

การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างโดยกระบวนการหมัก  
แบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับ  
ENHANCEMENT OF BIOGAS PRODUCTION FROM FRESH ELEPHANT  
MANURE LEACHATE BY ANAEROBIC DIGESTION PROCESS USING  
BIOCHAR FORM ELEPHANT MANURE AS  
SUPPORT MATERIAL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

พ.ศ. 2567

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุครอบง

ผู้วิจัย

นางสาวโสภี พันอินทร์

สาขาวิชา

พลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยทิพย์ สิ้นธูยา

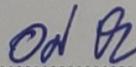
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร.วิยงค์ กังวานสุขุมงคล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

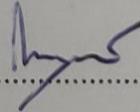
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์สินธุนาท

คณะกรรมการสอบ



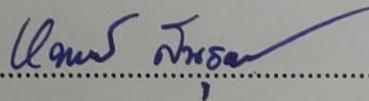
ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ)



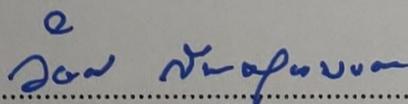
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤกษ์ อักกะรังสี)



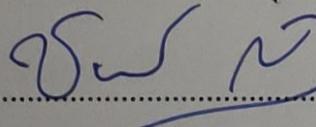
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยทิพย์ สิ้นธูยา)



กรรมการ

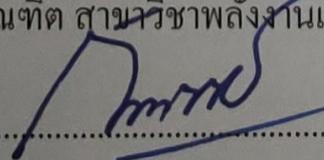
(อาจารย์ ดร.วิยงค์ กังวานสุขุมงคล)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์สินธุนาท)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน



คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ โชติกเดชาณรงค์)

วันที่ 29 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2567

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** : การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง  
โดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยการใช้  
ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรับรอง

**ผู้วิจัย** : โสภี พันอินทร์

**สาขาวิชา** : พลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์**

: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หทัยทิพย์ สินธูชา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

: อาจารย์ ดร. วียงค์ กังวานสุขุมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์ดินฉนาท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้น้ำชะมูลช้างที่แตกต่างกันในการผลิตแก๊สชีวภาพ และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งศึกษาความแตกต่างของอัตราส่วนน้ำชะมูลช้างกับน้ำที่ 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 kg elephant manure /kg water ตามลำดับทำการทดลองในชุดการทดลองแบบกะ (batch test) โดยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่เตรียมโดยการหมักจากน้ำชะมูลช้างกับหัวเชื้อจุลินทรีย์จากตะกอนมูลสุกร ทำการทดลองโดยมีหัวเชื้อกับน้ำชะมูลช้างในอัตราส่วน 0.5 (g VS-based) ซึ่งปรับค่าความเป็นกรด่างเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ  $7.1 \pm 0.1$  ควบคุมอุณหภูมิ  $35 \pm 2$  °C ที่ใช้ระยะเวลาหมัก 45 วัน จากผลการทดลองแสดงว่ากระบวนการหมักที่อัตราส่วนน้ำชะมูลช้างกับน้ำที่ 1:2 สามารถผลิตแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุด โดยพบว่ามีค่าแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ 113 mLCH<sub>4</sub>/g VS<sub>added</sub> และพบว่าหลังจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้ถึง 75.1% งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบถังหมักแบบยูเอเอสบีร่วมกับใช้วัสดุรองรับถ่านชีวภาพจากมูลช้าง เพื่อใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยถังหมักแบบยูเอเอสบีที่ออกแบบมีปริมาตร 12 ลิตร โดยเริ่มป้อนอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (organic loading rate, OLR) OLR ที่ 6 kg COD/m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> และปรับค่าความเป็นกรด่างก่อนป้อนเข้าสู่ถังหมักให้มีค่าอยู่ระหว่าง 6.5-7.2 ทำการหมัก

ก

จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) จากนั้นทำการเพิ่มขึ้น OLR จนถึง  $27.06 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  จากการทดลอง พบว่าระบบยูเอเอสบีที่ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนจาก 52% เป็น 70% นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้ถึง 92.2% จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวัสดุรองรับจากมูลช้างสามารถลดการชะล้างแบคทีเรียในระบบการหมักแบบต่อเนื่องได้ และสามารถนำผลที่ได้ไปเป็นต้นแบบ และข้อมูลจากการทดลองไปประยุกต์ใช้ต่อไป

**คำสำคัญ :** น้ำชะมูลช้าง, หัวเชื้อจุลินทรีย์, ถ่านชีวภาพ, อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์



**The Title** : Enhancement of Biogas Production from Fresh Elephant Manure Leachate by Anaerobic Digestion Process Using Biochar from Elephant Manure as Support Material

**The Author** : Sopee Pan-in

**Program** : Community Energy and Environment

**Thesis Advisors**

: Assistant Professor, Dr. Hathaithip Sintuya Advisor

: Dr. Wiyong Kangwansupamonkon Co – advisor

: Assistant Professor Dr. Chayanon Sawatdeenarunat Co – advisor

**ABSTRACT**

The research aims to study the effects of using different ratios of fresh elephant manure leachate in biogas production and to enhance the efficiency of biogas production from fresh elephant manure leachate. This is achieved by applying elephant manure biochar as an intermediary material in an anaerobic digestion process. The study examines different ratios of elephant dung to water, specifically 1:1, 1:2, 1:3, and 1:4 ( $\text{kg}_{\text{elephant manure}}/\text{kg}_{\text{water}}$ ). Experiments were conducted using batch tests, employing anaerobic digestion prepared by fermenting fresh elephant manure leachate with microbial inoculum from pig manure sludge sediment. The experiments were carried out with an inoculum-to- fresh elephant manure leachate ratio of 0.5 (g VS-based), adjusting the initial pH to  $7.1 \pm 0.1$ , and controlling the temperature at  $35 \pm 2$  °C. fermentation period of 45 days. The results showed that the digestion process with a 1:2 fresh elephant manure leachate to water ratio could produce the maximum cumulative biogas, with methane yield reaching 113 mL  $\text{CH}_4/\text{g VS}$  added. The process also achieved a 75.1% COD removal efficiency. Furthermore, the research designed a UASB (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket) reactor combined with biochar from elephant manure as a supporting material for oxygen-free biogas production. The designed UASB reactor had a volume of 12 liters. It starts up with an organic loading rate (OLR) of  $6 \text{ kg COD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , adjusting the pH between 6.5-7.2 before feeding into the reactor. The fermentation continued until reaching

a steady state, after which the OLR was increased to  $27.06 \text{ COD/m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . The experiments revealed that the UASB system using biochar from elephant manure as a supporting material could improve methane production efficiency from 52% to 70%, and COD removal efficiency up to 92.2%. The results concluded that the supporting material from elephant manure could reduce bacterial washout in the continuous digestion system and the findings could serve as a prototype and data for future applications.

**Keywords :** Fresh elephant manure leachate, Microbial inoculum, Biochar, Organic



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยทิพย์ สินธูยา อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษาตลอดจนช่วยปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริง และความทุ่มเทของอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์สินธุนาท และดร.วิยงค์ กังวานสุขมงคล ผู้อำนวยการกลุ่มวิจัยการวิเคราะห์ระดับนาโนขั้นสูง และความปลอดภัย สวทช. และดร.กนิษฐา บุญภาวนิชกุล นักวิจัย ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สวทช. ซึ่ง ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัยพร้อมทั้งให้คำแนะนำ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย รวมถึงขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์นาโนเทคโนโลยี ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ที่เอื้อต่อการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (Thailand Graduate Institute of Science and Technology: TGIST) เลขที่ SCA-CO-2562-9677-TH ที่ได้กรุณามอบทุนในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณ นักศึกษาสาขาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน ทุกคน ร่วมทุกข์ร่วมสุข และให้ความช่วยเหลือเกื้อกูลตลอดมา

ขอขอบพระคุณเป็นพิเศษ ครอบครัว ที่คอยห่วงใย และเป็นกำลังใจ รวมถึงสนับสนุนการศึกษาจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์ จึงขอมอบให้แก่เหล่าคุณอาจารย์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิทยานิพนธ์เป็นประโยชน์ต่อผู้เกี่ยวข้อง สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่รับคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

โสภี พันอินทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	๗
ABSTRACT.....	๘
กิตติกรรมประกาศ.....	๙
สารบัญ.....	๗
สารบัญตาราง.....	๑๑
สารบัญภาพ.....	๑๒
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
สมมติฐานการวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	5
นิยามคำศัพท์จำเพาะ.....	6
กรอบแนวคิดการวิจัย.....	7
2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	8
กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	8
การผลิตแก๊สชีวภาพ.....	14
ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบต่อเนื่องและการประยุกต์ใช้งาน.....	22
ถ่านชีวภาพ.....	32
ไบโอดีเซล.....	36

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2	
การวิเคราะห์และการตรวจวัดคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ .....	42
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	50
3 <b>วิธีดำเนินการวิจัย</b> .....	<b>60</b>
วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย .....	60
ระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้ในการวิจัย .....	62
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	71
4 <b>ผลการวิเคราะห์ข้อมูล</b> .....	<b>79</b>
ผลการวิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของวัตถุดิบของงานวิจัย .....	80
ผลการวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน .....	89
ผลของการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับใน กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน .....	97
5 <b>สรุป อภิปรายผล ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>114</b>
บรรณานุกรม .....	117
ประวัติผู้วิจัย .....	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ..... 9
2.2	ค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพ 1 m <sup>3</sup> เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ..... 9
2.3	ชนิดและคุณสมบัติของแบคทีเรียที่มีบทบาทในกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน ... 14
2.4	ศักยภาพการผลิตมีเทนจากสารอินทรีย์ ..... 16
2.5	การละลายของแก๊สในน้ำที่อุณหภูมิช่วงเมโซฟิลิก และช่วงเทอร์โมฟิลิก ..... 19
2.6	งานวิจัยที่ศึกษาระบบหมักแบบต่อเนื่องที่มีวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน ..... 53
2.7	งานวิจัยที่ศึกษาระบบหมักแบบต่อเนื่อง และแบบซ์สำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ 56
2.8	งานวิจัยที่ทำการศึกษาผลของวัสดุรองรับที่อยู่ในระบบแก๊สชีวภาพ ..... 59
3.1	การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยเทคนิคต่าง ๆ ..... 72
3.2	การวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพ ..... 74
3.3	การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพหมักแบบต่อเนื่อง ..... 77
4.1	ชื่อย่อตัวอย่าง และความหมายที่ใช้วิเคราะห์ผลของข้อมูลงานวิจัย ..... 79
4.2	คุณลักษณะเบื้องต้นของวัตถุดิบน้ำชะมูลช้าง และหัวเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ..... 81
4.3	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเส้นใยมูลช้าง ถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพข้าง ผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า.. 82
4.4	ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของมูลช้าง ถ่านชีวภาพมูลช้าง และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า ..... 83
4.5	วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า และไม่มีวัสดุรองรับ ที่ใช้ในการผลิตแก๊สมีเทน . 87
4.6	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ..... 89
4.7	ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของน้ำชะมูลช้างต่อน้ำ..... 92
4.8	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้าง..... 94
4.9	ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของของน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพมูลช้าง..... 96
4.10	ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติในถังปฏิกรณ์ UASB แบบถ่านชีวภาพ (R1) และไม่มีถ่านชีวภาพ (R2) ..... 105

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	กรอบแนวคิดการวิจัย .....	7
2.1	การแปลงสารอินทรีย์ให้กลายเป็นแก๊สชีวภาพ.....	10
2.2	การลดขนาดโมเลกุลด้วยกระบวนการย่อยสลาย.....	11
2.3	การเปลี่ยนสารอินทรีย์ขนาดเล็กให้เป็นกรดอินทรีย์ .....	12
2.4	การผลิตแก๊สมีเทนด้วยกระบวนการมีเทนโนเจนซิส .....	13
2.5	ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนต่อเนื่อง .....	24
2.6	ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบสลับเป็นกะ .....	25
2.7	ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบย่อยสลายล้มผัส.....	26
2.8	ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์.....	27
2.9	ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นลอยตัวไร้อากาศ.....	28
2.10	ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น .....	29
2.11	ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขยายตัว .....	30
2.12	ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบจานหมุนชีวภาพไร้อากาศ.....	31
2.13	ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบแผ่นกั้น.....	32
2.14	การเชื่อมโยงระหว่างไพโรไลซิสกับการผลิตแก๊สชีวภาพ.....	33
2.15	องค์ประกอบและ โครงสร้างของถ่านชีวภาพ .....	35
2.16	การดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ .....	43
2.17	การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้น ๆ .....	43
2.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ .....	44
2.19	เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง .....	46
2.20	การทำงานและส่วนประกอบของเครื่อง FE-SEM.....	48
2.21	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสมรรถนะสูง .....	49
2.22	แผนผังการทำงานของเครื่อง FT-IR .....	50
3.1	(ก) มูลช้างสด (ข) น้ำชะมูลช้าง .....	61
3.2	(ก) ระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบบ่อปิด (ข) หัวเชื้อกากตะกอนมูลสุกร.....	61
3.3	ระบบการผลิตแก๊สชีวภาพขนาด 1 ลิตร .....	62

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.4	องค์ประกอบภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ UASB..... 65
3.5	การทำหน้าที่กั้นตะกอนไม่ให้ไหลลงไปกับน้ำขาออกของเขื่อนกักตะกอน ..... 66
3.6	ความแตกต่างของทิศทางการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าด้านล่างมีลักษณะต่างกัน .... 66
3.7	แบบถังหมักระบบ UASB ..... 67
3.8	ถังหมักระบบ UASB แสดงแบบสามมิติ (ก) ภายนอกถัง (ข) ภายในถัง ..... 68
3.9	องค์ประกอบหลักของถังปฏิกรณ์ UASB..... 69
3.10	แผนผังของระบบถังปฏิกรณ์หมักแบบต่อเนื่อง..... 70
4.2	สเปกตรัม FT-IR ของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ..... 84
4.3	ผลผลิตแก๊สมีเทนสะสม ..... 86
4.4	ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ..... 90
4.5	ปริมาณแก๊สมีเทนทุกรายวัน (ก) และปริมาณแก๊สมีเทนสะสม (ข) ..... 91
4.6	ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม (ก) และปริมาณแก๊สมีเทนสะสม (ข) ..... 95
4.7	การผลิตมีเทนรายวัน (ก) และปริมาณมีเทน (ข)..... 95
4.8	การผลิตแก๊สชีวภาพรายวันในช่วงระยะเวลาการทำงานของถังปฏิกรณ์ แบบถ่านชีวภาพ (R1) และไม่มีถ่านชีวภาพ (R2) ..... 99
4.9	ความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ..... 100
4.10	การผลิตแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์ R1 และ R2 ..... 100
4.11	ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของเครื่องปฏิกรณ์ R1 และ R2..... 102
4.12 :	การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเป็นต่างในถังปฏิกรณ์ R1 และ R2..... 103
4.13	ลักษณะของถ่านชีวภาพมูลช้าง [ก (15kx), (10 $\mu$ m)] และถ่านชีวภาพมูลช้าง ที่มีไบโอฟิล์ม [ข (15kx), (10 $\mu$ m)] ที่สังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ FE-SEM.. 107
4.14	ลักษณะรูปร่างของน้ำชะมูลช้างในถังปฏิกรณ์ ..... 109
4.15	สเปกตรัม FT-IR ของวัสดุรองรับก่อนและหลังการผลิตแก๊สชีวภาพ การผลิตแก๊ส ชีวภาพที่ใช้วัสดุรองรับเป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ..... 110

# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เชียงใหม่เป็นจังหวัดทางตอนเหนือของประเทศไทยที่มุ่งให้ความสำคัญกับช้างควบคู่ไปกับการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ หรือการท่องเที่ยวอย่างมีความรับผิดชอบต่อแหล่งธรรมชาติ โดยมีกิจกรรมการท่องเที่ยว บ่อนอาหารช้าง อาบน้ำให้ช้าง ล่องแพ และเดินป่า จึงทำให้สถานที่แห่งนี้ได้รับความสนใจจากนักท่องเที่ยวทั้งไทยและต่างชาติ จนกลายเป็นแหล่งเศรษฐกิจที่สำคัญในการสร้างอาชีพสร้างรายได้ให้กับคนในชุมชนหลายครัวเรือน (Kontogeorgopoulos, 2009) โดยจังหวัดเชียงใหม่ มีปางช้างจำนวนมาก มีช้างรวมกันกว่า 2,700 เชือก (ธงชัย ประเทือง, 2555) ซึ่งช้างแต่ละเชือกจะมีปริมาณมูลช้างในแต่ละวันมากกว่า 30 กิโลกรัมต่อวัน (Rattanawanee, Duangpukdee, & Poolprasert, 2013) ปริมาณมูลช้างที่เกิดขึ้นจำนวนมากจึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบทำให้เกิดน้ำเน่าเสีย และยังส่งกลิ่นเหม็นต่อนักท่องเที่ยว ซึ่งส่งผลทำให้เกิดทัศนียภาพแย่ง หากยังไม่ได้รับการจัดการแก้ไขปัญหามูลช้างที่เหมาะสมอาจจะส่งผลเสียต่อการท่องเที่ยวได้ในอนาคต

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อลดปริมาณของเสียอินทรีย์จากกระบวนการต่าง ๆ เช่น น้ำเสียจากชุมชน น้ำเสียจากอุตสาหกรรม และของเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ (H. Chen et al., 2017; Ivanovici et al., 2021; Siddiki et al., 2021) ซึ่งมูลช้างที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเป็นวัสดุอินทรีย์มาผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อให้ได้แก๊สมีเทนมาใช้ประโยชน์ โดยมูลช้างจะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต และเส้นใยลิกโนเซลลูโลสที่เป็นส่วนสำคัญในการผลิตแก๊สชีวภาพ การผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถลดปริมาณของเสียอินทรีย์ในของเสียลงได้ ร้อยละ 60 ถึง 80 ขึ้นอยู่กับชนิด และองค์ประกอบของของเสีย และแก๊สชีวภาพเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาเป็นพลังงานทดแทนทางด้านความร้อน ซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 5,000 – 5,500 กิโลแคลอรี โดยที่แก๊สชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร มีสัดส่วนมีเทนร้อยละ 60 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) นอกจากนี้การผลิตแก๊สชีวภาพให้มีประสิทธิภาพนั้นต้องขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบอินทรีย์

หรือวัสดุตั้งต้นที่ใช้ และถึงปฏิกรณ์ในการหมักแก๊สชีวภาพที่ดีจะทำให้เกิดการผสมกันอย่างดีบนพื้นที่ผิวของอาหารกับเชื้อแบคทีเรียพื้นที่ผิวของอาหารกับเชื้อแบคทีเรีย แต่เมื่อการหมักในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนต่อเนื่องมีระยะเวลาที่สั้นอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการชะล้างของแบคทีเรีย (washing out) เกิดขึ้น เนื่องจากการหมักในระยะเวลาสั้นในการกักเก็บจะทำให้อัตราการไหลเข้าของวัตถุดิบเพิ่มสูงขึ้นไม่ทันต่อการเจริญของแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์แก๊สชีวภาพ จึงทำให้เกิดการสูญเสียแบคทีเรีย โดยแนวทางการตรึงทางชีวภาพสามารถเพิ่มความหนาแน่นของเซลล์แบคทีเรีย (Faisal, Salama, Hassan, Jeon, & Li, 2020; He, Zhang, Duan, Shao, & Lü, 2020; Meyer-Kohlstock, Haupt, Heldt, Heldt, & Kraft, 2016) ซึ่งต้องมีตัวกลางให้เชื้อแบคทีเรียยึดเกาะในระบบถังปฏิกรณ์แก๊สชีวภาพ ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้มีการบรรจุวัสดุให้แบคทีเรียยึดเกาะ โดยมีการไหลน้ำเสียดอย่างสม่ำเสมอโดยวัสดุที่ใช้ เช่น พลาสติก เซรามิก และเม็ดบีดแก้ว เป็นต้น (Faisal et al., 2020) ซึ่งวัสดุดังกล่าวข้างต้นมีราคาต้นทุนในการผลิตสูง รวมถึงปัญหาในการจัดการหลังปิดระบบถังปฏิกรณ์ผลิตแก๊สชีวภาพ นอกจากนี้ระบบที่ใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพในปัจจุบันมีหลายระบบ เช่น บ่อหมัก anaerobic pond ถึงหมัก high rate anaerobic contact ถึงกรองไร้ออกซิเจน anaerobic filter หรือ anaerobic fixed film และระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นตะกอนแบคทีเรียไร้อากาศแบบไหลขึ้น up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพแล้ว พบว่าระบบ UASB เป็นระบบที่มีความน่าสนใจเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูง มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ และสามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้สูงกว่าระบบไม่ใช้อากาศแบบอื่นๆ

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุรองรับจากถ่านชีวภาพมูลช้าง โดยการประยุกต์การตรึงจุลินทรีย์ด้วยตัวกลางถ่านชีวภาพมูลช้างร่วมกับระบบการหมักแบบต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติเป็นตัวกลางที่ดีช่วยลดการสูญเสียแบคทีเรียในระบบการผลิตแก๊สชีวภาพ (Bona et al., 2020; Qambrani, Rahman, Won, Shim, & Ra, 2017) โดยทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งเป็นแนวทางเลือกในการเพิ่มมูลค่ามูลช้างในการนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งการผลิตแก๊สชีวภาพและบำบัดน้ำเสียพร้อมกัน และเป็นอีกวิธีแก้ไขปัญหามูลช้างที่ช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายตามธรรมชาติสู่สิ่งแวดล้อมได้

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้าง
3. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ด้านเศรษฐกิจ
  - 1.1. ได้แนวทางการใช้มูลช้างเกิดประโยชน์สูงสุดในการผลิตชีวภาพโดยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน
  - 1.2. ลดค่าใช้จ่ายในการซื้อแก๊สหุงต้ม เนื่องจากมีการนำพลังงานทดแทนชีวภาพมาใช้ทดแทนแก๊สหุงต้มในบางส่วน
2. ด้านสังคม
  - 2.1. ลดปัญหามูลช้างที่มีปริมาณมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ทำให้เกิดน้ำเน่าเสีย ทัศนียภาพแย่ง และยังส่งกลิ่นเหม็นต่อนักท่องเที่ยว หากยังไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสมอาจจะส่งผลเสียต่อการท่องเที่ยวได้ในอนาคต
  - 2.2. ลดปัญหาการเผามูลช้างในพื้นที่ โดยส่งเสริมให้ประชาชนในปางช้างภาคเหนือตระหนักถึงปัญหามลพิษหมอกควันที่เกิดจากการเผา โดยมีการร่วมมือกันในการพัฒนาชุมชนให้เข้มแข็งพึ่งตนเองได้ และสร้างคุณภาพชีวิตที่ดีให้แก่ชุมชน
3. ด้านสิ่งแวดล้อม
  - 3.1. ลดความรุนแรงของปัญหาหมอกควันจากการเผามูลช้างในพื้นที่จัดเก็บของปางช้างซึ่งนำไปสู่การลดปัญหามลพิษทางอากาศจากหมอกควันของภาคเหนือ
  - 3.2. ได้แนวทางที่สามารถบูรณาการความรู้ทางด้านวิชาการพลังงานชีวภาพการจัดการ และใช้ประโยชน์จากของมูลช้าง ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
4. ด้านการเรียนรู้
  - 4.1. ต้นแบบขั้นตอนหรือวิธีการใช้ประโยชน์จากการนำมูลช้างที่เป็นของเสียในปางช้างเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน
  - 4.2. ได้แนวทางของศักยภาพน้ำชะมูลช้างที่สามารถผลิตแก๊สชีวภาพ

5. ได้แนวทางในการดำเนินการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบหมักแบบต่อเนื่องให้เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง
6. ต้นแบบการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนชีวภาพในระบบการจัดการ มูลช้าง และผลงานวิจัยสามารถใช้เป็นแหล่งเรียนรู้ชุมชนอื่น ๆ ในการผลิตแก๊สชีวภาพ

#### สมมติฐานการวิจัย

1. ประสิทธิภาพของแบคทีเรียที่เกิดขึ้นในถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ภายในไบโอฟิล์มของถังปฏิกรณ์หมักแบบต่อเนื่อง
2. มีความแตกต่างระหว่างจำนวนของแบคทีเรียในไบโอฟิล์ม และที่ลอยอยู่อย่างอิสระในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน
3. มีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพในการเกิดแก๊สชีวภาพที่เพิ่มขึ้น โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งมีการก่อตัวเกิดไบโอฟิล์มกับวัสดุรองรับที่เป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยการออกแบบถังปฏิกรณ์แบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เกิดการหมัก โดยมีวัสดุรองรับ (ส่วนล่าง) และส่วนแยกตกตะกอนกับแก๊สในระบบ (ส่วนบน)
4. มีการใช้กระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมจะเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงมูลช้างเป็นถ่านชีวภาพโดยเพิ่มผลผลิตถ่านชีวภาพและลดปริมาณของวัสดุที่ไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเหลือทิ้ง.
5. มีอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้างซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยอัตราส่วนนี้ช่วยให้การหมักเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ดี
6. มีการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นตัวกลางในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเพิ่มความสามารถในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการยึดเกาะของจุลินทรีย์ผลิตแก๊สชีวภาพ และเร่งปฏิกิริยาการหมัก

## ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตด้านสถานที่
  - 1.1. ปางช้างในจังหวัดเชียงใหม่
  - 1.2. วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
  - 1.3. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
2. ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง
 

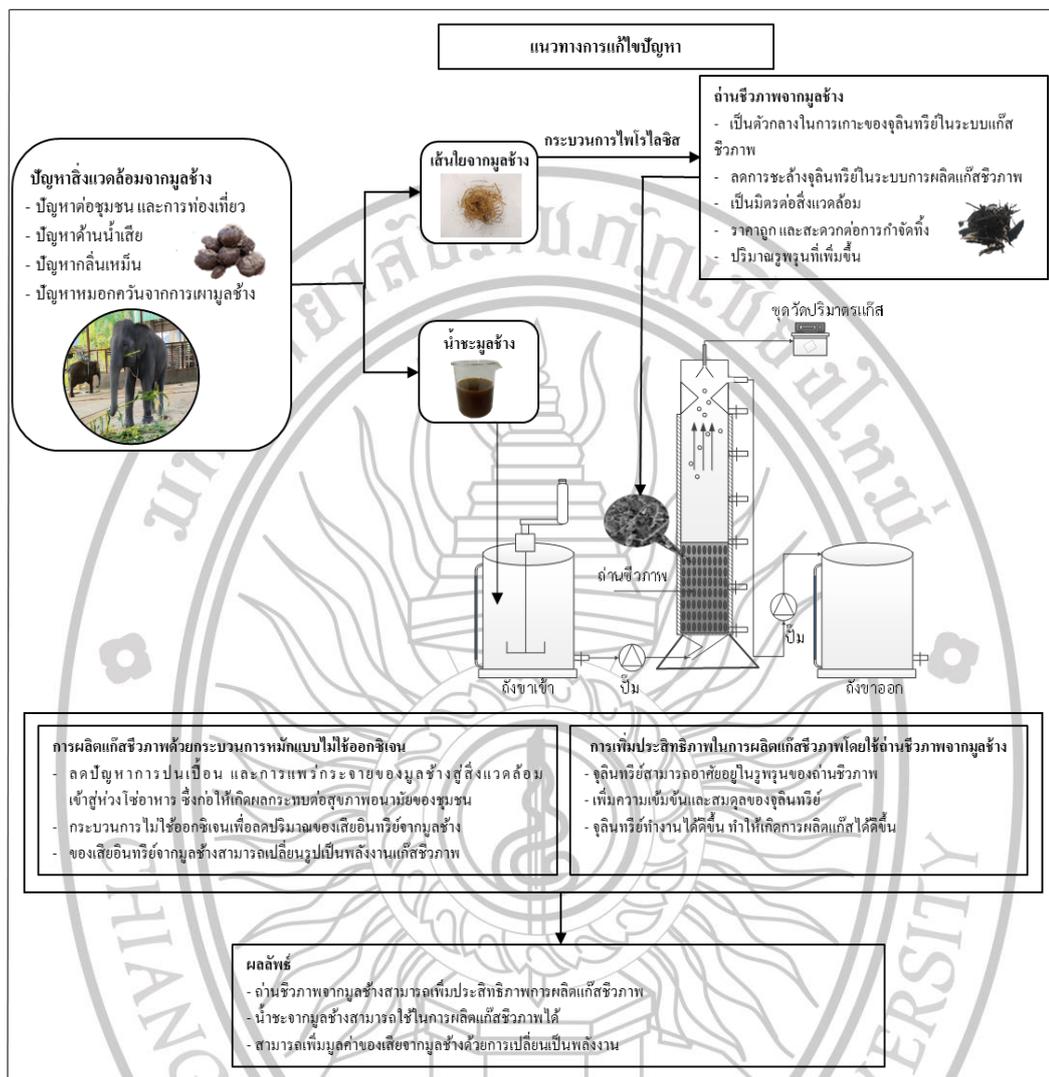
การผลิตแก๊สชีวภาพ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพหมักแบบต่อเนื่อง ขนาด 15 ลิตร จำนวน 2 ถังปฏิกรณ์ ซึ่งภายในถังปฏิกรณ์มีถ่านชีวภาพจากมูลช้าง
3. ขอบเขตด้านเนื้อหา
  - 3.1. วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการหมักแก๊สชีวภาพ คือ ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง น้ำชะมูลช้าง และแบคทีเรีย
  - 3.2. ทำการทดลองแบบกะหรือแบบทซ์ (batch) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ  $35 \pm 2$  °C ในระยะเวลาที่เก็บสารอินทรีย์ในระบบ 45 วัน ภายในขวดแก้ว ความจุ 400 mL
  - 3.3. ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของน้ำชะมูลช้างต่อน้ำที่ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4
  - 3.4. ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของน้ำชะกับต่อถ่านชีวภาพมูลช้างที่อัตราส่วน 2.5, 5, 7.5, 10 และ 15 g/L
  - 3.5. ทำการทดลองถังปฏิกรณ์หมักแบบต่อเนื่อง ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ  $35 \pm 2$  °C ในระยะเวลาที่เก็บสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ 396 วัน ความจุ 12 L โดยทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง จากการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในถังปฏิกรณ์การหมักแบบต่อเนื่อง
  - 3.6. วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ ได้แก่ แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และออกซิเจน ( $\text{O}_2$ )
4. ขอบเขตด้านเวลา
 

ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย 5 ปี

### นิยามคำศัพท์จำเพาะ

1. ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง (biochar from elephant manure residue) คือ วัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากชีวมวล หรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ โดยนำมูลช้างมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุม อุณหภูมิและอากาศหรือจำกัดอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุดซึ่งกระบวนการเผาไหม้นี้ เรียกว่า “การแยกสลายด้วยความร้อนหรือกระบวนการไพโรไลซิส” ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อยมาก
2. น้ำชะมูลช้าง (fresh elephant manure filtrate) คือ มูลช้างสด บรรจุลงในถุงไนลอน แล้วแช่ในน้ำ อัตราส่วนมูลสุกร 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ปิดฝาถังให้สนิท และหมักไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วยกถุงไนลอนที่บรรจุมูลช้างออกจากถังจะได้น้ำชะมูลช้างสีน้ำตาลใส
3. ไบโอฟิล์ม (biofilm) คือ แบคทีเรียจะเคลือบอยู่บนตัวกลางที่มีรูพรุนในรูปของไบโอฟิล์ม โดยเซลล์ยึดเกาะเหล่านี้จะถูกฝังอยู่ภายในเมทริกซ์นอกเซลล์ที่เต็มไปด้วยสารโพลีเมอร์นอกเซลล์ extracellular polymeric substances (EPSs)

กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารายการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน การผลิตแก๊สชีวภาพ ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ ถึงปฏิบัติการหมักแบบต่อเนื่องและการประยุกต์ใช้งาน และถ่านชีวภาพ โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

#### กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

การผลิตแก๊สชีวภาพ (biogas) เป็นวิธีหนึ่งในการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลโดยผลิตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อเป็นการลดปริมาณของเสียอินทรีย์จากกระบวนการต่าง ๆ เช่น เศษอาหาร น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากอุตสาหกรรม และน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และมูลสัตว์ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการนี้สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในของเสียลงได้ 60-80% ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของของเสีย โดยเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มที่ต้องการ และไม่ต้องการใช้ออกซิเจนในการเติบโต เชื้อบางกลุ่มสามารถปรับเปลี่ยนเมแทบอลิซึมไปมาได้ขึ้นอยู่กับสภาวะว่ามีหรือไม่มีออกซิเจน กระบวนการที่ใช้ออกซิเจนจะเกิดขึ้นได้เร็ว และได้ผลผลิตที่มีส่วนประกอบทางเคมี และถูกออกซิไดซ์ได้สูง เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ในขณะที่กระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนจะช้ากว่า 50 เท่า เมื่อเทียบกับกระบวนการใช้ออกซิเจน แต่ได้ผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างซับซ้อน

การหมักย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีแบคทีเรียกลุ่มที่สามารถมีชีวิตเติบโตได้ดีในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ คือแก๊สชีวภาพ ประกอบไปด้วย แก๊สมีเทน 55-75% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 25-45% ส่วนที่เหลือเป็นไอน้ำและแก๊สชนิดอื่น ๆ ในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่

แก๊สแอมโมเนีย แก๊สไนโตรเจน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และออกซิเจน ดังตารางที่ 2.1 (Cheng, 2017; Karellas, Boukis, & Kontopoulos, 2010)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ

องค์ประกอบ	สูตรโครงสร้างทางเคมี	ปริมาณ (%)
แก๊สมีเทน	CH <sub>4</sub>	55.00-75.00
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	CO <sub>2</sub>	25.00-45.00
แก๊สแอมโมเนีย	NH <sub>3</sub>	0.50-1.00
แก๊สไนโตรเจน	N <sub>2</sub>	0.00-5.00
แก๊สไฮโดรเจน	H <sub>2</sub>	0.00-3.00
แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์	H <sub>2</sub> S	0.02-0.50
ไอน้ำ	H <sub>2</sub> O (vapor)	0.00-10.00

ที่มา : Cheng, 2017; Karellas, Boukis, & Kontopoulos, 2010

แก๊สชีวภาพมีค่าความร้อนประมาณ 5,000-5,500 kcal ซึ่งมีความหนาแน่น 1.15 kg/m<sup>3</sup> จากคุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ สามารถนำแก๊สชีวภาพในปริมาตร 1 m<sup>3</sup> มาเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ดังตารางที่ 2.2 (กฤษฎณา สวนจันทร์ และธณชัย เอกฉัตร, 2552)

ตารางที่ 2.2 ค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพ 1 m<sup>3</sup> เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น

เชื้อเพลิง	ค่าความร้อนเทียบเท่า
ไฟฟ้า	1.00 kW/hr
แก๊สหุงต้ม (LPG)	0.46 kg
น้ำมันเบนซิน	0.67 L
น้ำมันดีเซล	0.60 L
ไม้ฟืน	1.50 kg

ที่มา : กฤษฎณา สวนจันทร์ และธณชัย เอกฉัตร, 2552

แก๊สชีวภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายวิธี แก๊สชีวภาพจากกระบวนการผลิต โดยแก๊สมีเทนเป็นสารประกอบอินทรีย์ มีลักษณะเป็นแก๊ส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไวไฟ ซึ่งแก๊สมีเทนสามารถใช้ประโยชน์เป็นแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ และใช้ในอุตสาหกรรมได้ พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สมีเทนสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ 5.14 kW/gCH<sub>4</sub> โดยวิธีที่ง่ายที่สุดในการนำแก๊สชีวภาพมาใช้ประโยชน์คือ การเผาไหม้โดยตรงในหม้อ หรือเตาเผา ซึ่งมีการใช้อย่างแพร่หลายในระดับครัวเรือน สำหรับการเผาไหม้โดยตรง แก๊สชีวภาพไม่ต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

**กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน**

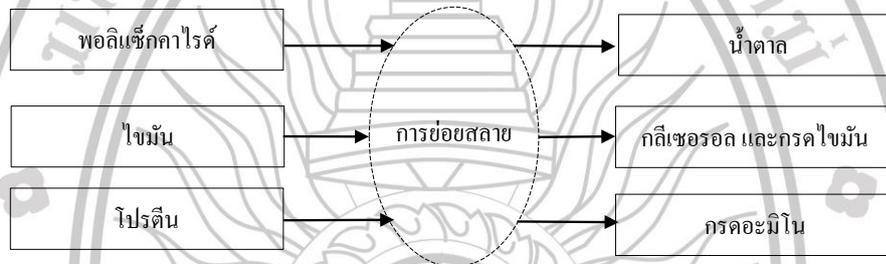
กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion process) ประกอบด้วยขั้นตอนที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน มีการทำงานร่วมถึงของแบคทีเรียหลายกลุ่ม ซึ่งทำหน้าที่ต่างกันในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การย่อยสลาย การผลิตกรด การผลิตกรดอะซิติก และการผลิตแก๊สมีเทน



**ภาพที่ 2.1** การแปลงสารอินทรีย์ให้กลายเป็นแก๊สชีวภาพ  
**ที่มา :** นคร ทิพยาวงศ์, 2019

### ขั้นตอนที่ 1 การย่อยสลาย (hydrolysis)

การย่อยสลายเป็นกระบวนการลดขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ เนื่องจากสารอินทรีย์ที่อยู่ในวัตถุดิบมีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน แบคทีเรียจึงไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ทันที เนื่องจากมีขนาดโมเลกุลใหญ่ไม่สามารถซึมผ่านผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้ จึงต้องทำการแตกตัวของโมเลกุล เพื่อให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงและสามารถละลายน้ำได้ก่อน โดยจะมีแบคทีเรียกลุ่มที่ปล่อยเอนไซม์มาช่วยเร่งการแตกตัวของโมเลกุล เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน แอลกอฮอล์ และกลีเซอริน เป็นต้น ดังภาพที่ 2.2 แสดงถึงสารอินทรีย์ที่ได้หลังจากการลดขนาดด้วยกระบวนการย่อยสลาย โดยมีวัตถุดิบตั้งต้นเป็นคาร์โบไฮเดรตกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) ไขมัน และโปรตีน

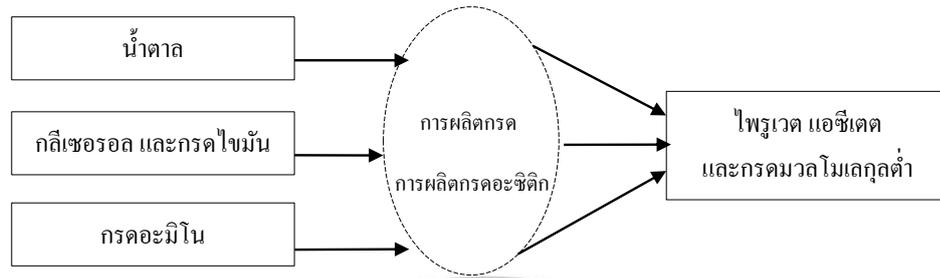


ภาพที่ 2.2 การลดขนาดโมเลกุลด้วยกระบวนการย่อยสลาย

ที่มา : นคร ทิพยาวงศ์, 2019

### ขั้นตอนที่ 2 การผลิตกรด (acidogenesis)

การผลิตกรดเป็นกระบวนการผลิตกรด โดยกลุ่มแบคทีเรียผลิตกรด เป็นการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ขนาดเล็กและละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาล กลีเซอริน และกรดไขมัน (จากขั้นตอนที่ 1) ให้เป็นกรดไขมันสายสั้น ดังภาพที่ 2.3 หรือกรดไขมันระเหยง่าย volatile fatty acids (VFA) โดยสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลงจะสามารถซึมผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ได้ แบคทีเรียจึงดูดซึมสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กเข้าสู่เซลล์และหลั่งเอนไซม์ออกมา เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในเซลล์ให้กลายเป็นกรดแอซิดิกและแก๊สไฮโดรเจน แล้วขับออกมาภายนอกเซลล์ แบคทีเรียในกลุ่มนี้คือแบคทีเรียสร้างกรด (acidogenic bacteria หรือ acidogens หรือ acid forming bacteria)



**ภาพที่ 2.3** การเปลี่ยนสารอินทรีย์ขนาดเล็กให้เป็นกรดอินทรีย์  
ที่มา : นคร ทิพยาวงศ์, 2019

แบคทีเรียในกระบวนการที่ 1 และ 2 เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ใช้ลดขนาดและทำการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์ แต่ไม่มีหน้าที่ในการสร้างแก๊สมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้คือ กลุ่มไม่สร้างแก๊สมีเทน (non-methanogenic bacteria) แบคทีเรียในกลุ่มนี้มีหลายชนิด และมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างกัน

#### ขั้นตอนที่ 3 การผลิตกรดอะซิติก (acetogenesis)

การผลิตกรดอะซิติกเป็นขั้นตอนนี้ กรดไขมันสายสั้น แอลกอฮอล์ และกรดไขมันสายยาว (เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 1 และ 2) จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดอะซิติก acidogenic bacteria หรือ acid forming bacteria ซึ่งอาจจะมีกรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 3

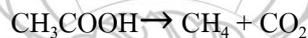
#### ขั้นตอนที่ 4 การผลิตแก๊สมีเทน (methanogenesis)

การผลิตแก๊สชีวภาพเป็นขั้นตอนการผลิตมีเทนเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนถือเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราสำหรับกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในกรณีที่ใช้วัสดุสารตั้งต้นที่ถูกย่อยสลายได้ง่าย โดยแบคทีเรียอีกกลุ่มซึ่งเรียกว่า มีเทนโนเจน (methanogens) จะทำการย่อยสลายและเปลี่ยนกรดอะซิติก แก๊สไฮโดรเจน ให้เป็นแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังภาพที่ 2.4 แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องอยู่ในสภาพไม่ใช้ออกซิเจนจึงจะสามารถผลิตแก๊สมีเทนออกมาได้ ซึ่งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะลอยตัวขึ้นเหนือผิวน้ำเพื่อนำไปใช้ผลิตพลังงานทดแทนต่อไป



**ภาพที่ 2.4** การผลิตแก๊สมีเทนด้วยกระบวนการมีเทนโนเจนิซิส  
ที่มา : นคร ทิพยาวงศ์, 2019

ในกระบวนการสร้างแก๊สมีเทนมี 2 ขั้นตอนที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตมีเทน คือ กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) และรีดักชัน (reduction) ในขั้นตอนแรกจะเป็นการเปลี่ยนกรดอะซิติก โดยการออกซิเดชันกับน้ำเพื่อเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับแก๊สไฮโดรเจน ก่อน สำหรับผลผลิตที่ได้ในขั้นตอนนี้จะรีดักชัน เพื่อเปลี่ยนให้เป็นแก๊สมีเทน และน้ำต่อไป ซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอนคือ



#### จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อนไปเป็นแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารอนินทรีย์ เกิดขึ้นได้โดยอาศัยกลุ่มจุลินทรีย์ที่เจริญได้ดีในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ตามลำดับขั้นตอนของกระบวนการออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ 1. กลุ่มแบคทีเรีย 2. กลุ่มแบคทีเรียที่ช่วยในหมัก หรือกลุ่มแบคทีเรียผลิตกรด 3. กลุ่มแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติก และ 4. กลุ่มแบคทีเรียผลิตมีเทน แบคทีเรียแต่ละกลุ่มมีคุณสมบัติแตกต่างกัน และมีสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.3 (Amani, Nosrati, & Sreekrishnan, 2010) ซึ่งแบคทีเรียแต่ละกลุ่มจะมีการทำงานร่วมกัน หรือมีการพึ่งพาประโยชน์ต่อกัน เช่น แบคทีเรียกลุ่มแรกจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นสารผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับแบคทีเรียกลุ่มถัดไปจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย นอกจากนี้ แบคทีเรียแต่ละกลุ่มยังมีการเจริญแบบสัมพันธ์กันในรูปแบบอื่น ๆ

ตารางที่ 2.3 สรุปรูปร่างและคุณสมบัติของแบคทีเรียที่มีบทบาทในกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน

ขั้นตอน	การย่อยสลาย	การผลิตกรด	การผลิตกรดอะซิติก	การผลิตแก๊สมีเทน
ตัวอย่างแบคทีเรีย	<i>Streptococcus</i> sp.	<i>Bacterioides</i> sp.	<i>Syntrophomonas</i> sp.	<i>Metanosaeta</i> sp.
	<i>Peptococcus</i> sp.	<i>Butyribacterium</i> sp.	<i>Syntrophobacter</i> sp.	<i>Methanosarcina</i> sp.
	<i>Micrococcus</i> sp.	<i>Propionobacterium</i> sp.	<i>Acetobacterium</i> sp.	<i>Methanobacterium</i> sp.
	<i>Clostridium</i> sp.	<i>Pseudomonas</i> sp.	<i>Clostridium</i> sp.	<i>Methanospirillum</i> sp.
		<i>Ruminococcus</i> sp.		<i>Methanobrevibacter</i> sp.
ระยะเวลาแบ่งตัว (doubling time)	0.5-1.8 วัน	0.5-1.8 วัน	2.5-10 วัน	0.5-9 วัน
		<i>Clostridium</i> sp.		<i>Methanothermobacter</i> sp.
สภาวะที่เหมาะสม สำหรับการเจริญ	ค่า pH 5.2-6.3		ค่า pH 6.5-8.0	
	ค่าศักย์รีดอกซ์ +400- -300		ค่าศักย์รีดอกซ์ <-250	
	อัตราส่วน C/N 10-45		อัตราส่วน C/N 20-30	

ที่มา : อลิศรา เรืองแสง, 2562

### การผลิตแก๊สชีวภาพ

#### ศักยภาพการผลิตมีเทนของวัตถุดิบ

วัตถุดิบหรือของเสียอินทรีย์ที่นำมาใช้ผลิตแก๊สชีวภาพมีศักยภาพในการให้ผลผลิตมีเทนแตกต่างกันขึ้นกับความสามารถในการถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ วัตถุดิบที่ย่อยสลายได้ง่ายจะให้ผลผลิตมีเทนสูง ดังนั้น ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสำคัญ การทำนายศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากวัตถุดิบที่ใช้จึงเป็นกุญแจสำคัญในการตัดสินใจติดตั้งระบบผลิตแก๊สชีวภาพ และดำเนินระบบผลิตแก๊สชีวภาพให้ได้ผลตอบแทนที่สูงองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบจึงถูกนำมาใช้ในการประเมินศักยภาพการผลิตมีเทนทางทฤษฎี เช่น ค่าซีโอดี chemical oxygen demand (COD) และค่าของแข็งระเหยได้ volatile solids (VS) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการประเมินปริมาณสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ และศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ ค่าซีโอดี คือปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในวัตถุดิบไปเป็นคาร์บอน ไดออกไซด์ ค่าของแข็งระเหยได้ คือน้ำหนักของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบแห้งที่หายไปหลังจากเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งค่าซีโอดีและค่าของแข็งระเหยได้ วิเคราะห์

ได้ง่ายในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ทั่วไป เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ดี อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ค่าซีโอดีของน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงและของแข็งแขวนลอยสูงมีความแม่นยำต่ำ เนื่องจากต้องใช้เวลาเจือจางตัวอย่างมากกว่า 100 เท่า ค่าของแข็งระเหยได้จึงมีความเหมาะสมกับน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงและของแข็งแขวนลอยสูงมากกว่าสารซีโอดี

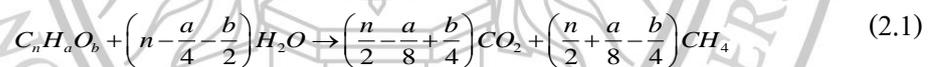
#### การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ

การคำนวณที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและการดำเนินระบบให้มีประสิทธิภาพ วิธีการคำนวณที่เกี่ยวข้อง มีดังต่อไปนี้

##### 1. ศักยภาพการผลิตมีเทนที่ได้ตามทฤษฎีการย่อยสลายสารอินทรีย์

ในกระบวนการหมักไม่ใช้ออกซิเจน มีผลโดยตรงต่อการผลิตแก๊สมีเทน ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้สามารถประมาณการได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบชีวมวลตั้งต้น โดยสารอินทรีย์ที่มีการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (CHONS) ทำให้สามารถทำนายผลผลิตแก๊สมีเทนได้โดยการวิเคราะห์สมดุลในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจนโดยจุลินทรีย์ ดังสมการที่ 2.1 (Buswell & Mueller, 1952) อัตราส่วนระหว่างมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นกับสถานะออกซิเดชันของคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์นั้นคือถ้ามีสารอินทรีย์คาร์บอนที่รีดิวซ์ได้มากก็ให้ผลผลิตแก๊สมีเทนได้มาก

สมการ



จะเห็นได้ว่า ในทฤษฎี ไขมันให้ค่าผลได้มีเทนสูงกว่าคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนตามลำดับ ในทางปฏิบัติ ผลได้แก๊สมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ศักยภาพการย่อยโดยจุลินทรีย์ของวัสดุสารตั้งต้น การเตรียมตัวอย่างวัสดุสารตั้งต้น รูปแบบกระบวนการหมักและถังหมักที่ใช้ และสภาพแวดล้อม เช่น ความเข้มข้นของวัสดุสารตั้งต้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง สารยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ภาระบรรทุกทุกสารอินทรีย์ และระยะเวลาที่เก็บน้ำหมัก hydraulic retention time (HRT) เป็นต้น ทำให้ค่าผลได้มีเทนจากกระบวนการหมักต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี (Dinuccio, Balsari, Gioelli, & Menardo, 2010; Weiland, 2010)

ดังนั้น ศักยภาพการผลิตมีเทนทางทฤษฎี ( $B_{o,th}$ ) ในหน่วยของมิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยได้ ( $\text{mLCH}_4/\text{gVS}$ ) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.2 (Angelidaki & Sanders, 2004) ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 273 เคลวิน และความดัน 1 บรรยากาศ) แก๊ส 1 โมล มี 22.4 ลิตร ดังนั้น ศักยภาพการผลิตมีเทนทางทฤษฎีในหน่วยของมิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมชีโอดี ( $\text{mLCH}_4/\text{gCOD}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

สมการ

$$B_{o,th} = \frac{\left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} + \frac{b}{4}\right) 22.4}{12n + a + 16b} \left( \text{STP} \frac{L - \text{CH}_4}{g - \text{VS}} \right); (\text{mLCH}_4/\text{gVS}) \quad (2.2)$$

$$B_{o,th} = \frac{\left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} + \frac{b}{4}\right) 22.4}{\left(n + \frac{a}{4} - \frac{b}{2}\right) 32} \left( \text{STP} \frac{L - \text{CH}_4}{g - \text{COD}} \right); (\text{mLCH}_4/\text{gCOD}) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $n$   $a$  และ  $b$  คือ จำนวนอะตอมของธาตุ C H และ O ตามลำดับ  
22.4 คือ การแปลงจากหน่วยโมลของแก๊สเป็นหน่วยลิตร

ตารางที่ 2.4 ศักยภาพการผลิตมีเทนจากสารอินทรีย์

ชนิดของสารตั้งต้น	องค์ประกอบ	อัตราส่วน COD/VS	ผลได้มีเทน	ผลได้มีเทน	องค์ประกอบมีเทนในแก๊สชีวภาพ (%)
			( $B_{o,th}$ ) LCH <sub>4</sub> /gVS	( $B_{o,th}$ ) LCH <sub>4</sub> /gCOD	
คาร์โบไฮเดรต*	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>	1.19	0.415	0.35	50
โปรตีน**	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>2</sub>	1.42	0.496	0.35	50
ไขมัน***	C <sub>57</sub> H <sub>104</sub> O <sub>6</sub>	2.90	1.014	0.35	70
อะซิเตท	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	1.07	0.373	0.35	50
โพรพิโอเนท	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	1.51	0.530	0.35	58

ที่มา : อลิศรา เรืองแสง, 2562

ในตารางที่ 2.4 ได้แสดงศักยภาพการผลิตมีเทนจากสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ โดยกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลองค์ประกอบ CHONS ของวัตถุดิบ สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของวัตถุดิบ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน กรดไขมัน ะเหยง่าย องค์ประกอบหลักนี้สามารถนำไปทำนายค่าศักยภาพการผลิตมีเทนทฤษฎีในหน่วยของ มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยได้ด้วยสมการที่ 2.4

สมการ

$$B_{o,th} = 0.415 \text{ carbohydrates} + 0.49 \text{ proteins} + 1.014 \text{ lipids} + 0.373 \text{ acetate} + 0.53 \text{ propionate} \quad (2.4)$$

2. ค่าพลังงานของแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

โดยค่าพลังงานของแก๊สมีเทนเป็นค่าที่ใช้บอกประสิทธิภาพในการเปลี่ยนวัตถุดิบตั้งต้นไปเป็นพลังงาน ซึ่งค่าพลังงานของแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จะคิดต่อหนึ่งหน่วย gCOD หรือ gVS ของวัตถุดิบ โดยการคำนวณจะใช้ค่าผลได้มีเทนที่ผลิตได้จริง ที่มีหน่วยเป็น  $LCH_4/gCOD$  และใช้ค่าความหนาแน่นของแก๊สและค่าความร้อนของแก๊สนั้น ๆ ค่าพลังงานมีหน่วยเป็น  $kJ/gCOD$  หรือ  $kJ/gVS$  โดยใช้สมการที่ 2.5 (Reungsang, Pattra, & Sittijunda, 2012)

สมการ

$$CH_4 \text{ energy production} = CH_4 \text{ yield} \times CH_4 \text{ density} \times CH_4 \text{ heating values} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $CH_4 \text{ energy production}$  คือ ค่าพลังงานที่ได้จากการผลิตแก๊สมีเทน ( $kJ/gCOD$ )

$CH_4 \text{ yield}$  คือ ค่าผลได้ของแก๊สมีเทน ( $LCH_4/gCOD$ )

$CH_4 \text{ density}$  คือ ค่าความหนาแน่นของแก๊สมีเทน ( $0.72 \text{ g/L}$ )

$CH_4 \text{ heating values}$  คือ ค่าความร้อนของแก๊สมีเทน ( $50 \text{ kJ/g}$ )

### ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดที่เจริญเติบโตร่วมกัน ดังนั้น ในการเริ่มต้นดำเนินระบบจึงต้องควบคุมปัจจัยทางเคมีและปัจจัยทางกายภาพในระบบให้เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย หากมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้

เหมาะสมต่อกลุ่มผลิตแก๊สมีเทน ก็จะทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบผลิตแก๊สชีวภาพส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลงและระบบล้มเหลวในที่สุด

ดังนั้น สภาวะปัจจัยทางเคมีกายภาพ และชีวภาพจึงมีผลต่อการทำงาน และการเจริญของแบคทีเรียในระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ปัจจัยทางเคมี ปัจจัยทางกายภาพ และปัจจัยทางชีวภาพที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพมีดังนี้ (อลิสรา เรื่องแสง, 2562)

#### 1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH value)

การผลิตแก๊สชีวภาพค่า pH จะอยู่ในช่วง 7.0–7.2 ซึ่งในช่วงแรกของการหมักแบคทีเรียจะมีการสร้างกรดทำให้ค่าพีเอชมีค่าลดลง หากค่า pH มีค่าต่ำกว่า 5 ทำให้หยุดการย่อยสลายในระบบ เนื่องจากแบคทีเรียในระบบล้ม โดยการย่อยสลายในช่วงเมทาโนเจนซึ่งเป็นช่วงที่ผลิตแก๊สชีวภาพ โดยค่า pH ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 6.5 โดยในช่วงท้ายกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนส่งผลให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่ามากกว่าพีเอช 8 เนื่องจากจะมีค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียที่มากขึ้น จากการย่อยสลายของไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น โดยความเสถียรของระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนในช่วงเริ่มต้นควรมีค่า pH เท่ากับ 6.8-8 (พลกฤษณ์ คุ่มกล้า, 2557)

#### 2. อัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

อัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจนสำหรับการเดินระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนอยู่ในช่วง 20/1 ถึง 30/1 และมีอัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ที่ 23/1 ซึ่งอัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้ปริมาณแอมโมเนียในไนโตรเจนในระบบมีปริมาณสูง และส่งผลให้เกิดการสะสมกรดไขมันระเหยง่ายในระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนแอมโมเนียในไนโตรเจน และกรดไขมันระเหยง่ายเป็นสารตัวกลางที่สำคัญ และสามารถยับยั้งการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

#### 3. อัลคาลินิตี้ alkalinity (Alk)

อัลคาลินิตี้บอกถึงค่าความเป็นด่างในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่อยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต แสดงถึงความสามารถของเหลวในการรับโปรตอน ของการเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับแอมโมเนียและน้ำ โดยค่าความเป็นด่างจะแสดงถึงบัฟเฟอร์ที่ดีของระบบหมักที่สามารถควบคุมค่าความเป็นกรด ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตแก๊สชีวภาพ โดยทั่วไประบบควรมีค่าอัลคาลินิตี้อยู่ประมาณ 1,000–1,500 mg/L as CaCO<sub>3</sub>

#### 4. กรดไขมันระเหยง่าย volatile fatty acids (VFAs)

ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีความสำคัญในการตรวจสอบความเสถียรของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดย VFAs ได้แก่, กรดโพรพิโอนิก, กรดบิวทิริก และกรดอะซิติก เป็นต้น ซึ่ง VFAs จะเกิดขึ้นในกระบวนการหมักของแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตกรด

นอกจากนี้ VFAs สามารถเป็นสัญญาณเตือนภายในระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน หากมีค่า VFAs ที่มีปริมาณที่มากส่งผลต่อความไม่เสถียรของระบบหมัก หรืออาจมีโอกาที่จะทำให้ระบบหยุดการย่อยสลายได้ ในระบบผลิตแก๊สชีวภาพที่มีการสะสมของ VFAs ในปริมาณมาก (>2,000 mg/L as CH<sub>3</sub>COOH) จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบลดลง และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบมีค่าต่ำกว่า 6.5 จะเป็นพิษต่ออาร์เคียกลุ่มผลิตแก๊สมีเทน หากยังไม่ได้ทำการแก้ไขปล่อยให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงถึง 4.5-5.0 ก็จะทำให้ระบบเสถียรในการหมัก เป็นผลให้ระบบล้มเหลวได้ ในสถานะปกติค่า VFAs ภายในระบบผลิตแก๊สชีวภาพไม่ควรเกิน 2,000 mg/L as CH<sub>3</sub>COOH

#### 5. อุณหภูมิ (temperature)

โดยอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญในการผลิตแก๊สชีวภาพในระบบหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มไม่ใช้ออกซิเจน โดยส่วนใหญ่ระบบผลิตแก๊สชีวภาพจะสามารถดำเนินระบบต่ออยู่ในช่วงเมโซฟิลิก ซึ่งมีอุณหภูมิระหว่าง 30-45 °C และช่วงเทอร์โมฟิลิก เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50-60 °C

#### ตารางที่ 2.5 การละลายของแก๊สในน้ำที่อุณหภูมิช่วงเมโซฟิลิก และช่วงเทอร์โมฟิลิก

แก๊ส	อุณหภูมิ (°C)	การละลายของแก๊ส (mmol/L)	การละลายของแก๊ส (%)
ไฮโดรเจน	35	0.749	
	50	0.725	-3.3
คาร์บอนไดออกไซด์	35	26.60	
	55	19.60	-36
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	35	82.20	
	55	61.80	-31
มีเทน	35	1.140	
	55	0.926	-19

ที่มา : อลิศรา เรืองแสง, 2562

#### 6. ความถี่ของการกวนผสม (mixing intensity)

การผสมสารอินทรีย์ ตะกอนน้ำ และ สลัดจ์ เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วน เพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแก๊สมีเทนรวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังป้องกันการตกตะกอน และตะกอนลอย ซึ่งตะกอนอาจจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวจากถังความถี่ของการกวนผสมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนต่อเนื่อง ช่วยการยับยั้งกระบวนการจากสภาวะการะบรทุกสารอินทรีย์สูงเกินไป โดยความถี่ของการกวนที่ลดลงสามารถช่วยลดการสะสม โพรพิโอเนตในระบบได้

#### 7. สารอาหาร (nutrient)

ชนิดและองค์ประกอบของสารตั้งต้นมีผลต่อผลได้ของแก๊สชีวภาพ สารตั้งต้นวัตถุดิบในการป้อนเข้าสู่ระบบสามารถวัดค่าความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีหรือของแข็งระเหยได้ และแยกแยะระหว่างส่วนย่อยสลายได้ และส่วนที่ย่อยสลายไม่ได้ สารอาหารหลัก สำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ คือ คาร์บอนและไนโตรเจน ยังมีไฮโดรเจน ออกซิเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเซลล์จุลินทรีย์ ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โปรแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และแมงกานีส ซึ่งส่วนสารอาหารรอง คือ โมลิบดีนัม สังกะสี โคบอลต์ ซีลีเนียม ทังสแตน และนิเกิล (พลกฤษณ์ คุ้มกล้า, 2557)

#### 8. สารพิษหรือสารยับยั้ง (toxic / inhibiting)

สารยับยั้งมีการเกิดจากตัวของวัสดุตั้งต้นและเกิดขึ้นระยะกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพได้ สารพิษและสารยับยั้ง ได้แก่ กรดไขมันระเหยได้, แอมโมเนีย, ไฮโดรเจน เป็นต้น นอกจากนี้สถานะธาตุไอออนที่มีปริมาณน้อยจะมีส่วนช่วยในการกระตุ้นการเติบโตของแบคทีเรียในระบบหมักได้ แต่ถ้ามีปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลเป็นพิษต่อระบบการหมักแก๊สชีวภาพ ได้แก่ แคลเซียม, แมกนีเซียม และโซเดียม เป็นต้น

#### 9. อัตราการะบรทุกสารอินทรีย์ organic loading rate (OLR)

คืออัตราการอินทรีย์ มีหน่วยเป็นน้ำหนักของซีโอดีที่อยู่ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบต่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์ชีวภาพต่อวัน ( $\text{kgCOD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ) อัตราการะบรทุกสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของวัตถุดิบเข้าสู่ระบบ (feeding rate) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่ การเปลี่ยนอัตราการะบรทุกสารอินทรีย์สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ และเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่องค์ประกอบของวัตถุดิบ การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของวัตถุดิบเข้าสู่ระบบทำได้ง่ายกว่า โดยการควบคุมอัตราการไหลของวัตถุดิบเข้าสู่ระบบให้สัมพันธ์กับระยะเวลาที่เหมาะสมในการสัมผัส

กันระหว่างแบคทีเรียกับสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ เพื่อให้ระบบสามารถย่อยสลายอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบที่ออกแบบให้อัตราการย่อยสลายสูงสามารถรองรับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ได้ 10-40 kgCOD/m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> สำหรับวัตถุดิบที่มีปริมาณของแข็งสูงมีอัตราการระบรทุกอินทรีย์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-5 kgVS/m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> ระบบที่มีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์สูง หมายถึงวัตถุดิบสามารถย่อยสลายได้สูงต่อหน่วยปริมาตรของถังปฏิกรณ์ชีวภาพอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบระบบผลิตแก๊สชีวภาพและระบุขนาดของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

โดยอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ คือปริมาณสารตั้งต้นรายวัน ที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แก๊สชีวภาพ และสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.6 (Liao, Chang, Herrmann, & Xia, 2018)

สมการ

$$OLR = \frac{C(\text{kgVS or CODm}^3) \times Q(\text{m}^3 \times \text{d}^{-1})}{V_{\text{Reactor}}(\text{m}^3)} \quad (2.6)$$

เมื่อ OLR	คือ	อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (kgVS or COD/m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
C	คือ	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (kgVS or CODm <sup>3</sup> )
Q	คือ	อัตราส่วนไหลของน้ำเสีย (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
V <sub>reactor</sub>	คือ	ปริมาตรถัง (m <sup>3</sup> )

#### 10. การกักเก็บสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ hydraulic retention (HRT)

ระยะเวลาขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์ที่เดิมเข้าไปในระบบ และประเภทของถังปฏิกรณ์หมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งระยะเวลาในการกักเก็บจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งมีระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่น้อยเกินไปจะส่งผลทำให้แบคทีเรียไม่เพียงพอต่อการย่อยสลายในการผลิตแก๊สมีเทน ระยะเวลาในการกักเก็บส่วนใหญ่จะประมาณ 14-60 วัน โดยระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมัก คำนวณได้ตามสมการที่ 2.7 (Escudie, Cresson, Delgenès, & Bernet, 2011)

สมการ

$$\text{HRT} = \frac{V_{\text{Reactor}}}{Q} \quad (2.7)$$

HRT	คือ	เวลาที่กักเก็บ (d)
V	คือ	ปริมาตรถังปฏิกรณ์ (m <sup>3</sup> )
Q	คือ	อัตราการไหลของน้ำเสีย (m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )

### ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบต่อเนื่องและการประยุกต์ใช้งาน

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพหมักแบบต่อเนื่อง สำหรับผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถจำแนกได้หลากหลายชนิด ตามวัตถุประสงค์ในการผลิตและพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการผลิต เช่น ปริมาณการป้อนวัสดุตั้งต้น อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ระยะเวลาเวลาในการกักเก็บ (HRT) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพความสามารถและข้อจำกัดในการควบคุมถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และปริมาณแก๊สชีวภาพที่ต้องการ และถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้สำหรับการผลิต ได้แก่ ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกะ ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบป้อนกึ่งต่อเนื่อง และถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบต่อเนื่อง ซึ่งในทางอุตสาหกรรมถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบต่อเนื่องได้รับความนิยม เนื่องจาก ได้รับการประเมินว่ามีความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากสามารถควบคุมอัตราการเจริญจำเพาะของจุลินทรีย์ให้สม่ำเสมอได้ในสภาวะการปฏิบัติการปฏิบัติการแบบคงตัว ด้วยวิธีการควบคุมอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกะไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกะจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา แต่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกะจะสามารถดำเนินการดำเนินการควบคุมในกระบวนการผลิตได้ง่ายกว่าและไม่ยุ่งยากในการเดินระบบ

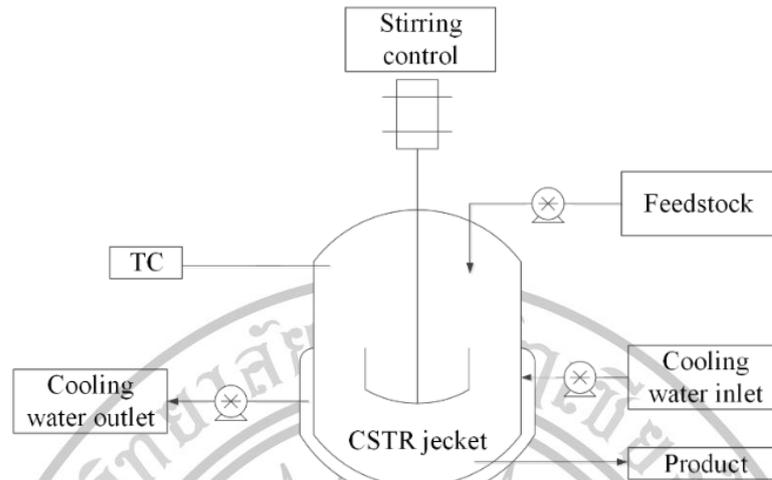
โดยทั่วไปถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกะจะใช้สำหรับการศึกษาศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (biomethane potential, BMP) และจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบป้อนกึ่งต่อเนื่อง หากมีการขยายขนาดในการผลิตจำเป็นต้องใช้การหมักแบบต่อเนื่องเพราะสามารถแก้ปัญหาการยับยั้งของวัสดุตั้งต้น (substrate inhibition) และยับยั้งของผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งสามารถทำให้เกิดผลได้ (yield) และอัตราการผลิตสูงขึ้น

การเลือกรูปแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับในกรณีของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน จำเป็นต้องคำนึงถึงความเข้มข้นของชีวมวลที่ใช้ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ชีวภาพ กรณีชีวมวลที่ป้อนมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids content) อยู่ระหว่างร้อยละ 1-12 ควรเลือกใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนต่อเนื่อง (continuous stirred tank reactor) ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีการกวนผสมภายในถังตลอดเวลาทำให้จุลินทรีย์สามารถ

สัมผัสกับสารอินทรีย์อย่างทั่วถึง ส่งผลให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการผลิตแก๊ส จากนั้นน้ำหมักที่ได้จากกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนสามารถนำไปผลิตมีเทนได้ด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นตะกอนจุลินทรีย์ใไร่อากาศแบบไหลขึ้น (up-flow anaerobic sludge blanket, UASB) ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพย่อยแบบใไร่อากาศหลากหลายรูปแบบ ส่งผลให้ชนิดถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีเพิ่มมากขึ้นและตอบสนองต่อประสงค์ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชีวภาพที่จำเพาะมากขึ้นด้วย

### ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนต่อเนื่อง

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนต่อเนื่อง (continuous stirred tank reactor, CSTR) ชนิดนี้ทำให้สารประกอบต่างๆ ในน้ำหมักผสมกันได้ดีและจุลินทรีย์มีพื้นที่ในการสัมผัสกับอาหารมาก แต่เมื่อการหมักมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำหมักในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนต่อเนื่องที่สั้นอาจทำให้เกิดปัญหาการตกตะกอนของจุลินทรีย์เกิดขึ้น เนื่องจากระยะเวลาการกักเก็บที่สั้นจะทำให้อัตราการไหลเข้าของวัสดุตั้งต้นเพิ่มสูงขึ้นไม่ทันต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพจึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียเซลล์จุลินทรีย์ในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงเซลล์ (immobilized-cell reactor) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้แทนถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนต่อเนื่อง เพราะสามารถคงไว้ซึ่งความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์สูงๆ และระยะเวลาการกักเก็บที่สั้น โดยไม่มีการสูญเสียเซลล์จุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ การตรึงเซลล์ทำได้โดยการขึ้นรูปแกรนูล (granular) ไบโอฟิล์ม (biofilm) หรือการกักจุลินทรีย์ไว้ในเจล (gel-entrapped bio-particles) ซึ่งการขึ้นรูปเป็นแกรนูลสามารถเพิ่มความเข้มข้นของจุลินทรีย์ 32.2 gVS/L และสามารถผลิตไฮโดรเจนได้  $\text{mol/mol}_{\text{กลูโคส}}$  1.81 (Z. P. Zhang et al., 2007) ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบ และการผลิตแก๊สชีวภาพแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ส่งผลต่อผลได้ของแก๊สมีเทน ซึ่งในการทดลอง พบว่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดลิ่มเหลวของระบบ เนื่องจาก อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่สูงเกินไป แต่ในบางการทดลองที่ใช้วิธีตรึงเซลล์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแผ่นกรองชีวภาพ พบว่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่สูงทำให้ได้ผลได้แก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากการตรึงเซลล์ช่วยให้มีการป้องกันการสูญเสียจุลินทรีย์ได้ (Van Ginkel & Logan, 2005)



ภาพที่ 2.5 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนต่อเนื่อง

#### ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบสลับเป็นกะ

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบสลับเป็นกะ (anaerobic sequencing batch reactor, ASBR) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ ASBR อย่างแพร่หลายสำหรับการบำบัดน้ำเสียและการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยถังปฏิกรณ์ ASBR นี้มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ ระบบมีรอบการหมักนานสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับการหมักแบบ fixed-bed continuous system) สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียและแก๊สชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ถังปฏิกรณ์ ASBR มีความยืดหยุ่นสูง สามารถประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลายตามความเหมาะสมของงานแต่ละประเภท การควบคุมระบบ ไม่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถดำเนินแต่ละขั้นตอนของระบบได้โดยใช้ถังหมักเดียว สามารถลดปัญหาการถูกชะของจุลินทรีย์ เนื่องจากมีขั้นตอนการตกตะกอนจุลินทรีย์ (settling period) หลักการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบสลับเป็นกะโดยทั่วไป คือ มีการเติมเข้าและระบายออก โดยมีขั้นตอนในการดำเนินปฏิกิริยา 1 รอบ ในถังหมักถังเดียว ในถังปฏิกรณ์ถังเดียวมีการหมัก ซึ่งมีทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

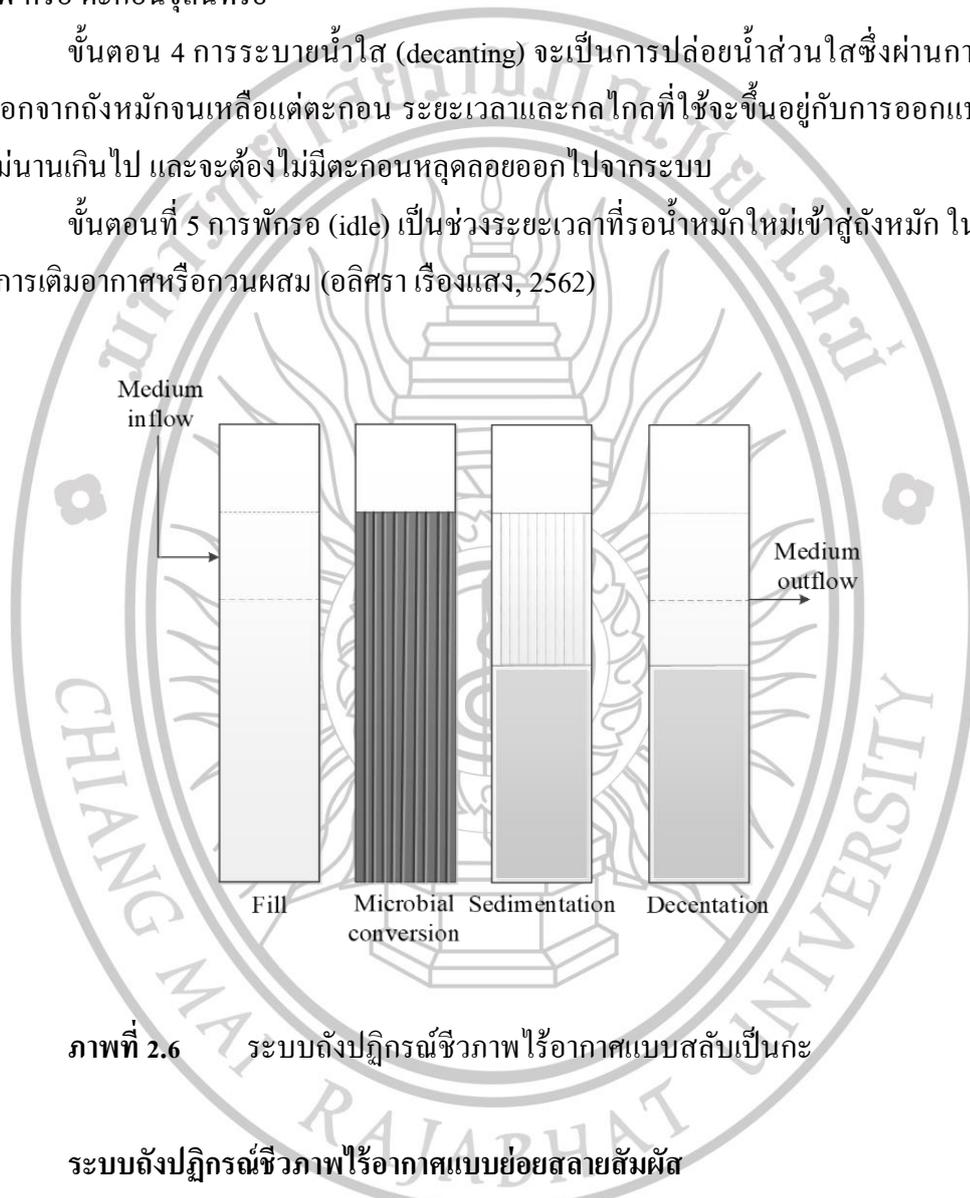
ขั้นตอนที่ 1 การเติม (fill) เป็นช่วงเวลาที่มีการเติมน้ำหมักใหม่เข้าสู่ถังหมัก ซึ่งมีน้ำตะกอนจากวัฏจักรก่อนหน้าที่อยู่ในถังหมัก การเติมน้ำหมักใหม่สามารถทำให้ใหม่สามารถทำให้ระดับน้ำในถังหมักสูงขึ้นจากร้อยละ 25 (เมื่อสิ้นสุดการพักระบบ) ถึงร้อยละ 100 ของความจุได้ ช่วงเวลาการเติมน้ำเสียโดยทั่วไปคิดเป็นร้อยละ 25 ของช่วงวัฏจักร ซึ่งอัตราส่วนระหว่างช่วงของการเติมต่อรอบที่มีค่าสูงทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบดีขึ้น

ขั้นตอนที่ 2 การทำปฏิกิริยา (microbial conversion) การทำปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นในระหว่างการเติมน้ำหมักใหม่ หรือหลังจากสิ้นสุดการเติมน้ำหมักใหม่ โดยจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นอย่างสมบูรณ์และระยะเวลาที่ใช้จะขึ้นกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 3 การตกตะกอน (sedimentation) เป็นช่วงเวลาที่เกิดการแยกตัวของแข็งชีวภาพ หรือ ตะกอนจุลินทรีย์

ขั้นตอน 4 การระบายน้ำใส (decanting) จะเป็นการปล่อยน้ำส่วนใสซึ่งผ่านการหมักแล้วออกจากถังหมักจนเหลือแต่ตะกอน ระยะเวลาและกลไกที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบ แต่ต้องไม่นานเกินไป และจะต้องไม่มีตะกอนหลุดลอยออกไปจากระบบ

ขั้นตอนที่ 5 การพักรอ (idle) เป็นช่วงระยะเวลาที่รอให้น้ำหมักใหม่เข้าสู่ถังหมัก ในช่วงนี้อาจมีการเติมอากาศหรือกวนผสม (อลิศรา เรืองแสง, 2562)

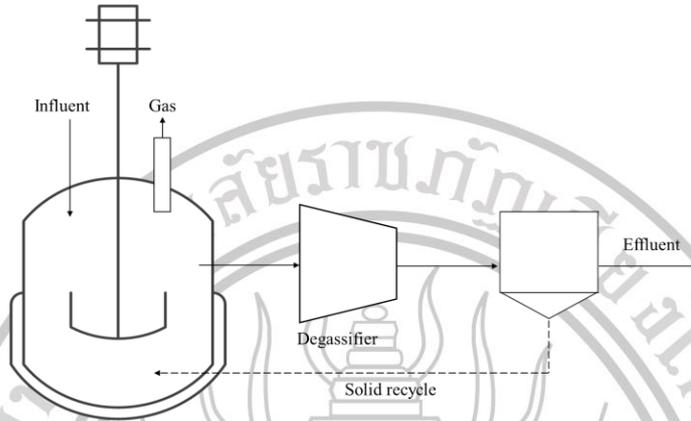


ภาพที่ 2.6 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบสลับเป็นกะ

#### ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบย่อยสลายสัมผัส

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบย่อยสลายสัมผัส (anaerobic contact reactor, AC) ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย โดยสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดอาจเป็นของแข็งหรือสารละลาย แต่จะนิยมใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง ถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบย่อยสลายสัมผัสอาจเป็นถังปฏิกิริยาแบบมีการหมุนเวียนตะกอนหรือไม่มีตะกอน ถังปฏิกรณ์

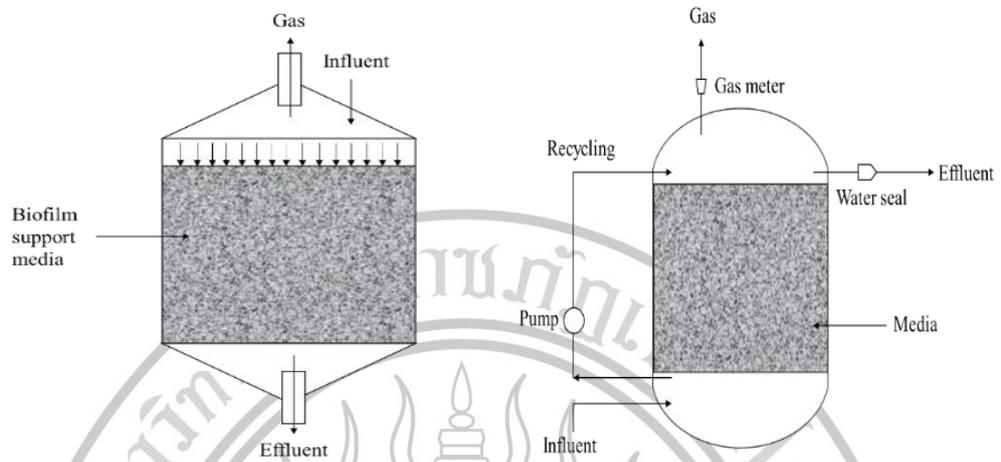
ชีวภาพ AC โดยทั่วไประบบสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ถึง  $6 \text{ kgCOD/m}^3 \text{ d}^{-1}$  โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด COD เท่ากับ 85-95% (Hassan, Zwain, & Dahlan, 2013)



ภาพที่ 2.7 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบย่อยสลายสัมผัส  
ที่มา : อติศรา เรืองแสง, 2562

### ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์

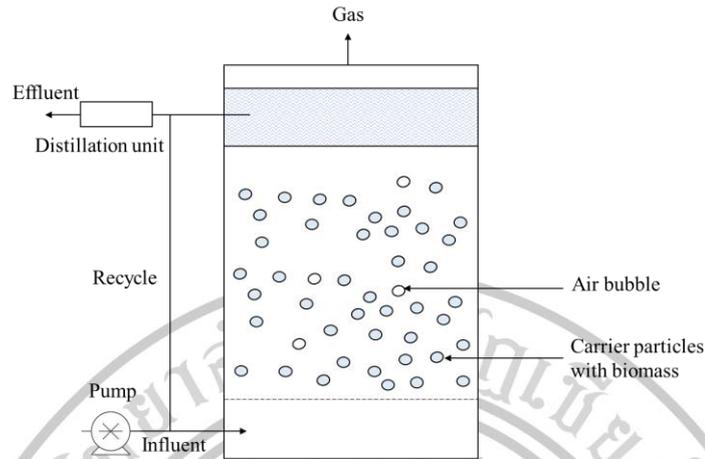
ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (anaerobic fixed film, AF) ได้ถูกพัฒนาให้สามารถในการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ได้ดีขึ้นจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่อาศัยการทำงานของตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยในน้ำเสีย มาเป็นระบบที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะกับตัวกลางในลักษณะตรึงฟิล์มที่มีลักษณะเด่นที่มีการบรรจุวัสดุอย่างเป็นระเบียบ มีการไหลของน้ำเสียที่สม่ำเสมอโดยวัสดุรองรับที่ใช้ เช่น พลาสติก หิน เซรามิก และเม็ดปิดแก้ว เป็นต้น โดยการบรรจุวัสดุรองรับลักษณะนี้ทำให้จุลินทรีย์ออกจากระบบ นอกจากนี้พื้นที่ผิวจำเพาะ ความเป็นรูพรุน พื้นที่ที่มีลักษณะหยาบ ขนาดของรู และทิศทางการจัดเรียงวัสดุที่แตกต่างกันยังส่งผลต่อการทำงานและเสถียรภาพของระบบในระยะยาว โดยระบบนี้อาจมีการป้อนน้ำเสียจากด้านบน (down flow anaerobic fixed film) และป้อนจากด้านล่าง (up-flow anaerobic fixed film) ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพดังภาพที่ 2.8 โดยระบบที่นิยมในปัจจุบันนี้คือ ระบบที่ป้อนน้ำเสียจากด้านล่างของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ เนื่องจากสามารถลดปัญหาการอุดตัน ส่วนใหญ่ใช้สารตั้งต้นเป็นลักษณะของปริมาณของแข็งต่ำ ระบบถังปฏิกรณ์นี้เริ่มต้นการทำงานโดยน้ำเสียจะถูกป้อนโดยน้ำเสียเข้าระบบผ่านท่อกระจายน้ำหนักและไหลผ่านสัมผัสกับจุลินทรีย์ที่ยึดติดกับวัสดุรองรับ โดยจุลินทรีย์ในระบบจะใช้สารอินทรีย์ที่มาจากน้ำเสียเป็นแหล่งอาหาร ซึ่งเมื่อเกิดแก๊สชีวภาพจะไหลขึ้นทางด้านบนของระบบ (Meng, Jost, Mumme, Wang, & Linke, 2016)



ภาพที่ 2.8 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์  
ที่มา : อติศรา เรืองแสง, 2562

### ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นลอยตัวไร้อากาศ

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นลอยตัวไร้อากาศ (anaerobic fluid bed reactor, AFBR) เป็นถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ได้พัฒนามาจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกรองไร้อากาศหรือถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ ซึ่งมีการดัดแปลงระบบโดยเปลี่ยนตัวกลางที่เป็นชนิดเป็นชั้นตรึงติดอยู่กับที่มาใช้ตัวกลางซึ่งเป็นอนุภาคนาขนาดเล็กที่สามารถเคลื่อนไหวได้เสมือนเป็นของไหล ดังภาพที่ 2.9 ด้วยเหตุนี้การกำหนดความเร็วต่ำสุดในระบบชั้นลอยตัว ภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นลอยตัวไร้อากาศจึงสำคัญมาก เพราะส่งผลต่อการเกิดการตกตะกอนของสารแขวนลอยในถังปฏิกรณ์ และข้อดีระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพนี้มีต้นทุนในการจัดการระบบต่ำ การทำงานของระบบจำเป็นต้องให้ตัวกลางมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลา จึงไม่เกิดการอุดตัน และระบบยังมีพื้นที่ผิวของฟิล์มจุลินทรีย์ การผสมระหว่างอนุภาคอินทรีย์และการเกิดการกระจายความร้อนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพอย่างสม่ำเสมอ (Bhatia & Yang, 2017)



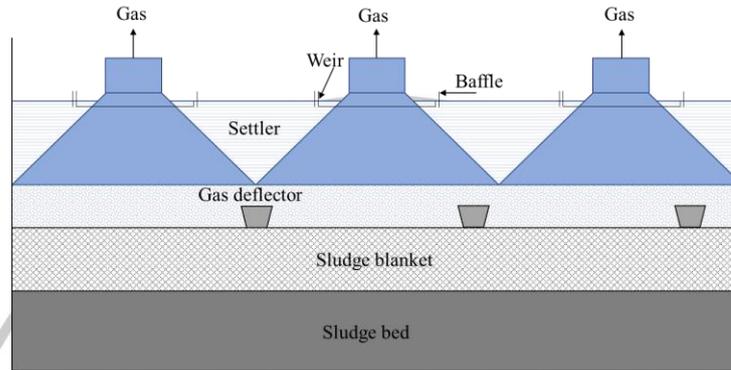
ภาพที่ 2.9 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบขึ้นลอยตัวไร้อากาศ  
 ที่มา : อติศรา เรืองแสง, 2562

### ระบบปฏิกรณ์ชีวภาพแบบขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น (up-flow anaerobic sludge blanket, UASB) โดยระบบ UASB เป็นระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียที่ใช้หลักการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ซึ่งน้ำเสียจะไหลผ่านชั้นตะกอนจุลินทรีย์ โดยไม่มีตัวกลางให้จุลินทรีย์เกาะ จากนั้นน้ำเสียถูกย่อยสลายด้วยแบคทีเรียภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแก๊สชีวภาพ ระบบ UASB เป็นระบบที่ได้รับความสนใจเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีชีวภาพแบบหมักไม่ใช้ออกซิเจน นอกจากนี้ยังได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงและมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้สูงกว่าระบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบอื่น ๆ ดังนั้นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ คือการประยุกต์การตรึงจุลินทรีย์ด้วยตัวกลางร่วมกับระบบ UASB เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ ดังภาพที่ 2.10

หลักการในการเดินระบบ UASB จะทำการเลี้ยงตะกอนแบคทีเรียให้สะสมอยู่ในถังปฏิกรณ์ และมีปริมาณตะกอนที่หลุดออกจากระบบน้อย โดยไม่ใช้วัสดุรองรับเพื่อให้ตะกอนเกาะติด ทั้งนี้ตะกอนแบคทีเรียที่อยู่ในระบบจะรวมตัวกันในรูปของเม็ดตะกอน (granule) ที่มีน้ำหนักมากตกตะกอนได้ดี เกิดเป็นลักษณะชั้นตะกอนในบริเวณด้านล่างของถัง ทั้งนี้ขนาดของตะกอนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียที่จ่ายเข้าสู่ระบบ กลไกการทำงานและลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากมีตะกอนบางส่วนที่มีขนาดเล็ก และตกตะกอนไม่ได้ปะปนอยู่ในระบบ การที่จะรักษาตะกอนส่วนนี้ไว้ต้องติดตั้งส่วนตกตะกอนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกน้ำเสีย ตะกอนแบคทีเรีย และแก๊สชีวภาพออกจากกัน gas-solid separator (GSS) ไว้ตอนบนของถังหมัก เพื่อ

ป้องกันไม่ให้ตะกอนหลุดออกจากถัง และเป็นการเพิ่มเวลาเก็บกักตะกอนในถังปฏิกิริยาให้นานขึ้น (วชิรา ดาวสุด, 2561)

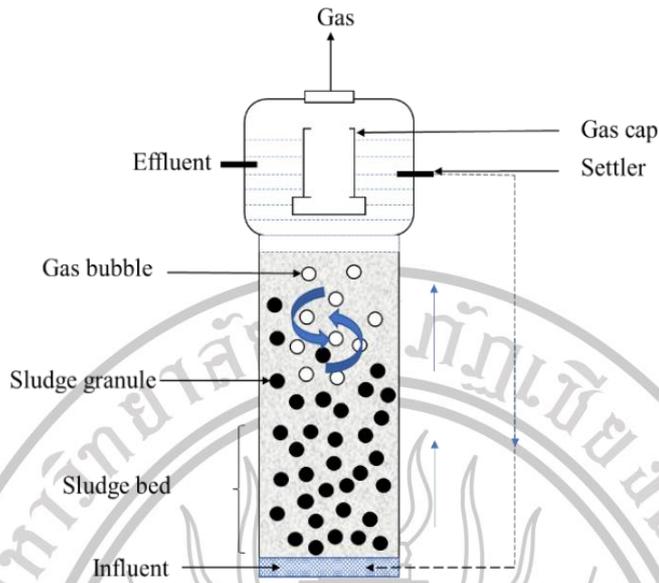


ภาพที่ 2.10 ระบบถังปฏิกิริยาชีวภาพแบบชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น

ที่มา : อติศรา เรืองแสง, 2562

#### ระบบถังปฏิกิริยาชีวภาพแบบชั้นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขยายตัว

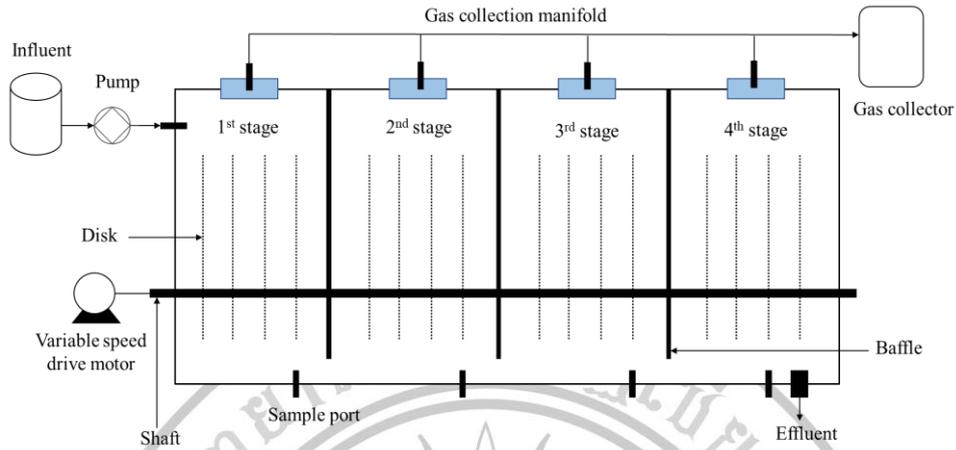
ถังปฏิกิริยาชีวภาพแบบชั้นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขยายตัว (expanded granular sludge bed, EGBG) ดังภาพที่ 2.11 ได้รับการพัฒนามาจากระบบถังปฏิกิริยา EGBG แบบไหลขึ้น โดยมีอัตราการไหลขึ้นสูงประมาณ 3-5 m/h ระบบถังปฏิกิริยา EGBG จะให้ความสำคัญกับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์และระยะเวลาในการกักเก็บเนื่องจากพารามิเตอร์ทั้งสองจะส่งผลต่อสมรรถนะและความล้มเหลวของระบบถังปฏิกิริยา EGBG อัตราน้ำไหลที่สูงขึ้นจะทำให้ชั้นนอน ซึ่งมีส่วนช่วยทำให้มีการสัมผัสระหว่างน้ำเสียและเม็ดแบคทีเรียได้ทั่วถึง ทำให้เกิดการก่อตัวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้เร็วกว่าถังปฏิกิริยา EGBG แบบไหลขึ้น รวมถึงการเกิดแก๊สมีเทน และการบำบัดน้ำเสียจึงมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบถังปฏิกิริยา EGBG แบบไหลขึ้น นอกจากนี้ การสัมผัสระหว่างวัตถุตั้งต้นและจุลินทรีย์ที่สูงกว่าถังปฏิกิริยา EGBG แบบไหลขึ้น จึงลดปัญหาการป้อนวัตถุตั้งต้นที่มีความเข้มข้นต่ำเข้าถังปฏิกิริยาได้ การย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นมีเทนเกิดขึ้นภายในชั้นสลัดจ์ ความสูงของชั้นสลัดจ์จะขึ้นอยู่กับความสูงของถังปฏิกิริยา EGBG ซึ่งมีค่าความสูงอยู่ที่ 7-14 เมตร เมื่อน้ำเสียไหลขึ้นมาถึงตอนบนซึ่งระบบแยกแก๊ส แก๊สจะลอยตัวขึ้นสู่ผิว น้ำ ตะกอนแขวนลอยจะตกตะกอนกลับลงไปยังตอนล่างของถังปฏิกิริยาชีวภาพ EGBG แบบไหลขึ้น ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลออกจากถังปฏิกิริยา (Saravanan & Sreekrishnan, 2006)



ภาพที่ 2.11 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขยายตัว  
ที่มา: อติศรา เรืองแสง, 2562

### ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบจวนหมุนชีวภาพไร้อากาศ

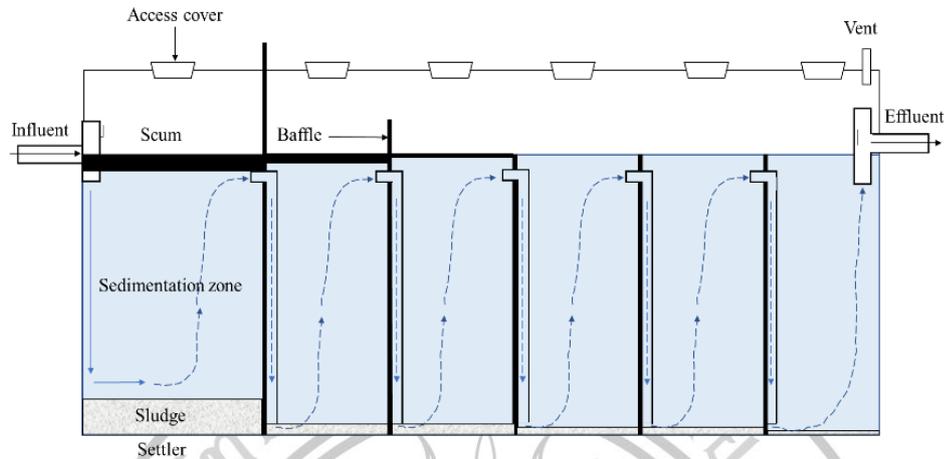
ถังปฏิกรณ์แบบ (anaerobic rotating biological contactor, AnRBC) ซึ่งลักษณะโครงสร้างมีฝาปิดเพื่อไม่ให้สัมผัสอากาศจากภายนอก และมีช่องระบายแก๊สออกทางตอนบน ดังภาพที่ 2.12 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ AnRBC สามารถเดินระบบได้กับน้ำเสียหลากหลายชนิด โดยเชื่อมติดกับระบบการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์กะทันหัน โดยข้อดีของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ AnRBC มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบไม่สูง ใช้พื้นที่น้อย เมื่อมีการเดินระบบไปได้ระยะหนึ่งจะพบว่าแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกเจนจะสามารถยึดเกาะ และเจริญเติบโตได้ดีบนผิวแผ่นจาน ซึ่งระบบจะมีการสะสมของตะกอนแข็งแขวนลอยต่ำ ทำให้ดูแลรักษาง่าย นอกจากนี้สามารถรับอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ และการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาเก็บได้ดี (Kulikowska, JóŹwiak, Kowal, & Ciesielski, 2010)



ภาพที่ 2.12 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบงานหมุนชีวภาพไร้อากาศ  
ที่มา : อลิศรา เรืองแสง, 2562

### ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบแผ่นกั้น

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบแผ่นกั้น (anaerobic baffled reactor, ABR) มีลักษณะเป็นถังหรือบ่อคินที่มีแผ่นกั้นขวางหลายแผ่นติดตั้งไว้และมีท่อเชื่อมระหว่างแผ่นกั้นทำหน้าที่ให้น้ำเสียผ่านไปยังห้องอื่นๆ ปกติระบบนี้จะถูกสร้างให้มีห้องย่อยประมาณ 3-6 ห้อง ดังภาพที่ 2.13 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ABR สามารถเชื่อมต่อกับระบบอื่นๆ ได้ง่าย เป็นถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้พื้นที่ไม่มาก และเหมาะสมกับสภาวะอากาศในพื้นที่ติดตั้งได้เกือบทุกสภาวะยกเว้นอากาศหนาว ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ABR ใช้เวลาในการเริ่มเดินระบบนานพอควรกว่าจะเข้าสู่สภาวะเสถียร แต่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยการเติมหัวเชื้อที่ได้จากมูลสัตว์ หรือสลัดจ์จากตะกอน เป็นต้น การไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะมีลักษณะไหลขึ้นลงสลับกันหลายครั้ง ซึ่งมีความเร็วในการไหลขึ้นลง ประมาณ 0.2-0.4 m/h โดยการไหลของน้ำจะช่วยเพิ่มเวลาในการสัมผัสระหว่างกลุ่มของจุลินทรีย์กับวัสดุตั้งต้นซึ่งเป็นอาหารของจุลินทรีย์ ข้อดีของระบบคือ ทนต่อการล้มเหลวจากการที่น้ำเสียมีสารอินทรีย์มากเกินไป ไม่ต้องใช้พลังงานจากไฟฟ้า ประหยัดต้นทุนการควบคุมดูแล สามารถใช้งานได้นานต่อรอบการกำจัดตะกอน เกิดการสะสมของตะกอนน้อย ระบบนี้มีเสถียรสูง สำหรับขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพจะคล้ายกับถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบขึ้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น โดยในแต่ละห้องจะต้องมีการปล่อยแก๊สเพื่อป้องกันกลิ่น และอันตรายจากการสะสมของแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละห้อง ระบบนี้สามารถใช้น้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง (อลิศรา เรืองแสง, 2562)



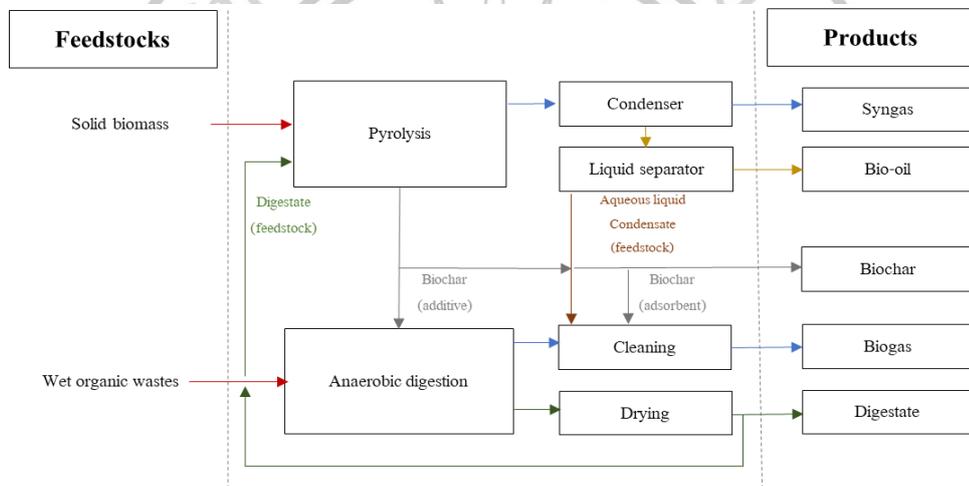
ภาพที่ 2.13 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไร้อากาศแบบแผ่นกั้น  
ที่มา : อติศรา เรืองแสง, 2562

### ถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพ เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีลักษณะเป็นของแข็ง โดยคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และเคมีที่มีความหลากหลาย โดยควบคุมชนิดของวัตถุดิบ (Azargohar, Nanda, Rao, & Dalai, 2013; Nanda, Azargohar, Kozinski, & Dalai, 2014) ในขณะที่กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็น กระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพ และกำจัดขยะอินทรีย์เปียกที่ย่อยสลายได้ ดังภาพที่ 2.14 โดยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการทางความร้อนที่สามารถเปลี่ยนชีวมวล แห่งที่เป็นของแข็งให้กลายเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ และถ่านชีวภาพ (Kan, Strezov, & Evans, 2016) โดย ไพโรไลซิสและกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถเป็นกระบวนการที่ช่วยลด ปริมาณของเสียอินทรีย์ได้ โดยศักยภาพของถ่านชีวภาพที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ เช่น วัตถุดิบ ในการปรับปรุงดิน (Lehmann & Joseph, 2015) ถ่านกัมมันต์ (Shahkarami, Dalai, & Soltan, 2016) อิเล็กโทรดสำหรับแบตเตอรี่หรือเซลล์อิเล็กโทรลิซิส (Dehkhoda, Gyenge, & Ellis, 2016) และ ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับน้ำมันดิน (Ekström, Lindman, & Pettersson, 1985) เป็นต้น โดยประสิทธิภาพ ของถ่านชีวภาพในการนำมาใช้งานส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และองค์ประกอบ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ สภาวะไพโรไลซิสการบำบัดก่อน และหลังการแปรรูป

ปัจจุบันมีการบูรณาการเทคโนโลยีในการเพิ่มศักยภาพปรับปรุงคุณภาพของ แก๊สชีวภาพและการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pelaez-Samaniego et al., 2018) หรือเพื่อลด ความไม่เสถียรและการยับยั้งในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Linville, Shen, Ignacio-de Leon, Schoene, & Urgun-Demirtas, 2017; J. Zhang et al., 2018) ซึ่งการนำถ่านชีวภาพ

จากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีกรดอะซิดิกมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยอาจมีการเพิ่มถ่านชีวภาพสำหรับการดูดซับสารยับยั้งที่เป็นพิษในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ (Fabbri & Torri, 2016; Hübner & Mumme, 2015; Salman, Schwede, Thorin, & Yan, 2017) ทั้งนี้ถ่านชีวภาพแสดงถึงความเชื่อมโยงที่สำคัญระหว่างไพโรไลซิส และกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพโดยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังภาพที่ 2.14 (Fabbri & Torri, 2016; Pecchi & Baratieri, 2019) ในส่วนนี้ทำการทบทวนคุณลักษณะต่างๆ รวมทั้งความเหมาะสมวัตถุดิบ และเทคโนโลยีการผลิต



ภาพที่ 2.14 การเชื่อมโยงระหว่างไพโรไลซิสกับการผลิตแก๊สชีวภาพ  
ที่มา : Fabbri & Torri, 2016; Pecchi & Baratieri, 2019

### กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสแบ่งได้ 2 วิธีการคือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) คือ การเผาไหม้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ๆ ใช้เวลานาน อาจใช้เวลาเป็นชั่วโมงในการเผา และใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 350-600 °C ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน และกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) ที่ใช้ระยะเวลาที่สั้นในการเผาไหม้เป็นวินาที โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ในช่วง 500-900 °C ซึ่งทั้ง 2 วิธีการกระบวนการไพโรไลซิสจะได้ผลผลิตที่แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ถ่านชีวภาพ (biochar) แก๊สชีวภาพ (biogas) และน้ำมัน (bio-oil) นอกจากนี้ได้ถ่านชีวภาพ ผลพลอยจากกระบวนการไพโรไลซิส ยังมีแก๊สสังเคราะห์ (syngas หรือ synthesis gas) ซึ่งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงผสม ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) แก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) กรดอินทรีย์ (organic acids) กรดไพโรลิกเนียส (pyrolygneous acid)

หรือน้ำส้มควันไม้ และความร้อนส่วนเกิน (Chiappero et al., 2020) ซึ่งถ่านชีวภาพ คือ การเผาถ่านแบบที่อาศัยหลักการไพโรไลซิส เพื่อต้องการถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพ ไม่มีสารพิษปนเปื้อนในเนื้อถ่าน นอกจากนี้กระบวนการผลิตถ่านต้องไม่มีควันไฟออกไปรบกวนชาวบ้านใกล้เคียง เตาเผาถ่านดังกล่าวมีกระบวนการคล้ายกับเตาเผา ปลายปล่องเตาแบบถ่านชีวภาพจะไร้ควันพิษ

ถ่านชีวภาพที่อาศัยหลักการไพโรไลซิส กระบวนการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อนในสภาพอับอากาศ แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ การกำจัดความชื้น การปล่อยไอสารระเหิด การเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่าน และการทำให้ถ่านบริสุทธิ์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### ขั้นตอนที่ 1 การกำจัดความชื้น

การกำจัดความชื้นในชีวมวล คือช่วงอุณหภูมิที่ 180 °C สามารถไล่ความชื้นจากชีวมวลโดยชีวมวลนั้น ๆ จะเกิดการคายน้ำที่ดูดซับอยู่ในเซลล์ของตัวชีวมวล และน้ำที่อยู่ในผนังเซลล์ของชีวมวล โดยเป็นการเตรียมชีวมวลสำหรับทำถ่านชีวภาพจะมีแต่ไอน้ำออกมา นอกจากนี้ยังสามารถเห็นควันที่ออกมาสีขาวปนฟ้าอ่อน

#### ขั้นตอนที่ 2 การปล่อยไอสารระเหิด

การให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่ผ่านการไล่ความชื้นจากขั้นตอนที่ 1 โดยการปล่อยไอสารระเหิดจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 180 จนถึง 270 °C ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้จะเป็นการสลายเส้นใยเฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) ในตัวของชีวมวลออกมาจนหมดที่อุณหภูมิประมาณ 270 °C เตาเผาถ่านที่ดีจะรักษาอุณหภูมิระดับนี้ให้ใกล้เคียงทั่วทุกจุดของเตา ควันที่ออกมามีสีจาง ๆ เจือปนในช่วงขั้นตอนการกำจัดไอสารระเหิด นอกจากนี้ยังมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ กรดน้ำส้ม (acetic acid) และเมทานอล (methanol) เจือปนออกมากับควันแต่มีปริมาณน้อยมาก

#### ขั้นตอนที่ 3 การเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่าน

การเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่านจะมีช่วงอุณหภูมิที่ 270 – 400 °C เป็นช่วงที่ชีวมวลเกิดการสลายตัวด้วยปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ซึ่งเกิดจากความร้อนที่สะสมโดยอุณหภูมิการสลายตัวเซลลูโลสประมาณ 270 °C ซึ่งควันที่ออกมามีสีขาวปนสีเหลือง มีกลิ่นฉุนสามารถติดไฟได้ โดยสามารถเก็บน้ำส้มควันไม้ที่มีคุณภาพทำได้ในช่วงนี้ ส่วนการสลายตัวลิกนินจะเริ่มที่อุณหภูมิประมาณ 310 °C จนถึง 400 °C หลังจากกระบวนการนี้ชีวมวลจะกลายเป็นถ่าน

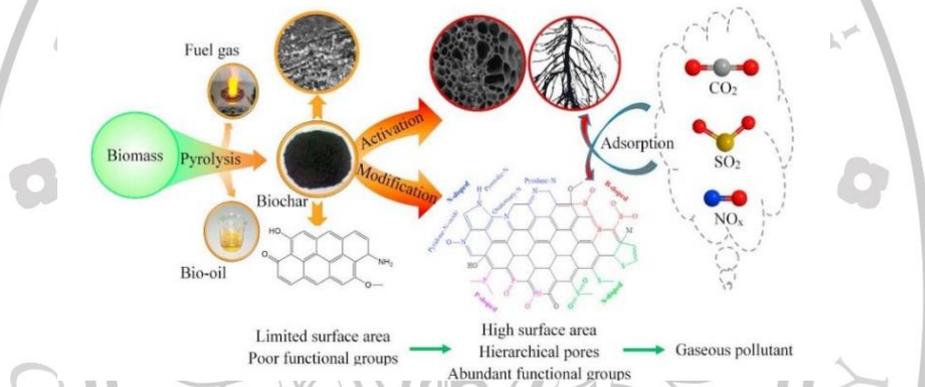
#### ขั้นตอนที่ 4 การทำให้ถ่านบริสุทธิ์

การเปลี่ยนถ่านชีวภาพเป็นถ่านชีวภาพบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400 °C พบว่า เกิดน้ำมันไพโรไลซิส หรือน้ำมันดิบชีวภาพ ในปริมาณที่สูง ซึ่งในส่วนของน้ำมันดิบชีวภาพที่เกิดการเผาไหม้ในเตาถ่านจะเกิดเป็นสารเบนโซไพรีน (benzopyrene) และไคเบนซานทราเซน

(dibenzanthracene) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง โดยที่อุณหภูมิในช่วง 500-600 °C สามารถนำมันดับชีวภาพออกจากถ่านชีวภาพได้ (กวินทร์ สุภวิทโยธิน, 2555)

### คุณสมบัติและองค์ประกอบ

คุณสมบัติ และองค์ประกอบพื้นฐานของถ่านชีวภาพมีลักษณะแตกต่างจากถ่านไม้ที่ผ่านการเผาไหม้โดยทั่วไป ได้แก่ ถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบโดยน้ำหนักสูงกว่าธาตุชนิดอื่น ๆ และไม่เกิดการแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากไม่ได้ผ่านการสัมผัสกับออกซิเจนในขณะที่ให้ความร้อน อีกทั้งคาร์บอนเป็นสารอะโรมาติกที่มีลักษณะเป็นวงแหวนคาร์บอน 6 อะตอม ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์โดยไม่มีออกซิเจน และไฮโดรเจน (Y. Chen, Zhang, Chen, Yang, & Chen, 2017)



ภาพที่ 2.15 องค์ประกอบและโครงสร้างของถ่านชีวภาพ

ที่มา : Chen, Zhang, Chen, Yang, & Chen, 2017

ถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นรูพรุน มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส ซึ่งองค์ประกอบจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของชีวมวล และปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไพโรไลซิสในการผลิตถ่านชีวภาพ เช่น อุณหภูมิอุณหภูมิ และระยะเวลา เป็นต้น

ถ่านชีวภาพได้นำมาใช้ประโยชน์ให้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้สำหรับผลิตความร้อน ไอน้ำ และไฟฟ้า ถ่านที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องปฏิกรณ์ภายในกระบวนการ โดยค่าความร้อนของถ่านมีค่า 15-30 MJ/kg ถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่าน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน โดยนำไปใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ นอกจากนี้

ถ่านยังมีคุณสมบัติที่ดีเกี่ยวกับ การปรับปรุงคุณสมบัติของดิน ดังนั้นจึงมีความพยายามในการพัฒนา ถ่านจากกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินสำหรับเกษตรกร

### ไบโอฟิล์ม (biofilm)

ไบโอฟิล์ม (biofilm) เป็นการรวมกลุ่มกันของจุลินทรีย์ที่เริ่มจากการเกาะติดบนพื้นผิวที่มีความชื้นสูงหรืออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีของเหลวล้อมรอบ โดยจุลินทรีย์เหล่านี้ร่วมกันผลิตพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเมทริกซ์ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และกรดนิวคลีอิก ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันให้กับจำนวนของแบคทีเรียที่อยู่ภายในโครงสร้าง ทั้งนี้สภาพภายในโครงสร้างรวมทั้งเจริญและเพิ่มจำนวน มีความแตกต่างจากจุลินทรีย์ชนิดเดียวกันที่อยู่ในสถานะเซลล์เดี่ยว ลักษณะรูปร่างของไบโอฟิล์มมีความแตกต่างกันตามชนิดของจุลินทรีย์ และสภาพแวดล้อมเป็นหลัก นอกจากนี้ไบโอฟิล์ม หมายถึงชั้นของจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตและเกาะอยู่บนพื้นผิวของแข็ง เช่น เหล็ก พลาสติก ยาง หรือเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ (Shineh, Mobaraki, Perves Bappy, & Mills, 2023) ไบโอฟิล์ม เป็นกลไกที่สำคัญในการกำจัดน้ำชะมูลช้างของระบบบำบัดแบบชีวภาพ ซึ่งเป็นมวลของจุลินทรีย์เจริญเติบโตบนผิวของตัวกลาง และทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของน้ำชะมูลช้างให้เป็นพลังงาน การเจริญเติบโตของไบโอฟิล์มบนผิวของตัวกลางเป็นผลจากกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีววิทยา ดังนี้

1. การขนส่ง (transportation) และการดูดซับ (adsorption) โมเลกุลของสารอินทรีย์ไปยังผิวของตัวกลาง
2. การขนส่ง (transportation) ของเซลล์จุลินทรีย์ไปยังผิวของตัวกลาง
3. การยึดเกาะ (attachment) ของจุลินทรีย์
4. การแปลงรูป (transformation) ของจุลินทรีย์เป็นไบโอฟิล์มที่บริเวณผิวของตัวกลาง
5. การหลุด (detachment) ของไบโอฟิล์มบางส่วนเนื่องมาจากแรงเฉือน (fluid shear stress) ของน้ำ

องค์ประกอบโครงสร้างของไบโอฟิล์ม เอกโซพอลิแซ็กคาไรด์ (exopolysaccharides) เป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้าง ซึ่งมีสัดส่วนได้สูงถึง 90% ที่ ประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายชนิดจากจุลินทรีย์ภายใน โดยส่วนมากเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ เอกโซพอลิแซ็กคาไรด์มีสมบัติทั้งไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และชอบน้ำ (hydrophilic) ทั้งนี้สมบัติการละลายน้ำขึ้นกับชนิดของสารประกอบ เช่น เอกโซพอลิแซ็กคาไรด์ ที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักประกอบด้วย 1,3- หรือ 1,4- $\beta$ -linked hexose residues มีความแข็งแรง ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำไม่ดี แต่หากเป็นชนิดอื่น

สามารถละลายน้ำได้ดีกว่า ทำให้มีสมบัติอุ้มน้ำได้ดี สารประกอบภายในโครงสร้างไบโอฟิล์มมีความซับซ้อน สามารถพบในโปรตีน และไขมัน

ลักษณะสมบัติของไบโอฟิล์มที่เกาะบนผิววัสดุต่าง ๆ ซึ่งมีผลมาจากองค์ประกอบ ดังนี้ ชนิดของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำ ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านผิวของวัสดุ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ลักษณะวัสดุรองรับที่ให้ไบโอฟิล์มเกาะ เป็นต้น

### การเกิดไบโอฟิล์มการสร้างไบโอฟิล์มของจุลินทรีย์

การเกิดไบโอฟิล์มมีขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างไบโอฟิล์ม เป็นการเคลื่อนที่ของเชื้อแบคทีเรียบนผิวมาจนเกาะติดบนพื้นผิว หลังได้รับสัญญาณจากสิ่งรอบตัว ซึ่งเป็นสารเคมีจากเชื้อจุลินทรีย์ส่งสัญญาณ (communication network) จนทำให้เกิดการรวมตัวกันของแบคทีเรียในลำดับนี้แบคทีเรียบางเซลล์อาจหลุด และกลับมาเกาะติดกัน หลังจากนั้นเริ่มมีการสร้างโคโลนีและเพิ่มจำนวน 4 รอบของการแบ่งตัว ซึ่งขั้นตอนนี้พบโคโลนีขนาดเล็กเกิดขึ้นใหม่ ซึ่งแสดงว่าแบคทีเรียมีการแยกตัวออกจากโครงสร้างไบโอฟิล์มเดิมเคลื่อนที่มาเกาะพื้นผิวใหม่ และเริ่มขั้นตอนการสร้างไบโอฟิล์มใหม่ต่อไป การตอบสนองต่อสัญญาณนับเป็นกลไกสำคัญอย่างหนึ่งที่จุลินทรีย์ใช้ควบคุมการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อม และมีผลต่อการแสดงออกของยีนหลายชนิด การก่อตัวของไบโอฟิล์มสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 แบคทีเรียเริ่มเกาะติดบนพื้นผิวแบบสามารถผันกลับได้ (reversible) เกิดปฏิสัมพันธ์ทางฟิสิกส์เคมี (physicochemical interaction) ระหว่างเชื้อแบคทีเรียกับพื้นผิว โดยแรงทางฟิสิกส์จะนำแบคทีเรียไปยังพื้นผิวด้วยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (brownian motion) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทางทำให้เกิดลักษณะการแพร่กระจาย หรือการเคลื่อนที่จากอิทธิพลของของเหลวที่เคลื่อนผ่าน ทำให้แบคทีเรียเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น และมีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของของเหลว หรือการเคลื่อนที่จากแรงต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แรงโน้มถ่วง แรงแวนเดอร์วาลส์ และประจุของพื้นผิววัสดุรองรับมีผลต่อการยึดเกาะ ส่วนปัจจัยทางเคมีที่เหนี่ยวนำจุลินทรีย์ไปยังพื้นผิว (chemo-attractants) เช่น กรดอะมิโน และน้ำตาล มีผลให้เกิดการเคลื่อนที่เร็วที่สุด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่มีผลต่อการยึดเกาะทางด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ความดัน สภาวะความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณออกซิเจน และอุณหภูมิ โดยแบคทีเรียสายพันธุ์ต่างกันจะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกาะติดของเซลล์ที่แตกต่างกัน การยึดเกาะกับพื้นผิวในระยะนี้อาจไม่เข้าสู่กระบวนการสร้างไบโอฟิล์ม โดยอาจหลุดออกจาก พื้นผิวกลับไปเป็นเซลล์อิสระ (planktonic cells)

ขั้นที่ 2 แบคทีเรียมีการยึดเกาะแบบจำเพาะมากขึ้นระหว่างโครงสร้างของแบคทีเรียกับพื้นผิวที่ยึดเกาะ โดยไม่สามารถผันกลับไปอยู่ในสภาวะเป็นเซลล์อิสระได้ ซึ่งมีการเคลื่อนที่ของ

ของเหลวในลักษณะแรงเฉือน แบบที่เรียกยังคงยึดเกาะติดกับพื้นผิวไม่ดี โดยอาศัยโครงสร้างภายนอก เช่น พิลไล (pili) แฟลกเจลลา (flagella) แคปซูล (capsule) ทำให้มีการยึดเกาะกับวัสดุรองรับขึ้น โดยแฟลกเจลลามีบทบาทสำคัญในการเข้ายึดเกาะกับพื้นผิวในช่วงเริ่มต้น เมื่อมีการเข้ายึดเกาะโดยจุลินทรีย์ ชนิดใดชนิดหนึ่งแล้วจะสามารถเหนี่ยวนำให้จุลินทรีย์ชนิดอื่นเข้าร่วมเกาะพื้นผิวในบริเวณเดียวกันได้ ในระยะเริ่มต้นของการยึดเกาะกับพื้นผิว เซลล์จะเรียงตัวเป็นชั้นเดียว (monolayer) จากนั้นจึงเริ่มมีการเรียงตัวเป็นชั้นถัดขึ้นมาด้วยการเคลื่อนที่แบบคืบคลานไปบนชั้นเซลล์เดิม (twitching motility) โดยอาศัยโครงสร้าง type IV pili ในระยะนี้เซลล์จับกันเป็นกลุ่มเรียกว่า microcolonies ซึ่งหากสายพันธุ์ใดมีความผิดปกติในการสังเคราะห์พิลไลจะไม่พบลักษณะ microcolonies

ขั้นที่ 3 เป็นระยะ แรกของการสร้างชั้นไบโอฟิล์ม โครงสร้างนี้ถูกปรับเปลี่ยนการตอบสนองต่อผลกระทบจากสภาพแวดล้อม ภายนอกไบโอฟิล์ม เพื่อการอยู่รอดของเซลล์ที่อยู่ภายในโครงสร้างซึ่งมีความหนาได้มากกว่า 10 ไมโครเมตร โดยโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ที่มีส่วนร่วม ในการยึดเกาะกับพื้นผิววัสดุรองรับ เช่น ไลโปพอลิแซ็กคาไรด์ (lipopolysaccharide) ที่เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก มีส่วนสำคัญในการเกาะติดกับพื้นผิวของเชื้อ *pseudomonas aeruginosa* สารอีกชนิดหนึ่งที่พบได้ในขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างไบโอฟิล์มของแบคทีเรีย คือ acyl homoserine lactone (acyl-HSLs) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การก่อตัวของไบโอฟิล์ม เมื่อมีการเพิ่มจำนวนเซลล์มากขึ้นจะพบสาร acyl-HSLs เพิ่มมากขึ้น ผลจากสารสื่อสัญญาณนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เยื่อหุ้มเซลล์ เมื่อกระบวนการยึดเกาะเริ่มมีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น จุลินทรีย์ภายในเริ่มปรับตัวได้ และแบ่งเซลล์เพิ่มจำนวน พร้อมกับสร้างสารพอลิเมอร์ที่เรียกว่า extracellular polymeric substances (EPS) ซึ่งประกอบด้วย พอลิแซ็กคาไรด์ กรดนิวคลีอิก และ โปรตีน ทำหน้าที่ ยึดเกาะ และป้องกันเซลล์ภายในโครงสร้าง เมื่อถึงขั้นตอนนี้จะพบเซลล์รวมกลุ่มเรียงชั้นซ้อนกันขึ้นมา อย่างไรก็ตามภายใต้โครงสร้างไบโอฟิล์มเดียวกันนี้สามารถพบจุลินทรีย์ต่างชนิดอยู่รวมกันได้ โดยมีสมบัติของสายพันธุ์เดิม จากการเปรียบเทียบความแตกต่าง และความซับซ้อนในองค์ประกอบของ EPS หรือจุลินทรีย์ชนิดเดียวกันเมื่ออยู่ในสถานะสิ่งแวดล้อม และแหล่งอาหารที่ต่างกัน พบมีองค์ประกอบของ EPS ที่ต่างกัน ได้ ซึ่งกระบวนการสร้างไบโอฟิล์มของแบคทีเรียมีความแตกต่างอย่างหลากหลาย (Dwivedi & Sehgal, 2022)

ขั้นที่ 4 ระยะนี้ตรวจพบการเพิ่มจำนวนเซลล์ภายในโครงสร้างไบโอฟิล์ม เกิดการขยายขนาดใหญ่ขึ้นจนเป็น microcolony หรือ โครงสร้างไบโอฟิล์มที่สมบูรณ์ (mature biofilm) เซลล์ที่อยู่ภายในโครงสร้างถูกจำกัดด้วยอาหารพื้นที่ และของเสียที่เซลล์ขับออกมา ถึงแม้มีการปรับตัวให้อยู่

ในสภาวะจำศีล โดยการแสดงออกของโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการเจริญและการแบ่งตัว มีความแตกต่าง จากเซลล์ที่ล่องลอยอย่างอิสระอยู่นอกโครงสร้าง

ขั้นที่ 5 เป็นระยะสุดท้าย เริ่มมีสัญญาณที่บ่งบอกถึงความหนาแน่นของเซลล์ในโครงสร้างนี้ มีการจับเอนไซม์ช่วยย่อยสลายโครงสร้าง นำไปสู่การกระจายตัวออกจากโครงสร้างไบโอฟิล์ม เรียกกระบวนการนี้ว่าการปลดปล่อยเซลล์ (releasing) ภายในให้ล่องลอย และเกิดการเกาะติดบนพื้นผิวใหม่ ซึ่งเซลล์ที่หลุดออกจากโครงสร้างไบโอฟิล์มมีรูปแบบโปรตีนใกล้เคียงกับเซลล์ที่ล่องลอยเป็นอิสระ เป็นเซลล์ที่กระจายตัวออกจากไบโอฟิล์ม แล้วสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมเดิม เช่นเดียวกับเซลล์ที่เป็นอิสระที่พร้อมจะเริ่มกระบวนการเกาะติดพื้นผิวและสร้างไบโอฟิล์มกลุ่มใหม่ต่อไป ทำให้เกิดการแพร่กระจายไบโอฟิล์ม ปัจจัยที่เร่งให้เกิดการแตกตัวมีทั้งขนาดของโครงสร้าง และแรงเฉือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่อย่างรุนแรงของเหลวที่เคลื่อนผ่านโครงสร้าง

#### การเกาะและการหลุดของไบโอฟิล์ม

จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียสามารถยึดเกาะได้กับพื้นผิววัสดุรองรับที่มีลักษณะหยาบ การยึดเกาะติดกับบนผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียจะสร้างเส้นใยขนาดเล็กกรอบตัวเซลล์ โดยเส้นใยจะมีการจับกันแน่นกับเส้นใยของเซลล์อื่น ทำให้แบคทีเรียสามารถเกาะติดหนาเป็นฟิล์มบนผิววัสดุรองรับได้ เส้นใยเหล่านี้ เรียกว่า ไกลโคแคลิกซ์ (glycocalyx) ซึ่งเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ดังนั้น ปริมาตรรวมของเซลล์เหล่านี้จึงน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรทั้งหมดของไบโอฟิล์ม เส้นใยนี้เป็นที่เก็บน้ำย่อยที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เล็กลง และสามารถละลายน้ำได้ก่อนที่จะถูกซึมผ่านผนังเซลล์ของแบคทีเรีย (Y. Li et al., 2021; Tektas, Thurnheer, Eliades, Attin, & Karygianni, 2020)

การหลุดของไบโอฟิล์มจะเป็นขบวนการเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยขึ้นอยู่กับภาวะไฮโดรไดนามิกซ์ (hydrodynamic condition) ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านแรงเฉือน (shear force) จะมีส่วนช่วยให้เกิดการหลุดของไบโอฟิล์มสำหรับการลอก (sloughing) ของไบโอฟิล์มนั้น เกิดจากสภาพขาดแคลนสารอาหารหรือปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ บริเวณชั้นผิวด้านในของฟิล์ม การลอกออกเนื่องจากฟิล์มมีความหนาจนทำให้เกิดสภาพขาดแคลนอาหาร หรือขาดแคลนออกซิเจนนี้มักเกิดในสภาวะที่มีแรงเฉือนต่ำ นอกจากนี้ถ้าไบโอฟิล์มมีความหนามากในที่สุดจะถูกถ่วงดึงให้หลุดโดยน้ำหนักของไบโอฟิล์มเอง

### องค์ประกอบทางเคมีของไบโอฟิล์ม

ไบโอฟิล์มประกอบด้วยน้ำสูงถึง 87-96% โดยน้ำหนัก และมีของแข็งระเหย (volatile solids) ต่ำเพียง 1.9-3.2% เท่านั้น นอกจากนี้ไบโอฟิล์มยังประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และเหล็ก (Fe) เป็นต้น ซึ่งปริมาณสารอินทรีย์เหล่านี้ในไบโอฟิล์มขึ้นกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (Abd El-Raheem, Korri-Youssoufi, & Hassan, 2022; Schneider, 2014)

### กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์

ไบโอฟิล์มประกอบด้วยน้ำสูงถึง 70-97% และเซลล์จุลินทรีย์ในไบโอฟิล์มยังประกอบด้วยน้ำสูงถึง 90% ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของไบโอฟิล์ม จึงใกล้เคียงกับค่าของน้ำ ความหนาแน่นของจุลินทรีย์นี้ สามารถวัดเป็นจำนวนหรือน้ำหนักแห้งแต่ในทางวิศวกรรมศาสตร์มักนิยมวัดเป็นน้ำหนักแห้ง ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในไบโอฟิล์มนี้ขึ้นกับสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่าน ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ อุณหภูมิ และชั้นความหนาของฟิล์ม ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในไบโอฟิล์มจะสูงขึ้น เมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในไบโอฟิล์มจะสูงขึ้น เมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในไบโอฟิล์มยังขึ้นกับถึงปฏิกิริยาในระบบที่ใช้ (Moteeb, 2008; Quan et al., 2022)

กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ไหลผ่านระบบกำจัดแบบ fixed-film นั้นเป็นกระบวนการถ่ายเทมวล และปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดพร้อมกัน ซึ่งขั้นตอนกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ โดยไบโอฟิล์มมีดังนี้

1. สารอินทรีย์และออกซิเจนจะถ่ายเทจากชั้นของเหลวไปยังส่วนที่อยู่ร่วมกัน (interface) ระหว่างชั้นของเหลว และไบโอฟิล์ม
2. สารอินทรีย์และออกซิเจนจะถ่ายเทผ่านบริเวณดังกล่าวไปยังชั้นของไบโอฟิล์ม
3. มีการใช้สารอินทรีย์ และออกซิเจนโดยพวกจุลินทรีย์ในชั้นของไบโอฟิล์ม
4. มีการถ่ายเทผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำจากชั้นไบโอฟิล์ม
5. ผลิตภัณฑ์ได้นี้จะถูกถ่ายเทต่อไปยังชั้นของเหลว

อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์อาจขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจน หรือสารอินทรีย์ กล่าวคือ ชั้นนอกจะเป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยแบคทีเรียจำพวกใช้ออกซิเจน ส่วนในชั้นในถัดไปจะเป็นชั้นที่ไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน ปฏิกิริยาการย่อยสลายสาร โดยใช้ออกซิเจนจะเกิดขึ้นเร็วกว่าแบบที่ไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์จึงขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดในชั้นที่มี

ออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ความหนาของชั้นนี้เรียกว่า ความหนาประสิทธิผล (effective depth) ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นออกซิเจนละลายน้ำ ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ และอัตราการใช้สารอินทรีย์ (substrate uptake rate)

### ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างไบโอฟิล์ม

การสร้างไบโอฟิล์มจะมีการประสานงานระหว่างเซลล์ซึ่ง อาจเป็นเชื้อชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดโดยการสื่อสารที่เรียกว่า quorum sensing (QS) ที่เข้ามามีบทบาทตั้งแต่เริ่มต้นเกาะติดจนถึงขั้นตอนสุดท้ายที่มีการแตกตัวของเซลล์ในไบโอฟิล์ม

1. สภาพพื้นผิว สภาพพื้นผิวในการเกาะติดของ เชื้อเป็นอีกปัจจัยที่น่าสนใจ มีหลายรายงานกล่าวตรงกัน ว่าเชื้อจะเกาะติดกับวัสดุที่มีสมบัติแบบ hydrophobic หรือกลุ่มชนิดไม่มีขั้ว (nonpolar) เช่น เทฟลอน หรือพลาสติกอื่น ๆ ได้ดีกว่าแบบ hydrophilic หรือกลุ่มมีขั้ว เช่น แก้ว หรือโลหะบางชนิดผลการเกาะติดจะดียิ่งขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีของเหลว หรือมีความชื้นสัมพัทธ์สูงผิวของวัสดุรองรับที่ขรุขระสามารถลดแรงที่กระทบต่อโครงสร้างได้

2. สภาพแวดล้อมภายนอก ความเป็นกรดด่าง สารอาหาร ความแรงของไอออน อุณหภูมิ เมื่อเกิด การเปลี่ยนแปลงปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งจะทำให้เชื้อภายใน โครงสร้างเกิดการปรับตัวตาม เช่น เมื่อเพิ่ม ความเข้มข้นของไอออน และสารอาหารมากขึ้น พบปริมาณเชื้อที่เกาะติดพื้นผิวได้เพิ่มขึ้น

3. โครงสร้างภายนอกของเซลล์ โครงสร้างภายนอกของเซลล์มีส่วนช่วยในการเคลื่อนที่ โดยแฟลกเจลลาทำหน้าที่ช่วยให้เชื้อเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวที่เหมาะสมได้ แม้จะมีแรงต้านจากสภาพแวดล้อม ส่วนพิไลทำหน้าที่ช่วยเกาะติดเนื่องจาก พิไลมีองค์ประกอบตรงส่วนปลายเป็นกรดอะมิโน ชนิดไม่มีขั้ว จึงทำให้ส่วนประกอบนี้แสดงสมบัติ hydrophobic แตกต่างจากโครงสร้างอื่นของผนังเซลล์แบคทีเรียที่เป็นประจุลบจากสมบัตินี้ทำให้พิไลสามารถยึดเกาะติดกับพื้นผิวต่าง ๆ ได้ดี นอกจากนี้ โครงสร้างภายนอก เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ หรือ เอกโซพอลิแซ็กคาไรด์ มีความจำเพาะกับการเกาะติดบนพื้นผิวที่เป็นแบบ hydrophilic ได้ดี เนื่องจากโครงสร้างทั้งสองชนิดนี้มีประจุรวมเป็นลบ

## การวิเคราะห์และการตรวจวัดคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

### เทคนิควิเคราะห์ถ่านชีวภาพ

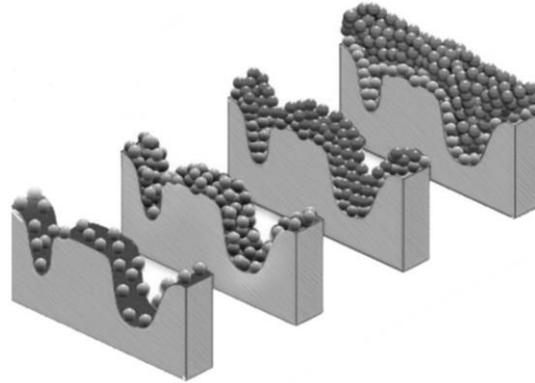
ทดสอบสมบัติของถ่านชีวภาพจากมวลข้างด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

1. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง surface area and porosity analyzer (BET) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวของสารที่ต้องการวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว ทฤษฎีของ BET มีหลักการวิเคราะห์การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) และการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) รวมถึงปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (total pore volume) โดยได้ศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ ดังแสดงภาพที่ 2.16 แก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็น โมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่เหลือแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็น โมเลกุลหลายชั้นดังแสดงในภาพที่ 2.16 ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ ( $W$ ) กับความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้นเป็นสมการของ BET ได้ดังนี้

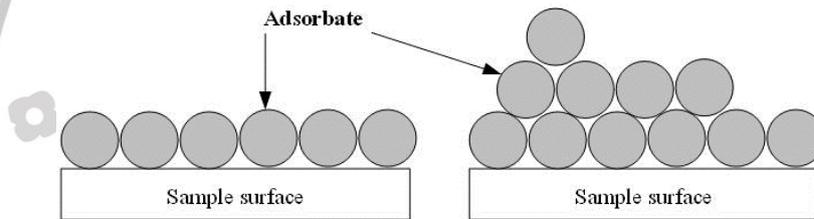
สมการ

$$\frac{1}{W \left[ \left( \frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1}{W_m C} \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ $W$	คือ	ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ $P/P_0$
$W_m$	คือ	ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็น โมเลกุลชั้นเดียว
$P$	คือ	ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะที่ทำการทดลอง (หน่วยเป็น มิลลิเมตรปรอท)
$P_0$	คือ	ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (หน่วยเป็น มิลลิเมตรปรอท)
$C$	คือ	ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ



ภาพที่ 2.16 การดูดซับแก๊สใน โตรเจนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ  
ที่มา : อรวรรณ ศิริโชติ, 2549



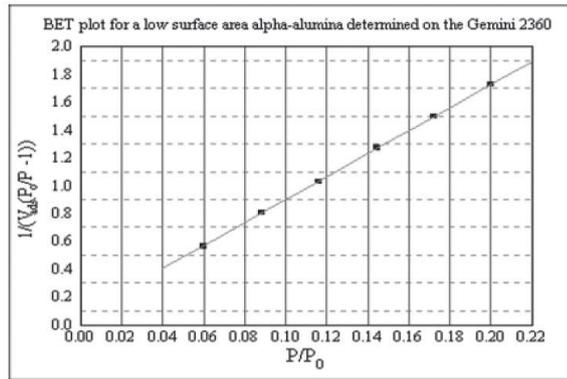
ภาพที่ 2.17 การดูดซับโมเลกุลของแก๊สใน โตรเจนของวัสดุเป็นชั้น ๆ  
ที่มา : อรวรรณ ศิริโชติ, 2549

จากความสัมพันธ์สมการ BET เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $1/W [(P_0/P) - 1]$  กับ  $P/P_0$  จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 2.18 มีความชัน (slope, s) สามารถคำนวณสมการที่ 2.9 และจุดตัดแกน y (y-intercept, i) ดังสมการที่ 2.10

สมการ

$$S = \frac{C-1}{W_m C} \tag{2.9}$$

$$i = \frac{1}{W_m C} \tag{2.10}$$



ภาพที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์

ที่มา : อรวรรณ ศิริโชติ, 2549

ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็น โมเลกุลชั้นเดียว ( $W_m$ ) คำนวณโดยนำ  $s$  และ  $i$  แทนค่าในสมการที่ 2.11 และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุคำนวณโดยนำ  $W_m$  แทนค่าในสมการที่ 2.12

สมการ

$$W_m = \frac{1}{S+i} \quad (2.11)$$

$$S_i = \frac{W_m NA_{cs}}{M} \quad (2.12)$$

- |             |     |                                                                                                     |
|-------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ $S_i$ | คือ | พื้นที่ผิวของวัสดุ (หน่วยเป็นตารางเมตร)                                                             |
| $N$         | คือ | เลขอาโวกราโดร ( $6.023 \times 10^{23}$ ) (หน่วยเป็นโมเลกุลต่อโมล)                                   |
| $M$         | คือ | น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (28 กรัมต่อโมล)                                                       |
| $A_{cs}$    | คือ | พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ( $16.2 \times 10^{-23}$ ) (หน่วยเป็นตารางเมตร) |

ค่า  $S_t$  ที่ได้เมื่อหารด้วยปริมาณของตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทดสอบ ( $w$ ) จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ หน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัม

สมการ

$$S = \frac{S_t}{W} \quad (2.13)$$

ปริมาตรรูพรุนรวม ( $V_p$ ) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ( $\bar{r}_p$ ) ของวัสดุคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

สมการ

$$V_p = \frac{W_i}{P} \quad (2.14)$$

$$\bar{r}_p = \frac{2V_p}{S_t} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $W_s$  คือ ปริมาณของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ )  $\approx 1$

$P$  คือ ความหนาแน่นของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ )  $\approx 1$

$S_t$  คือ พื้นที่ผิวของวัสดุที่ทดสอบได้

หลักการทำงาน

การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุน ใช้เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่าง (sample cell) จำนวน 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ พื้นที่ผิวจำเพาะ ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่วัสดุตัวอย่างแต่หน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง ก่อนการทดสอบต้องให้ความร้อนต่อเซลล์ต้องให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างเพื่อไล่ความชื้น และโมเลกุลของสารถูกดูดซับชนิดอื่นให้ออกจากผิวหน้าของวัสดุตัวอย่างจากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสองเป็นสุญญากาศ

เพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่นก่อนจุ่มเซลล์ทั้ง 2 ลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อให้เซลล์ทั้งสองอยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำ จากนั้นผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้ามาในเซลล์ทั้ง 2 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างจะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุทำให้ความดันภายในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างลดลงจนกระทั่งคงที่ (P) ในขณะที่เซลล์ที่ไม่มีวัสดุตัวอย่างความดันของแก๊สไนโตรเจนจะคงที่ ( $P_0$ ) ข้อมูลที่เครื่องบันทึกผลคือ ค่าความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (W) โดยวัสดุตัวอย่างจากนั้นเครื่องจะปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาอีก เช่นเดียวกับครั้งแรก และแก๊สไนโตรเจนถูกดูดซับจนความดันคงที่อีกเป็นเช่นนี้ จนกระทั่งความดันภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างไม่ลดลง ( $P/P_0 \approx 1$ ) แสดงว่าไม่เกิดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนอีกแล้วจากข้อมูลค่าความดันสัมพัทธ์ และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ได้เครื่องทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผลออกมาเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุน (อรรรรณ ศิริโชค, 2549)



ภาพที่ 2.19 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง

## 2. เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน field emission scanning electron microscope (FE-SEM)

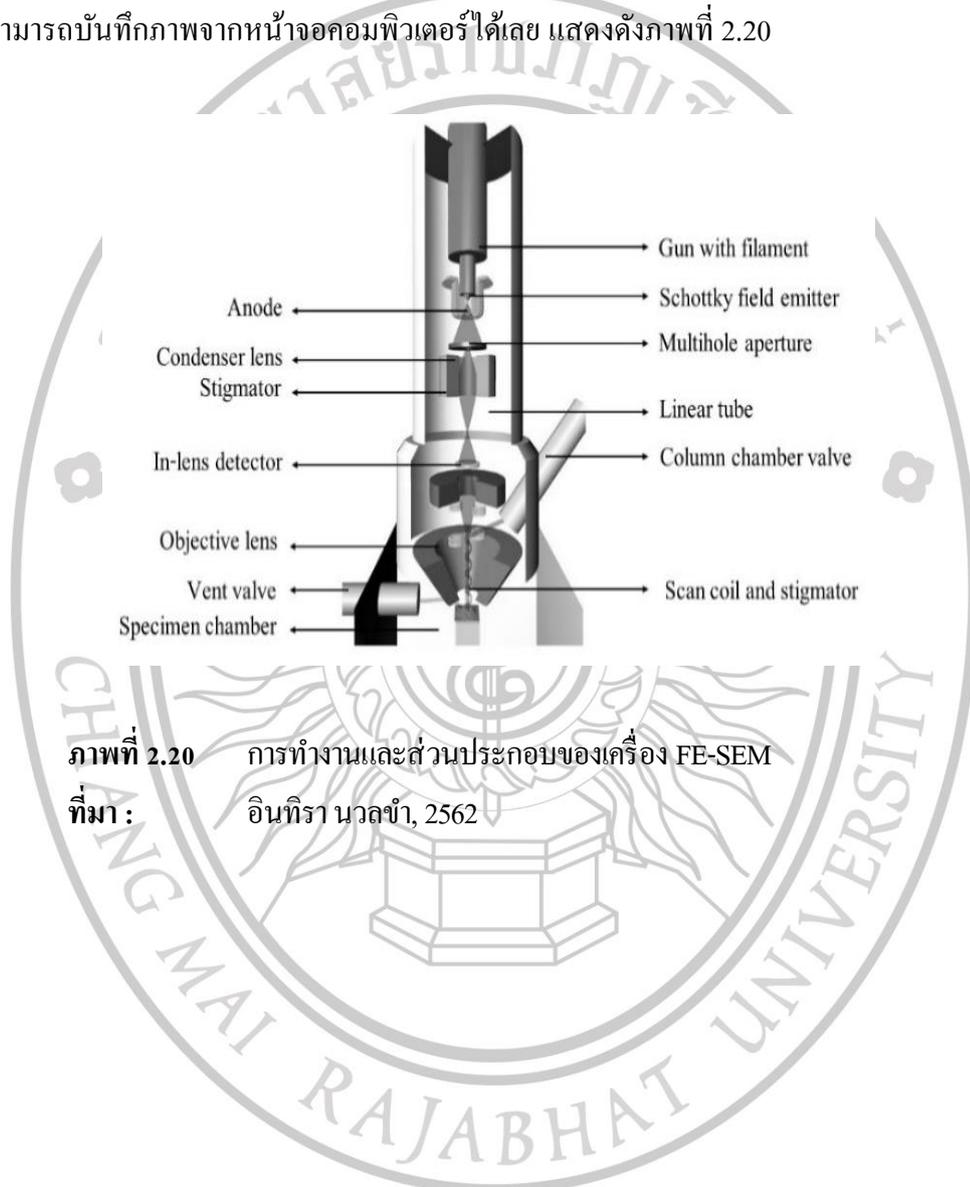
เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของตัวอย่าง โดย FE-SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ FE-SEM ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (energy dispersive x-ray spectrometer ; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษาชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษา อีกทั้ง FE-SEM สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัดอื่น ๆ เพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึก โดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (electron backscatter diffraction; EBSD) ซึ่งกล้อง FE-SEM สามารถใช้ศึกษาโครงสร้าง และวิเคราะห์พื้นผิวตัวอย่างได้จนถึงระดับนาโน ประกอบด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (energy dispersive x-ray spectrometer : EDS) ใช้สำหรับศึกษาวิเคราะห์การกระจายตัว และองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งแบบเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ทั้งนี้ยังติดตั้งอุปกรณ์สแกนภาพแบบส่องผ่าน (scanning transmission electron microscopy : STEM) ใช้สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เตรียมให้บาง เพื่อให้เห็นโครงสร้างที่ส่องผ่านซึ่งแสดงผลได้ใกล้เคียงกับการถ่ายภาพด้วยกล้อง TEM โดย field emission scanning electron ระบบอิเล็กตรอนออกพิกชนิด Schottky field emission gun มี resolution สูงถึง 0.8 nm ที่ 30 kV เหมาะสำหรับงานทางวิทยาศาสตร์กายภาพ ศักย์เร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.05-30 kV นอกจากนี้ให้กำลังขยายของภาพตั้งแต่ 2-2,000,000 เท่า ง่ายต่อการใช้งานเพราะควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบสุญญากาศในระบบลำอิเล็กตรอนใช้ sputter-ion pump ส่วนห้องชิ้นงาน (sample chamber) ใช้ diffusion pump มีตัวตรวจวัดหลักสำหรับการวิเคราะห์

นอกจากนี้ FE-SEM สามารถประยุกต์โดยเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้เขียนลวดลาย ขนาดเล็กลงบนชิ้นงาน (electron beam lithography) จะเห็นได้ว่า FE-SEM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อ การศึกษาวิจัย ด้วยกำลังขยายที่สูง และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และครอบคลุมการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาค

### หลักการทํางาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิชชัน ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มของอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำ

อิเล็กตรอนเล็กหรือใหญ่ได้ตามความต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะมีการปรับให้ลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะปรับระยะโฟกัส โดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอคอมพิวเตอร์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้เลย แสดงดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 การทำงานและส่วนประกอบของเครื่อง FE-SEM  
ที่มา : อินทิรา นวลขำ, 2562



ภาพที่ 2.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อิมิชชัน

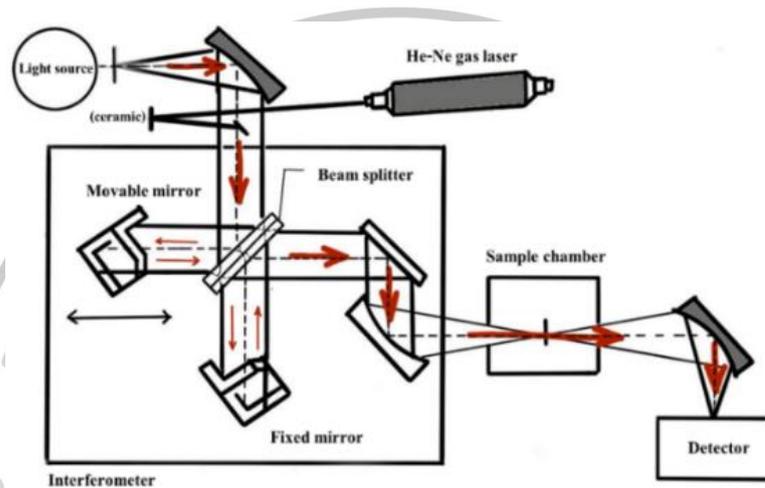
### 3. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี โครสโคปี fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

เครื่อง FT-IR เป็นเทคนิคที่ใช้การศึกษาทรานส์มิชชันของการสั่นหรือการหมุนของหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลของสารนั้น เป็นเครื่องมือการวิเคราะห์ขั้นสูง ที่มีกรพัฒนามาจากเครื่อง IR spectrometer เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น และมีความสามารถในการแยกสูง และความไวสูง และแม่นยำ นิยมใช้วิเคราะห์ทดสอบสารอินทรีย์ และใช้ได้กับสารที่มีความบริสุทธิ์สูงทั้งที่อยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสง เมื่อแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ผ่านสู่สารอินทรีย์ พันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานที่ค่ายาวคลื่นหนึ่ง ข้อมูลนี้จะถูกประมวลผล โดยคอมพิวเตอร์ โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เรียกว่าฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม ซึ่งจะคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัม เนื่องจากสารแต่ละชนิดให้สเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถนำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่มีอยู่ในฐานข้อมูลเพื่อนำมาใช้พิสูจน์และบ่งชี้ชนิดของตัวอย่างได้

#### หลักการทํางาน

หลักการทำงานของเครื่อง FT-IR คือ เมื่อมีการให้ความร้อนช่วงอุณหภูมิ 1,000 – 8,000 °C กับแหล่งกำเนิดรังสีแล้วรังสีอินฟราเรดที่ถูกปล่อยออกมาจะผ่านไปยังเซลล์ตัวอย่าง ทำให้ดูดกลืนรังสีตรงกับความถี่การสั่นหลักมูลของพันธะ ซึ่งความเข้มของสัญญาณจะวิเคราะห์ด้วยเครื่อง

ตรวจหาได้ลักษณะเป็นคลื่นหลังจากประมวลผล โดยการแปลงฟูเรียร์ (fourier transformation) จะเปลี่ยนเป็นเส้นสเปกตรัมของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและความถี่ สำหรับอุปกรณ์ beam splitter ประกอบด้วยฟิล์มของโลหะ เช่น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Ge บางที่เคลือบอยู่บนผิวของวัสดุรองรับ เช่น Quartz, KBr และ CsI เป็นต้น



ภาพที่ 2.22 แผนผังการทำงานของเครื่อง FT-IR  
ที่มา : สุชีรา ธรรมจง, 2562

### เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการผลิตแก๊สชีวภาพในระบบอุตสาหกรรมมีหลายรูปแบบขึ้นกับชนิดและสถานะของของเสียอินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะของเหลวที่ถูกผลิตออกมาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นหากต้องการกำจัดของเสียอินทรีย์ และผลิตแก๊สชีวภาพในกระบวนการเดียวกันจึงเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่ง และยังเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ ระบบหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ และผลิตแก๊สชีวภาพได้ในกระบวนการเดียวกัน คือ ระบบการหมักแบบต่อเนื่อง และสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้อย่างต่อเนื่อง แต่ยังมีปัญหา คือ แก๊สที่เกิดขึ้นได้คั้นมาจากการเกิดก้อนแบคทีเรียซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ประกอบไปด้วย anaerobic bacteria และ archaea ซึ่งเกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ผลิตแก๊สมีเทน เป็นจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในก้อนแบคทีเรีย ตัวกลางที่ให้จุลินทรีย์ยึดเกาะเป็นแบบไร้ออกซิเจน จึงเป็นแนวทางที่คืออย่างหนึ่งที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับระบบหมักแบบต่อเนื่องได้ โดยการตรึงแบคทีเรียมีการใช้กันในระบบอุตสาหกรรม ซึ่งช่วยในเรื่องการเพิ่มปริมาณของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตเอทานอล และการผลิตกรดอะซิติก โดยมีข้อดีในการตรึงเอนไซม์สามารถทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณที่สูงขึ้น

การเพิ่มปริมาณแก๊สมีเทนได้มีงานวิจัยหลายงานวิจัยพบว่า การตรึงแบคทีเรียสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนได้ ซึ่งการประยุกต์ใช้การตรึงเซลล์กับระบบหมักแบบต่อเนื่อง ซึ่งคาดว่าหากงานวิจัยนี้จะเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนต่อไป เพื่อลดปัญหาการปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อมและการขาดแคลนพลังงานในอนาคต โดยต่อไปนี้จะเป็นการกล่าวถึงบททวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับถึงปฏิกรณ์ชีวภาพหมักแบบต่อเนื่อง และวัสดุรองรับไบโอฟิล์ม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### **ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบต่อเนื่อง และระบบแบทช์**

ถึงปฏิกรณ์ไบโอฟิล์มหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นที่น่าสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากมีความสามารถในการรับอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สูง (Bakraoui et al., 2020; L. Zhang, Ban, Li, & Wan, 2019) เมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนทั่วไป เครื่องปฏิกรณ์ไบโอฟิล์มสามารถลดเวลาเริ่มต้นได้อย่างมีนัยสำคัญ และเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ถึง 5 เท่า (Vasconcelos et al., 2019) ไบโอฟิล์มเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่ยึดติดกับวัสดุรองรับ และมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ และการผลิตมีเทนอย่างมีประสิทธิภาพ (Debik & Coskun, 2009; Diamantis & Aivasidis, 2018; Tao Wang et al., 2018)

ถึงปฏิกรณ์ไบโอฟิล์มประเภทต่าง ๆ ที่มีความนิยมใช้ในปัจจุบัน ซึ่งทางอุตสาหกรรมอาหารได้นำมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีการบำบัดน้ำทิ้งที่มีความความเข้มข้นที่สูง (Hendrickx, Pessotto, Prins, Habets, & Vogelaar, 2019; Parker, 2005) ซึ่งระบบที่ใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพในปัจจุบันมีหลายระบบ เช่น บ่อหมัก (anaerobic pond) ถึงหมัก (high rate anaerobic contact) ถึงกรองไร้ออกซิเจน (anaerobic filter) หรือ (anaerobic fixed film) และระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นตะกอนแบคทีเรียไร้อากาศแบบไหลขึ้น (up-flow anaerobic sludge blanket, UASB) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่าระบบ UASB มีข้อดีที่กว่าระบบอื่น โดยระบบหมักแบบต่อเนื่อง เป็นระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียที่ใช้หลักการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ด้านล่างของถึงปฏิกรณ์การหมักแบบต่อเนื่อง เพื่อลดการอุดตันในระบบ ซึ่งน้ำเสียจะไหลผ่านชั้นตะกอนจุลินทรีย์ โดยไม่มีตัวกลางให้จุลินทรีย์เกาะ จากนั้นน้ำเสียถูกย่อยสลายด้วยแบคทีเรียภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแก๊สชีวภาพ ระบบการหมักแบบต่อเนื่องเป็นระบบที่ได้รับความสนใจเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีชีวภาพแบบหมักไม่ใช้ออกซิเจน นอกจากนี้ยังได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูง และมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ สามารถรับภาระสารอินทรีย์ที่สูงกว่าระบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบอื่นๆ

ดังนั้นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ คือการประยุกต์การตรึงจุลินทรีย์ด้วยวัสดุรองรับ ร่วมกับระบบการหมักแบบต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ

1. คุณลักษณะของวัสดุตั้งต้นและการทำงานในการเดินระบบการหมักแบบต่อเนื่อง  
คุณลักษณะของวัสดุตั้งต้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง โดยความเข้มข้นของไนโตรเจนที่สูง และปริมาณน้ำเสียที่ไหลเข้าสามารถนำไปสู่การสะสมแอมโมเนียมากเกินไป ซึ่งเป็นพิษหรือเป็นสารยับยั้งต่อระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และส่งผลต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสที่ช้าลง มีผลต่ออัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ (Geißler, Schwan, & Dornack, 2019) งานวิจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าผลของระบบการหมักแบบต่อเนื่อง ที่มีวัสดุตั้งต้นที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2.6



ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่ทำการศึกษามลของระบบหมักแบบต่อเนื่องที่มีวัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกัน

วัสดุตั้งต้น	กำจัดซีโอดี (%)COD <sub>re</sub>	HRT (hr)	OLR (gCOD/L·d <sup>1</sup> )	ผลผลิต	อ้างอิง
Glutamate-rich wastewater	95.5-96.5	4.5-6	8.26-10.82	0.31 <sup>1</sup>	(H. Chen, Wei, Xie, et al., 2020)
Monosodium glutamate	97	24	8	2.3 <sup>2</sup>	(H. Chen, Wei, Liang, et al., 2020)
Sugarcane bagasse hydrolysate	86	18.4	2.4	0.27 <sup>1</sup>	(Ribeiro, Passos, Gurgel, Baêta, & De Aquino, 2017)
Pistachio wastewater	89.8	5.40 d	4.56	0.33 <sup>1</sup>	(Gür & Demirer, 2019)
Perchlorate	84.7	2.2	9.96	-	(Han et al., 2018)
Synthetic slaughterhouse wastewater	70	10	3.94-8.15	0.35 <sup>2</sup>	(Vidal, Carvajal, Huilimir, & Salazar, 2019)
Chocolate wastewater	39-94	6	2-6	0.3-1.9 <sup>4</sup>	(Esparza-Soto, Jacobo-López, Lucero-Chávez, & Fall, 2019)
Pig slurry	-	1.5 d	14.3-16.4	0.25 <sup>1</sup>	(Rico, Montes, & Rico, 2017)
Leachate from waste incineration	97.5-99.5	1.3-3 d	1.86-7.43	-	(J. Li et al., 2020)

<sup>1</sup>LCH<sub>4</sub>/gCOD, <sup>2</sup>LCH<sub>4</sub>/L·d, <sup>3</sup>LCH<sub>4</sub>/gCODd, <sup>4</sup>Lbiogas/L·d, ระยะเวลาที่เก็บน้ำหมัก (Hydraulic retention time, HRT)

ประสิทธิภาพของกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องขึ้นกับวัสดุตั้งต้นที่มีผลต่อการเกิดแก๊สชีวภาพของระบบการหมักแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่สำคัญในการป้อนเข้าระบบถึงปฏิกรณ์หมักแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วย อุณหภูมิ (psychrophilic, mesophilic or thermophilic), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ระยะเวลาในการกักเก็บ (HRT), อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (OLR), ความเร็วในการป้อนเข้าสู่ระบบ โดยค่าพีเอชต้องเป็นกลาง (pH= 6.8-7.2) เพื่อให้ได้ตะกอนเม็ดที่ดีในการป้อนวัสดุตั้งต้น (Abbasi & Abbasi, 2012) ความเร็วในการป้อนเข้าสู่ระบบแบบการไหลขึ้นช่วยสร้างสมดุลในการผสมระหว่างช่วงชั้นตะกอนแบคทีเรียและน้ำเสีย รวมทั้งสามารถควบคุม HRT ตามที่ต้องการ โดยช่วงความเร็วการไหลในถังปฏิกรณ์ระบบการหมักแบบต่อเนื่อง คือ 0.5–1.5 m/hr (Latif, Ghufraan, Wahid, & Ahmad, 2011) โดยทั่วไประบบหมักแบบต่อเนื่อง จะใช้ความเร็วการไหลที่สูงขึ้นในขั้นตอนการเริ่มต้นถึงปฏิกรณ์ เพื่อเลือกชีวมวล กำจัดเม็ด (granular) ขนาดเล็กจากระบบ โดยการเริ่มการทำงานของถังปฏิกรณ์หมักแบบต่อเนื่อง มีความจำเป็นในการควบคุมการเติม OLR เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ โดยทั่วไปต้องใช้ OLR เริ่มต้นที่ต่ำในช่วงเริ่มต้นการเดินระบบ และทำการเพิ่มขึ้นตามที่กำหนดไว้ เพื่อให้สามารถปรับตัวต่อวัสดุตั้งต้นได้ โดยแบคทีเรียช่วงเมทาโนเจนที่เพิ่มขึ้นและการลดลงอย่างต่อเนื่อง มีผลมาจากการเพิ่ม OLR อย่างเป็นขั้นตอนในการบำบัดของระบบหมักแบบต่อเนื่อง ให้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของผลผลิตแก๊สมีเทนตามสัดส่วน (Vasconcelos et al., 2019) รวมถึงการใช้อุณหภูมิในช่วง mesophilic เพื่อให้เกิดการย่อยสลายในระบบที่มีความเสถียรต่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Tassew, Bergland, Dinamarca, & Bakke, 2020)

2. ระบบหมักแบบต่อเนื่อง และระบบแบทช์โดยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในระบบหมักแบบต่อเนื่องและระบบแบทช์ โดยมีชนิดวัสดุตั้งต้นชนิดเดียวสามารถควบคุมค่าความเป็นความเป็นด่าง หรือความเข้มข้นของแอมโมเนียมากเกินไปในป้อนอาหารเข้าสู่ระบบได้ (Mainardis, Flaibani, Mazzolini, Peressotti, & Goi, 2019) การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนร่วมวัสดุตั้งต้นหลายชนิด หรือกระบวนการย่อยร่วมโดยมีประโยชน์สำหรับความเสถียรของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น และการสร้างแก๊สชีวภาพที่เพิ่มขึ้น และช่วยปรับสมดุลความเข้มข้นของสารอาหารในระบบ (Siddique & Wahid, 2018) การศึกษาการเพิ่มธาตุอาหารรองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยร่วม ผลสรุปการย่อยร่วมของการหมักแบบต่อเนื่องและการหมักแบบแบทช์ จะเห็นได้ว่าของเสียจากอาหารและน้ำเสียจากฟาร์ม (Chan, Lu, de Toledo, Gu, & Shim, 2019; Gao, Zhang, & Liu, 2020; Loizia, Neofytou, & Zorpas, 2019) ซึ่งมีคุณสมบัติของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) และสารอาหาร ซึ่งการย่อยสลายร่วมสามารถสร้างผลผลิตพลังงานที่เพิ่มขึ้น โดยมีการประยุกต์ HRT ในการศึกษาการย่อยร่วมจะใช้

ระยะเวลาการหมักนานกว่าที่ใช้วัสดุตั้งต้นชนิดเดียว นอกจากนี้ยังมีการทดลองในช่วง mesophilic โดยใส่สารอาหาร (ในรูปของ Fe, Co, Ni, Se, Mo) พบว่ามีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเมทาเจน โดยกระตุ้นการผลิตแก๊สมีเทนในระบบ ซึ่งการเติมการเติมโลหะ และธาตุธรรมชาติมีผลดีต่อการกำจัดซีโอดีและการผลิตแก๊สชีวภาพในการย่อยร่วมการหมักแบบต่อเนื่องและแบทช์ โดยวัสดุตั้งต้นที่มีภาระสูง (Chan et al., 2019; Loizia et al., 2019) วัสดุตั้งต้นร่วมที่มีคาร์บอนที่มากสามารถให้ประโยชน์ต่อระบบเมื่อทำงานกับน้ำเสียที่มีปริมาณซัลเฟต เนื่องจากการทำงานระหว่างแบคทีเรียลดซัลเฟต sulfate-reducing bacteria (SRB) และชีวมวลเมทาโนเจน ซึ่งลดการเติมคาร์บอนในระบบ ในขณะที่สารอาหารและความเป็นด่างสามารถเตรียมได้จากของเสียจากสัตว์เมื่อหมักร่วมกับวัสดุตั้งต้นที่มีการย่อยสลายสูงและเป็นกรด (Montes, Leivas, Martínez-Prieto, & Rico, 2019) แก้ปัญหาแบบบูรณาการสำหรับการกำจัดของเสียจากฟาร์ม ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม (Rico, Muñoz, Fernández, & Rico, 2015)

การมีวัสดุรองรับในถังปฏิกรณ์หมักแบบต่อเนื่อง และแบทช์สำหรับการผลิตแก๊สมีเทนแบบเดิมสำหรับการผลิตแก๊สมีเทนจะก่อให้เกิดการก่อตัวของมวลรวมที่อัดแน่นและการมีอยู่ที่สอดคล้องกันมากขึ้นของกากตะกอนที่เป็นเม็ดขนาดใหญ่ ( $\geq 0.6$  mm.) ด้วยการผลิต extracellular polymeric substances (EPS) ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อ VFA และการกระตุ้นผลผลิตแก๊สมีเทนที่ลดลง ซึ่งมีผลต่อความเสถียรของระบบหมักแบบต่อเนื่อง และแบทช์สำหรับการผลิตแก๊สมีเทน (C. Chen et al., 2017; D. Zhang et al., 2019) ซึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาข้างต้นมีงานวิจัยที่นำวัสดุรองรับต่างๆ สำหรับบรรจุในถังปฏิกรณ์หมักแบบต่อเนื่อง และแบทช์สำหรับการผลิตแก๊สมีเทนซึ่งรวมถึงโลหะแร่ธาตุ วัสดุพลาสติกกรีซไคลิด ใยสังเคราะห์ และถ่านไบโอชาร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ่านไบโอชาร์เป็นวัสดุคาร์บอนที่ได้จากชีวมวลที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยการกระตุ้น direct interspecies electron transfer (DIET) การเพิ่มประสิทธิภาพอัตราส่วน C/N, การดูดซับสารมลพิษขนาดเล็ก (Mainardis et al., 2019) โดยถ่านไบโอชาร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของหมักแบบต่อเนื่อง และแบทช์สำหรับการผลิตแก๊สมีเทน เมื่อบำบัดพื้นผิวที่ละลายน้ำได้สูง ซึ่งสร้าง VFA ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ถังปฏิกรณ์ที่มีถ่านชีวภาพสามารถกำจัด COD สูงกว่าถังปฏิกรณ์ควบคุม (77% เทียบกับ 40%) โดยมีผลผลิตแก๊สชีวภาพที่ดีขึ้นที่ OLR จาก 6.9–7.8 kgCOD/m<sup>3</sup>d (Wambugu, Rene, van de Vossenberg, Dupont, & van Hullebusch, 2019) งานวิจัยได้ทำการศึกษาการใช้วัสดุตั้งต้นที่เหมาะสมสำหรับการย่อยร่วมในถังปฏิกรณ์หมักแบบต่อเนื่อง และการหมักแบบแบทช์หรือแบบกะซึ่งการศึกษาจะดำเนินการในห้องปฏิบัติการ โดยการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ผ่านการใส่วัสดุรองรับในซัดเกาะของตัวแบคทีเรีย ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยได้ทำการศึกษาระบบหมักแบบต่อเนื่อง และแบบพัชสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ

วัสดุตั้งต้น	ถังปฏิกรณ์	วัสดุรองรับ	เวลา (วัน)	ผลผลิต	อ้างอิง
Corn straw	Batch	PETF, PPE, PAF and PUF	47	แก๊สชีวภาพ 44.8%, แก๊สมีเทน 49.84%	(Liu et al., 2017)
Corn straw	Batch	GAC	47	แก๊สชีวภาพ 42.69%, แก๊สมีเทน 37.29 %	(Liu et al., 2019)
Cow manure	Batch	BioCords	55	แก๊สมีเทน 37.29%	(Izadi, Izadi, Eldyasti, & Hawkes, 2018)
Cheese and wafer waste	Batch	Lignin grafted (PVP)	21	แก๊สชีวภาพ 14.09%	(Pilarska et al., 2019)
Cattle manure	Continuous	PET-rings	300	แก๊สชีวภาพ 44%	(Martí-Herrero et al., 2014)
Sugar beet silage	Continuous	MFGPs	220	CH <sub>4</sub> เพิ่มขึ้น 1.18 เป็น 1.25 ลิตร/วัน	(Ramm et al., 2014)
Spent wash	Batch	Luffa sponge, coconut husk fiber, and wood chips	60	CH <sub>4</sub> เพิ่มขึ้น 77.7% เป็น 82.6%	(Zainab, Meraj, & Liaquat, 2020a)
Cattle manure	Continuous	ACF, PVAf, and GF	50	แก๊สชีวภาพ เพิ่มขึ้น 2.12 L d <sup>-1</sup>	(Gong, Liang, Li, & Wang, 2011)
Biowaste	Continuous	Straw	100	CH <sub>4</sub> เพิ่มขึ้น 50-Nl kg <sup>-1</sup> VS	(Bengelsdorf, Gabris, Michel, Zak, & Kazda, 2015)
Mustard tuber wastewater	Batch	Biofilm reactor	60	แก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นจาก 0.082 เป็น 0.094 และ 0.105 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> /day	(Chai & Kang, 2012)
Stuffed wafers and raw sewage sludge	Batch	Kraft lignin	60	แก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น 18%	(A Pilarska, Wolna-Maruwka, & Pilarski, 2018)
Anaerobic sludge	Continuous	PVA-gel beads	50	แก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น 28%	(Szentgyörgyi, Nemestóthy, & Belafi-Bako, 2010)

Polypropylene fiber (PPF); Polyester fiber (PETF); Polyamide fiber (PAF); Polyurethane fiber (PUF); Magnetic foam glass particles (MFGPs)

### วัสดุรองรับไบโอฟิล์ม

ไบโอฟิล์มเป็นชุมชนจุลินทรีย์ที่ฝังอยู่ในเมทริกซ์นอกเซลล์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์และเกิดขึ้นจากการเกาะติดของจุลินทรีย์กับพื้นผิวที่มีชีวิตหรือไม่มีชีวิต มากกว่า 90% ของมวลไบโอฟิล์มเปียกคือน้ำ โพลีแซ็กคาไรด์ และไกลโคโปรตีนที่มีสารโพลีเมอร์ภายนอกเซลล์ (EPS) มีสัดส่วนมากกว่า 70% ของมวลไบโอฟิล์มแห้ง ความหนาของไบโอฟิล์มแตกต่างกันไปตั้งแต่หลายไมครอนจนถึงหลายเซนติเมตร ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ อายุของไบโอฟิล์ม สถานะสารอาหาร และปัจจัยสิ่งแวดล้อม

ถึงปฏิกรณ์ไบโอฟิล์มแบบไม่ใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์จะถูกตรึงบนวัสดุรองรับ ทำให้ถึงปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่ดี (Qazi, Nadeem, Baig, Baig, & Syed, 2011) การบำบัดน้ำเสียในบ่อกรองไร้อากาศเป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (anaerobic filter ; AF) โดยมีวัสดุรองรับต่างๆ เช่น เปลือกหอย ถ่านชีวภาพ วัสดุพลาสติก เซรามิก แก้วเผาผนึก อิฐทนไฟ หินจากธรรมชาติ ได้แก่ หินปูน กรวด หินภูเขาไฟ ดินเหนียว และหินมวลรวม (Karadag, Köroğlu, Ozkaya, & Cakmakci, 2015) ซึ่งมีการสรุปเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

จากการศึกษาของเบลองคอน (Belancon et al., 2010) ที่ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพถึงปฏิกรณ์ ASBBR และถึงปฏิกรณ์ไบโอไบโอฟิล์มแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบไฮบริด สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ที่อุณหภูมิ 30 °C โดยมีวัสดุรองรับเป็นโพลียูรีเทน ถึงปฏิกรณ์แบบไฮบริดมีวัสดุรองรับที่ดูกว้างเหนือโซนแยกแก๊ส และของเหลว เพื่อการกักเก็บของแข็ง โดย ASBBR มีวัสดุรองรับรองรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ผลการทดลอง พบว่าการใส่วัสดุรองรับในระบบเป็นแนวทางที่ดีในการเพิ่มชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบไฮบริด ในขณะที่ ASBBR มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ที่สูงกว่าในทุกสภาวะ แม้ว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบไฮบริดจะสูญเสียชีวมวลประมาณ 18% เนื่องจากการลอยตัวของเม็ดเล็กๆ

รวมถึงการศึกษาของวาเลโร (Valero et al., 2018) ที่ได้ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนจาก Nejayote ที่มีวัสดุรองรับเป็นถ่านกัมมันต์แบบแกรนูล (GAC) โดยทำการทดสอบศักยภาพแก๊สมีเทนทางชีวเคมี (BMP) โดยมีการเติม GAC จะเพิ่มผลผลิตมีเทนขึ้น 34% ในกรณีแรก นอกจากนี้ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าการผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น 54% เมื่อมีการพัฒนาไบโอฟิล์ม GAC 10 วันก่อนการทดสอบ BMP

การศึกษาของลิน (Lin et al., 2017) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากเอธานอล โดยการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน (AD) ซึ่งวัสดุรองรับเป็นวัสดุคาร์บอนนำไฟฟ้า (เช่น วัสดุนาโนกราฟีนและถ่านกัมมันต์) พบว่าการเติมกราฟีน 1 g/L ส่งผลให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $695 \pm 9.1$  mL/g และอัตราการผลิต มีค่าเท่ากับ  $95.7 \pm 7.6$  mL/g/d ซึ่งสอดคล้องกับ

การเพิ่มผลผลิตเป็นไบโอมีเทน 25% และมีการย่อยสลายของเอทานอลดีขึ้นเป็น 29.1% เมื่อมีวัสดุรองรับเป็นกราไฟน

การศึกษาของลี และปาร์ค (Lee, Lee, & Park, 2016) พบว่า การหมักแบบแบทช์ขนาด 500 mL ที่มีวัสดุรองรับเป็น GAC มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนสูงกว่า 1.8 เท่า เมื่อเทียบกับที่ไม่มี GAC (35.7 เทียบกับ 20.1±7.1 mLCH<sub>4</sub>/d) โดยมีค่าการผลิตแก๊สมีเทนประมาณ 34% นอกจากนี้ การเติมวัสดุรองรับที่เป็น GAC ช่วยในการเสริมสร้างจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสปีชีส์โดยตรง DIET ซึ่งการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสปีชีส์โดยตรง ผ่านวัสดุนำไฟฟ้าสามารถให้ประโยชน์อย่างมากต่อการเกิดแก๊สมีเทนหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

จากการศึกษาการผลิตแก๊สมีเทนจากน้ำเสียสังเคราะห์ของครูซ วิกกี (Cruz Viggli et al., 2014) โดยการหมักแบบแบทช์ขนาด 120 mL ที่มีวัสดุรองรับเป็นแมกเนไทต์ขนาดไมโครมิเตอร์ (Micrometer-size magnetite; Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) เป็นเวลา 20 วัน พบว่า การใส่วัสดุรองรับ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ให้เป็นภาคตะกอนในมีทาโนเจน (methanogenic sludge) ช่วยเพิ่มอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจากโพรพิโอเนต (สูงถึง 33%)

จากการศึกษาผลในระยะสั้นของนาโนกราไฟนต่อการสร้างเมทาโนเจนซิสในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนของเทียน เจียว ลี จาง และจิว (Tian, Qiao, Li, Zhang, & Zhou, 2017) พบว่า กราไฟน (30 และ 120 mg./L) มีผลในอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งเพิ่มขึ้น 17.0% และ 51.4% ตามลำดับ

ในการศึกษาการเพิ่มถ่านกัมมันต์แบบเม็ดลงในระบบย่อยตะกอนแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อเพิ่มการผลิตแก๊สมีเทนของยาง (Yang et al., 2017) โดยทำการใส่ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด GAC ในระบบแบทช์ที่มีวัตถุดิบเป็นตะกอน หมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเติม GAC จาก 0 เป็น 5.0 g การผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น 17.4% และอัตราการลดตะกอนเพิ่มขึ้น 6.1% (จาก 39.1% เป็น 45.2%) ในการย่อยอาหาร 20 วัน GAC ได้เพิ่มประสิทธิภาพอย่างเห็นได้ชัดกับเมทาโนเจนที่ใช้ไฮโดรเจน, *Geobacter* และเมทาโนเจนอื่นๆ ที่สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสปีชีส์ได้โดยตรง เพื่อเร่งการใช้วัสดุตั้งต้นและการผลิตแก๊สมีเทน

การศึกษาด้านกัมมันต์และด้านชีวภาพถูกใช้เป็นวัสดุรองรับในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (AD) จากเศษอินทรีย์ของขยะชุมชนของราชapur (Rasapoor et al., 2020) ซึ่งทำการศึกษการเติมวัสดุรองรับที่เป็นถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่า การใช้ตัวกลางเป็นถ่านชีวภาพที่ 20 g/L สามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการใช้ตัวกลางเป็นถ่านกัมมันต์ 10 g/L ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD จากขยะสูงที่สุดที่ 51%

ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่ทำการศึกษาผลของวัสดุรองรับที่อยู่ในระบบแก๊สชีวภาพ

ปริมาตร (mL)	วัสดุตั้งต้น	วัสดุรองรับ	แก๊สมีเทน (%)	เวลา (Day)	อ้างอิง
120	Nejayote	GAC	34	30	(Valero et al., 2018)
250	Ethanol	Graphene	25	12	(Lin et al., 2017)
500	Synthetic wastewater	GAC	34	45	(Lee et al., 2016)
120	Synthetic wastewater	Magnetite	33	20	(Cruz Viggi et al., 2014)
250	Glucose	Graphene	51	15	(Tian et al., 2017)
250	Sludge treatment plant	GAC	17	20	(Yang et al., 2017)
100	OFMSW+inoculum	PW biochar	41	10	(Rasapoor et al., 2020)
100	OFMSW+inoculum	PS biochar	38	10	(Rasapoor et al., 2020)
100	OFMSW+inoculum	MC biochar	23	10	(Rasapoor et al., 2020)

\*OFMSW; ขยะมูลฝอยชุมชน Organic fraction of municipal solid waste (OFMSW)

สรุปรวบของการทบทวนเอกสารในการเพิ่มปริมาณแก๊สมีเทนได้มีงานวิจัยหลายงานวิจัยพบว่า การตรึงแบคทีเรียสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนได้ แต่ในการประยุกต์ใช้การตรึงเซลล์กับระบบหมักแบบต่อเนื่อง โดยใช้ถ่านชีวภาพเป็นตัวกลางในจุลินทรีย์ยัดเก่านั้นยังไม่ค่อยมีงานวิจัย ซึ่งคาดว่าองค์ความรู้จากการทบทวนวรรณกรรม สามารถนำมาต่อยอดกับงานวิจัยนี้ โดยเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนต่อไป เพื่อลดปัญหาการปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อมและการขาดแคลนพลังงานในอนาคต

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้างโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในบทนี้การกล่าวถึง วัตถุประสงค์ และระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้างโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ คือ วัตถุประสงค์ตั้งต้น คือ น้ำชะมูลช้าง (fresh elephant manure filtrate) ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง (biochar from elephant manure) และหัวเชื้อกากตะกอนจุลินทรีย์มูลสุกร (pig manure sludge from anaerobic digester)

#### น้ำชะมูลช้าง

น้ำชะมูลช้าง คือ มูลช้าง ได้รับความอนุเคราะห์จากปางช้างในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งลักษณะของมูลช้าง โดยการเก็บตัวอย่างมูลช้างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้มีการจำกัดเพศ และอายุของช้าง ซึ่งช้างส่วนใหญ่ในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่จะมีการบริโภคหญ้าเนเปียร์เป็นอาหารหลัก การเตรียมน้ำชะมูลช้าง ทำได้โดยการนำมูลช้างสด บรรจุลงในถุงไนลอน แล้วแช่ในน้ำอัตราส่วนมูลช้างต่อน้ำ ปกติล้างให้สนิท และหมักไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วยกถุงไนลอนที่บรรจุมูลช้างออกจากถังจะได้ น้ำชะมูลช้างสีน้ำตาลใส เก็บส่วนที่เป็นน้ำชะมูลช้าง เก็บรักษาตัวอย่างน้ำชะมูลช้างด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อให้ได้ pH เท่ากับ 4 แล้วเก็บในตู้แช่ที่อุณหภูมิ 4 °C ก่อนนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และเคมีในห้องปฏิบัติการ ส่วนที่เป็นกากเส้นใยมูลช้างนำไปผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างต่อไป



(ก)

(ข)

ภาพที่ 3.1 (ก) มวลขี้างสด (ข) น้ำชะมวลขี้าง

### หัวเชื้อแบคทีเรีย

หัวเชื้อแบคทีเรีย คือ หัวเชื้อกากตะกอนมูลสุกรที่ได้จากระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบบ่อปิด (modified covered lagoon) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากสำนักงานฟาร์มสุกร ภายใต้สังกัดคณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการสนับสนุนหัวเชื้อกากตะกอนจุลินทรีย์มูลสุกร ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งลักษณะกากตะกอนจุลินทรีย์มูลสุกร โดยน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไม่ต้องผ่านการปรับสภาพหัวเชื้อ เนื่องจากเป็นเชื้อที่ผลิตแก๊สชีวภาพ จากนั้นนำหัวเชื้อมาทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ  $7.0 \pm 0.1$  เติมแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่แก๊สออกซิเจนออกจากหัวเชื้อ และปิดขวดฝาอะลูมิเนียม เพื่อทำการเลี้ยงในสภาพไร้อากาศ และทำการกระตุ้นเชื้อจุลินทรีย์โดยนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ก่อนนำไปใช้เป็นหัวเชื้อในการหมักร่วมกับน้ำชะมวลขี้างเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ



(ก)

(ข)

ภาพที่ 3.2 (ก) ระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบบ่อปิด (ข) หัวเชื้อกากตะกอนมูลสุกร

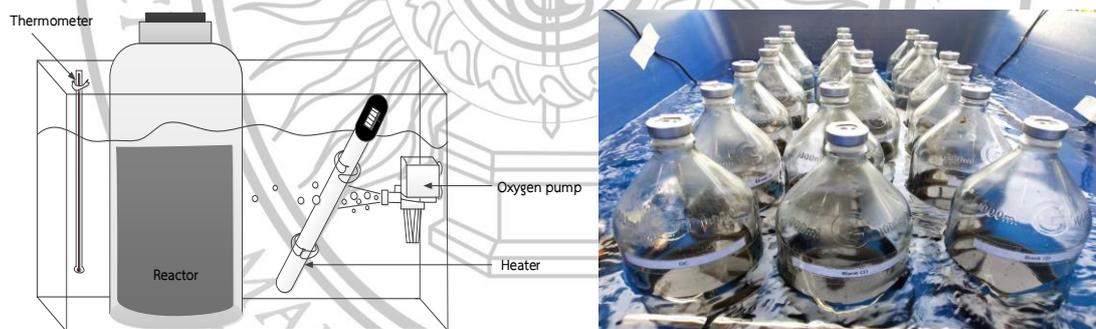
### ระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้ในการวิจัย

ระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบ่งเป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบหมักแบบแบทช์หรือแบบกะ และระบบการเติมแบบต่อเนื่อง

#### ระบบหมักแบบแบทช์หรือแบบกะ

ระบบหมักแบบกะหรือแบทช์ โดยทำการทดสอบศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน (Biochemical Methane Potential : BMP) เป็นการทดสอบเพื่อประเมินการย่อยสลายสารอินทรีย์เคมีที่ใช้ในการผลิตแก๊สมีเทนในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งเป็นการตรวจวัดแรงดันที่เพิ่มขึ้นในระบบทดสอบ ซึ่งอ้างอิงวิธีทดสอบจากมาตรฐาน VDI 4630

โดยมีรายละเอียด การออกแบบระบบการผลิตแก๊สชีวภาพขนาด 1 ลิตร ปริมาตรใช้จริง 400 มิลลิลิตร ขวดหมักถูกปิดด้วยจุกยาง โดยในการหมักแบบไร้ออกซิเจนจะมีการใช้เครื่องทำความร้อน (Heater) ให้ความร้อนแก่น้ำเพื่อให้ได้อุณหภูมิอยู่ในช่วง  $35 \pm 2$  °C โดยมีเทอร์มอมิเตอร์ตรวจสอบอุณหภูมิน้ำ และตัวปั๊มน้ำออกซิเจนเพื่อให้มีการไหลเวียนน้ำในระบบให้ความร้อนสม่ำเสมอทั่วภาชนะใส่ขวดหมัก ซึ่งมีการบันทึกค่าแรงดันแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน โดยมีการวัดองค์ประกอบแก๊สเมื่อแรงดันประมาณ 300 mbar จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองโดยสังเกตจากปริมาณแก๊สที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่า 1% ของปริมาณแก๊สสะสม ซึ่งจะใช้เวลาการหมักประมาณ 30-60 วัน โดยตัวอย่างโคอะแกมระบบการผลิตแก๊สชีวภาพขนาด 1 ลิตร ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ระบบการผลิตแก๊สชีวภาพขนาด 1 ลิตร

วิธีวิเคราะห์ (Analytical methods) องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ สามารถใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สชีวภาพแบบพกพา (GFM 406; Gas data limited, United kingdom) โดยปริมาตรของแก๊สชีวภาพที่วัดได้จะถูกทำให้เป็นมาตรฐานที่อุณหภูมิมาตรฐาน (0 °C) และสภาวะความดัน (1 atm) และแสดงเป็น NmL ตามอุณหภูมิในการทำงานของห้องปฏิบัติการเมื่อทำการวัดดังนี้

สมการ

$$V_{STP} = \frac{[V_T \times 273 \times (760 - P_w)]}{(270 + T) \times 760} \quad (3.1)$$

- เมื่อ  $V_{STP}$  คือ ปริมาตรแก๊สของอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (L)  
 $V_T$  คือ ปริมาตรของแก๊สที่วัดที่อุณหภูมิ T (L)  
 T คือ อุณหภูมิของแก๊สหรือพื้นที่โดยรอบ ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $P_w$  คือ ความดันไอของน้ำเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ (mmHg)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณเพื่อให้เห็นภาพความสมบูรณ์ของข้อมูลที่ได้รับจากการทดลองว่ามีความคล้อยคลึงกับข้อมูลที่ซ้ำกัน กราฟลูกบอลพร้อมกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยจากจุดข้อมูลแต่ละจุดและแสดงในกราฟผลตอบแทนสะสม ค่า  $p$  ถูกกำหนดไว้ที่ 0.05 และทดสอบความสำคัญของผลลัพธ์ด้วย ค่า  $p < 0.05$  ในขณะที่ไม่มีผลลัพธ์ที่มีนัยสำคัญอยู่ที่  $p > 0.05$  ในระหว่างการวิเคราะห์ความแปรปรวน one way (ANOVA) การวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับการประยุกต์ใช้แบบจำลองজনপলাসত্রীมีการอธิบายเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

โดยวัดปริมาตรของแก๊สทั้งหมดที่เกิดขึ้น โดยวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณแก๊สมีเทนสะสม

สูตรเอมพิริกัลหรือสูตรอย่างง่าย (Empirical formula) ( $\text{C}_n\text{H}_a\text{O}_b\text{N}_c\text{S}_d$ ) ของมูลซ้าง โดยใช้สูตรศักยภาพการผลิตมีเทนในทางทฤษฎี (Theoretical biochemical methane potential ;  $\text{BMP}_{th}$ ) ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 273 เคลวิน และความดัน 1 บรรยากาศ) แก๊ส 1 โมล มี 22.4 ลิตร ดังนั้น ศักยภาพการผลิตมีเทนทางทฤษฎีในหน่วย  $\text{mLCH}_4/\text{gVS}_{add}$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 (Pererva, Miller, & Sims, 2020)

สมการ

$$\text{BMP}_{th} \left( \text{mLCH}_4 / \text{gVS} \right) = \frac{22.4 \times \left( \frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} \right)}{12n + a + 16b} \times 1000 \quad (3.2)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ (kinetic coefficients)

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณอัตราการผลิตแก๊สสูงสุดในการทดลองนี้ คือ สมการ modified gompertz model (Budiyono & Sumardiono, 2014) เพื่ออธิบายถึงการผลิตแก๊สชีวภาพของน้ำชะมูลช้างในระบบกะ ภายใต้อุณหภูมิแบบไม่ใช้ออกซิเจน การสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการเจริญเติบโตของประชากรแบคทีเรีย และดังนั้นการผลิตแก๊สชีวภาพในบ่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถจำลองได้โดยแบบจำลอง gompertz สมการดังกล่าวจะใช้เพื่อหาเส้นโค้งที่เหมาะสมของผลการทดลอง และวิธีการใช้สมการดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชัน solver ใน Microsoft excel

สมการ

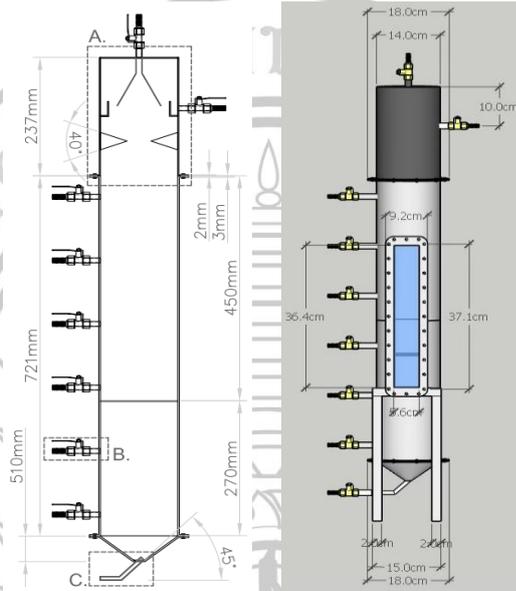
$$M(t) = P \times \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{R_{\max} \times e}{P} \right] (\lambda - t) + 1 \right\} \quad (3.3)$$

M(t)	คือ ปริมาณการผลิตแก๊สมีเทนสะสม ณ เวลาต่างๆ (mLCH <sub>4</sub> /gVS)
P	คือ ปริมาณผลิตแก๊สมีเทนสูงสุด (mLCH <sub>4</sub> /gVS)
R <sub>max</sub>	คือ อัตราการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุด (mLCH <sub>4</sub> /g VS.d)
λ	คือ ค่า lag time (วัน)
t	คือ ระยะเวลาการหมัก (วัน)
e	คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 2.71828

#### ระบบการหมักแบบต่อเนื่อง

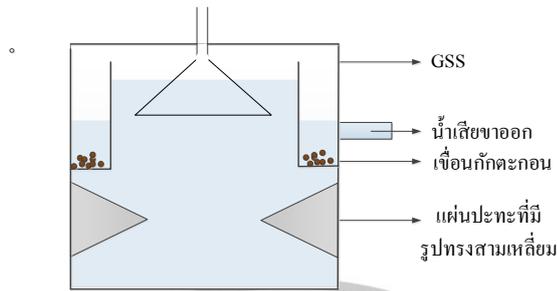
ระบบการหมักแบบต่อเนื่อง เป็นระบบตั้งปฏิกรณ์ชีวภาพที่ไม่ใช้ออกซิเจนผลิตแก๊สชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ได้ โดยระบบเป็นตั้งปฏิกรณ์ชีวภาพที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic bio-reactor) ได้ถูกพัฒนาให้มีความสามารถในการกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ได้ดีขึ้นจากตั้งปฏิกรณ์ชีวภาพที่อาศัยการทำงานของตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยในน้ำชะมูลช้าง มาเป็นระบบที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะกับตัวกลางในลักษณะตรึงฟิล์ม มีลักษณะเด่นที่มีการบรรจุวัสดุอย่าง เป็นระเบียบ มีการไหลของน้ำชะมูลช้างอย่างสม่ำเสมอ โดยวัสดุรองรับที่ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ซึ่งการบรรจุวัสดุรองรับลักษณะนี้ทำให้จุลินทรีย์ในระบบส่วนใหญ่เจริญเติบโตแบบยึดเกาะบนผิววัสดุรองรับทำให้ไม่มีการสูญเสียจุลินทรีย์ออกจากระบบ โดยงานวิจัยนี้ใช้ตั้งปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ

ชั้นตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Up-flow anaerobic sludge blanket, UASB) ในการหมักแบบต่อเนื่อง โดยถังหมักที่ออกแบบในการวิจัยนี้ทำด้วยสแตนเลส 12 L ลักษณะเป็นทรงกระบอกก้นถึงเป็นรูปกรวย โดยมีขนาดถังปฏิกรณ์ UASB เส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของถัง 14 และ 146.8 cm ตามลำดับ



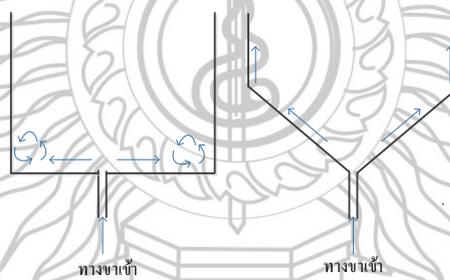
ภาพที่ 3.4 องค์ประกอบภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ UASB

จากภาพที่ 3.4 เพื่อให้แก๊สลอยขึ้นสู่ (Gas- solid separator, GSS) จึงได้ออกแบบให้มีแผ่นปะทะที่มีรูปทรงสามเหลี่ยมยื่นออกมาจากผนังด้านในของถัง โดยอาศัยหลักการที่น้ำสามารถไหลเลี้ยวไปมาได้ในขณะที่แก๊สมีการลอยตัวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเป็นเส้นตรงเท่านั้นยกเว้นมีสิ่งกีดขวางหรือแผ่นปะทะใดๆ มาเปลี่ยนทิศทางการลอยตัวขึ้นหลังจากผ่านพื้นสิ่งกีดขวางนั้นแล้วก็จะลอยตัวเป็นเส้นตรงดั้งเดิมจึงออกแบบและติดตั้งแผ่นปะทะที่มีลักษณะทรงสามเหลี่ยมยื่นออกมาเพื่อขวางทิศทางการไหล ทำให้น้ำ และแก๊สมาปะทะแล้วเบี่ยงเบนการไหล ของน้ำ และแก๊สออกจากกันหากปิดฝาเข้ากับตัวถังตำแหน่งของ GSS จะอยู่ระหว่างเขื่อนน้ำล้นกับผนังสามเหลี่ยมพอดีและติดตั้งตะแกรงไว้เพื่อช่วยในการกั้นตะกอนให้ลอยตัวอยู่เป็นชั้นสัจจไม่ให้งมลงสู่ก้นถังหมักแบบ UASB



ภาพที่ 3.5 การทำหน้าที่กั้นตะกอนไม่ให้ไหลปนไปกับน้ำาออกของเชือกักตะกอน

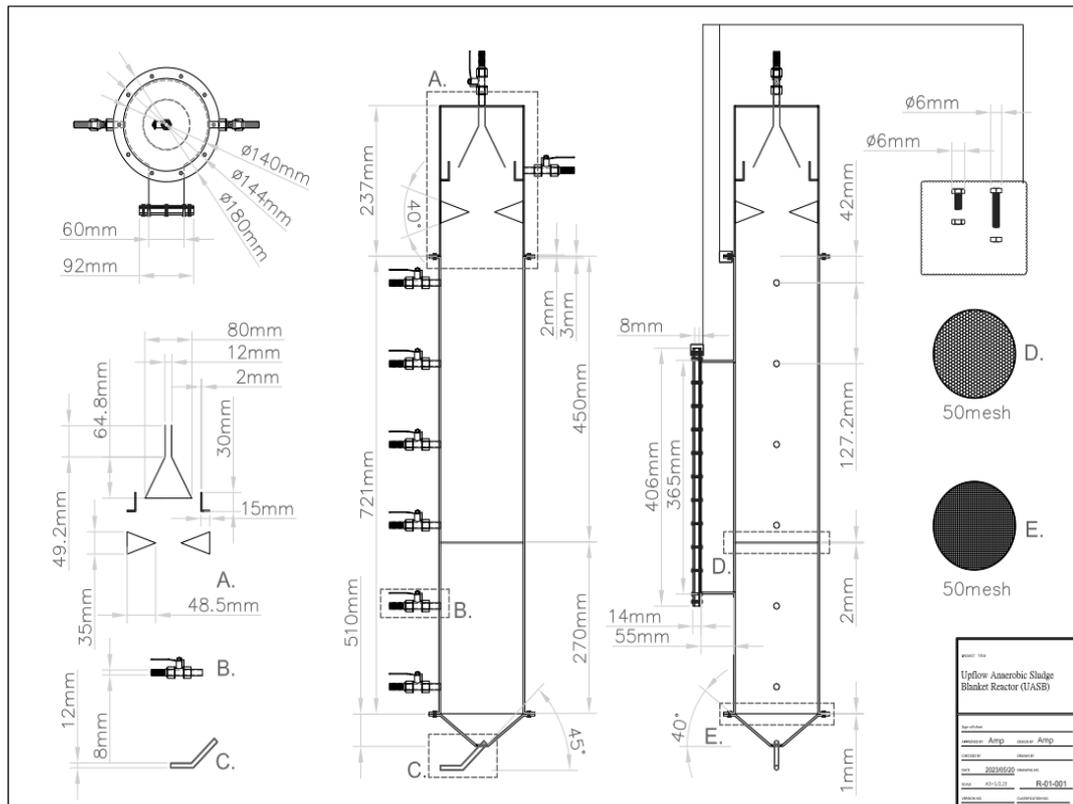
จากภาพที่ 3.5 จะเห็นว่ามีส่วนที่เป็นเชือกักตะกอนก่อนที่น้ำจะออกจากถังหมักแบบ UASB เพื่อไม่ให้ตะกอนไหลออกไปกับน้ำ โดยทั่วไป ถัง UASB จะมีลักษณะแบนราบ จึงทำให้เกิดปัญหาบริเวณไร้ตอบสนอง (Dead zone) จึงออกแบบกันถังให้มีลักษณะเป็นกรวยสามเหลี่ยม ซึ่งนอกเหนือจากจะเป็นการป้องกันการเกิดปัญหาบริเวณไร้ตอบสนองแล้วยังเป็นการช่วยให้การไหลเป็นไปได้ง่ายขึ้นอีกด้วยดังแสดงภาพที่ 3.6

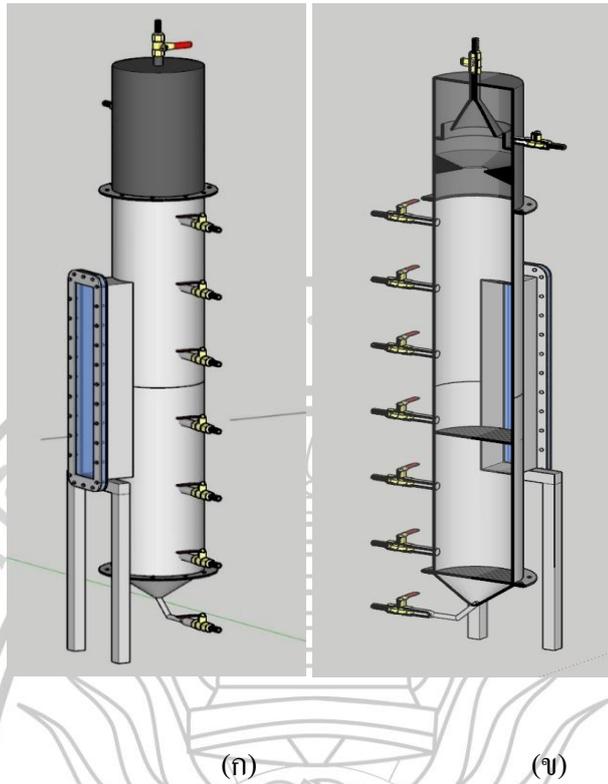


ภาพที่ 3.6 ความแตกต่างของทิศทางการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าด้านล่างมีลักษณะต่างกัน

การศึกษาข้อมูลพื้นฐานของถังหมักแก๊สชีวภาพแบบระบบยูเอสบีเพื่อนำมาออกแบบและสร้างถังหมัก UASB ในขนาดทดลอง (Lab scale) โดยถังมีขนาด 13 L สามารถบรรจุน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัดภายในได้ 12 ลิตรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของถังรวมถึงสัดส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 3.5 และออกแบบให้อุปกรณ์เครื่องแยกสามสถานะ ทำหน้าที่หลัก คือ แยกแก๊สและตะกอน โดยทั่วไปมุมของอุปกรณ์ดักแก๊สจะเอียงประมาณ  $40^\circ$  กับผนังท่อบำบัด และอุปกรณ์แยกแก๊ส-ตะกอนจุลินทรีย์ ต้องมีผิวด้านในกรวยเพื่อรักษาสภาพการกวนพอให้แก๊สจะไหลออกได้อย่าง

รวดเร็ว โดยปกติพื้นที่หน้าตัดของช่องเก็บแก๊สไม่ควรต่ำกว่า 15-20% ของพื้นที่หน้าตัดของถัง UASB โดย GSS ที่อยู่ติดกับฝาถังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของฝาถังรวมถึงสัดส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 3.7





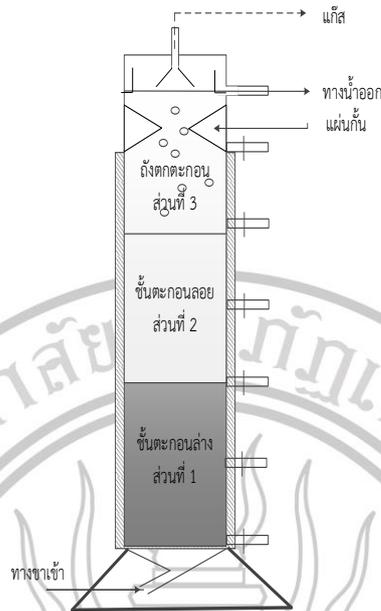
ภาพที่ 3.8 ถังหมักระบบ UASB แสดงแบบสามมิติ (ก) ภายนอกถัง (ข) ภายในถัง

### 1. แนวคิดของกระบวนการถังปฏิกรณ์ชีวภาพ UASB

กระบวนการ UASB มีแนวความคิดของกระบวนการ UASB เริ่มต้นจากความต้องการผลิตแก๊สชีวภาพ และพัฒนาระบบการออกแบบบำบัดของเสียจากมูลช้างให้มีประสิทธิภาพ ประหยัดค่าใช้จ่าย และเป็นระบบที่ง่ายต่อการใช้งาน แต่ในระบบ UASB จะมีปัญหาในการดำเนินระบบ เช่น เวลาในการกักเก็บ (Hydraulic retention time), การรักษาปริมาณแบคทีเรียไว้ให้สูงสุด, ความเร็วของเสียที่ไหลเข้าสู่ระบบ, ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ไหลเข้า, ขนาดเม็ดตะกอนแบคทีเรีย, การกระจายน้ำเสียให้เข้าอย่างทั่วถึง เป็นต้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวมาข้างต้นเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินระบบ UASB

### 2. ลักษณะการทำงานของกระบวนการถังปฏิกรณ์ UASB

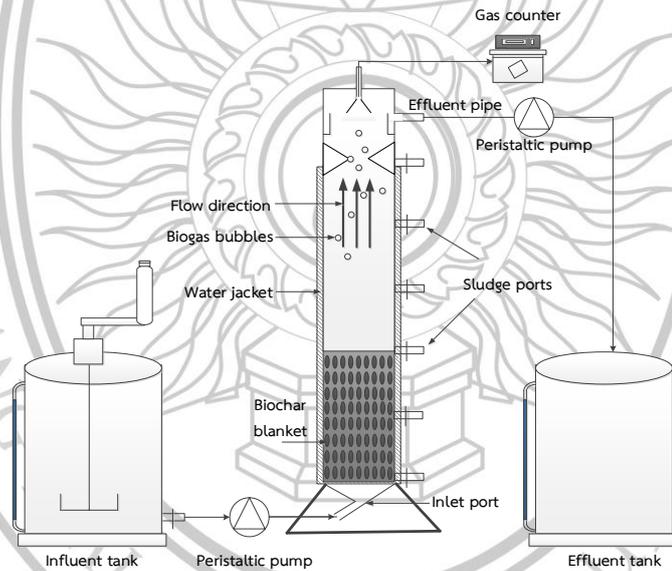
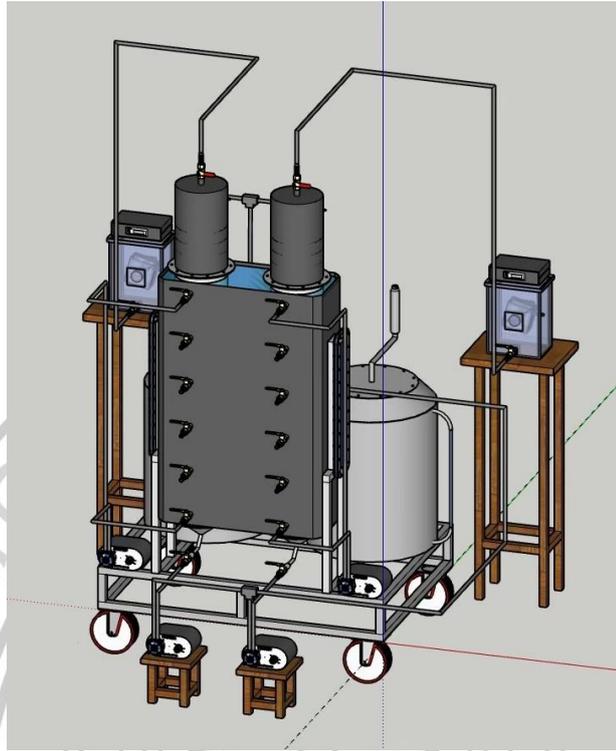
กระบวนการถังปฏิกรณ์ UASB มีการใส่ตะกอนแบคทีเรียเข้าไปในระบบเพื่อบำบัดน้ำเสียของเสียจากมูลช้าง ภาพที่ 3.9 อธิบายกระบวนการถังปฏิกรณ์ UASB โดยแบ่งถังปฏิกรณ์ UASB เป็น 3 ส่วน คือ ชั้นตะกอนล่าง (ส่วนที่ 1) ชั้นตะกอนลอย (ส่วนที่ 2) และชั้นแยก 3 สถานะ (ของแข็ง, ของเหลว และแก๊ส) (ส่วนที่ 3)



ภาพที่ 3.9 องค์ประกอบหลักของถังปฏิกรณ์ UASB

น้ำชะมูลข้างไหลจะเข้าทางส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ และเกิดการสัมผัสกันกับชั้นตะกอนแบคทีเรียที่มีความเข้มข้นสูง หรือชั้นตะกอนส่วนล่าง (Sludge bed) โดยการบีมน้ำเข้าไปสัมผัส เพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลข้าง โดยชั้นตะกอนล่างได้ค้ำขึ้น ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเกิดแก๊ส ซึ่งแก๊สเกาะติดที่ผิวตะกอนแบคทีเรียในชั้นตะกอนแบคทีเรีย ซึ่งความเร็วของน้ำชะมูลข้างที่ป้อนเข้าสู่ระบบ และฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะทำให้ตะกอนแบคทีเรียในส่วนล่างลอยสู่ส่วนที่ 2 หรือเรียกชั้นนี้ว่า ชั้นตะกอนลอย ซึ่งในชั้นนี้ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนจะต่ำกว่าตะกอนด้านล่าง ซึ่งเป็นชั้นแบคทีเรียที่แขวนลอย หรือ ชั้นตะกอนลอย (Sludge blanket) ระหว่างที่น้ำเสียไหลขึ้นสู่ถังปฏิกรณ์ สารอินทรีย์ก็จะยังคงถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียในชั้นตะกอนลอย เมื่อตะกอนลอย และแก๊สลอยขึ้นถึงส่วนชั้นตกตะกอน (ส่วนที่ 3) จากนั้นจะไปกระทบกับแผ่นกั้นในส่วนที่ 1 ทำให้ตะกอนแบคทีเรียตกตะกอน โดยระบบแผ่นกั้นจะเอียงทำมุมประมาณ 40 องศา เรียกว่า Baffle system ส่วนแก๊สที่ได้จากระบบจะไหลเข้าสู่ GSS ซึ่งเป็นแก๊สชีวภาพ และตะกอนแบคทีเรียจะตกลงสู่ส่วนที่ 2 และส่วนที่ 1

ถังปฏิกรณ์ UASB มีองค์ประกอบดังนี้ 1. ถังปฏิกรณ์แก๊สชีวภาพที่มีถ่านชีวภาพ (Blanket-reactor) 2. วอเตอร์แจ็กเก็ต (Water jacket), 3. ชุดวัดปริมาตรแก๊ส (Gas counter), 4. บีมน้ำส่งจ่ายวัตถุดิบแบบรีดท้อขาเข้า-ออก (Influent-effluent peristaltic pump), และ 5. ถังเก็บวัตถุดิบขาเข้า-ขาออก (Influent-effluent tank) ดังแสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แผนผังของระบบถังปฏิกรณ์หมักแบบต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับ โดยใช้ถ่านชีวภาพมูลช้างเป็นตัวกลางในระบบ UASB เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพและการสูญเสียแบคทีเรียในระบบ การศึกษามุ่งเน้นที่การพัฒนาวัสดุรองรับจากถ่านชีวภาพมูลช้างและ

ประเมินประสิทธิภาพในการจัดการและการผลิตแก๊สชีวภาพจากวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการกำจัดปริมาณของเสียและการผลิตพลังงานทดแทน การจัดการของเสียอินทรีย์และการพัฒนาพลังงานทดแทนนั้นมีความสำคัญในยุคปัจจุบัน กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน, เช่น ระบบ UASB (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket), ได้รับการยอมรับในการลดปริมาณของเสียจากแหล่งต่างๆ โดยใช้วัสดุอินทรีย์เช่นมูลช้าง ซึ่งมีคาร์โบไฮเดรตและเส้นใยลิกโนเซลลูโลสสูง เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีพลังงานสูง ระบบ UASB มีความสามารถในการรับภาระสารอินทรีย์สูง และมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่ต่ำ ซึ่งทำให้เป็นระบบที่น่าสนใจสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพในปัจจุบัน

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการทดลองในงานวิจัยนี้ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การผลิตทดสอบคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ส่วนที่ 2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และส่วนที่ 3 การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### ส่วนที่ 1 การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

การเตรียม และทดสอบคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การเตรียมถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยการนำเส้นใยมูลช้างที่ผ่านการล้างน้ำมาอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 3 วัน ซึ่งการทำถ่านชีวภาพจากมูลช้างโดยกระบวนการไพโรไลซิส เตาขนาด 50 ลิตร ที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 12 นาที ในสภาวะไร้ออกซิเจน
2. การทำความสะอาดถ่านชีวภาพจากมูลช้างหลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยถ่านชีวภาพจากมูลช้างจะถูกล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำถ่านชีวภาพมาต้มน้ำเดือดเป็นเวลา 40 นาที หลังจากนั้นใช้น้ำกลั่นล้างถ่านชีวภาพจนกว่าส่วนลอยเหนือตะกอนจะใส จากนั้นนำถ่านชีวภาพจากมูลช้างอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C และใช้ตะแกรงขนาด 40 mesh (0.4 มม.) เพื่อคัดขนาดถ่านชีวภาพมูลช้าง

3. ทดสอบสมบัติของถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยเทคนิคต่าง ๆ

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์	วัตถุดิบ
field emission scanning electron microscope (FE-SEM)	-	S-3400N II Hitachi, Japan	BC, EM
surface area and porosity analyzer (BET)		DIN 66132/ISO 9277	BC, EM
Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)		BRUKER - VERTEX70	
Ultimate analysis			
		Elemental analyzer	
Carbon (C)	%	ASTM D 5373 ASTM D 4239	BC, EM
Hydrogen (H)	%		BC, EM
Oxygen (O)	%		BC, EM
Nitrogen (N)	%		BC, EM
Sulphur (S)	%		BC, EM
Proximate analysis			
Moisture content (MC)	%	ASTM D 7582	BC, EM
Volatile matter (VM)	%		BC, EM
Fixed carbon (FC)	%		BC, EM
Ash	%		BC, EM

หมายเหตุ : Elephant manure (EM) คือ มูลช้างแห้ง; Biochar (BC) คือ ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

## ส่วนที่ 2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของมูลช้างต่อน้ำที่แตกต่างกัน และหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพที่แตกต่างกัน ในการผลิตแก๊สชีวภาพหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน งานวิจัยนี้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้วิธีการประเมินศักยภาพทางการผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้วิธีการทดสอบการตามมาตรฐาน VDI 4630 โดยการทำการทดลองแบบกะในขวดแก้วขนาด 1000 มิลลิลิตร ปริมาตรใช้จริง 400 มิลลิลิตร ซึ่งเติมน้ำชะมูลช้าง และหัวเชื้อ ในอัตราส่วน 0.5 (g VS-based). โดยทำการปรับปริมาตรโดยการเติมอาหารเสริมเท่ากับ 400 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ  $7.0 \pm 0.1$  ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 นอร์มอล (N) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มอล (N) และทำการไล่แก๊สออกซิเจนภายในขวดออกด้วยการเติมแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) เข้าไปแทนที่ขวดละ 3 นาที เพื่อให้ขวดอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน ปิดฝาขวดทดลองด้วยจุกยาง แล้วปิดด้วยฝาอะลูมิเนียมนำไปตั้งไว้ที่อุณหภูมิ  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วัน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ติดตามผลการทดลอง

การประเมินหาค่าประสิทธิภาพและศักยภาพในการย่อยสลายเป็นมีเทนของมูลช้าง biochemical methane potential (BMP) ทำการทดลองแบบกะ หรือแบทช์ (batch) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ  $37 \pm 2$  °C ซึ่งมีถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตรปริมาตรใช้จริง 400 มิลลิลิตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยทำการวัดปริมาณแก๊สชีวภาพทุกวัน และวัดความเข้มข้นของแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) ทุก 5 วัน ซึ่งระยะเวลาหมัก 30-60 วัน หรือจนกว่าปริมาณเหลือน้อย และเริ่มคงที่ โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

- ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของน้ำชะมูลช้างต่อน้ำที่ 1:1 1:2 1:3 และ 1: 4
- ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของน้ำชะกับต่อถ่านชีวภาพมูลช้างที่อัตราส่วน 2.5 5 7.5 10 g/L และ ไม่ใส่ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

การวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นในผลิตแก๊สชีวภาพด้วยเทคนิคต่าง ๆ จากการทดลองของส่วนที่ 2 มีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนขนาด 1 ลิตร โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพ

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
pH		APHA 4500-H <sup>+</sup> B	ก่อนและหลังการหมัก
COD	mg/l	APHA 5220 B	ก่อนและหลังการหมัก
TS	mg/g	APHA 2540 G	ก่อนและหลังการหมัก
TSS	mg/l	APHA 2540 D	ก่อนและหลังการหมัก
VS	mg/g	APHA 2540 G	ก่อนและหลังการหมัก
VSS	mg/l	APHA 2540 E	ก่อนและหลังการหมัก
VFA	mg/l as CH <sub>3</sub> COOH	APHA 2310 B	ก่อนและหลังการหมัก
Alk	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	APHA 2320 B	ก่อนและหลังการหมัก
Methane gas	mbar	VDI 4630	ทุก 4 วัน

### ส่วนที่ 3 การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

1. สร้างชุดถังปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยใช้เป็นระบบการหมักแบบต่อเนื่อง เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยมีถ่านชีวภาพในส่วน blanket ของถังปฏิกรณ์ โดยการสร้างชุดถังปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพมีองค์ประกอบ ดังนี้ 1. ถังปฏิกรณ์แก๊สชีวภาพที่มีถ่านชีวภาพ (blanket-UASB reactor) 2. วอเตอร์แจ็กเก็ต (water jacket) 3. ชุดวัดปริมาตรแก๊ส (gas counter) 4. ปั๊มสุบจ่ายวัตถุดิบแบบรีดท่อขาเข้า-ออก (influent-effluent peristaltic pump) และ 5. ถังเก็บวัตถุดิบขาเข้า-ขาออก (influent-effluent tank) ซึ่งถังปฏิกรณ์การหมักต่อเนื่องมีขนาด 12 ลิตร โดยมีการอัตราการไหลในการป้อนอาหารเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ 0.01-0.02 m/h โดยการเริ่มต้นเดินระบบถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการ UASB ซึ่งเริ่มตั้งแต่การใส่ตะกอนมูลสุกร และเลี้ยงจนตะกอนจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งมีผลต่อการบำบัดในระบบอย่างมาก โดยจะแบ่งขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของตะกอนมีลักษณะเป็นเม็ด เป็น 3 ขั้นตอน คือ ช่วงแรกเป็นช่วงปรับตัวและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลาย acetate และ propionate ขั้นตอนต่อมาจะเป็นช่วงในการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ และขั้นตอนสุดท้าย คือการพัฒนาและเพิ่มจำนวนตะกอนขนาดเล็กในระบบ

2. การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยใช้เป็นระบบการหมักแบบต่อเนื่อง

2.1. การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยทำการศึกษาผลของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ และปริมาณถ่านชีวภาพต่อปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ในระบบการหมักแบบต่อเนื่อง

2.2. การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อีมิชชัน (FE-SEM) การวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี FT-IR และวิเคราะห์ความหลากหลายของจุลินทรีย์ในน้ำชะมูลช้างที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ UASB

2.2.1 ศึกษาสมบัติบางประการของชีวมวลมูลช้าง และถ่านชีวภาพจากมูลช้างศึกษาหุ้ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบบนพื้นผิวของตัวอย่างน้ำชะมูลช้าง และถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดย Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR) ด้วยเทคนิค KBr-pellet (แม้นและอมร, 2535) ซึ่งมีวิธีการคือ นำ KBr เกรดวิเคราะห์ (analytical reagent (AR)/reagent grade) มาอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเก็บใน desiccator ที่มีซิลิกาเจล และนำชีวมวลมูลช้าง และถ่านชีวภาพมูลช้างทั้งที่ไม่ผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาเก็บในโถดูดความชื้น จากนั้นใช้ตัวอย่างปริมาณ 2 mg ที่อบแห้งแล้วนำมาผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่ 100-200 mg ในโถงอะเกต แล้วบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องอัด (die) และคว่ำอัดตัวอย่างประมาณ 3-4 นาที จึงนำตัวอย่างที่เป็นเม็ดใสบางออกมาใส่ลงในแผ่นดิสก์ (disc holder) แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR (Nexus 670, Thermo Scientific, USA)

2.2.2 ศึกษาสภาพพื้นผิวของชีวมวลของถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่ผ่านกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยระบบ UASB ศึกษาสภาพพื้นผิวของตัวอย่างถ่านชีวภาพจากมูลช้าง หลังจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยการนำวัสดุรองรับถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่เป็นไบโอฟิล์มมาวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์ FE-SEM เพื่อคุณลักษณะทางกายภาพ หลังจากการหมักแก๊สชีวภาพ เพื่อสังเกตการก่อตัวของไบโอฟิล์มที่อยู่บนวัสดุรองรับถ่านชีวภาพ มูลช้าง โดยใช้กล้อง FE-SEM โดยนำตัวอย่างวัสดุรองรับถ่านชีวภาพ โดยใช้กลูตาราลดีไฮด์ 2% เป็นเวลา 12–24 ชั่วโมง ที่ 4 °C จากนั้นตัวอย่างจะถูกล้างด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต 0.2 M จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างเสียหาย ตัวอย่างจะถูกทำให้แห้งด้วยการเจือจางเอทานอลจำนวนหลายครั้ง เพื่อให้สามารถกำจัดของเหลวที่อยู่ในตัวอย่างออกได้ช้า ๆ ตัวอย่างถูกทำให้แห้งที่ 30% 50% 70% 80% และ 90% เป็นเวลา 10 นาที ในแต่ละครั้ง และใช้เอทานอลที่มีความเข้มข้น 100% (w/w) เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง (Zainab, Meraj, & Liaquat, 2020b) นำชิ้นตัวอย่างมาผ่านกระบวนการทำให้แห้งด้วยเครื่องอบแห้งจุลวิฤติ (รุ่น Leica EM CPD 300, Leica Microsystems, Germany) เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นเตรียมตัวอย่างโดยใช้หลักไฟฟ้าสถิต โดยติดแผ่นคาร์บอนบนสปีดเตอร์ นำตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แห้งที่มีขนาดเล็กประมาณ 0.4 cm มาวางบนสปีดเตอร์ที่เตรียมไว้ แล้วนำไปเคลือบด้วยทอง เป็นเวลา 120 วินาที ก่อนการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE-SEM (S-3400N II Hitachi, Japan)

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพหมักแบบต่อเนื่อง ด้วยเทคนิคต่าง ๆ โดยมีรายละเอียด ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของการผลิตแก๊สชีวภาพหมักแบบต่อเนื่อง

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์	ถังปฏิกรณ์	ความถี่ในการวิเคราะห์
pH	-	APHA 4500-H <sup>+</sup> B	R1 และ R2	ทุก ๆ 3 วัน
TS	mg/L	APHA 2540 G	R1 และ R2	ทุก ๆ 3 วัน
TSS	mg/L	APHA 2540 D	R1 และ R2	ทุก ๆ 3 วัน
VS	mg/L	APHA 2540 G	R1 และ R2	ทุก ๆ 3 วัน
VSS	mg/L	APHA 2540 E	R1 และ R2	ทุก ๆ 3 วัน
FE-SEM		(S-3400N II Hitachi, Japan)	BC	ก่อนและหลังหมัก
BET	mg/g	DIN 66132/ISO 9277	BC	ก่อนหมัก
VFA	mg/l as CH <sub>3</sub> COOH	APHA 2310 B Titrimetric method	R1 และ R2	ทุก ๆ 3 วัน
COD	mg/l	APHA 5220 B	R1 และ R2	ทุก ๆ 3 วัน
Alk	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	APHA 2320 B	R1 และ R2	ทุก ๆ 3 วัน
C/N ratio		APHA 4500-N C (Total kjeldahl nitrogen, TKN)	EM, PM	ก่อนหมัก
		APHA 5310 (Total organic carbon, TOC)		
Biogas production	Nml/gCODadd	VDI 4630	R1 และ R2	ทุกวัน
Methane gas	mbar	VDI 4630	R1 และ R2	ทุก 4 วัน

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

Ultimate analysis				
Carbon (C)	%	Elemental analyzer	BC	ก่อนและหลังหมัก
Hydrogen (H)	%	ASTM D 5373	BC	ก่อนและหลังหมัก
Oxygen (O)	%	ASTM D 4239	BC	ก่อนและหลังหมัก
Nitrogen (N)	%		BC	ก่อนและหลังหมัก
Sulphur (S)	%		BC	ก่อนและหลังหมัก
Proximate analysis				
Moisture content (MC)	%	Thermogravimetric analyzer	EM, BC	ก่อนและหลังหมัก
Volatile matter (VM)	%	ASTM D 7582	EM, BC	ก่อนและหลังหมัก
Fixed carbon (FC)	%		EM, BC	ก่อนและหลังหมัก
Ash	%		EM, BC	ก่อนและหลังหมัก

หมายเหตุ: Fresh elephant manure leachate (EM) คือ น้ำชะมูลช้าง; Anaerobic digestion of pig manure (PM) คือ หัวเชื้อกากตะกอนจุลินทรีย์มูลสุกร; Biochar (BC) คือ ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง; Reactor carriers used biochar (R1) คือ ถังปฏิกรณ์ที่มีวัสดุรองรับจากถ่านชีวภาพและ Reactor without biochar (R2) คือ ถังปฏิกรณ์ไม่มีถ่านชีวภาพ

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูลการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งมีการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของวัตถุดิบของงานวิจัย และการผลิตทดสอบคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ส่วนที่ 2 การหาค่าศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (Biological Methane Potential) โดยมีการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้างระบบกะ และส่วนที่ 3 การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในระบบ UASB โดยมีรายละเอียดดังนี้

การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับ ซึ่งชื่อย่อตัวอย่างและความหมายที่ใช้วิเคราะห์ผลของข้อมูลงานวิจัย ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ชื่อย่อตัวอย่าง และความหมายที่ใช้วิเคราะห์ผลของข้อมูลงานวิจัย

ชื่อย่อ	ความหมาย
EM 1:1	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:1 (W/W)
EM 1:2	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:2 (W/W)
EM 1:3	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:3 (W/W)
EM 1:4	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:4 (W/W)

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ชื่อย่อ	ความหมาย
BC	ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง
AC	ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า
EM 1:2 + BC_7.5 g	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:2 (W/W) และใช้วัสดุรองรับเป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่ 7.5 g/L
EM 1:2 + AC_7.5 g	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:2 (W/W) และใช้วัสดุรองรับเป็นถ่านกัมมันต์เกรดการค้า 7.5 g/L
AD 1 (2.5g/L)	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:2 (W/W) โดยมีวัสดุรองรับเป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้าง 2.5 g/L
AD 2 (5g/L)	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:2 (W/W) โดยมีวัสดุรองรับเป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้าง 5 g/L
AD 3 (7.5g/L)	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:2 (W/W) โดยมีวัสดุรองรับเป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้าง 7.5 g/L
AD 4 (10g/L)	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:2 (W/W) โดยมีวัสดุรองรับเป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้าง 10 g/L
AD 5 without biochar	น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1:2 (W/W) โดยไม่มีวัสดุรองรับ
R1	ถังปฏิกรณ์ที่มีวัสดุรองรับจากถ่านชีวภาพ
R2	ถังปฏิกรณ์ไม่มีถ่านชีวภาพ

### ผลการวิเคราะห์ลักษณะเบื้องต้นของวัตถุดิบของงานวิจัย

#### ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

การวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นของวัตถุดิบคือ น้ำชะมูล และหัวเชื้อกากตะกอนจุลินทรีย์มูลสุกร ได้แสดงดังในตารางที่ 4.2 จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วน VS/TS (VS/TS ratio) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในวัตถุดิบ มีค่าเท่ากับ  $0.69 \pm 0.02$  และ  $0.62 \pm 0.02$  ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าทั้งวัตถุดิบและหัวเชื้อจุลินทรีย์มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ เนื่องจากอัตราส่วน VS/TS มากกว่า 0.5 (Pellera & Gidarakos, 2016) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) มีค่าเท่ากับ  $21.5 \pm 0.05$  ซึ่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิตแก๊สชีวภาพ ควรมีค่าอยู่ในช่วง 20-35 ซึ่งสามารถมี

ศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ (Xue et al., 2020) นอกจากนี้ น้ำชะมูลช้าง และหัวเชื้อจุลินทรีย์มูลสุกรมีค่าปริมาณเถ้าต่ำ มีค่าเท่ากับ 1.91 และ 2.22% ซึ่งปริมาณเถ้าไม่สามารถย่อยสลายเพื่อผลิตพลังงานได้ และอาจทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ เช่น การอุดตันหรือการสะสมตะกอนได้

**ตารางที่ 4.2** คุณลักษณะเบื้องต้นของวัตถุดิบน้ำชะมูลช้าง และหัวเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับระบบผลิตแก๊สชีวภาพ

ค่าพารามิเตอร์	หน่วย	น้ำชะมูลช้าง	หัวเชื้อจุลินทรีย์มูลสุกร
pH	-	7.05 ± 0.35	7.21±0.35
Total solid	mg/L	15,025±77.78	64,925±42.43
Volatile solid	mg/L	10,375±91.92	40,345±35.36
VS/TS ratio	-	0.69±0.02	0.62±0.02
C/N ratio	-	21.5±0.05	NA
Proximate analysis			
Moisture content (MC)	%	80.79	78.18
Volatile matter (VM)	%	11.91	15.52
Fixed carbon (FC)	%	5.39	4.08
Ash	%	1.91	2.22

หมายเหตุ NA = Not Applicable

การศึกษาวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เป็นขั้นตอนสำคัญเพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ในงานวิจัย ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการดำเนินงานต่อไป โดยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเส้นใยมูลช้าง ถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพข้างผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า แสดงดังตารางที่ 4.3

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ เป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบพื้นฐานของวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก โดยการวิเคราะห์นี้จะสามารถระบุปริมาณของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) กำมะถัน (S) และ เถ้า (ash) ในวัสดุตั้งต้น การวิเคราะห์แบบแยกธาตุมีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพในหลายด้าน โดยคาร์บอนของเส้นใยมูลช้าง ถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพข้างผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า มีค่าเท่ากับ 36.4±2.8

50.2±2.7 41.0±2.6 และ 89.88±2.4% ตามลำดับ มีค่าไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 1.5±2.7 2.6±2.5 6.0±2.6 และ 0% ตามลำดับ ซึ่งค่าคาร์บอนและไฮโดรเจน เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตแก๊สชีวภาพ เนื่องจากเป็นแหล่งของพลังงาน หากมีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูง โดยทั่วไปแล้วจะสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากขึ้น ซึ่งค่าออกซิเจนในวัสดุชีวมวลส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ วัสดุที่มีออกซิเจนสูงอาจมีการย่อยสลายที่ง่ายกว่าแต่อาจให้พลังงานน้อย นอกจากนี้ไนโตรเจน และกำมะถัน การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ มีผลต่อศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ และ อาจทำให้เกิดการปล่อยแก๊สเป็นพิษ หรือมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น ไนโตรเจนอาจก่อให้เกิดแก๊สแอมโมเนียหรือไนโตรเจนออกไซด์ ในขณะที่กำมะถันอาจก่อให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ช่วยให้สามารถประเมินประสิทธิภาพ และศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบกระบวนการทางเทคนิค และการบริหารจัดการวัสดุชีวมวล เพื่อให้ได้ผลผลิตจากแก๊สชีวภาพที่ดีที่สุด การเลือกใช้วัสดุชีวมวลที่มีส่วนประกอบที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ และลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมได้

**ตารางที่ 4.3** ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเส้นใยมูลช้าง ถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพข้างผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ชื่อตัวอย่าง	Ultimate analysis (%wt, dry basis)				
	Hydrogen	Carbon	Nitrogen	Sulfur	Oxygen
	(%wt, dry basis)				
เส้นใยมูลช้าง	1.5±2.7	36.4±2.8	0.6±0.1	0.2±0.0	61.3±2.9
ถ่านชีวภาพมูลช้าง	2.6±2.5	50.2±2.7	1.9±0.0	0.32±0.0	44.98±2.4
ถ่านชีวภาพข้างผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ระบบ UASB	6.0±2.6	41.0±2.6	0.9±0.1	0.52±0.1	51.58±2.5
ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (กะลามะพร้าว)	0	89.88±2.4	1.07±0.1	0.19±0	8.84±2.8

ชื่อเครื่องมือ : Elemental analyzer, J-science, JM10 and Carbon/Sulfur analyzer, Horiba, Emia-220 V2

## ผลการวิเคราะห์ถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

### 1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

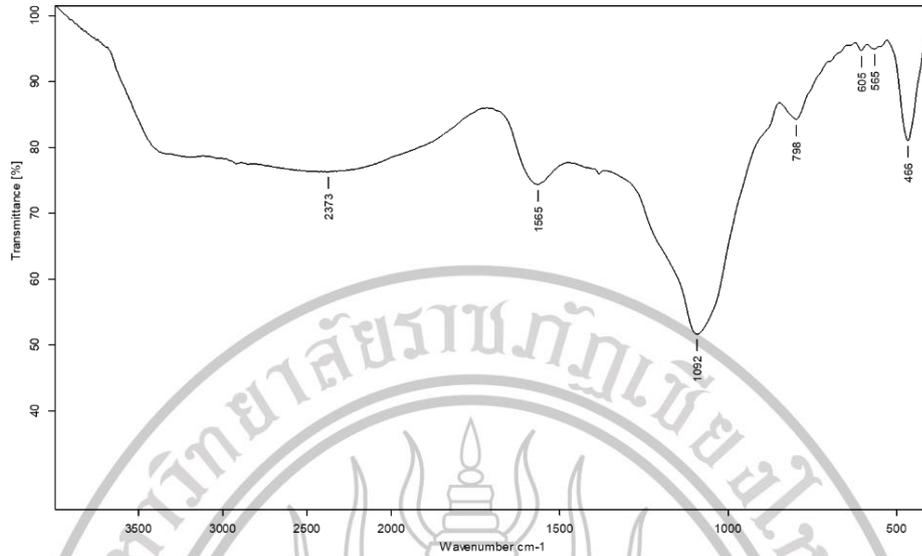
1.1. ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยเครื่อง Belsorp, mini II surface analyzer โดยใช้ BET-method ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพจากมูลช้างจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ  $193.18 \text{ m}^2/\text{g}$  มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ  $2.76 \text{ nm}$  และรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $948.86 \text{ m}^2/\text{g}$  มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ  $1.05 \text{ nm}$  พื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงในระบบแก๊สชีวภาพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะและการทำงานของแบคทีเรีย ซึ่งสำคัญต่อการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์และการผลิตแก๊สชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของมูลช้าง ถ่านชีวภาพมูลช้าง และ ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ชื่อตัวอย่าง	BET surface area ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	Total pore volume ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	Average pore diameter (nm)
ถ่านชีวภาพมูลช้าง	193.18	0.13	2.76
ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า	948.86	0.41	1.05

ชื่อเครื่องมือ : specific surface area analyzer (BET), Belsorp, mini II

1.2. ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง จากสเปกตรัม FT-IR ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการระบุสารประกอบโมเลกุล และพันธะเคมีภายในตัวอย่างของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และการวิเคราะห์สเปกตรัม FT-IR เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการระบุหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ ซึ่งมีต่อกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ การวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านชีวภาพมูลช้างก่อนการหมักพบความถี่ในสเปกตรัม ซึ่งแต่ละความถี่สามารถบอกถึงความสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่สามารถมีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพได้ ดังนี้



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัม FT-IR ของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

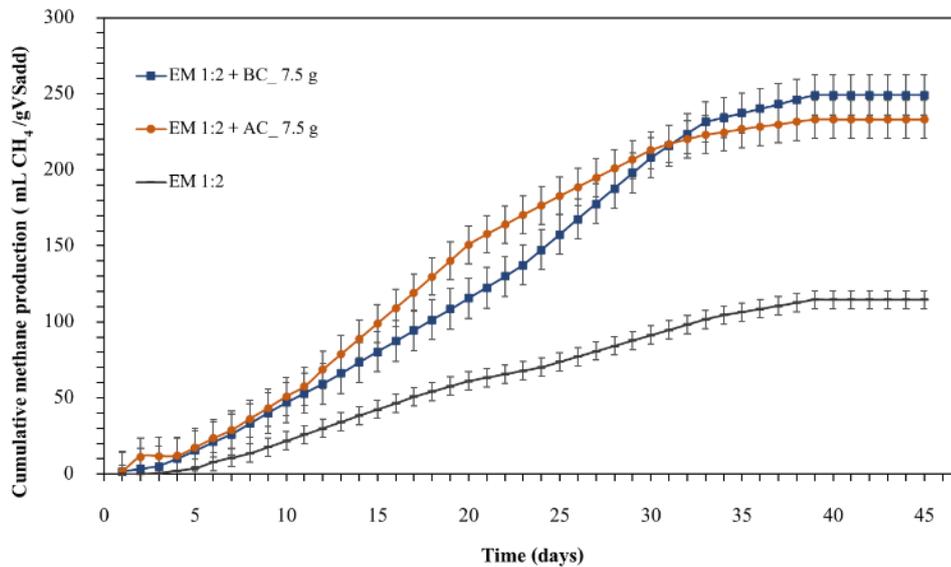
จากภาพที่ 4.1 แสดง IR spectra ของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง วิเคราะห์โดยใช้ด้วยใช้ด้วยเครื่อง FTIR เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนไปของมูลช้าง เมื่อถูกกระตุ้นให้เป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้ KBr พบว่า IR-spectra ของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชัน Amide II ที่พิกัด  $1,555\text{ cm}^{-1}$  พันธะ C-H ที่พิกัด  $2,373\text{ cm}^{-1}$  (C-H stretching vibration) พันธะนี้มีอยู่ในสารอินทรีย์หลายชนิด และเป็นแหล่งที่มาหลักของไฮโดรเจนที่จำเป็นในการผลิตแก๊สมีเทน และที่พิกัด  $1,092\text{ cm}^{-1}$  ฟังก์ชันที่มีพันธะ C-O หมู่พบในแอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ เคตอน กรดคาร์บอกซิลิก และเอสเทอร์ จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายพันธะ C-O ซึ่งมีบทบาทในกระบวนการสลายสารอินทรีย์ เพื่อผลิตแก๊สมีเทนได้ นอกจากนี้ยัง พบว่า ที่พิกัด  $798\text{ cm}^{-1}$  สามารถพบในโครงสร้างอะโรเมติกหรือ Si-O stretching แสดงที่พิกัด  $605\text{ cm}^{-1}$  และ  $555\text{ cm}^{-1}$  ที่อาจมีความสัมพันธ์กับพันธะโลหะ-ซัลเฟอร์หรือโลหะ-คาร์บอน และที่พิกัด  $466\text{ cm}^{-1}$  ที่ไม่มีผลโดยตรงในการผลิตแก๊สชีวภาพ จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามีหมู่ฟังก์ชันเกี่ยวข้องกับการผลิตแก๊สชีวภาพเกิดขึ้น 2 หมู่ คือ พันธะ C-O และ พันธะ C-H (Reza et al., 2019)

การวิเคราะห์ศึกษาหมู่ฟังก์ชันกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมักสามารถช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ โดยการเลือกใช้วัตถุดิบที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสม สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตแก๊สมีเทน และลดปริมาณการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบได้ การศึกษานี้มีศักยภาพในการให้ข้อมูลเชิงลึกในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการหมักสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ

## 2. ผลการทดสอบศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

2.1. วิธีการประเมินศักยภาพทางการผลิตแก๊สมีเทน โดยใช้วิธีการประเมินศักยภาพทางการผลิตแก๊สมีเทน (biochemical methane potential, BMP) ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้วิธีการทดสอบการตามมาตรฐาน VDI 4630 (Koch, Hafner, Weinrich, Astals, & Holliger, 2020) โดยการทำการทดลองแบบกะในขวดแก้วขนาด 1000 มิลลิลิตร ปริมาตรใช้จริง 400 มิลลิลิตร โดยมีการเติมวัสดุรองรับถ่านชีวภาพจากมูลช้าง BC และถ่านกัมมันต์ทางการค้า AC ที่ 7.5 g/L ซึ่งเติมน้ำชะมูลช้าง และหัวเชื้อ ในอัตราส่วน 0.5 (g VS-based). และทำการปรับปริมาตรโดยการเติมอาหารเสริมเท่ากับ 400 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ  $7.01 \pm 0.1$  ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 นอร์มอล (N) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มอล (N) และทำการใส่แก๊สออกซิเจนภายในขวดออกด้วยการเติมแก๊สอาร์กอนเข้าไปแทนที่ขวดละ 5 นาที เพื่อให้ขวดอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน ปิดฝาขวดทดลองด้วยจุกยางแล้วปิดด้วยฝาอะลูมิเนียมนำไปตั้งไว้ที่อุณหภูมิ  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วัน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ติดตามผลการทดลอง

วัดปริมาตรของแก๊สทั้งหมดที่เกิดขึ้น และใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณอัตราการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดในการทดลองนี้ คือสมการ modified gompertz model เพื่ออธิบายถึงการผลิตแก๊สมีเทนของน้ำชะมูลช้างในระบบกะ ภายใต้สภาวะแบบไม่ใช้ออกซิเจน การสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการเจริญเติบโตของประชากรแบคทีเรีย โดยมีตัวช่วยในการวิเคราะห์หาค่าศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน ดังนี้ EM 1:2 + BC 7.5 g: กระบวนการหมักที่ใช้น้ำชะมูลช้างในอัตราส่วน 1:2 และเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้าง (BC) ที่ 7.5 g/L ส่วน EM 1:2 + AC 7.5 g น้ำชะมูลช้างในอัตราส่วน 1:2 และเติมถ่านกัมมันต์การค้า (AC) ที่ 7.5 g/L และ EM 1:2 คือ หมักที่ใช้น้ำชะมูลช้างในอัตราส่วน 1:2 ไม่มีวัสดุรองรับ



ภาพที่ 4.2 ผลผลิตแก๊สมีเทนสะสม

จากภาพที่ 4.2 แสดงถึงการผลิตแก๊สมีเทนสะสม (cumulative methane production) ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งมีวัสดุรองรับเป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้างและถ่านกัมมันต์เกรดการค้า ในหน่วย (mLCH<sub>4</sub>/gVSadd) ระยะเวลาทดสอบ 45 วัน จากการทดลองพบว่า ช่วงแรกของการทดลอง 0-15 วัน ของการผลิตแก๊สมีเทนสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วสำหรับทั้ง 3 เงื่อนไข โดยการทดลองแสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่ดีในช่วงแรกของการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน การหมักแบบไม่มีการเติมวัสดุรองรับ แสดงให้เห็นถึงการเริ่มย่อยสลายวัสดุที่ยากต่อการย่อยสลาย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านกัมมันต์เกรดการค้า แสดงให้เห็นถึงการผลิตแก๊สมีเทนสะสมที่สูงกว่าแบบไม่มีการเติมวัสดุรองรับ โดยศักยภาพทางการผลิตแก๊สมีเทนเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า และไม่มีการเติมวัสดุรองรับ มีค่าเท่ากับ 249.18 231.4 และ 114.7 mL/gVSadd ตามลำดับ โดยการเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีค่ามากกว่าที่เติมถ่านกัมมันต์เกรดการค้า แต่ในขณะที่ช่วงสุดท้ายการหมักหลังจาก 35 วัน พบว่าการผลิตแก๊สมีเทนสะสมในทุกเงื่อนไขมีการชะลอลง เนื่องจากไม่มีสารอาหารของวัตถุดิบในการย่อยสลาย

ผลการทดลองนี้จะเห็นว่าการเติมวัสดุรองรับที่มีคาร์บอนสูงสามารถช่วยเสริมการผลิตแก๊สมีเทนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นผลมาจากการที่ถ่านชีวภาพจากมูลช้างและถ่านกัมมันต์เกรดการค้า มีพื้นที่ผิวสำหรับจุลินทรีย์ได้ยึดเกาะ และอาจช่วยดูดซับสารที่ยับยั้งการหมักแก๊สมีเทน ทำให้การหมักมีความเสถียรภาพ และสามารถส่งผลต่อการผลิตแก๊สมีเทนที่สูงขึ้น

2.2. หาค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณอัตราการผลิตแก๊สสูงสุดในการทดลองนี้ คือสมการ modified gompertz model เพื่ออธิบายถึงการผลิตแก๊สชีวภาพของน้ำชะมูลช้าง โดยมีวัสดุรองรับถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และกัมมันต์เกรดการค้าในหมักแบบกะ ภายใต้สภาวะแบบไม่ใช้ออกซิเจน การสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการเจริญเติบโตของประชากรแบคทีเรีย และดังนั้นการผลิตแก๊สชีวภาพในบ่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถจำลองได้โดยแบบจำลอง gompertz สมการดังกล่าวจะใช้เพื่อหาเส้นโค้งที่เหมาะสมของผลการทดลอง และวิธีการใช้สมการดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชัน solver ใน Microsoft excel

ตารางที่ 4.5 วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า และไม่มีวัสดุรองรับ ที่ใช้ในการผลิตแก๊สมีเทน

ตัวอย่าง	$M(\text{mL/gVS}_{\text{added}})$	$R_m (\text{mL/gVS}_{\text{added-d}})$	$\lambda(\text{d})$	$R^2$
EM 1:2 + BC_ 7.5 g	294.6	10.4	6.2	0.9963
EM 1:2 + AC_ 7.5 g	243.3	8.92	5.5	0.9958
Elephant manure 1:2	129.4	4.1	5.3	0.9954

การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้สมการ modified gompertz model เพื่อคำนวณอัตราการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดจากการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนของน้ำชะมูลช้าง สมการนี้เป็นเครื่องมือในการศึกษาการเจริญเติบโตของกลุ่มแบคทีเรีย และการผลิตแก๊สชีวภาพในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้าง พบว่า ได้เพิ่มการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุด (BMP) ที่มีการเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ซึ่งมีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า และมีค่า  $R_m$  ที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า และไม่มีวัสดุรองรับ

การเติมถ่านกัมมันต์เกรดการค้า พบว่ามีผลทำให้มีการเร่งอัตราการผลิตแก๊สมีเทนในช่วงเวลาหนึ่ง แสดงดังภาพที่ 4.2 นอกจากนี้ระยะเวลาการหมักที่สั้นกว่าการไม่มีวัสดุรองรับ ค่า  $R^2$  ที่สูงใกล้เคียง 1 กันทุกเงื่อนไข โดยแสดงถึงความเหมาะสมที่ดีของแบบจำลอง Gompertz กับข้อมูล

ที่ได้ ซึ่งสมการนี้สามารถใช้อธิบายการผลิตแก๊สมีเทนที่มีวัฏธรรองรับในการผลิตแก๊สมีเทนได้เป็นอย่างดี

การผลิตแก๊สมีเทนเป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตพลังงานหมุนเวียน ซึ่งสามารถช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยงานวิจัยที่มีการเพิ่มถ่านชีวภาพ 5-10 g/L (Johnravindar et al., 2022) ในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทน สามารถลดเวลาระยะหน่วงได้ 33-42% (Sugiarto et al., 2023) นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มการเกิดเมทาโนเจนิซิส ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มปริมาณการผลิตแก๊สมีเทน นอกจากนี้การเติมถ่านกัมมันต์ 1-10 g/L ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพสามารถลดเวลาระยะให้การผลิตแก๊สมีเทนได้ถึง 46-85% (L. Jiang et al., 2023) ถ่านกัมมันต์มีผลต่อการสลายตัวของกรดไขมันระเหยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสปีชีส์โดยตรง (Direct Interspecies Electron Transfer, DIET) (Jiang, Shi, Zhang, & Luo, 2023) เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่สูงกว่า 20 g/L จะทำให้ได้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงสุด โดยเพิ่มขึ้น 33% เมื่อเทียบกับการย่อยลิกนินโมโนเมอร์ (Deng et al., 2023)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชีวภาพ รวมถึงความหนาแน่น ปริมาตรและขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวสัมผัส (SA) ค่า pH องค์ประกอบธาตุ เช่น กลุ่มหน้าที่ (เช่น C=O, C=O, COOH, OH และ NHx) ความนำไฟฟ้า (EC) และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ซึ่งคุณสมบัติของถ่านชีวภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ดี เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสใหญ่ ในขณะที่พื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านชีวภาพ (193.18 m<sup>2</sup>/g) ซึ่งต่ำกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (948.86 m<sup>2</sup>/g) การกระจายขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ในถ่านชีวภาพมีขนาดใหญ่และกว้างกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (1-4 μm) เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (1 μm) รูพรุนขนาดใหญ่ในถ่านชีวภาพมีสภาพแวดล้อมที่ดีกว่าสำหรับการเติบโตของจุลินทรีย์ โดยเป็นประโยชน์เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า ในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และการบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นต่าง แม้ว่าถ่านชีวภาพประกอบด้วยธาตุหลักเช่น คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ธาตุอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน (N) กำมะถัน (S) และฟอสฟอรัส (P) รวมถึงธาตุโลหะต่างๆ เช่น โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) ฯลฯ มีอยู่ในถ่านชีวภาพ ซึ่งธาตุที่กล่าวมา มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกลุ่ม อัตราส่วนของ H/C, O/C และ N/C กำหนดปริมาณกลุ่มออกซิเจนและไนโตรเจนในถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพมีทั้งกลุ่มหน้าที่ที่มีประจุลบและประจุบวก และ CEC ของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นเนื่องจากการดึงดูดของกลุ่มหน้าที่ที่มีประจุลบ ได้แสดงให้เห็นว่า EC ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.002 ถึง 23.8 dS/m สูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (3 ± 0.327 dS/m) ภายใต้เงื่อนไขบาง

ประการ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ต้องศึกษาและประยุกต์ใช้ต่อไปของถ่านชีวภาพ โดยสรุป คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ความมีรูพรุนสูง พื้นที่ผิวสัมผัสที่มาก ความนำไฟฟ้าที่ดี และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดี ทำให้ถ่านชีวภาพสามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบ ตัวยึดเกาะให้กับแบคทีเรียในระบบ และเป็นตัวบัพเฟอร์ รวมถึงเป็นสารเติมแต่งเพื่อการถ่ายโอนอิเล็กตรอนสำหรับการบำบัดมลพิษในน้ำ ซึ่งจากการประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของถ่านชีวภาพอย่างครอบคลุมเพื่อนำไปประยุกต์กับงานด้านอื่นๆ

### ผลการวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (Biological Methane Potential)

#### ผลการวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนของน้ำมูลช้างต่อน้ำ

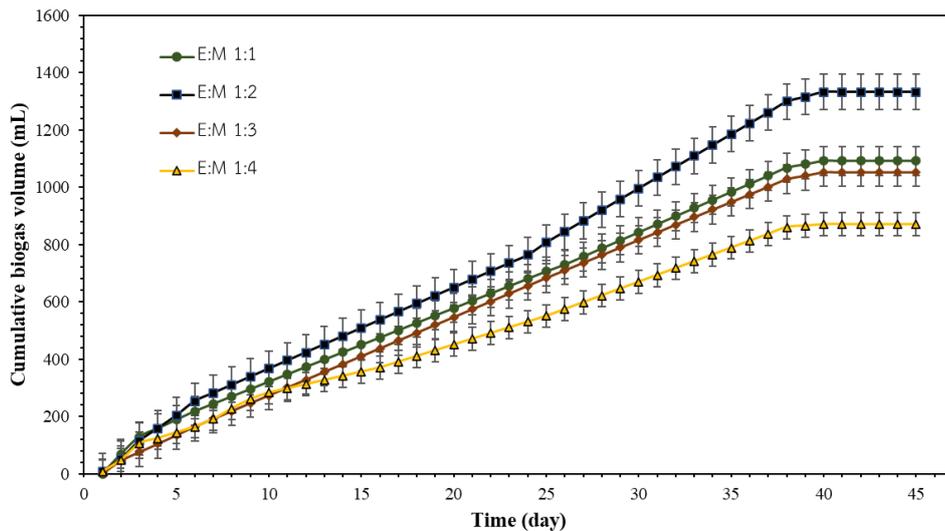
ระบบหมักแบบกะหรือแบบซ์ 2 การทดลอง โดยทำการทดสอบศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) เป็นวิธีการทดสอบที่สำคัญในการประเมินความสามารถของสารอินทรีย์ที่จะถูกย่อยสลาย และแปลงเป็นแก๊สมีเทนในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน การทดสอบนี้ทำให้สามารถประเมินการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในระยะเวลาหนึ่ง ช่วยในการออกแบบ และปรับปรุงระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้โดยแบบจำลอง gompertz สมการดังกล่าวจะใช้เพื่อหาเส้นโค้งที่เหมาะสมของผลการทดลอง และวิธีการใช้สมการดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชัน solver ใน Microsoft excel

ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของระบบการผลิตแก๊สชีวภาพของน้ำชะมูลช้างต่อน้ำประสิทธิภาพในการเดินระบบผลิตแก๊สชีวภาพที่อัตราส่วนน้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ได้แก่ 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 kg/kg ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของตัวอย่างก่อนและหลังการผลิตแก๊สชีวภาพประกอบไปด้วย ค่าของแข็งทั้งหมด (TS) ค่าของแข็งระเหยง่าย (VS) ค่าซีโอดีก่อนและหลังการผลิตแก๊สชีวภาพ และค่ากำจัดซีโอดี ( $COD_{re}$ ) แสดงดังตารางที่ 4.6 วิเคราะห์ผลตาม APHA (2005)

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ก่อนและหลังการผลิตแก๊สชีวภาพ

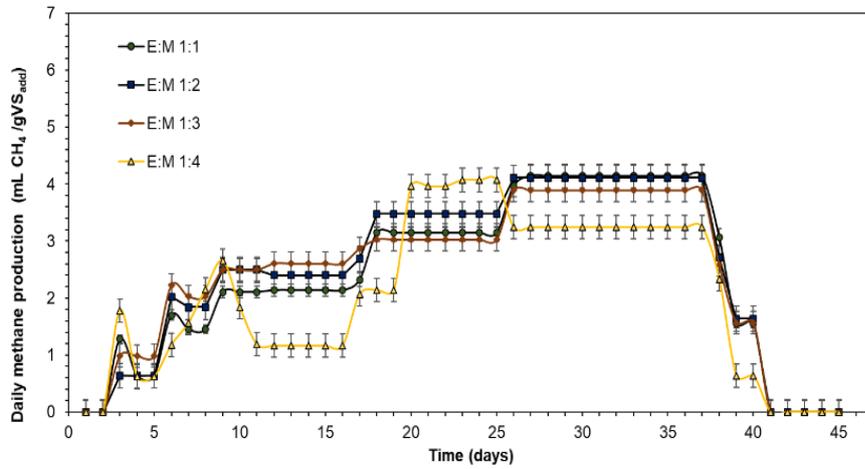
ตัวอย่าง	TS <sub>in</sub> (mg/l)	TS <sub>out</sub> (mg/l)	VS <sub>in</sub> (mg/l)	VS <sub>out</sub> (mg/l)	COD <sub>in</sub> (mg/l)	COD <sub>out</sub> (mg/l)	COD <sub>re</sub> %
E:M 1:1	27,370±452	20,585±177	17,450±424	13,705±318	24,222±314	8,667±314	64.2
E:M 1:2	25,940±212	16,380±170	16,445±474	9,900±297	22,111±157	5,503±144	75.1
E:M 1:3	21,785±346	16,320±113	13,440±354	9,138±322	19,778±314	11,516±288	41.8
E:M 1:4	16,385±389	10,673±166	12,270±297	7,438±251	17,222±157	13,656±144	20.7

จากตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์น้ำชะมูลช้างต่อน้ำเข้าและออกระบบ ที่ระยะเวลาในการหมัก 45 วัน โดยการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างต่อน้ำที่ 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 kg/kg นำประสิทธิภาพไปทดสอบทางสถิติ One-Way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ในการหาข้อมูลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ในการกำจัดค่าของ TS และ VS ในระบบ แต่ในขณะที่อัตราส่วนน้ำชะมูลช้างต่อน้ำที่ 1:2 มีค่าการกำจัดซีโอดีสูงสุดอยู่ที่ 75.11% ซึ่งจากการที่ระบบมีการกำจัดค่าซีโอดีที่สูงมีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพที่ดี เนื่องจากในระหว่างการหมักจุลินทรีย์ได้เกิดการย่อยสลายสารวัสดุตั้งต้นที่มีอยู่ในกระบวนการเพื่อเปลี่ยนเป็นแก๊สชีวภาพ ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Kafle & Chen, 2016) และ (Kafle & Kim, 2013) ที่สามารถผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อมีการกำจัดค่าซีโอดีที่สูงจาก 0.50 m<sup>3</sup>/kg VS เป็น 0.75 m<sup>3</sup>/kg VS และค่ากำจัดซีโอดีอยู่ที่ 41.1% เป็น 85.0% ตามลำดับ

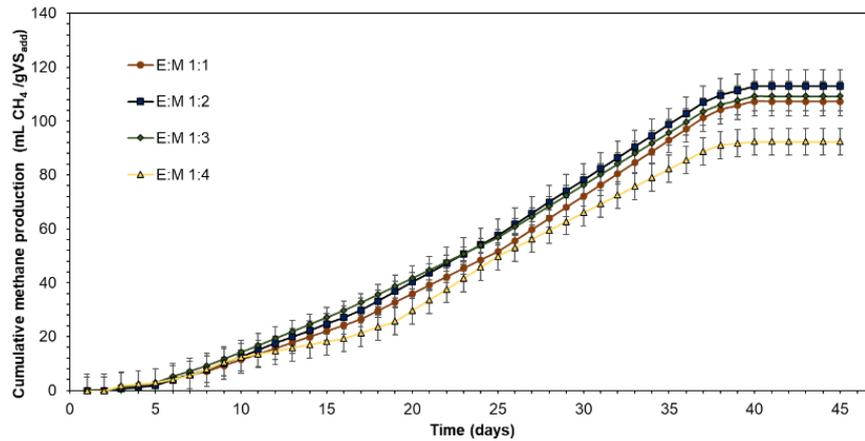


ภาพที่ 4.3 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่น้ำชะมูลช้างต่อน้ำ

การผลิตแก๊สชีวภาพต้องมีการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น โดยทำการวัดปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมจนกว่าค่าคงที่ โดยระบบสิ้นสุดที่ระยะเวลา 45 วัน จากการศึกษารายปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมของการหมักน้ำชะมูลช้างต่อน้ำในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 kg/kg ผลการวิจัยพบว่า มีค่าปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมเท่ากับ 1,092.17 1,332.67 1,052.33 และ 870.26 mL ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.3 ซึ่งการผลิตแก๊สชีวภาพสะสมของอัตราส่วนน้ำชะมูลช้างต่อน้ำ 1:2 w/w สามารถผลิตแก๊สชีวภาพสะสมสูงที่สุด เนื่องจากการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีการลดปริมาณของเสียอินทรีย์ในระบบ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.4 ปริมาณแก๊สมีเทนทุกรายวัน (ก) และปริมาณแก๊สมีเทนสะสม (ข)

การทดลองพบว่า การเกิดแก๊สมีเทนจะเกิดขึ้นสูงสุดในช่วงวันที่ 26 ของการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน และปริมาณแก๊สมีเทนจนสิ้นสุดการผลิตในวันที่ 37 ของการหมัก แสดงดังภาพที่ 4.4 (ก) การสะสมแก๊สมีเทนจากการหมักโดยใช้อุณหภูมิ 37°C ได้แก่ 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 kg/kg มีค่าเท่ากับ 107.4 113.0 109.3 และ 92.37 mLCH<sub>4</sub>/gVS<sub>added</sub> ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.4 (ข) โดยมีค่าความเข้มข้นของแก๊สมีเทนสูงสุด 42 48 45.6 และ 41% ตามลำดับ

อ้างอิงจากประสิทธิภาพการแปลงพลังงานคำนวณจากความหนาแน่นและค่าความร้อนของแก๊สมีเทน การผลิตแก๊สมีเทนไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของวัตถุดิบ แต่ยังมีปัจจัยที่หลากหลายในการผลิตแก๊สมีเทนจากกระบวนการย่อยสลายไม่ใช้ออกซิเจน เช่น ศักยภาพการย่อยสลายของ

จุลินทรีย์ในวัตถุดิบตั้งต้น ความเข้มข้นของวัตถุดิบ อุณหภูมิในการหมัก เป็นต้น โดยวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสามารถในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ซึ่งวัตถุดิบที่ย่อยสลายได้ง่ายจะให้ผลผลิตมีเทนที่สูง โดยอัตราส่วนน้ำชะมูลช้างต่อน้ำ 1:2 w/w มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 75.1% ซึ่งแสดงถึงปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในวัตถุดิบไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ มีผลต่อการผลิตแก๊สมีเทนที่ดี

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของน้ำชะมูลช้างต่อน้ำ

	$M$ (mL/gVSadd)	$R_m$ (mL/gVSadd-d <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (d)	$R^2$
EM 1:1	147.78	3.73	10.23	0.9954
EM 1:2	148.78	3.94	9.61	0.9963
EM 1:3	145.50	3.65	8.46	0.9959
EM 1:4	119.54	3.35	10.03	0.9938

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของน้ำชะมูลช้างต่อน้ำที่แตกต่างกัน คือ EM 1:1 EM 1:2 EM 1:3 และ EM 1:4 มีค่าปริมาณแก๊สที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 147.78 148.78 145.50 และ 119.54 mL/gVSadd ตามลำดับ ซึ่งค่า  $M$  ที่สูงที่สุดอยู่ที่ EM 1:2 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการผลิตแก๊สมีเทน นอกจากนี้ค่า  $R_m$  คืออัตราการผลิตแก๊สสูงสุดต่อวัน โดยการทดลองพบว่า อัตราการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุด ( $R_m$ ) มีค่าสูงสุดใน EM 1:2 มีค่าเท่ากับ 3.94 mL/gVSadd-d<sup>-1</sup> การเพิ่มอัตราส่วน EM ที่มีการเจือจางด้วยน้ำมากเกินไปอาจลดประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนได้ นอกจากนี้ระยะเวลาในการเริ่มต้นการผลิตแก๊สมีเทน ( $\lambda$ ) ของระบบหมักแบบกะของน้ำชะมูลช้างต่อน้ำที่แตกต่างกัน พบว่าค่า  $\lambda$  ที่ต่ำสุดคือ ค่า EM 1:3 แสดงถึงการเริ่มต้นการผลิตแก๊สที่เร็วที่ในการผลิตแก๊สมีเทน อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาค่านี้ร่วมกับค่าอื่นๆ เช่น  $M$  และ  $R_m$  สำหรับการประเมินประสิทธิภาพทั้งหมด ซึ่งจากการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย ( $R^2$ ) ซึ่งที่ค่า  $R^2$  สูงแสดงถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูล ทุกการทดลองมีค่า  $R^2$  ที่ใกล้เคียงกับ 1 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ที่กระหว่างข้อมูลทดลองกับ โมเดลทางสถิติ ในงานวิจัยนี้จึงเลือก EM 1:2 มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในแง่ของการผลิตแก๊สมีเทน (ทั้งค่า  $M$  และ  $R_m$ ) ในการหาศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนของน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพมูลช้างต่อไป ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลช้างในหลายการศึกษา Mainkaew et al. พบว่า มูลช้างมีค่าความร้อนสูง (HHV) 17 MJ/kg และให้ผลผลิตของแข็ง 79% (Babatunde, Tilli, & Mbini,

2022) การศึกษาเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลช้าง ซึ่งสามารถนำไปสู่แหล่งพลังงานหมุนเวียนได้

การทดลองที่มีการใช้ EM ในอัตราส่วนต่างๆ (EM 1:1 EM 1:2 EM 1:3 และ EM 1:4) ในการผลิตแก๊สมีเทนจากน้ำชะมูลช้าง  $p < 0.05$  ซึ่งให้เห็นว่าอย่างน้อยหนึ่งคู่ของกลุ่มตัวอย่างมีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ. หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำชะมูลช้างต่อน้ำ ในการทดลองมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลลัพธ์ของการผลิตแก๊สมีเทน  $p < 0.05$  ในการวิเคราะห์ One-Way ANOVA ของการทดลองนี้ บ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำชะมูลช้างต่อน้ำ มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการผลิตแก๊สมีเทนจากน้ำชะมูลช้าง ความแตกต่างของการทดลองเป็นส่วนสำคัญในการนำข้อมูลไปใช้ในการพัฒนากระบวนการที่มีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้มีการต่อยอดโดยการนำถ่านชีวภาพจากมูลช้าง เพื่อใช้เป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์มีพื้นที่ยึดเกาะภายในระบบ และสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สชีวภาพ ซึ่งจะได้ทดลองในส่วนของการหาศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนของน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้างต่อไป

#### ผลการหาศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนของน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

##### 1. ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของตัวอย่างก่อนและหลังการผลิตแก๊สชีวภาพ

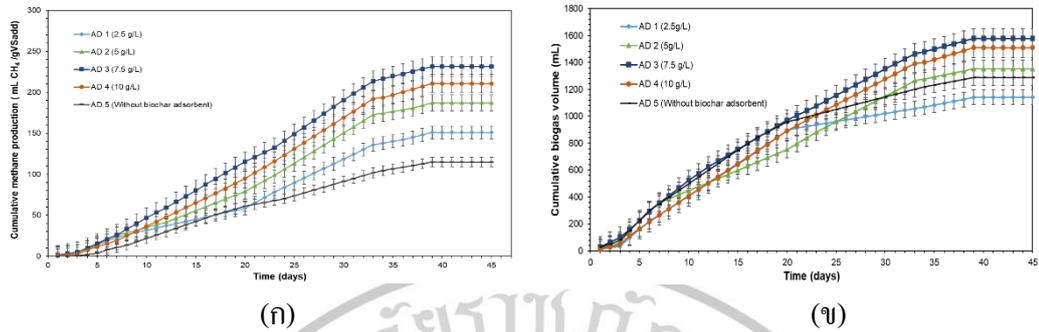
ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของตัวอย่างประกอบไปด้วย ค่าของแข็งทั้งหมด (TS) ค่าของแข็งระเหยง่าย (VS) ค่าซีโอดีก่อนและหลังการผลิตแก๊สชีวภาพ และค่ากำจัดซีโอดี (COD<sub>re</sub>) แสดงดังตารางที่ 4.8 จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์การผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งการผลิตแก๊สชีวภาพมีการกำจัดค่าซีโอดีในระบบหลังการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ นอกจากนี้การลดค่า COD สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำที่เกิดจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ และสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพในการศึกษา พบว่าการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำชะมูลช้างกับถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่มีการผลิตแก๊สชีวภาพ ทั้ง 5 เงื่อนไขมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยเฉพาะเงื่อนไข AD3 (7.5 g/L) ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการทดลองนี้ ด้วยการกำจัด COD ที่ 88.1% แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ก่อนและหลังการผลิตแก๊สชีวภาพ

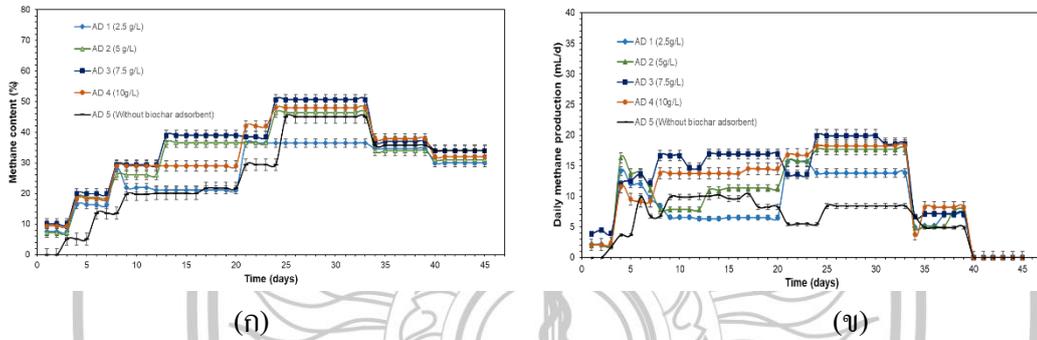
ตัวอย่าง	TS <sub>in</sub> (mg/L)	TS <sub>out</sub> (mg/L)	VS <sub>in</sub> (mg/L)	VS <sub>out</sub> (mg/L)	COD <sub>in</sub> (mg/L)	COD <sub>out</sub> (mg/L)	COD <sub>re</sub> %
AD 1 (2.5g/L)	28,235 ± 190.9	10,178 ± 187.4	17,530 ± 113.1	8,568 ± 166.17	29,257 ± 323.3	5,503 ± 144.1	81.2
AD 2 (5g/L)	31,925 ± 120.2	13,090 ± 120.2	19,050 ± 113.1	10,300 ± 134.4	30,743 ± 161.6	5,401 ± 288.2	82.4
AD 3 (7.5g/L)	34,175 ± 360.6	22,503 ± 95.5	20,095 ± 275.8	11,980 ± 113.1	34,171 ± 161.6	4,076 ± 144.1	88.1
AD 4 (10g/L)	38,015 ± 152.0	22,403 ± 152.0	21,853 ± 187.4	12,940 ± 162.6	40,914 ± 323.3	9,580 ± 144.1	76.6
AD 5	19,930 ± 70.7	7,033 ± 102.5	16,695 ± 176.8	3,893 ± 109.6	22,742 ± 161.6	6,522 ± 144.1	71.3

2. ผลการหาคักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่อัตราส่วนน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

ผลการทดสอบหาคักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน (Biochemical Methane Potential : BMP) โดยระบบหมักแบบกะ ซึ่งการหาคักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่อัตราส่วนน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่แตกต่างกัน ได้แก่ AD1 (2.5g/L) AD2 (5g/L) AD3 (7.5g/L) AD4 (10g/L) และ AD5 (ไม่มีถ่านชีวภาพจากมูลช้าง) โดยหมักแบบกะ ทำการทดลองเป็นเวลา 45 วัน โดยการทดลองพบว่า ปริมาณของแก๊สชีวภาพสะสมและแก๊สมีเทนสะสมของน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่แตกต่างกัน AD1 (2.5g/L) AD2 (5 g/L) AD3 (7.5g/L) AD4 (10 g/L) และ AD5 (ไม่มีถ่านชีวภาพจากมูลช้าง) สามารถผลิตแก๊สชีวภาพสะสม เท่ากับ 1,140 1,353 1,577.67 1,509.33 และ 1,288 mL ตามลำดับ และแก๊สมีเทนสะสม เท่ากับ 150.91 187.28 231.44 210.46 และ 114.70 mLCH<sub>4</sub>/gVSadd ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม (ก) และปริมาณแก๊สมีเทนสะสม (ข)



ภาพที่ 4.6 การผลิตมีเทนรายวัน (ก) และปริมาณมีเทน (ข)

ภาพที่ 4.6 (ข) แสดงผลการวิจัย พบว่าการผลิตแก๊สมีเทนในแต่ละวัน (จุดสูงสุด) โดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่แตกต่างกัน ประกอบไปด้วย AD1 (2.5 g/L) AD2 (5 g/L) AD3 (7.5 g/L) AD4 (10 g/L) และ AD5 (ไม่มีถ่านชีวภาพจากมูลช้าง) มีค่าการผลิตแก๊สมีเทนรายวันอยู่ที่ 15.65 17.64 19.9 และ 18.24 mLCH<sub>4</sub>/gVS<sub>s</sub>add ตามลำดับ และมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทนอยู่ที่ 36.40% 46.43% 50.60% 48% และ 45% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.6 (ก) นอกจากนี้ความเข้มข้นของมีเทนก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่กลุ่ม AD3 (50.60%) และปริมาณแก๊สจะลดน้อยลงเมื่อถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่เติมในระบบมากกว่า 7.5 g/L สรุปได้ว่าการใช้ถ่านชีวภาพในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มปริมาณและความเข้มข้นของแก๊สมีเทนจากกระบวนการหมักได้ ซึ่งการทดลองเบื้องต้นสามารถแสดงถึงกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีวัสดุรองรับเป็นถ่านชีวภาพให้มี

ศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพที่สูงขึ้น ด้วยถ่านชีวภาพมีโครงสร้างที่มีรูพรุน การนำไฟฟ้าที่ดี และการปรับสมดุลในการค่าบัพเฟอร์ที่ดี

3. ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพมูลช้าง สามารถทราบถึงประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างกับถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่มีปริมาณที่แตกต่างกัน การทดลองนี้มีการใช้ถ่านชีวภาพมูลช้างใน 5 ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (AD1 ถึง AD5) โดย AD5 ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพ จากการทดลองพบว่า ค่า BMP แสดงถึงปริมาณแก๊สชีวภาพสูงสุดที่สามารถผลิตได้ต่อหน่วยวัสดุเพิ่มเข้าไป ซึ่งค่าที่สูงกว่าบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการผลิตแก๊สมีเทน จากตารางที่ 4.9 แสดงค่าสูงสุดคือ AD3 (231.4 mL/gVS<sub>add</sub>) และต่ำสุดคือ AD5 (114.7 mL/gVS<sub>add</sub>) ซึ่งค่า  $M$  แสดงถึงอัตราการผลิตแก๊สมีเทนเฉลี่ยที่สูง เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการผลิตแก๊สมีเทนอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงสุด คือ AD3 (270.3 mL/gVS<sub>add</sub>) และต่ำสุดคือ AD5 (129.4 mL/gVS<sub>add</sub>) โดยพบว่า  $R_m$  มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุด ซึ่งค่าที่สูงบ่งชี้ถึงความสามารถในการผลิตแก๊สมีเทนอย่างรวดเร็ว. สูงสุดคือ AD3 (8.1 mL/gVS<sub>add-d</sub>) และต่ำสุดคือ AD5 (4.1 mL/gVS<sub>add-d</sub>) และค่า  $\lambda$  เวลาที่ใช้ในช่วงการเริ่มต้นการผลิตแก๊สอย่างรวดเร็ว และใช้เวลาสั้นที่สุดคือ AD3 (5.2 วัน) และยาวที่สุดคือ AD4 (6.6 วัน) โดยทุกเงื่อนไขในการทดลองพบว่า มีค่า  $R_2$  ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คาดการณ์จากแบบจำลอง ค่าที่ใกล้เคียง 1 บ่งชี้ถึงความเที่ยงตรงของแบบจำลอง ทั้ง 5 ตัวอย่างมีค่า  $R_2$  สูง (>0.98) บ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ของของน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพมูลช้าง

ตัวอย่าง	BMP(mL/gVS <sub>added</sub> )	M(mL/gVS <sub>added</sub> )	$R_m$ (mL/gVS <sub>added-d</sub> )	$\lambda$ (d)	$R^2$
AD 1 (2.5g/L)	150.9	196.9	4.9	5.8	0.9895
AD 2 (5g/L)	187.3	232.3	6.4	6.3	0.9920
AD 3 (7.5g/L)	231.4	270.3	8.1	5.2	0.9961
AD 4 (10g/L)	210.5	249.7	7.5	6.6	0.9958
AD 5	114.7	129.4	4.1	5.3	0.9954

สรุปได้ว่า การเพิ่มถ่านชีวภาพมูลช้างส่งผลให้การผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยที่ AD3 (7.5 g/L) ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในทุกด้านที่พิจารณา อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณของถ่านชีวภาพมูลช้างมากเกินไป (เช่นใน AD4) อาจไม่ได้ให้ผลลัพธ์ที่ดี ส่วน AD5 ซึ่งไม่มีถ่านชีวภาพมี ประสิทธิภาพที่ต่ำที่สุดในการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งผลจากการทดลองนี้ นำไปสู่การทดลองส่วนที่ 3

โดยใช้ระบบ UASB เพื่อทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

**ผลของการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน**

เทคโนโลยีการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) มีบทบาทเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพอย่างมากในการลดปริมาณขยะ วัสดุอินทรีย์ พร้อมกับการผลิตพลังงานในรูปแบบของแก๊สชีวภาพ โดยแก๊สชีวภาพที่ได้มักประกอบด้วยแก๊สมีเทน 66.1% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 33.3% นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบของแก๊สอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน (0.5%) และออกซิเจน (0.1%) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่สำคัญต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ ได้แก่ การพิจารณาด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ วัสดุที่ใช้ และกระบวนการขนส่ง ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกำหนดผลประโยชน์ของระบบที่สามารถเปลี่ยนขยะเป็นพลังงานได้

ถังปฏิกรณ์หมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประกอบด้วย ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกวนต่อเนื่อง (CSTR) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นตะกอนจุลินทรีย์ใไรอากาศแบบไหลขึ้น (UASB) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นลอยตัวใไรอากาศ (AFBR) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบจานหมุนชีวภาพใไรอากาศ (AnRBC) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ขยายตัว (EGSB) ได้รับการนำมาใช้เป็นอย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบชั้นตะกอนจุลินทรีย์ใไรอากาศแบบไหลขึ้น (UASB) ได้รับการยอมรับว่าเหมาะสม และได้รับการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียหลายประเภท อาทิ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้ง น้ำเสียจากกระบวนการผลิตชีส น้ำเสียจากการแปรรูปมันฝรั่ง และน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยความนิยมดังกล่าวอาจเนื่องมาจากความยืดหยุ่น ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ และต้นทุนการบำรุงรักษาที่ต่ำ การศึกษาของ (Dutta, Davies, & Ikumi, 2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตแก๊สชีวภาพในถังปฏิกรณ์ UASB พบว่ามีปริมาณการผลิต  $1.15 \pm 0.21$   $1.16 \pm 0.22$  และ  $1.17 \pm 0.33$  L/day สำหรับค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ COD 10 5 และ 3 g/L และมีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนที่  $67.3 \pm 3.1\%$   $64.0 \pm 1.7\%$  และ  $61.3 \pm 1.6\%$  ตามลำดับ ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ การผลิตแก๊สชีวภาพที่  $1.15 \pm 1.17$  L/day นอกจากนี้มีงานวิจัยของ (Caixeta, Cammarota, & Xavier, 2002) ได้ประเมินถังปฏิกรณ์ UASB ที่มีระบบแยกสามขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสีย พบว่ามีการผลิตแก๊สชีวภาพ 11 L/day (STP) และประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD อยู่ระหว่าง 77% ถึง 91% โดยเฉลี่ย OLR อยู่ที่ 3.5 และ 6.5 kgCOD/m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>

ในงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (UASB) ถูกนำมาแก้ไขปัญหาทั้งด้านการจัดการขยะและการผลิตพลังงานทดแทน ปัญหาของมูลช้างที่สะสมเป็นขยะในบางพื้นที่เป็นการแก้ไข และได้รับประโยชน์จากการใช้มูลช้างเป็นถ่านชีวภาพในระบบ UASB ไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณขยะ ทั้งนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ยัง รวมถึงการวิเคราะห์ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่เหมาะสมสำหรับระบบ UASB เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่สูงสุดในการผลิตแก๊สชีวภาพ การศึกษาค่า OLR ที่เหมาะสมกับระบบเป็นส่วนสำคัญในการปรับปรุง และพัฒนากระบวนการนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยผลการทดลองสามารถนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนในอุตสาหกรรมจัดการขยะ และการผลิตพลังงานทดแทน ผลของการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

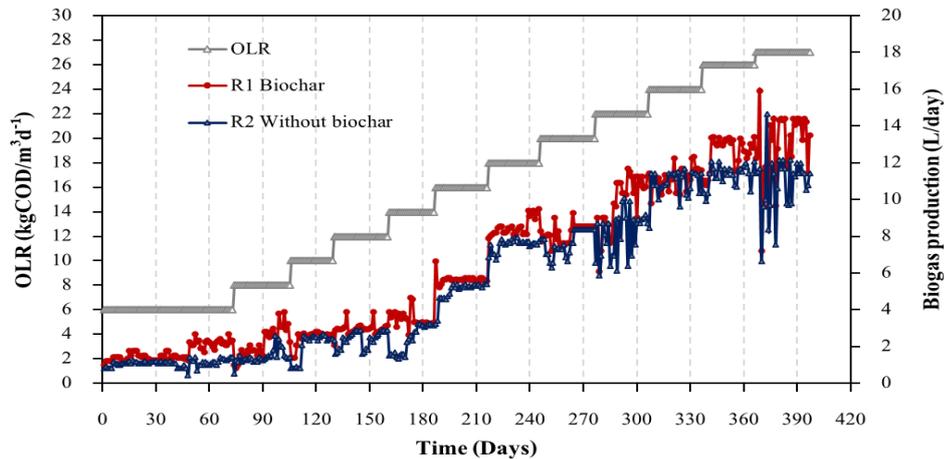
#### 1. ผลผลิตแก๊สชีวภาพ และแก๊สมีเทนในระบบ UASB

ภาวะสมดุลในการผลิตแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณและส่วนประกอบของแก๊สชีวภาพและแก๊สมีเทนมีค่าคงที่ หรือมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นภาวะสมดุลในระบบ งานวิจัยของ (Marcos, Al-Kassir, Cuadros, & Yusaf, 2017) ได้กล่าวถึง ภาวะสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณการผลิตแก๊สมีเทนคงที่และมีความต่อเนื่อง ภาพที่ 4.7 ภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9 แสดงถึงปริมาณแก๊สชีวภาพ สัดส่วนของแก๊สมีเทน และการผลิตแก๊สมีเทนเฉพาะในช่วงเวลาทั้งหมดของการเปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์ UASB R1 ถ่านชีวภาพ และ R2 ไม่มีถ่านชีวภาพ ซึ่งใช้เวลา 407 วัน การเปลี่ยนแปลงการเติมน้ำชะมูลช้างที่ปริมาณที่แตกต่างกันตามปริมาณค่าการเปลี่ยนแปลง OLR โดยการดำเนินการจากขั้นตอนหนึ่งไปอีกขั้นตอนหนึ่ง หลังจากที่มีการผลิตแก๊สชีวภาพได้อยู่ในภาวะสมดุลกับความแปรปรวนน้อยกว่า 5% ค่า OLR เริ่มต้นที่  $6 \text{ kgCOD/m}^3 \text{d}^{-1}$  ถูกเพิ่มขึ้นจนถึง  $27 \text{ kgCOD/m}^3 \text{d}^{-1}$  ซึ่งนำไปใช้เป็นเงื่อนไขในการทำการทดลองทั้งสองถึงปฏิกรณ์ ตามที่แสดงในภาพที่ 4.7 ที่ OLR 6 8 10 12 14 และ  $16 \text{ kgCOD/m}^3 \text{d}^{-1}$  มีการผลิตแก๊สชีวภาพในถังปฏิกรณ์ UASB R1 และ R2 อยู่ที่ 1.8 2.5 2.9 2.5 5.03 และ 5.6 L/d และ 1.21 2.1 2.4 2.4 3.5 และ 5.0 L/d ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของแก๊สมีเทนของถังปฏิกรณ์ R1 51.1% 50.1% 51.6% 52.7% 51.3% และ 61.3% ส่วนถังปฏิกรณ์ R2 มีค่าเท่ากับ 44.5% 48.5% 48.5% 47.1% 48.2% และ 52.8% (ภาพที่ 4.8)

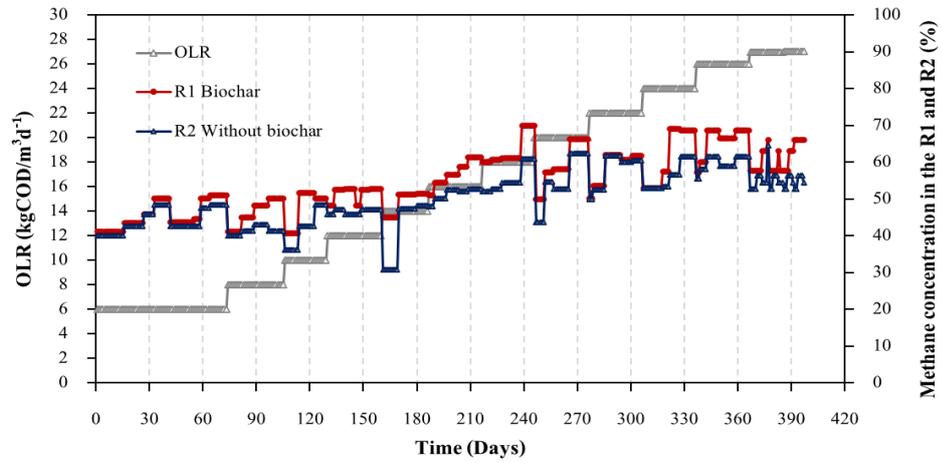
ในทำนองเดียวกันการผลิตแก๊สมีเทนปฏิกรณ์ UASB R 1 มีผลที่สอดคล้องกับ OLR พบว่า 0.029 0.036 0.041 0.055 0.064 และ 0.114  $\text{LCH}_4/\text{gCODadd}$  โดยถังปฏิกรณ์ UASB R2 มีค่า

เท่ากับ 0.018 0.021 0.031 0.041 0.039 และ 0.091  $\text{LCH}_4/\text{g COD}$  (ภาพที่ 4.9) การเพิ่ม OLR ถึง 18  $\text{kgCOD}/\text{m}^3\text{d}^{-1}$  ถึงปฏิกรณ์ R1 และ R2 มีค่าความเข้มข้นของแก๊สมีเทนสูงสุดคือ 70% และ 60.9% และมีการผลิตแก๊สมีเทนอยู่ที่ 0.17 และ 0.14  $\text{LCH}_4/\text{g COD}$  ตามลำดับ

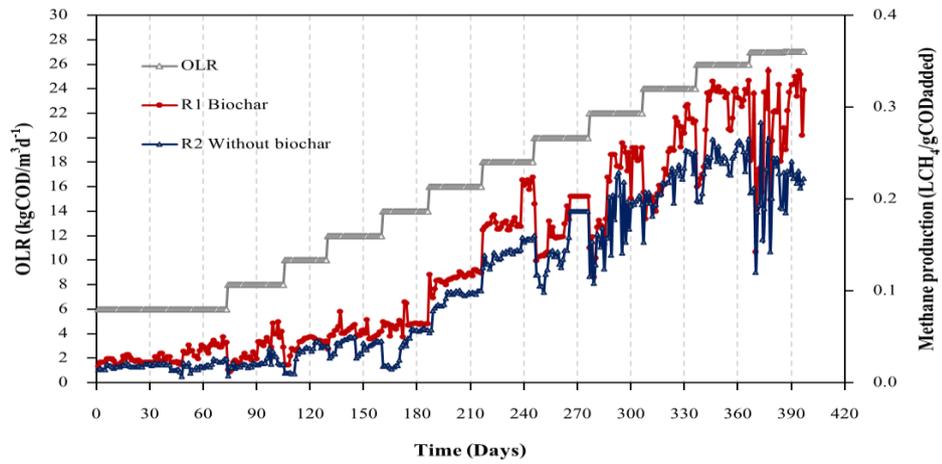
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า R1 มีค่าความเข้มข้นของแก๊สมีเทนที่สูงกว่า R2 ในช่วงเวลาที่เทียบได้ แสดงว่าการใส่ถ่านชีวภาพอาจช่วยเพิ่มการผลิตแก๊สมีเทน โดยการทดลองการประเมินผลของการใช้ถ่านชีวภาพในการผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งเป็นหนึ่งในผลผลิตหลักของกระบวนการหมักไร้อากาศในถังปฏิกรณ์ การมีความเข้มข้นของแก๊สมีเทนที่สูงขึ้นสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของกระบวนการหมัก



ภาพที่ 4.7 การผลิตแก๊สชีวภาพรายวันในช่วงระยะเวลาการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบถ่านชีวภาพ (R1) และไม่มีถ่านชีวภาพ (R2)



ภาพที่ 4.8 ความเข้มข้นของแก๊สมีเทน



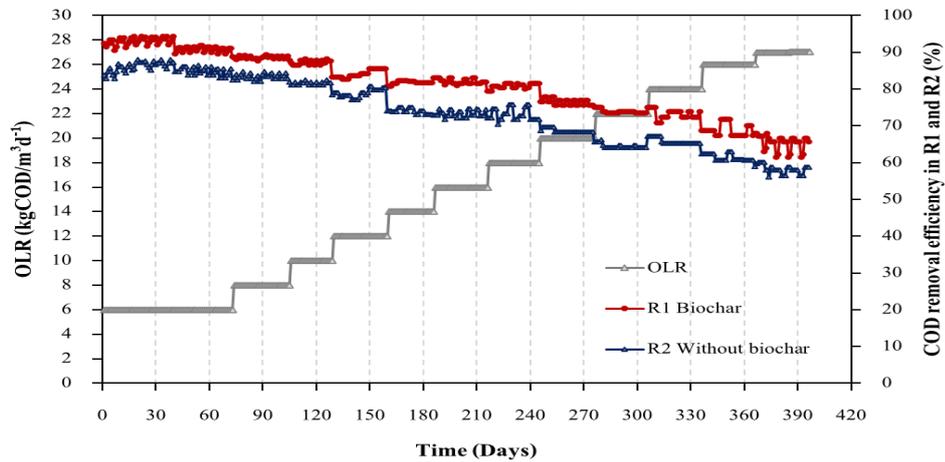
ภาพที่ 4.9 การผลิตแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์ R1 และ R2

## 2. ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของเครื่องปฏิกรณ์ R1 และ R2

การทดสอบประสิทธิภาพของการกำจัด COD ของการย่อยสลายในระบบ UASB ทั้งแบบ R1 มีถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และ R2 ไม่มีถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ได้ดำเนินการหมักแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 407 วัน โดยมีการวิเคราะห์การกำจัด COD ที่ OLR ต่างๆ ตามที่แสดงในภาพที่ 4.10 ทั้ง 2 ถังปฏิกรณ์ โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่  $35 \pm 2$  °C การเปลี่ยนแปลงของ OLR ตลอดระยะเวลาของการศึกษาอยู่ในช่วง  $6 \text{ kgCOD/m}^3\text{d}^{-1}$  ถึง  $27.06 \text{ kgCOD/m}^3\text{d}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องประสิทธิภาพการกำจัดของตัวย่อยสลาย R1 และ R2 ที่ OLR ต่ำ จะสามารถมีการกำจัดค่า COD เหลือ ที่มีค่ามากกว่า 90% ในถังปฏิกรณ์ R1 ที่ OLR เท่ากับ  $6-8 \text{ kgCOD/m}^3\text{d}^{-1}$  อย่างไรก็ตาม เมื่อ OLR เพิ่มขึ้นเป็น  $12 \text{ kgCOD/m}^3\text{d}^{-1}$  ถังปฏิกรณ์ R2 มีการกำจัดค่า COD ลดลงเมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ R1 ลดลงของการกำจัด COD เหลือเพียง 58.2% ที่ OLR ในขณะที่ตัวย่อยสลาย R1 สามารถรักษาการกำจัด COD ที่สำคัญถึง 92% ในสภาวะคงที่ ซึ่งการกำจัดค่า COD ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 70-90% ปัญหาที่เห็นในถังปฏิกรณ์ R2 อาจเกิดจากการชะล้างกลุ่มของชุมชนจุลินทรีย์ที่ต้องช่วยปรับสมดุลในระบบ ที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงของ OLR นอกจากนี้ การเกิดสคัมร่วมกับประชากรจุลินทรีย์ที่ไม่เพียงพอทำให้เกิดการลดลงของกิจกรรมจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ R2 เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ R1 นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในถังปฏิกรณ์ R1 ช่วยให้มีพื้นที่เพียงพอสำหรับการขยายตัวของประชากรจุลินทรีย์ การเพิ่ม OLR ต่อไปในทั้งสองถังปฏิกรณ์ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ในถังปฏิกรณ์ R2 ลดลงเหลือเหลือ 61.5% และ 58.2% ที่ OLR 26 และ  $27.06 \text{ kgCOD/m}^3\text{d}^{-1}$  ตามลำดับ ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ R1 มีอัตราการกำจัดที่ 70.1% และ 65.4% ความทนทานของถังปฏิกรณ์ R1 พบว่า ความสามารถในการปรับตัวของชุมชนจุลินทรีย์ต่อสภาพแวดล้อม (D. Li et al., 2015) นอกจากนี้ การศึกษาแสดงว่าถังปฏิกรณ์ UASB สามารถรักษากระบวนการให้คงที่ได้เมื่อการดำเนินการอยู่ภายในขอบเขต OLR ปกติ ซึ่งอยู่ระหว่าง 1.5 และ  $18.0 \text{ kgCOD/m}^3\text{d}^{-1}$  (Fang, Boe, & Angelidaki, 2011; Jing et al., 2013) ดังนั้น การประเมินผลลัพธ์ทดลองทั้งถังปฏิกรณ์ แสดงให้เห็นว่าตัวย่อยสลาย UASB (R1) มีประสิทธิภาพที่ดีสามารถลด COD เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ R2 นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่คล้ายกัน (Dendooven & Escamilla-Silva, 2005) โดยใช้ระบบ UASB อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่มีวัสดูดซับ ในการศึกษานี้ การเพิ่ม OLR สำหรับทั้งสองถังปฏิกรณ์ มีประสิทธิภาพไม่ดีต่อการใช้ถังปฏิกรณ์ R2 ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ R1 สามารถทนต่อ OLR ที่สูงพร้อมกับสามารถกำจัดน้ำชะมูลช้างที่มีคุณภาพที่ HRT หนึ่งวัน

สรุปได้ว่า การใช้วัสดูดซับถ่านชีวภาพจากมูลช้างในถังปฏิกรณ์ R1 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีในระบบในขณะที่ OLR จะเพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งในทางตรงกัน

ข้ามถึงปฏิกรณ์ R2 ไม่ได้แสดงประสิทธิภาพที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ R1 และเมื่อ OLR เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลง

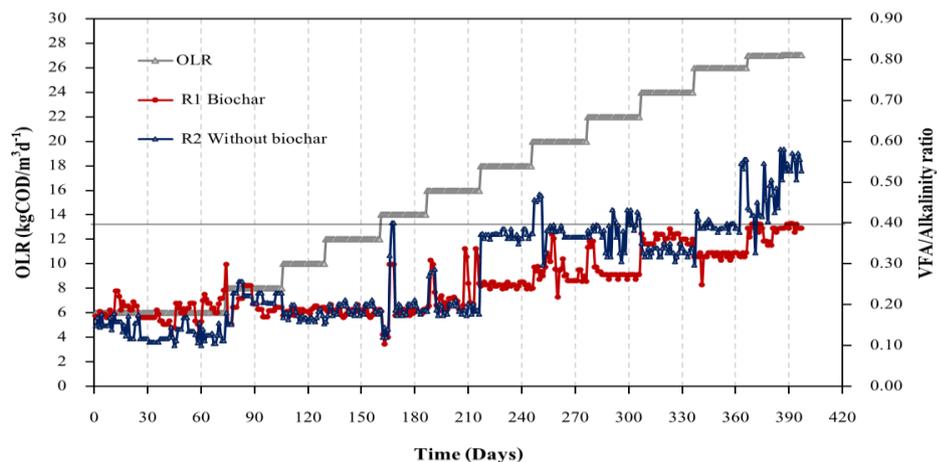


ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของเครื่องปฏิกรณ์ R1 และ R2

### 3. ความแปรผันของอัตราส่วนความเป็นด่างของถังปฏิกรณ์ R1 และ R2

ความเข้มข้นสูงของโปรตีนและไขมันในน้ำชะมูลช้างที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากการยับยั้งที่เกิดขึ้นระหว่างการย่อยสลายภายในระบบ ระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับความสามารถในการบัฟเฟอร์ และระดับของการปรับตัวของจุลินทรีย์ (Buendía, Fernández, Villaseñor, & Rodríguez, 2008) ค่าความเป็นพารามิเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่แสดงถึงความสามารถของสารละลายในการทนต่อการลดลงของ pH ที่เกิดจากการปลดปล่อยกรดอินทรีย์ ทำให้เกิดบัฟเฟอร์ของระบบ (Sakar, Yetilmezsoy, & Kocak, 2009) รวมถึงความสามารถของแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนิก (Methanogenic bacteria) ในการทนต่อการสะสม VFA ที่สูงขึ้น และขึ้นอยู่กับค่าความด่างของระบบเป็นหลัก รวมถึงความสามารถในการบัฟเฟอร์ ดังนั้น กระบวนการผลิตแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์เป็นฟังก์ชันของความด่างและความคงที่ของ pH (Tangkathitipong, Intanoo, Butpan, & Chavadej, 2017) อัตราส่วนของความด่างต้องอยู่ในช่วง 0.1-0.3 หากอัตราส่วนความด่างในการย่อยสลายเกินกว่า 0.4 ระบบอาจเข้าสู่สภาวะไม่สมดุลในระบบ ในการศึกษาครั้งนี้ อัตราส่วนความด่าง Alk/VFA ของตัวย่อยสลายของถังปฏิกรณ์ R1 เพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน 0.4 แต่ในถังปฏิกรณ์ R2 เริ่มมีค่า Alk/VFA ที่สูงมากกว่า 0.4 ที่ OLR 16 kgCOD/m<sup>3</sup>d (ภาพที่ 4.11)

แสดงให้เห็นว่า สภาวะการดำเนินงานที่มั่นคงและความต่างที่เหมาะสมในระบบ ซึ่ง R1 อยู่ต่ำกว่าระดับการยับยั้ง การเพิ่มความเข้มข้นของ COD เป็น OLR 16 kgCOD/m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup> ทำให้อัตราส่วนความต่างของตัวย่อยสลาย R2 เพิ่มขึ้นจนเกินช่วงที่ทำงานปกติ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าวัตถุดิบน้ำชะมูลช้างส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวย่อยสลาย R2 ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการบัฟเฟอร์ ตามที่แสดงโดยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความต่างเป็น 0.5 (ภาพที่ 4.11) ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวย่อยสลาย R2 ในการเพิ่ม OLR อัตราส่วน Alk/VFA ในตัวย่อยสลาย R2 ก่อนข้างสูงและเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง โดยไปถึงค่าเกินกว่า 0.5 ที่ปลายการทดลอง ดังนั้น เป็นสัญญาณของความไม่สมดุลของระบบที่ไม่มีวัสดุรองรับที่ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ด้วยเหตุนี้ อัตราส่วนความต่างของตัวย่อยสลาย R2 จึงเกินขีดจำกัดที่เหมาะสมที่ 0.3 ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ (Morales-Polo, Cledera-Castro, & Moratilla Soria, 2018) อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนความต่างที่อัตราการไหลทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ R1 มีค่าน้อยกว่า 0.3 และความเข้มข้นของ VFA รวมอยู่ต่ำกว่า 100 mg/L โดย ค่า VFA (Volatile Fatty Acids) และ Alkalinity เป็นตัวบ่งชี้ความสมดุลของกระบวนการย่อยสลายในระบบปฏิกรณ์ชีวภาพ ซึ่ง VFA เป็นผลผลิตจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์และต้องถูกใช้โดยแบคทีเรียเพื่อการผลิตแก๊สมีเทน ในขณะที่ Alkalinity ช่วยในการรักษา pH ในระดับที่เหมาะสม อัตราส่วน VFA/Alkalinity ที่สูงอาจบ่งบอกถึงภาวะที่ระบบไม่สมดุลซึ่งสามารถนำไปสู่ปัญหาในการทำงานของระบบปฏิกรณ์



ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความต่างในถังปฏิกรณ์ R1 และ R2

หลายการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) ได้แสดงให้เห็นว่าการผลิตแก๊สชีวภาพและการกำจัด COD สามารถทำได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยการเปลี่ยนแปลงกลยุทธ์การให้อาหาร ตัวอย่างเช่น การวิจัยของ (Basitere, Rinquest, Njoya, Sheldon, & Ntwampe, 2017) ได้แสดงให้เห็นว่าการผลิตแก๊สชีวภาพได้รับการปรับปรุงเมื่อวัตถุดิบถูกให้อาหารบ่อยกว่าหนึ่งครั้งต่อวัน เช่นเดียวกัน เมทาโนเจนไม่ถูกยับยั้งตลอดเวลา การศึกษาของถังปฏิกรณ์ R1 เนื่องจากทั้งระดับของ VFAs และ pH คงที่ อย่างไรก็ตาม การลดลงอย่างมากของประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ R2 เมื่อ OLR เพิ่มขึ้นเป็น  $18 \text{ kgCOD/m}^3 \text{ d}^{-1}$  เกิดขึ้นเนื่องจากมีผลต่อประชากรจุลินทรีย์ที่เกินความสามารถในการย่อยสลายของชีวมวล ปัญหาที่พบในถังปฏิกรณ์ R2 ยังอาจเกิดจากการเกิดสคัมมากเกินไป และการไหลที่กระทันหัน ทำให้เกิดการสูญเสียประชากรเมทาโนเจนิก โดยมีงานวิจัยของ (Borja, Banks, & Wang, 1995) ได้แสดงถึงปริมาณแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพที่ผลิตขึ้นในระหว่างการย่อยสลายหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนของน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ลดลงจาก 78% เป็น 57% เมื่อ OLR เพิ่มขึ้นจาก 2.9 ไปเป็น  $5.4 \text{ kgCOD/m}^3 \text{ d}^{-1}$  การลดลงของปริมาณแก๊สมีเทนเกิดจากการยับยั้งแบคทีเรียเมทาโนเจนิกที่ OLR สูง ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณ VFA ในน้ำทิ้ง อีกปัจจัยที่สำคัญที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพที่ต่ำของถังปฏิกรณ์ R2 นอกจากนี้ จุลินทรีย์ที่ช่วยในการแปลงสารตั้งต้นเป็นแก๊สชีวภาพในถังปฏิกรณ์ R2 อาจถูกยับยั้งด้วยสารและผลิตภัณฑ์มากมายที่อาจเข้ามาในกระบวนการจากแหล่งภายนอก หรืออาจถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการ ด้วยเหตุนี้ พฤติกรรมของถังปฏิกรณ์ R2 ตั้งแต่ OLR 18 ไปจนถึง  $27.06 \text{ kgCOD/m}^3 \text{ d}^{-1}$  จึงเป็นช่วงการยับยั้งของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายและกระบวนการกรดสร้าง ซึ่งต่อมากจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการของเมทาโนเจนตามลำดับของกระบวนการย่อยสลาย

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติในถังปฏิกรณ์ UASB แบบถ่านชีวภาพ (R1) และไม่มีถ่านชีวภาพ (R2)

Period of operation (day)	Duration (days)	OLR (kgCOD/m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	Methane content (%)		Biogas production (L/d)		CH <sub>4</sub> production (LCH <sub>4</sub> /g CODadded)		Alk/VFA		%COD	
			R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2	R1	R2
1-73	73	6	51.1	44.5	1.8	1.21	0.029	0.018	0.18	0.15	92.2	85.6
74-106	32	8	50.1	48.5	2.5	2.1	0.036	0.021	0.19	0.17	91.1	84.9
107-131	24	10	51.6	48.5	2.9	2.4	0.041	0.031	0.18	0.19	87.3	81.6
131-162	31	12	52.7	47.1	2.5	2.4	0.055	0.041	0.19	0.20	84.1	78.9
163-189	26	14	51.3	48.2	5.03	3.5	0.064	0.039	0.20	0.23	81.9	74.0
190-220	30	16	61.3	52.8	5.6	5.0	0.114	0.091	0.24	0.37	82.1	73.3
221-251	30	18	70	60.9	8.5	7.5	0.174	0.143	0.26	0.38	80.8	73.1
252-282	30	20	59.63	55.10	8.1	7.7	0.183	0.151	0.28	0.38	76.5	68.6

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

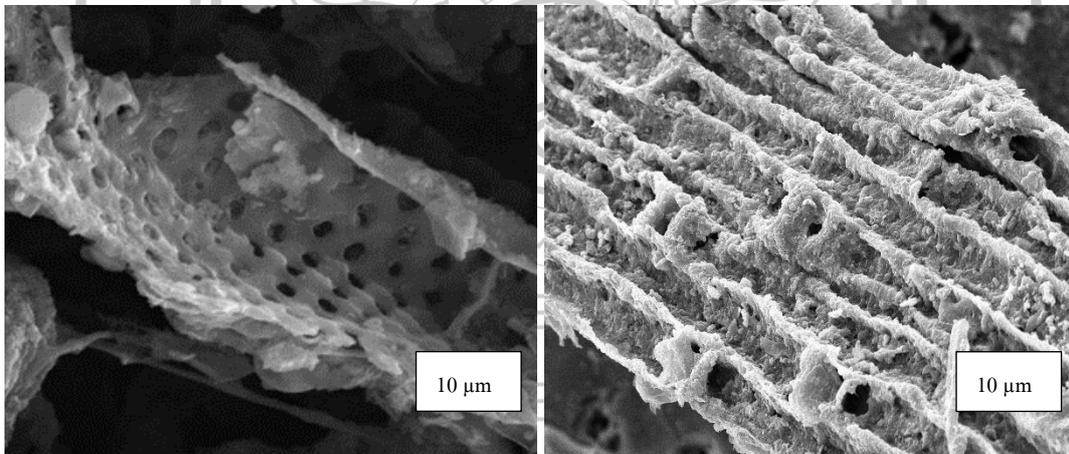
Period of operation (day)	Duration (days)	OLR (kgCOD/m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	Methane		Biogas		CH <sub>4</sub> production		Alk/VFA		%COD	
			content (%)		production (L/d)		(LCH <sub>4</sub> /g CODadded)					
283-313	30	22	61.8	58.19	9.8	8.1	0.214	0.174	0.33	0.39	73.9	64.5
314-344	30	24	61.50	56.29	11.13	10.9	0.243	0.218	0.32	0.41	73.1	65.7
345-375	30	26	60.1	59.91	12.6	11.3	0.295	0.240	0.31	0.41	70.1	61.5
376-407	31	27.06	64.25	58.90	12.9	10.9	0.280	0.213	0.38	0.48	65.4	58.2

R1: Biochar; R2: Without biochar; COD: Chemical oxygen demand; HRT: Hydraulic retention time

## ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยถ่านชีวภาพในระบบ UASB

### 1. ผลการวิเคราะห์ FE-SEM ของวัสดุรองรับถ่านชีวภาพมูลช้าง

ถังปฏิกรณ์ UASB ที่มีจุลินทรีย์หลายชนิดที่อาศัยอยู่ รวมถึงแบคทีเรียและอาร์เคีย โดยจุลินทรีย์เหล่านี้มีศักยภาพในการฟื้นฟูสภาพสิ่งแวดล้อมอย่างมาก การศึกษาส่วนประกอบ และลักษณะของกลุ่มจุลินทรีย์เป็นกระบวนการที่ซับซ้อน เนื่องจากสภาพทางกายภาพและเคมีที่หลากหลายของสถานที่กำจัดของน้ำชะมูลช้าง การศึกษาแสดงให้เห็นว่าชีวมวลสามารถสะสมได้ภายในโครงสร้างรูพรุนของวัสดุที่ตัวกลางถ่านชีวภาพมูลช้าง ภาพ FE-SEM ของตัวอย่างวัสดุรองรับถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่ได้ทำความสะอาดจากสิ่งเจือปนถูกถ่ายก่อนการศึกษา ภาพที่ 4.12 (ก) หลังจากผลิตเกิดชีวภาพด้วยกระบวนการแบบไม่ใช้ออกซิเจน 407 วัน พบว่ามีการสร้างชีวมวลจุลินทรีย์ในตัวกลางวัสดุ ภาพ FE-SEM ของวัสดุรองรับถ่านชีวภาพมูลช้างจึงถูกถ่ายที่การขยาย  $(10\mu\text{m}) \times (15\text{kx})$  ตัวอย่างเหล่านี้ถูกนำออกจากถังปฏิกรณ์ UASB และทำให้แห้งโดยใช้ลม ภาพที่ 4.12 (ข)



(ก)

(ข)

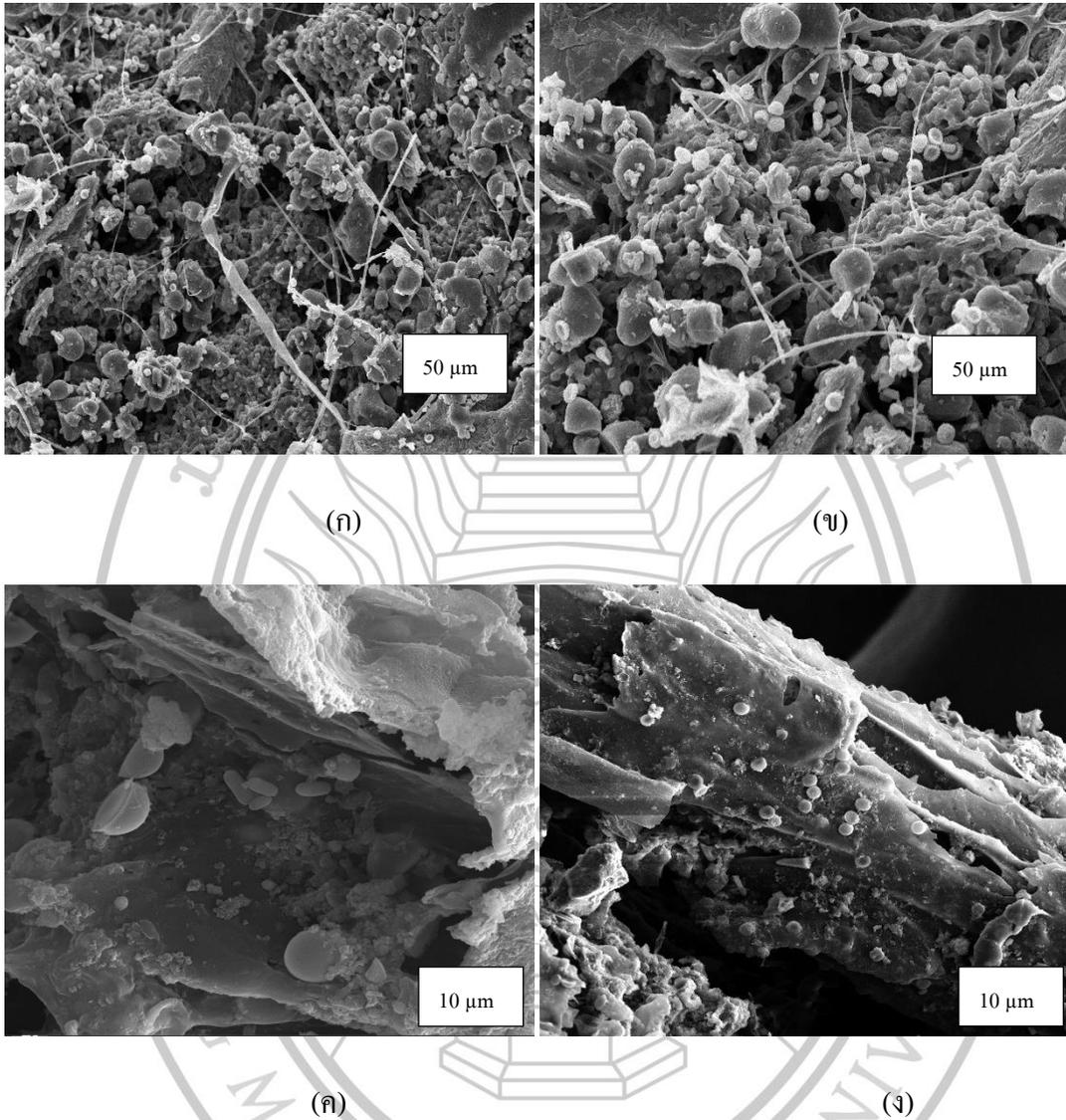
ภาพที่ 4.12 ลักษณะของถ่านชีวภาพมูลช้าง [ก (15kx), (10 $\mu\text{m}$ )] และถ่านชีวภาพมูลช้างที่มีไบโอฟิล์ม [ข (15kx), (10 $\mu\text{m}$ )] ที่สังเกตรด้วยกล้องจุลทรรศน์ FE-SEM

ถังปฏิกรณ์ UASB แบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยทั่วไปมักมีกลุ่มแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนที่หลากหลาย คือ แบคทีเรียสร้างมีเทนแบบแอซิโตคลาสติก (acetoclastic) และไฮโดรจีโนโทรฟิก (hydrogenotrophic) ซึ่งช่วยเพิ่มความเสถียรภาพของถังปฏิกรณ์ UASB ภาพที่ 4.13 (ก), (ข) แสดงภาพของตะกอนน้ำชะมูลช้างในถังปฏิกรณ์ UASB และถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่ใช้เป็นวัสดุรองรับในการช่วยเติบโตติดกับตะกอน และลดการชะล้างน้ำชะมูลช้างในถังปฏิกรณ์ UASB หลังจากการปรับสภาพ ในขณะที่ภาพที่ 4.13 (ค), (ง) แทนภาพของถ่านชีวภาพในถังปฏิกรณ์ UASB หลังจากผ่านการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างมีการสัมผัสกับถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยตลอดระยะเวลาที่เปรียบเทียบกัน การวิเคราะห์ตะกอนและการเติบโตของชีวมวลที่ติดอยู่บนวัสดุรองรับจากถ่านชีวภาพจากมูลช้างสามารถวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน FE-SEM รูปทรงที่สังเกตได้ในถังปฏิกรณ์ UASB ภาพที่ (ก) และ (ค) เป็นเซลล์ที่มีรูปร่างเป็นแท่ง ขึ้นต่อกันเป็นเส้นใยยาวแสดงถึงการมีอยู่ของ *Methanosaeta* sp.

การวิเคราะห์ FE-SEM ในการศึกษาผลสอดคล้องกับ Gomes et al. ภาพที่ 4.13 (ง) แสดงภาพเซลล์ที่มีรูปร่างกลม ที่เจริญเติบโตรวมกันเป็นกลุ่มใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ถึงการมีอยู่ของ *Methanosarcina* sp. ที่พบในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในระบบ UASB ที่มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) สูง ประชากรของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ R2 มีความแตกต่างอย่างชัดเจนจากเครื่องย่อย R1 ตามที่เห็นได้ในภาพที่ 4.13 สันนิษฐานว่า เนื่องจากการมีอยู่ของวัสดุรองรับจากมูลช้างช่วยให้แบคทีเรียและอาร์เคียที่มีขี้ดเกาะและเป็นที่เจริญเติบโต (วัสดุรองรับถ่านชีวภาพมูลช้างอยู่ในถังปฏิกรณ์ UASB ที่ R1) การเปลี่ยนแปลงในการเติบโตของประชากรจุลินทรีย์เอื้อต่อ *Methanosarcina* sp. ด้วยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทดลอง นอกจากนี้ วัสดุรองรับถ่านชีวภาพจากมูลช้างในถังปฏิกรณ์ R1 ยังช่วยลดการชะล้างแบคทีเรียและอาร์เคียให้มีการเติบโตสูง (*Methanosarcina* sp.) โดยทำให้กลุ่มแบคทีเรียจึงสามารถยับยั้งการสร้างกรดไขมันระเหยสูงในถังปฏิกรณ์ R1 ได้ ในทางเปรียบเทียบการพัฒนาของสายพันธุ์ *Methanosarcina* sp. มีความสำคัญมากในถังปฏิกรณ์ R1 เมื่อเปรียบเทียบแบคทีเรียที่สามารถผลิตแก๊สมีเทนอื่น ๆ ในถังปฏิกรณ์ R2 (*Methanosaeta* sp.) *Methanosarcina* sp. ในถังปฏิกรณ์ R1 มีความเสถียรมากกว่า R2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ OLR ในระบบ ซึ่งรวมถึงความทนทานสูงต่อความเข้มข้นของกรดอะซิเตตสูงและการกระทบของ pH

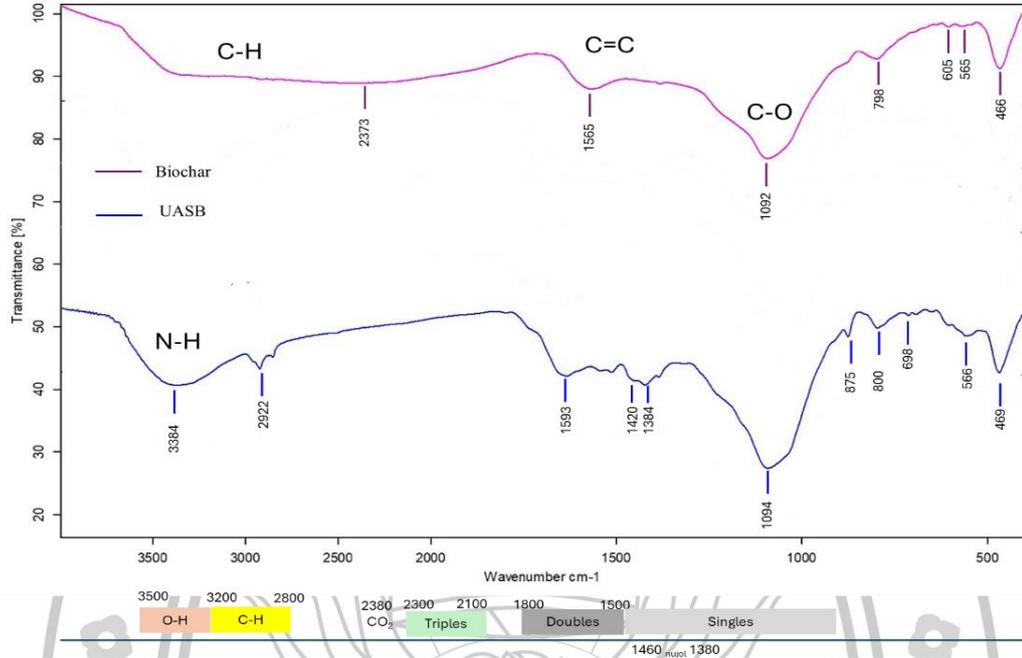
การดำเนินงานวิจัย การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ได้สรุปพารามิเตอร์ในการทดสอบระหว่างถังปฏิกรณ์ UASB R1 (ถ่านชีวภาพ) และ R2 (ไม่มีถ่าน

ชีวภาพ) การทดลองในทั้งสองถังปฏิกรณ์ UASB มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงอัตรา  
ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR 6-27.06 kgCOD/m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>



ภาพที่ 4.13 ลักษณะรูปร่างของน้ำชะมูลข้างในถังปฏิกรณ์  
(ก) และ (ข) หลังจากผ่านกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ,  
(ค) แสดงรูปทรงคล้ายกับ *Methanosaeta* sp. และ  
(ง) แสดงรูปทรงคล้ายกับ *Methanosarcina* sp.

## 2. ผลการวิเคราะห์ FTIR ของวัสดุรองรับในระบบ UASB



ภาพที่ 4.14 สเปกตรัม FT-IR ของวัสดุรองรับก่อนและหลังการผลิตแก๊สชีวภาพ การผลิตแก๊สชีวภาพที่ใช้วัสดุรองรับเป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) สเปกตรัม FT-IR ของวัสดุรองรับก่อนและหลังการผลิตแก๊สชีวภาพ การผลิตแก๊สชีวภาพที่ใช้วัสดุรองรับเป็นถ่านชีวภาพจากมูลช้าง แสดงถึงพื้นที่ที่สัมพันธ์กับกลุ่มฟังก์ชันเคมีต่างๆ ในสารอินทรีย์กลุ่ม C-H ที่ความถี่  $2,923\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงส่วนประกอบของสารอินทรีย์ในถ่านชีวภาพ โดยพบในโมเลกุลที่มีพันธะแบบเอเทอร์หรืออัลคาน ซึ่งกลุ่มนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้หลังจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจะลดลงเนื่องจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ ในถ่านชีวภาพมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ กลุ่ม C=C ที่  $1,655\text{ cm}^{-1}$  สำหรับถ่านชีวภาพ แสดงถึงโครงสร้างอะโรมาติกหรือสารอินทรีย์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบพันธะคู่ นอกจากนี้กลุ่ม C-O ที่  $1,022\text{ cm}^{-1}$  สำหรับถ่านชีวภาพ โดยอาจพบในกรดคาร์บอกซิลิก, เอสเทอร์ ซึ่งบ่งบอกถึงการมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน โดยกลุ่ม N-H ที่  $3,234\text{ cm}^{-1}$  ในถังปฏิกรณ์ UASB แสดงถึงกลุ่มอะมีนหรือโครงสร้างที่มีไนโตรเจนอื่นๆ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับโปรตีนหรือวัสดุชีวภาพที่มีอยู่ของตัววัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ การเปรียบเทียบระหว่างตัววัสดุรองรับถ่านชีวภาพก่อนและหลังหมักในถังปฏิกรณ์ UASB ช่วยให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างสารอินทรีย์และการลดหรือเพิ่มของกลุ่มฟังก์ชันที่

แตกต่างกันหลังจากผ่านกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอาจบ่งบอกถึงการย่อยสลายของสารอินทรีย์หรือการแปลงสภาพสารในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยรวม FT-IR สามารถให้ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและคุณสมบัติเคมีของวัสดุ ในระหว่างกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ การวิเคราะห์จึงช่วยให้เข้าใจถึงปฏิกิริยาทางเคมีและกลไกการย่อยสลายที่เกี่ยวข้องได้ดีขึ้น และเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

### กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยวัสดุรองรับถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง เป็นวัสดุรองรับที่ใช้สำหรับการปรับสมดุล pH ซึ่งถ่านชีวภาพเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังเป็นตัวดูดซับสำหรับช่วยลดการยับยั้งการเติบโตของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และเป็นท่อนำอิเล็กตรอนสำหรับ DIET เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งกลไกของถ่านชีวภาพในการปรับปรุงประสิทธิภาพย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่สำคัญ คือ เป็นตัวช่วยในการยับยั้งสารพิษในระบบได้ ปรับปรุงการเผาผลาญของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นการทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อผลิตแก๊สมีเทนและสารประกอบอื่นๆ ให้มีปริมาณมากขึ้น. นอกจากนี้ยังส่งเสริมประสิทธิภาพการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสายพันธุ์ (A Pilarska et al., 2018; Pan JunTing et al., 2019) ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ที่มีการเพิ่มถ่านชีวภาพ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นและอัตราส่วนของสารเริ่มต้นต่อสารตั้งต้น (D. Wang et al., 2017) สิ่งนี้บ่งชี้ว่ากลไกของถ่านชีวภาพที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยการศึกษากลไกและความสัมพันธ์ภายในของถ่านชีวภาพที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ได้แก่ การควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง การทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ และการดูดซับสารยับยั้ง

#### 1. การควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง

การใช้ถ่านชีวภาพในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (AD) อาจเป็นวิธีการที่ทั้งง่ายและมีประสิทธิผลในการเร่งการฟื้นฟูของถังปฏิกรณ์ที่มีการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยในระบบสภาพเป็นกรด ซึ่งกลุ่มอัลคาไลน์ทั้งในรูปแบบอินทรีย์ และอนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านชีวภาพ พบว่ามีความสามารถในการทำหน้าที่เป็นสารกลั่นกลางที่ดี คือเป็นกระบวนการกลั่นกลางกรดอินทรีย์ผันเหลวจึงเกี่ยวข้องกับการใช้สารหรือวิธีการที่สามารถลดความเข้มข้นของกรดเหล่านี้ได้ เพื่อป้องกันผลกระทบเชิงลบต่อกระบวนการย่อยสลาย เช่น การลดค่า pH ที่อาจยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียผลิตแก๊สมีเทน นอกจากนี้ยังมีผลการศึกษา Shen et al. ได้พบว่ากลุ่มฟังก์ชันที่มีอยู่บนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ และลักษณะเป็นต่างของสารชนิดนี้มีบทบาทสำคัญในการรักษาสมดุล

ค่า pH ในระดับที่เหมาะสม (7.5–8) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน การเพิ่มถ่านชีวภาพในระบบจึงช่วยให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยต่อการทำงานของแบคทีเรียผลิตมีเทนในการแปรรูปกรดอินทรีย์เปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน และยังส่งผลต่อปริมาณมีเทนในระบบจะมีการเพิ่มขึ้น (Shen, Linville, Urgun-Demirtas, Schoene, & Snyder, 2015) นอกจากนี้ยังมีการวิจัยของ Wang et al. ได้ยืนยันว่าความสามารถของถ่านชีวภาพในการทำน้ำที่เป็นสารกลั่นกลาง pH มีความสำคัญอย่างยิ่งในการรักษาความเสถียรของค่า pH ในช่วงเวลาที่มีการสะสมกรดอินทรีย์ผันเหลวในระบบย่อยสลาย ความเสถียรนี้ช่วยให้แบคทีเรียผลิตมีเทนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มปริมาณการผลิตมีเทนได้มากขึ้น การนำถ่านชีวภาพมาใช้ในระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยลดผลกระทบเชิงลบจากค่า pH ต่ำและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ผันเหลวที่สูง (G. Wang et al., 2018) วิธีการเติมถ่านชีวภาพจะช่วยในเรื่องการย่อยสลายในการผลิตแก๊สชีวภาพได้เร็วขึ้น แต่ยังคงเพิ่มความเหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตมีเทน ทำให้ได้ผลผลิตมีเทนที่สูงขึ้นและกระบวนการผลิตพลังงานที่ยั่งยืนยิ่งขึ้น

## 2. การทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ

ถ่านชีวภาพสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของประชากรของจุลินทรีย์ในการผลิตแก๊สมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผ่านการเสริมสร้างจุลินทรีย์ที่มีหน้าที่สำคัญ และแบคทีเรียผลิตมีเทนที่มีส่วนร่วมในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน Zhang et al. สังเกตเห็นว่าถ่านชีวภาพกระตุ้นการหลั่งสารพอลิเมอร์นอกเซลล์ ซึ่งเป็นตัวกลางสำคัญสำหรับการเกาะติดของจุลินทรีย์กับพื้นผิวของตัววัสดุรองรับ เมื่อมีการสร้างชั้นเรียงซ้อนของจุลินทรีย์ ดังนั้น การเพิ่มถ่านชีวภาพจึงช่วยให้การเติบโตของจุลินทรีย์ที่เกาะติดได้ดีขึ้น นำไปสู่การแตกตัวของตะกอนอย่างรวดเร็ว และลดการสูญเสียแบคทีเรียผลิตมีเทนในเครื่องถังปฏิกรณ์ย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (D. Zhang et al., 2017) นอกจากนี้มีการศึกษาของ Dang et al. พบว่าถ่านชีวภาพเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของ *Sporanaerobacter* และ *Enterococcus* ซึ่งสามารถย่อยสลายสารตั้งต้นที่สามารถหมักได้และส่งอิเล็กตรอนไปยังสปีชีส์ *Methanosarcina* ที่ถูกเสริมด้วยการเพิ่มถ่านชีวภาพ (Dang et al., 2016) นอกจากนี้ Indren et al. ได้พบ *Methanosarcina* เกาะติดกับถ่านชีวภาพ และสร้างปฏิสัมพันธ์ทางชีวภาพ ปฏิสัมพันธ์นี้สามารถนำไปสู่การลดเวลาที่ล่าช้า (Indren, Birzer, Kidd, & Medwell, 2020)

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาที่พบว่าถ่านชีวภาพช่วยเสริมการเติบโตของแบคทีเรียผลิตมีเทนผ่านการเพิ่ม *Methanosarcinales* อีกทั้ง Wang et al. พบว่าเมื่อปริมาณถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น จะเป็นประโยชน์มากขึ้นสำหรับการเกาะติดของแบคทีเรียผลิตมีเทน ซึ่งตรงกับผลลัพธ์ที่ถ่านชีวภาพเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของแบคทีเรียเมทาโนเจนที่มี *Methanosaeta* มาก

ดังนั้น การเพิ่มถ่านชีวภาพจะส่งเสริมการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ผันเหลวเป็นมีเทน นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังเพิ่มผลผลิตของกรดอินทรีย์ผันเหลวโดยการส่งเสริมการสร้างชั้นเรียงซ้อนของจุลินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการย่อยสลาย (T. Wang, Zhai, Zhu, Li, & Zeng, 2018)

### 3. การดูดซับสารยับยั้ง

การดูดซับของถ่านชีวภาพเป็นหนึ่งในกลไกหลักที่สำคัญการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติในการดูดซับสารยับยั้ง โดยงานวิจัยของ Kanjanarong et al. ได้แสดงให้เห็นว่าการมีกลุ่มคาร์บอกซิลหรือไฮดรอกซิล (Kanjanarong et al., 2017) มีคุณสมบัติในการดูดซับ อย่างไรก็ตาม Bagreev et al. ได้พิสูจน์ว่ารูพรุนของถ่านชีวภาพสามารถดูดซับสารเคมี เช่น ฟอสเฟต, ไนเตรต, ไนไตรต์, แอมโมเนีย, สารกำจัดศัตรูพืช, โลหะหนัก และคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Shanmugam et al. กล่าวว่า การปรับปรุงผลผลิตมีเทนในกระบวนการย่อยสลายเกิดจากความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพ ซึ่งช่วยบรรเทาการยับยั้งจากกรดโดยการดูดซับกรดอินทรีย์ผันเหลว การดูดซับสามารถทำได้โดยใช้ตัวดูดซับ เช่น ถ่านชีวภาพ โมเลกุลของกรดอินทรีย์จะติดอยู่กับพื้นผิวของตัวดูดซับและสามารถถูกล้างออกได้ในภายหลังเพื่อฟื้นฟูกรดอินทรีย์ที่ถูกกักเก็บไว้ กระบวนการนี้ช่วยให้สามารถแยกและกู้คืนสารประกอบมีค่าในอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีถ่านชีวภาพเป็นตัวรองรับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการลดปริมาณสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม โดยใช้คุณสมบัติของถ่านชีวภาพในการดูดซับสารเหล่านั้น และป้องกันไม่ให้แพร่กระจายหรือเข้าสู่ระบบนิเวศอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังสามารถรีไซเคิลและใช้ประโยชน์ได้เป็นเวลานาน ช่วยลดความต้องการสำหรับการใช้วัสดุใหม่และสนับสนุนในการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน (Shanmugam, Adhikari, Nam, & Sajib, 2018)

## บทที่ 5

### สรุปอภิปรายผล ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลองของงานวิจัยในการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้าง โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยผลการทดลองสามารถทำตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และบรรลุเป้าหมายที่วางไว้ โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1. การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างโดยกระบวนการไพโรไลซิส การวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนากระบวนการไพโรไลซิส ผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นถ่านชีวภาพ โดยจะตรวจสอบการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ เพื่อประเมินคุณภาพและการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองรับถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และมีการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า ซึ่งมีการทดลองการเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้างในระบบหมักแบบกะ พบว่าสามารถเพิ่มการผลิตแก๊สมีเทนสูง และมีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า การเพิ่มถ่านชีวภาพ 5-10 g/L ในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทน สามารถลดเวลาระยะเวลาการผลิตแก๊สชีวภาพได้ถึง 33-42% นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มการเกิดเมทาโนเจนซิส ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มปริมาณการผลิตแก๊สมีเทน

2. การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างต่อถ่านชีวภาพจากมูลช้าง งานวิจัยนี้จะสำรวจอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำชะมูลช้างและถ่านชีวภาพที่ได้จากมูลช้างในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยเน้นที่การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สและคุณภาพของแก๊สมีเทนที่ได้ โดยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งศึกษาความแตกต่างของอัตราส่วนน้ำชะมูลช้างกับน้ำที่ 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 kg/kg ตามลำดับ ทำการทดลองในชุดการทดลองแบบกะ (batch test) โดยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่เตรียมโดยการหมักจากน้ำชะมูลช้างกับหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนมูลสุกร ทำการทดลองโดยมีหัวเชื้อกับน้ำชะมูลช้างในอัตราส่วน 0.5 (g VS-based) ซึ่งปรับค่าความเป็นกรด่างเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ  $7.1 \pm 0.1$  ควบคุมอุณหภูมิ  $35 \pm 2$  °C ที่ใช้ระยะเวลาหมัก 45 วัน จากผลการทดลองแสดงว่ากระบวนการหมักที่อัตราส่วนน้ำชะมูลช้างกับน้ำที่ 1:2 สามารถผลิต

แก๊สชีวภาพสะสมสูงสุด โดยพบว่ามีค่าแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $113 \text{ mLCH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$  และพบว่า หลังจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้ถึง 75.1% และเมื่อมีการเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้างสามารถกำจัดค่าซีโอดีที่สูงขึ้นจาก 75.1% เป็น 88.1%

3. การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำชะมูลช้างโดยการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนากระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นตัวกลาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ การศึกษานี้จะวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ในแง่ของปริมาณแก๊สที่ผลิตได้ คุณภาพของแก๊ส และความเสถียรของกระบวนการในระยะยาวในส่วนของกรอกแบบถังหมัก งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบถังหมักแบบ UASB ร่วมกับใช้วัสดุรองรับถ่านชีวภาพจากมูลช้าง เพื่อใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยใช้ถังหมัก UASB ที่ออกแบบ มีปริมาตร 12 ลิตร โดยเริ่มป้อนอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (organic loading rate, OLR) ที่  $6 \text{ kg COD}/\text{m}^3\text{d}^{-1}$  และปรับค่าความเป็นกรดต่างก่อนป้อนเข้าสู่ถังหมักให้มีค่าอยู่ระหว่าง 6.5-7.2 ทำการหมักจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) จากนั้นทำการเพิ่มขึ้น OLR จนถึง  $27.06 \text{ kg COD}/\text{m}^3\text{d}^{-1}$  พบว่าระบบ UASB ที่ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นวัสดุรองรับสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนจาก 52% เป็น 70% นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้ถึง 92.2% จากผลการทดลอง

สรุปได้ว่าวัสดุรองรับจากถ่านชีวภาพมูลช้างสามารถลดการชะล้างแบคทีเรียในระบบการหมักแบบต่อเนื่องได้ และสามารถนำผลที่ได้ไปเป็นต้นแบบ นอกจากนี้วัสดุรองรับมีความสามารถในการผลิตแก๊สชีวภาพที่สูงขึ้น และช่วยในการปรับปรุงสภาพแวดล้อมในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพได้ และข้อมูลจากการทดลองไปประยุกต์ใช้ต่อไป ซึ่งวัตถุประสงค์ของการวิจัยทั้ง 3 ส่วนนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงศักยภาพและข้อจำกัดในการใช้มูลช้างเป็นทรัพยากรในการผลิตพลังงานทดแทน และนำไปสู่การพัฒนาวิธีการ และมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน

การขยายผลแก๊สชีวภาพในอุตสาหกรรม และชุมชนมีกลไกหลายประการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพ ดังนี้

1. การพัฒนาเทคโนโลยีและการปรับปรุงกระบวนการผลิต: การนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงวัสดุชีวมวลเป็นแก๊สชีวภาพ รวมถึงการลดการสูญเสียและการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สที่ผลิตออกมาได้ดียิ่งขึ้น

2. การรวมระบบการผลิตแก๊สชีวภาพกับอุตสาหกรรมอื่นๆ: ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ เช่น การนำกากตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำมันพืชมาผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบและเพิ่มมูลค่าเพิ่มจากวัสดุที่เหลือใช้
3. การสนับสนุนจากนโยบายและสิทธิประโยชน์ของรัฐ: รัฐบาลสามารถสนับสนุนการผลิตแก๊สชีวภาพโดยการให้เงินอุดหนุน ลดหย่อนภาษี หรือการให้สิทธิพิเศษอื่นๆ เช่น การซื้อกลับแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้เพื่อใช้ในภาครัฐ
4. การรณรงค์และการศึกษาส่งเสริมความรู้ในชุมชน: การแนะนำและส่งเสริมการใช้แก๊สชีวภาพให้กับชุมชน โดยการจัดทำโครงการศึกษา การสัมมนา และการประชาสัมพันธ์เกี่ยวกับประโยชน์และการใช้แก๊สชีวภาพอย่างเหมาะสม
5. ค่าตอบแทนเบื้องต้น: ค่าตอบแทนในการขยายผลแก๊สชีวภาพอาจประกอบด้วย การลงทุนเบื้องต้นสำหรับการสร้างหรือปรับปรุงโรงงาน, การฝึกอบรมบุคลากร, การปรับปรุงเทคโนโลยี และการดำเนินการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิต นอกจากนี้ยังอาจมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและค่าเชื้อเพลิงหมุนเวียน
6. การขยายผลแก๊สชีวภาพต้องพิจารณาถึงปัจจัยหลายอย่างเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดทั้งในมุมมองของเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม และต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบในการนำไปใช้ในระดับชุมชนและอุตสาหกรรม

## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). *คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทนชุดที่ 5 พลังงานแก๊สชีวภาพ*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- กฤษณา สวนจันทร์ และ รณชัย เอกฉัตร. (2552). *แก๊สชีวภาพ biogas*. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- กวิินทร์ ศุภวิทย์โยธิน. (2555). *การประเมินปัจจัยของการผลิตถ่านจากไม้ไผ่โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน*. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- ธงชัย ประเทือง. (2555). *ผลกระทบทางสังคมและเศรษฐกิจจากการสร้างปางช้างเป็นสถานที่ท่องเที่ยวในเขตพื้นที่ตำบลกี้ช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่*. (วิทยานิพนธ์ศิลปศาสตรมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- นคร ทิพยาวงศ์. (2553). *เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- วชิรา ดาวสุด และ ญาณิสสา ละอองอุทัย. (2561). *การผลิตแก๊สชีวภาพและพัฒนาแบบจำลองโดยระบบยูเอเอสบีจากของเสียอินทรีย์ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์* (รายงานการวิจัย). ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- อินทิรา นวลขำ. (2562). *การเคลือบและการวิเคราะห์ฟิล์มบางเทอร์โมอิเล็กทริกส์เจอร์แมนเนียมแอนติโมนีเทลลูไรด์เตรียมด้วยกระบวนการพอลิไดซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง*. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- อรรรรณ ศิริโชติ. (2549). *เคมีเชิงฟิสิกส์เบื้องต้น*. สงขลา: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อลิศรา เรืองแสง (2562). *เชื้อเพลิงชีวภาพและชีวเคมีภัณฑ์โดยจุลินทรีย์*. ขอนแก่น: คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- A Pilarska, A., Wolna-Maruwka, A., & Pilarski, K. (2018). Kraft lignin grafted with polyvinylpyrrolidone as a novel microbial carrier in biogas production. *Energies*, 11(12), 3246.

- Abbasi, T., & Abbasi, S. (2012). Formation and impact of granules in fostering clean energy production and wastewater treatment in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1696-1708.
- Abd El-Raheem, H., Korri-Youssoufi, H., & Hassan, R. Y. (2022). Biofilm and the electron transfer mechanism in bioelectrochemical systems. In *Bio-Electrochemical Systems* (pp. 65-91): CRC Press.
- Amani, T., Nosrati, M., & Sreekrishnan, T. (2010). Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects—a review. *Environmental Reviews*, 18(NA), 255-278.
- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology*, 3(2), 117-129.
- Azargohar, R., Nanda, S., Rao, B., & Dalai, A. K. (2013). Slow pyrolysis of deoiled canola meal: product yields and characterization. *Energy & fuels*, 27(9), 5268-5279.
- Babatunde, L., Tilli, I., & Mbini, O. (2022). The Production of Biogas from Cow Dung. In: BP International.
- Bakraoui, M., Karouach, F., Ouhammou, B., Aggour, M., Essamri, A., & El Bari, H. (2020). Biogas production from recycled paper mill wastewater by UASB digester: Optimal and mesophilic conditions. *Biotechnology Reports*, 25, e00402.
- Basitere, M., Rinquest, Z., Njoya, M., Sheldon, M., & Ntwampe, S. K. O. (2017). Treatment of poultry slaughterhouse wastewater using a static granular bed reactor (SGBR) coupled with ultrafiltration (UF) membrane system. *Water Science and Technology*, 76(1), 106-114.
- Belancon, D., Fuzzato, M. C., Gomes, D. R., Cichello, G. C., de Pinho, S. C., Ribeiro, R., & Tommaso, G. (2010). A comparison of two bench-scale anaerobic systems used for the treatment of dairy effluents. *International journal of dairy technology*, 63(2), 290-296.
- Bengelsdorf, F. R., Gabris, C., Michel, L., Zak, M., & Kazda, M. (2015). Syntrophic microbial communities on straw as biofilm carrier increase the methane yield of a biowaste-digesting biogas reactor. *AIMS Bioeng*, 2(3), 264-276.

- Bhatia, S. K., & Yang, Y.-H. (2017). Microbial production of volatile fatty acids: current status and future perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16(2), 327-345.
- Bona, D., Beggio, G., Weil, T., Scholz, M., Bertolini, S., Grandi, L., . . . Pivato, A. (2020). Effects of woody biochar on dry thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Journal of environmental management*, 267, 110633.
- Borja, R., Banks, C. J., & Wang, Z. (1995). Effect of organic loading rate on anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater in a fluidised-bed reactor. *Bioresource Technology*, 52(2), 157-162.
- Budiyono, I. S., & Sumardiono, S. (2014). Kinetic model of biogas yield production from vinasse at various initial pH: comparison between modified Gompertz model and first order kinetic model. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(13), 2798-2805.
- Buendía, I., Fernández, F., Villaseñor, J., & Rodríguez, L. (2008). Biodegradability of meat industry wastes under anaerobic and aerobic conditions. *Water research*, 42(14), 3767-3774.
- Buswell, A., & Mueller, H. (1952). Mechanism of methane fermentation. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(3), 550-552.
- Caixeta, C. E., Cammarota, M. C., & Xavier, A. M. (2002). Slaughterhouse wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor. *Bioresource Technology*, 81(1), 61-69.
- Chai, H., & Kang, W. (2012). Influence of biofilm density on anaerobic sequencing batch biofilm reactor treating mustard tuber wastewater. *Applied biochemistry and biotechnology*, 168(6), 1664-1671.
- Chan, P. C., Lu, Q., de Toledo, R. A., Gu, J.-D., & Shim, H. (2019). Improved anaerobic co-digestion of food waste and domestic wastewater by copper supplementation—Microbial community change and enhanced effluent quality. *Science of the total environment*, 670, 337-344.

- Chen, C., Liang, J., Yoza, B. A., Li, Q. X., Zhan, Y., & Wang, Q. (2017). Evaluation of an up-flow anaerobic sludge bed (UASB) reactor containing diatomite and maifanite for the improved treatment of petroleum wastewater. *Bioresource Technology*, *243*, 620-627.
- Chen, H., Wei, Y., Liang, P., Wang, C., Hu, Y., Xie, M., . . . Tian, H. (2020). Performance and microbial community variations of a upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor for treating monosodium glutamate wastewater: Effects of organic loading rate. *Journal of environmental management*, *253*, 109691.
- Chen, H., Wei, Y., Xie, C., Wang, H., Chang, S., Xiong, Y., . . . Yu, G. (2020). Anaerobic treatment of glutamate-rich wastewater in a continuous UASB reactor: Effect of hydraulic retention time and methanogenic degradation pathway. *Chemosphere*, *245*, 125672.
- Chen, H., Zhang, C., Rao, Y., Jing, Y., Luo, G., & Zhang, S. (2017). Methane potentials of wastewater generated from hydrothermal liquefaction of rice straw: focusing on the wastewater characteristics and microbial community compositions. *Biotechnology for biofuels*, *10*(1), 1-16.
- Chen, Y., Zhang, X., Chen, W., Yang, H., & Chen, H. (2017). The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance. *Bioresource Technology*, *246*, 101-109.
- Cheng, J. J. (2017). Anaerobic digestion for biogas production. In *Biomass to renewable energy processes* (pp. 143-194): CRC Press.
- Chiappero, M., Norouzi, O., Hu, M., Demichelis, F., Berruti, F., Di Maria, F., . . . Fiore, S. (2020). Review of biochar role as additive in anaerobic digestion processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *131*, 110037.
- Cruz Viggì, C., Rossetti, S., Fazi, S., Paiano, P., Majone, M., & Aulenta, F. (2014). Magnetite particles triggering a faster and more robust syntrophic pathway of methanogenic propionate degradation. *Environmental science & technology*, *48*(13), 7536-7543.
- Dang, Y., Holmes, D. E., Zhao, Z., Woodard, T. L., Zhang, Y., Sun, D., . . . Lovley, D. R. (2016). Enhancing anaerobic digestion of complex organic waste with carbon-based conductive materials. *Bioresource Technology*, *220*, 516-522.

- Debik, E., & Coskun, T. (2009). Use of the Static Granular Bed Reactor (SGBR) with anaerobic sludge to treat poultry slaughterhouse wastewater and kinetic modeling. *Bioresource Technology*, *100*(11), 2777-2782.
- Dehkoda, A. M., Gyenge, E., & Ellis, N. (2016). A novel method to tailor the porous structure of KOH-activated biochar and its application in capacitive deionization and energy storage. *Biomass and Bioenergy*, *87*, 107-121.
- Dendooven, L., & Escamilla-Silva, E. (2005). Poultry slaughter wastewater treatment with an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Bioresource Technology*, *96*(15), 1730-1736.
- Deng, C., Kang, X., Lin, R., Wu, B., Ning, X., Wall, D., & Murphy, J. D. (2023). Boosting biogas production from recalcitrant lignin-based feedstock by adding lignin-derived carbonaceous materials within the anaerobic digestion process. *Energy*, *278*, 127819.
- Diamantis, V., & Aivasidis, A. (2018). Performance of an ECSB reactor for high-rate anaerobic treatment of cheese industry wastewater: effect of pre-acidification on process efficiency and calcium precipitation. *Water Science and Technology*, *78*(9), 1893-1900.
- Dinuccio, E., Balsari, P., Gioelli, F., & Menardo, S. (2010). Evaluation of the biogas productivity potential of some Italian agro-industrial biomasses. *Bioresource Technology*, *101*(10), 3780-3783.
- Dutta, A., Davies, C., & Ikumi, D. S. (2018). Performance of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor and other anaerobic reactor configurations for wastewater treatment: a comparative review and critical updates. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, *67*(8), 858-884.
- Dwivedi, D., & Sehgal, T. (2022). Biofilm Development in Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria. In *Focus on bacterial biofilms*: IntechOpen.
- Ekström, C., Lindman, N., & Pettersson, R. (1985). Catalytic conversion of tars, carbon black and methane from pyrolysis/gasification of biomass. In *Fundamentals of thermochemical biomass conversion* (pp. 601-618): Springer.
- Escudie, R., Cresson, R., Delgenès, J.-P., & Bernet, N. (2011). Control of start-up and operation of anaerobic biofilm reactors: an overview of 15 years of research. *Water research*, *45*(1), 1-10.

- Esparza-Soto, M., Jacobo-López, A., Lucero-Chávez, M., & Fall, C. (2019). Anaerobic treatment of chocolate-processing industry wastewater at different organic loading rates and temperatures. *Water Science and Technology*, 79(12), 2251-2259.
- Fabbri, D., & Torri, C. (2016). Linking pyrolysis and anaerobic digestion (Py-AD) for the conversion of lignocellulosic biomass. *Current opinion in biotechnology*, 38, 167-173.
- Faisal, S., Salama, E.-S., Hassan, S. H., Jeon, B.-H., & Li, X. (2020). Biomethane enhancement via plastic carriers in anaerobic co-digestion of agricultural wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-13.
- Fang, C., Boe, K., & Angelidaki, I. (2011). Biogas production from potato-juice, a by-product from potato-starch processing, in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) and expanded granular sludge bed (EGSB) reactors. *Bioresour Technology*, 102(10), 5734-5741.
- Gao, M., Zhang, L., & Liu, Y. (2020). High-loading food waste and blackwater anaerobic co-digestion: Maximizing bioenergy recovery. *Chemical Engineering Journal*, 394, 124911.
- Geißler, A., Schwan, B., & Dornack, C. (2019). Developing a high-performance methane stage for biomass with high nitrogen loads. *Renewable Energy*, 143, 1744-1754.
- Gong, W.-j., Liang, H., Li, W.-z., & Wang, Z.-z. (2011). Selection and evaluation of biofilm carrier in anaerobic digestion treatment of cattle manure. *Energy*, 36(5), 3572-3578.
- Gür, E., & Demirer, G. (2019). Anaerobic digestability and biogas production capacity of pistachio processing wastewater in UASB reactors. *Journal of Environmental Engineering*, 145(8), 04019042.
- Han, Y., Guo, J., Zhang, Y., Lian, J., Guo, Y., Song, Y., . . . Yang, Q. (2018). Anaerobic granule sludge formation and perchlorate reduction in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor. *Bioresour Technology Reports*, 4, 123-128.
- Hassan, S. R., Zwain, H. M., & Dahlan, I. (2013). Development of Anaerobic Reactor for Industrial Wastewater Treatment: An Overview, Present Stage and Future Prospects. *Journal of Advanced Scientific Research*, 4(1).
- He, P., Zhang, H., Duan, H., Shao, L., & Lü, F. (2020). Continuity of biochar-associated biofilm in anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal*, 124605.

- Hendrickx, T., Pessotto, B., Prins, R., Habets, L., & Vogelaar, J. (2019). Biopaq® ICX: The next generation high rate anaerobic reactor proves itself at full scale. *Water Practice and Technology*, 14(4), 802-807.
- Hübner, T., & Mumme, J. (2015). Integration of pyrolysis and anaerobic digestion—use of aqueous liquor from digestate pyrolysis for biogas production. *Bioresource Technology*, 183, 86-92.
- Indren, M., Birzer, C. H., Kidd, S. P., & Medwell, P. R. (2020). Effect of total solids content on anaerobic digestion of poultry litter with biochar. *Journal of environmental management*, 255, 109744.
- Ivanovici, M., Cioabla, A., Lelea, D., Popescu, F., Dunga, L., & Ordodi, L. (2021). *Biogas production on lab-scale: utilization of wastewater from Hunedoara treatment plant*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.
- Izadi, P., Izadi, P., Eldyasti, A., & Hawkes, R. (2018). Enhancement of anaerobic digestion using particulate growth systems. *BioEnergy Research*, 11(3), 516-527.
- Jiang, L., Zhang, Y., Zhu, Y., Huang, Z., Huang, J., Wu, Z., . . . Li, H. (2023). Effects of Magnetic Biochar Addition on Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4278.
- Jiang, T., Shi, Z., Zhang, S., & Luo, G. (2023). Enhanced anaerobic digestion by hydrochar for efficient biogas production. In *Material-Microbes Interactions* (pp. 271-295); Elsevier.
- Jing, Z., Hu, Y., Niu, Q., Liu, Y., Li, Y.-Y., & Wang, X. C. (2013). UASB performance and electron competition between methane-producing archaea and sulfate-reducing bacteria in treating sulfate-rich wastewater containing ethanol and acetate. *Bioresource Technology*, 137, 349-357.
- Johnravindar, D., Kumar, R., Luo, L., Jun, Z., Manu, M., Wang, H., & Wong, J. W. (2022). Influence of inoculum-to-substrate ratio on biogas enhancement during biochar-assisted co-digestion of food waste and sludge. *Environmental Technology*, 1-13.
- Kafle, G. K., & Chen, L. (2016). Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. *Waste management*, 48, 492-502.

- Kafle, G. K., & Kim, S. H. (2013). Anaerobic treatment of apple waste with swine manure for biogas production: batch and continuous operation. *Applied Energy*, *103*, 61-72.
- Kan, T., Strezov, V., & Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *57*, 1126-1140.
- Kanjanarong, J., Giri, B. S., Jaisi, D. P., Oliveira, F. R., Boonsawang, P., Chaiprapat, S., . . . Khanal, S. K. (2017). Removal of hydrogen sulfide generated during anaerobic treatment of sulfate-laden wastewater using biochar: Evaluation of efficiency and mechanisms. *Bioresource Technology*, *234*, 115-121.
- Karadag, D., Koroğlu, O. E., Ozkaya, B., & Cakmakci, M. (2015). A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater. *Process Biochemistry*, *50*(2), 262-271.
- Karellas, S., Boukis, I., & Kontopoulos, G. (2010). Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(4), 1273-1282.
- Koch, K., Hafner, S. D., Weinrich, S., Astals, S., & Holliger, C. (2020). Power and limitations of biochemical methane potential (BMP) tests. *Frontiers in energy research*, *8*, 63.
- Kontogeorgopoulos, N. (2009). Wildlife tourism in semi-captive settings: a case study of elephant camps in northern Thailand. *Current Issues in Tourism*, *12*(5-6), 429-449.
- Kulikowska, D., Jóźwiak, T., Kowal, P., & Ciesielski, S. (2010). Municipal landfill leachate nitrification in RBC biofilm—Process efficiency and molecular analysis of microbial structure. *Bioresource Technology*, *101*(10), 3400-3405.
- Latif, M. A., Ghufuran, R., Wahid, Z. A., & Ahmad, A. (2011). Integrated application of upflow anaerobic sludge blanket reactor for the treatment of wastewaters. *Water research*, *45*(16), 4683-4699.
- Lee, J.-Y., Lee, S.-H., & Park, H.-D. (2016). Enrichment of specific electro-active microorganisms and enhancement of methane production by adding granular activated carbon in anaerobic reactors. *Bioresource Technology*, *205*, 205-212.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*: Routledge.

- Li, D., Liu, S., Mi, L., Li, Z., Yuan, Y., Yan, Z., & Liu, X. (2015). Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and cow manure. *Bioresource Technology*, *189*, 319-326.
- Li, J., He, C., Tian, T., Liu, Z., Gu, Z., Zhang, G., & Wang, W. (2020). UASB-modified Bardenpho process for enhancing bio-treatment efficiency of leachate from a municipal solid waste incineration plant. *Waste management*, *102*, 97-105.
- Li, Y., Li, X., Hao, Y., Liu, Y., Dong, Z., & Li, K. (2021). Biological and physiochemical methods of biofilm adhesion resistance control of medical-context surface. *International Journal of Biological Sciences*, *17*(7), 1769.
- Liao, Q., Chang, J.-s., Herrmann, C., & Xia, A. (2018). *Bioreactors for microbial biomass and energy conversion*: Springer.
- Lin, R., Cheng, J., Zhang, J., Zhou, J., Cen, K., & Murphy, J. D. (2017). Boosting biomethane yield and production rate with graphene: The potential of direct interspecies electron transfer in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, *239*, 345-352.
- Linville, J. L., Shen, Y., Ignacio-de Leon, P. A., Schoene, R. P., & Urgan-Demirtas, M. (2017). In-situ biogas upgrading during anaerobic digestion of food waste amended with walnut shell biochar at bench scale. *Waste management & research*, *35*(6), 669-679.
- Liu, Y., Lin, C., Jia, H., Yong, X., Xie, X., Wu, X., . . . Wei, P. (2019). Effects of amino-modified biofilm carriers on biogas production in the anaerobic digestion of corn straw. *Environmental Technology*.
- Liu, Y., Zhu, Y., Jia, H., Yong, X., Zhang, L., Zhou, J., . . . Wei, P. (2017). Effects of different biofilm carriers on biogas production during anaerobic digestion of corn straw. *Bioresource Technology*, *244*, 445-451.
- Loizia, P., Neofytou, N., & Zorpas, A. A. (2019). The concept of circular economy strategy in food waste management for the optimization of energy production through anaerobic digestion. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(15), 14766-14773.
- Mainardis, M., Flaibani, S., Mazzolini, F., Peressotti, A., & Goi, D. (2019). Techno-economic analysis of anaerobic digestion implementation in small Italian breweries and evaluation of biochar and granular activated carbon addition effect on methane yield. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *7*(3), 103184.

- Marcos, A., Al-Kassir, A., Cuadros, F., & Yusaf, T. (2017). Treatment of slaughterhouse waste water mixed with serum from lacteal industry of extremadura in Spain to produce clean energy. *Energies*, 10(6), 765.
- Martí-Herrero, J., Alvarez, R., Rojas, M., Aliaga, L., Céspedes, R., & Carbonell, J. (2014). Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. *Bioresource Technology*, 167, 87-93.
- Meng, Y., Jost, C., Mummme, J., Wang, K., & Linke, B. (2016). An analysis of single and two stage, mesophilic and thermophilic high rate systems for anaerobic digestion of corn stalk. *Chemical Engineering Journal*, 288, 79-86.
- Meyer-Kohlstock, D., Haupt, T., Heldt, E., Heldt, N., & Kraft, E. (2016). Biochar as additive in biogas-production from bio-waste. *Energies*, 9(4), 247.
- Montes, J. A., Leivas, R., Martínez-Prieto, D., & Rico, C. (2019). Biogas production from the liquid waste of distilled gin production: Optimization of UASB reactor performance with increasing organic loading rate for co-digestion with swine wastewater. *Bioresource Technology*, 274, 43-47.
- Morales-Polo, C., Cledera-Castro, M. D. M., & Moratilla Soria, B. Y. (2018). Reviewing the anaerobic digestion of food waste: From waste generation and anaerobic process to its perspectives. *Applied Sciences*, 8(10), 1804.
- Moteeb, S. H. (2008). Quantitative and qualitative assays of bacterial biofilm produced by *Pseudomonas aeruginosa* and *Klebsiella* spp. *J. Al-anbar Univ. pure sci*, 2(3), 6-13.
- Nanda, S., Azargohar, R., Kozinski, J. A., & Dalai, A. K. (2014). Characteristic studies on the pyrolysis products from hydrolyzed Canadian lignocellulosic feedstocks. *BioEnergy Research*, 7(1), 174-191.
- Pan JunTing, P. J., Ma JunYi, M. J., Zhai LiMei, Z. L., Luo Tao, L. T., Mei ZiLi, M. Z., & Liu HongBin, L. H. (2019). Achievements of biochar application for enhanced anaerobic digestion: a review.
- Parker, W. J. (2005). Application of the ADM1 model to advanced anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 96(16), 1832-1842.

- Pecchi, M., & Baratieri, M. (2019). Coupling anaerobic digestion with gasification, pyrolysis or hydrothermal carbonization: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *105*, 462-475.
- Pelaez-Samaniego, M. R., Smith, M. W., Zhao, Q., Garcia-Perez, T., Frear, C., & Garcia-Perez, M. (2018). Charcoal from anaerobically digested dairy fiber for removal of hydrogen sulfide within biogas. *Waste management*, *76*, 374-382.
- Pellera, F.-M., & Gidakos, E. (2016). Effect of substrate to inoculum ratio and inoculum type on the biochemical methane potential of solid agroindustrial waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *4*(3), 3217-3229.
- Pererva, Y., Miller, C. D., & Sims, R. C. (2020). Existing empirical kinetic models in biochemical methane potential (BMP) testing, their selection and numerical solution. *Water*, *12*(6), 1831.
- Pilarska, A. A., Wolna-Maruwka, A., Pilarski, K., Janczak, D., Przybył, K., & Gawrysiak-Witulska, M. (2019). The use of lignin as a microbial carrier in the co-digestion of cheese and wafer waste. *Polymers*, *11*(12), 2073.
- Qambrani, N. A., Rahman, M. M., Won, S., Shim, S., & Ra, C. (2017). Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *79*, 255-273.
- Qazi, J. I., Nadeem, M., Baig, S. S., Baig, S., & Syed, Q. (2011). Anaerobic fixed film biotreatment of dairy wastewater. *Middle-East Journal of Scientific Research*, *8*(3), 590-593.
- Quan, K., Hou, J., Zhang, Z., Ren, Y., Peterson, B. W., Flemming, H.-C., . . . van der Mei, H. C. (2022). Water in bacterial biofilms: pores and channels, storage and transport functions. *Critical reviews in microbiology*, *48*(3), 283-302.
- Ramm, P., Jost, C., Neitmann, E., Sohling, U., Menhorn, O., Weinberger, K., . . . Linke, B. (2014). Magnetic biofilm carriers: the use of novel magnetic foam glass particles in anaerobic digestion of sugar beet silage. *Journal of renewable energy*, *2014*.
- Rasapoor, M., Young, B., Asadov, A., Brar, R., Sarmah, A. K., Zhuang, W.-Q., & Baroutian, S. (2020). Effects of biochar and activated carbon on biogas generation: A thermogravimetric and chemical analysis approach. *Energy Conversion and Management*, *203*, 112221.

- Rattanawanee, A., Duangpukdee, O., & Poolprasert, P. (2013). Insect diversity during different stages of Asiatic Elephant dung deterioration in Eastern Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 47(3), 387-397.
- Reungsang, A., Pattra, S., & Sittijunda, S. (2012). Optimization of key factors affecting methane production from acidic effluent coming from the sugarcane juice hydrogen fermentation process. *Energies*, 5(11), 4746-4757.
- Reza, M. S., Ahmed, A., Caesarendra, W., Abu Bakar, M. S., Shams, S., Saidur, R., . . . Azad, A. K. (2019). Acacia holosericea: an invasive species for bio-char, bio-oil, and biogas production. *Bioengineering*, 6(2), 33.
- Ribeiro, F. R., Passos, F., Gurgel, L. V. A., Baêta, B. E. L., & De Aquino, S. F. (2017). Anaerobic digestion of hemicellulose hydrolysate produced after hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse in UASB reactor. *Science of the Total Environment*, 584, 1108-1113.
- Rico, C., Montes, J. A., & Rico, J. L. (2017). Evaluation of different types of anaerobic seed sludge for the high rate anaerobic digestion of pig slurry in UASB reactors. *Bioresource Technology*, 238, 147-156.
- Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J., & Rico, J. L. (2015). High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate. *Chemical Engineering Journal*, 262, 794-802.
- Sakar, S., Yetilmezsoy, K., & Kocak, E. (2009). Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment—a literature review. *Waste management & research*, 27(1), 3-18.
- Salman, C. A., Schwede, S., Thorin, E., & Yan, J. (2017). Enhancing biomethane production by integrating pyrolysis and anaerobic digestion processes. *Applied Energy*, 204, 1074-1083.
- Saravanan, V., & Sreekrishnan, T. (2006). Modelling anaerobic biofilm reactors—A review. *Journal of environmental management*, 81(1), 1-18.
- Schneider, D. (2014). Metagenomic and Metatranscriptomic Analyses of Calcifying Biofilms.

- Shahkarami, S., Dalai, A. K., & Soltan, J. (2016). Enhanced CO<sub>2</sub> adsorption using MgO-impregnated activated carbon: impact of preparation techniques. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(20), 5955-5964.
- Shanmugam, S. R., Adhikari, S., Nam, H., & Sajib, S. K. (2018). Effect of bio-char on methane generation from glucose and aqueous phase of algae liquefaction using mixed anaerobic cultures. *Biomass and Bioenergy*, 108, 479-486.
- Shen, Y., Linville, J. L., Urgan-Demirtas, M., Schoene, R. P., & Snyder, S. W. (2015). Producing pipeline-quality biomethane via anaerobic digestion of sludge amended with corn stover biochar with in-situ CO<sub>2</sub> removal. *Applied Energy*, 158, 300-309.
- Shineh, G., Mobaraki, M., Perves Bappy, M. J., & Mills, D. K. (2023). Biofilm formation, and related impacts on healthcare, food processing and packaging, industrial manufacturing, marine industries, and sanitation—A review. *Applied Microbiology*, 3(3), 629-665.
- Siddiki, S. Y. A., Uddin, M., Mofijur, M., Fattah, I., Ong, H. C., Lam, S. S., . . . Ahmed, S. (2021). Theoretical calculation of biogas production and greenhouse gas emission reduction potential of livestock, poultry and slaughterhouse waste in Bangladesh. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105204.
- Siddique, M. N. I., & Wahid, Z. A. (2018). Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. *Journal of cleaner production*, 194, 359-371.
- Sugiarto, Y., Wijayanti, U. R., Sunyoto, N. M. S., Maharsih, I. K., Andriani, R. D., & Anugroho, F. (2023). The Effect of Biochar Particle Size on Biogas Production Using Bread Waste Substrate. *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, 11(1), 105-115.
- Szentgyörgyi, E., Nemestóthy, N., & Belafi-Bako, K. (2010). Anaerobic moving bed biofilm fermenter for biogas production. *Environment Protection Engineering*, 36(4), 117-125.
- Tangkathitipong, P., Intanoo, P., Butpan, J., & Chavadej, S. (2017). Separate production of hydrogen and methane from biodiesel wastewater with added glycerin by two-stage anaerobic sequencing batch reactors (ASBR). *Renewable Energy*, 113, 1077-1085.
- Tassew, F. A., Bergland, W. H., Dinamarca, C., & Bakke, R. (2020). Influences of temperature and substrate particle content on granular sludge bed anaerobic digestion. *Applied Sciences*, 10(1), 136.

- Tektas, S., Thurnheer, T., Eliades, T., Attin, T., & Karygianni, L. (2020). Initial bacterial adhesion and biofilm formation on aligner materials. *Antibiotics*, *9*(12), 908.
- Tian, T., Qiao, S., Li, X., Zhang, M., & Zhou, J. (2017). Nano-graphene induced positive effects on methanogenesis in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, *224*, 41-47.
- Valero, D., Rico, C., Canto-Canché, B., Domínguez-Maldonado, J. A., Tapia-Tussell, R., Cortes-Velazquez, A., & Alzate-Gaviria, L. (2018). Enhancing biochemical methane potential and enrichment of specific electroactive communities from nixtamalization wastewater using granular activated carbon as a conductive material. *Energies*, *11*(8), 2101.
- Van Ginkel, S. W., & Logan, B. (2005). Increased biological hydrogen production with reduced organic loading. *Water research*, *39*(16), 3819-3826.
- Vasconcelos, E., Santaella, S., Viana, M., Dos Santos, A., Pinheiro, G., & Leitão, R. (2019). Composition and ecology of bacterial and archaeal communities in anaerobic reactor fed with residual glycerol. *Anaerobe*, *59*, 145-153.
- Vidal, J., Carvajal, A., Huilnir, C., & Salazar, R. (2019). Slaughterhouse wastewater treatment by a combined anaerobic digestion/solar photoelectro-Fenton process performed in semicontinuous operation. *Chemical Engineering Journal*, *378*, 122097.
- Wambugu, C. W., Rene, E. R., van de Vossenberg, J., Dupont, C., & van Hullebusch, E. D. (2019). Role of biochar in anaerobic digestion based biorefinery for food waste. *Frontiers in energy research*, *7*, 14.
- Wang, D., Ai, J., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S., . . . Song, C. (2017). Improving anaerobic digestion of easy-acidification substrates by promoting buffering capacity using biochar derived from vermicompost. *Bioresource Technology*, *227*, 286-296.
- Wang, G., Li, Q., Dzakpasu, M., Gao, X., Yuwen, C., & Wang, X. C. (2018). Impacts of different biochar types on hydrogen production promotion during fermentative co-digestion of food wastes and dewatered sewage sludge. *Waste management*, *80*, 73-80.
- Wang, T., Huang, Z., Ruan, W., Zhao, M., Shao, Y., & Miao, H. (2018). Insights into sludge granulation during anaerobic treatment of high-strength leachate via a full-scale IC reactor with external circulation system. *Journal of environmental sciences*, *64*, 227-234.

- Wang, T., Zhai, Y., Zhu, Y., Li, C., & Zeng, G. (2018). A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *90*, 223-247.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology*, *85*(4), 849-860.
- Xue, S., Wang, Y., Lyu, X., Zhao, N., Song, J., Wang, X., & Yang, G. (2020). Interactive effects of carbohydrate, lipid, protein composition and carbon/nitrogen ratio on biogas production of different food wastes. *Bioresource Technology*, *312*, 123566.
- Yang, Y., Zhang, Y., Li, Z., Zhao, Z., Quan, X., & Zhao, Z. (2017). Adding granular activated carbon into anaerobic sludge digestion to promote methane production and sludge decomposition. *Journal of Cleaner Production*, *149*, 1101-1108.
- Zainab, A., Meraj, S., & Liaquat, R. (2020a). Study on natural organic materials as biofilm carriers for the optimization of anaerobic digestion. *Waste and biomass valorization*, *11*(6), 2521-2531.
- Zainab, A., Meraj, S., & Liaquat, R. (2020b). Study on natural organic materials as biofilm carriers for the optimization of anaerobic digestion. *Waste and biomass valorization*, *11*, 2521-2531.
- Zhang, D., Li, W., Hou, C., Shen, J., Jiang, X., Sun, X., . . . Liu, X. (2017). Aerobic granulation accelerated by biochar for the treatment of refractory wastewater. *Chemical Engineering Journal*, *314*, 88-97.
- Zhang, D., Shen, J., Shi, H., Su, G., Jiang, X., Li, J., . . . Wang, L. (2019). Substantially enhanced anaerobic reduction of nitrobenzene by biochar stabilized sulfide-modified nanoscale zero-valent iron: Process and mechanisms. *Environment international*, *131*, 105020.
- Zhang, J., Zhao, W., Zhang, H., Wang, Z., Fan, C., & Zang, L. (2018). Recent achievements in enhancing anaerobic digestion with carbon-based functional materials. *Bioresource Technology*, *266*, 555-567.
- Zhang, L., Ban, Q., Li, J., & Wan, C. (2019). Functional bacterial and archaeal dynamics dictated by pH stress during sugar refinery wastewater in a UASB. *Bioresource Technology*, *288*, 121464.

Zhang, Z. P., Show, K. Y., Tay, J. H., Liang, D. T., Lee, D. J., & Jiang, W. J. (2007). Rapid formation of hydrogen-producing granules in an anaerobic continuous stirred tank reactor induced by acid incubation. *Biotechnology and bioengineering*, 96(6), 1040-1050.



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล นางสาวโสภี พันอินทร์

วัน เดือน ปีเกิด 24 กรกฎาคม 2535

ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 9 หมู่ 1 ตำบลเขาชะงุ้ม อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี  
รหัสไปรษณีย์ 70120

อีเมล sopee11lamp@gmail.com

## ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2561 – ปัจจุบัน หลักสูตร ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชา พลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน  
สถาบันการศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

พ.ศ. 2558 หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงานทดแทน  
สถาบันการศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2554 หลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาวิชา พลังงานทดแทน  
สถาบันการศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

## ทุนการศึกษาที่เคยได้รับ

พ.ศ. 2562 โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
ไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ  
เทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

พ.ศ. 2560 โครงการสนับสนุนทุนวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา  
ปีงบประมาณ 2560

## ผลงานทางด้านวิชาการ

### 1. การนำเสนองานประชุมวิชาการในระดับชาติ

**Pan-in, S.,** Sawatdeenarunat, C., Pramokchon, P., and Sintuya, H. (2018). Effect of Endo-nutrients on Bio-hydrogen Production from Banana by Microbial Consortium in Bioreactor effluent. The 11<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-11), Chaiphum, Thailand, November 28-30, pp. 35.

### 2. การนำเสนองานประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ

**Pan-in, S.,** Kangwansupamonkon, W., Boonpavanitchakul, K., Sawatdeenarunat, C., and Sintuya, H. (2021). Preparation of charcoal adsorbent from elephant manure for the enhancement of methane production by anaerobic digestion. The 21<sup>st</sup> International Union of Materials Research Societies – International Conference in Asia (IUMRS-ICA2020), Chaing Mai, Thailand, February 23-26.

**Pan-in, S., & Sukasem, N.** (2017). Methane production potential from anaerobic co-digestions of different animal dungs and sweet corn residuals. *Energy Procedia*, 138, 943-948.

### 3. วารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

**Panin, S.,** Setthapun, W., Sinsuw, A. A. E., Sintuya, H., & Chu, C.-Y. (2020). Biohydrogen and biogas production from mashed and powdered vegetable residues by an enriched microflora in dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27), 14073-14082.

Chaisombat, P., **Pan-in, S.,** Setthapun, W., and Sintuya, H. (2018). Renewable energy potential assessment of Mae-Tha Sub-district, Chiang Mai, Thailand. Conference on Green Technology Engineering and Application (GTEA), Taichung, Taiwan, May 25, pp. IV2-1-4.