	569.15

ตารางที่ ข-26 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 2 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
431.85	0.00	0.00	0.00	1.02	16570.57	54.51	11.99	581.14
456.53	0.00	0.00	0.00	1.02	15689.30	51.61	16.00	597.14
479.70	0.00	0.00	0.00	1.02	15406.40	50.68	10.64	607.78
527.38	0.00	0.00	0.00	1.02	14463.27	47.57	9.99	617.78
575.58	0.00	0.00	0.00	1.02	16135.83	53.48	17.65	635.42
625.18	0.00	0.00	0.00	1.02	16245.87	53.84	17.23	652.65
671.48	0.00	0.00	0.00	1.02	16968.70	62.30	16.20	668.85
719.55	0.00	0.00	0.00	1.02	15865.68	52.58	9.46	678.32
767.42	0.00	0.00	0.00	1.02	15390.30	56.51	15.82	694.14
815.53	0.00	0.00	0.00	1.02	16110.80	59.15	13.61	707.74
863.52	0.00	0.00	0.00	1.02	15073.60	55.35	16.05	723.79
911.42	0.00	0.00	0.00	1.02	13333.00	45.75	5.49	729.28
960.08	0.00	0.00	0.00	1.02	7145.27	24.52	0.74	730.02
1007.38	0.00	0.00	0.00	1.02	6278.23	21.54	0.65	730.67
1077.45	0.00	0.00	0.00	1.02	16643.87	57.11	0.00	730.67

ตารางที่ ข-27 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพชุดควบคุม ครั้งที่ 3

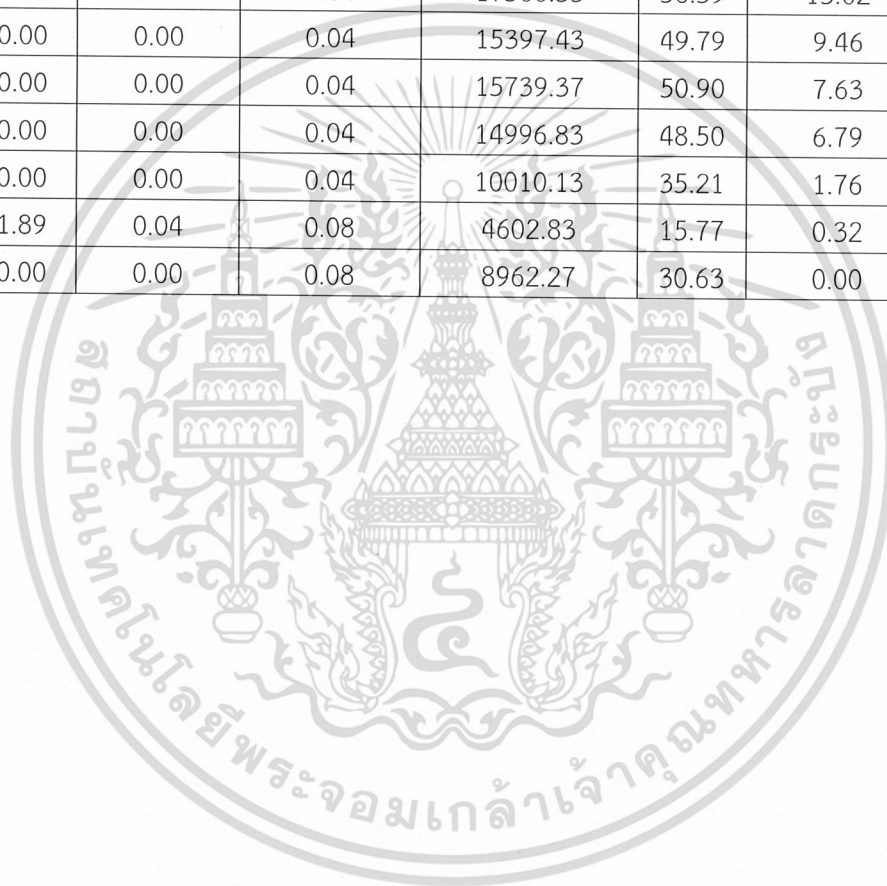
ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.98	0.00	0.00	0.00	0.00	18374.17	64.61	14.21	14.21
50.03	0.00	0.00	0.00	0.00	17861.60	62.80	12.56	26.77
75.22	0.00	0.00	0.00	0.00	14119.60	48.26	2.90	29.67
99.20	0.00	0.00	0.00	0.00	8432.48	28.82	0.86	30.53
123.22	0.00	0.00	0.00	0.00	13120.47	44.84	3.14	33.67
147.13	0.00	0.00	0.00	0.00	11877.53	39.47	2.76	36.44
171.92	0.00	0.00	0.00	0.00	11250.13	37.38	2.62	39.05
195.35	0.00	0.00	0.00	0.00	12099.53	40.20	3.22	42.27
218.97	0.00	0.00	0.00	0.00	11401.37	39.03	2.73	45.00
243.30	0.00	0.00	0.00	0.00	7940.78	27.19	1.09	46.09
364.88	0.00	0.00	0.00	0.00	16739.77	55.06	0.00	46.09

ตารางที่ ข-28 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 1

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16.38	37.78	0.05	0.04	0.04	12727.03	52.39	47.68	47.68
41.75	0.00	0.00	0.00	0.04	18071.85	74.39	79.60	127.28
66.50	0.00	0.00	0.00	0.04	18083.86	74.44	60.30	187.58
90.33	0.00	0.00	0.00	0.04	9720.97	33.89	30.50	218.07
116.07	0.00	0.00	0.00	0.04	14278.80	49.77	40.32	258.39
140.15	0.00	0.00	0.00	0.04	12615.23	43.97	33.42	291.81
164.12	0.00	0.00	0.00	0.04	13185.60	45.96	43.66	335.47
188.12	0.00	0.00	0.00	0.04	14175.76	49.59	35.21	370.68
212.42	0.00	0.00	0.00	0.04	13581.07	47.51	31.83	402.51
236.42	0.00	0.00	0.00	0.04	13238.43	46.31	24.54	427.05
260.17	0.00	0.00	0.00	0.04	9619.76	33.65	16.49	443.54
283.98	0.00	0.00	0.00	0.04	15772.05	55.17	27.03	470.57
308.12	0.00	0.00	0.00	0.04	17184.80	62.23	28.00	498.58
332.23	0.00	0.00	0.00	0.04	16024.07	58.03	27.85	526.43
356.13	0.00	0.00	0.00	0.04	16842.90	59.51	23.80	550.24
379.93	0.00	0.00	0.00	0.04	15452.45	54.60	16.38	566.62
404.25	0.00	0.00	0.00	0.04	17509.17	61.87	19.80	586.41

ตารางที่ ข-28 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 1 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
428.48	0.00	0.00	0.00	0.04	17500.33	56.59	13.02	599.43
452.25	0.00	0.00	0.00	0.04	15397.43	49.79	9.46	608.89
476.62	0.00	0.00	0.00	0.04	15739.37	50.90	7.63	616.52
500.10	0.00	0.00	0.00	0.04	14996.83	48.50	6.79	623.31
524.05	0.00	0.00	0.00	0.04	10010.13	35.21	1.76	625.07
544.85	1528.93	1.89	0.04	0.08	4602.83	15.77	0.32	625.39
959.47	0.00	0.00	0.00	0.08	8962.27	30.63	0.00	625.39



ตารางที่ ข-29 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 2

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.90	0.00	0.00	0.00	0.00	17192.53	58.90	34.75	34.75
47.48	0.00	0.00	0.00	0.00	12269.33	43.02	18.07	52.82
65.68	0.00	0.00	0.00	0.00	18652.70	65.40	41.85	94.68
95.52	0.00	0.00	0.00	0.00	13730.30	48.14	34.18	128.85
119.83	0.00	0.00	0.00	0.00	15836.70	55.52	17.21	146.07
143.80	0.00	0.00	0.00	0.00	16566.20	58.08	19.75	165.81
167.67	0.00	0.00	0.00	0.00	11249.10	39.55	12.26	178.08
192.07	0.00	0.00	0.00	0.00	17633.40	62.00	20.46	198.54
214.05	0.00	0.00	0.00	0.00	17682.53	62.17	18.65	217.19
239.28	0.00	0.00	0.00	0.00	18236.65	62.33	20.57	237.76
263.17	0.00	0.00	0.00	0.00	17544.63	59.96	19.79	257.54
287.12	0.00	0.00	0.00	0.00	17182.97	58.73	19.97	277.51
311.20	0.00	0.00	0.00	0.00	18088.10	60.10	13.22	290.73
335.95	0.00	0.00	0.00	0.00	17301.77	57.49	10.35	301.08
359.35	0.00	0.00	0.00	0.00	17942.30	59.62	13.12	314.20
382.97	0.00	0.00	0.00	0.00	6461.83	21.47	0.43	314.63
529.28	0.00	0.00	0.00	0.00	16452.77	54.12	0.00	314.63

ตารางที่ ข-30 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 3

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.75	0.00	0.00	0.00	0.00	15468.77	54.39	100.08	100.08
49.82	0.00	0.00	0.00	0.00	15579.77	54.78	96.96	197.04
74.98	0.00	0.00	0.00	0.00	17647.20	60.31	120.62	317.67
98.98	0.00	0.00	0.00	0.00	13648.63	46.65	57.84	375.51
122.98	0.00	0.00	0.00	0.00	16237.00	55.49	71.03	446.54
146.90	0.00	0.00	0.00	0.00	16517.35	54.88	66.41	512.95
171.68	0.00	0.00	0.00	0.00	14893.97	49.49	58.89	571.84
195.12	0.00	0.00	0.00	0.00	16288.17	54.12	49.79	621.63
218.73	0.00	0.00	0.00	0.00	16866.87	57.75	51.97	673.60
243.08	0.00	0.00	0.00	0.00	16008.43	54.81	49.33	722.93
267.32	0.00	0.00	0.00	0.00	17706.03	58.24	37.86	760.79
292.15	0.00	0.00	0.00	0.00	17428.83	57.33	41.85	802.64
315.15	0.00	0.00	0.00	0.00	16148.68	53.12	35.06	837.69
362.85	0.00	0.00	0.00	0.00	16793.13	55.24	53.58	891.28
411.05	0.00	0.00	0.00	0.00	17597.17	58.32	50.74	942.01
460.62	0.00	0.00	0.00	0.00	16815.60	55.73	37.90	979.91
506.88	0.00	0.00	0.00	0.00	16416.30	60.28	33.15	1013.06

ตารางที่ ข-30 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:10 ครั้งที่ 3 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
555.03	0.00	0.00	0.00	0.00	15207.40	50.40	5.54	1018.61
602.88	0.00	0.00	0.00	0.00	13574.70	49.84	7.48	1026.08
651.05	0.00	0.00	0.00	0.00	11082.60	40.69	2.44	1028.52
698.92	0.00	0.00	0.00	0.00	8014.90	29.43	3.53	1032.05
913.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12597.10	43.23	0.00	1032.05

ตารางที่ ข-31 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 1

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16.20	22.56	0.03	0.04	0.04	10541.90	43.40	69.43	69.43
41.57	0.00	0.00	0.00	0.04	12225.18	50.33	51.84	121.27
66.32	0.00	0.00	0.00	0.04	17536.56	72.19	26.71	147.98
90.15	0.00	0.00	0.00	0.04	16833.07	58.68	22.88	170.86
115.80	0.00	0.00	0.00	0.04	14081.53	49.09	19.14	190.01
139.87	0.00	0.00	0.00	0.04	13773.40	48.01	20.16	210.17

ตารางที่ ข-31 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 1 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
163.83	0.00	0.00	0.00	0.04	7457.88	26.00	14.56	224.73
187.83	0.00	0.00	0.00	0.04	7315.07	25.59	11.00	235.73
212.13	0.00	0.00	0.00	0.04	12877.47	45.05	20.27	256.00
236.10	0.00	0.00	0.00	0.04	13444.33	47.03	18.81	274.81
259.93	0.00	0.00	0.00	0.04	13771.98	48.17	19.27	294.08
283.78	0.00	0.00	0.00	0.04	15296.03	53.51	23.54	317.63
307.92	0.00	0.00	0.00	0.04	17857.23	64.66	23.93	341.55
332.03	0.00	0.00	0.00	0.04	16688.10	60.43	22.96	364.52
355.90	0.00	0.00	0.00	0.04	17339.93	61.27	21.44	385.96
379.72	0.00	0.00	0.00	0.04	18009.40	63.63	21.64	407.60
404.03	0.00	0.00	0.00	0.04	16025.18	56.62	20.38	427.98
428.27	0.00	0.00	0.00	0.04	17714.57	57.29	20.62	448.60
452.05	0.00	0.00	0.00	0.04	17015.80	55.03	18.71	467.31
476.25	0.00	0.00	0.00	0.04	16970.10	54.88	19.21	486.52
499.88	0.00	0.00	0.00	0.04	17470.63	56.50	18.64	505.16
523.83	0.00	0.00	0.00	0.04	17138.67	60.29	21.10	526.26
544.63	0.00	0.00	0.00	0.04	17697.67	60.64	15.77	542.03
595.73	0.00	0.00	0.00	0.04	18513.67	63.43	30.45	572.48

ตารางที่ ข-31 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 1 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
620.28	0.00	0.00	0.00	0.04	17258.20	59.13	12.42	584.89
643.73	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	584.89
668.08	0.00	0.00	0.00	0.04	16055.40	55.01	10.45	595.35
691.92	0.00	0.00	0.00	0.04	13921.36	47.70	4.77	600.12
740.00	0.00	0.00	0.00	0.04	14766.83	51.77	7.25	607.36
789.33	0.00	0.00	0.00	0.04	13482.96	47.27	7.09	614.45
837.57	0.00	0.00	0.00	0.04	13542.27	47.62	8.57	623.03
884.83	0.00	0.00	0.00	0.04	11662.30	39.86	3.59	626.61
932.67	0.00	0.00	0.00	0.04	8084.40	27.63	1.66	628.27
982.58	0.00	0.00	0.00	0.04	7129.58	23.69	0.00	628.27

ตารางที่ ข-32 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 2

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.68	0.00	0.00	0.00	0.00	14742.96	50.51	45.46	45.46
47.25	0.00	0.00	0.00	0.00	18957.73	66.47	57.16	102.62
65.27	0.00	0.00	0.00	0.00	19741.60	69.22	56.06	158.69
95.30	0.00	0.00	0.00	0.00	14782.43	51.83	49.24	207.92
119.62	0.00	0.00	0.00	0.00	15137.43	53.07	45.11	253.04
143.60	0.00	0.00	0.00	0.00	15273.86	53.55	47.13	300.16
167.48	0.00	0.00	0.00	0.00	5891.50	20.72	9.74	309.90
191.83	0.00	0.00	0.00	0.00	15640.27	54.99	25.30	335.19
213.83	0.00	0.00	0.00	0.00	15021.53	52.82	22.18	357.38
239.07	0.00	0.00	0.00	0.00	16871.93	57.66	26.52	383.90
262.97	0.00	0.00	0.00	0.00	14486.87	49.51	24.26	408.16
286.90	0.00	0.00	0.00	0.00	17111.07	58.48	26.32	434.48
310.97	0.00	0.00	0.00	0.00	17294.33	57.47	25.28	459.76
335.72	0.00	0.00	0.00	0.00	17381.55	57.76	26.57	486.33
359.13	0.00	0.00	0.00	0.00	16704.25	55.51	25.53	511.86
382.75	0.00	0.00	0.00	0.00	17003.37	56.50	25.42	537.29
407.08	0.00	0.00	0.00	0.00	16731.93	57.28	25.20	562.49

ตารางที่ ข-32 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 2 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สหสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สหสม
431.40	0.00	0.00	0.00	0.00	18048.83	59.37	23.75	586.24
456.15	0.00	0.00	0.00	0.00	17234.25	56.69	22.68	608.92
479.23	0.00	0.00	0.00	0.00	16724.43	55.01	16.50	625.42
526.90	0.00	0.00	0.00	0.00	15929.70	52.40	19.91	645.33
575.10	0.00	0.00	0.00	0.00	16227.35	53.78	18.82	664.15
624.70	0.00	0.00	0.00	0.00	15470.03	51.27	12.82	676.97
671.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15675.10	57.55	8.63	685.60
886.92	0.00	0.00	0.00	0.00	9982.90	36.65	0.00	685.60

ตารางที่ ข-33 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 3

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สหสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สหสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.52	0.00	0.00	0.00	0.00	14276.57	50.20	92.37	92.37
49.62	0.00	0.00	0.00	0.00	15701.20	55.21	55.21	147.57
74.77	0.00	0.00	0.00	0.00	17792.65	60.81	67.50	215.07

ตารางที่ ข-33 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:20 ครั้งที่ 3 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
98.77	0.00	0.00	0.00	0.00	12974.50	44.34	63.41	278.48
122.78	0.00	0.00	0.00	0.00	14414.33	49.26	58.62	337.10
146.68	0.00	0.00	0.00	0.00	14928.73	49.61	51.09	388.20
171.45	0.00	0.00	0.00	0.00	15485.77	51.46	45.80	433.99
194.90	0.00	0.00	0.00	0.00	16622.10	55.23	45.29	479.28
218.52	0.00	0.00	0.00	0.00	17141.63	58.69	50.47	529.75
242.88	0.00	0.00	0.00	0.00	17659.13	60.46	45.34	575.10
267.08	0.00	0.00	0.00	0.00	17545.40	57.71	37.51	612.61
291.93	0.00	0.00	0.00	0.00	16912.83	55.63	27.26	639.87
314.92	0.00	0.00	0.00	0.00	16895.30	55.57	26.68	666.55
362.63	0.00	0.00	0.00	0.00	18729.70	62.07	34.14	700.69
410.82	0.00	0.00	0.00	0.00	17754.00	58.84	32.36	733.05
460.38	0.00	0.00	0.00	0.00	17964.00	59.53	22.62	755.67
506.67	0.00	0.00	0.00	0.00	17310.77	63.56	20.34	776.01
912.92	0.00	0.00	0.00	0.00	8054.23	27.64	0.00	776.01

ตารางที่ ข-34 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 1

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16.05	28.46	0.04	0.05	0.05	9402.60	38.71	54.96	54.96
41.35	0.00	0.00	0.00	0.05	15419.13	63.47	63.47	118.44
66.10	0.00	0.00	0.00	0.05	17659.26	72.70	65.43	183.86
89.95	0.00	0.00	0.00	0.05	18663.33	65.06	63.10	246.97
115.50	0.00	0.00	0.00	0.05	16180.80	56.40	58.66	305.63
139.48	0.00	0.00	0.00	0.05	15265.93	53.21	67.58	373.21
163.52	0.00	0.00	0.00	0.05	7798.27	27.18	39.42	412.62
187.55	0.00	0.00	0.00	0.05	10035.57	35.10	32.65	445.27
211.83	0.00	0.00	0.00	0.05	10206.47	35.70	35.70	480.97
235.80	0.00	0.00	0.00	0.05	12943.33	45.28	46.63	527.61
259.72	0.00	0.00	0.00	0.05	11289.06	39.49	40.67	568.28
283.57	0.00	0.00	0.00	0.05	7250.20	25.36	27.39	595.67
307.72	0.00	0.00	0.00	0.05	16483.38	59.69	59.09	654.76
331.58	0.00	0.00	0.00	0.05	15489.63	56.09	58.34	713.10
355.67	0.00	0.00	0.00	0.05	17338.30	61.26	23.89	736.99
379.50	0.00	0.00	0.00	0.05	10785.60	38.11	15.62	752.61
403.78	0.00	0.00	0.00	0.05	17741.70	62.69	26.96	779.57

ตารางที่ ข-34 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 1 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
428.05	0.00	0.00	0.00	0.05	17999.83	58.21	25.61	805.18
451.87	0.00	0.00	0.00	0.05	11836.67	38.28	20.67	825.85
476.07	0.00	0.00	0.00	0.05	17764.00	57.45	29.87	855.72
499.67	0.00	0.00	0.00	0.05	17280.67	55.88	28.50	884.22
523.58	0.00	0.00	0.00	0.05	15853.47	55.77	19.52	903.74
544.43	0.00	0.00	0.00	0.05	17989.57	61.64	26.50	930.25
595.52	0.00	0.00	0.00	0.05	18130.98	62.12	40.38	970.62
620.10	0.00	0.00	0.00	0.05	16636.17	57.00	19.95	990.57
643.48	0.00	0.00	0.00	0.05	14828.10	50.80	11.18	1001.75
667.95	0.00	0.00	0.00	0.05	18435.80	63.16	18.95	1020.70
691.72	0.00	0.00	0.00	0.05	18321.03	62.77	20.71	1041.42
711.10	0.00	0.00	0.00	0.05	17885.73	62.71	13.80	1055.21
739.82	0.00	0.00	0.00	0.05	12736.50	44.66	3.13	1058.34
959.33	0.00	0.00	0.00	0.05	14532.67	49.67	1.49	1059.83

ตารางที่ ข-35 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 2

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.50	0.00	0.00	0.00	0.00	14286.43	48.95	15.17	15.17
47.03	0.00	0.00	0.00	0.00	16829.37	59.00	18.88	34.06
65.13	0.00	0.00	0.00	0.00	18543.00	65.01	20.80	54.86
95.10	0.00	0.00	0.00	0.00	15529.43	54.45	19.06	73.92
119.38	0.00	0.00	0.00	0.00	13017.73	45.64	15.97	89.89
143.38	0.00	0.00	0.00	0.00	13543.33	47.48	16.62	106.51
167.30	0.00	0.00	0.00	0.00	8684.90	30.54	10.38	116.89
191.60	0.00	0.00	0.00	0.00	15266.60	53.68	18.25	135.14
213.62	0.00	0.00	0.00	0.00	15926.13	56.00	18.48	153.62
238.83	0.00	0.00	0.00	0.00	16871.77	57.66	20.76	174.38
262.75	0.00	0.00	0.00	0.00	17312.10	59.17	21.89	196.27
286.70	0.00	0.00	0.00	0.00	16681.83	57.01	21.66	217.94
310.75	0.00	0.00	0.00	0.00	17280.90	57.42	20.10	238.04
335.50	0.00	0.00	0.00	0.00	17709.78	58.85	21.18	259.22
358.92	0.00	0.00	0.00	0.00	16910.80	56.19	18.54	277.76
382.53	0.00	0.00	0.00	0.00	17443.25	59.72	20.30	298.07
406.87	0.00	0.00	0.00	0.00	17469.10	59.81	22.13	320.20

ตารางที่ ข-35 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 2 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สหสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สหสม
431.17	0.00	0.00	0.00	0.00	18750.67	61.68	19.74	339.93
455.93	0.00	0.00	0.00	0.00	17379.23	57.17	18.86	358.80
479.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17541.40	57.70	19.04	377.84
526.67	0.00	0.00	0.00	0.00	17170.28	56.48	16.94	394.78
574.88	0.00	0.00	0.00	0.00	17619.73	58.39	18.69	413.47
624.47	0.00	0.00	0.00	0.00	17202.32	57.01	14.25	427.72
670.75	0.00	0.00	0.00	0.00	15885.13	58.33	8.75	436.47
886.63	0.00	0.00	0.00	0.00	10752.20	39.48	0.00	436.47

ตารางที่ ข-36 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 3

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สหสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สหสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.30	0.00	0.00	0.00	0.00	13318.18	46.83	64.16	64.16
49.40	0.00	0.00	0.00	0.00	15231.80	53.56	72.84	136.99
74.55	0.00	0.00	0.00	0.00	18495.83	63.21	82.81	219.80
98.57	0.00	0.00	0.00	0.00	18131.43	61.97	87.37	307.17
122.58	0.00	0.00	0.00	0.00	14780.83	50.52	78.30	385.47
146.47	0.00	0.00	0.00	0.00	13687.30	45.48	67.77	453.24
171.22	0.00	0.00	0.00	0.00	13386.80	44.48	33.81	487.05
194.68	0.00	0.00	0.00	0.00	14607.60	48.54	37.86	524.91
218.30	0.00	0.00	0.00	0.00	15884.53	54.38	40.24	565.15
242.68	0.00	0.00	0.00	0.00	15328.77	52.48	23.09	588.24
266.87	0.00	0.00	0.00	0.00	16657.03	54.79	28.49	616.73
291.73	0.00	0.00	0.00	0.00	16632.73	54.71	31.19	647.92
314.60	0.00	0.00	0.00	0.00	16313.40	53.66	26.29	674.21
362.42	0.00	0.00	0.00	0.00	18423.28	61.06	30.53	704.74
410.58	0.00	0.00	0.00	0.00	18256.50	60.50	29.65	734.39
460.15	0.00	0.00	0.00	0.00	18856.70	62.49	27.50	761.88

ตารางที่ ข-36 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:30 ครั้งที่ 3 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
554.57	0.00	0.00	0.00	0.00	13920.73	46.13	3.23	790.48
602.42	0.00	0.00	0.00	0.00	14384.10	52.81	6.34	796.82
650.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	796.82
698.45	0.00	0.00	0.00	0.00	14243.98	52.30	19.35	816.17
746.33	0.00	0.00	0.00	0.00	7069.60	24.26	0.97	817.14
912.85	0.00	0.00	0.00	0.00	12405.30	42.57	0.00	817.14

ตารางที่ ข-37 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 1

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15.85	7.23	0.01	0.0031	0.0031	1851.83	7.62	2.67	2.67
41.12	53.76	0.07	0.03	0.03	4322.10	17.79	8.36	11.03
65.88	0.00	0.00	0.00	0.03	7746.20	31.89	12.12	23.15
89.77	0.00	0.00	0.00	0.03	7931.87	27.65	4.15	27.30
115.37	0.00	0.00	0.00	0.03	8073.27	28.14	5.63	32.92

ตารางที่ ข-37 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 1 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
139.43	0.00	0.00	0.00	0.03	6914.23	24.10	4.58	37.50
163.43	0.00	0.00	0.00	0.03	7252.27	25.28	13.15	50.65
187.40	0.00	0.00	0.00	0.03	6885.77	24.09	15.42	66.06
211.70	0.00	0.00	0.00	0.03	5235.90	18.32	11.36	77.42
235.63	0.00	0.00	0.00	0.03	5017.13	17.55	7.72	85.14
259.50	0.00	0.00	0.00	0.03	4812.66	16.83	6.06	91.20
283.38	0.00	0.00	0.00	0.03	4944.78	17.30	6.40	97.60
307.55	0.00	0.00	0.00	0.03	5434.40	19.68	7.08	104.69
331.60	0.00	0.00	0.00	0.03	2916.00	10.56	3.70	108.38
355.43	0.00	0.00	0.00	0.03	4729.83	16.71	2.67	111.06
379.28	0.00	0.00	0.00	0.03	1498.40	5.29	0.05	111.11
403.60	0.00	0.00	0.00	0.03	3441.00	12.16	0.49	111.59
959.27	0.00	0.00	0.00	0.03	13000.27	44.43	0.00	111.59

ตารางที่ ข-38 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 2

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub>	ปริมาณ H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub>	ปริมาณ CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.35	0.00	0.00	0.00	0.00	7256.60	24.86	12.18	12.18
46.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.18
64.93	0.00	0.00	0.00	0.00	15752.80	55.23	24.30	36.48
94.97	0.00	0.00	0.00	0.00	16652.13	58.38	25.69	62.17
119.22	0.00	0.00	0.00	0.00	16514.43	57.90	27.21	89.39
143.25	0.00	0.00	0.00	0.00	13816.06	48.44	22.77	112.15
167.17	0.00	0.00	0.00	0.00	11980.43	42.13	19.38	131.53
191.43	0.00	0.00	0.00	0.00	13107.10	46.09	20.28	151.81
213.47	0.00	0.00	0.00	0.00	12618.90	44.37	18.64	170.44
238.67	0.00	0.00	0.00	0.00	15479.50	52.90	22.75	193.19
262.62	0.00	0.00	0.00	0.00	14046.65	48.01	21.12	214.32
286.55	0.00	0.00	0.00	0.00	16444.80	56.20	24.17	238.48
310.58	0.00	0.00	0.00	0.00	17444.23	57.96	25.50	263.99
335.33	0.00	0.00	0.00	0.00	17503.50	58.16	26.75	290.74
358.77	0.00	0.00	0.00	0.00	18280.23	60.74	26.12	316.86
382.38	0.00	0.00	0.00	0.00	17320.37	59.30	26.09	342.95

ตารางที่ ข-38 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 2 (ต่อ)

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
431.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19358.78	63.68	29.93	397.44
455.78	0.00	0.00	0.00	0.00	17994.93	59.19	28.41	425.85
478.83	0.00	0.00	0.00	0.00	12801.20	42.11	19.79	445.64
526.52	0.00	0.00	0.00	0.00	17598.93	57.89	27.21	472.85
574.73	0.00	0.00	0.00	0.00	17989.98	59.62	25.04	497.89
624.30	0.00	0.00	0.00	0.00	18203.70	60.33	27.15	525.04
670.58	0.00	0.00	0.00	0.00	18243.47	66.99	30.14	555.18
718.70	0.00	0.00	0.00	0.00	16115.73	53.41	4.81	559.99
766.55	0.00	0.00	0.00	0.00	16204.30	59.50	7.73	567.73
886.28	0.00	0.00	0.00	0.00	14216.43	52.20	0.00	567.73

ตารางที่ ข-39 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 3

ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26.70	0.00	0.00	0.00	0.00	11392.53	40.06	71.30	71.30
48.80	0.00	0.00	0.00	0.00	14808.20	52.07	46.86	118.16
73.93	0.00	0.00	0.00	0.00	18058.80	61.72	67.89	186.06
97.97	0.00	0.00	0.00	0.00	18829.20	64.35	89.45	275.50
121.98	0.00	0.00	0.00	0.00	18219.70	62.27	88.42	363.92
145.83	0.00	0.00	0.00	0.00	15911.98	52.87	70.32	434.24
170.58	0.00	0.00	0.00	0.00	15953.33	53.01	62.55	496.80
194.07	0.00	0.00	0.00	0.00	15460.80	51.37	64.73	561.53
217.68	0.00	0.00	0.00	0.00	14965.57	51.24	40.48	602.00
242.07	0.00	0.00	0.00	0.00	14366.70	49.19	24.59	626.60
266.23	0.00	0.00	0.00	0.00	15736.27	51.76	26.40	653.00
291.13	0.00	0.00	0.00	0.00	15796.90	51.96	26.50	679.50
314.03	0.00	0.00	0.00	0.00	15874.33	52.22	25.06	704.56
361.80	0.00	0.00	0.00	0.00	18079.50	59.92	30.56	735.12
409.97	0.00	0.00	0.00	0.00	17124.07	56.75	25.54	760.66
459.52	0.00	0.00	0.00	0.00	17528.40	58.09	24.98	785.63
505.83	0.00	0.00	0.00	0.00	13393.40	49.18	19.18	804.81

ตารางที่ ข-39 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนชีวภาพอัตราส่วน 1:40 ครั้งที่ 3 (ต่อ)

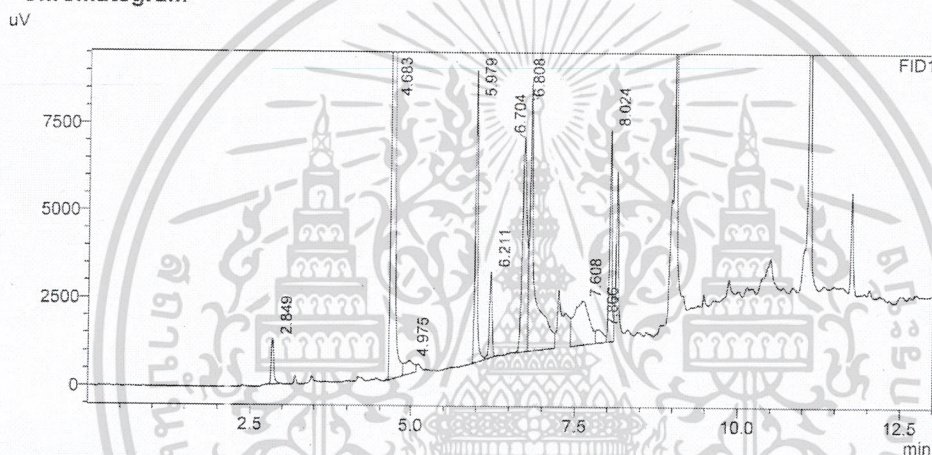
ชั่วโมง (hr)	Peak Area H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub>	ปริมาตร H <sub>2</sub> สะสม	peak Area CH <sub>4</sub>	% CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub>	ปริมาตร CH <sub>4</sub> สะสม
553.97	0.00	0.00	0.00	0.00	17099.93	62.79	13.81	818.63
601.83	0.00	0.00	0.00	0.00	16424.00	60.30	14.47	833.10
649.93	0.00	0.00	0.00	0.00	16103.50	59.13	7.10	840.20
697.83	0.00	0.00	0.00	0.00	16257.77	59.69	32.23	872.43
745.73	0.00	0.00	0.00	0.00	14689.37	50.40	14.62	887.05
794.32	0.00	0.00	0.00	0.00	14667.07	50.33	10.07	897.11
841.62	0.00	0.00	0.00	0.00	10333.47	35.46	2.48	899.60
915.35	0.00	0.00	0.00	0.00	13504.47	46.34	0.00	899.60

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set1 Be-control  
 Sample ID :  
 Data Filename : set1 Be-control1.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 11:10:45  
 Date Processed : 4/12/2562 14:43:25  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.849	3507	1265	-7.449	mg/l		Formic
2	4.683	213965	82846	1420.586	mg/l		Acetic
3	4.975	3908	375	0.000		V	
4	5.979	20614	8241	85.009	mg/l		Propionic Acid
5	6.211	6633	2445	0.000		V	
6	6.704	20576	6118	12029.842	mg/l		Isobutyric Acid
7	6.808	41149	7642	91.209	mg/l	V	butyric Acid
8	7.608	20735	1247	67.673	mg/l		Isovaleric Acid
9	7.866	3027	373	0.000		V	
10	8.024	14870	6002	44.766	mg/l	V	valeric Acid
Total		362985	116555				

รูปที่ ข-1 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจน control ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

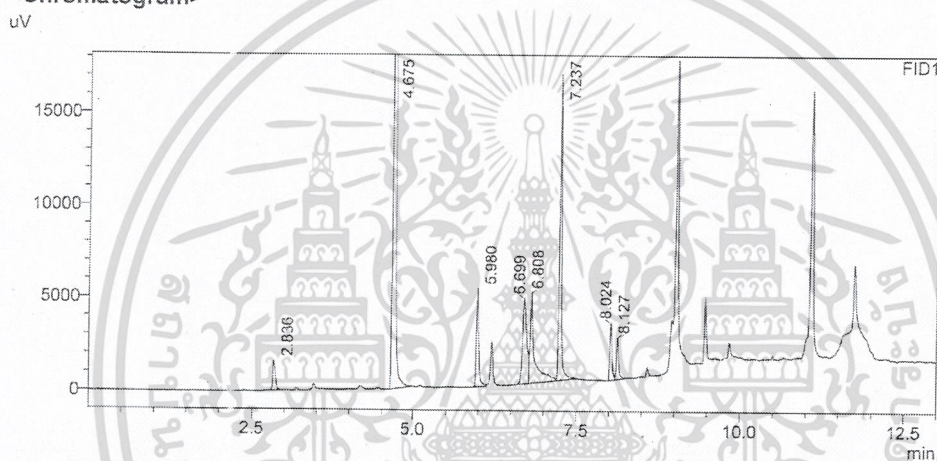
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set2 Be-control  
 Sample ID :  
 Data Filename : set2 Be-control1.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 12:49:01  
 Date Processed : 4/12/2562 14:49:30

Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.836	4388	1566	-7.330	mg/l		Formic
2	4.675	157346	60975	1022.885	mg/l		Acetic
3	5.980	13300	5219	56.473	mg/l		Propionic Acid
4	6.699	19939	4579	12795.320	mg/l	V	Isobutyric Acid
5	6.808	23619	4815	38.046	mg/l	V	butyric Acid
6	7.237	36042	16447	128.698	mg/l	SV	Isovaleric Acid
7	8.024	7051	3036	23.450	mg/l		valeric Acid
8	8.127	1449	2192	0.000	mg/l	V	
Total		269134	98830				

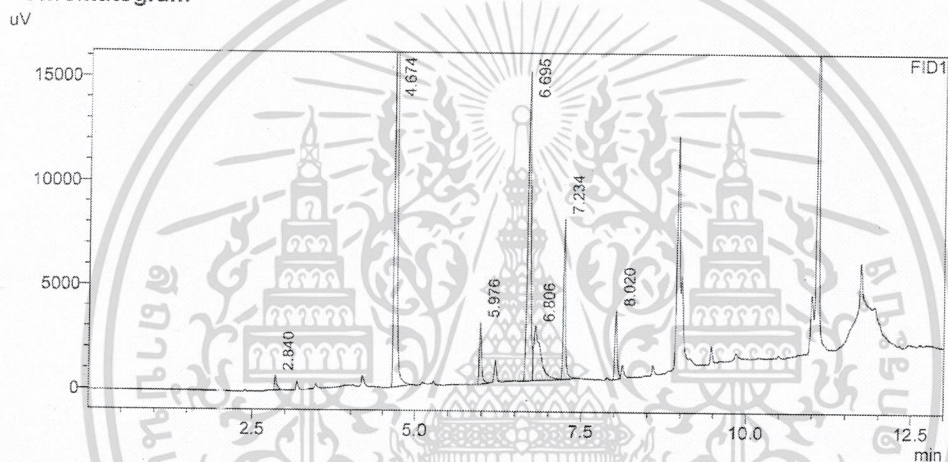
รูปที่ ข-2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจน control ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## <Sample Information>

Sample Name : set3 Be-control  
 Sample ID :  
 Data Filename : set3 Be-control.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 ul  
 Date Acquired : 2/12/2562 14:26:07  
 Date Processed : 4/12/2562 14:53:42  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## <Chromatogram>



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.840	1811	721	-7.677	mg/l		Formic
2	4.674	94221	38167	615.464	mg/l		Acetic
3	5.976	7287	2948	33.014	mg/l		Propionic Acid
4	6.695	9426	14804	10453.027	mg/l		Isobutyric Acid
5	6.806	8383	2599	22.168	mg/l	V	butyric Acid
6	7.234	7557	7577	56.468	mg/l		Isovaleric Acid
7	8.020	7585	3279	24.906	mg/l		valeric Acid
Total		196274	70095				

รูปที่ ข-3 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจน control ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

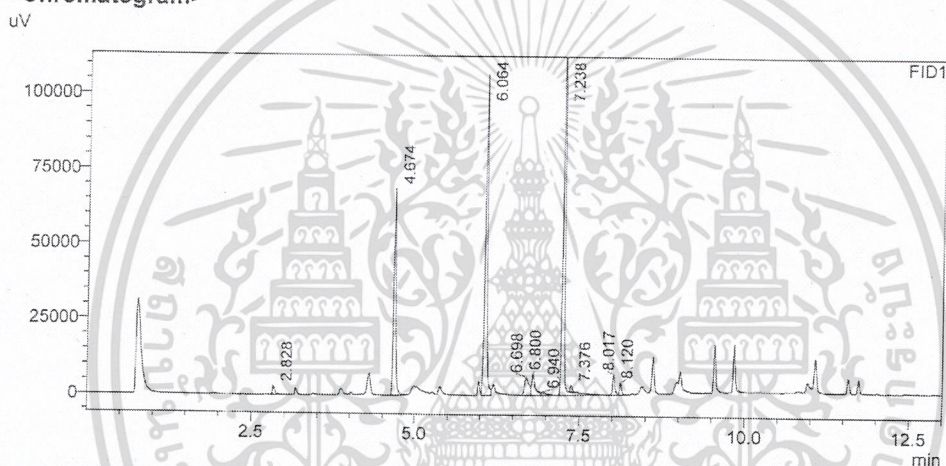
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Analysis Report

## <Sample Information>

Sample Name : set1 Be-10  
 Sample ID :  
 Data Filename : set1 Be-11.gcd  
 Method Filename : VFA+12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 11:33:42  
 Date Processed : 4/12/2562 14:41:05  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## <Chromatogram>



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.828	7432	2904	-6.922	mg/l	V	Formic
2	4.674	163570	68568	1082.421	mg/l		Acetic
3	6.064	275821	105928	1079.921	mg/l		Propionic Acid
4	6.698	27602	5941	12186.513	mg/l	V	Isobutyric Acid
5	6.800	23466	6989	46.580	mg/l	V	butyric Acid
6	6.940	5428	940	0.000		V	
7	7.238	293426	130969	1046.824	mg/l	S	Isovaleric Acid
8	7.376	5270	2197	0.000		T	
9	8.017	15738	6648	47.130	mg/l		valeric Acid
10	8.120	9539	3927	0.000		V	
Total		833093	335012				

รูปที่ ข-4 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

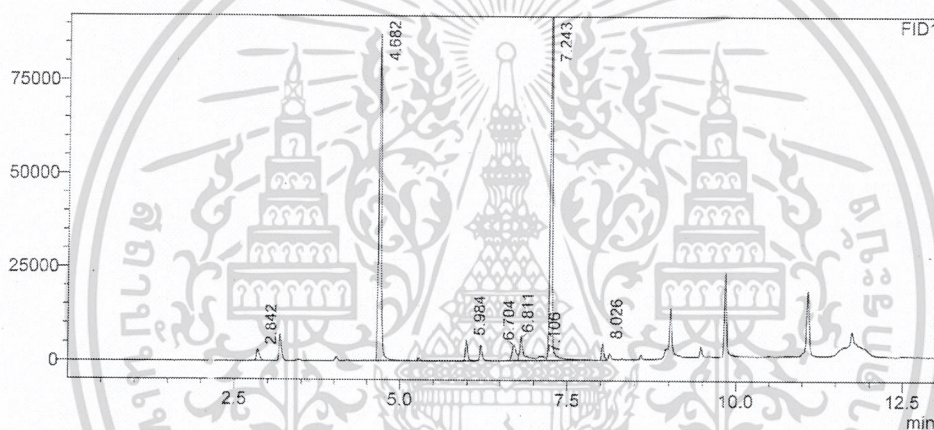
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## <Sample Information>

Sample Name	: set2 Be-10	Sample Type	: Unknown
Sample ID	:	Acquired by	: System Administrator
Data Filename	: set2 Be-10.gcd	Processed by	: System Administrator
Method Filename	: VFA4-12-62.gcm		
Batch Filename	:		
Vial #	: 1		
Injection Volume	: 1 uL		
Date Acquired	: 2/12/2562 13:06:16		
Date Processed	: 4/12/2562 14:46:51		

## <Chromatogram>

uV



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.842	3260	3101	-6.676	mg/l		Formic
2	4.682	243035	86549	1595.306	mg/l	S	Acetic
3	5.984	14465	5447	61.017	mg/l		Propionic Acid
4	6.704	13929	4292	12875.538	mg/l	V	Isobutyric Acid
5	6.811	25032	6246	45.362	mg/l	V	butyric Acid
6	7.106	7915	1028	0.000		V	
7	7.243	263219	120700	943.840	mg/l	SV	Isovaleric Acid
8	8.026	10321	4433	32.365	mg/l		valeric Acid
Total		602177	231795				

รูปที่ ข-5 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

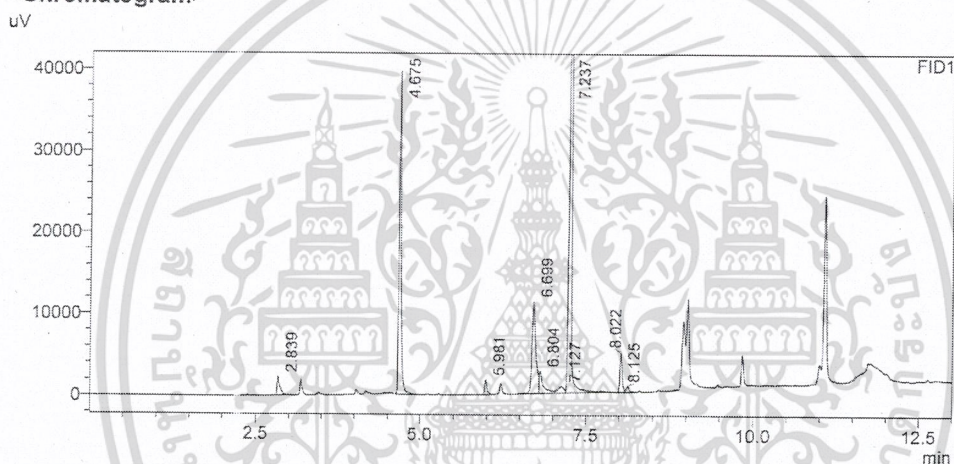
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Analysis Report

## <Sample Information>

Sample Name : set3 3e-10  
 Sample ID :  
 Data Filename : set3 3e-10.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 14:43:38  
 Date Processed : 4/12/2562 14:51:40  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## <Chromatogram>



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.839	4153	2207	-7.093	mg/l		Formic
2	4.675	97785	39369	638.465	mg/l		Acetic
3	5.981	4595	1767	22.508	mg/l		Propionic Acid
4	6.699	46485	11233	10686.736	mg/l		Isobutyric Acid
5	6.804	12110	2676	3.143	mg/l	V	butyric Acid
6	7.127	5150	794	0.000		V	
7	7.237	182087	83198	636.607	mg/l	SV	Isovaleric Acid
8	8.022	11451	4754	35.445	mg/l		valeric Acid
9	8.125	2251	662	0.000		V	
Total		366067	146648				

รูปที่ ข-6 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

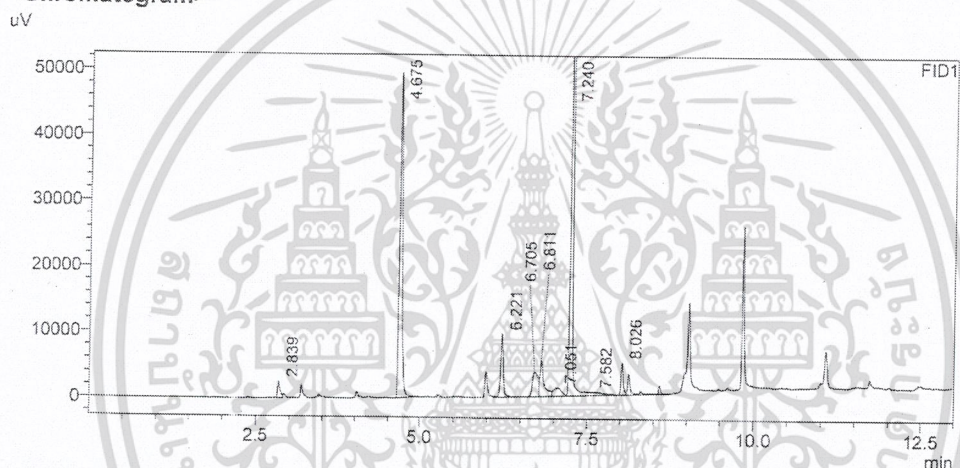
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Analysis Report

## <Sample Information>

Sample Name : set1 Be-20  
 Sample ID :  
 Data Filename : set1 Be-21.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 11:52:05  
 Date Processed : 4/12/2562 14:41:39  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## <Chromatogram>



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.839	6371	2485	-7.064	mg/l	V	Formic
2	4.675	145948	49320	949.318	mg/l		Acetic
3	6.221	21975	9441	113.727	mg/l		Propionic Acid
4	6.705	21379	3739	12601.493	mg/l	V	Isobutyric Acid
5	6.811	21643	5471	41.151	mg/l	V	butyric Acid
6	7.051	10885	1274	0.000		V	
7	7.240	240886	97785	843.935	mg/l	SV	Isovaleric Acid
8	7.582	684	124	0.000		TV	
9	8.026	1401	4737	35.308	mg/l	T	valeric Acid
Total		492172	174375				

รูปที่ ข-7 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

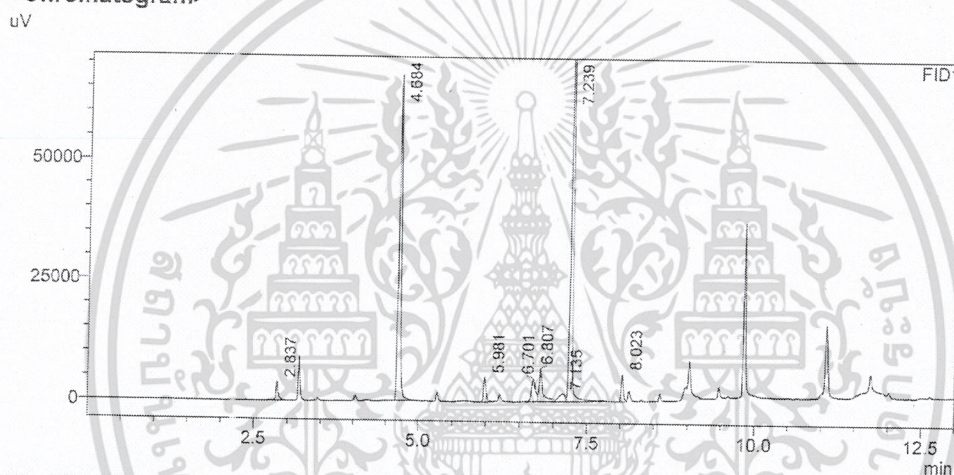
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set2 Be-20  
 Sample ID :  
 Data Filename : set2 Be-20.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 13:23:24  
 Date Processed : 4/12/2562 14:47:56  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.837	8708	3787	-6.750	mg/l	V	Formic
2	4.684	170736	67164	1109.305	mg/l	M	Acetic
3	5.981	13146	4958	55.872	mg/l		Propionic Acid
4	6.701	19824	4729	12804.424	mg/l	V	Isobutyric Acid
5	6.807	26975	6742	45.190	mg/l	V	butyric Acid
6	7.135	10809	1558	0.000		V	
7	7.239	222982	100736	780.803	mg/l	SV	Isovaleric Acid
8	8.023	12901	5535	39.398	mg/l		valeric Acid
Total		485081	195210				

รูปที่ ข-8 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Analysis Report

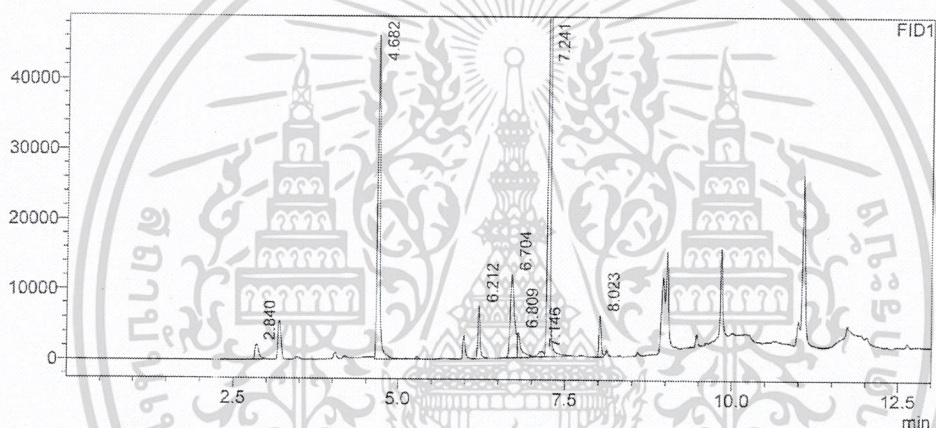
## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set3 Be-20  
 Sample ID :  
 Data Filename : set3 Be-20.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 15:00:47  
 Date Processed : 4/12/2562 14:52:14

Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;

uV



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.840	8907	2064	-6.723	mg/l		Formic
2	4.682	134318	45892	874.257	mg/l	S	Acetic
3	6.212	18144	7214	75.373	mg/l		Propionic Acid
4	6.704	56342	11760	10142.157	mg/l		Isobutyric Acid
5	6.809	14446	3568	10.226	mg/l	V	butyric Acid
6	7.146	4860	805	0.000		V	
7	7.241	228243	102957	799.353	mg/l	SV	Isovaleric Acid
8	8.023	14023	5762	42.456	mg/l		valeric Acid
Total		476282	180022				

รูปที่ ข-9 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

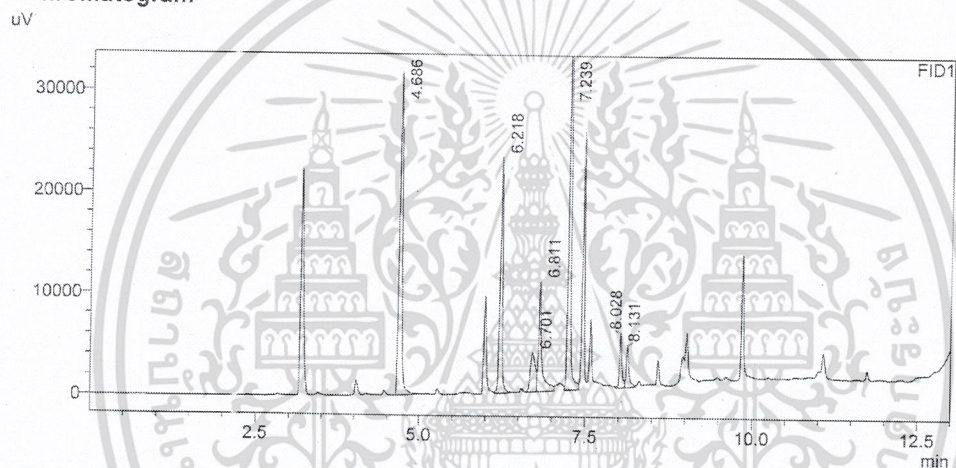
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set1 Be-30  
 Sample ID :  
 Data Filename : set1 Be-31.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 12:09:17  
 Date Processed : 4/12/2562 14:42:39  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	4.686	101519	31437	662.562	mg/l		Acetic
2	6.218	6296	23058	243.728	mg/l		Propionic Acid
3	6.701	19774	3777	12808.399	mg/l	V	Isobutyric Acid
4	6.811	30410	10716	82.903	mg/l	V	butyric Acid
5	7.239	109675	46319	381.280	mg/l		Isovaleric Acid
6	8.028	11621	5217	41.360	mg/l		valeric Acid
7	8.131	12385	4011	0.000		V	
Total		356680	124535				

รูปที่ ข-10 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:30 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

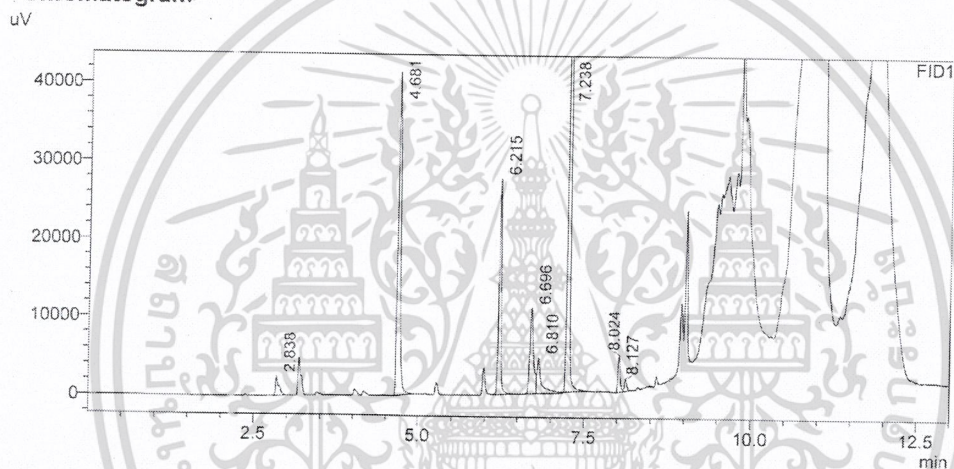
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Analysis Report

## <Sample Information>

Sample Name : set2 Be-30  
 Sample ID :  
 Data Filename : set2 Be-30.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 13:46:45  
 Date Processed : 4/12/2562 14:48:45  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## <Chromatogram>



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.838	3327	2340	-6.801	mg/l	V	Formic
2	4.681	125043	40972	814.395	mg/l		Acetic
3	6.215	65180	27448	262.784	mg/l		Propionic Acid
4	6.696	42603	10856	10995.134	mg/l		Isobutyric Acid
5	6.810	22643	4518	35.087	mg/l	V	butyric Acid
6	7.238	202355	91697	708.071	mg/l	M	Isovaleric Acid
7	8.024	11191	4718	34.736	mg/l		valeric Acid
8	8.127	3985	1533	0.000			
Total		482327	184084				

รูปที่ ข-11 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:30 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

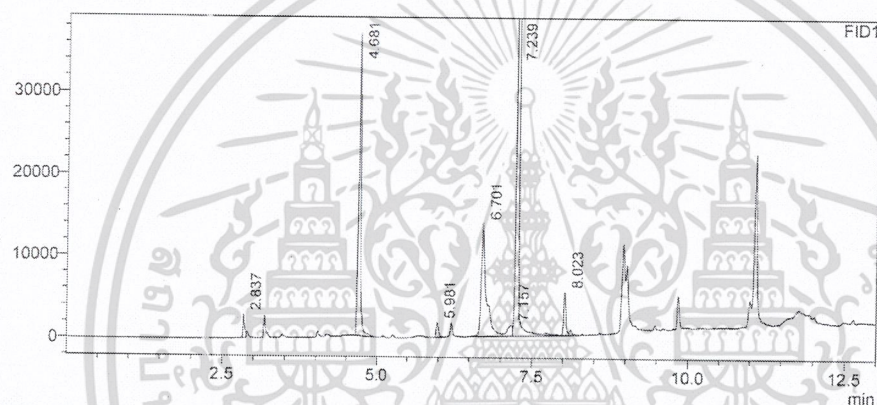
SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set3 Be-30  
 Sample ID :  
 Data Filename : set3 Be-30.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 15:17:51  
 Date Processed : 4/12/2562 14:52:48  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;

uV



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.837	5807	2787	-7.140	mg/l	V	Formic
2	4.681	92235	36287	602.643	mg/l		Acetic
3	5.981	4585	1775	22.472	mg/l		Propionic Acid
4	6.701	76064	13679	8337.353	mg/l		Isobutylic Acid
5	7.157	7768	1362	0.000		V	
6	7.239	241344	105492	845.550	mg/l	SV	Isovaleric Acid
7	8.023	12530	5095	38.366	mg/l	T	valeric Acid
Total		440334	166477				

รูปที่ ข-12 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:30  
 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

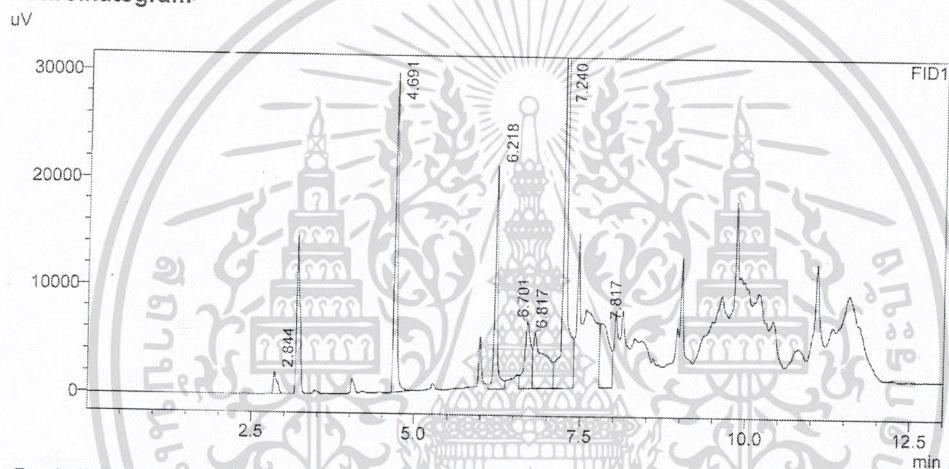
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set1 Be-40  
 Sample ID :  
 Data Filename : set1 Be 42.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 12:30:25  
 Date Processed : 4/12/2562 14:39:54  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.844	7558	1990	-6.905	mg/l		Formic
2	4.691	90535	29373	591.671	mg/l		Acetic
3	6.218	61975	20536	246.378	mg/l		Propionic Acid
4	6.701	41045	6119	11118.850	mg/l		Isobutyric Acid
5	6.817	61194	5144	151.998	mg/l	V	butyric Acid
6	7.240	233691	82264	836.195	mg/l	V	Isovaleric Acid
7	7.817	53510	5884	163.729	mg/l		valeric Acid
Total		559507	151310				

รูปที่ ข-13 ข้อมูลวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:40  
 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

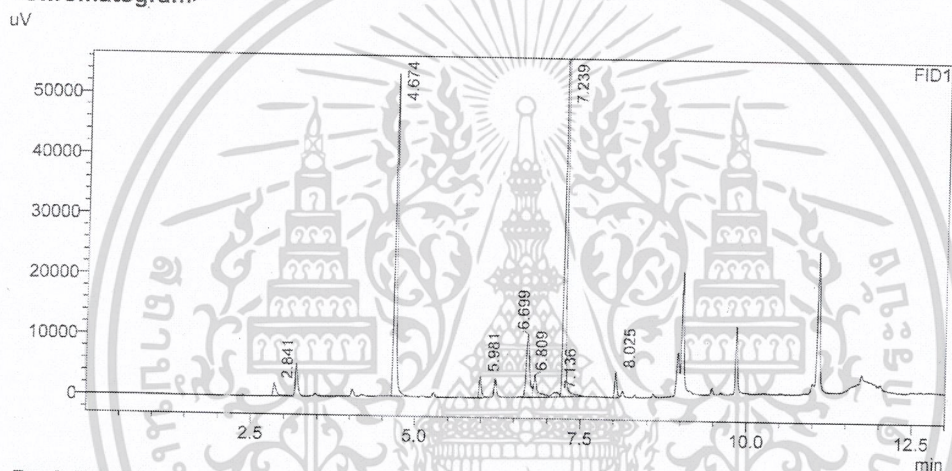
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set2 Be-40  
 Sample ID :  
 Data Filename : set2 Be-40.gcd  
 Method Filename : VFA-I-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12 2562 14:04:05  
 Date Processed : 4/12 2562 14:49:13  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.841	3425	2092	-7.057	mg/l		Formic
2	4.674	133502	53120	888.355	mg/l		Acetic
3	5.981	9084	3508	40.022	mg/l		Propionic Acid
4	6.699	37867	10424	11371.269	mg/l	V	Isobutylic Acid
5	6.809	15445	3638	13.258	mg/l	V	butylic Acid
6	7.136	3266	751	0.000		V	
7	7.239	201435	92272	704.827	mg/l	SV	Isovaleric Acid
8	8.025	3853	4174	31.088	mg/l		valeric Acid
Total		421877	169979				

รูปที่ ข-14 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:40  
 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

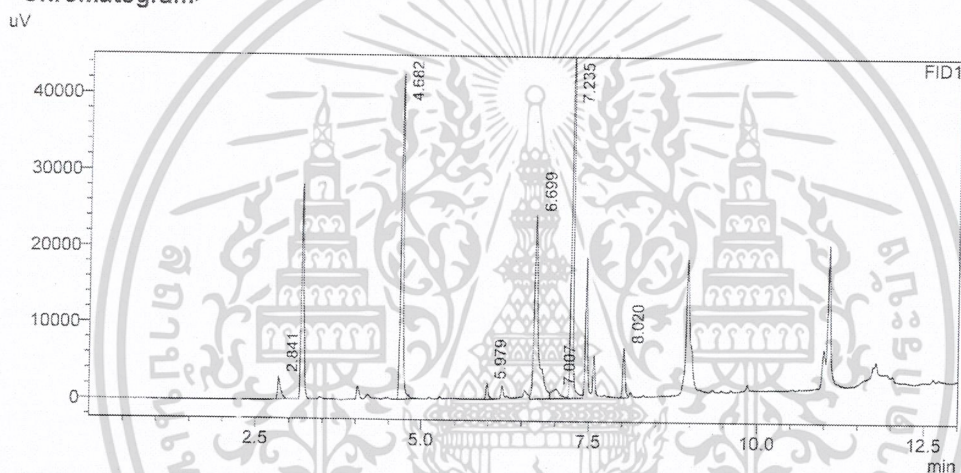
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set3 Be-40  
 Sample ID :  
 Data Filename : set3 Be-40.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2012 15:37:30  
 Date Processed : 4/12/2012 14:53:22  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.841	8255	2915	-6.677	mg/l		Formic
2	4.682	114886	42157	748.840	mg/l		Acetic
3	5.979	8329	1998	25.374	mg/l		Propionic Acid
4	6.699	106960	23865	5883.318	mg/l		Isobutyric Acid
5	7.007	10463	1232	-1.852	mg/l	V	butyric Acid
6	7.235	117117	52795	407.518	mg/l	V	Isovaleric Acid
7	8.020	15252	6404	45.806	mg/l		valeric Acid
Total		379262	131367				

รูปที่ ข-15 ข้อมูลติบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซไฮโดรเจนอัตราส่วน 1:40  
 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ

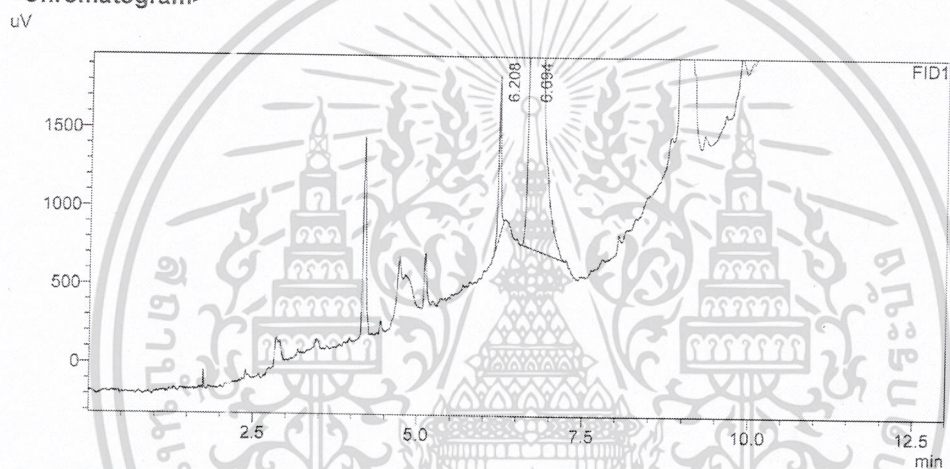
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Analysis Report

## <Sample Information>

Sample Name : set1 Af-control  
 Sample ID :  
 Data Filename : set1 Af-control.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 16:02:21  
 Date Processed : 4/12/2562 14:39:06  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## <Chromatogram>



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	6.208	2707	1026	15.143	mg/l		Propionic Acid
2	6.694	153530	40368	1787.208	mg/l		Isobutylic Acid
Total		161237	41395				

รูปที่ ข-16 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทน control ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

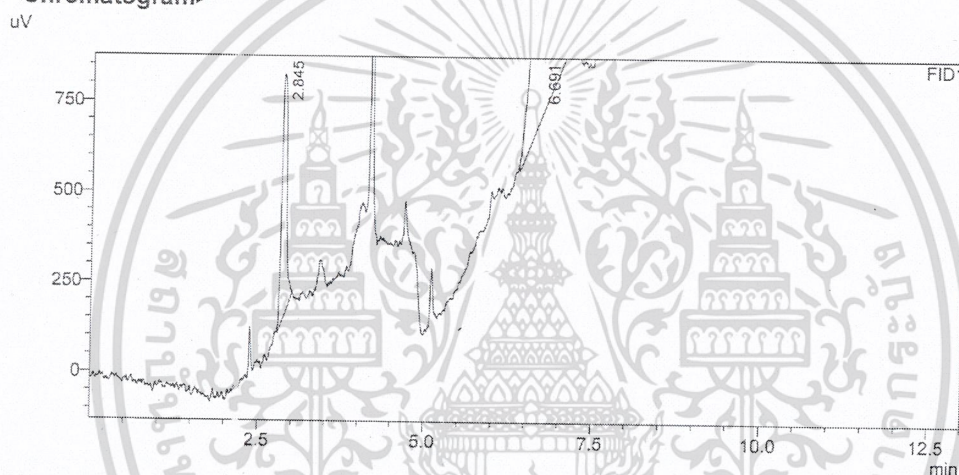
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set2 Af-control  
 Sample ID :  
 Data Filename : set2 Af-control.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 3/12/2562 11:57:56  
 Date Processed : 4/12/2562 14:46:22  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.845	3525	682	-7.446	mg/l	V	Formic
2	6.691	184322	45654	-261.393	mg/l	V	Isobutyric Acid
Total		187847	46336				

รูปที่ ข-17 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทน control ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

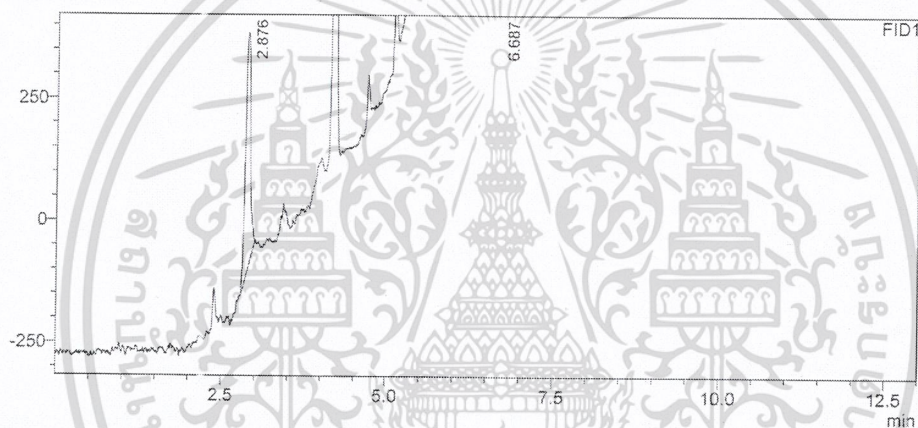
# Analysis Report

## <Sample Information>

Sample Name : set3 Af-control  
 Sample ID :  
 Data Filename : set3 Af-control.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial# : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 3/12/2562 13:48:46  
 Date Processed : 4/12/2562 14:51:20  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## <Chromatogram>

uV



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.876	2533	488	-7.580	mg/l		Formic
2	6.687	22188	62695	-3189.641	mg/l	SV	Isobutylic Acid
Total		22721	63183				

รูปที่ ข-18 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทน control ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

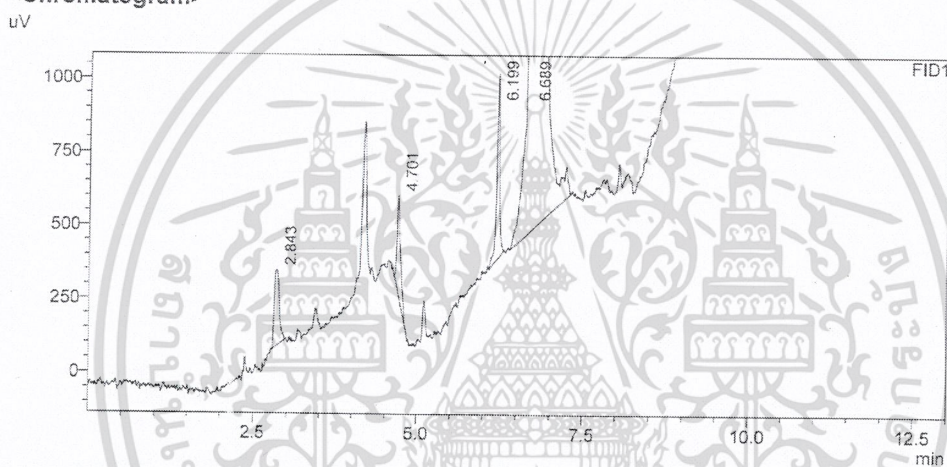
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Analysis Report

## <Sample Information>

Sample Name	: set1 Af-10	Sample Type	: Unknown
Sample ID	:	Acquired by	: System Administrator
Data Filename	: set1 Af-10.gcd	Processed by	: System Administrator
Method Filename	: VFA4-12-62.gcm		
Batch Filename	:		
Vial #	: 1		
Injection Volume	: 1 uL		
Date Acquired	: 2/12/2562 16:37:14		
Date Processed	: 4/12/2562 14:36:48		

## <Chromatogram>



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.843	266	259	-7.750	mg/l		Formic
2	4.701	338	330	15.976	mg/l		Acetic
3	6.199	888	626	11.950	mg/l	V	Propionic Acid
4	6.689	137123	30785	3884.654	mg/l	S	Isobutylic Acid
Total		137615	32001				

รูปที่ ข-19 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

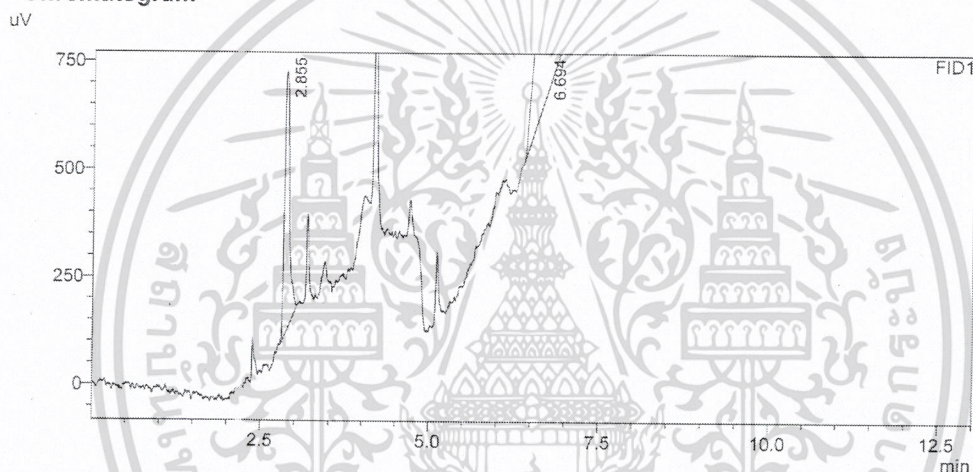
# Analysis Report

## <Sample Information>

Sample Name : set2 Af-10  
 Sample ID :  
 Data Filename : set2 Af-10.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 3/12/2562 12:14:59  
 Date Processed : 4/12/2562 14:44:12

Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## <Chromatogram>



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.855	3211	609	-7.489	mg/l		Formic
2	6.694	162470	37471	1474.243	mg/l		Isobutylic Acid
Total		165681	38080				

รูปที่ ข-20 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

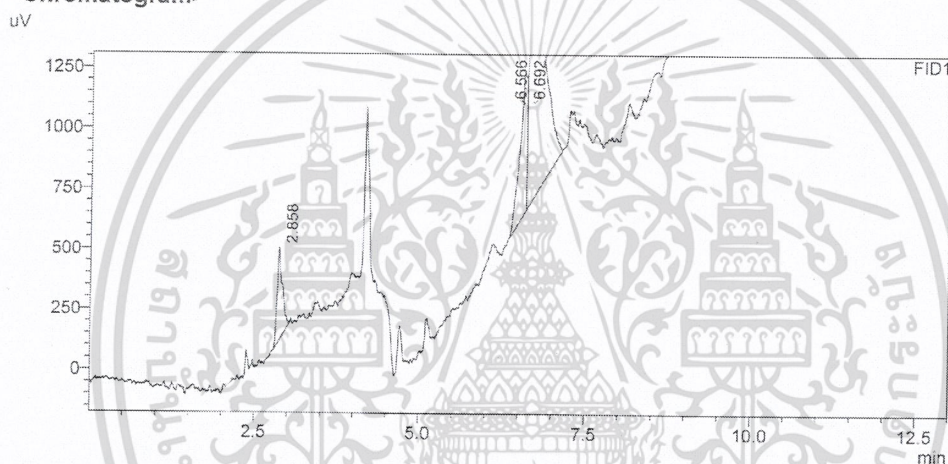
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set3 Af-10  
 Sample ID :  
 Data Filename : set3 Af-10.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1  $\mu$ L  
 Date Acquired : 3/12/2562 14:06:33  
 Date Processed : 4/12/2562 14:49:50  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.858	2078	387	-7.641	mg/l		Formic
2	6.566	4230	583	0.000			
3	6.692	153682	40977	2172.250	mg/l	V	Isobutyric Acid
Total		159991	41947				

รูปที่ ข-21 ข้อมูลวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:10 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

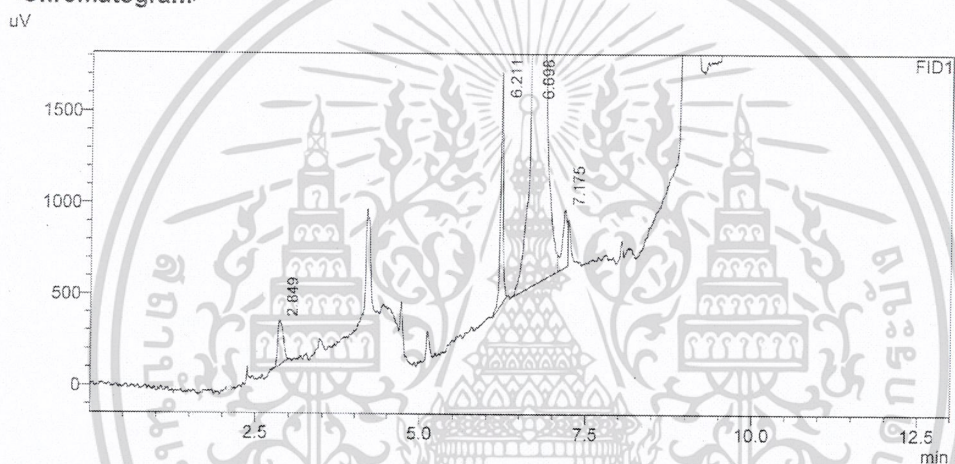
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set1 Af-20  
 Sample ID :  
 Data Filename : set1 Af-20.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 16:19:53  
 Date Processed : 4/12/2562 14:37:20  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.849	1379	243	-7.735	mg/l		Formic
2	6.211	3488	1260	18.190	mg/l		Propionic Acid
3	6.698	126218	28863	4353.716	mg/l		Isobutylic Acid
4	7.175	1690	317	0.517	mg/l	V	Isovaleric Acid
Total		132774	30683				

รูปที่ ข-22 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

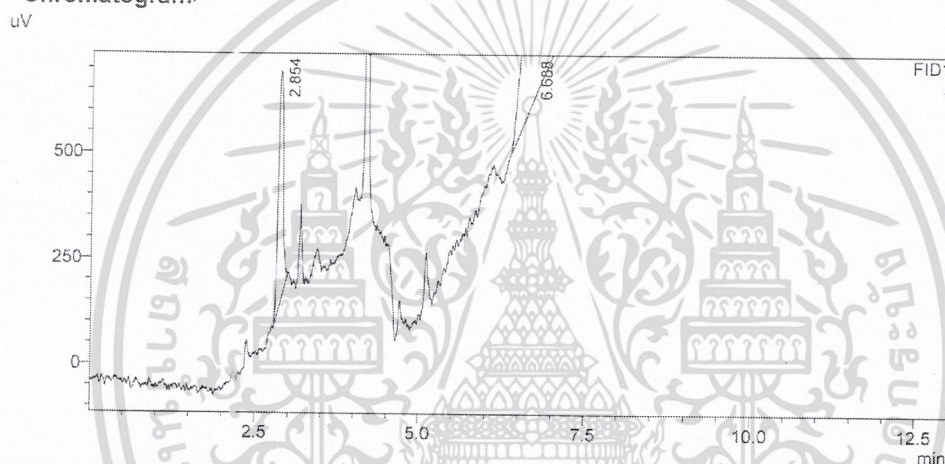
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set2 Af-20  
 Sample ID :  
 Data Filename : set2 Af-20.gcd  
 Method Filename : VFA-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 3/12/2562 12:32:45  
 Date Processed : 4/12/2562 14:44:38  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.854	2694	553	-7.558	mg/l		Formic
2	6.688	194021	47996	-1031.808	mg/l	S	Isobutyric Acid
Total		196715	48549				

รูปที่ ข-23 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

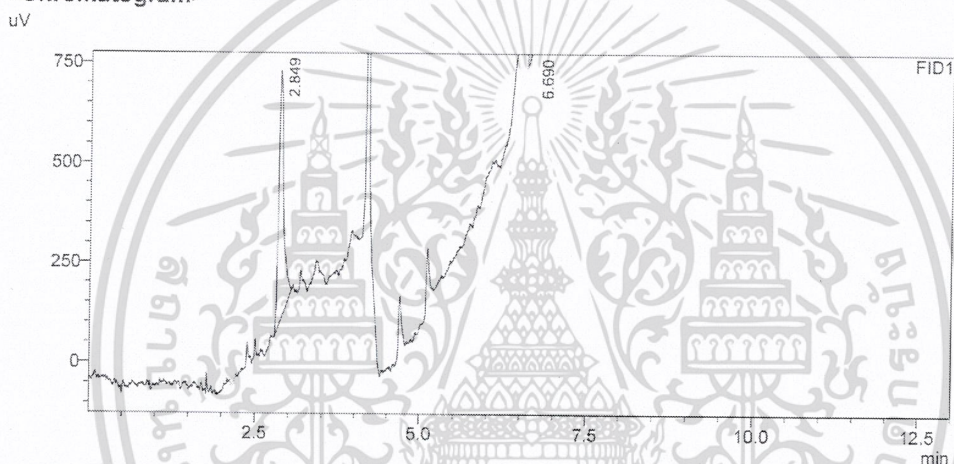
## Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set3 Af-20  
 Sample ID :  
 Data Filename : set3 Af-20.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 3/12/2562 14:24:56  
 Date Processed : 4/12/2562 14:50:17

Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.849	3280	632	7.479	mg/l		Formic
2	6.690	177314	47668	295.216	mg/l		Isobutyric Acid
Total		180594	48300				

รูปที่ ข-24 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:20 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

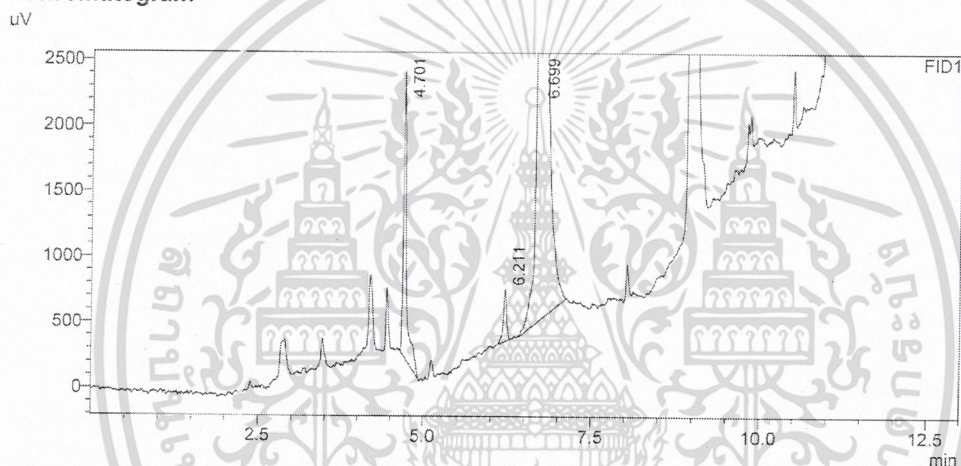
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Analysis Report

## <Sample Information>

Sample Name	: set1 Af-30	Sample Type	: Unknown
Sample ID			
Data Filename	: set1 Af-30.gcd		
Method Filename	: VFA4-12-62.gcm	Acquired by	: System Administrator
Batch Filename		Processed by	: System Administrator
Vial #	: 1		
Injection Volume	: 1 uL		
Date Acquired	: 2/12/2562 16:54:20		
Date Processed	: 4/12/2562 14:38:11		

## <Chromatogram>



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	4.701	7522	2161	55.888	mg/l		Acetic
2	6.211	1328	396	9.765	mg/l		Propionic Acid
3	6.699	123539	27647	4566.471	mg/l		Isobutylic Acid
Total		132390	30204				

รูปที่ ข-25 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:30 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

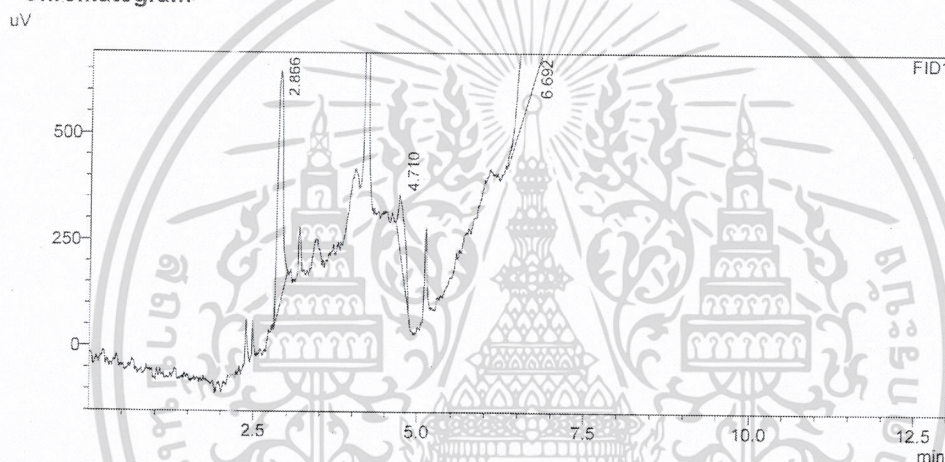
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set2 Af-30  
 Sample ID :  
 Data Filename : set2 Af-30.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 3/12/2562 12:49:56  
 Date Processed : 4/12/2562 14:45:25  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.866	3011	553	-7.515	mg/l		Formic
2	4.710	1125	122	14.598	mg/l		Acetic
3	6.692	197423	48950	-1301.988	mg/l		Isobutylic Acid
Total		201559	49625				

รูปที่ ข-26 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:30 ชุด  
 การทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

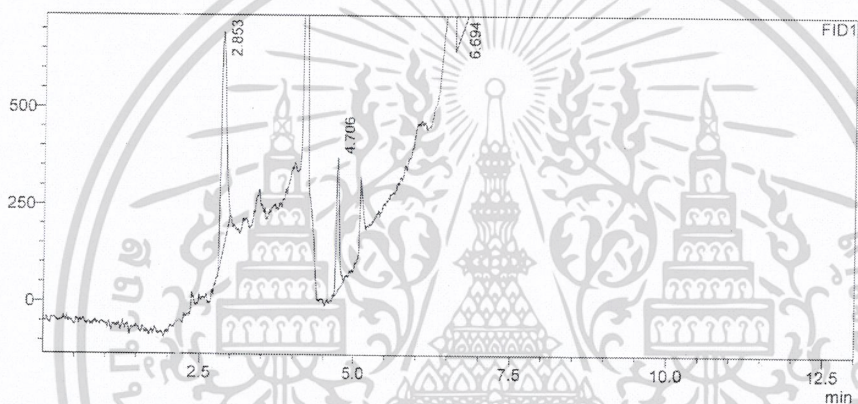
## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set3 Af-30  
 Sample ID :  
 Data Filename : set3 Af-30.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 µL  
 Date Acquired : 3/12/2562 14:43:15  
 Date Processed : 4/12/2562 14:50:41

Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;

uV



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.853	3163	572	-7.495	mg/l		Formic
2	4.706	1266	345	15.506	mg/l		Acetic
3	6.694	201739	56372	-1883.090	mg/l	S	Isobutylic Acid
Total		209167	57289				

รูปที่ ข-27 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:30 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

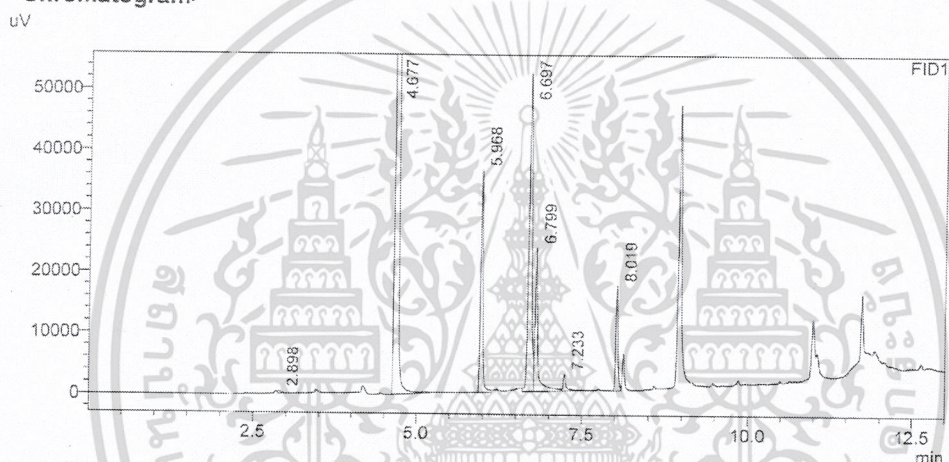
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SHIMADZU  
LabSolutions Analysis Report

## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set1 Af-40  
 Sample ID :  
 Data Filename : set 1 Af-40.gcd  
 Method Filename : VFA-1-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 2/12/2562 17:13:03  
 Date Processed : 4/12/2562 14:36:17  
 Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.898	1380	377	-7.735	mg/l	V	Formic
2	4.677	764118	265052	4939.126	mg/l	S	Acetic
3	5.968	86318	36167	349.155	mg/l		Propionic Acid
4	6.697	177973	51765	242.895	mg/l		Isobutyric Acid
5	6.799	72974	23296	187.724	mg/l	V	butyric Acid
6	7.233	3127	2618	23.215	mg/l	V	Isovaleric Acid
7	8.019	38424	16944	108.975	mg/l		valeric Acid
Total		1151314	396218				

รูปที่ ข-28 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:40 ชุดการทดลองที่ 1 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

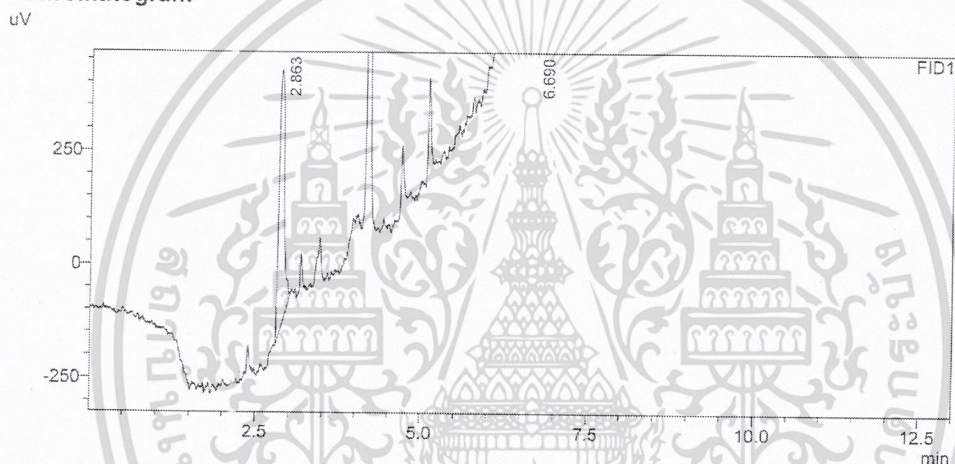
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Analysis Report

## <Sample Information>

Sample Name	: set2 Af-40	Sample Type	: Unknown
Sample ID	:	Acquired by	: System Administrator
Data Filename	: set2 Af-40.gcd	Processed by	: System Administrator
Method Filename	: VFA4-12-62.gcm		
Batch Filename	:		
Vial #	: 1		
Injection Volume	: 1 uL		
Date Acquired	: 3/12/2562 13:12:40		
Date Processed	: 4/12/2562 14:45:48		

## <Chromatogram>



## <Peak Table>

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.863	3155	567	-7.496	mg/l		Formic
2	6.690	195226	51342	-1206.957	mg/l	S	Isobutylic Acid
Total		199382	51908				

รูปที่ ข-29 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:40 ชุดการทดลองที่ 2 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

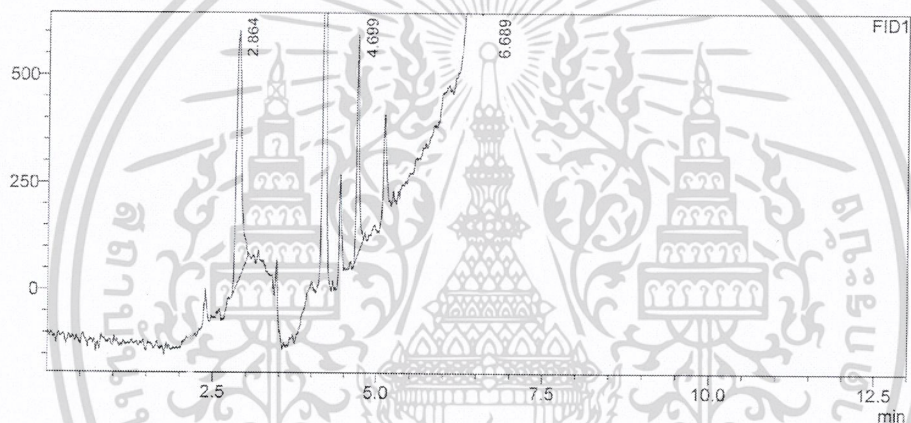
## &lt;Sample Information&gt;

Sample Name : set3 Af-40  
 Sample ID :  
 Data Filename : set3 Af-40.gcd  
 Method Filename : VFA4-12-62.gcm  
 Batch Filename :  
 Vial # : 1  
 Injection Volume : 1 uL  
 Date Acquired : 3/12/2562 15:03:24  
 Date Processed : 4/12/2562 14:51:04

Sample Type : Unknown  
 Acquired by : System Administrator  
 Processed by : System Administrator

## &lt;Chromatogram&gt;

uV



## &lt;Peak Table&gt;

Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	Name
1	2.864	3163	584	-7.495	mg/l		Formic
2	4.699	1435	510	16.598	mg/l		Acetic
3	6.689	233603	64901	4175.748	mg/l		Isobutylic Acid
Total		238201	65995				

รูปที่ ข-30 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการหมักก๊าซมีเทนที่อัตราส่วน 1:40 ชุดการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-40 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ของแข็งระเหยง่ายตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์หลังหมักก๊าซชีวภาพ

ตัวอย่าง		ผลการทดลอง COD mg/L			ค่าเฉลี่ย mg/L	SD
		ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3		
control	ครั้งที่ 1	70.14	69.82	69.81	69.92	0.19
	ครั้งที่ 2	77.48	78.66	78.48	78.21	0.64
	ครั้งที่ 3	79.80	81.71	81.64	81.02	1.08
อัตราส่วน 1:10	ครั้งที่ 1	77.04	76.26	77.71	77.00	0.73
	ครั้งที่ 2	72.43	73.82	72.72	72.99	0.73
	ครั้งที่ 3	70.73	71.36	71.22	71.10	0.33
อัตราส่วน 1:20	ครั้งที่ 1	80.03	80.17	80.60	80.27	0.30
	ครั้งที่ 2	63.65	63.57	64.87	64.03	0.73
	ครั้งที่ 3	66.12	64.63	65.04	65.26	0.77
อัตราส่วน 1:30	ครั้งที่ 1	65.57	64.75	65.51	65.28	0.46
	ครั้งที่ 2	58.45	58.53	58.42	58.47	0.06
	ครั้งที่ 3	64.07	58.98	65.18	62.74	3.30
อัตราส่วน 1:40	ครั้งที่ 1	63.77	64.36	64.81	64.31	0.52
	ครั้งที่ 2	54.50	55.62	54.26	54.79	0.73
	ครั้งที่ 3	59.67	59.30	58.90	59.29	0.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้