

การผลิตก๊าซชีวภาพจากเส้นใยปาล์มร่วมกับทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์  
จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

นางสาวสุพรรณมา ไชยปา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIOGAS PRODUCTION FROM PALM FIBER AND EMPTY FRUIT BUNCH  
BY USING SLUDGE FROM ANAEROBIC WASTEWATER TREATMENT SYSTEM

Miss Supanna Chaipa



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Energy Technology and Management

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตก๊าซชีวภาพจากเส้นใยปาล์มร่วมกับทะเลสาบปาล์ม  
เปล่าโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

โดย

นางสาวสุพรรณษา ไชยปา

สาขาวิชา

เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร ชูตินธรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์)

สุพรรณภา ไชยปา : การผลิตก๊าซชีวภาพจากเส้นใยปาล์มร่วมกับทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (BIOGAS PRODUCTION FROM PALM FIBER AND EMPTY FRUIT BUNCH BY USING SLUDGE FROM ANAEROBIC WASTEWATER TREATMENT SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, 108 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักร่วมระหว่างเส้นใยปาล์มกับทะลายปาล์มเปล่า โดยวัตถุดิบปรับสภาพทางกายภาพและทางเคมีแล้ว จำนวน 5 gVS หมักร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 300 ml ทำการหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียวเป็นระยะเวลา 40 วัน ใช้สัดส่วนระหว่างทะลายปาล์มต่อเส้นใยปาล์ม 100: 0, 80: 20, 60: 40, 50: 50, 40: 60, 20: 80, และ 0: 100 พบว่าที่สัดส่วน 50: 50 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดคือ 207.12 ml CH<sub>4</sub>/gVS จากนั้นทำการทดลองหมักด้วยสัดส่วน 50: 50 แบบเติมวัตถุดิบกึ่งต่อเนื่อง โดยที่การเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS และเติมครั้งต่อไป 0.3 gVS ทุกๆ 5 วันเป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่ามีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมากกว่าการหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) มีค่าสูงสุดคือ 221.94 ml CH<sub>4</sub>/gVS ซึ่งเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ 7.16%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากหลายๆฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัคระวิสิทธิ์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยด้วยความเอาใจใส่ อีกทั้งช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง และเป็นกำลังใจ ทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อบรมสั่งสอน ให้วิชาความรู้ตลอดจนข้อคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท อakwa นิธิฮารา คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ และสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือในการทำการทดลอง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ที่คอยช่วยเหลือชี้แนะการใช้งานเครื่องมือต่างๆอย่างดี และขอขอบคุณ ผู้บริหาร หัวหน้างาน และเพื่อนร่วมงานทุกท่าน ที่ให้กำลังใจ และคำชี้แนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท อีสเทิร์น ปาล์มมออย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบในงานวิจัยทั้งหมด

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ นิสิตมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือเกื้อกูลกันเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญ ให้ความหวังใยและสนับสนุนตลอดมาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	4
2.1.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน.....	4
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	7
2.2 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล.....	12
2.2.1 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล.....	12
2.2.2 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล.....	13
2.3 การนำก๊าซชีวภาพจากชีวมวลไปใช้ประโยชน์.....	15
2.3.1 ประโยชน์ในด้านอนุรักษ์พลังงาน.....	15
2.3.2 ประโยชน์ในด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม.....	15
2.3.3 ประโยชน์ด้านการเกษตร.....	16

2.4 การปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment).....	16
2.4.1 การปรับสภาพทางกายภาพ (Physical pretreatment).....	17
2.4.2 การปรับสภาพทางเคมี (Chemical pretreatment).....	17
2.4.3 การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี (Physicochemical pretreatment).....	18
2.4.4 การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment).....	19
2.5 ข้อมูลของปาล์มน้ำมัน.....	19
2.5.1 ข้อมูลทั่วไปของปาล์มน้ำมัน.....	19
2.5.2 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ.....	20
2.5.3 วัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.....	22
2.5.4 ลักษณะสมบัติของทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม.....	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 แผนการทดลอง.....	30
3.2 อุปกรณ์และสารเคมี.....	30
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	30
3.2.2 สารเคมี.....	31
3.3 วัตถุดิบ และการเตรียมวัตถุดิบ.....	32
3.3.1 ทะลายปาล์ม (Empty fruit bunch) และเส้นใยปาล์ม (Palm fiber).....	32
3.3.2 ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	32
3.3.3 การปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม.....	33
3.3.4 การเตรียมชุดการทดลอง Automatic Methane Potential Test.....	34
3.4 การทดลองส่วนที่ 1.....	35
3.5 การทดลองส่วนที่ 2.....	37



3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	40
3.6.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดให้คงที่.....	40
3.6.2 พารามิเตอร์ตัวแปรต้นที่ต้องการศึกษาวิจัย.....	40
3.6.3 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์.....	40
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
4.1 คุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง.....	42
4.1.1 ทะลายปาล์ม (Empty fruit bunch).....	42
4.1.2 เส้นใยปาล์ม (palm fiber).....	43
4.1.3 ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	43
4.2 ผลการทดลอง.....	45
4.2.1 ผลการศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ระหว่างวัสดุหมักร่วม 2 ชนิดคือทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม แบบเติม วัตถุดิบครั้งเดียว.....	45
4.2.2 ผลการศึกษาหาปริมาณการเติมวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิต ก๊าซมีเทนระหว่างวัสดุหมักร่วม 2 ชนิดคือทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม ใน การเติมแบบกึ่งต่อเนื่อง.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม และตะกอนจุลินทรีย์... 74	74
ก.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม.....	75
ก.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติตะกอนจุลินทรีย์.....	76

ภาคผนวก ข การเตรียมวัสดุดิบสำหรับการทดลอง.....	77
ข.1 การเตรียมวัสดุดิบสำหรับการทดลองส่วนที่ 1.....	78
ข.2 การเตรียมวัสดุดิบสำหรับการทดลองส่วนที่ 2.....	79
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีไอดี ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยง่าย ..	80
ค.1 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช.....	81
ค.2 ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดี.....	83
ค.3 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมดและค่าของแข็งระเหยง่าย.....	88
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน.....	93
ง.1 ผลการวัดปริมาณก๊าซมีเทนสะสมและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน.....	94
ง.2 ผลการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดแต่ละวัน.....	96
ง.3 ผลการวัดปริมาณก๊าซมีเทนสะสม.....	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	108

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ระดับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลาย สารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ .....	12
ตารางที่ 2.2 แสดงธาตุอาหารที่มีในวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม .....	23
ตารางที่ 2.3 ลักษณะสมบัติของทะเลลายปาล์มเปล่า.....	24
ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของเส้นใยปาล์ม .....	24
ตารางที่ 3.1 ปริมาณการเติมวัตถุดิบการทดลองส่วนที่ 1.....	36
ตารางที่ 3.2 ปริมาณการเติมวัตถุดิบการทดลองส่วนที่ 2 .....	38
ตารางที่ 3.3 วิเคราะห์ และความถี่ของค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง .....	41
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทะเลลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม และตะกอนจุลินทรีย์.....	44
ตารางที่ 4.2 ตารางค่าของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) และของแข็งระเหยง่าย (Volatile solid: VS) ก่อนเดินระบบ ของการทดลองส่วนที่ 1.....	49
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าของแข็งระเหยง่ายต่อของแข็งทั้งหมด (VS/TS) ของการทดลองส่วนที่ 1 .....	51
ตารางที่ 4.4 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองส่วนที่ 1 .....	55
ตารางที่ 4.5 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองส่วนที่ 2 เทียบกับการทดลองส่วนที่ 1.....	67

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	การทำงานของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซมีเทน ..... 6
รูปที่ 2.2	ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน..... 7
รูปที่ 2.3	ผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลายสารอินทรีย์และเกิดก๊าซชีวภาพ..... 9
รูปที่ 3.1	ชุดการทดลองหมักก๊าซชีวภาพแบบวัดปริมาณก๊าซมีเทนอัตโนมัติ.....31
รูปที่ 3.2	ทะเลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มก่อนนำมาทดลอง ..... 32
รูปที่ 3.3	ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนก่อนนำมาทดลอง..... 32
รูปที่ 3.4	ทะเลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มหลังการปรับสภาพโดยวิธีทางกายภาพ ..... 33
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนการปรับสภาพทะเลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มโดยวิธีทางเคมี ..... 34
รูปที่ 3.6	การเตรียมชุดทดลอง Automatic Methane Potential Test..... 35
รูปที่ 3.7	ขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 1..... 36
รูปที่ 3.8	การเตรียมวัตถุดิบเพื่อทำการทดลองส่วนที่ 1..... 37
รูปที่ 3.9	การเดินระบบการทดลองส่วนที่ 1..... 37
รูปที่ 3.10	ขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 2..... 39
รูปที่ 3.11	การเตรียมวัตถุดิบเพื่อทำการทดลองส่วนที่ 2..... 39
รูปที่ 3.12	การเดินระบบการทดลองส่วนที่ 2 ..... 40
รูปที่ 4.1	ลักษณะของทะเลายปาล์มเปล่าที่นำมาใช้ในการทดลอง.....42
รูปที่ 4.2	ลักษณะของเส้นใยปาล์มที่นำมาใช้ในการทดลอง ..... 43
รูปที่ 4.3	ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ทดลอง ..... 44
รูปที่ 4.4	แสดงค่าพีเอชการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1 ..... 46
รูปที่ 4.5	แสดงค่าพีเอชการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2 ..... 46
รูปที่ 4.6	แสดงค่าซีไอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1 ..... 47
รูปที่ 4.7	แสดงค่าซีไอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2 ..... 47
รูปที่ 4.8	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1 ..... 48

รูปที่ 4.9	แสดงค่าของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1 .....	49
รูปที่ 4.10	แสดงค่าของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2 .....	50
รูปที่ 4.11	แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1 .....	50
รูปที่ 4.12	แสดงค่าของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1 .....	50
รูปที่ 4.13	แสดงค่าของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2 .....	51
รูปที่ 4.14	แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 1 .....	51
รูปที่ 4.15	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1 .....	53
รูปที่ 4.16	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2 .....	53
รูปที่ 4.17	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนแต่ละวันของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1 .....	54
รูปที่ 4.18	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนแต่ละวันของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2 .....	54
รูปที่ 4.19	แสดงค่าพีเอชการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1 .....	56
รูปที่ 4.20	แสดงค่าพีเอชการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2 .....	57
รูปที่ 4.21	แสดงค่าพีเอชการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3 .....	57
รูปที่ 4.22	แสดงค่าซีโอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1 .....	58
รูปที่ 4.23	แสดงค่าซีโอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2 .....	58
รูปที่ 4.24	แสดงค่าซีโอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3 .....	59
รูปที่ 4.25	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 .....	59
รูปที่ 4.26	แสดงค่าของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1 .....	61
รูปที่ 4.27	แสดงค่าของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2 .....	61
รูปที่ 4.28	แสดงค่าของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3 .....	62
รูปที่ 4.29	แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 .....	62
รูปที่ 4.30	แสดงค่าของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1 .....	62
รูปที่ 4.31	แสดงค่าของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2 .....	63

รูปที่ 4.32	แสดงค่าของเชิงระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3 .....	63
รูปที่ 4.33	แสดงประสิทธิภาพการบำบัดของเชิงระเหยง่าย ของการทดลองส่วนที่ 2 .....	63
รูปที่ 4.34	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1 .....	65
รูปที่ 4.35	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2 .....	65
รูปที่ 4.36	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3 .....	66
รูปที่ 4.37	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนแต่ละวันของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1 .....	66
รูปที่ 4.38	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนแต่ละวันของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2 .....	66
รูปที่ 4.39	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนแต่ละวันของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3 .....	67



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศต่างๆในโลก มีความต้องการใช้พลังงานที่สูงขึ้นเนื่องจากการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม และวิถีการดำรงชีวิตที่เปลี่ยนไป โดยประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานคิดเป็น 48% ของการใช้พลังงานทั้งประเทศ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558) รัฐบาลจึงส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ สร้างความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ รวมทั้งลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554b) พลังงานทดแทนจากก๊าซชีวภาพถือเป็นหนึ่งในนโยบายของภาครัฐที่มีการใช้น้ำเสีย ของเสีย และพืชพลังงานมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีสภาพภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเติบโตของพืชพันธุ์ต่างๆ จึงมีการเพาะปลูกพืชเพื่อใช้เป็นอาหาร และใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรที่หลากหลาย โดยผลผลิตทางการเกษตรรวมถึงผลผลิตเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย เป็นพืชยืนต้นที่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ตลอดทั้งปี ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ. 2558 ราคาน้ำมันปาล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำมันปาล์มยังเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของเนื้อที่ให้ผลผลิตปาล์มที่เพิ่มขึ้นถึง 16.81% (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งซึ่งทะเลลายปาล์มสด 100 % ให้ทะเลลายปาล์มเปล่าเกิดขึ้น 32% ของผลผลิตทั้งหมด, กะลาปาล์ม 4% ของผลผลิตทั้งหมด และเส้นใย 19% ของผลผลิตทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554a) โดยทะเลลายปาล์มเปล่าและเส้นใยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่นำของเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปทางการเกษตรมาหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งทะเลลายปาล์มและเส้นใยปาล์มมีความสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ ตัวอย่างการหมักเศษวัสดุเหลือจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มได้แก่การหมักน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์, การหมักน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับทะเลลายปาล์มเปล่าภายใต้อุณหภูมิสูง เป็นต้น

สารอาหารเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน โดยที่อัตราส่วนสารอาหารคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อกำมะถัน ( C:N:P:S ) เท่ากับ 600:15:5:3 (Azeem et al., 2011) ซึ่งใน 1 ตันของทะเลสาบปาล์มสด ในทะเลสาบปาล์มเปล่า และ เส้นใยปาล์ม มีปริมาณไนโตรเจน 8 และ 23 kg ตามลำดับ และมีปริมาณฟอสฟอรัส 0.6 และ 0.1 kg ตามลำดับ ซึ่งเส้นใยปาล์มมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าทะเลสาบปาล์มเปล่า และทะเลสาบปาล์มเปล่ามีปริมาณฟอสฟอรัสมากกว่าเส้นใยปาล์ม (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540)แสดงให้เห็นว่าหากใช้ทะเลสาบปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มหมักร่วมกันจะช่วยเสริมปริมาณสารอาหารเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้ดีกว่าการหมักวัสดุเพียงอย่างเดียวใดอย่างหนึ่ง นอกจากนี้โดยส่วนใหญ่โรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มที่มีระบบบำบัดน้ำเสีย มักใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพอยู่แล้ว ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะนำทะเลสาบปาล์มเปล่าหมักร่วมกับเส้นใยปาล์มและใช้จุลินทรีย์ในบ่อบำบัดแบบไร้อากาศมาเป็นจุลินทรีย์เริ่มต้นสำหรับการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน โดยหาสัดส่วนของทะเลสาบปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มที่เหมาะสมและปริมาณการเติมวัตถุดิบในช่วงเวลาที่เหมาะสม ที่สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากที่สุด ซึ่งก๊าซมีเทนที่ได้สามารถเป็นพลังงานทดแทนเพื่อนำไปใช้ในโรงงาน และเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ดีและยั่งยืน ถือว่าเป็นทางเลือกหนึ่งที่ต้องส่งเสริมและศึกษาเพิ่มเติมเพื่อใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของประเทศให้คุ้มค่าและเกิดประโยชน์มากที่สุด เพื่อเป็นพลังงานทางเลือกสำหรับอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากทะเลสาบปาล์มเปล่าร่วมกับเส้นใยปาล์มในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยใช้จุลินทรีย์ในบ่อบำบัดแบบไร้อากาศมาเป็นจุลินทรีย์เริ่มต้นสำหรับการหมักแบบเติมครั้งเดียว
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณทะเลสาบปาล์มเปล่าร่วมกับเส้นใยปาล์มในการหมักแบบเติมกึ่งต่อเนื่อง ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ชุดการทดลอง Automatic methane potential test system ดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งที่ 35 องศาเซลเซียส ห้องปฏิบัติการ บริษัท อาควา นิชิฮาระ คอร์ปอเรชั่น จำกัด

การศึกษาวิจัยกำหนดขอบเขตการวิจัยไว้ ดังนี้



1. ทะลายปาล์มเปล่า และเส้นใยปาล์ม จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท อีสเทิร์นปาล์มออย จำกัด
2. เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เดินระบบ เป็นเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศแบบระบบถังกวนสมบูรณ์ (Completely stirred tank reactor, CSTR) โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท อีสเทิร์นปาล์มออย จำกัด
3. การทดลองเป็นระบบการหมักแบบไร้อากาศ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลของประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนของทะลายปาล์มเปล่าร่วมกับเส้นใยปาล์มในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และอัตราการเติมวัตถุดิบที่เหมาะสมในการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง
2. ได้องค์ความรู้ เทคนิคการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม โดยสามารถนำไปขยายผลสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับใช้งานจริงต่อไป
3. เป็นแนวทางในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และเป็นพลังงานทดแทน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพหรือ ไบโogas เป็นพลังงานสะอาดที่เกิดจากการนำของเสีย เช่น มูลสัตว์ น้ำเสีย จากฟาร์มปศุสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ขยะ และของเหลือใช้ทางการเกษตร มาผ่าน กระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) โดยจุลินทรีย์หลายกลุ่ม เมื่อสภาวะแวดล้อมเหมาะสม โดยจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มจะทำหน้าที่แตกต่างกัน ในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลาย เพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้

ก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทนประมาณ 50-70% และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 20-50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ), แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และไอน้ำ ( $H_2O$ ) นอกจากนี้ยังมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เช่น ซิลอกเซน (Siloxane), โฟม, คราบ (Scum), เมือกและตะกอน เป็นต้น (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

##### 2.1.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

ในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ แบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

##### ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนลดขนาดของสารอินทรีย์โดยย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลงและสามารถละลายน้ำได้ ซึ่งโมเลกุล ขนาดเล็กที่สร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานของ จุลินทรีย์ ผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น จุลินทรีย์กลุ่มที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้คือ กลุ่มไฮโดรไลติก (Hydrolytic bacteria) และกลุ่มเฟอร์เมนเตทีฟ (Fermentative bacteria)

##### ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

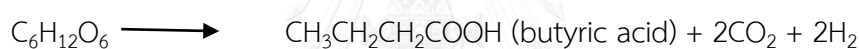
สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำจะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นแหล่งอาหาร และพลังงานโดยช่วงเริ่มต้นของกระบวนการย่อยสลายจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) เป็นผลของปฏิกิริยาเช่น กรดอะซิติก ( $CH_3COOH$ ), กรดโพรพิอิก ( $C_2H_5COOH$ ), กรดบิวทีริก

(C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>COOH) เป็นต้น และสารอื่นๆ เช่น เอทานอล (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นต้น จุลินทรีย์กลุ่มนี้เรียกว่ากลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

ขั้นตอนต่อมากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจะถูกจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนิก (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นอะซิเตต ฟอर्मेट ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน โดยไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวกำหนดทิศทางของระบบ ถ้าในระบบมีจุลินทรีย์กลุ่มอื่นที่สามารถใช้ไฮโดรเจนได้ ไฮโดรเจนจะสะสมอยู่ในระบบน้อย ได้กรดอะซิติกและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ ดังแสดงตามสมการต่อไปนี้



แต่เมื่อใดก็ตามที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในระบบมีสูงมากเมื่อเทียบกับปริมาณจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ใช้ไฮโดรเจนได้ไม่ทัน หรือถ้าค่าพีเอชต่ำมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเปลี่ยนแปลงดังแสดงในสมการ



แสดงให้เห็นว่าจะทำให้เกิดกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 เช่น กรดโพรพิโอนิก เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมด้วย ซึ่งความเข้มข้นของกรดโพรพิโอนิกที่มากกว่า 1,000 mg/l จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ไม่ใช้ออกาศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553)

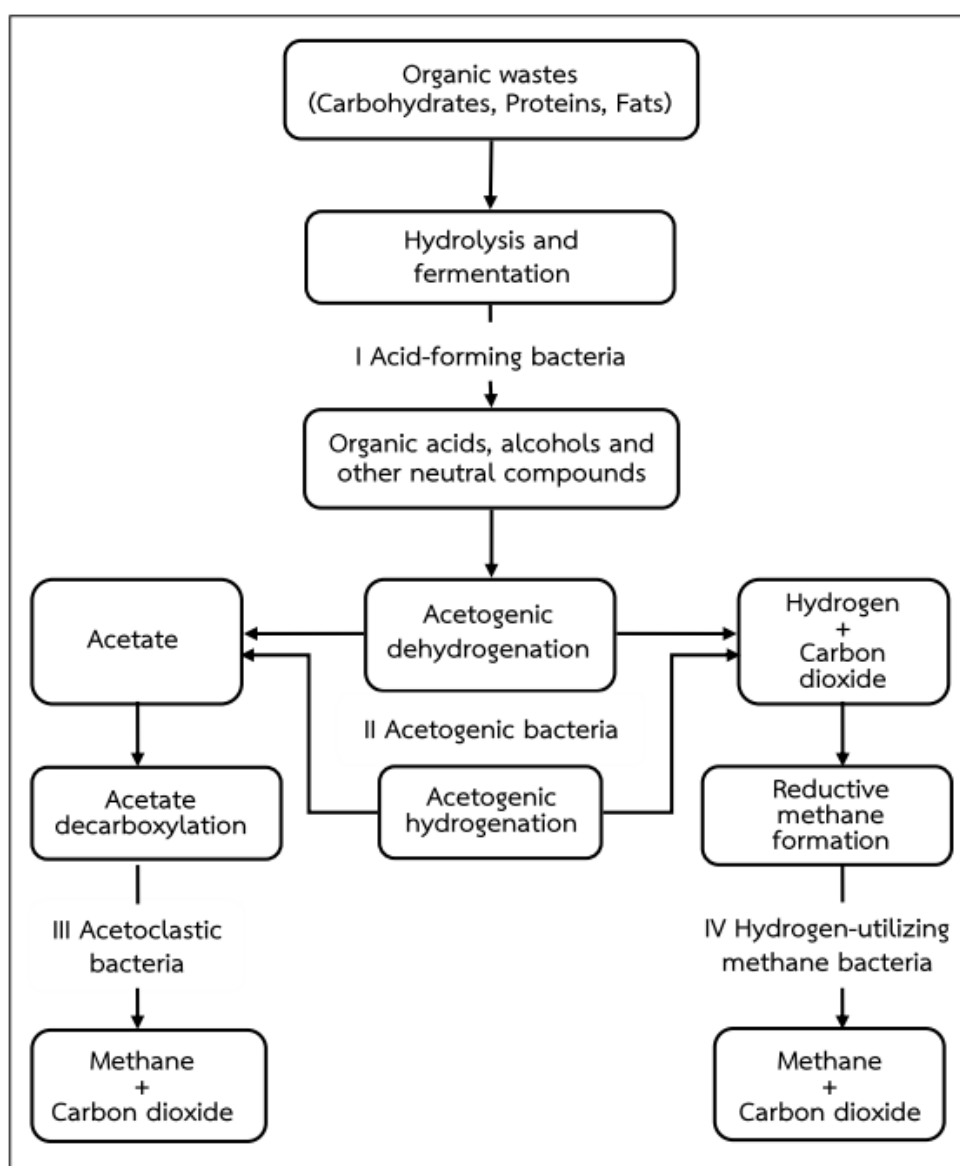
ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงมากพอที่จะยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน เรียกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดและไฮโดรเจนนี้ว่า จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ผลิตก๊าซมีเทน (Non-methanogenic bacteria)

### ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน ผลผลิตสุดท้ายคือ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งกระบวนการนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะแบบไม่ใช้ออกาศ สารตั้งต้นมาจากขั้นตอนการผลิตกรด โดยสารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุดคือกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจน ส่วนกรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง จุลินทรีย์จะต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้เป็นกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ ปฏิกิริยาแสดงดังสมการ

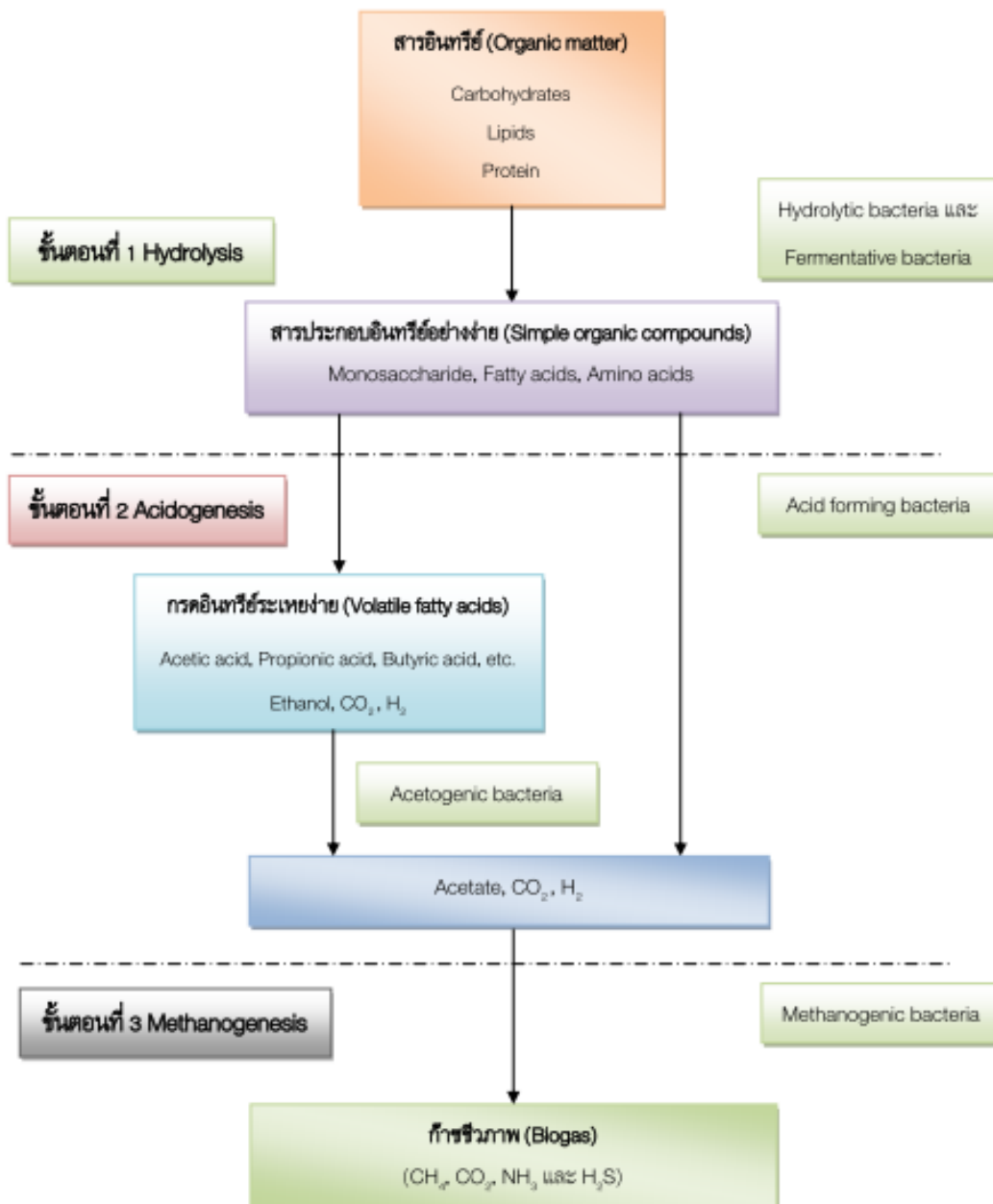


จุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมาก และมีอัตรา  
การเจริญเติบโตต่ำกว่าจุลินทรีย์กลุ่มอื่นๆ ดังนั้นการเจริญเติบโตและปริมาณของจุลินทรีย์กลุ่มนี้จึง  
เป็นปัจจัยสำคัญของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ การทำงานของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์  
ให้เกิดก๊าซมีเทน และลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน แสดงดังรูปที่ 2.1  
และ 2.2



รูปที่ 2.1 การทำงานของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซมีเทน

ที่มา : นฤมล เชาวะกระโทก (2556)



รูปที่ 2.2 ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน  
ที่มา : (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

### 2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจน เกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม ประสิทธิภาพในการย่อยสลายขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมคือ ถ้าระบบอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่

เหมาะสมการย่อยสลายสารอินทรีย์จะมีประสิทธิภาพสูง ในทางตรงกันข้ามถ้าสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสมกับการหมักจะทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำหรืออาจมีผลกระทบทำให้การหมักล้มเหลวเช่นกัน (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ในการควบคุมระบบการหมักให้มีประสิทธิภาพสูงจึงต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อม ซึ่งมีปัจจัยสำคัญ ได้แก่

### 1. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ ถ้าอุณหภูมิในการหมักแตกต่างไปจากอุณหภูมิที่เหมาะสม 10°C ประสิทธิภาพการย่อยสลายจะต่างกันถึง 100% สำหรับระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศพบว่าในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 3 ช่วง ในการย่อยสลายแต่ละช่วงจะมีจุลินทรีย์ที่ทำงานต่างชนิดกัน

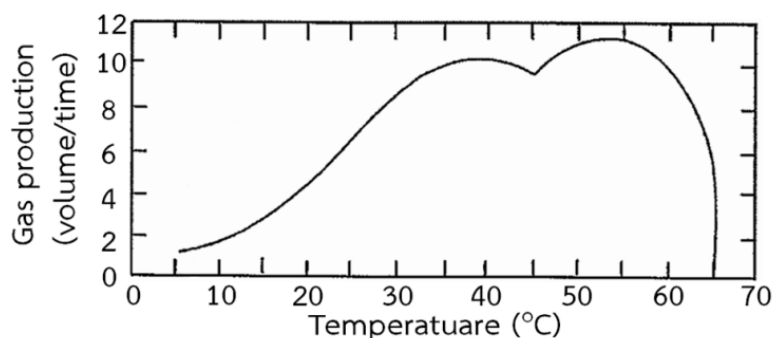
- ช่วงไซโคฟิลลิก (Psychrophilic range) มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม 5 – 15°C กลุ่มของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในช่วงอุณหภูมินี้เป็นจุลินทรีย์พวกไซโคฟิลลิก (Psychrophilic bacteria) ที่มีความคุ้นเคยกับอุณหภูมิต่ำ

- ช่วงเมโซฟิลลิก (Mesophilic range) มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 30 – 37°C กลุ่มของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในช่วงอุณหภูมินี้เป็นจุลินทรีย์พวกเมโซฟิลลิก (Mesophilic bacteria)

- ช่วงเทอร์โมฟิลลิก (Thermophilic range) มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 50 – 55°C กลุ่มของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในช่วงอุณหภูมินี้เป็นจุลินทรีย์พวกเทอร์โมฟิลลิก (Thermophilic bacteria) ที่มีความคุ้นเคยกับอุณหภูมิสูง

โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของระบบหมักแบบไร้อากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์ดีที่สุดจะเกิดในช่วงเทอร์โมฟิลลิก รองลงมาคือช่วงเมโซฟิลลิกและช่วงไซโคฟิลลิกตามลำดับ

สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นเมืองร้อนไม่จำเป็นต้องทำการเดินระบบในช่วงเทอร์โมฟิลลิก เนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานมาก อีกทั้ง Mesophilic bacteria สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีกว่า Themophilic bacteria ดังนั้นการเดินระบบในช่วงเมโซฟิลลิกจึงเพียงพอแล้ว ไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงเดินระบบ ผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลายสารอินทรีย์และเกิดก๊าซชีวภาพ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลายสารอินทรีย์และเกิดก๊าซชีวภาพ  
ที่มา : (นฤมล เชาวกระโทก, 2556)

## 2. พีเอช (pH)

เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีจุลินทรีย์หลายกลุ่มทำงานร่วมกัน ซึ่งแต่ละกลุ่มมีความต้องการค่าพีเอชที่เหมาะสมในช่วงต่างกัน จุลินทรีย์สร้างกรดจะเติบโตได้ดีในช่วงพีเอชที่เป็นกลาง มีความทนทานในการเปลี่ยนแปลงพีเอชได้ดี ถึงแม้ว่าค่าพีเอชจะลดลงเหลือ 4.5 ก็ไม่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์กลุ่มนี้ ส่วนจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนมีความทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงพีเอชน้อย สามารถทำงานได้ในช่วงค่าพีเอช 6.5 ถึง 8.2 (Azeem et al., 2011) แต่ถ้าพีเอชลดลงเหลือ 5 คือมีการสร้างกรดมากกว่ามีเทน จะเป็นอันตรายต่อกลุ่มจุลินทรีย์สร้างมีเทน

## 3. ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid)

ในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ มีการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายกลุ่มโดยจุลินทรีย์สร้างกรดที่มีหน้าที่ย่อยสลายสารเชิงซ้อนได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ต่อมากลุ่มของจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจึงย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้เป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในรูปแบบของก๊าซชีวภาพ ในกรณีที่การสร้างและการใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายไม่สมดุลกัน ถ้าการสร้างมากกว่าการใช้ของกรดอินทรีย์จะมีผลทำให้ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และพีเอชลดลง ซึ่งถ้าพีเอชลดลงเหลือ 4.5 – 5.0 จะทำให้ระบบการหมักเสียสมดุล โดยสังเกตจากสภาพของถังหมักมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพลดลงในขณะที่เปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553)

#### 4. สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

ค่า Alkalinity ในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของการหมัก เมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้น จะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอช ช่วยต้านการลดลงของค่าพีเอช ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต เมื่อความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มมากขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตจะลดลง โดยค่า Alkalinity ที่เหมาะสมสำหรับระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีค่าประมาณ 1,000 – 5000 ml/l CaCO<sub>3</sub> (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553) นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนตควรมีค่า น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.4 ซึ่งระบบจะมีบัฟเฟอร์สูงเพียงพอแก่การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของระบบ ทำให้ระบบมีค่าพีเอชที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

#### 5. การเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ (Organic loading)

การเติมสารอินทรีย์เข้าระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการจัดการสารอินทรีย์ในระบบคือการตกตะกอน ระยะเวลาในการนำสารอินทรีย์ออกจากระบบ หากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่มากเกินไปในระบบจะเกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจำนวนมากจากกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดผลิตกรด ทำให้ค่าพีเอชในระบบลดลง ทำให้จุลินทรีย์สร้างมีเทนตายได้ และระบบขาดความสมดุล แต่หากเติมสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไปประสิทธิภาพในการหมักจะลดลง ดังนั้นการเติมสารอินทรีย์อย่างสม่ำเสมอสามารถช่วยให้จุลินทรีย์ทำงานได้ดี (สรศักดิ์ ท่าใหญ่, 2556) ซึ่งมีวิธีการเติมหลายวิธี ดังนี้

การเติมครั้งเดียว (Batch process) เป็นวิธีเติมสารอินทรีย์เข้าระบบเพียงครั้งเดียว และจุลินทรีย์ในระบบค่อยๆ ย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบด้วยตัวเอง ซึ่งการเติมแบบครั้งเดียวเหมาะกับบ่อหมักที่มีขนาดใหญ่ มีระยะเวลาในการกักเก็บนาน

การเติมกึ่งต่อเนื่อง (Semi – continuous process) เป็นวิธีการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบเป็นช่วงๆ ให้สอดคล้องกับแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ เช่น รอบการทำงานของโรงงาน และช่วงการเกิดของเสียในแต่ละวัน เป็นต้น ซึ่งต้องเหมาะสมกับระยะเวลาการทิ้งสารอินทรีย์เดิมที่หมักในระบบด้วย

การเติมแบบต่อเนื่อง (Continuous process) เนื่องจากวิธีนี้ทำให้ค่าตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญของระบบการหมักมีค่าคงที่ตลอดเวลาเหมาะสมสำหรับโรงงานที่มีการปล่อยของเสียตลอดเวลา หรือมีแหล่ง



ที่สามารถนำสารอินทรีย์เติมเข้าระบบได้ตลอดเวลา เช่น ฟาร์มปศุสัตว์ที่มีการล้างคอกสัตว์ตลอดทั้งวัน หรือน้ำเสียจากโรงงานที่มีบ่อปรับสภาพ และสูบเข้าระบบการหมักได้ตลอดเวลา เป็นต้น

## 6. การกวนผสม (Mixing)

ระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีการกวนผสมที่ดีจะทำให้สารอินทรีย์สัมผัสกับจุลินทรีย์ และถูกย่อยสลายอย่างทั่วถึง เป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงตามไปด้วย และยังป้องกันการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่างๆ ของถังหมัก วิธีการกวนผสมมีหลายวิธีเช่น การใช้เครื่องกวนแบบมอเตอร์อยู่ในถังหมัก, การใช้เครื่องกวนแบบมอเตอร์อยู่นอกถังหมัก, การสูบลมวนเวียนตะกอนด้วยเครื่องสูบลม เป็นต้น โดยจากการศึกษาของ นฤมล เชาวะกระโทก (2556) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการใช้น้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคแเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่าการกวนผสมที่ 24 ชั่วโมง สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดีกว่าการกวนผสมที่ 12 ชั่วโมง

## 7. สารพิษ (Toxic)

สารพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบการหมักเป็นสารจำพวกสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ก็ได้ โดยสารพิษจะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบ เช่นสารประกอบของโลหะ ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม เป็นต้น ความรุนแรงของสารพิษขึ้นอยู่กับประเภทและความเข้มข้นของสารพิษนั้นๆ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพระบบหมัก ซึ่งสารพิษอาจมาจากกระบวนการย่อยสลายเอง หรืออาจมาจากภายนอก โดยสารพิษที่เกิดขึ้นภายในระบบได้แก่

**แอมโมเนีย (Ammonia)** เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทโปรตีน หรือสารอินทรีย์ที่มีค่า C/N ต่ำมากๆ เช่นของเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ เป็นต้น ที่มีไนโตรเจน ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) หรือก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) โดยความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งหมด, อุณหภูมิ และค่าพีเอช ซึ่งเมื่อมีอุณหภูมิสูงที่จุลินทรีย์สามารถเติบโตได้ดี ปริมาณก๊าซแอมโมเนียก็จะมากขึ้นด้วย ซึ่งจะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 mg/l (นฤมล เชาวะกระโทก, 2556)

**ซัลไฟด์ (Sulfide)** เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟตสูง เช่นน้ำเสียจากโรงงานยางพารา เป็นต้น หรือเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์จำพวกโปรตีนที่มีซัลเฟต ซึ่งซัลไฟด์ที่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์คือมีความเข้มข้นสูงกว่า 200 mg/l

**โลหะหนัก (Heavy metal)** ระดับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระดับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (mg/l)
Cu	1
Zn	5
Cr <sup>6+</sup>	5
Cr <sup>3+</sup>	2000
Total chromium (Cr)	5
Ni	2
Cd	0.02
S	100
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	500
Ammonia	1500
Na <sup>+</sup>	3500
K <sup>+</sup>	2.5
Ca <sup>2+</sup>	2500
Mg <sup>2+</sup>	1000
Acrylonitrile	5
Benzene	50
CCl <sub>4</sub>	10
Chloroform	0.1
Pentachlorophenol	0.4
Cyanide	1

ที่มา : (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

## 2.2 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล

### 2.2.1 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล

เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถจำแนกได้หลายแบบขึ้นอยู่กับแนวทางในการจำแนกสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลซึ่งสารอินทรีย์มีความชื้นต่ำจะจำแนกตามปริมาณของแข็ง

(Total solid, TS) ในระบบ ซึ่งสามารถแยกออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบการย่อยสลายแบบเปียก (Wet digestion) และระบบการย่อยสลายแบบแห้ง (Dry digestion) ดังนี้

- **ระบบการย่อยสลายแบบเปียก (Wet digestion)**

ระบบการย่อยสลายแบบเปียก มีปริมาณของแข็งน้อยกว่า 15% (ประมาณ 5-15%) ชีวมวลมีความชื้นสูงประมาณ 85-95% (ไม่ต่ำกว่า 85%) ภายในถังหมักจะมีสภาพเป็นน้ำ เรียกว่าเป็นการหมักแบบใช้ความชื้นสูง หรือการหมักแบบการเติมน้ำ ซึ่งสามารถใช้งานเครื่องสูบน้ำทั่วไปในระบบได้

- **ระบบการย่อยสลายแบบแห้ง (Dry digestion)**

ระบบการย่อยสลายแบบแห้ง มีปริมาณของแข็งมากกว่า 15% (ประมาณ 20-50%) ชีวมวลมีความชื้นต่ำ ภายในถังหมักจะมีสภาพเป็นของเหลว เป็นการหมักแบบใช้ความชื้นต่ำ หรือเรียกว่าการหมักแบบไม่เติมน้ำ เครื่องสูบน้ำที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติที่สามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดหรือความหนาแน่นสูงกว่าน้ำได้

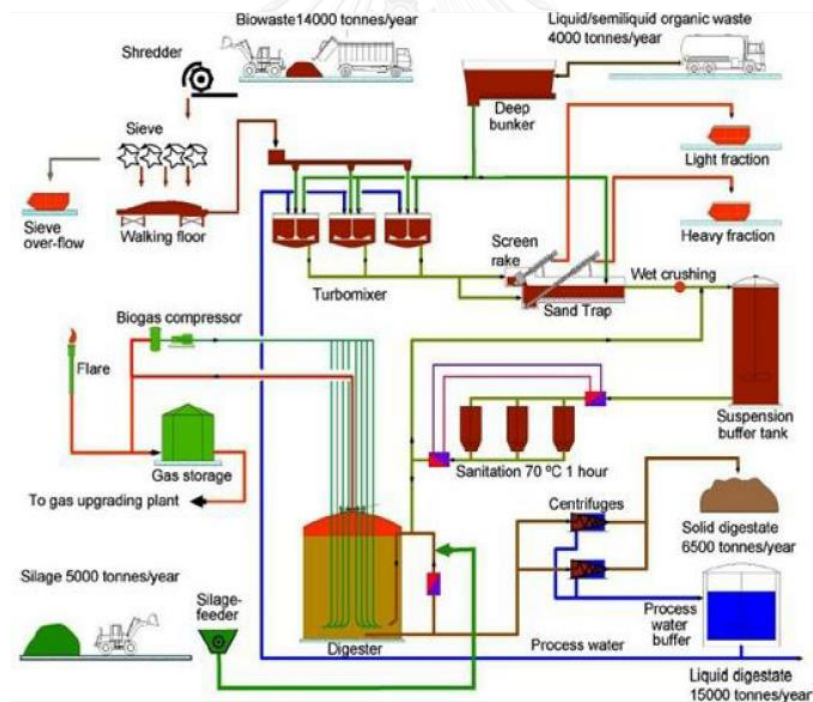
## 2.2.2 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล

การผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลสามารถใช้ได้ทั้งระบบแบบแห้งและระบบแบบเปียก ชีวมวลที่จะส่งเข้าถังหมักต้องผ่านการบดสับให้เป็นชิ้นเล็กๆ เสียก่อน ลักษณะของชีวมวลที่บดสับแล้วจะเป็นแบบที่มีความชื้นมากหรือชื้นน้อยขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของชีวมวล ถ้าชีวมวลที่ป้อนเข้าระบบมีความชื้นต่ำ อาจหมักแบบเปียกหรือแบบแห้งก็ได้ การหมักแบบแห้งมักไม่ต้องเติมน้ำให้ระบบแต่อาจใช้น้ำในระบบเพื่อช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่วนการหมักแบบเปียกไม่จำเป็นต้องเติมน้ำเสมอไป เช่น กรณีของชีวมวลที่มีความชื้นสูงมากกว่า 85% เมื่อบดให้ละเอียดแล้วสามารถนำไปหมักแบบเปียกได้เลย ในภาคเกษตรกรรมการย่อยร่วมกับมูลสัตว์ถือว่าการแก้ปัญหาของปริมาณมูลสัตว์ ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุด โดยทั่วไปมูลสัตว์จะมีปริมาณของแข็งต่ำ (<10% TS) เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการแบบไร้อากาศส่วนใหญ่จึงเป็นการหมักแบบเปียก (Lehtomaki, 2006; กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553)

เทคโนโลยีการหมักแบบเปียกเป็นเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้กับน้ำเสียและกากตะกอนทั่วไป ในขณะที่เทคโนโลยีการหมักแบบแห้งเป็นเทคโนโลยีที่ยังไม่แพร่หลาย ต้องมีการเติมน้ำให้ระบบเพื่อให้เป็นการหมักแบบเปียก จึงต้องมีการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียในการเลือกใช้เทคโนโลยี โดยปกติแล้วลักษณะของชีวมวลจะมีสัดส่วนของของแข็งสูง มีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากจำพวกเส้นใย, เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส, และลิกนิน จึงทำให้ในระบบมีสารแขวนลอยจำนวนมาก อาจสร้างปัญหาให้กับการทำงานของระบบ เนื่องจากสารแขวนลอยที่ย่อยสลายยากจะทำให้ระบบเกิดการอุดตันได้ง่าย ปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากจำพวกเส้นใย หรือผนังเซลล์พืชมีมากกว่าสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือการกำจัดค่าความต้องการ

ออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD) ในระบบน้อยกว่า 50% ดังนั้นหากต้องการให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบสูงประมาณ 80-90% ดังเช่นที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย มีความจำเป็นต้องใช้สารเคมีประเภทกรดเช่น กรดแอสซิดิก, กรดซัลฟิวริก, เอนไซม์เซลลูเลส หรือเอมิเซลลูเลส เพื่อสลายเซลลูโลสและเอมิเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลหรือสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำและย่อยสลายง่ายเสียก่อน จึงจะนำมาหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553)

ในประเทศแถบยุโรปมีการใช้ประโยชน์ของชีวมวลของรูปแบบ Green Refinery ซึ่งใช้เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบแห้ง โดยใช้ต้นแบบการบดย่อยและการหมักในท้องวัว มีการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ นอกจากนี้ยังเป็นการผลิตพลังงานทดแทน และก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานที่สะอาดนำมาใช้งานทั้งการผลิตความร้อนและการผลิตไฟฟ้า เป็นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ก๊าซไนโตรเจน และกลิ่น เมื่อมีการบริหารจัดการอย่างเหมาะสมอาจนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเพื่อการขนส่งได้ในอนาคต ตัวอย่างกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของ UTS ประเทศเยอรมัน  
ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553)

## 2.3 การนำก๊าซชีวภาพจากชีวมวลไปใช้ประโยชน์

### 2.3.1 ประโยชน์ในด้านอนุรักษ์พลังงาน

การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในด้านอนุรักษ์พลังงาน ได้แก่การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร สามารถทดแทนพลังงานในรูปแบบต่างๆ โดยก๊าซชีวภาพ 1 m<sup>3</sup> สามารถทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 kg, น้ำมันเบนซิน 0.67 l, น้ำมันเตา 0.55 l และพลังงานไฟฟ้า 1.40 kW-hr และใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

1. นำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาหุงต้มในครัวเรือน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ และโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ทิ้งทะเลาะปาล์มสด เป็นต้น

2. นำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานกล/พลังงานไฟฟ้า ได้แก่ ใช้กับชุดเครื่องยนต์สันดาปภายในต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) สามารถนำไปขับเครื่องสูบน้ำโดยตรง หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่ต้องการต้นกำลัง ส่วนการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในเครื่องยนต์นั้น สามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) (เครื่องนำเข้าจากต่างประเทศ) มีประสิทธิภาพประมาณ 40% เครื่องยนต์เบนซินหรือดีเซลขนาดเล็ก นำมาดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพร่วมกับน้ำมันเบนซินหรือดีเซล โดยการทดแทนการใช้้ำมันดีเซลได้ประมาณ 80-90% เครื่องยนต์ดีเซลขนาดกลาง นำมาดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพ ร่วมกับน้ำมันดีเซล โดยการทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ประมาณ 80% และเครื่องยนต์เบนซินหรือดีเซลขนาดกลางและใหญ่ นำมาดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้ 100% มีประสิทธิภาพประมาณ 20-25%

3. การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในการผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration system) จะเป็นการผลิตพลังงานกล/พลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อนร่วมกันซึ่งเป็นระบบที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการใช้เชื้อเพลิงให้มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งรูปแบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมกับความร้อนอาศัยหลักการนำความร้อนทิ้งที่เกิดขึ้นจากระบบการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้ากลับมาผลิต เป็นพลังงานความร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

### 2.3.2 ประโยชน์ในการจัดการสิ่งแวดล้อม

การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในการจัดการสิ่งแวดล้อมคือ มีการใช้เทคโนโลยีที่จัดการของเสียอย่างครบวงจร โดยเฉพาะของเสียหลังการเก็บเกี่ยว และของเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งมีปริมาณมาก ได้แก่ ทะล่ายและเส้นใยปาล์ม ลำต้น

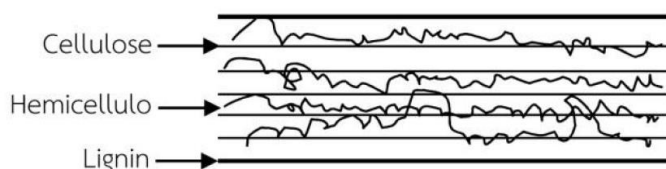
เหง้า กากมันสำปะหลัง ยอดและใบอ้อย ตอซังสับประรด และฟางข้าว เป็นต้น ซึ่งเป็นปัญหาในการจัดเก็บและทำลายแก่ผู้ประกอบการและเกษตรกร บางแห่งถูกกองทิ้งไว้โดยไม่ได้รับการจัดการที่ดี ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการจัดการของเสียที่ไม่มีประสิทธิภาพ เมื่อมีการนำของเสียมาผลิตก๊าซชีวภาพจะเป็นการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้อย่างคุ้มค่า หรือมีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด (Waste minimize) ถือเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถลดปริมาณของเสีย ลดปัญหากลิ่นและแมลง และลดปริมาณก๊าซมีเทนที่ปล่อยสู่บรรยากาศได้ เป็นการช่วยลดอัตราการเกิดภาวะเรือนกระจกอันเป็นต้นเหตุให้อุณหภูมิโลกร้อนขึ้น

### 2.3.3 ประโยชน์ด้านการเกษตร

ประโยชน์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลในด้านการเกษตรคือ สามารถนำกากตะกอนที่ผ่านการหมักมาผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อใช้ในการปลูกพืช บำรุงดิน และการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศช่วยลดปริมาณเชื้อโรค ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคพืชหลายชนิด รวมทั้งสามารถทำลายการงอกของเมล็ดวัชพืชได้อีกด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554b)

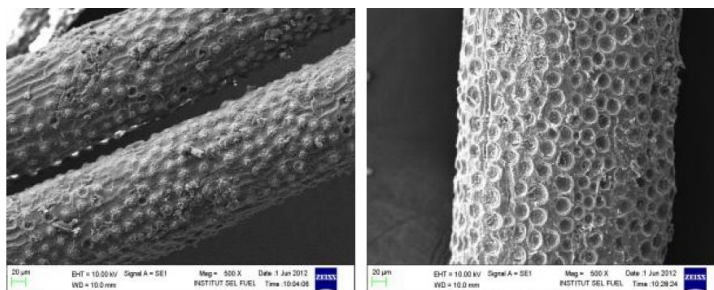
## 2.4 การปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment)

ในภาคอุตสาหกรรมเกษตร วัตถุดิบที่เป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสามารถนำมาหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้หลายอย่าง เช่น กากมันสำปะหลัง ทะลายปาล์ม ชานอ้อย เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นของเสียที่มีองค์ประกอบของพอลิเมอร์เซลลูโลสได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยวิธีทางเคมีและชีวภาพ การปรับสภาพวัตถุดิบมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดลิกนินที่เป็นองค์ประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกัน ซึ่งทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์มาก ดังนั้นจึงต้องมีการปรับสภาพวัตถุดิบก่อน เพื่อในกระบวนการหมักเป็นก๊าซชีวภาพจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้ และเป็นการเพิ่มขนาดรูพรุนของวัตถุดิบ (สุภาวดี ผลประเสริฐ, 2557) โครงสร้างทั่วไปของลิกโนเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.5 และตัวอย่างเปรียบเทียบเส้นใยปาล์มก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของลิกโนเซลลูโลส

ที่มา: (สุภาวดี ผลประเสริฐ, 2557)



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างเปรียบเทียบเส้นใยปาล์มก่อนและหลังการปรับสภาพด้วย NaOH  
ที่มา: (Nur et al., 2013)

กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบสามารถแบ่งออกได้ 4 รูปแบบดังนี้

#### 2.4.1 การปรับสภาพทางกายภาพ (Physical pretreatment)

การปรับสภาพทางกายภาพคือการใช้เครื่องมือเครื่องจักรในการหั่น สับ บด เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และลดขนาดอนุภาคของลิกโนเซลลูโลส โดยทั่วไปควรลดขนาดวัตถุดิบหลังหั่นสับแล้วให้มีขนาด 1-3 cm. และบดละเอียดให้มีขนาด 0.2-2 mm. โดยพลังงานที่ใช้ในการบดวัตถุดิบขึ้นอยู่กับขนาดของชีวมวลที่นำมาใช้ด้วย ทั้งนี้มักใช้ร่วมกับกระบวนการปรับสภาพอื่นๆด้วย เพราะในการใช้งานจริง การปรับสภาพวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กลงเพียงอย่างเดียวอาจจะสิ้นเปลืองพลังงานมาก

#### 2.4.2 การปรับสภาพทางเคมี (Chemical pretreatment)

การปรับสภาพทางเคมี สามารถใช้เคมีได้หลายชนิดและหลายวิธีการซึ่งให้ประสิทธิภาพการปรับสภาพที่ต่างกัน ได้แก่

**2.4.2.1 การปรับสภาพด้วยโอโซน (Ozonolysis)** โอโซนสามารถย่อยสายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสได้ ก๊าซโอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่ดี สามารถละลายน้ำได้ สามารถเข้าไปแตกโครงสร้างของลิกนินและปลดปล่อยสารประกอบที่ละลายน้ำได้และมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยเช่นกรดอะซิติก กรดฟลอมิก เป็นต้น ข้อดีของการปรับสภาพด้วยวิธีนี้ คือมีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน ไม่ผลิตสารตกค้างที่เป็นพิษต่อกระบวนการต่อไป และปฏิกิริยาสามารถดำเนินได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันห้อง แต่มีข้อเสียคือต้องใช้โอโซนปริมาณมาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง

**2.4.2.2 การปรับสภาพด้วยกรด (Acid hydrolysis)** กรดที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก แต่การย่อยลิกโนเซลลูโลสด้วยกรดเข้มข้นจะมีฤทธิ์กัดกร่อน มีความเป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องใช้ถังปฏิกิริยาที่ทนทานต่อการกัดกร่อน และต้องปรับพีเอชให้เป็นกลางหลังปรับสภาพวัตถุดิบเพื่อสามารถเข้าสู่กระบวนการหมักต่อไปได้ อีก

ทั้งมีค่าใช้จ่ายสูงในการคืนสภาพกรด ถึงแม้ว่าการปรับสภาพด้วยกรดจะให้ประสิทธิภาพสูงแต่ก็ยังมีค่าใช้จ่ายสูงด้วย

**2.4.2.3 การปรับสภาพด้วยด่าง (Alkaline hydrolysis)** ต่างที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนขาว ต่างสามารถแตกโครงสร้างของลิกนินและลดการเกิดผลึกของเซลลูโลสได้ การปรับสภาพด้วยด่างเป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่ต้องใช้พลังงานมากเมื่อเทียบกับการปรับสภาพด้วยกรด แต่ต้องทำการปรับพีเอชให้เป็นกลางหลังจากทำการปรับสภาพเพื่อไม่ให้ขัดขวางการทำงานของกระบวนการในขั้นตอนต่อไป

**2.4.2.4 การกำจัดลิกนินโดยการออกซิเดชัน (Oxidative delignification)** การปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) มีประสิทธิภาพในการปรับสภาพวัตถุดิบให้มีสภาพที่เอนไซม์สามารถเข้าถึงและย่อยสลายได้ดี แต่สารเคมีที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูง

#### 2.4.3 การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี (Physicochemical pretreatment)

การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี สามารถใช้ได้หลายวิธีการซึ่งให้ประสิทธิภาพการปรับสภาพที่ต่างกัน ได้แก่

**2.4.3.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion)** ชีวมวลที่ผ่านการหั่นแล้วจะถูกปรับสภาพด้วยไอน้ำอันทันที่ความดันสูง หลังจากนั้นจึงลดความดันลง โดยส่วนใหญ่จะควบคุมอุณหภูมิที่ 160-260°C ที่ความดัน 0.69-4.83 MPa ระยะเวลาหนึ่งจึงลดความดันลงให้เหลือเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการย่อยสลายเคมีเซลลูโลสและการเปลี่ยนรูปลิกนิน โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการระเบิดด้วยไอน้ำได้แก่ ระยะเวลา อุณหภูมิ และขนาดของชีวมวล ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้พลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบดด้วยเครื่องจักรอย่างเดียว และมีความคุ้มค่าเมื่อใช้ปรับสภาพไม้เนื้อแข็งและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร แต่มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้กับไม้เนื้ออ่อน ข้อเสียคือการทำลายส่วนประกอบของไซแลน (xylan) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่พบอยู่ในผนังเซลล์ของพืชและอาจก่อให้เกิดสารองค์ประกอบที่ขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการถัดไป

**2.4.3.2 การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (ammonia fiber explosion, AFEX)** การทำให้ชีวมวลสัมผัสกับแอมโมเนียเหลวที่อุณหภูมิและความดันสูงในระยะเวลาหนึ่งจึงลดความดันลง โดยมีตัวแปรสำคัญได้แก่ ภาวะบรรจุแอมโมเนีย ภาวะบรรจุทุกน้ำ อุณหภูมิ และระยะเวลาของปฏิกิริยา โดยทั่วไปกระบวนการ AFEX จะใช้แอมโมเนียเหลวปริมาณ 1-2 กิโลกรัมแอมโมเนียต่อกิโลกรัมชีวมวลแห้ง ที่อุณหภูมิ 60-120°C และความดัน 1.72-2.06 MPa เป็นเวลา 30 นาที กระบวนการนี้สามารถช่วยเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล แต่มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้ปรับสภาพชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินสูง



## 2.4.4 การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment)

การปรับสภาพทางชีวภาพ เป็นการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลส เช่น brown- fungi, white- fungi, และ soft-rot fungi เป็นต้น ข้อดีของกระบวนการนี้คือใช้พลังงานน้อย ไม่ใช้สารเคมีทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่อัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งทำให้ใช้เวลานานในการย่อยสลายและใช้พื้นที่ในการผลิตมาก นอกจากนี้มีงานวิจัยของ รุ่งทิภา สีมานาน (2553) ศึกษาการใช้หญ้าเนเปียร์หมัก ที่ปรับสภาพหญ้าเนเปียร์โดยทำการหมักร่วมกับจุลินทรีย์กลุ่มแลคติกก่อนนำมาหมักร่วมกับมูลสุกร ซึ่งเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้

## 2.5 ข้อมูลของปาล์มน้ำมัน

### 2.5.1 ข้อมูลทั่วไปของปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย เหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น เจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของประเทศไทย เป็นพืชยืนต้นที่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตทะลายได้ตลอดทั้งปี อายุการเก็บเกี่ยวมากกว่า 25 ปี จึงทำให้เกษตรกรและผู้ประกอบการโรงงานมีรายได้ต่อเนื่องตลอดทั้งปีและมีระยะเวลาติดต่อกันนาน เป็นพืชที่ทนทานต่อการเกิดภัยธรรมชาติ เช่น ภัยแล้ง ไฟไหม้สวนปาล์มน้ำมันสามารถฟื้นสภาพกลับมาเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ใหม่ นอกจากนี้ยังเป็นพืชน้ำมันที่มีความสำคัญในอนาคต โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่น้ำมันเชื้อเพลิงธรรมชาติขาดแคลน หรือมีราคาสูงมากๆ อาจจะใช้ปาล์มมาเสริมทดแทนได้บางส่วน (ศูนย์การเรียนรู้ปาล์มน้ำมันซีพีโอ) ในปี 2557 มีผลผลิตปาล์มน้ำมัน 12,503,447 ตัน โดยมีผลผลิตเฉลี่ย 3,014 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งภาคใต้ให้ผลผลิตต่อไร่มากที่สุด รองลงมาคือภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ ตามลำดับ (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมักอยู่ใกล้สวนปาล์ม มีระยะทางโดยเฉลี่ย 20 กิโลเมตร และไกลสุดประมาณ 100 กิโลเมตร โดยชาวสวนจะขนส่งด้วยรถบรรทุก การเก็บเกี่ยวผลผลิตทะลายปาล์มแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเก็บเกี่ยวผลผลิตทะลายปาล์ม

ที่มา : (www.oknation.net)

## 2.5.2 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ

น้ำมันปาล์มดิบมีกระบวนการผลิตตั้งแต่เริ่มต้นเก็บทะลายปาล์มสดจนถึงการเตรียมนำไปใช้ในกระบวนการอื่นๆ (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) แบ่งเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

### ขั้นตอนที่ 1 การรับและการเก็บทะลายปาล์มสดที่โรงงาน

ทะลายปาล์มสดที่เก็บเกี่ยวจะต้องรีบนำไปส่งที่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ทะลายปาล์มสดจะถูกขนถ่ายลงบนพื้นที่รองรับ และใส่ในตู้ขนาด 2.5 – 3.0 ตัน ระยะเวลาหลังการเก็บเกี่ยวจนถึงการนึ่งทะลายปาล์มควรสั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และไม่ควรมากเกิน 72 ชั่วโมง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดกรดไขมันอิสระจากเอนไซม์ที่อยู่ในส่วนเปลือก น้ำมันปาล์มจากผลปาล์มสดมีกรดไขมันอิสระประมาณร้อยละ 1 แต่หากทิ้งไว้นาน ปริมาณกรดไขมันอิสระจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำมันมีปริมาณและคุณภาพลดลง

### ขั้นตอนที่ 2 การอบทะลายด้วยไอน้ำ (Sterilization)

การอบทะลายด้วยไอน้ำใช้อุณหภูมิในการอบที่ 130 – 135°C ใช้ความดัน 2.5 - 3 bar ใช้ระยะเวลานาน 50 ถึง 75 นาที การอบทะลายจะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิส ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมัน ความร้อนของไอน้ำช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดจากทะลายปาล์มได้ง่าย ทำให้เนื้อเยื่อของผลปาล์มยุ่ยและง่ายต่อการหีบอัดน้ำมันในกระบวนการต่อไป

### ขั้นตอนที่ 3 การแยกผล (Stripping)

การแยกผลเป็นการส่งทะลายปาล์มเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลาย สำหรับทะลายปาล์มเปล่าจะถูกแยกออกไป จากนั้นนำผลปาล์มที่ได้ไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม เพื่อให้ส่วนเปลือกแยกออกจากเมล็ด

### ขั้นตอนที่ 4 การย่อยผลปาล์ม (Digestion)

ผลปาล์มที่แยกได้จะถูกส่งไปยังเครื่องย่อย โดยมีแผ่นตีผลปาล์มให้แตกโดยเติมน้ำร้อนเล็กน้อยเพื่อตีผลปาล์มให้ยุ่ย และนำไปสกัดน้ำมันต่อไป

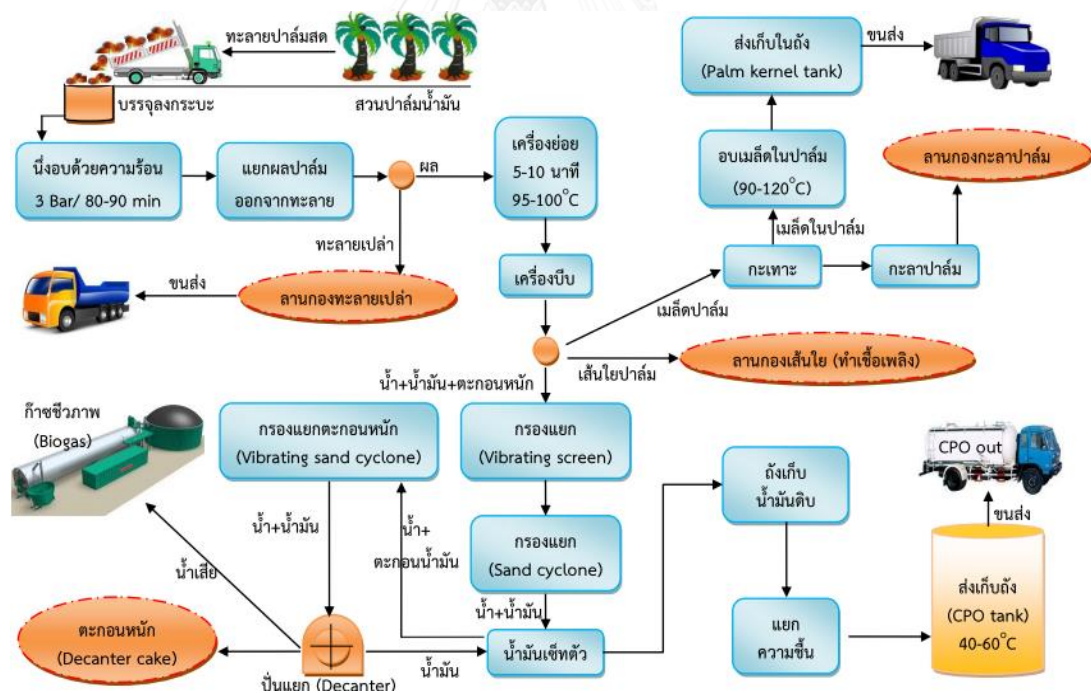
### ขั้นที่ 5 การสกัดน้ำมัน (Oil extraction)

การสกัดน้ำมันจะนำส่วนเปลือกมาอบที่อุณหภูมิ 90 – 100°C ใช้ระยะเวลานาน 20 ถึง 30 นาที หลังจากนั้นจึงผ่านเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ ของผสมที่มีน้ำมันอยู่จะมีปริมาณสารแขวนลอยสูง ทำให้แยกน้ำมันได้ยาก ในส่วนของแข็งซึ่งประกอบด้วยเมล็ดและเส้นใยถูกทำให้ร้อนจนแห้ง แล้วแยกออกจากกันด้วยไซโคลน เมล็ดปาล์มที่แยกได้จะถูกนำเข้าสู่เครื่องกระเทาะเพื่อแยกเมล็ดในและกะลา

## ขั้นที่ 6 การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (Clarification)

การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบเป็นการนำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัด ส่งไปยังถังกรองเพื่อแยกน้ำและของแข็งออกจากกัน โดยกรองชิ้นส่วนเล็กๆ และเส้นใยออก จากนั้นนำน้ำมันเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดอีกครั้ง ทำการไล่น้ำออกเพื่อให้ปาล์มแห้ง และส่งเข้าถังเก็บน้ำมันสำหรับรอการกลั่นหรือจำหน่ายต่อไป

น้ำมันปาล์มดิบที่ได้ จะแยกเป็นสองส่วน คือ ส่วนบนจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีส้มแดง (Crude palm oil olein) ปริมาณประมาณ 30 - 50% ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไขสีเหลืองส้ม (Crude palm oil stearin) ปริมาณประมาณ 50 - 70% สำหรับกากผลปาล์มจะถูกนำมาแยกเส้นใยออกจากเมล็ด และนำเมล็ดที่ได้มาอบแห้งและทำความสะอาด จากนั้นนำเข้าเครื่องกะเทาะเพื่อแยกกะลาออก และนำเมล็ดในมาอบแห้งโดยให้ความชื้นไม่เกิน 7% แล้วบรรจุลงในกระสอบเพื่อรอจำหน่ายหรือหีบน้ำมันต่อไป สำหรับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ได้จากกระบวนการการสกัดสามารถส่งเข้าสู่โรงงานอุตสาหกรรมเพื่อทำให้บริสุทธิ์ หรือจะนำไปแยกส่วน (Fractionation) ก่อนก็ได้ ซึ่งจะได้น้ำมันปาล์มที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

ที่มา: (นฤมล เชาวะกระโทก, 2556)

### 2.5.3 วัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ในโรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมีเศษวัสดุที่เป็นของแข็งที่เกิดจากกระบวนการหีบน้ำมันปาล์มเกิดขึ้นโดย มีทะลายปาล์มเปล่าเกิดขึ้น 32% ของผลผลิตทั้งหมด, เส้นใยปาล์ม 19% ของผลผลิตทั้งหมดและกะลาปาล์ม 4% ของผลผลิตทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554a) นอกจากนี้ยังมีข้อมูลพบว่าปริมาณทะลายปาล์มสด 100% เกิดเศษวัสดุจากกระบวนการหีบน้ำมันปาล์มที่เป็นทะลายปาล์มเปล่า 24%, เส้นใยปาล์ม 14% และกะลาปาล์ม 6% (Chavalparit et al., 2006) การนำเศษวัสดุมาใช้ประโยชน์นอกจากเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้วยังเพิ่มรายได้ให้กับโรงงาน โดยรายได้ดังกล่าวสามารถใช้เป็นต้นทุนในการซื้อวัตถุดิบ เป็นการเพิ่มมูลค่าทำให้ราคาของทะลายปาล์มสดมีราคาสูงมากขึ้นอีกด้วย กากปาล์มน้ำมันที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบทั้งในส่วนของเส้นใย กะลาและทะลายปาล์มเปล่านั้น เรียกว่า ชีวมวล ซึ่งพลังงานชีวมวลเป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในพืช โดยพืชจะเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์มาเก็บไว้ในส่วนต่างๆ เช่น ต้นปาล์มน้ำมันจะสะสมพลังงานไว้ทุกส่วน ตั้งแต่ผลปาล์ม เส้นใย กะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า ดังนั้นเศษวัสดุของต้นปาล์มน้ำมันจึงสามารถนำมาใช้ให้พลังงานได้ เรียกว่า พลังงานชีวมวล โดยแนวทางการนำวัสดุเศษเหลือจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาใช้ให้เกิดประโยชน์ (ธีระพงศ์ จันทนิยม, 2551) มีดังนี้

1. **ส่วนของเหลว (Condensate)** เป็นน้ำที่เกิดในหม้อนึ่งทะลายปาล์ม ในสถานะความดันจึงทำให้แบ่งในแกนทะลายปาล์มแตกตัวเป็นน้ำตาล ส่วนของเหลวนี้นี้ถูกแยกออกมาทิ้ง หากนำส่วนของเหลวมาทำให้เข้มข้นขึ้นจะได้โมลาส (molasses) เช่นเดียวกับโมลาสที่ได้จากโรงหีบอ้อย

2. **ทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunch)** เป็นส่วนของทะลายที่แยกผลปาล์มออกไปแล้ว เดิมทะลายปาล์มเปล่ามีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นที่วางไข่ของด้วงแรด ซึ่งเป็นแมลงที่กัดกินยอดปาล์มและมะพร้าว ดังนั้นโรงงานจึงต้องเผาทะลายปาล์มเปล่าทิ้ง แต่มีปัญหาเนื่องจากความชื้นสูง ปัจจุบันทะลายปาล์มเปล่าถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในการเพาะเห็ด และทำปุ๋ยหมักเนื่องจากมีธาตุอาหารสูง และสามารถพัฒนาต่อยอดในอุตสาหกรรมสิ่งทอได้ เนื่องจากเป็นเส้นใยที่มีความเหนียวและแข็งแรง

3. **เส้นใยปาล์ม (Fiber)** เป็นส่วนเปลือกนอกของผลปาล์มที่หีบน้ำมันออกไปแล้ว เส้นใยปาล์มถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อผลิตไอน้ำ (Boiler) เพื่อนำไอน้ำไปนึ่งทะลาย และผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในโรงงาน โดยเส้นใยปาล์มมีปริมาณธาตุอาหารใกล้เคียงทะลายปาล์มเปล่า จึงนำไปเป็นวัสดุทำปุ๋ยหมัก

4. **การตะกอนดีแคนเตอร์ (Decanter cake)** เป็นส่วนของกากตะกอนและเศษเปลือกผลปาล์มที่ปะปนอยู่ในน้ำมันปาล์ม ซึ่งถูกแยกออกในขั้นตอนสุดท้ายของการสกัดน้ำมันปาล์ม เป็นส่วนที่

มีโปรตีนและแคลเซียมสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับวัวนม และสามารถนำไปผลิตปุ๋ยหมักได้เช่นเดียวกับทะเลยาปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม

5. กะลา (Shell) สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อผลิตไอน้ำ เนื่องจากกะลาให้ค่าความร้อนสูง หรือนำไปผสมวัตถุดิบอื่นเพื่อทำเป็นก้อนเชื้อเพลิง และแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ได้

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มไม่มีการเติมสารเคมีใดๆ ดังนั้นสารต่างๆที่อยู่ในผลิตภัณฑ์พลอยได้ และวัสดุเศษเหลือจึงมาจากปาล์มน้ำมัน (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) โดยธาตุอาหารที่มีในวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงธาตุอาหารที่มีในวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

สถานะ	วัสดุเศษเหลือ	ปริมาณ น้ำ (%)	N*	P*	K*	Mg*	kg/ton ทะเลยา ปาล์ม สด
ของแข็ง	ทะเลยาปาล์มเปล่า	60	8	0.6	24.1	1.8	230
	เถ้าทะเลยาปาล์มเปล่า	0	-	17	450	36	4
	เส้นใย	20	23	0.1	2	0.4	145
	เถ้าเส้นใย/กะลา	0	-	17-66	170-250	40	50
	กากสลัดจ์	72	20	8	20	4	30
ของเหลว	น้ำเสียของบ่อดัก		~0.2-	~0.1-	~2	~0.5	892**
	น้ำมันสุดท้าย		1.0	0.3			315***
	น้ำทิ้งหลังการบำบัด		~0.1-	~0.1-	~2	~0.5	892**
	แบบไร้อากาศ		0.9	0.3			315***
	น้ำทิ้งหลังการบำบัด		~ 0	~0.1	~2	~0.5	892**
	แบบเต็มระบบ						315***

\* ของแข็ง kg/ton น้ำหนักแห้งของเหลว kg/m<sup>3</sup>

\*\* ระบบถังตกจม และ Separator

\*\*\* ระบบ decanter และ separator

ที่มา: (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540)

### 2.5.4 ลักษณะสมบัติของทะเลสาบปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม

ลักษณะสมบัติของทะเลสาบปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มจาก กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2553) แสดงค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของเส้นใยปาล์มว่าเท่ากับ 104 มากกว่า 100 จัดเป็นวัสดุย่อยสลายยาก ในขณะที่ทะเลสาบปาล์มเปล่ามีค่า C/N 62 น้อยกว่า 100 จึงจัดเป็นวัสดุย่อยสลายง่าย นอกจากนี้มีข้อมูลองค์ประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ ตารางที่ 2.3 ลักษณะสมบัติของทะเลสาบปาล์มเปล่า

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น
ซีโอดี (mg/l)	425000
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) (% โดยมวล)	43.6±1.2
ปริมาณของแข็งระเหยง่าย(VS) (% โดยมวล)	39.2±0.8
พีเอช	5.2±0.2
ไนโตรเจนทั้งหมด (g/kg)	2.2
เฮมิเซลลูโลส (%)	22±1.2
เซลลูโลส (%)	39.1±0.8
ลิกนิน (%)	23±0.7

ที่มา: (O-thong et al., 2012)

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของเส้นใยปาล์ม

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น
ซีโอดี (mg/l)	28453
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) (mg/l)	157
ปริมาณของแข็งระเหยง่าย(VS) (mg/l)	12
พีเอช	6.5
แอมโมเนีย ไนโตรเจน (mg/l)	480
เฮมิเซลลูโลส (%)	33.5
เซลลูโลส (%)	29.9
ลิกนิน (%)	21.6

ที่มา: (Mohammed et al., 2014)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเกิด วัฒนสิทธิ์ (2556) ทำการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเศษเหลือโรงงานน้ำมันปาล์มดิบและการหมักร่วมภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง ได้ศึกษาการหมักวัสดุเศษเหลือ ได้แก่ น้ำทิ้ง กากตะกอนดีแคแเตอร์ ทะลายปาล์มเปล่า และเส้นใย ที่อุณหภูมิ °C พบว่าสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 356.6, 293.6, 180.2 และ 217.3 ml.CH<sub>4</sub>/g VS ตามลำดับ แสดงว่ากากตะกอนดีแคแเตอร์ ทะลายปาล์มเปล่า และเส้นใยสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุหมักร่วม (Co-substrate) เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนในการหมักร่วมกับน้ำทิ้ง และพบว่าการหมักร่วมน้ำทิ้งกับกากตะกอนดีแคแเตอร์มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าวัสดุเศษเหลือชนิดอื่น ให้ผลผลิตมีเทน 423.138 ml.CH<sub>4</sub>/g VS ส่วนการหมักร่วมของน้ำทิ้งกับทะลายปาล์มให้ผลผลิตมีเทน รองลงมาคือ 278.449 ml.CH<sub>4</sub>/g VS และการหมักร่วมน้ำทิ้งกับเส้นใยให้ผลผลิตมีเทนคือ 221.933 ml.CH<sub>4</sub>/g VS

Azeem et al. (2011) ทำการศึกษาการจัดการของเสียขยะอินทรีย์ที่เป็นของแข็ง โดยมีแนวทางการจัดการขยะอินทรีย์เพื่อลดการสูญเสียของทรัพยากรธรรมชาติ และรักษาความสมดุลของระบบนิเวศมุ่งเน้นที่กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งพบว่าการหมักร่วมของของเสีย เป็นการเพิ่มอัตราการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน ตัวอย่างเช่นการลดความเป็นพิษ ความสมดุลของสารอาหาร คาร์บอนต่อไนโตรเจน ที่ทำให้จุลินทรีย์มีการทำงานร่วมกันดีขึ้น สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น และมีตัวอย่างของการหมักร่วมขยะมูลฝอยเทศบาลร่วมกับกากตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมในอัตราส่วน 1: 2 ให้ผลการผลิตก๊าซมีเทนมากกว่าการหมักขยะมูลฝอยเทศบาลเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ในงานวิจัยได้รวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการหมักแบบไร้อากาศได้แก่ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิการหมักปกติคือที่ 35°C การดูแลรักษาระบบจะมีความเสถียร และใช้พลังงานน้อยกว่าการหมักที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามการหมักที่อุณหภูมิสูงก็ยังมีข้อได้เปรียบคือมีการย่อยและผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็วกว่าการหมักที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนการกำหนดค่าพีเอช ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเกิดก๊าซมีเทนมีค่าพีเอช เท่ากับ 7 และในกระบวนการย่อยรวมทั้งกระบวนการสร้างกรดค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 5.5 - 6.5 นอกจากนี้ค่าความชื้นที่เหมาะสมที่ทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุดอยู่ที่ 60-80% สำหรับสารอาหารและแหล่งคาร์บอน การเลือกวัตถุดิบในการนำมาหมักซึ่งมีลักษณะพื้นผิว ปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และเส้นใย ที่ต่างกันจะมีผลต่อกระบวนการหมัก โดยไนโตรเจนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการสังเคราะห์โปรตีน และเป็นสารอาหารหลักของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน อัตราส่วนสารอาหาร C: N: P: S เท่ากับ 600: 15: 5: 3 เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน แต่ถ้าหากมีความเข้มข้นแอมโมเนียที่มากเกินไปในระบบจะทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลง นอกจากนี้ค่าอัตราส่วน C/N เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยมี

อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 20 - 30 สำหรับการหมักเศษผักและผลไม้ และมีค่า 20 - 35 สำหรับหมักขยะอินทรีย์

Denay et al. (2011) ทำการศึกษาปรับปรุงการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลสาบปลาเลียโดยการปรับสภาพก่อนการหมักแบบเดิมครั้งเดียว โดยการแช่โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 8% นำไปต้มที่อุณหภูมิ 100°C ในเวลาที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10, 20, 40 และ 60 นาที ซึ่งการปรับสภาพทะเลสาบปลาเลียเป็นกระบวนการที่ใช้โดยกวนผสมทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 60 นาที โดยการหมักเป็นการหมักแบบเดิมวัตถุดิบครั้งเดียว ภายใต้อุณหภูมิสูง ในการทดลอง 7 วันแรกสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนได้มากที่สุด 0.24 Nm<sup>3</sup>/kg VS เมื่อเทียบกับการหมักโดยไม่มีการปรับสภาพเบื้องต้นที่ผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.13 Nm<sup>3</sup>/kg VS และเมื่อหมักเป็นเวลา 30 วัน ได้ผลผลิตมีเทนสูงสุด 0.404 m<sup>3</sup>/kg VS ซึ่งใกล้เคียงกับการผลิตก๊าซมีเทนจากคาร์โบไฮเดรตทางทฤษฎีถึง 97% นอกจากนี้การปรับสภาพทะเลสาบปลาเลียด้วยการแช่กรดฟอสฟอริก สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนได้ 40% เมื่อเทียบกับที่ไม่ปรับสภาพก่อนการหมัก ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายจะลดลงเมื่อปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก แต่เพิ่มขึ้นเมื่อปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนนอกจากนี้ทะเลสาบปลาเลียถือว่าเป็นเศษวัสดุที่มีเป็นจำนวนมากอย่างหนึ่งซึ่งมาจากโรงงานสกัดน้ำมันพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งมาเลเซียและอินโดนีเซีย และมีทะเลสาบปลาเลียบางส่วนที่นำไปเป็นเชื้อเพลิงในการป้อนเข้าสู่เตาเผาเพื่อกระบวนการผลิต แต่การนำวัสดุเหลือใช้ไปเผาไม่ได้เป็นการนำกลับมาใช้ใหม่อย่างคุ้มค่า และยังเกิดมลพิษเพิ่มขึ้นเช่น ฝุ่นควัน และซี้เถ้า แต่การนำทะเลสาบปลาเลียมาใช้หมักเพื่อนำไปผลิตก๊าซชีวภาพ หรือหมักเพื่อนำไปเป็นปุ๋ยมีประโยชน์แก่การเพาะปลูกพืชใหม่ เป็นการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้ที่สามารถสร้างคุณค่าได้มากกว่า และไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

Chavalparit et al. (2006) ทำการศึกษาทางเลือกสำหรับการรักษาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มดิบของประเทศไทย โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการระบบนิเวศของโรงงาน ได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุเศษเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้แก่เส้นใยปาล์ม 0.6 ล้านตันต่อปี, กะลาปาล์ม 0.2 ล้านตันต่อปี, ทะลายปาล์มเปล่า 0.9 ล้านตันต่อปี สามารถใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น กะลาปาล์มและเส้นใยปาล์มใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำใช้ในกระบวนการผลิต และกะลาปาล์มสามารถนำไปผลิตถ่านกัมมันต์ได้ ทะลายปาล์มเปล่าสามารถใช้ในภาคเกษตรกรรมโดยใช้เป็นวัสดุเพาะเห็ด ซึ่งทะเลสาบปลาเลีย 1 ตัน สามารถเพาะเห็ดได้ 30 kg และนำทะเลสาบปลาเลียที่ใช้แล้วเป็นปุ๋ยให้กับต้นปาล์มที่เพาะปลูกได้ ตะกอนดีแคนเตอร์ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตอาหารสัตว์ และน้ำเสียคิดเป็น 50 - 79% ของปริมาณน้ำทั้งหมดในกระบวนการผลิต เป็น



น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงสามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพและนำกลับไปเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานได้ และน้ำเสียยังมีธาตุอาหารสูงที่สามารถนำไปรดน้ำในพื้นที่เพาะปลูกได้

ลาแพน หล้าคำมี (2553) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้มูลสุกรเป็นหัวเชื้อเริ่มต้นแบบกะและแบบกึ่งกะ โดยเริ่มต้นทำการทดลองปรับสภาพทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% เป็นเวลา 30 นาที แล้วปรับพีเอชให้เป็นกลาง ที่พีเอชเท่ากับ 7 หลังจากนั้นหมักทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้น้ำมูลสุกรเป็นหัวเชื้อเริ่มต้นแบบกะ และแบบกึ่งกะ พบว่าการหมักแบบกึ่งกะสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีกว่าแบบกะ โดยการหมักทะเลลายปาล์มเริ่มต้น 70 gVS แล้วเติมทะเลลายปาล์มเปล่าครั้งละ 10 g ทุกๆ 3 วัน จนครบ 100 g ใช้น้ำมูลสุกรเป็นหัวเชื้อเริ่มต้น 400 ml ทำการหมักเป็นเวลา 12 วัน ให้ค่าก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 105.67ml/d และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 1268 ml

Mohammed et al. (2014) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากการปรับสภาพเบื้องต้นของเส้นใยปาล์ม โดยทำการหมักแบบไร้อากาศร่วมกับปุ๋ยคอก โดยวัตถุดิบที่นำมาใช้หมักได้แก่ เส้นใยปาล์มที่ผ่านเครื่องโม่ไฟฟ้าเพื่อลดขนาด, ปุ๋ยคอกสด และน้ำเสียจากโรงงานสกัดปาล์มน้ำมันเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ วัตถุดิบทุกชนิดเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C จนกระทั่งนำมาใช้ทดลองและมีการปรับสภาพทางชีวภาพของเส้นใยปาล์มด้วยการหมักกับเห็ดนางรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลาย โดยเริ่มต้นทำการทดลอง 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างที่ 1 ปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเห็ดนางรม ทำการหมักร่วมกับปุ๋ยคอกและน้ำเสีย, ตัวอย่างที่ 2 เส้นใยปาล์มไม่ผ่านการปรับสภาพหมักร่วมกับปุ๋ยคอกและน้ำเสีย, ตัวอย่างที่ 3 ปรับสภาพเส้นใยปาล์มด้วยเห็ดนางรมและหมักร่วมกับน้ำเสีย, ตัวอย่างที่ 4 เส้นใยปาล์มไม่ผ่านการปรับสภาพ หมักร่วมกับน้ำเสีย ขนาด ทุกตัวอย่างใช้ถึงหมักขนาด 10 l ทำการหมักเป็นเวลา 30 วัน ผลการทดลองของตัวอย่างที่ 1 ให้ก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุดรองลงมาได้แก่ตัวอย่างที่ 2, 3, และ 4 โดยให้ก๊าซชีวภาพสะสม 0.116, 0.068, 0.037 และ 0.016 L/gVS ตามลำดับ และสัดส่วนปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพมากที่สุดได้แก่ตัวอย่างที่ 1 รองลงมาได้แก่ตัวอย่างที่ 2, 3, และ 4 โดยมีสัดส่วนคือ 63%, 46%, 35%, และ 31% ตามลำดับ โดยในวันที่ 10 ของการทดลอง ตัวอย่างที่ 1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นสูงที่สุด 1.95 L/d หลังจากนั้นตั้งแต่วันที่ 11 เป็นต้นไปปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลงเรื่อยๆจนคงที่ นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนพบว่า ตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีองค์ประกอบก๊าซมีเทน 40 – 60% ซึ่งมากกว่าตัวอย่างที่ 3 และ 4 ที่มีองค์ประกอบก๊าซมีเทนน้อย

นฤมล เชาวะระโทก (2556) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการใช้น้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคเนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยทำการทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าอัตราส่วนน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง 180 ml หมักร่วมกับตะกอนดีแคเนเตอร์ 10 g ที่อุณหภูมิ 35±1°C เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด

มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด  $0.350 \text{ LCH}_4/\text{gTCOD}_{\text{removal}}$  จากนั้นทำการทดลองที่ 2 ใช้ น้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักเพียงอย่างเดียว ใช้ระยะเวลาในการกวน 24 ชั่วโมง แล้วทำการทดลองที่ 3 ใช้ น้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ ระยะเวลาในการกวน 24 ชั่วโมง และการทดลองที่ 4 ใช้ น้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมัก ร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ระยะเวลาในการกวน 12 ชั่วโมง ใช้ระยะเวลาพักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน พบว่าการทดลองที่ 3 และใช้ระยะเวลาพักเก็บ 20 วัน เหมาะสมที่สุดเนื่องจากสามารถผลิต ก๊าซชีวภาพได้  $2.88 \text{ L/d}$  มีองค์ประกอบก๊าซมีเทน 64.6% สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด  $1.86 \text{ L/d}$  ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด  $0.292 \text{ LCH}_4/\text{gTCOD}_{\text{removal}}$  ซึ่งมากกว่าศักยภาพในการผลิต ก๊าซมีเทนจากการหมักน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง ที่ระยะเวลาการกวนผสม 24 ชั่วโมง ถึง 3.7 เท่า นอกจากนี้การประเมินทางด้านพลังงานพบว่าการหมักน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเล แช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์สามารถเปลี่ยนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้  $19 \times 10^9 \text{ MJ/year}$  ซึ่งเพิ่มศักยภาพในการเปลี่ยนก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานความร้อนได้มากกว่าการ หมักน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งอย่างเดียว 26 เท่า

ธีระพงศ์ จันทรนิยม & อัจฉรา เฟื่องหนู (2557) ทำการศึกษาการผลิตปุ๋ยหมักจากวัสดุ เศษเหลือในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้สรุปปัจจัยที่จำเป็นในการผลิตปุ๋ยหมักคือ คุณภาพของวัสดุที่ นำมาหมักต้องมีปริมาณธาตุอาหารพืชสูงมีค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ไม่สูงนัก หากวัสดุใดมีค่า C/N สูงสามารถเพิ่มไนโตรเจนเพื่อลดค่า C/N ลงเช่นการเติมมูลสัตว์เป็นต้น อีกทั้ง เลือกใช้จุลินทรีย์ที่มีความเฉพาะกับวัตถุดิบ เพื่อให้การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ กระบวนการหมักต้องควบคุมความชื้น และอุณหภูมิให้เหมาะสม สำหรับวัสดุเหลือใช้จากโรงงานสกัด น้ำมันปาล์มพบว่า มีปริมาณวัสดุที่นำมาทำปุ๋ยมีจำนวนมากต่อเนื่องตลอดปี มีคุณสมบัติของวัตถุดิบ คงที่ มีความเหมาะสมต่อการนำมาทำปุ๋ยหมัก คือมีค่า C/N ของทะเลลายปาล์มเปล่าประมาณ 54 ค่า พีเอชประมาณ 8.7 สามารถนำมาผสมกับตะกอนที่มีค่า C/N ประมาณ 16.8 และค่าพีเอช 8.0 ได้ ทั้งนี้ในขั้นตอนการทำปุ๋ยหมัก เริ่มต้นด้วยการสับย่อยทะเลลายปาล์มเปล่าให้มีขนาดเล็ก เพื่อความ สะดวกในการคลุกกับตะกอน แล้วใส่ตะกอนคลุกผสมในสัดส่วนทะเลลายปาล์มเปล่า 8 ส่วนต่อตะกอน 2 ส่วน คลุกให้เข้ากัน รดน้ำพอเปียก ตั้งกองปุ๋ยให้สูงประมาณ 1 m. คลุมด้วยพลาสติกเพื่อรักษา อุณหภูมิและความชื้น แล้วกลับกองหลังจากหมักผ่านไป 15 วัน และกลับกองอีกทุกๆ 7 วัน ใน ระหว่างกลับกองมีการเติมน้ำเข้าไปเพื่อรักษาความชื้น ใช้เวลาหมักทั้งหมด 45 – 60 วัน จึงนำ ปุ๋ยหมักไปใช้งานได้

Hamidou et al. (2014) ทำการศึกษาศักยภาพการหมักเส้นใยปาล์มร่วมกับปุ๋ยหมัก โดย การหมักแบบเติมครั้งเดียวที่อุณหภูมิแบบปกติ (Mesophilic range)  $37 \pm 1^\circ\text{C}$  ทำการทดลองโดย กำหนดสัดส่วนน้ำหนักแห้งระหว่างเส้นใยปาล์มต่อปุ๋ยหมัก 3: 1, 1: 1 และ 1: 3 ใช้ภาระบรรทุก

สารอินทรีย์ 30 gVS/L พบว่า การหมักเส้นใยปาล์มเพียงอย่างเดียว และปุ๋ยหมักเพียงอย่างเดียวได้ ปริมาณก๊าซชีวภาพ 90 ml/gVS ในวันที่ 12 และ 23.4 ml/gVS ในวันที่ 7 ตามลำดับ เมื่อนำเส้นใย ปาล์มหมักร่วมกับปุ๋ยหมักแล้วที่สัดส่วน 3: 1 ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด 93.6 ml/gVS ในวันที่ 11 รองลงมาคือสัดส่วน 1: 1 ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพ 86.8 ml/gVS ในวันที่ 8 และ สัดส่วน 1: 3 ได้ ปริมาณก๊าซชีวภาพน้อยที่สุด 26.4 ml/gVS ในวันที่ 8 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมดคือ 536.4, 452.2 และ 189.2 ml/gVS ตามลำดับ โดยการหมักเส้นใยปาล์มอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการกำจัด ของแข็งระเหยง่ายมากที่สุด 91.1% รองลงมาได้แก่การหมักปุ๋ยหมักอย่างเดียว 86% และการหมัก ร่วมระหว่างเส้นใยปาล์มกับปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพกำจัดของแข็งระเหยง่ายน้อยที่สุด 71%

O-thong et al. (2012) ได้ทำการศึกษาการหมักละลายปาล์มเปล (EFB) ร่วมกับน้ำเสีย โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิสูง โดยละลายปาล์มเปลผ่านการ ปรับสภาพทางกายภาพด้วยการสับให้มีขนาดเล็กกว่า 5 mm. เมื่อเปรียบเทียบการหมักน้ำเสียโรงงาน สกัดน้ำมันปาล์มเพียงอย่างเดียว ได้ก๊าซชีวภาพ 502 mlCH<sub>4</sub>/gVS หรือ 33.2 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ton POME และการหมักละลายปาล์มเปล่าเพียงอย่างเดียวได้ก๊าซชีวภาพ 202 mlCH<sub>4</sub>/gVS หรือ 79.1 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ton EFB เมื่อหมักละลายปาล์มเปล่าร่วมกับน้ำเสียในอัตราส่วนน้ำหนักแห้งต่างๆ คือ 0.4: 1, 0.8: 1 และ 2.3: 1 ได้ก๊าซมีเทน 276-340 mlCH<sub>4</sub>/gVS จากนั้นทดลองเพิ่มเติมโดยนำละลาย ปาล์มเปล่าผ่านการปรับสภาพทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% ล้างด้วยน้ำสะอาด และแบบ Hydrothermal ซึ่งอบที่อุณหภูมิ 230°C และภายใต้แรงดัน เป็นเวลา 15 นาที ใช้สัดส่วน 6.8: 1 ทำ การทดลอง 5 ตัวอย่างคือ ตัวอย่างที่ 1 ทะลายปาล์มเปล่าเพียงอย่างเดียวผ่านการปรับสภาพด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์, ตัวอย่างที่ 2 ทะลายปาล์มเปล่าผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์หมัก ร่วมกับน้ำเสีย, ตัวอย่างที่ 3 ทะลายปาล์มเปล่าเพียงอย่างเดียวผ่าน Hydrothermal, ตัวอย่างที่ 4 ทะลายปาล์มเปล่าผ่าน Hydrothermal หมักร่วมกับน้ำเสีย, ตัวอย่างที่ 5 ทะลายปาล์มเปล่าเพียง อย่างเดียวผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และผ่าน Hydrothermal และตัวอย่างที่ 6 ทะลายปาล์มเปล่าเพียงอย่างเดียวผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และผ่าน Hydrothermal หมักร่วมกับน้ำเสีย พบว่าตัวอย่างที่ 6 ได้ปริมาณก๊าซมีเทนมากที่สุด 392 mlCH<sub>4</sub>/gVS หรือ 82.7 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ton วัตถุดิบ ดังนั้นการปรับสภาพละลายปาล์มเปล่าทางเคมีและ Hydrothermal สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมของละลาย ปาล์มเปล่าและน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ใช้ถึงปฏิกรณ์การย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบระบบวัดปริมาณก๊าซมีเทนสะสมอัตโนมัติ (Automatic Methane Potential Test) ขนาด 500 ml ควบคุมอุณหภูมิ 37°C ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการ บริษัท อาควา นิชิฮาระ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ประเทศไทย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

**การทดลองส่วนที่ 1** เป็นการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดระหว่างทะเลาะปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม โดยใช้การหมักแบบเดิมวัตถุดิบครั้งเดียว

**การทดลองส่วนที่ 2** เป็นการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้สัดส่วนทะเลาะปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มที่ได้จากผลการทดลองส่วนที่ 1 ทดลองหาปริมาณการเติมวัตถุดิบที่เหมาะสมในการหมักแบบเดิมวัตถุดิบกึ่งต่อเนื่อง

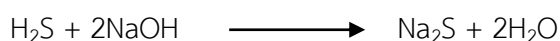
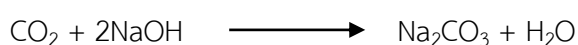
#### 3.2 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1.1 ถังปฏิกรณ์เป็นชุดการทดลอง Automatic Methane Potential Test รุ่น AMPTS II ยี่ห้อ Bioprocess Control Sweden AB ประกอบไปด้วย

- Sample incubation unit ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิให้กับขวดทดลองขนาด 500 ml จำนวน 15 ขวด โดยสามารถปรับอุณหภูมิให้กับน้ำในเครื่องเพื่อรักษาอุณหภูมิของขวดทดลองให้คงที่ตลอดการทดลอง

- CO<sub>2</sub> Fixing unit ทำหน้าที่ดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งภายในขวดขนาด 100 ml บรรจุสารละลาย Alkaline คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ ปริมาตร 80 ml ดังนั้นเมื่อเกิดก๊าซชีวภาพในขวดทดลอง ที่ต่อท่อเข้ากับ CO<sub>2</sub> Fixing unit แล้ว จะมีเพียงก๊าซมีเทน ที่จะเข้าสู่เครื่องวัดปริมาณก๊าซมีเทนต่อไป ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับก๊าซชีวภาพ ที่สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังนี้



- Gas volume measuring device ทำหน้าที่วัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นโดยอัตโนมัติ และแสดงผลปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นขณะช่วงเวลาหนึ่ง และปริมาณก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด ซึ่งแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยส่งสัญญาณด้วยระบบ Network

ชุดการทดลอง Automatic Methane Potential Test แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดการทดลองหมักก๊าซชีวภาพแบบวัดปริมาณก๊าซมีเทนอัตโนมัติ

ที่มา: (Bioprocess (2011))

3.2.1.2 เครื่องวัดพีเอช

3.2.1.3 เครื่องวัดอุณหภูมิ

3.2.1.4 โถทำแห้ง

3.2.1.5 ตู้อบปรับอุณหภูมิได้ 150°C

3.2.1.6 เตาเผาที่อุณหภูมิ 550°C

3.2.1.7 ตาชั่ง

3.2.1.8 เครื่องวัดซีไอดี ด้วยระบบ Closed Reflux, Colorimetric Method

### 3.2.2 สารเคมี

3.2.2.1 สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต

3.2.2.2 สารละลายซัลฟูริก

3.2.2.3 สารละลายเฟอร์โรอินดิเคเตอร์

3.2.2.4 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

3.2.2.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10%

### 3.3 วัตถุดิบ และการเตรียมวัตถุดิบ

#### 3.3.1 ทะลายปาล์ม (Empty fruit bunch) และเส้นใยปาล์ม (Palm fiber)

ทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มที่ใช้ในการทดลองนำมาจากลานกองเศษวัสดุของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งผ่านการหีบน้ำมันปาล์มออกไปแล้ว ลักษณะเป็นเส้นใยเหนียว และทะลายปาล์มจะมีสีน้ำตาลที่อ่อนกว่าเส้นใยปาล์ม ลักษณะทะลายปาล์มและเส้นใยปาล์มก่อนนำมาเตรียมทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.2



(ก) ทะลายปาล์มเปล่าก่อนนำมาทดลอง (ข) เส้นใยปาล์มก่อนนำมาทดลอง

รูปที่ 3.2 ทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มก่อนนำมาทดลอง

#### 3.3.2 ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ตะกอนจุลินทรีย์นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศถึงกวนสมบูรณ์ (Completely stirred tank reactor, CSTR) ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยเปิดวาล์วดูดตะกอนจากก้นบ่อ CSTR ตะกอนจะไหลผ่านท่อเข้าถังขนาด 20 ลิตร ปิดฝาถังและเก็บตะกอนไว้ที่อุณหภูมิห้องปกติ เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง ลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์เป็นตะกอนน้ำขุ่น มีสีน้ำตาลดำ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศก่อนนำมาทดลอง

### 3.3.3 การปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม

การปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มประกอบด้วยการปรับสภาพโดยวิธีทางกายภาพและการปรับสภาพโดยวิธีทางเคมี มีขั้นตอนดังนี้

**3.3.3.1 การปรับสภาพโดยวิธีทางกายภาพ** โดยการนำทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มมาฉีกออก เพื่อลดขนาดให้ง่ายต่อการนำไปดสับ จากนั้นนำทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มที่ฉีกแล้วไปสับละเอียดให้มีขนาดเล็กกว่า 10 mm ด้วยเครื่องสับอุตสาหกรรมจากโรงงานรับดสับสมุนไพร โดยขั้นตอนการปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มโดยวิธีทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 3.4

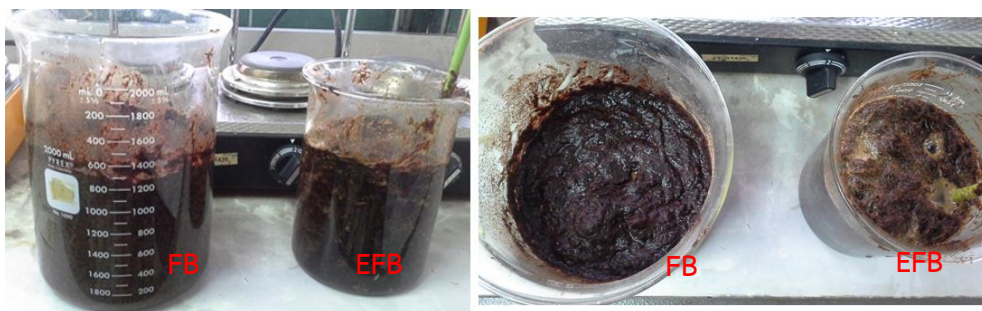


รูปที่ 3.4 ทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มหลังการปรับสภาพโดยวิธีทางกายภาพ

#### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.3.3.2 การปรับสภาพโดยวิธีทางเคมี** โดยการนำทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มที่ผ่านการสับให้มีขนาดเล็กกว่า 10 mm มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10% นำไปต้มให้เดือดเป็นเวลา 30 นาที กรองทะลายปาล์มเปล่า และเส้นใยปาล์มออก แล้วล้างโดยให้น้ำไหลผ่านจนรู้สึกว่ามีกลิ่นติดมือ แช่วัตถุดิบในน้ำสะอาด ใช้กรดซัลฟูริก 10% ( $H_2SO_4$ ) ค่อยๆหยดลงไป คนตลอดเวลาให้เข้ากัน และใช้เครื่องวัดค่าพีเอชวัดเพื่อปรับค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ระหว่าง  $7.0 \pm 0.5$  จนค่าพีเอชคงที่ ให้เทน้ำทิ้ง นำทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}C$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัตถุดิบไปตากแดดจนแห้งสนิท จึงเก็บใส่ภาชนะเพื่อเตรียมนำไปทดลอง ขั้นตอนการปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มโดยวิธีทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.5





(ก) การต้มละลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มใน NaOH 10%



ทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว  
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการปรับสภาพทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มโดยวิธีทางเคมี

### 3.3.4 การเตรียมชุดการทดลอง Automatic Methane Potential Test

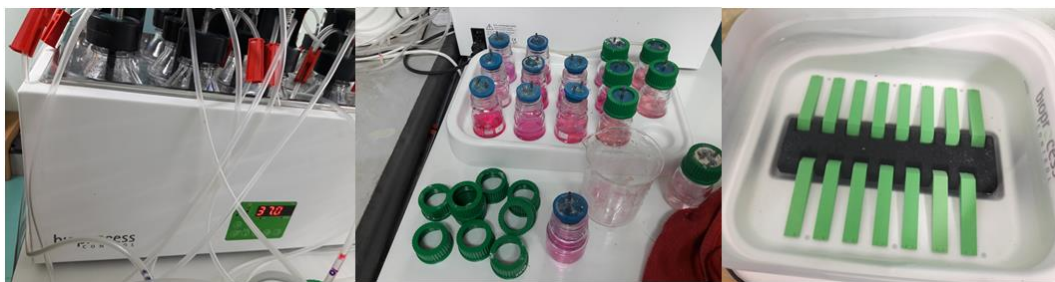
**3.3.4.1 CO<sub>2</sub> fixing unit** เตรียมสารละลาย NaOH 3 M ผสมกับ pH indicator ใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) ซึ่งมีสีชมพูม่วงหยุดใน NaOH 3 M จนมีสีชมพูม่วง เพื่อตรวจสอบค่าพีเอช เมื่อทำการทดลองหากสารละลายมีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จนค่าพีเอชในขวดลดลง สีของสารละลายในขวดจะอ่อนลงจนไม่มีสีจึงจะเปลี่ยนสารละลายในขวดใหม่ ใส่สารละลายที่เตรียมไว้ปริมาตร 80 ml ในขวดแก้ว 100 ml พร้อมต่อสายยางอ่อนด้านในขวดด้านที่จะต่อกับขวดทดลอง โดยจุ่มท่อสายยางลงใต้สารละลายในขวดประมาณ 1 cm

**3.3.4.2 Sample incubation unit** เติมน้ำ 8 l เพื่อปรับอุณหภูมิของน้ำและควบคุมอุณหภูมิของขวดทดลองให้ได้ 37°C ตรวจสอบการต่อสายไฟให้พร้อมใช้งาน

**3.3.4.3 Gas volume measuring device** เติมน้ำใน water bath ให้ได้ปริมาตรตามขีดที่กำหนด ตรวจสอบการต่อสายไฟและสายสัญญาณที่จะต่อเข้ากับระบบอินเทอร์เนต

การเตรียมชุดทดลอง Automatic Methane Potential Test แสดงดังรูปที่ 3.6





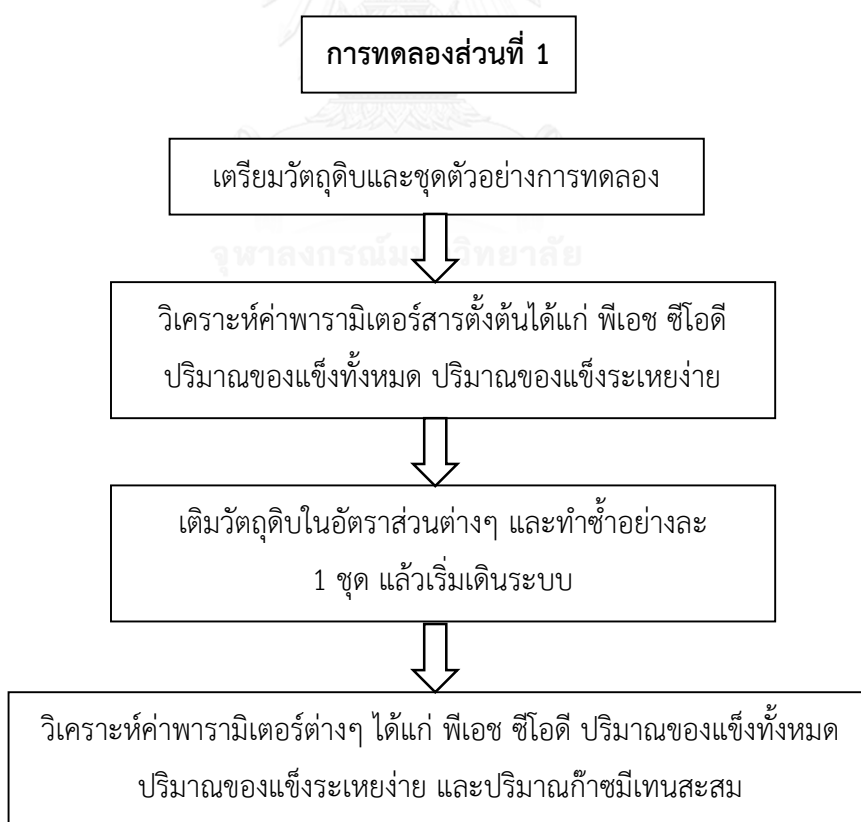
รูปที่ 3.6 การเตรียมชุดทดลอง Automatic Methane Potential Test

### 3.4 การทดลองส่วนที่ 1

การทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดระหว่าง ทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม โดยใช้การหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียว เริ่มต้นการทดลองโดย ชั่งทะลายปาล์มเปล่า และเส้นใยปาล์มในสัดส่วน 100: 0 , 80: 20 , 60: 40 , 50: 50 , 40: 60 , 20: 80 , และ 0: 100 จำนวน 5 gVS ใส่ในขวดทดลองขนาด 500 ml สัดส่วนละ 2 ขวด เตรียมตะกอน จุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศโดยเทใส่ถัง และคนให้เข้ากันทุกครั้งที่ตวงเพื่อป้องกัน ตะกอนตกอยู่ก้นถัง เตรียมตะกอนจุลินทรีย์ใส่ขวดทดลองทุกขวดเท่าๆกัน ขวดละ 300 ml และชุด ทดลองเปรียบเทียบ (Blank) ใช้ตะกอนจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว 300 ml จำนวน 1 ขวด แสดง วัตถุดิบที่ทำการทดลองดังตารางที่ 3.1 ปิดฝาขวดทดลอง เขย่าขวดให้วัตถุดิบเข้ากันทั้งหมด ตรวจวัด ค่าพารามิเตอร์ต่างๆก่อนเดินระบบได้แก่ ซีโอดี, พีเอช, ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็ง ระเหยง่าย แล้วจึงปิดขวด นำขวดทดลองจัดเรียงใน Sample incubation จนครบ 15 ขวด ต่อสาย ยางอ่อนจากขวดทดลองเข้ากับขวด CO<sub>2</sub> Fixing โดยขวดทดลอง 1 ขวดต่อ CO<sub>2</sub> Fixing 1 ขวด จน ครบทุกขวด และต่อสายยางอ่อนจากขวด CO<sub>2</sub> Fixing เข้ากับส่วน Gas volume measuring ซึ่งมี หมายเลขขวด 1 – 15 กำกับอยู่จนครบทุกขวดตามหมายเลขที่กำหนดให้ตรงกัน เริ่มตั้งค่าการวัดผล ปริมาณก๊าซมีเทนผ่านระบบที่เชื่อมต่อ Server ทำการหมักเป็นเวลา 40 วัน กวนผสมโดยการเขย่า ขวดวันละ 1 ครั้ง ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมจะถูกวัดโดยอัตโนมัติและแสดงผลที่คอมพิวเตอร์ ขั้นตอน การทดลองส่วนที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.7 และรูปประกอบแสดงการทดลองส่วนที่ 1 ดังรูปที่ 3.8 - 3.9

ตารางที่ 3.1 ปริมาณการเติมวัตถุดิบการทดลองส่วนที่ 1

ตัวอย่าง ที่	สัดส่วนระหว่าง ทะเลาะปาล์มเปล่า ต่อเส้นใยปาล์ม (EFB : FB)	ปริมาณการ เติมทะเลาะ ปาล์มเปล่า (EFB) (gVS)	ปริมาณการ เติมเส้นใย ปาล์ม (FB) (gVS)	ปริมาณการ เติมวัตถุดิบ ทั้งหมด (gVS)	ปริมาณการเติม ตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge) (ml)
1	100:0	5	0	5	300
2	80:20	4	1	5	300
3	60:40	3	2	5	300
4	50:50	2.5	2.5	5	300
5	40:60	2	3	5	300
6	20:80	1	4	5	300
7	0:100	0	5	5	300
Blank	-	-	-	-	300



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 1



รูปที่ 3.8 การเตรียมวัสดุดินเพื่อทำการทดลองส่วนที่ 1



รูปที่ 3.9 การเดินระบบการทดลองส่วนที่ 1

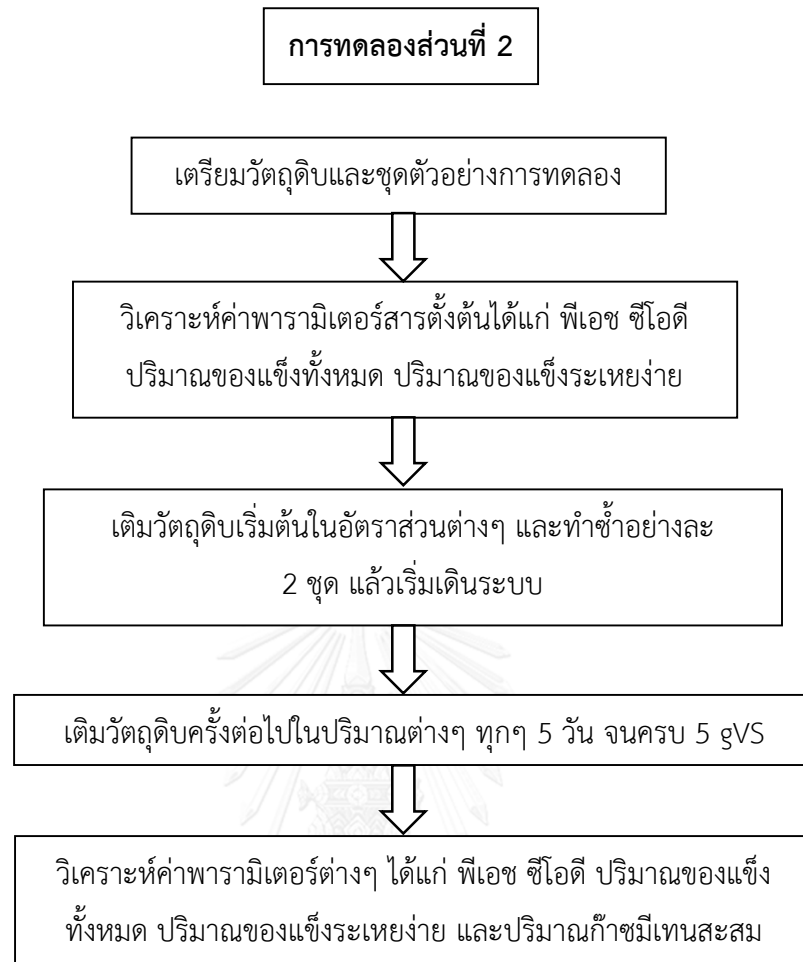
### 3.5 การทดลองส่วนที่ 2

นำผลการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งได้สัดส่วนระหว่างทะเลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มที่เหมาะสม มาทดลองหมักแบบเติมวัสดุคอกิ่งต่อเนื่อง กำหนดปริมาณการเติมทะเลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มในสัดส่วนที่เหมาะสม โดยมีปริมาณการเติมวัสดุคอกิ่งในครั้งแรก และเติมทุกๆ 5 วัน ในปริมาณที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 3.2 ใส่วัสดุคอกิ่งในขวดทดลองขนาด 500 ml ทำซ้ำอย่างละ 2

ขวด เตรียมตะกอนจุลินทรีย์ใส่ขวดทดลองทุกขวดเท่าๆกัน ขวดละ 300 ml และชุดทดลองเปรียบเทียบ (Blank) ใช้ตะกอนจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว 300 ml จำนวน 1 ชุด รวมชุดการทดลองทั้งหมด 13 ชุด เขย่าขวดให้วัตถุดิบผสมเข้ากันทั้งหมด ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆก่อนเดินระบบ ได้แก่ ซีโอดี, พีเอช, ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยง่าย แล้วจึงปิดขวด นำขวดทดลองจัดเรียงใน Sample incubation ต่อสายยางอ่อนจากขวดทดลองเข้ากับขวด CO<sub>2</sub> Fixing โดยขวดทดลอง 1 ขวดต่อ CO<sub>2</sub> Fixing 1 ชุด จนครบทุกขวด และต่อสายยางอ่อนจากขวด CO<sub>2</sub> Fixing เข้ากับส่วน Gas volume measuring ซึ่งมีหมายเลขขวดกำกับอยู่จนครบทุกขวดตามหมายเลขที่กำหนดให้ตรงกัน แล้วเริ่มตั้งค่าการวัดผลปริมาณก๊าซมีเทนผ่านระบบอินเตอร์เน็ต ทำการหมักเป็นเวลา 30 วัน กวนผสมโดยการเขย่าขวดวันละ 1 ครั้ง ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมจะถูกวัดโดยอัตโนมัติ และแสดงผลที่คอมพิวเตอร์ แผนผังขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.10 และรูปประกอบแสดงการทดลองส่วนที่ 2 ดังรูปที่ 3.11 - 3.12

ตารางที่ 3.2 ปริมาณการเติมวัตถุดิบการทดลองส่วนที่ 2

ตัวอย่างที่	ปริมาณการเติมครั้งแรก (gVS)	ปริมาณการเติมครั้งต่อไป ทุกๆ 5 วัน (gVS)	ปริมาณการเติมวัตถุดิบทั้งหมด (gVS)
1	3.5	0.3	5
2	2.75	0.45	5
3	2.0	0.6	5
4	1.25	0.75	5
Blank	-	-	-



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 2



รูปที่ 3.11 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อทำการทดลองส่วนที่ 2



รูปที่ 3.12 การเดินระบบการทดลองส่วนที่ 2

### 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

#### 3.6.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดให้คงที่

- 3.6.1.1 น้ำหนักแห้งของวัตถุดิบที่ใช้หมักรวม 5 gVS
- 3.6.1.2 ตะกอนจุลินทรีย์ ปริมาตร 300 ml
- 3.6.1.3 ขวดทดลองขนาด 500 ml
- 3.6.1.4 อุณหภูมิในการทดลองคงที่  $37 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$
- 3.6.1.5 การเขย่าขวดเพื่อให้วัตถุดิบผสมเข้ากัน วันละ 1 ครั้ง

#### 3.6.2 พารามิเตอร์ตัวแปรต้นที่ต้องการศึกษาวิจัย

- 3.6.2.1 ในการทดลองส่วนที่ 1 ตัวแปรต้นคือ สัดส่วนระหว่างทะเลาะลายปาล์มเปล่า และเส้นใยปาล์ม โดยใช้การหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียว คือ 100: 0 , 80: 20 , 60: 40 , 50: 50 , 40: 60 , 20: 80 , และ 0: 100
- 3.6.2.2 ในการทดลองส่วนที่ 2 ตัวแปรต้นคือ ปริมาณการเติมวัตถุดิบในครั้งแรก และเติมทุกๆ 5 วัน ในปริมาณที่แตกต่างกัน

#### 3.6.3 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ลักษณะทะเลาะลายปาล์มและเส้นใยปาล์มนั้น จะวิเคราะห์ทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ซีไอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด



ปริมาณของแข็งระเหยง่าย และปริมาณก๊าซมีเทนสะสม ซึ่งวิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ของทะเลสาบปาล์ม และเส้นใยปาล์มมีดังนี้

- 3.6.3.1 ค่าพีเอช (pH) มีค่าความเป็นกรด ต่าง ตั้งแต่ 0 ถึง 14
- 3.6.3.2 ซีโอดีทั้งหมด (Total chemical oxygen demand: TCOD)
- 3.6.3.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS)
- 3.6.3.4 ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile solid: VS)
- 3.6.3.5 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (Accumulated methane gas volume)

วิธีวิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ แสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 วิธีวิเคราะห์ และความถี่ของค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่
ค่าพีเอช	Electrometric method 4500-H <sup>+</sup> B.	2 ครั้ง
ซีโอดีทั้งหมด	Closed reflux, colorimetric method	2 ครั้ง
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	Total solid dried at 103-105°C	2 ครั้ง
ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	Volatile solid ignited at 550 °C	2 ครั้ง
ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม	Bio-methane potential (BMP) tests	ทุกวัน

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 คุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วิเคราะห์ลักษณะทางด้านกายภาพของทะเลาะปาล์มเปล่าพบว่า มีลักษณะเป็นเส้นใยแข็ง แหวม ส่วนลักษณะทางด้านกายภาพของเส้นใยปาล์มพบว่าเป็นเส้นใยอ่อน เหนียวนุ่ม แต่ทะเลาะปาล์มเปล่ามีสีน้ำตาลที่อ่อนกว่าเส้นใยปาล์ม ในการปรับสภาพทางกายภาพโดยการบดสับให้มีขนาดเล็กลงเป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการหมักระหว่างวัตถุดิบและตะกอนจุลินทรีย์ โดยทะเลาะปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มจัดเป็นวัตถุดิบจำพวกลิกโนเซลลูโลส มีลิกนินที่อยู่บนผิวของวัสดุเคลือบห่อหุ้มเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยลิกนินจะทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Nur et al., 2013; สุภาวดี ผลประเสริฐ, 2557) ดังนั้นการปรับสภาพก่อนนำวัตถุดิบไปทดลอง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งขั้นตอนการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีสีน้ำตาลหลุดออกมาทั้งทะเลาะปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม และพบว่าวัตถุดิบทั้งสองมีความแข็งลดลง

##### 4.1.1 ทะเลาะปาล์ม (Empty fruit bunch)

คุณลักษณะทางกายภาพของทะเลาะปาล์มเปล่าก่อนการปรับสภาพมีสีน้ำตาล เป็นเส้นใยเล็ก แข็ง ความยาวประมาณ 50 – 150 mm ผ่านการปรับสภาพทางกายภาพและทางเคมี แล้วนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) มีค่า 88.96%, ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) มีค่า 86.07%, ปริมาณความชื้น 11.04% คิดเป็นสัดส่วน VS/TS เท่ากับ 96.75% ซึ่งพบว่าค่า VS/TS มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ การเกตุ วัฒนสิทธิ์ (2556) และ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2553) ที่ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด(TS) มีค่า 53.83% และ 32.07% ตามลำดับ และปริมาณของแข็งระเหยง่าย(VS) มีค่า 45.72% และ 29.65% ตามลำดับ คิดเป็นสัดส่วน VS/TS เท่ากับ 96.75% และ 92.45% ตามลำดับ ลักษณะทะเลาะปาล์มเปล่าที่นำมาใช้ทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของทะเลาะปาล์มเปล่าที่นำมาใช้ในการทดลอง



#### 4.1.2 เส้นใยปาล์ม (palm fiber)

คุณลักษณะทางกายภาพของเส้นใยปาล์มก่อนการปรับสภาพมีสีน้ำตาลเข้ม เป็นเส้นใยเล็ก เหนียวนุ่ม ความยาวประมาณ 50 – 100 mm ผ่านการปรับสภาพทางกายภาพและทางเคมี เมื่อวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของเส้นใยปาล์มพบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) มีค่า 70.58%, ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) มีค่า 66.02% และปริมาณความชื้น 29.42% คิดเป็นสัดส่วน VS/TS เท่ากับ 93.54% พบว่าค่า VS/TS มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ การเกตุ วัฒนสิทธิ์ (2556) และ Nur et al. (2013) ซึ่งค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) มีค่า 75.49% และ 89.6% ตามลำดับ และ ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) มีค่า 66.42% และ 84.85% ตามลำดับ คิดเป็นสัดส่วน VS/TS เท่ากับ 87.99% และ 94.7% ตามลำดับ ลักษณะเส้นใยปาล์มที่นำมาใช้ทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะของเส้นใยปาล์มที่นำมาใช้ในการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะทางกายภาพของทะลายปาล์มเปล่ากับเส้นใยปาล์มพบว่า ทะลายปาล์มเปล่ามีสีน้ำตาลที่อ่อนกว่าเส้นใยปาล์ม มีลักษณะเส้นที่หนา และแข็งกว่าเส้นใยปาล์ม การปรับสภาพทางกายภาพโดยการบดสับให้มีขนาดเล็กลงเป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการหมัก ระหว่างวัตถุดิบและตะกอนจุลินทรีย์ โดยทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มจัดเป็นวัตถุดิบจำพวก ลิกโนเซลลูโลส ซึ่งมีลิกนินที่อยู่บนผิวของวัสดุเคลือบห่อหุ้มเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินจะทนต่อการย่อยสลาย (Nur et al., 2013) ดังนั้นการปรับสภาพก่อนนำวัตถุดิบไปทดลอง จะช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งในขั้นตอนการปรับสภาพมีสีน้ำตาลหลุดออกกับน้ำ ทั้ง ทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม โดยการทดลองของ Denay et al. (2011) พบว่าการปรับสภาพ ทะลายปาล์มก่อนหมักแบบเดิมครั้งเดียว ด้วยการแช่โซเดียมไฮดรอกไซด์ 8% เป็นเวลา 60 นาที สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนได้ 100%

#### 4.1.3 ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ ไร้อากาศ CSTR ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มพบว่า ตะกอนจุลินทรีย์มีสีน้ำตาลดำ เป็นตะกอนชั้น มี กลิ่นเหมือนก๊าซไข่เน่าซึ่งเป็นกลิ่นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของก๊าซชีวภาพ

(สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) แสดงว่าตะกอนจุลินทรีย์นำมาใช้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ เมื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนจุลินทรีย์พบว่า มีค่าของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 34,700 mg/l และค่าของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (VSS) เท่ากับ 25,400 mg/l คิดเป็นสัดส่วน SS/VSS เท่ากับ 73.20% จะเห็นได้ว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก มีค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยอยู่ที่ 7.6 ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ 6.8-7.8 (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ดังนั้นจึงสามารถนำตะกอนจุลินทรีย์นี้มาใช้ในการทดลองได้ ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ทดลอง

คุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาใช้ทดลองส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทะเลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม และตะกอนจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	หน่วย	ทะเลายปาล์มเปล่า	เส้นใยปาล์ม	ตะกอนจุลินทรีย์
ค่าพีเอช	-	7-8	7-8	7.5-8
ค่าของแข็งทั้งหมด (TS)	g/100g	88.96	70.58	-
ค่าของแข็งระเหยง่าย (VS)	g/100g	86.07	66.02	-
ค่าของแข็งแขวนลอย	mg/l	-	-	34,700
ค่าของแข็งแขวนลอย ระเหยง่ายทั้งหมด (VSS)	mg/l	-	-	25,400
VS/TS	%	96.75	93.54	-
VSS/SS	%	-	-	73.20%

## 4.2 ผลการทดลอง

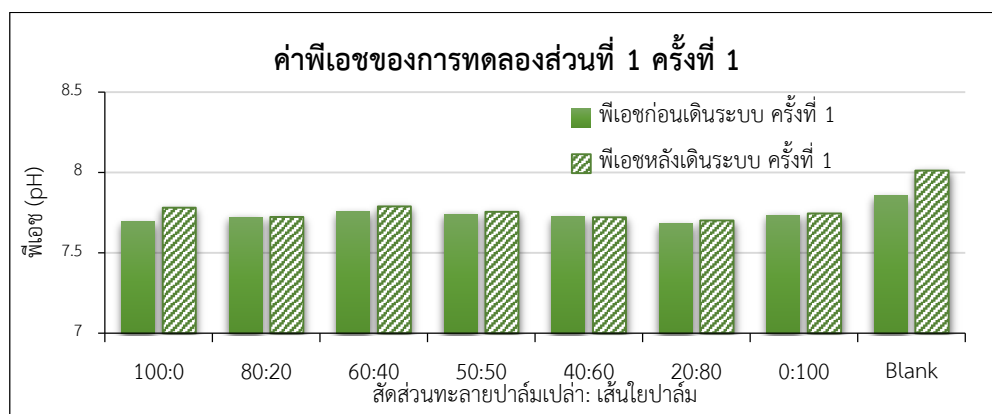
การวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากทะเลาะปาล์มเปล่า ร่วมกับเส้นใยปาล์มในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ CSTR มาเป็นจุลินทรีย์เริ่มต้นสำหรับการหมักโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองคือ การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาลำดับส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนระหว่างวัสดุหมักรวม 2 ชนิดคือทะเลาะปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม แบบเดิมวัตถุดิบครั้งเดียว ทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง และการทดลองส่วนที่ 2 เป็นการนำผลการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งได้ลำดับระหว่างทะเลาะปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มที่เหมาะสม มาทดลองหมักแบบเดิมวัตถุดิบกึ่งต่อเนื่อง ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังนี้

### 4.2.1 ผลการศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนระหว่างวัสดุหมักรวม 2 ชนิดคือทะเลาะปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม แบบเดิมวัตถุดิบครั้งเดียว

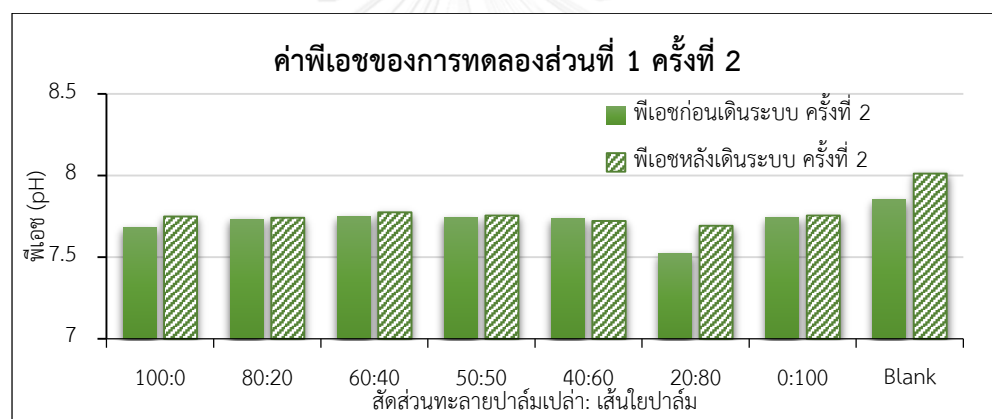
เมื่อทำการหมักทะเลาะปาล์มเปล่าร่วมกับเส้นใยปาล์มแบบเดิมวัตถุดิบครั้งเดียว โดยใช้สัดส่วน 100: 0, 80: 20, 60: 40, 50: 50, 40: 60, 20: 80, และ 0: 100 จำนวน 5 gVS และใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 300 ml หมักเป็นเวลา 40 วัน ทดลองเปรียบเทียบกัน 2 ครั้ง ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุดิบที่ผสมกันทั้งก่อนและหลังการทดลอง ได้แก่ ค่าพีเอช, ค่าซีไอดี, ปริมาณของแข็งทั้งหมด, ปริมาณของแข็งระเหยง่าย, ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อวัน ได้ผลการทดลองดังนี้

**4.2.1.1 ค่าพีเอช (pH)** ในการทดลองส่วนที่ 1 มีการปรับค่าพีเอชในขั้นตอนการปรับสภาพของวัตถุดิบ และวัดค่าพีเอชก่อนเริ่มเดินระบบ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 7-8 ทุกสัดส่วนการทดลองทั้งการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยการทดลองนี้ไม่มีการควบคุมค่าพีเอช เพื่อให้สามารถวัดค่าและวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งมีผลต่อการเกิดก๊าซมีเทนในระบบ เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 40 วันหลังการทดลองจึงวัดค่าพีเอชอีกครั้งพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยซึ่งมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดที่ผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) และจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ในกรณีที่การสร้างและการใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายไม่สมดุลกัน ถ้ามีการสร้างกรดอินทรีย์มากกว่าการใช้จะมีผลทำให้ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และพีเอชลดลง (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ในการทดลองส่วนที่ 1 พบว่าหลังการเดินระบบค่าพีเอชแต่ละสัดส่วนมีค่าอยู่ระหว่าง 7-8 ทั้งการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 แสดงว่าระหว่างการทดลองระบบมีความสมดุลระหว่างจุลินทรีย์สร้างกรดและ

จุลินทรีย์สร้างมีเทน ซึ่งจุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถทำงานได้ในช่วงค่าพีเอชระหว่าง 6.5 - 8.2 ผลการวัดค่าพีเอชก่อนและหลังทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 แสดงค่าพีเอชการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1

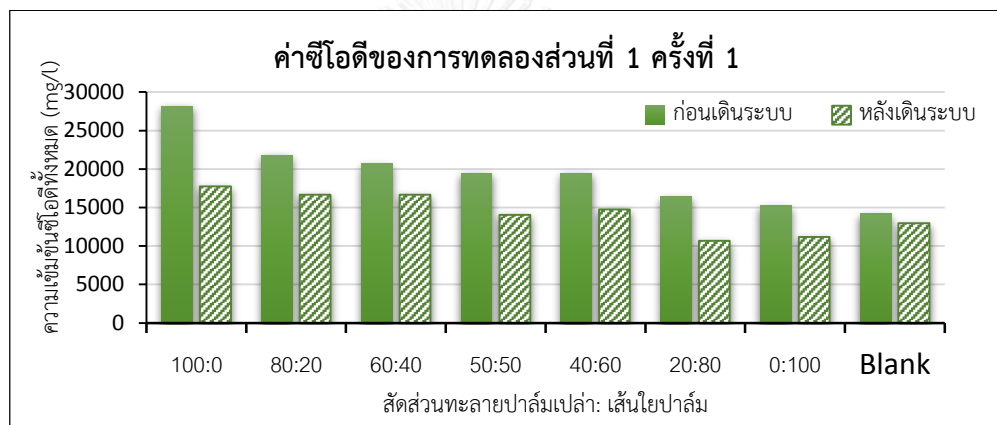


รูปที่ 4.5 แสดงค่าพีเอชการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2

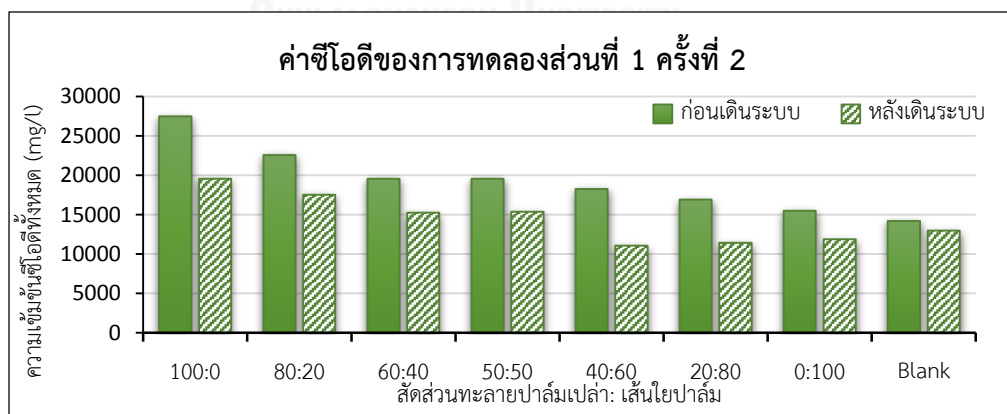
#### 4.2.1.2 การบำบัดซีโอดีทั้งหมด (Total chemical oxygen demand: TCOD)

ค่าซีโอดีคือปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิเดชันสารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ สำหรับกระบวนการหมักแบบไร้อากาศจะกลายเป็นก๊าซชีวภาพ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553) ในการทดลองส่วนที่ 1 เนื่องจากการทดลองแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียว ในวันแรกของการเริ่มต้นเดินระบบมีสัดส่วนระหว่างทะเลาะปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงมีปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบแตกต่างกัน พบว่าการวิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมดก่อนการเดินระบบสัดส่วนที่มีทะเลาะปาล์มมากกว่าจะมีค่าซีโอดีทั้งหมดมากกว่าทั้งการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยสัดส่วนระหว่างทะเลาะปาล์มเปล่าต่อเส้นใยปาล์มที่ 100: 0 มีซีโอดีทั้งหมดมากที่สุดรองลงมาได้แก่สัดส่วน 80: 20, 60: 40,

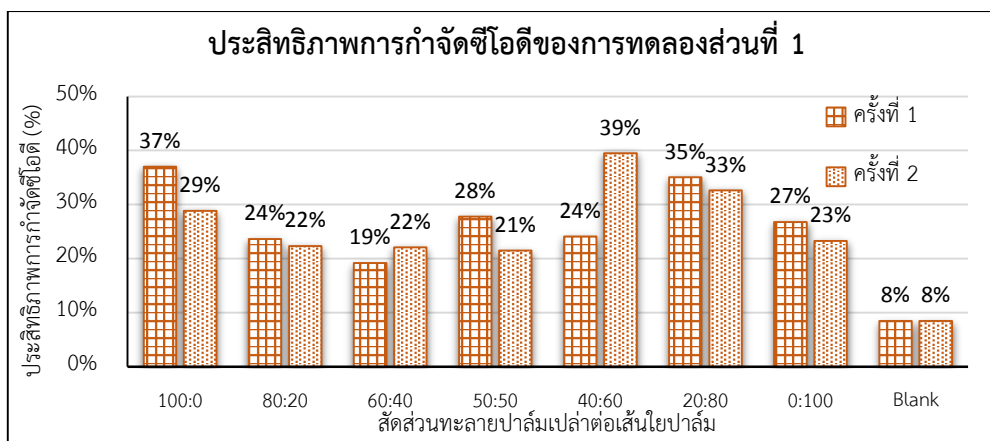
50: 50, 40: 60, 20:80 และสัดส่วน 0: 100 มีซีโอดีทั้งหมดน้อยที่สุด เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 40 วัน จุลินทรีย์ในระบบได้ย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและการสร้างเซลล์ใหม่ใน กระบวนการต่างๆ จนเกิดก๊าซชีวภาพ หลังการทดลองเมื่อวิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมดในระบบพบว่ามี ค่าลดลง การทดลองครั้งที่ 1 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ระหว่าง 19 - 37% และการทดลอง ครั้งที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ระหว่าง 21 - 39% เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Mohammed et al. (2014) ซึ่งทดลองหมักเส้นใยปาล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น และเส้นใย ปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นเป็นระยะเวลา 30 วัน มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี 22% และ 28% ตามลำดับ โดยผลการวัดค่าซีโอดีทั้งหมดก่อนและหลังการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 ถึง และ 4.7 และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 แสดงค่าซีโอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.7 แสดงค่าซีโอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1

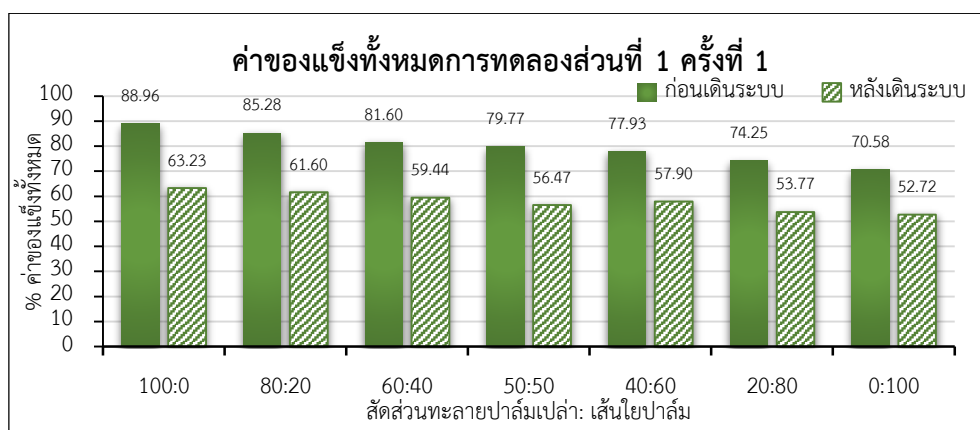
#### 4.2.1.3 การบำบัดของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) และของแข็งระเหยง่าย

(Volatile solid: VS) ในการวิเคราะห์หาค่าของแข็งระเหยง่ายต้องหาค่าของแข็งทั้งหมดก่อน โดยค่าของแข็งทั้งหมดคือปริมาณน้ำหนักแห้งของวัตถุดิบซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 103 – 105°C ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และค่าของแข็งระเหยง่ายคือของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ที่ถูกเผา ณ อุณหภูมิ 550°C ค่าของแข็งระเหยง่ายเป็นตัวชี้วัดการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพในระบบการหมักแบบไร้อากาศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553) หากวัตถุดิบที่นำมาใช้หมักมีค่าของแข็งระเหยง่ายมากแสดงว่าสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าวัตถุดิบที่มีค่าของแข็งระเหยง่ายน้อย โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสเป็นกระบวนการลดขนาดของสารอินทรีย์โดยย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง หากมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบมาก จุลินทรีย์ก็ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทดลองส่วนที่ 1 ใช้สัดส่วนตะกอนปาล์มเปล่าต่อเส้นใยปาล์มแตกต่างกัน ซึ่งก่อนทดลองมีการวัดค่าของแข็งระเหยง่ายเทียบกับของแข็งทั้งหมด (VS/TS) พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 93.5-96.7% .หมายความว่าวัตถุดิบเป็นสารอินทรีย์เกือบทั้งหมด โดยใช้วัตถุดิบในการทดลอง 5 gVS เท่ากันทุกขบวนการทดลอง เมื่อทำการทดลองเป็นระยะเวลา 40 วัน จุลินทรีย์ในระบบได้ย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพตามกระบวนการต่างๆ แล้ว ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในระบบลดลง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้าลง จนกระทั่งสารอินทรีย์ในระบบไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์บางส่วนตายไป ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายจึงลดลง จากการวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมดและค่าของแข็งระเหยง่ายหลังการทดลอง ในการทดลองครั้งที่ 1 คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งทั้งหมดมีค่า 25.3 – 29.2% และประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งระเหยง่ายมีค่า 43.37 – 51% ในการทดลองครั้งที่ 2 คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่า 25.33 – 29.01% และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายมีค่า 43.3 – 50.81% นอกจากนี้

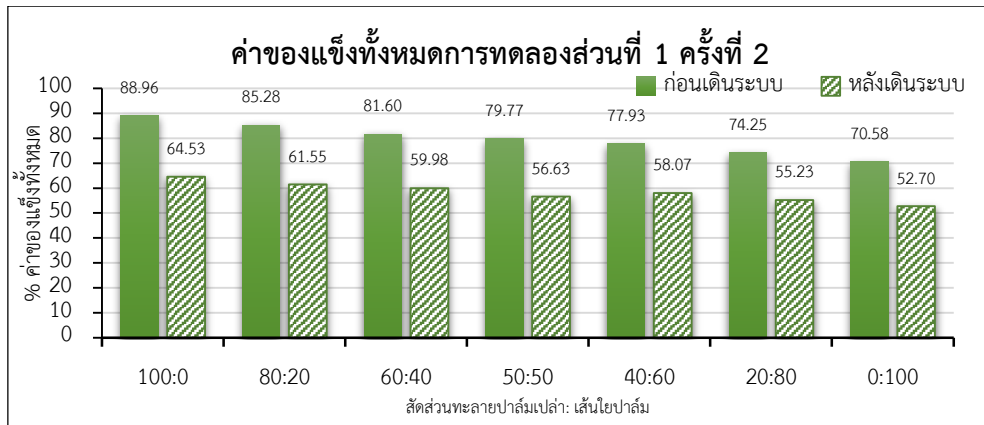
เมื่อเปรียบเทียบค่าของแข็งระเหยง่ายต่อของแข็งทั้งหมดพบว่ามีค่าลดลง แสดงว่าสารอินทรีย์ในระบบมีปริมาณที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำมันพืชร่วมกับเศษอาหารที่สามารถลดค่าของแข็งทั้งหมดได้ 33.2 – 48.1% และลดค่าของแข็งระเหยง่ายได้ 43.5 - 55.4% (ฐานวุฑฐ สำราญศิลป์, 2555) โดยผลการทดลองค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายก่อนเดินระบบแสดงดังตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าของแข็งระเหยง่ายต่อของแข็งทั้งหมด (VS/TS) แสดงดังตารางที่ 4.3 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 – 4.14

ตารางที่ 4.2 ตารางค่าของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) และของแข็งระเหยง่าย (Volatile solid: VS) ก่อนเดินระบบ ของการทดลองส่วนที่ 1

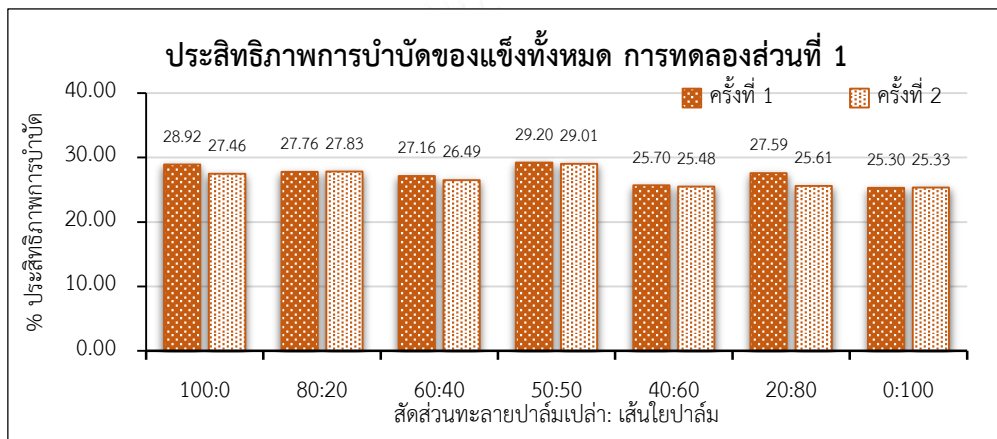
ตัวอย่าง	% ของแข็งทั้งหมด	% ของแข็งระเหยง่าย	VS/TS
100:0	88.96	86.07	0.968
80:20	85.28	82.06	0.962
60:40	81.60	78.05	0.956
50:50	79.77	76.05	0.953
40:60	77.93	74.04	0.950
20:80	74.25	70.03	0.943
0:100	70.58	66.02	0.936



รูปที่ 4.9 แสดงค่าของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1

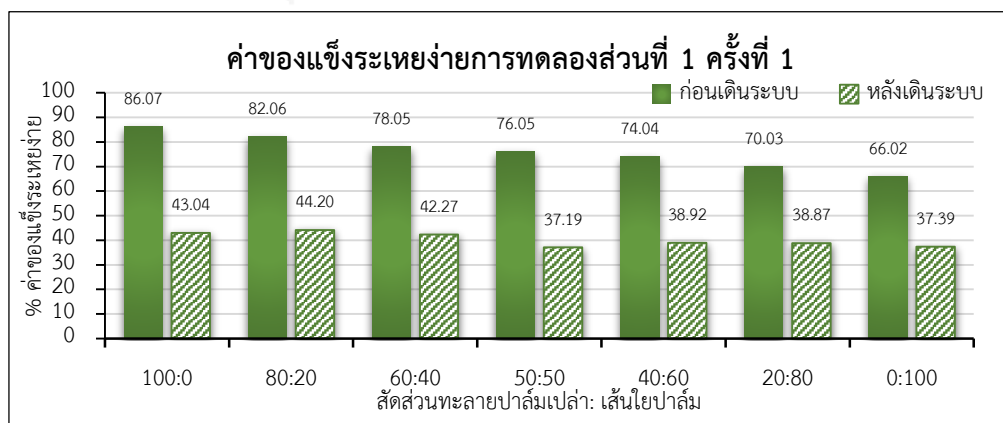


รูปที่ 4.10 แสดงค่าของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2



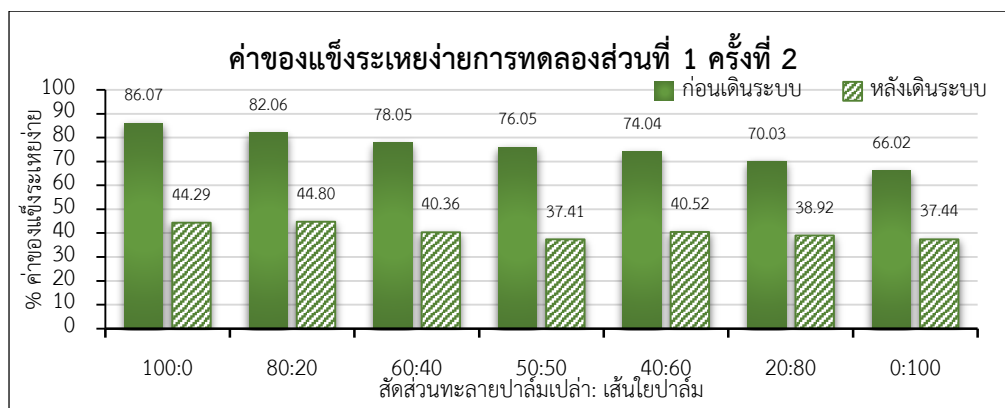
รูปที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

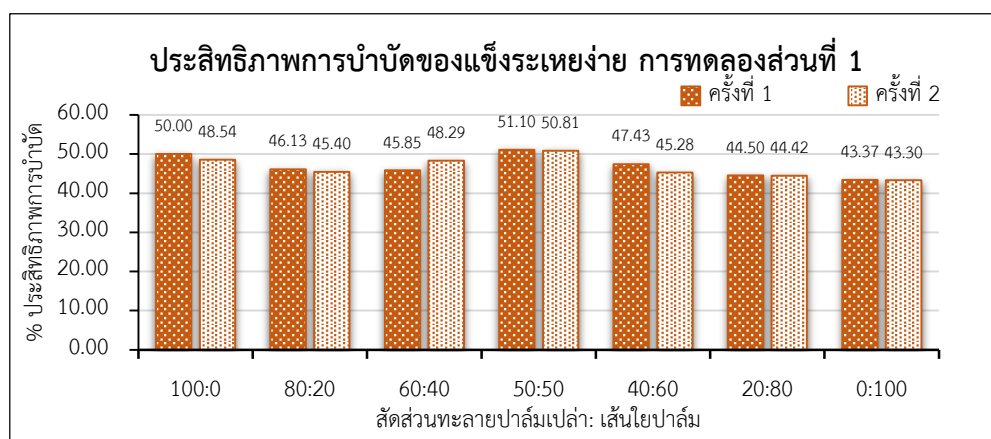


รูปที่ 4.12 แสดงค่าของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1





รูปที่ 4.13 แสดงค่าของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 1

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าของแข็งระเหยง่ายต่อของแข็งทั้งหมด (VS/TS) ของการทดลองส่วนที่ 1

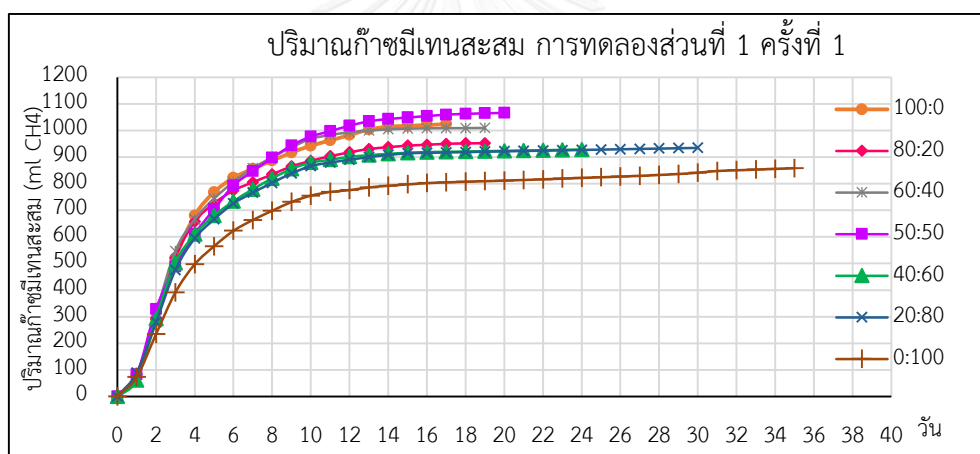
สัดส่วน	ค่าของแข็งระเหยง่ายต่อของแข็งทั้งหมด (VS/TS)		
	ก่อนเดินระบบ	หลังเดินระบบ ครั้งที่ 1	หลังเดินระบบ ครั้งที่ 2
100:0	0.97	0.68	0.69
80:20	0.96	0.72	0.73
60:40	0.96	0.71	0.67
50:50	0.95	0.66	0.66
40:60	0.95	0.67	0.70
20:80	0.94	0.72	0.70
0:100	0.94	0.71	0.71

**4.2.1.4 ปริมาณก๊าซมีเทน (Accumulated methane volume)** เมื่อทำการหมักทะลายปาล์มเปล่าร่วมกับเส้นใยปาล์มแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียว โดยใช้สัดส่วนต่างกัน พบว่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทนจากการวัดโดยอัตโนมัติด้วยเครื่อง Automatic Methane Potential Test ทำการทดลองหมักเป็นเวลา 40 วัน ในช่วงแรกของการทดลองมีค่าสูงในช่วงวันที่ 1-5 และค่อยๆ มีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนลดลงจนคงที่และไม่มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้น เนื่องจากการทดลองนี้เป็น การทดลองโดยเติมวัตถุดิบครั้งเดียว ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบจะถูกจุลินทรีย์ใช้เพื่อเจริญเติบโต และผลิตก๊าซชีวภาพ ในช่วงแรกของการทดลองจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยง่ายได้ดี ทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่แสดงผลมีค่ามาก จุลินทรีย์มีการปรับตัวกับปริมาณสารอินทรีย์ที่คงเหลือใน ระบบตามระยะเวลาในการทดลองและย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก จนกระทั่งปริมาณจุลินทรีย์ใน ระบบมีจำนวนน้อยลงเนื่องจากมีสารอาหารที่น้อยลง ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจึงน้อยลงเรื่อยๆ และ หมดไป พบว่าตัวอย่างที่มีสัดส่วนเส้นใยปาล์มมากกว่ามีระยะเวลาในการเกิดก๊าซมีเทนมาก หมายถึง การใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานกว่า เนื่องจากเส้นใยปาล์มมีค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) เท่ากับ 104 มากกว่า 100 จึงจัดเป็นวัสดุย่อยสลายยาก ในขณะที่ทะลายปาล์มเปล่ามีค่า C/N 62 น้อยกว่า 100 จึงจัดเป็นวัสดุย่อยสลายง่าย (กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2553) โดยค่า C/N ที่เหมาะสมในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศคือ 20 ถึง 35 (Azeem et al., 2011) แต่ทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มมีค่า C/N มาก จึงมีผลทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้ช้า การ ปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบจึงช่วยให้เกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น จากการทดลองครั้งที่ 1 พบว่า สัดส่วนระหว่างทะลายปาล์มเปล่าต่อเส้นใยปาล์ม 0: 100 มีระยะเวลาการเกิดก๊าซมีเทนมากที่สุด 35 วัน รองลงมาได้แก่สัดส่วน 20: 80, 40: 60, 50: 50, 60: 40, 80: 20, และ 100: 0 ที่มีระยะเวลาการ เกิดก๊าซมีเทน 30, 24, 20, 19, 19 และ 17 วันตามลำดับ และการทดลองครั้งที่ 2 พบว่าสัดส่วน ระหว่างทะลายปาล์มเปล่าต่อเส้นใยปาล์ม 0: 100 มีระยะเวลาการเกิดก๊าซมีเทนมากที่สุด 35 วัน รองลงมาได้แก่สัดส่วน 20: 80, 50: 50, 80: 20, 100: 0, 40: 60 และ 60: 40 มีระยะเวลาการเกิดก๊าซ มีเทน 32, 20, 19, 17, 16 และ 16 วันตามลำดับ ซึ่งมีลำดับแตกต่างกับการทดลองครั้งที่ 1 ใน สัดส่วน 40: 60 และ สัดส่วน 60:40 ซึ่งมีระยะเวลาการเกิดก๊าซมีเทนน้อย มีสาเหตุมาจากจุลินทรีย์ใน ระบบสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็ว การเกิดก๊าซมีเทนจึงเกิดขึ้นและหมดลงเร็วกว่าการทดลอง ในสัดส่วนอื่นๆ

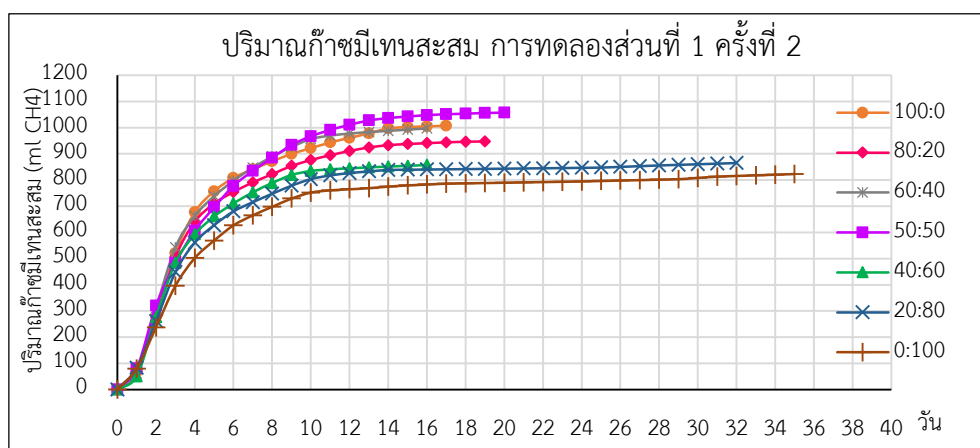
นอกจากนี้สารอาหารเป็นอีกปัจจัยหนึ่งสำหรับกระบวนการเกิดก๊าซมีเทนในระบบการหมัก แบบไร้อากาศ โดยสารอาหารที่เหมาะสมคือต้องมีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อ ซัลเฟอร์ (C:N:P:S) ที่ 600:15:5:3 (Azeem et al., 2011) จากค่า C/N จะเห็นได้ว่าทะลายปาล์ม เปล่ามีสารอาหารไนโตรเจนมากกว่าเส้นใยปาล์ม สอดคล้องกับงานวิจัยของ สำนักเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2540) ทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มมีไนโตรเจน 23%

และน้อยกว่า 1% ตามลำดับ แต่มีฟอสฟอรัส 0.1% และ 17-66% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทะเลาะปาล์มเปล่ามีฟอสฟอรัสน้อยกว่า ดังนั้นการหมักร่วมทะเลาะปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มในสัดส่วนที่เหมาะสมจะเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้ดียิ่งขึ้น

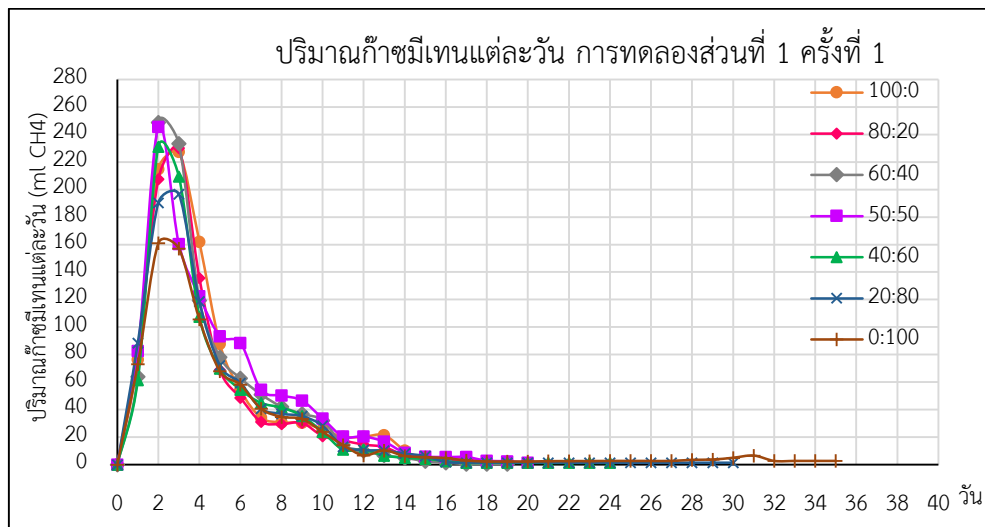
การทดลองครั้งที่ 1 ที่สัดส่วน 50: 50 ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดเท่ากับ 1,066.2 ml รองลงมาได้แก่ สัดส่วน 100: 0 , 60: 40 , 80: 20 , 20: 80 , 40: 60 , และ 0:100 ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมมีค่าเท่ากับ 1,024 , 1,009.6 , 952.5 , 934.8 , 928.5 และ 858.3 ml ตามลำดับ การทดลองครั้งที่ 2 ที่สัดส่วน 50: 50 ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดเท่ากับ 1,057.4 ml รองลงมาได้แก่ สัดส่วน 100: 0 , 60: 40 , 80: 20 , 20: 80 , 40: 60 , และ 0:100 ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมมีค่าเท่ากับ 1,007 , 997 , 947.3 , 864.8 , 857.3 และ 822.9 ml ตามลำดับ และชุดทดลองที่ใช้เปรียบเทียบกับ(Blank) ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมมีค่าเท่ากับ 26.2 ml ผลการทดลองแสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมดังรูปที่ 4.15 - 4.16- และแสดงปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแต่ละวันดังรูปที่ 4.17 - 4.18



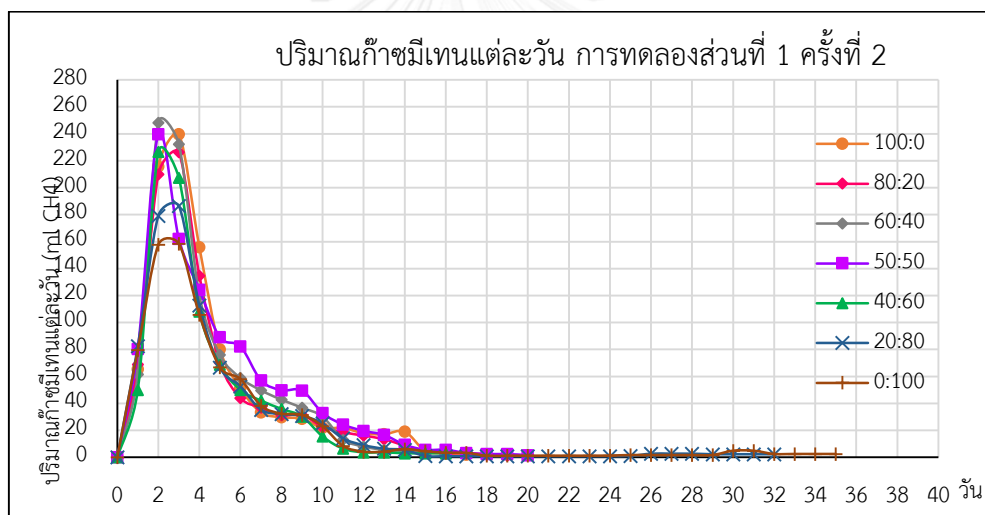
รูปที่ 4.15 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนแต่ละวันของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.18 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนแต่ละวันของการทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2

เมื่อคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของทะเลาะปาล์มเปล่าร่วมกับเส้นใยปาล์มโดยการคิดเทียบปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดของแต่ละสัดส่วนต่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดจากการทดลองพบว่า การหมักร่วมวัตถุดิบในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนได้ดีกว่าการหมักวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว พบว่าที่การทดลองครั้งที่ 1 สัดส่วน 50: 50 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุด 208 ml CH<sub>4</sub>/gVS รองลงมาได้แก่สัดส่วน 100: 0 , 60: 40 , 80: 20 , 20: 80 , 40: 60 , และ 0:100 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน 199.56, 196.68, 185.26, 181.72, 180.46, และ 166.42 ml CH<sub>4</sub>/gVS ตามลำดับ และการทดลองครั้งที่ 2 สอดคล้องกับการทดลองครั้งที่ 1 สัดส่วน 50: 50 มี

ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุด 206.24 ml CH<sub>4</sub>/gVS รองลงมาได้แก่สัดส่วน 100: 0 , 60: 40 , 80: 20 , 20: 80 , 40: 60 , และ 0:100 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน 196.16, 194.16, 184.22, 167.72, 166.22, และ 159.34 ml CH<sub>4</sub>/gVS ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงสอดคล้องกับงานวิจัยของ การเกตุ วัฒนสิทธิ์ (2556) ที่ศึกษาหมักทะลายปาล์มเปล่าร่วมกับน้ำทิ้งและหมักเส้นใยปาล์มร่วมกับน้ำทิ้งที่อุณหภูมิ 60°C ได้ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน 278.45 และ 221.93 ml CH<sub>4</sub>/gVS ตามลำดับ เมื่อคิดค่าเฉลี่ยศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแล้วได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองส่วนที่ 1

สัดส่วนระหว่าง ทะลายปาล์มเปล่า ต่อเส้นใยปาล์ม	ปริมาณของแข็ง ระเหยง่ายทั้งหมด ของวัตถุดิบ (gVS)	ปริมาณก๊าซมีเทน สะสมทั้งหมด (ml CH <sub>4</sub> )	ศักยภาพการผลิตก๊าซ มีเทน (ml CH <sub>4</sub> /gVS)
100:0	5	1015.50 a <sup>1/</sup>	197.86 a
80:20	5	949.90 b	185.26 b
60:40	5	1003.30 c	195.42
50:50	5	1061.80 ac	207.12ac
40:60	5	892.90 bde	173.34bde
20:80	5	899.80 bcd	174.72bcd
0:100	5	840.60 e	162.88e

1/ ค่าเฉลี่ยในช่องเดียวกันที่กำกับด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P<0.05)

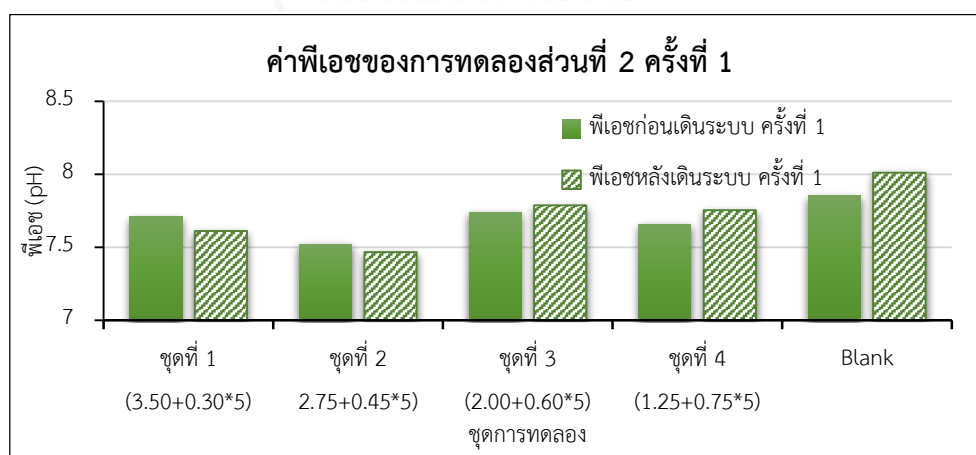
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 4.2.2 ผลการศึกษาหาปริมาณการเติมวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนระหว่างวัสดุหมักรวม 2 ชนิดคือทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม ในการเติมแบบกึ่งต่อเนื่อง

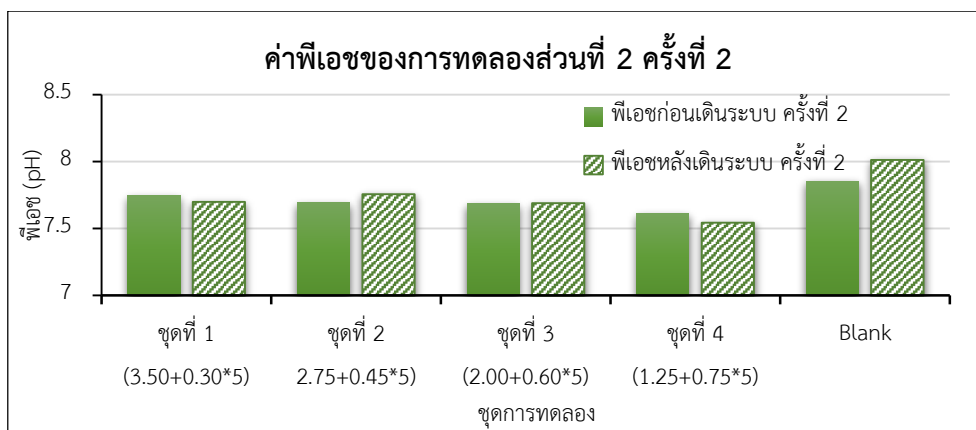
เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองที่ 1 พบว่าการหมักทะลายปาล์มเปล่ากับเส้นใยปาล์มที่สัดส่วน 50: 50 ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด จึงนำมาทดลองหมักแบบเติมกึ่งต่อเนื่อง ในปริมาณการเติมครั้งแรก และครั้งต่อไปทุกๆ 5 วันที่แตกต่างกัน รวมปริมาณวัตถุดิบทั้งหมด 5 gVS และใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 300 ml หมักเป็นเวลา 30 วัน ทดลองซ้ำชุดละ 2 ครั้ง ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุดิบที่ผสมกันทั้งก่อนและหลังการทดลองได้แก่ อุณหภูมิ, ค่าพีเอช, ค่าซีโอดี, ปริมาณของแข็งทั้งหมด, ปริมาณของแข็งระเหยง่าย, ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อวัน ซึ่งการแสดงผลในแกนแนวนอนคือชุดการทดลองทั้ง 4 ชุด เช่น ชุดที่ 1

( $3.5 + 0.30 \times 5$ ) หมายถึง การทดลองชุดที่ 1 ทำการเติมวัตถุติบครั้งแรก 3.5 gVS และเติมครั้งต่อไป 0.3 gVS จำนวน 5 ครั้ง เป็นต้น ผลการทดลองการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องมีดังนี้

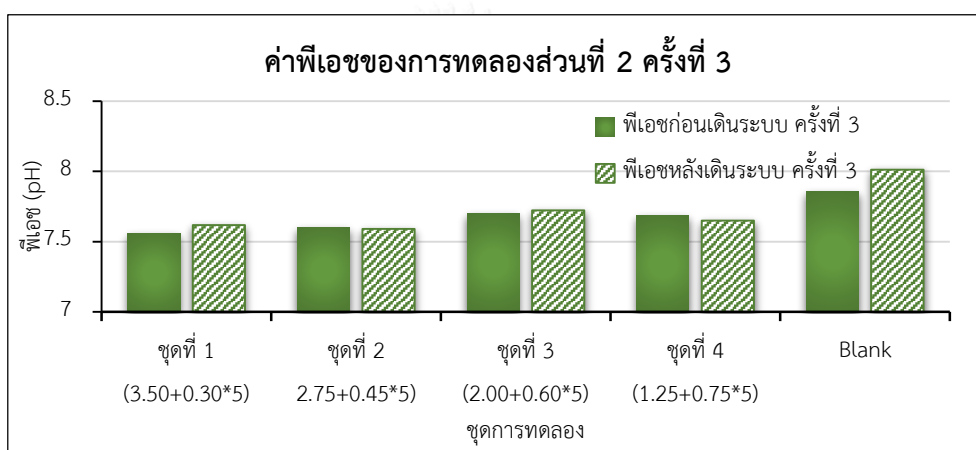
**4.2.2.1 ค่าพีเอช (pH) ในการทดลองส่วนที่ 2** ทะลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม ที่นำมาใช้มีการปรับค่าพีเอชในขั้นตอนการปรับสภาพของวัตถุติบพร้อมกับวัตถุติบในการทดลองส่วนที่ 1 เมื่อนำมาทดลองมีการวัดค่าพีเอชก่อนเริ่มเดินระบบ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 7-8 ทุกสัปดาห์การทดลอง โดยการทดลองนี้ไม่มีการควบคุมค่าพีเอช เพื่อให้สามารถวัดค่าและวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งมีผลต่อการเกิดก๊าซมีเทนในระบบ เมื่อเติมวัตถุติบทุกๆ 5 วัน รวมปริมาณวัตถุติบทั้งหมด 5 gVS ทดลองหมักจนระยะเวลาครบ 30 วัน หลังการทดลองจึงวัดค่าพีเอชอีกครั้งพบว่าค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยซึ่งมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดที่ผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ในกรณีที่มีการสร้างและการใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายไม่สมดุลกัน ถ้ามีการสร้างกรดอินทรีย์มากกว่าการใช้จะมีผลทำให้ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และพีเอชลดลง (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม , 2553) ในการทดลองส่วนที่ 2 พบว่าหลังการเดินระบบค่าพีเอชของทุกขวดทดลอง ทั้งการทดลองครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 3 มีค่าอยู่ระหว่าง 7-8 แสดงว่าปริมาณการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชน้อยหรือไม่มีเลย หากวัตถุติบที่นำมาทดลองมีค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ ซึ่งระหว่างการทดลองระบบมีความสมดุลระหว่างจุลินทรีย์สร้างกรดและจุลินทรีย์สร้างมีเทน ซึ่งจุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถทำงานได้ในช่วงค่าพีเอชระหว่าง 6.5 -8.2 ผลการวัดค่าพีเอชก่อนและหลังทดลองแสดงดังรูปที่ 4.19 – 4.21



รูปที่ 4.19 แสดงค่าพีเอชการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.20 แสดงค่าพีเอชการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2

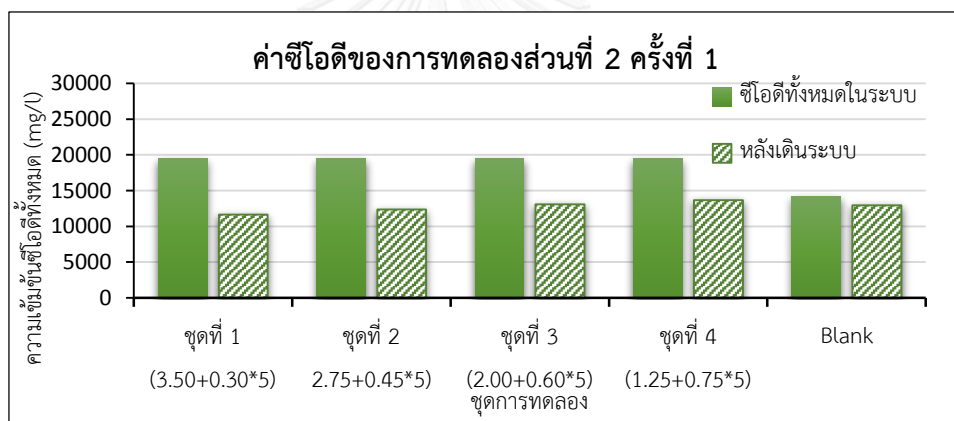


รูปที่ 4.21 แสดงค่าพีเอชการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3

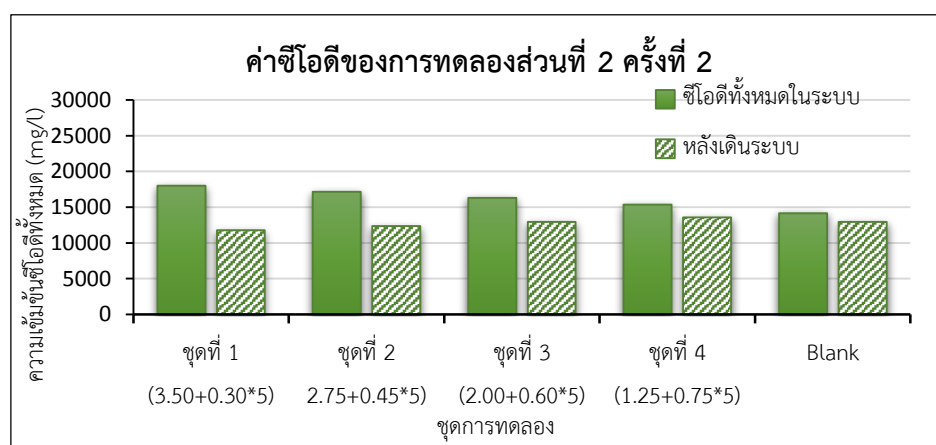
#### 4.2.2.2 การบำบัดซีโอดีทั้งหมด (Total chemical oxygen demand: TCOD)

ค่าซีโอดีคือปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิเดชันสารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ สำหรับกระบวนการหมักแบบไร้อากาศจะกลายเป็นก๊าซชีวภาพ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553) ในการทดลองส่วนที่ 2 เนื่องจากการทดลองแบบเติมวัตถุดิบกึ่งต่อเนื่อง ในวันแรกของการเริ่มต้นเดินระบบมีปริมาณวัตถุดิบที่เติมในระบบแตกต่างกัน และเติมครั้งต่อไปทุกๆ 5 วัน ในปริมาณที่แตกต่างกัน รวมปริมาณวัตถุดิบทั้งหมด 5 gVS จึงมีปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบแตกต่างกัน พบว่าการวิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมดก่อนการเดินระบบของขวดที่มีการเติมปริมาณวัตถุดิบมากกว่าจะมีค่าซีโอดีทั้งหมดมากกว่าการทดลองครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 3 ขวดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS มีค่าซีโอดีทั้งหมดมากที่สุด รองลงมาได้แก่ขวดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 2.75, 2.0 และ 1.25 gVS ตามลำดับ เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 30 วัน จุลินทรีย์ในระบบได้ย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและการสร้าง

เซลล์ใหม่ในกระบวนการต่างๆ จนเกิดก๊าซชีวภาพ โดยการเติมวัตถุดิบกึ่งต่อเนื่อง สภาวะในขวดทดลองตลอดช่วงเวลากการหมักจะไม่เปลี่ยนแปลงมาก จุลินทรีย์สามารถปรับตัวเจริญเติบโตได้ดี และสร้างเซลล์ใหม่ได้มากขึ้นกว่าการเติมวัตถุดิบครั้งเดียว ทำให้หลังการทดลองเมื่อวิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมดในระบบพบว่ามีความลดลง มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีทั้งหมดสูงกว่าการหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียว การทดลองครั้งที่ 1, ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีทั้งหมดอยู่ระหว่าง 29.85 – 40.31%, 30.46 – 39.69% และ 29.23 – 40.92% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ นฤมล เชาวะกระโทก (2556) ซึ่งทดลองหมักตะกอนดีแคแเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบร่วมกับน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี 76.2% เมื่อทดลองโดยใช้การเติมวัตถุดิบแบบต่อเนื่องมีการกวนผสม 24 ชั่วโมง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีได้ถึง 94.4% โดยผลการวัดค่าซีโอดีทั้งหมดก่อนและหลังการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.22 ถึง 4.24 และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.25

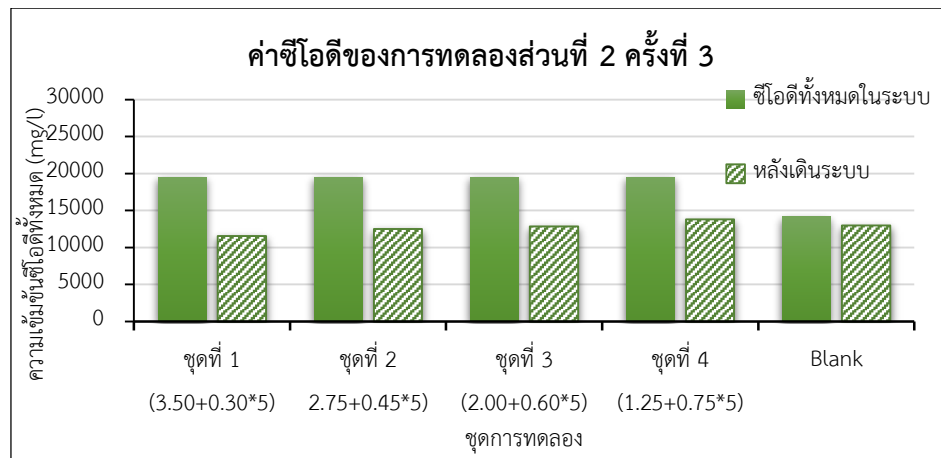


รูปที่ 4.22 แสดงค่าซีโอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1

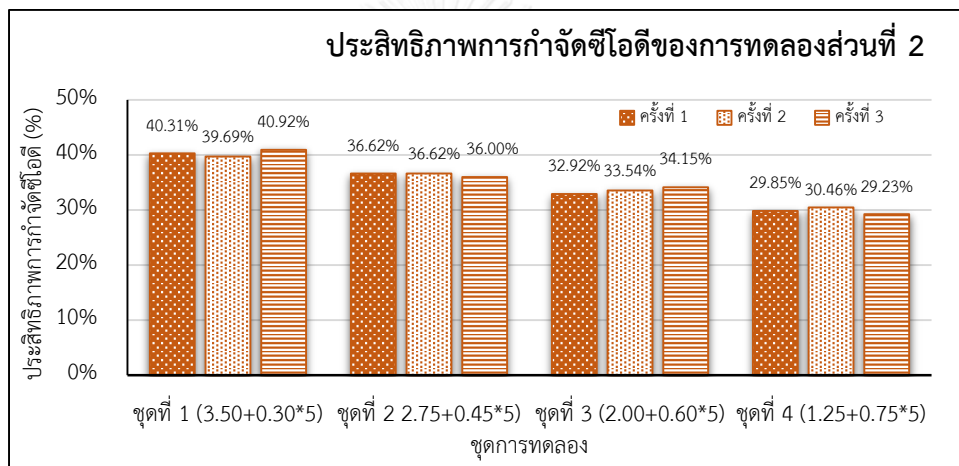


รูปที่ 4.23 แสดงค่าซีโอดีทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2





รูปที่ 4.24 แสดงค่าซีไอทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.25 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2

CHULALONGKORN UNIVERSITY

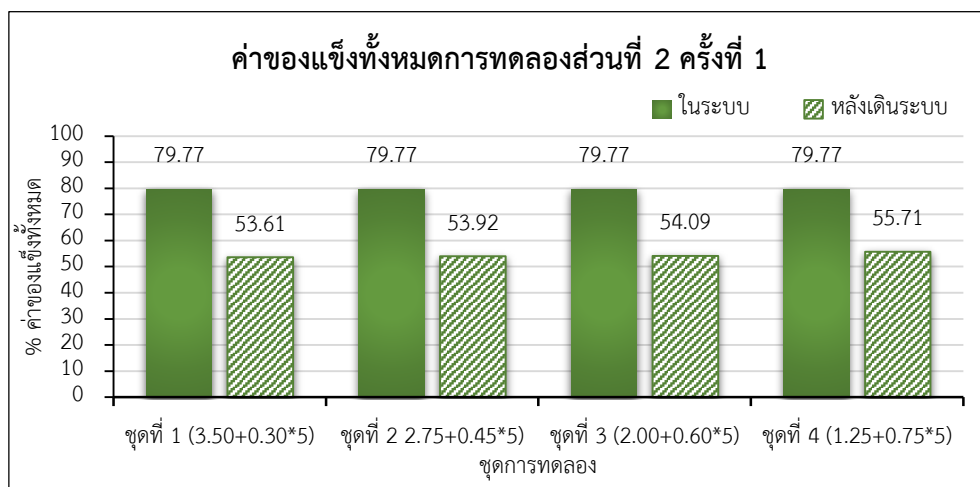
**4.2.2.3 การบำบัดของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) และของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Total volatile solid: TVS)** ในการวิเคราะห์หาค่าของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดต้องหาค่าของแข็งทั้งหมดก่อน โดยค่าของแข็งทั้งหมดคือปริมาณน้ำหนักแห้งของวัตถุดิบซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 103 – 105°C ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และค่าของแข็งระเหยง่ายคือของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ที่ถูกเผา ณ อุณหภูมิ 550°C ค่าของแข็งระเหยง่ายเป็นตัวชี้วัดการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพในระบบการหมักแบบไร้อากาศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553) หากวัตถุดิบที่นำมาใช้หมักมีค่าของแข็งระเหยง่ายมากแสดงว่าสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าวัตถุดิบที่มีค่าของแข็งระเหยง่ายน้อย โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสเป็นกระบวนการลดขนาดของสารอินทรีย์โดยย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง หากมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบมาก จุลินทรีย์ก็จะต้องใช้เวลาในการย่อยสลาย

เพิ่มขึ้นด้วย สำหรับการทดลองส่วนที่ 2 เนื่องจากเป็นการทดลองแบบเติมวัตถุดิบกึ่งต่อเนื่อง ในวันแรกของการเริ่มต้นเดินระบบมีปริมาณวัตถุดิบที่เติมในระบบแตกต่างกัน จึงมีปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบแตกต่างกัน แล้วจึงเติมครั้งต่อไปทุกๆ 5 วันในปริมาณที่แตกต่างกัน รวมปริมาณวัตถุดิบทั้งหมด 5 gVS ในระบบจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมด 79.77% และปริมาณของแข็งระเหยง่าย 76.05% มีการวัดค่าของแข็งระเหยง่ายเทียบกับของแข็งทั้งหมด (TVS/TS) พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 93.5-96.7% เท่ากันทุกชุดการทดลอง เมื่อเติมวัตถุดิบเพิ่มเข้าไปในระบบครั้งแรก จุลินทรีย์ในระบบได้ย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพตามกระบวนการต่างๆ แล้ว และปริมาณสารอินทรีย์ในระบบลดลงบางส่วน แต่มีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มเข้ามาในระบบทุกๆ 5 วัน ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์รวมในระบบเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการเติมวัตถุดิบแบบครั้งเดียว สภาวะในขวดทดลองตลอดช่วงเวลาการหมักจึงไม่เปลี่ยนแปลงมาก ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นต่อเนื่อง จุลินทรีย์จะสามารถปรับตัวเจริญเติบโตได้ดี และสร้างเซลล์ใหม่ได้มากขึ้นกว่าการเติมวัตถุดิบครั้งเดียว ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่อเนื่อง ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดจึงลดลง และทำการทดลองจนครบ 30 วัน

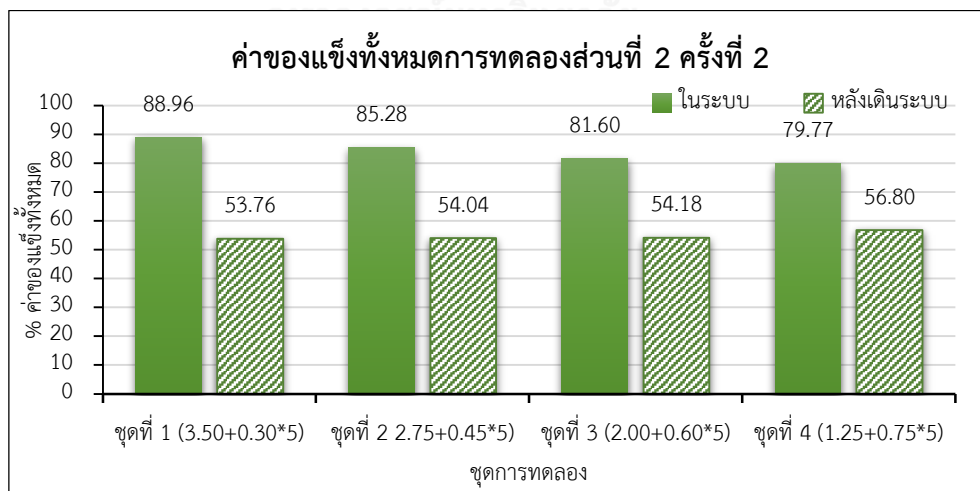
เมื่อวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมดพบว่าการทดลองครั้งที่ 1 ถึง 3 มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมากกว่าการทดลองแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียวเล็กน้อย โดยการทดลองครั้งที่ 1 ชุดทดลองที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมากที่สุด 32.8% รองลงมาได้แก่ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 2.75, 2.0 และ 1.25 gVS ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด 32.4%, 32.2% และ 30.16% ตามลำดับ การทดลองครั้งที่ 2 ชุดทดลองที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมากที่สุด 39.56% รองลงมาได้แก่ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 2.75, 2.0 และ 1.25 gVS ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด 36.64%, 33.61%, และ 28.80%ตามลำดับ และการทดลองครั้งที่ 3 ชุดทดลองที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมากที่สุด 38.59% รองลงมาได้แก่ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 2.75, 2.0 และ 1.25 gVS ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด 36.73%, 33.83% และ 31.41% ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายมีแนวโน้มเดียวกับของแข็งทั้งหมด การทดลองครั้งที่ 1 ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายมากที่สุด 55.29% รองลงมาได้แก่ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 2.75, 2.0 และ 1.25 gVS ตามลำดับที่มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย 54.83%, 54.33% และ 53.74% ตามลำดับ การทดลองครั้งที่ 2 ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายมากที่สุด 60.46% รองลงมาได้แก่ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 2.75, 2.0, และ 1.25 gVS ตามลำดับที่มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย 57.93%, 55.06% และ 51.93% ตามลำดับ และการทดลองครั้งที่ 3 ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย

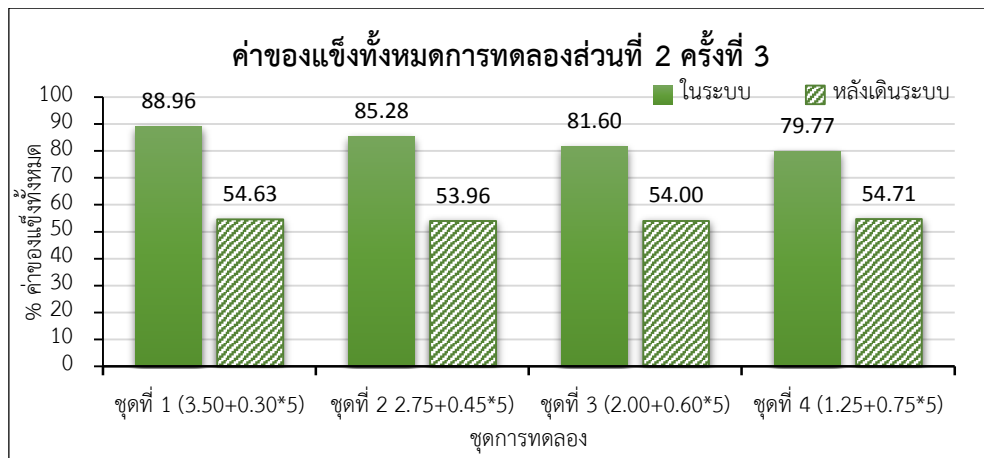
มากที่สุด 60.21% รองลงมาได้แก่ช่วงที่มีการเติมวัตถุติดเริ่มต้น 2.75, 2.0, และ 1.25gVS ตามลำดับ ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย 57.65%, 54.16% และ 51.96% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ นฤมล เชาวะกระโทก (2556) ซึ่งทดลองหมักตะกอนดีแคแเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบร่วมกับน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง ระยะเวลาเก็บ 20 และ 30 วัน โดยใช้การเติมวัตถุติดแบบต่อเนื่องมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งทั้งหมด 38.5% และ 36.4% ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด 51.1% และ 47.4% ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ของการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.26 – 4.33



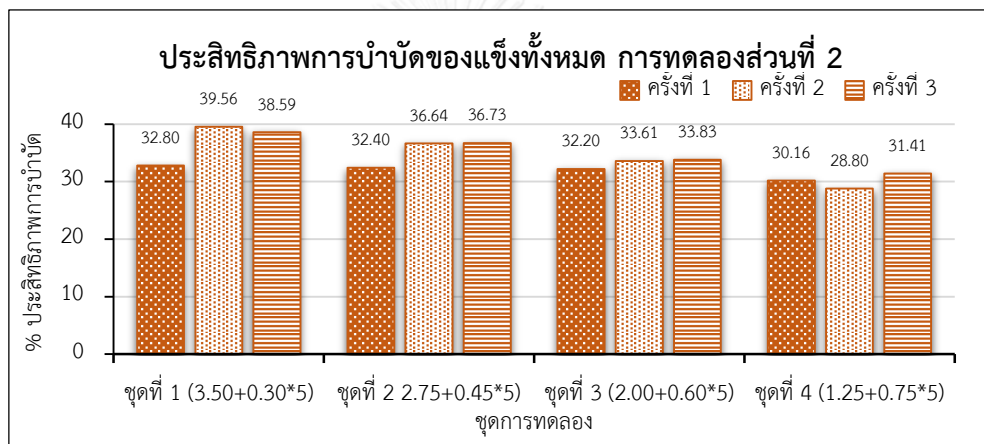
รูปที่ 4.26 แสดงค่าของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1



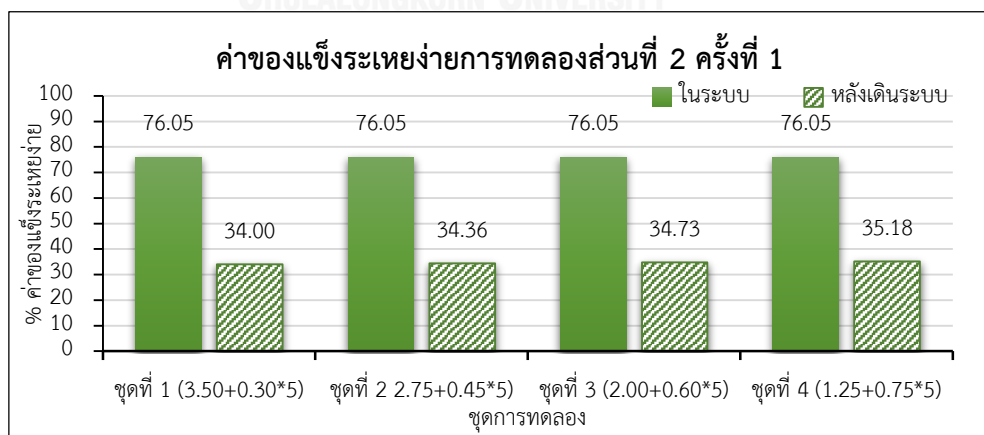
รูปที่ 4.27 แสดงค่าของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2



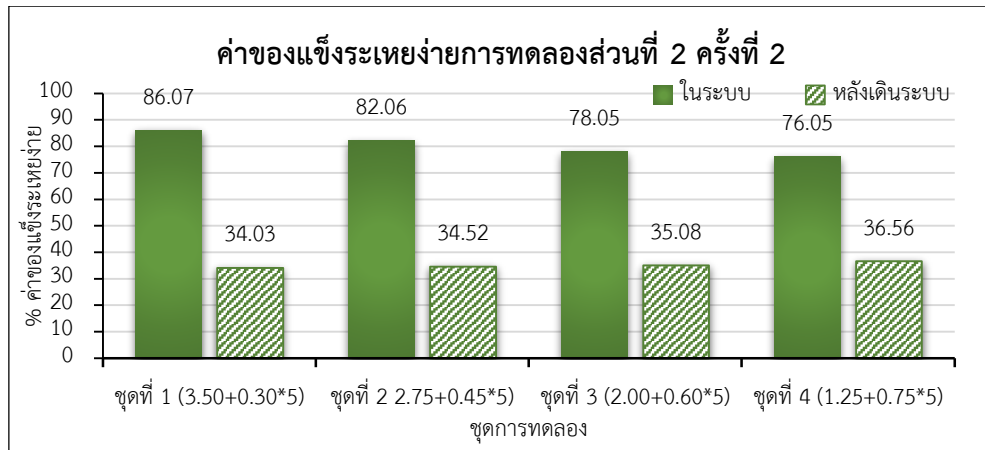
รูปที่ 4.28 แสดงค่าของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3



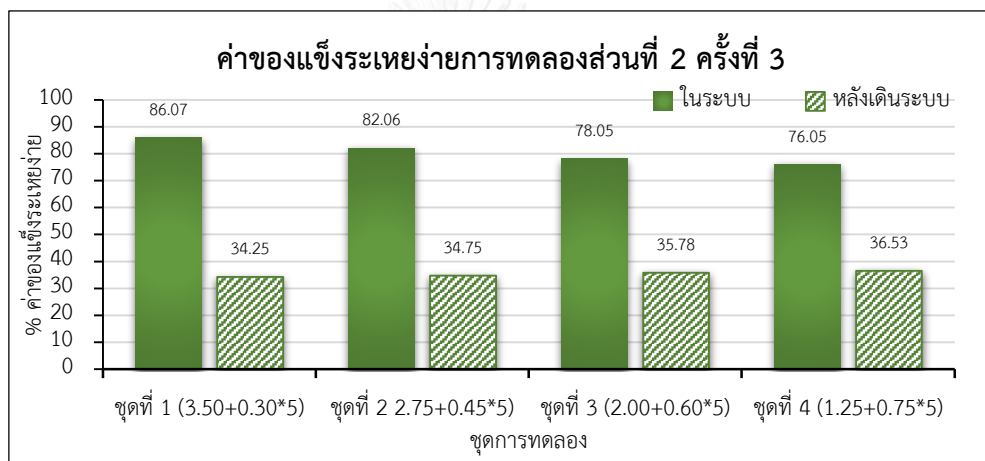
รูปที่ 4.29 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของการทดลองส่วนที่ 2



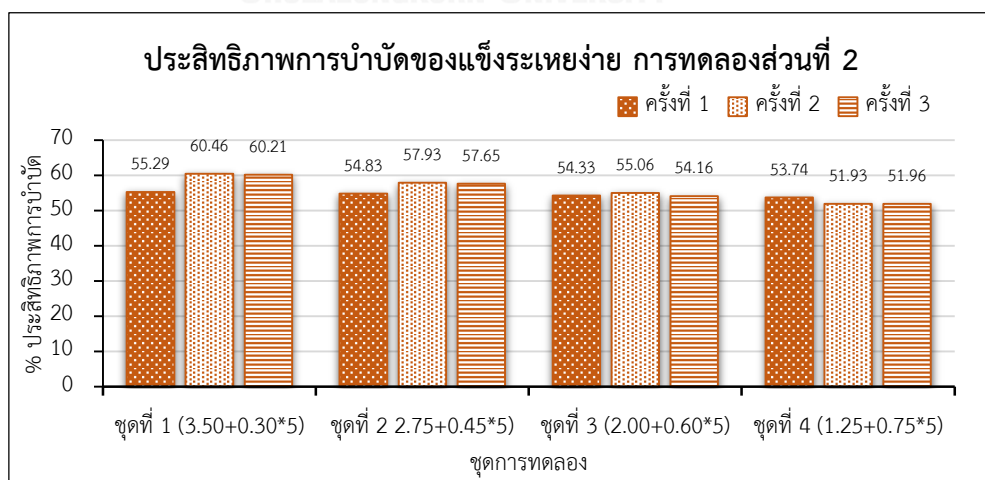
รูปที่ 4.30 แสดงค่าของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.31 แสดงค่าของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.32 แสดงค่าของแข็งระเหยง่ายของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3



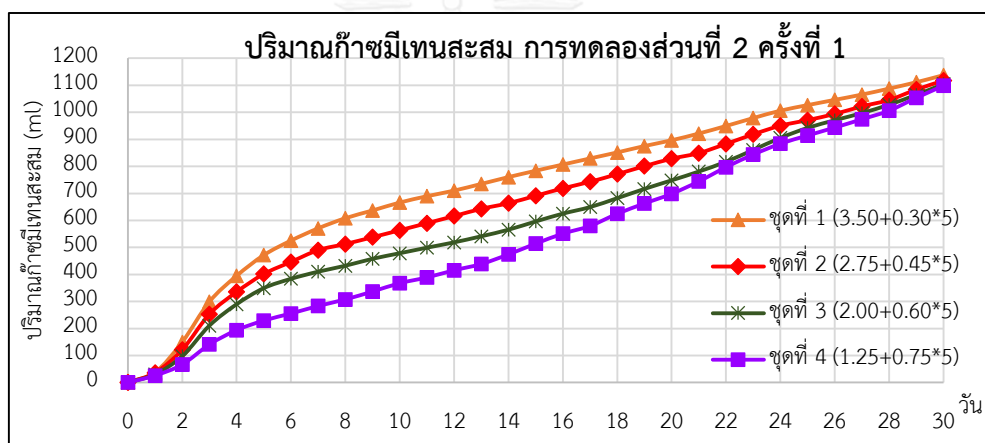
รูปที่ 4.33 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งระเหยง่าย ของการทดลองส่วนที่ 2

**4.2.2.4 ปริมาณก๊าซมีเทน (Accumulated methane volume)** เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองที่ 1 พบว่าการหมักทะเลลายปาล์มเปล่ากับเส้นใยปาล์มที่สัดส่วน 50: 50 ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด จึงทำการหมักทะเลลายปาล์มเปล่าร่วมกับเส้นใยปาล์มแบบเติมวัตถุดิบกึ่งต่อเนื่อง ในวันแรกของการเริ่มต้นเดินระบบมีปริมาณวัตถุดิบที่เติมในระบบแตกต่างกัน และเติมครั้งต่อไปทุกๆ 5 วันในปริมาณที่แตกต่างกัน รวมปริมาณวัตถุดิบทั้งหมด 5 gVS พบว่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทนจากการวัดโดยอัตโนมัติด้วยเครื่อง Automatic Methane Potential Test ทำการทดลองหมักเป็นเวลา 30 วัน การเติมแบบกึ่งต่อเนื่องทำให้มีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนสม่ำเสมอ มีความต่อเนื่องและมีปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแต่ละวันมากกว่าการหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียว วัสดุหมักทั้งทะเลลายปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบได้หมด สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ (นฤมล เชาวะกระโทก, 2556) การหมักวัตถุดิบแบบเติมกึ่งต่อเนื่องทำให้จุลินทรีย์สามารถปรับตัว เจริญเติบโตและย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอได้ดีกว่าการหมักวัตถุดิบแบบเติมครั้งเดียว และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ ลาแพน หล้าคำมี (2553) ที่ทำการศึกษามักทะเลลายปาล์มเปล่าร่วมกับมูลสุกรซึ่งพบว่าการหมักแบบเติมวัตถุดิบกึ่งต่อเนื่อง ทุกๆ 3 วัน สามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้สูงสุด 26.1%

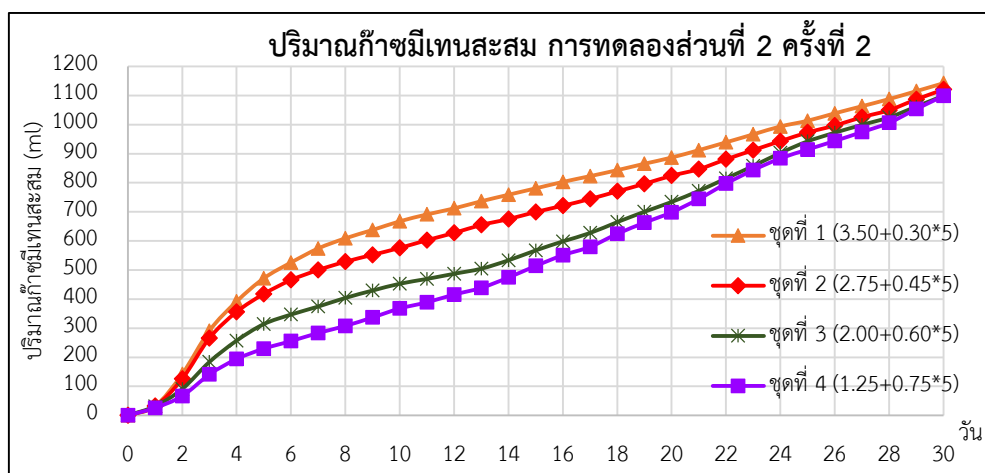
จากผลการทดลองครั้งที่ 1 ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1,137.6 ml รองลงมาได้แก่ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 2.75, 2.0, และ 1.25 gVS ตามลำดับ ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมมีค่าเท่ากับ 1,117.5, 1,104.3 และ 1,094.2 ml ตามลำดับ ผลการทดลองครั้งที่ 2 มีความสอดคล้องกับการทดลองครั้งที่ 1 โดยชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1,142.3 ml รองลงมาได้แก่ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 2.75, 2.0 และ 1.25 gVS ตามลำดับ ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมมีค่าเท่ากับ 1,120.4, 1,099.6 และ 1,098.4 ml ตามลำดับ และผลการทดลองครั้งที่ 3 มีชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1,127.8 ml รองลงมาได้แก่ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 2.75, 2.0 และ 1.25 gVS ตามลำดับ ได้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมมีค่าเท่ากับ 1,112, 1,105.6 และ 1,091.1 ml ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดค่าเฉลี่ยของการทดลองครั้งที่ 1 ถึง 3 มากกว่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA จะเห็นได้ว่าการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS มีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนในช่วงแรกสูงกว่าการทดลองชุดอื่นๆ เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบมากกว่าการทดลองชุดอื่นๆ ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ เจริญเติบโตและผลิตก๊าซมีเทนได้มาก เมื่อมีการเติมสารอินทรีย์ในครั้งต่อไปอย่างสม่ำเสมอครั้งละ 0.3 gVS ทุกๆ 5 วัน ปริมาณจุลินทรีย์ในระบบมีมากกว่าการทดลองชุดอื่น จึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี อัตราการเกิดก๊าซมีเทนจึงเกิดมาก

และสม่ำเสมอมากกว่าการทดลองชุดอื่นที่มีการเติมสารอินทรีย์เริ่มต้นน้อย ดังนั้นหากมีการเติมวัตถุดิบเข้าไปในระบบสม่ำเสมอเรื่อยๆ จะสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เรื่อยๆ และหากมีการเติมปริมาณวัตถุดิบที่เพิ่มมากขึ้น ดังผลการทดลองของชุดการทดลองที่ 4 ที่มีปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนในแต่ละวันเพิ่มมากขึ้น จากการเติมวัตถุดิบครั้งต่อไปในปริมาณที่มากกว่าการทดลองชุดอื่นๆ ทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบได้รับสารอินทรีย์มากขึ้น ซึ่งจุลินทรีย์จะสามารถปรับตัวและผลิตก๊าซมีเทนได้เพิ่มมากขึ้น

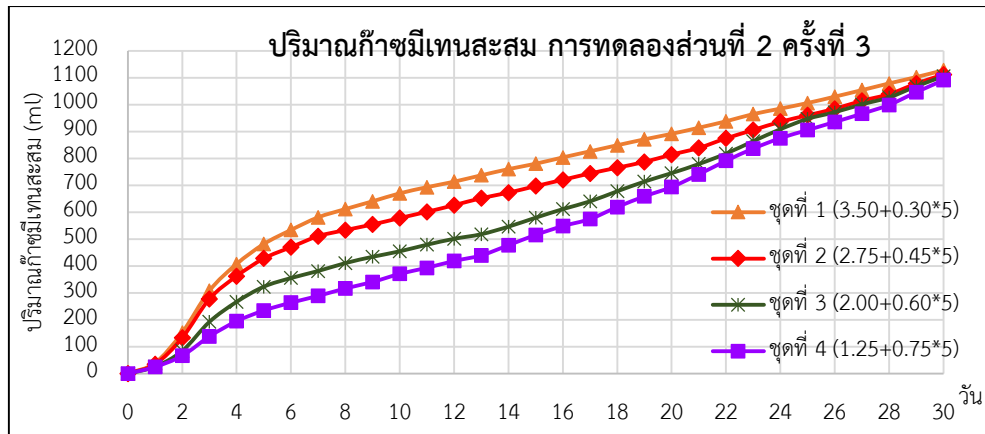
การวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนโดยนำผลการทดลองมาคำนวณความแตกต่างของการทดลองส่วนที่ 1 และ 2 พบว่าชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS สามารถเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้มากที่สุด 7.16% รองลงมาได้แก่ชุดที่มีการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 2.75, 2.0 และ 1.25 gVS สามารถเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้ 5.29%, 3.99% และ 3.16% ตามลำดับ ผลการทดลองส่วนที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.34 - 4.39 และตารางที่ 4 5



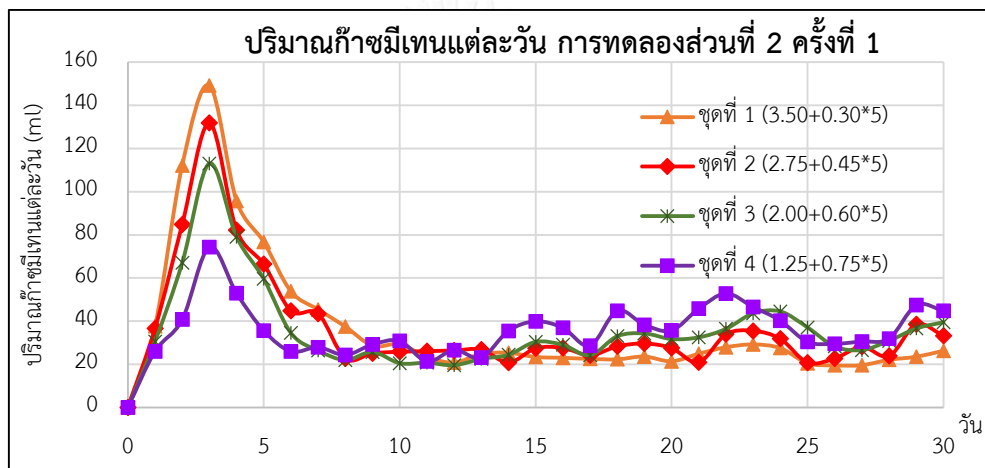
รูปที่ 4.34 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1



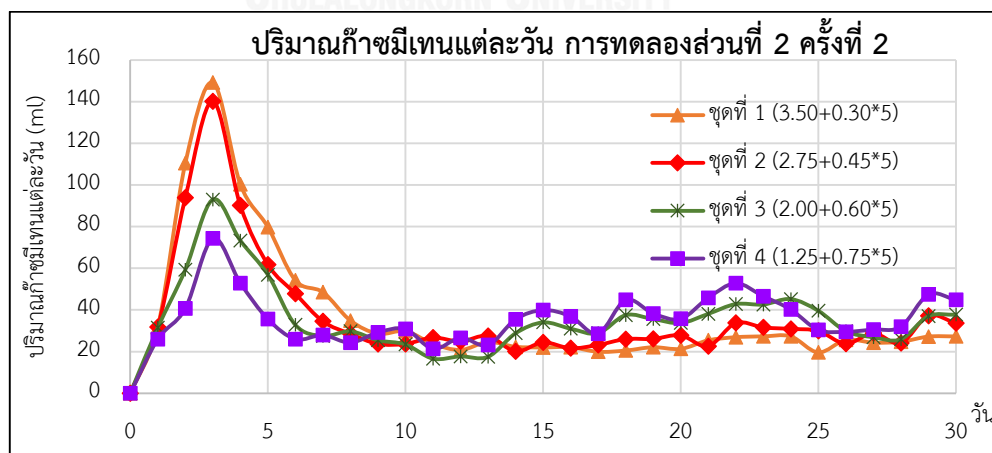
รูปที่ 4.35 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.36 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3

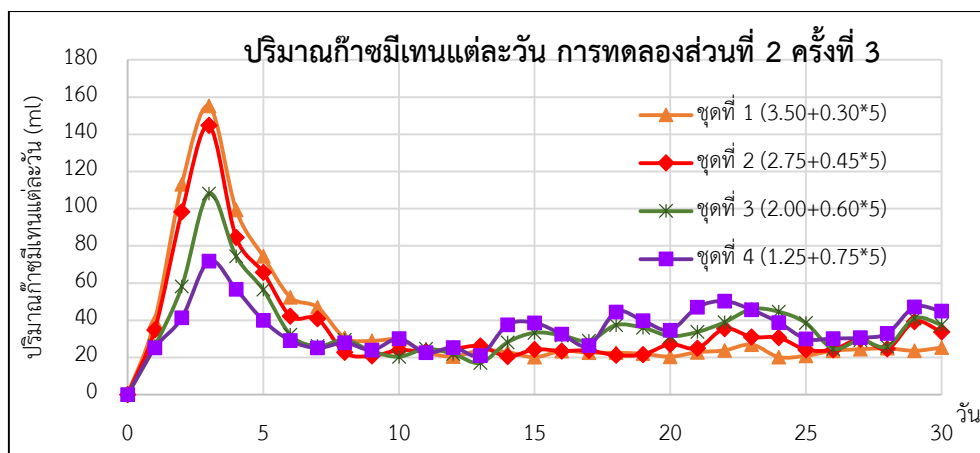


รูปที่ 4.37 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนแต่ละวันของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.38 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนแต่ละวันของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2





รูปที่ 4.39 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนแต่ละวันของการทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3

ตารางที่ 4.4 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองส่วนที่ 2 เทียบกับการทดลองส่วนที่ 1

ชุดการทดลอง	ปริมาณ วัตถุดิบ (gVS)	ปริมาณก๊าซมีเทน สะสมทั้งหมด (ml CH <sub>4</sub> )	ศักยภาพการผลิตก๊าซ มีเทน (ml CH <sub>4</sub> /gVS)
ชุดที่ 1 (3.50+0.30*5)	5	1,135.9 a <sup>1/</sup>	221.94 a
ชุดที่ 2 (2.75+0.45*5)	5	1,116.63 b	218.09 b
ชุดที่ 3 (2.0+0.60*5)	5	1,103.17 c	215.39 c
ชุดที่ 4 (1.25+0.75*5)	5	1,094.57 c	213.67 c
การทดลองที่ 1 สัดส่วน 50:50	5	1,061.8 d	207.12 d

1/ ค่าเฉลี่ยในช่องเดียวกันที่กำกับด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P<0.05)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเส้นใยปาล์มร่วมกับทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนระหว่างวัสดุหมักรวม 2 ชนิดคือทะเลสาบปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์ม แบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียว โดยใช้สัดส่วน 100: 0, 80: 20, 60: 40, 50: 50, 40: 60, 20: 80 และ 0: 100 จำนวน 5 gVS และใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 300 ml หมักเป็นเวลา 40 วัน และนำผลการทดลองมาใช้ศึกษาต่อในการทดลองส่วนที่ 2 คือการศึกษาผลของปริมาณทะเลสาบปาล์มเปล่าร่วมกับเส้นใยปาล์มในการหมักแบบเติมกึ่งต่อเนื่อง ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศหาค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน โดยปริมาณการเติมวัตถุดิบครั้งแรก 3.5, 2.75, 2 และ 1.25 gVS แล้วเติมครั้งต่อไปทุกๆ 5 วัน ปริมาณ 0.3, 0.45, 0.6 และ 0.75 gVS ตามลำดับ รวมปริมาณวัตถุดิบทั้งหมด 5 gVS และใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 300 ml หมักเป็นเวลา 30 วัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

##### 1. สรุปผลการทดลองส่วนที่ 1

การทดลองส่วนที่ 1 สรุปผลการทดลองได้ว่าการหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียวที่สัดส่วนระหว่างทะเลสาบปาล์มเปล่าต่อเส้นใยปาล์ม 50: 50 มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดเฉลี่ย 1,061.80 ml คิดเป็นศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 207.12 ml CH<sub>4</sub>/gVS มีระยะเวลาเกิดก๊าซมีเทน 20 วัน เมื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆก่อนและหลังทดลองพบว่าค่าพีเอชก่อนและหลังการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 7-8 ซึ่งเป็นสภาวะที่จุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนสามารถทำงานได้ มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ระหว่าง 19-39% มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS) 25.3-29.2% และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS) 43.3-51%

##### 2. สรุปผลการทดลองส่วนที่ 2

การทดลองส่วนที่ 2 สรุปผลการทดลองได้ว่าเมื่อทดลองหมักทะเลสาบปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มที่อัตราส่วน 50: 50 แบบเติมวัตถุดิบกึ่งต่อเนื่อง พบว่าการเติมวัตถุดิบเริ่มต้น 3.5 gVS และเติมครั้งต่อไป 0.3 gVS ทุกๆ 5 วัน มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดเฉลี่ย 1,135.9 ml คิดเป็นศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดมีค่าเท่ากับ 221.94 ml CH<sub>4</sub>/gVS โดยการหมักแบบเติมวัตถุดิบกึ่งต่อเนื่องมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมากกว่าการหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

สามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดร้อยละ 7.16 เมื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆก่อนและหลังทดลองพบว่าค่าพีเอชก่อนและหลังการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 7-8 ซึ่งเป็นสถานะที่จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนสามารถทำงานได้ มีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีสูงกว่าการหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียวมีค่าอยู่ระหว่าง 28.8 - 39.56% มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS) 31.41 – 38.58% และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (VS) 51.93 – 60.46%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียว ควรมีการปรับอัตราส่วนระหว่างทะเลาะปาล์มเปล่าและเส้นใยปาล์มให้มีความหลากหลายมากขึ้น และในการเติมแบบกึ่งต่อเนื่องควรปรับความถี่และอัตราการเติมวัตถุดิบ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อการเกิดก๊าซมีเทนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
2. ควรมีการศึกษาวัตถุดิบประกอบก๊าซชีวภาพ และวัดค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ VFA/Alkalinity, ไนโตรเจน เป็นต้น เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน
3. ควรมีการศึกษาปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ของวัตถุดิบ เพื่อหาต้นทุน และเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการนำไปใช้งานจริง
4. การนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ในอนาคต ควรขยายผลการทดลองเป็นระดับนำร่อง (Pilot scale) เพื่อพัฒนาให้เป็นประโยชน์และใช้งานได้จริงสำหรับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การเก็บเกี่ยวผลผลิตทะเลลายปาล์ม, แหล่งที่มา:

[www.oknation.netbloghomeblog\\_data37839378images045.jpg](http://www.oknation.netbloghomeblog_data37839378images045.jpg),

[www.oknation.netbloghomeblog\\_data37839378images149.jpg](http://www.oknation.netbloghomeblog_data37839378images149.jpg)

กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2553). การผลิตปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพ. แหล่งที่มา:

[http://r07.ldd.go.th/Web/21\\_O/manual2.pdf](http://r07.ldd.go.th/Web/21_O/manual2.pdf)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2553). รายงานฉบับสมบูรณ์  
ศึกษาและสาธิตการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2554a). คู่มือการพัฒนาและ  
การลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 4 พลังงานชีวมวล (Vol. 1). ศูนย์บริการวิชาการด้าน  
พลังงานทดแทน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2554b). คู่มือการพัฒนาและ  
การลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 5 พลังงานก๊าซชีวภาพ (Vol. 1). ศูนย์บริการวิชาการ  
ด้านพลังงานทดแทน.

การเกิด วัฒนสิทธิ์. (2556). ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเศษเหลือโรงงานน้ำมันปาล์มดิบ  
และการหมักร่วม ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง. วารสารหาดใหญ่วิชาการ, 16(3 (ฉบับพิเศษ)),  
48-58.

ฐานวุฒ สำนวนศิลป์. (2555). การผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำมันพืชร่วมกับเศษอาหารแบบ  
ไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธีระพงศ์ จันทนิยม. (2551). กระบวนการไร้ของเสียในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม. วารสาร  
หาดใหญ่วิชาการ, 6(2), 159-164.

ธีระพงศ์ จันทนิยม, & อัจฉรา เฟื่องหนู. (2557). การผลิตปุ๋ยหมักจากวัสดุเศษเหลือในโรงงานสกัด  
น้ำมันปาล์ม. เคหการเกษตร, 38(11), 234-237.

นฤมล เชาวะกรโกลก. (2556). การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนดีแคเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมัน  
ปาล์มดิบร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- รุ่งทิwa สี่มาปาน. (2553). ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมของมูลสุกรและหญ้าเนเปียร์หมัก. ประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48.
- ลาแพน หล้าคำมี. (2553). การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้มูลสุกรเป็นหัวเชื้อเริ่มต้นแบบกะและแบบกึ่งกะ. บทความวิจัยครูวิจัย.
- ศูนย์การเรียนรู้ปาล์มน้ำมันซีพีไอ. คุณประโยชน์ของปาล์มน้ำมัน. แหล่งที่มา:  
<http://www.cpiagrotech.com/index.php/en/knowledge-en/item/121-pa>
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2558). ปาล์มน้ำมัน: เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ (ปี 2557-2558 พยากรณ์ไตรมาสที่ 3 เดือนกันยายน 2558).
- สรศักดิ์ ท่าใหญ่. (2556). การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรโดยการหมักร่วมกับผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2553). คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม (Vol. 1).
- สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2540). คู่มือแนวทางการจัดการสิ่งแวดล้อม สำหรับอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานนโยบายและแผนพัฒนาการเกษตร. (2557). ภาวะเศรษฐกิจการเกษตรปี 2557 และแนวโน้มปี 2558.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2558). สถานการณ์พลังงานปี 2558 และแนวโน้มปี 2559.
- สุภาวดี ผลประเสริฐ. (2557). การปรับสภาพวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 16(3 (ฉบับพิเศษ)), 641-649.

#### ภาษาอังกฤษ

- Azeem K., Muhammad A., Muzammil A., Tariq M., & Lorna D. (2011). Review: The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste management.*, 31, 1737-1744.
- Bioprocess Control. (2011). AMPTS II Operation and Maintenance Manual Version1.7. แหล่งที่มา: <http://www.bioprocesscontrol.com/products/ampts-ii/>
- Chavalparit O., Rulkens W. H., Mol A. P. J., & Khaodhair S. (2006). Option for environmental sustainability of the crude palm oil industry in Thailand

through enhancement of industrial *Environment, Development and Sustainability*, 8, 271-287.

Denay N., Keikhosro K., & Ilona H. (2011). Improvement of biogas production from oil palm empty fruit bunches (OPEFB). *Industrial-Crops-and-Products*, 34, 1097-1101.

Hamidou B., et al. (2014). Evaluation of batch anaerobic co-digestion of palm pressed fiber and cattle manure under mesophilic conditions. *Waste management*, 34, 1984-1991.

Lehtomaki A. (2006). *Biogas production from energy crop and crop residues*.

Department of Biological and Environmental Science, Faculty of Mathematics and science, University of Jyvaskyla.

Mohammed S., et al. (2014). Biological pre-treated oil palm mesocarp fibre with cattle manure for biogas production by anaerobic digestion during acclimatization phase. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 95, 189-194.

Nur I. I., Jamaliah J. M., Shuhaida H., Mohd N. T. M., & Osman H. (2013). Sodium Hydroxide Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Oil Palm Mesocarp Fiber. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 4(3), 101-105.

O-thong S., Boe K., & Angelidaki I. (2012). Thermophilic anaerobic co-digestion of oil palm empty fruit bunches with palm oil mill effluent for efficient biogas *Applied Energy*, 93, 648-654.







ก.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทะเลายปาล์มแปลาและเส้นใยปาล์ม

ตารางที่ ก. 1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด ของวัตถุดิบที่นำมาทดลอง

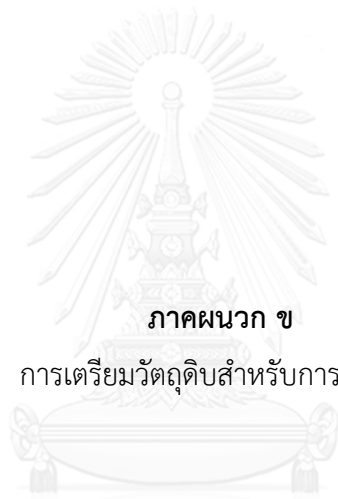
สัดส่วน	No.	น้ำหนัก		น้ำหนัก		น้ำหนัก		น้ำหนักจริง		น้ำหนักจริง	%TS	%TVS	VS/TS
		ภาชนะ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	น้ำหนักจริง				
100:0	38	31.8862	33.5676	32.9712	1.6814	1.085	32.2265	0.3403	64.53	44.29	0.69		
80:20	42	34.8363	37.4261	36.4302	2.5898	1.5939	35.2699	0.4336	61.55	44.80	0.73		
60:40	5	34.193	35.7039	35.0993	1.5109	0.9063	34.4895	0.2965	59.98	40.36	0.67		
50:50	77	28.6564	30.4534	29.674	1.797	1.0176	29.0018	0.3454	56.63	37.41	0.66		
40:60	K2	29.3978	31.2958	30.5	1.898	1.1022	29.731	0.3332	58.07	40.52	0.70		
20:80	3N	29.1937	30.9502	30.1639	1.7565	0.9702	29.4802	0.2865	55.23	38.92	0.70		
0:100	31	35.5265	37.0285	36.318	1.502	0.7915	35.7557	0.2292	52.70	37.44	0.71		

ก.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติตะกอนจุลินทรีย์

ตารางที่ ก.2.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติตะกอนจุลินทรีย์

ตัวอย่าง	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนัก ก่อนอบ (g)	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนัก หลังเผา (g)	%SS	%VSS	VSS/SS
ตะกอนจุลินทรีย์	2	30.6294	30.6978	30.6479	34200	24950	0.730
ตะกอนจุลินทรีย์	2	31.5462	31.6166	31.5647	35200	25950	0.737
ค่าเฉลี่ย	-	-	-	-	34700	25450	0.733





ภาคผนวก ข

การเตรียมวัสดุติดสำหรับการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข.1 การเตรียมวัสดุสำหรับทำการทดลองส่วนที่ 1

ตารางที่ ข.1.1 ปริมาณการเติมวัสดุดิบและตะกอนจุลินทรีย์ การทดลองส่วนที่ 1

ตัวอย่างที่	สัดส่วนระหว่าง ทะเลาะปาล์มเปล่า ต่อเส้นใยปาล์ม	ปริมาณ วัสดุดิบ (gVS)	ปริมาณทะเลาะปาล์มเปล่า		ปริมาณเส้นใยปาล์ม		ปริมาณ ตะกอนจุลินทรีย์
			น้ำหนักแห้ง (gVS)	น้ำหนักจริง (g)	น้ำหนักแห้ง (gVS)	น้ำหนักจริง (g)	
1	100:0	5	5	5.81	0	0	300
2	80:20	5	4	4.65	1	1.52	300
3	60:40	5	3	3.49	2	3.03	300
4	50:50	5	2.5	2.91	2.5	3.79	300
5	40:60	5	2	2.33	3	4.55	300
6	20:80	5	1	1.16	4	6.06	300
7	0:100	5	0	0	5	7.58	300
Blank	-	-	-	-	-	-	300

ข.2 การเตรียมวัสดุสำหรับการทดลองส่วนที่ 2

ตารางที่ ข.2.2 ปริมาณการเติมวัตถุบและตะกอนจุลินทรีย์ การทดลองส่วนที่ 2

ชุดการทดลอง	ปริมาณการเติมวัตถุเริ่มต้น										ปริมาณการเติมวัตถุโดยตรงต่อทุก ๆ 5 วัน					
	ตะกอน					น้ำหมักแก๊ส					น้ำหมักจริง		น้ำหมักแก๊ส		น้ำหมักจริง	
	น้ำหนักรวม (gVS)	น้ำหนักแห้ง (gVS)	น้ำหนักจริง (g)	น้ำหนักแห้ง (gVS)	น้ำหนักจริง (g)	น้ำหนักรวม (gVS)	น้ำหนักแห้ง (gVS)	น้ำหนักจริง (g)	น้ำหนักแห้ง (gVS)	น้ำหนักจริง (g)	น้ำหนักรวม (gVS)	น้ำหนักแห้ง (gVS)	น้ำหนักจริง (g)	น้ำหนักรวม (gVS)	น้ำหนักแห้ง (gVS)	น้ำหนักจริง (g)
1	3.50	1.750	2.035	1.750	2.652	300	3.50	1.750	2.035	2.652	3.50	1.750	2.035	1.750	1.375	2.652
2	2.75	1.375	1.599	1.375	2.083	300	2.75	1.375	1.599	2.083	2.75	1.375	1.599	1.375	1.000	2.083
3	2.00	1.000	1.163	1.000	1.515	300	2.00	1.000	1.163	1.515	2.00	1.000	1.163	1.000	0.625	1.515
4	1.25	0.625	0.727	0.625	0.947	300	1.25	0.625	0.727	0.947	1.25	0.625	0.727	0.625	0.250	0.947
Blank	-	-	-	-	-	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



ภาคผนวก ค  
ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าซีโอดี ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยง่าย

ค.1 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช

ตารางที่ ค.1.1.1 ผลการวัดค่าพีเอช การทดลองส่วนที่ 1

สัดส่วน	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	พีเอชก่อนเดินระบบ ครั้งที่ 1	พีเอชหลังเดินระบบ ครั้งที่ 1	พีเอชก่อนเดินระบบ ครั้งที่ 2	พีเอชหลังเดินระบบ ครั้งที่ 2
100:0	7.693	7.78	7.681	7.75
80:20	7.72	7.723	7.734	7.742
60:40	7.755	7.788	7.748	7.775
50:50	7.74	7.754	7.742	7.754
40:60	7.725	7.721	7.737	7.721
20:80	7.683	7.7	7.52	7.692
0:100	7.734	7.745	7.741	7.754
Blank	7.854	8.012	7.854	8.012

ตารางที่ ค.1.1.2 ผลการวัดค่าพีเอช การทดลองส่วนที่ 2

ชุดทดลอง	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	พีเอชก่อนเดินระบบ ครั้งที่ 1	พีเอชหลังเดินระบบ ครั้งที่ 1	พีเอชก่อนเดินระบบ ครั้งที่ 2	พีเอชหลังเดินระบบ ครั้งที่ 2	พีเอชก่อนเดินระบบ ครั้งที่ 3	พีเอชหลังเดินระบบ ครั้งที่ 3
ชุดที่ 1 (3.50+0.30*5)	7.711	7.613	7.742	7.698	7.558	7.619
ชุดที่ 2 (2.75+0.45*5)	7.523	7.468	7.694	7.756	7.602	7.591
ชุดที่ 3 (2.00+0.60*5)	7.741	7.788	7.685	7.687	7.701	7.722
ชุดที่ 4 (1.25+0.75*5)	7.658	7.754	7.612	7.543	7.683	7.65
Blank	7.854	8.012	7.854	8.012	7.854	8.012



ค.2 ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอเอตี

ตารางที่ ค.2.1 ผลวิเคราะห์ค่าซีไอเอตีทั้งหมด การทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1

สัดส่วน	ขนาดหลอดตัวอย่าง (ml)	การเจือจาง 1:	ก่อนเดินระบบ			หลังเดินระบบ			% ประสิทธิภาพ กำจัดซีไอเอตี
			%Abs	ความเข้มข้น (µg)	ซีไอเอตีทั้งหมด (mg/l)	%Abs	ความเข้มข้น (µg)	ซีไอเอตีทั้งหมด (mg/l)	
100:0	2.5	50	0.235	1410	28200	0.148	888	17760	37%
80:20	2.5	50	0.182	1092	21840	0.139	834	16680	24%
60:40	2.5	50	0.172	1032	20640	0.139	834	16680	19%
50:50	2.5	50	0.162	972	19440	0.117	702	14040	28%
40:60	2.5	50	0.162	972	19440	0.123	738	14760	24%
20:80	2.5	50	0.137	822	16440	0.089	534	10680	35%
0:100	2.5	50	0.127	762	15240	0.093	558	11160	27%
Blank	2.5	100	0.059	354	14160	0.054	324	12960	8%

ตารางที่ ค.2.2 ผลวิเคราะห์ค่าซีไอดีทั้งหมด การทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2

สัดส่วน	ขนาดหลอดตัวอย่าง (ml)	การเจือจาง	ก่อนเดินระบบ			หลังเดินระบบ			% ประสิทธิภาพ บำบัดซีไอดี
			%Abs	ความเข้มข้น (µg)	ซีไอดีทั้งหมด	%Abs	ความเข้มข้น (µg)	ซีไอดีทั้งหมด	
100:0	2.5	1: 50	0.229	1374	27480	0.163	978	19560	29%
80:20	2.5	50	0.188	1128	22560	0.146	876	17520	22%
60:40	2.5	50	0.163	978	19560	0.127	762	15240	22%
50:50	2.5	50	0.163	978	19560	0.128	768	15360	21%
40:60	2.5	50	0.152	912	18240	0.092	552	11040	39%
20:80	2.5	50	0.141	846	16920	0.095	570	11400	33%
0:100	2.5	50	0.129	774	15480	0.099	594	11880	23%
Blank	2.5	100	0.059	354	14160	0.054	324	12960	8%

ตารางที่ ค.2.3 ผลวิเคราะห์ค่าซีไอต์ทั้งหมด การทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1

ชุดทดลอง	ขนาดหลอด ตัวอย่าง (ml)	การเจือจาง 1:	ก่อนเดินระบบ			หลังเดินระบบ			% ประสิทธิภาพ กำจัดซีไอต์
			%Abs	ความเข้มข้น (µg)	ซีไอต์ทั้งหมด (mg/l)	%Abs	ความเข้มข้น (µg)	ซีไอต์ทั้งหมด (mg/l)	
ชุดที่ 1 (3.50+0.30*5)	2.5	50	0.149	894	17880	0.097	582	11640	40.31%
ชุดที่ 2 (2.75+0.45*5)	2.5	50	0.142	852	17040	0.103	618	12360	36.62%
ชุดที่ 3 (2.00+0.60*5)	2.5	50	0.136	816	16320	0.109	654	13080	32.92%
ชุดที่ 4 (1.25+0.75*5)	2.5	50	0.129	774	15480	0.114	684	13680	29.85%
Blank	2.5	100	0.059	354	14160	0.054	324	12960	8.47%

ตารางที่ ค.2.4 ผลวิเคราะห์ค่าซีไอต์ทั้งหมด การทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2

ชุดทดลอง	ขนาดหลอดตัวอย่าง (ml)	การเจือจาง	ก่อนเดินระบบ			หลังเดินระบบ			% ประสิทธิภาพกำจัดซีไอต์
			%Abs	ความเข้มข้น (µg)	ซีไอต์ทั้งหมด (mg/l)	%Abs	ความเข้มข้น (µg)	ซีไอต์ทั้งหมด (mg/l)	
ชุดที่ 1 (3.50+0.30*5)	2.5	1:	0.15	900	18000	0.098	588	11760	39.69%
ชุดที่ 2 (2.75+0.45*5)	2.5	50	0.143	858	17160	0.103	618	12360	36.62%
ชุดที่ 3 (2.00+0.60*5)	2.5	50	0.136	816	16320	0.108	648	12960	33.54%
ชุดที่ 4 (1.25+0.75*5)	2.5	50	0.128	768	15360	0.113	678	13560	30.46%
Blank	2.5	100	0.059	354	14160	0.054	324	12960	8.47%

ตารางที่ ค.2.5 ผลวิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมด การทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3

ชุดทดลอง	ขนาดหลอด ตัวอย่าง (ml)	การเจือจาง 1:	ก่อนเดินระบบ			หลังเดินระบบ			% ประสิทธิภาพ กำจัดซีโอดี
			%Abs	ความเข้มข้น (µg)	ซีโอดีทั้งหมด (mg/l)	%Abs	ความเข้มข้น (µg)	ซีโอดีทั้งหมด (mg/l)	
ชุดที่ 1 (3.50+0.30*5)	2.5	50	0.15	900	18000	0.096	576	11520	40.92%
ชุดที่ 2 (2.75+0.45*5)	2.5	50	0.144	864	17280	0.104	624	12480	36.00%
ชุดที่ 3 (2.00+0.60*5)	2.5	50	0.135	810	16200	0.107	642	12840	34.15%
ชุดที่ 4 (1.25+0.75*5)	2.5	50	0.127	762	15240	0.115	690	13800	29.23%
Blank	2.5	100	0.059	354	14160	0.054	324	12960	8.47%

ค.3 ผลการวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยง่าย

ตารางที่ ค.3.1 ผลวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยง่าย การทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 1

สัดส่วน	น้ำหนัก		น้ำหนัก		น้ำหนักจริง		น้ำหนักจริง		น้ำหนักจริง หลังเผา (g)	%TS	%TVS	VS/TS
	ภาชนะ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	น้ำหนัก	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	น้ำหนัก	หลังเผา (g)				
100:0	30.8532	32.3842	31.8212	1.531	0.968	31.1623	0.3091	63.23	43.04	0.68		
80:20	33.8031	36.2431	35.3062	2.44	1.5031	34.2276	0.4245	61.60	44.20	0.72		
60:40	35.226	36.8869	36.2133	1.6609	0.9873	35.5113	0.2853	59.44	42.27	0.71		
50:50	29.6895	31.6354	30.7884	1.9459	1.0989	30.0648	0.3753	56.47	37.19	0.66		
40:60	28.3648	30.1148	29.378	1.75	1.0132	28.6969	0.3321	57.90	38.92	0.67		
20:80	30.2269	32.1352	31.2529	1.9083	1.026	30.5112	0.2843	53.77	38.87	0.72		
0:100	36.5597	38.2125	37.431	1.6528	0.8713	36.813	0.2533	52.72	37.39	0.71		

ตารางที่ ค.3.2 ผลวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยง่าย การทดลองส่วนที่ 1 ครั้งที่ 2

สัดส่วน	น้ำหนัก		น้ำหนักจริง		น้ำหนักจริง		น้ำหนักจริง		%TS	%TVS	VS/TS
	ภาชนะ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	หลังเผา (g)	หลังเผา (g)				
100:0	31.8862	33.5676	32.9712	1.6814	1.085	32.2265	0.3403	64.53	44.29	0.69	
80:20	34.8363	37.4261	36.4302	2.5898	1.5939	35.2699	0.4336	61.55	44.80	0.73	
60:40	34.193	35.7039	35.0993	1.5109	0.9063	34.4895	0.2965	59.98	40.36	0.67	
50:50	28.6564	30.4534	29.674	1.797	1.0176	29.0018	0.3454	56.63	37.41	0.66	
40:60	29.3978	31.2958	30.5	1.898	1.1022	29.731	0.3332	58.07	40.52	0.70	
20:80	29.1937	30.9502	30.1639	1.7565	0.9702	29.4802	0.2865	55.23	38.92	0.70	
0:100	35.5265	37.0285	36.318	1.502	0.7915	35.7557	0.2292	52.70	37.44	0.71	

ตารางที่ ค.3.3 ผลวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยง่าย การทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 1

สัดส่วน	น้ำหนัก		น้ำหนักจริง		น้ำหนักจริง		น้ำหนักจริง		%TTS	%TVS	VS/TS
	ลักษณะ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	หลังเผา (g)	หลังเผา (g)				
ชุดที่ 1 (3.50+0.30*5)	34.193	36.2756	35.3094	2.0826	1.1164	34.6013	0.4083	53.61	34.00	0.63	
ชุดที่ 2 (2.75+0.45*5)	29.3976	31.4072	30.4812	2.0096	1.0836	29.7908	0.3932	53.92	34.36	0.64	
ชุดที่ 3 (2.00+0.60*5)	30.2267	32.7669	31.6006	2.5402	1.3739	30.7183	0.4916	54.09	34.73	0.64	
ชุดที่ 4 (1.25+0.75*5)	28.3649	30.1753	29.3735	1.8104	1.0086	28.7366	0.3717	55.71	35.18	0.63	



ตารางที่ ค.3.4 ผลวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยง่าย การทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 2

สัดส่วน	น้ำหนัก		น้ำหนักจริง		น้ำหนักจริง		น้ำหนัก		น้ำหนักจริง		%TS	%TVS	VS/TS
	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	หลังเผา (g)	หลังเผา (g)	หลังเผา (g)	หลังเผา (g)			
ชุดที่ 1 (3.50+0.30*5)	29.6893	33.1676	31.5593	34.783	1.8700	30.3755	0.6862	53.76	34.03	0.63			
ชุดที่ 2 (2.75+0.45*5)	29.1938	31.0061	30.1731	1.8123	0.9793	29.5475	0.3537	54.04	34.52	0.64			
ชุดที่ 3 (2.00+0.60*5)	30.294	32.7098	31.6028	2.4158	1.3088	30.7554	0.4614	54.18	35.08	0.65			
ชุดที่ 4 (1.25+0.75*5)	36.5595	38.823	37.8451	2.2635	1.2856	37.0176	0.4581	56.80	36.56	0.64			

ตารางที่ ค.3.5 ผลวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยง่าย การทดลองส่วนที่ 2 ครั้งที่ 3

สัดส่วน	น้ำหนัก		น้ำหนัก		น้ำหนัก		น้ำหนักจริง		น้ำหนักจริง		%TS	%TVS	VS/TS
	ภาษาษะ (g)	ก่อนอบ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	ก่อนอบ (g)	หลังอบ (g)	น้ำหนักจริง	หลังเผา (g)			
ชุดที่ 1 (3.50+0.30*5)	34.1968	36.8653	35.6546	36.8653	2.6685	1.4578	34.7407	0.5439	54.63	34.25	0.63		
ชุดที่ 2 (2.75+0.45*5)	29.4036	31.2428	30.396	31.2428	1.8392	0.9924	29.7569	0.3533	53.96	34.75	0.64		
ชุดที่ 3 (2.00+0.60*5)	30.2103	32.2163	31.2935	32.2163	2.006	1.0832	30.5758	0.3655	54.00	35.78	0.66		
ชุดที่ 4 (1.25+0.75*5)	27.3685	29.3327	28.4431	29.3327	1.9642	1.0746	27.7255	0.357	54.71	36.53	0.67		



ง.1 ผลการวัดปริมาณก๊าซมีเทนสะสมและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ตารางที่ ง.1.1 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน การทดลองส่วนที่ 1

สัดส่วน	น้ำหนักวัสดุที่ใช้หมัก (gVS)	ปริมาณแก๊สมีเทนสะสม (ml)				ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (ml/gVS)			
		Blank	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	เฉลี่ย
100:0	5	26.2	1024	1007	1015.50	199.56	196.16	197.86	197.86
80:20	5	26.2	952.5	947.3	949.90	185.26	184.22	184.74	184.74
60:40	5	26.2	1009.6	997	1003.30	196.68	194.16	195.42	195.42
50:50	5	26.2	1066.2	1057.4	1061.80	208	206.24	207.12	207.12
40:60	5	26.2	928.5	857.3	892.90	180.46	166.22	173.34	173.34
20:80	5	26.2	934.8	864.8	899.80	181.72	167.72	174.72	174.72
0:100	5	26.2	858.3	822.9	840.60	166.42	159.34	162.88	162.88

ตารางที่ ง.1.2 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน การทดลองส่วนที่ 2

ชุดที่	น้ำหนักวัสดุที่ใช้หมัก (gVS)	ปริมาณแก๊สมีเทนสะสม (ml)					ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (ml/gVS)				
		Blank	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	% ที่เพิ่มขึ้น
ชุดที่ 1 (3.50+0.30*5)	5	26.2	1137.6	1142.3	1127.8	1135.90	222.28	223.22	220.32	221.94	7.16%
ชุดที่ 2 (2.75+0.45*5)	5	26.2	1117.5	1120.4	1112	1116.63	218.26	218.84	217.16	218.09	5.29%
ชุดที่ 3 (2.0+0.60*5)	5	26.2	1104.3	1099.6	1105.6	1103.17	215.62	214.68	215.88	215.39	3.99%
ชุดที่ 4 (1.25+0.75*5)	5	26.2	1094.2	1098.4	1091.1	1094.57	213.6	214.44	212.98	213.67	3.16%
แบบเติมครั้งเดียว (50:50)	5	26.2	1057.4	1066.2	-	1061.80	206.24	208	-	207.12	-

ง.2 ผลการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแต่ละวัน

ตารางที่ ง.2.1 ผลการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแต่ละวัน การทดลองส่วนที่ 1

Process temperature [Celsius]	37														
Flow Cell nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Name	1.1-100:0	1.2-100:0	2.1-80:20	2.2-80:20	3.1-60:40	3.2-60:40	4.1-50:50	4.2-50:50	5.1-40:60	5.2-40:60	6.1-20:80	6.2-20:80	7.1-0:100	7.2-0:100	B
Substrate VS/COD amount [g]	4.3	4.3	4.1	4.1	3.9	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.5	3.5	3.3	3.3	0
Inoculum VS/COD amount [g]	7.64	7.64	7.63	7.63	7.64	7.64	7.63	7.63	7.64	7.64	7.63	7.63	7.64	7.64	7.64
Type of unit [VS/COD]	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS
Headspace volume [ml]	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	300
Assumed CH4 content [%]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Day	1.1-100:0	1.1-100:0	2.1-80:20	2.2-80:20	3.1-60:40	3.2-60:40	4.1-50:50	4.2-50:50	5.1-40:60	5.2-40:60	6.1-20:80	6.2-20:80	7.1-0:100	7.2-0:100	B
	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]	[Nm <sup>3</sup> /day]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	76.2	65.3	83.4	69	63.9	61.5	82.6	80.3	61.4	50	88.5	82.4	73	79.7	11.4
2	214.8	215.7	207.7	210	249	248.3	245.7	239.6	231.3	226.6	190.5	179.2	161	157.7	2.7
3	227.5	239.8	230.2	226.3	233.5	232.4	160.4	162.1	209.6	207.3	196.8	186.5	157.2	158.5	2.7
4	162	155.9	135.7	134.7	119.4	119.9	122.3	124.2	107.5	108.2	118.6	112.7	105.6	105.8	1.1
5	87.6	80.2	68.8	70.1	78.1	76	93.4	89	69.7	68.6	72	66.6	67.9	66.9	0.6
6	53.9	51.1	48.6	44	62.8	58.9	88.4	82.3	54.5	50	59.3	52.6	58.1	58.1	0.6
7	34.1	33.3	31.1	36.8	51	49.7	54.3	57.1	44.8	42.1	40.6	35.3	40.6	38.3	0.6

Day	1.1-100:0 [Nm/day]	1.1-100:0 [Nm/day]	2.1-80:20 [Nm/day]	2.2-80:20 [Nm/day]	3.1-60:40 [Nm/day]	3.2-60:40 [Nm/day]	4.1-50:50 [Nm/day]	4.2-50:50 [Nm/day]	5.1-40:60 [Nm/day]	5.2-40:60 [Nm/day]	6.1-20:80 [Nm/day]	6.2-20:80 [Nm/day]	7.1-0:100 [Nm/day]	7.2-0:100 [Nm/day]	B [Nm/day]
8	30.6	29.7	29.4	31.2	42.1	42.7	50.2	49.8	41.4	35.9	36.9	32.1	34.7	32.4	0.6
9	30.4	28.6	30.3	31.5	36.9	36.8	46.5	49.5	35.4	30.3	35.2	30.8	33.1	31.5	0.6
10	25.6	21.8	20.7	22.5	32.1	30.2	33.5	32.9	23.7	15.5	28.2	25.2	23.8	23.1	0.6
11	20.1	21.8	17.5	18.6	14.4	13.1	20.4	24.3	10.8	6.4	13	14	14.1	8.4	0.6
12	20.1	17.8	14.5	16.1	10	8	20.4	19.6	10.8	3.7	10.5	9	6.7	4.2	0.6
13	21.3	17.1	12.7	13.4	6.6	5.5	16.6	16.6	6.5	3.7	10.1	6.4	10.2	4.2	0.6
14	10.2	19.1	6.7	8.7	4.9	4.8	8.5	9.3	4.9	3	8	5.5	6.2	6.1	0.6
15	3.2	4.8	5.8	4.6	2.4	4.6	5.8	5.6	4.1	3	6.1	1	5.3	4.5	0.6
16	3.2	3	3.5	3.2	1.3	4.6	5.4	5.6	2.5	3	1.8	0.8	4.7	3.4	0.6
17	3.2	2	3.5	3.2	0.4		5.4	3.2	1.2		1.4	0.8	2.9	3.3	0.6
18			1.6	2.2	0.4		2.8	2.4	1.2		1.4	0.8	2.2	1.2	0.5
19			0.8	1.2	0.4		2.3	2.4	1.2		1.4	0.8	2.2	1.2	
20							1.3	1.6	1.2		1.4	0.8	2.2	1.2	
21									1.2		1.4	0.8	2.4	1.2	
22									1.2		1.3	0.8	2.5	1.2	
23									1.2		1.3	0.8	2.5	1.2	

Day	1.1-100:0 [Nm/day]	1.1-100:0 [Nm/day]	2.1-80:20 [Nm/day]	2.2-80:20 [Nm/day]	3.1-60:40 [Nm/day]	3.2-60:40 [Nm/day]	4.1-50:50 [Nm/day]	4.2-50:50 [Nm/day]	5.1-40:60 [Nm/day]	5.2-40:60 [Nm/day]	6.1-20:80 [Nm/day]	6.2-20:80 [Nm/day]	7.1-0:100 [Nm/day]	7.2-0:100 [Nm/day]	B [Nm/day]
24									1.2		1.3	0.8	2.6	1.3	
25											1.3	1	2.6	1.7	
26											1.3	2.7	2.6	1.7	
27											1.3	2.7	2.6	1.7	
28											1.3	2.7	3.4	1.7	
29											1.3	2.3	3.6	1.7	
30											1.3	2.3	4.9	4.9	
31												2.3	6.5	4.9	
32												2.3	2.6	2.5	
33													2.6	2.5	
34													2.6	2.5	
35													2.6	2.5	
36															
37															
38															
39															
40															



ตารางที่ ๓.2.2 ผลการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแต่ละวัน การทดลองส่วนที่ 2

Process temperature [Celsius]	37											
Flow Cell nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Name	1st 3.50-1	1st 3.50-2	1st 3.50-3	1st 2.75-1	1st 2.75-2	1st 2.75-3	1st 2.00-1	1st 2.00-2	1st 2.00-3	1st 1.25-1	1st 1.25-2	1st 1.25-3
Substrate VS/COD amount [g]	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Inoculum VS/COD amount [g]	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63
Type of unit [VS/COD]	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS
Headspace volume [ml]	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295
Assumed CH4 content [%]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Day	1st 3.50-1	1st 3.50-2	1st 3.50-3	1st 2.75-1	1st 2.75-2	1st 2.75-3	1st 2.00-1	1st 2.00-2	1st 2.00-3	1st 1.25-1	1st 1.25-2	1st 1.25-3
	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	Flow [Nm <sup>3</sup> /day]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	37.6	31.7	39.6	36.6	31.7	34.8	30.6	31.5	26.1	25.9	26	25.1
2	112.2	110.4	113.1	84.8	93.9	98.3	67	59.3	58.2	44.6	40.7	41.3
3	149.3	149.2	155.3	131.8	140.2	144.7	113.1	93	108.1	73.7	74.3	71.8
4	95.7	100.3	99.4	82.1	90.1	84.5	79.1	73.3	74.4	50.4	52.9	56.6
5	76.7	79.8	74.3	66.4	61.8	65.7	59.6	56.9	56.4	35.6	35.6	39.9
6	53.8	54.2	52.4	44.8	47.8	42.2	34.5	32.8	32.2	30.8	26	29.1

Day	1st 3.50-1 Flow [Nm/day]	1st 3.50-2 Flow [Nm/day]	1st 3.50-3 Flow [Nm/day]	1st 2.75-1 Flow [Nm/day]	1st 2.75-2 Flow [Nm/day]	1st 2.75-3 Flow [Nm/day]	1st 2.00-1 Flow [Nm/day]	1st 2.00-2 Flow [Nm/day]	1st 2.00-3 Flow [Nm/day]	1st 1.25-1 Flow [Nm/day]	1st 1.25-2 Flow [Nm/day]	1st 1.25-3 Flow [Nm/day]
7	45.4	48.5	47	43.5	34.5	40.8	26.4	27.5	26.1	26.6	27.9	25.1
8	37.5	34.9	30.6	22.7	28.5	22.7	22	29.7	29.4	28.4	24.3	27.9
9	28.6	28.6	28.9	25.1	23.7	20.8	25.7	25.4	23.4	26.9	29.2	24
10	29.3	29.8	29.6	25.8	23.7	23.9	20.5	23.4	20.4	34.8	30.8	30.1
11	23.4	23.7	22.9	26.1	26.7	23.2	20.7	16.6	24.6	23.6	21.3	22.5
12	20.8	20.8	20.5	26.4	24.9	24.6	19.6	17.7	21.9	29.2	26.6	25.4
13	24.8	24.6	23.8	26.8	27.5	26.1	22.5	17.5	17.1	25.3	23.1	21
14	25.3	22.3	22.9	20.8	20.1	20.5	24.4	28.8	28.1	35.3	35.5	37.5
15	23.4	22	20.1	27.4	24.4	24.3	30.4	34	33.3	37.9	39.9	38.6
16	23	22.1	23.5	27.6	21.6	23.5	29	31	31.9	34.9	36.9	32.6
17	22.5	19.9	22.6	24.2	23.2	23.7	24.2	28.8	28.9	25.9	28.6	26.3
18	22.3	20.5	22.5	28.3	26	21.2	33	37.5	37.4	36.7	44.8	44.5
19	23.6	22.1	22	29.6	26.1	21.6	34.3	35.6	36	38	38.3	39.7
20	21.4	21.3	20.4	27.5	27.8	27.1	31.7	33.7	31.5	39.8	35.7	34.7

Day	1st 3.50-1 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 3.50-2 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 3.50-3 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 2.75-1 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 2.75-2 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 2.75-3 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 2.00-1 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 2.00-2 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 2.00-3 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 1.25-1 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 1.25-2 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]	1st 1.25-3 Flow [Nm <sup>3</sup> /day]
21	24.9	25.4	22.8	20.9	22.6	24.9	32.5	38.1	33.7	41.2	45.8	47
22	27.9	26.9	23.8	33.9	33.7	35.5	36.4	42.8	38.9	48.4	52.8	50.3
23	29.2	27.3	26.9	35.5	31.6	31	43.6	42.6	46	45.5	46.6	45.6
24	27.5	27.3	20.2	31.8	30.9	30.6	44.5	45.2	44.6	36.9	40.2	38.8
25	20.5	19.6	20.9	20.8	29.9	24.2	37.1	39.6	38.5	30.1	30.4	30
26	19.5	25.6	23.6	22.7	23.8	24.2	28.3	29.8	24.7	28.2	29.5	30.2
27	19.6	24.3	24.4	28.1	28.8	29.8	26.6	26.9	29.3	33.5	30.6	30.6
28	22.1	24.7	24.9	23.8	24.1	24.6	30.9	25.9	25.9	35.5	31.9	32.9
29	23.5	27.2	23.6	38.5	37.2	39.3	36.6	37	41	45.3	47.4	47.1
30	26.3	27.3	25.3	33.2	33.6	33.7	39.5	37.7	37.6	45.3	44.8	44.9

๓.๓ ผลการวัดปริมาณก๊าซมีเทนสะสม

ตารางที่ ๓.3.1 ผลการวัดปริมาณก๊าซมีเทนสะสม การทดลองส่วนที่ 1

Process temperature [Celsius]	37														
Flow Cell nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Name	1.1-100:0	1.2-100:0	2.1-80:20	2.2-80:20	3.1-60:40	3.2-60:40	4.1-50:50	4.2-50:50	5.1-40:60	5.2-40:60	6.1-20:80	6.2-20:80	7.1-0:100	7.2-0:100	B
Substrate VS/COD amount [g]	4.3	4.3	4.1	4.1	3.9	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.5	3.5	3.3	3.3	0
Inoculum VS/COD amount [g]	7.64	7.64	7.63	7.63	7.64	7.64	7.63	7.63	7.64	7.64	7.63	7.63	7.64	7.64	7.64
Type of unit [VS/COD]	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS
Headspace volume [mL]	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	300
Assumed CH4 content [%]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Day	1.1-100:0	1.2-100:0	2.1-80:20	2.2-80:20	3.1-60:40	3.2-60:40	4.1-50:50	4.2-50:50	5.1-40:60	5.2-40:60	6.2-20:80	6.2-20:80	7.1-0:100	7.2-0:100	B
Volume [NmL]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volume [NmL]	76.2	65.3	83.4	69	63.9	61.5	82.6	80.3	61.4	50	88.5	82.4	73	79.7	11.4
Volume [NmL]	291	281	291.1	279	312.9	309.8	328.3	319.9	292.7	276.6	279	261.6	234	237.4	14.1
Volume [NmL]	518.5	520.8	521.3	505.3	546.4	542.2	488.7	482	502.3	483.9	475.8	448.1	391.2	395.9	16.8
Volume [NmL]	680.5	676.7	657	640	665.8	662.1	611	606.2	609.8	592.1	594.4	560.8	496.8	501.7	17.9
Volume [NmL]	768.1	756.9	725.8	710.1	743.9	738.1	704.4	695.2	679.5	660.7	666.4	627.4	564.7	568.6	18.5
Volume [NmL]	822	808	774.4	754.1	806.7	797	792.8	777.5	734	710.7	725.7	680	622.8	626.7	19.1

Day	1.1-100:0		1.2-100:0		2.1-80:20		2.2-80:20		3.1-60:40		3.2-60:40		4.1-50:50		4.2-50:50		5.1-40:60		5.2-40:60		6.2-20:80		6.2-20:80		7.1-0:100		7.2-0:100		B	
	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	Volume [Nm]	
7	856.1	841.3	805.5	790.9	857.7	846.7	847.1	834.6	778.8	752.8	766.3	715.3	663.4	665	19.7															
8	886.7	871	834.9	822.1	899.8	889.4	897.3	884.4	820.2	788.7	803.2	747.4	698.1	697.4	20.3															
9	917.1	899.6	865.2	853.6	936.7	926.2	943.8	933.9	855.6	819	838.4	778.2	731.2	728.9	20.9															
10	942.7	921.4	885.9	876.1	968.8	956.4	977.3	966.8	879.3	834.5	866.6	803.4	755	752	21.5															
11	962.8	943.2	903.4	894.7	983.2	969.5	997.7	991.1	890.1	840.9	879.6	817.4	769.1	760.4	22.1															
12	982.9	961	917.9	910.8	993.2	977.5	1018.1	1010.7	900.9	844.6	890.1	826.4	775.8	764.6	22.7															
13	1004.2	978.1	930.6	924.2	999.8	983	1034.7	1027.3	907.4	848.3	900.2	832.8	786	768.8	23.3															
14	1014.4	997.2	937.3	932.9	1004.7	987.8	1043.2	1036.6	912.3	851.3	908.2	838.3	792.2	774.9	23.9															
15	1017.6	1002	943.1	937.5	1007.1	992.4	1049	1042.2	916.4	854.3	914.3	839.3	797.5	779.4	24.5															
16	1020.8	1005	946.6	940.7	1008.4	997	1054.4	1047.8	918.9	857.3	916.1	840.1	802.2	782.8	25.1															
17	1024	1007	950.1	943.9	1008.8	997	1059.8	1051	920.1	857.3	917.5	840.9	805.1	786.1	25.7															
18			951.7	946.1	1009.2	997	1062.6	1053.4	921.3	857.3	918.9	841.7	807.3	787.3	26.2															
19			952.5	947.3	1009.6	997	1064.9	1055.8	922.5	857.3	920.3	842.5	809.5	788.5																
20							1066.2	1057.4	923.7	857.3	921.7	843.3	811.7	789.7																
21									924.9	857.3	923.1	844.1	814.1	790.9																
22									923.7	857.3	921.7	843.3	811.7	789.7																



ตารางที่ 3.2 ผลการวัดปริมาณก๊าซมีเทนสะสม การทดลองส่วนที่ 2

Process temperature [Celsius]	37											
Flow Cell nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Name	1st 3.50-1	1st 3.50-2	1st 3.50-3	1st 2.75-1	1st 2.75-2	1st 2.75-3	1st 2.00-1	1st 2.00-2	1st 2.00-3	1st 1.25-1	1st 1.25-2	1st 1.25-3
Substrate VS/COD amount [g]	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Inoculum VS/COD amount [g]	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63	7.63
Type of unit [VS/COD]	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS	VS
Headspace volume [ml]	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295
Assumed CH4 content [%]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Day	1st 3.50-1	1st 3.50-2	1st 3.50-3	1st 2.75-1	1st 2.75-2	1st 2.75-3	1st 2.00-1	1st 2.00-2	1st 2.00-3	1st 1.25-1	1st 1.25-2	1st 1.25-3
Volume [NmL]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volume [NmL]	37.6	31.7	39.6	36.6	31.7	34.8	30.6	31.5	26.1	25.9	26	25.1
Volume [NmL]	149.8	142.1	152.7	121.4	125.6	133.1	97.6	90.8	84.3	70.5	66.7	66.4
Volume [NmL]	299.1	291.3	308	253.2	265.8	277.8	210.7	183.8	192.4	144.2	141	138.2
Volume [NmL]	394.8	391.6	407.4	335.3	355.9	362.3	289.8	257.1	266.8	194.6	193.9	194.8
Volume [NmL]	471.5	471.4	481.7	401.7	417.7	428	349.4	314	323.2	230.2	229.5	234.7
Volume [NmL]	525.3	525.6	534.1	446.5	465.5	470.2	383.9	346.8	355.4	261	255.5	263.8

Day	1st 3.50-1 Volume [Nm]	1st 3.50-2 Volume [Nm]	1st 3.50-3 Volume [Nm]	1st 2.75-1 Volume [Nm]	1st 2.75-2 Volume [Nm]	1st 2.75-3 Volume [Nm]	1st 2.00-1 Volume [Nm]	1st 2.00-2 Volume [Nm]	1st 2.00-3 Volume [Nm]	1st 1.25-1 Volume [Nm]	1st 1.25-2 Volume [Nm]	1st 1.25-3 Volume [Nm]
7	570.7	574.1	581.1	490	500	511	410.3	374.3	381.5	287.6	283.4	288.9
8	608.2	609	611.7	512.7	528.5	533.7	432.3	404	410.9	316	307.7	316.8
9	636.8	637.6	640.6	537.8	552.2	554.5	458	429.4	434.3	342.9	336.9	340.8
10	666.1	667.4	670.2	563.6	575.9	578.4	478.5	452.8	454.7	377.7	367.7	370.9
11	689.5	691.1	693.1	589.7	602.6	601.6	499.2	469.4	479.3	401.3	389	393.4
12	710.3	711.9	713.6	616.1	627.5	626.2	518.8	487.1	501.2	430.5	415.6	418.8
13	735.1	736.5	737.4	642.9	655	652.3	541.3	504.6	518.3	455.8	438.7	439.8
14	760.4	758.8	760.3	663.7	675.1	672.8	565.7	533.4	546.4	491.1	474.2	477.3
15	783.8	780.8	780.4	691.1	699.5	697.1	596.1	567.4	579.7	529	514.1	515.9
16	806.8	802.9	803.9	718.7	721.1	720.6	625.1	598.4	611.6	563.9	551	548.5
17	829.3	822.8	826.5	742.9	744.3	744.3	649.3	627.2	640.5	589.8	579.6	574.8
18	851.6	843.3	849	771.2	770.3	765.5	682.3	664.7	677.9	626.5	624.4	619.3
19	875.2	865.4	871	800.8	796.4	787.1	716.6	700.3	713.9	664.5	662.7	659
20	896.6	886.7	891.4	828.3	824.2	814.2	748.3	734	745.4	704.3	698.4	693.7
21	921.5	912.1	914.2	849.2	846.8	839.1	780.8	772.1	779.1	745.5	744.2	740.7
22	949.4	939	938	883.1	880.5	874.6	817.2	814.9	818	793.9	797	791



Day	1st 3.50-1 Volume [Nm]	1st 3.50-2 Volume [Nm]	1st 3.50-3 Volume [Nm]	1st 2.75-1 Volume [Nm]	1st 2.75-2 Volume [Nm]	1st 2.75-3 Volume [Nm]	1st 2.00-1 Volume [Nm]	1st 2.00-2 Volume [Nm]	1st 2.00-3 Volume [Nm]	1st 1.25-1 Volume [Nm]	1st 1.25-2 Volume [Nm]	1st 1.25-3 Volume [Nm]
23	978.6	966.3	964.9	918.6	912.1	905.6	860.8	857.5	864	839.4	843.6	836.6
24	1006.1	993.6	985.1	950.4	943	936.2	905.3	902.7	908.6	876.3	883.8	875.4
25	1026.6	1013.2	1006	971.2	972.9	960.4	942.4	942.3	947.1	906.4	914.2	905.4
26	1046.1	1038.8	1029.6	993.9	996.7	984.6	970.7	972.1	971.8	934.6	943.7	935.6
27	1065.7	1063.1	1054	1022	1025.5	1014.4	997.3	999	1001.1	968.1	974.3	966.2
28	1087.8	1087.8	1078.9	1045.8	1049.6	1039	1028.2	1024.9	1027	1003.6	1006.2	999.1
29	1111.3	1115	1102.5	1084.3	1086.8	1078.3	1064.8	1061.9	1068	1048.9	1053.6	1046.2
30	1137.6	1142.3	1127.8	1117.5	1120.4	1112	1104.3	1099.6	1105.6	1094.2	1098.4	1091.1

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุพรรณมา ไชยปา เกิดเมื่อวันที่ 29 กันยายน พุทธศักราช 2531 มีภูมิลำเนาอยู่ที่ จังหวัดลำปาง สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2553 เข้าศึกษา ต่อในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 เข้าทำงานใน ตำแหน่งวิศวกรสิ่งแวดล้อม แผนกออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย ฝ่ายบริหารงานโครงการ บริษัท อาควา นิธิฮาร์ว คอร์ปอเรชั่น จำกัด ตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2554 จนถึงปัจจุบัน

