



การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก



โดย
นางสาวเจษฎาพร กิจเจตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำขี้ของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก และ
เทอร์โมฟิลิก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

BIOGAS PRODUCTION FROM WATER OF WATER-HYACINTH LEAF AND
PATIOLE CO-DIGESTION WITH MICROORGANISM UNDER MESOPHILIC AND
THERMOPHILIC CONDITION



By
MISS Chessadabhorn KITJETTANEE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (ENERGY ENGINEERING)
Department of MECHANICAL ENGINEERING
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2018
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวา ร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้
สภาวะเมโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก
โดย เจษฎาพร กิจเจตน์
สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีระศักดิ์ หุดากร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล เขตเจนการ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีระศักดิ์ หุดากร)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เก่งกมล วรรณเกษม)

59406202 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ ผักตบชวา เมโซฟิลิก เทอร์โมฟิลิก

นางสาว เจษฎาพร กิจเจตน์: การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีระศักดิ์ หุดากร

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนการหมักร่วมของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่สภาวะเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก โดยใช้ถัง PVC ขนาด 20 ลิตร มีปริมาตรทำงาน (work volume) 16 ลิตร โดยทำการทดลองในห้องควบคุมอุณหภูมิในสภาวะเมโซฟิลิก 37 ± 2 องศาเซลเซียส และในสภาวะเทอร์โมฟิลิก 51 ± 1 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาพักเก็บ (hydraulic retention time : HRT) 60 วัน โดยใช้วิธีการแทนที่น้ำในการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และใช้เครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพในการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ มีเทน (CH_4) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และออกซิเจน (O_2) จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้ง 5 อัตราส่วน ได้แก่ 4: 1 2: 1 1: 1 1: 2 และ 1: 4 พบว่าการหมักร่วมของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาต่อจุลินทรีย์ในสภาวะเมโซฟิลิกที่อัตราส่วน 1: 1 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทน (specific methane yield : SMY) สูงสุดถึง $0.2387 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg VS}_{\text{added}}$ มีศักยภาพในการผลิตมีเทน (biochemical methane potential : BMP) สูงสุดถึง 51.89% นอกจากนี้ปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทนสูงสุด 73.07% เกิดขึ้นในวันที่ 37 ของกระบวนการทั้งหมด 60 วัน สำหรับการทดลองในสภาวะเทอร์โมฟิลิก พบว่าที่อัตราส่วน 1: 1 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทน (specific methane yield : SMY) สูงสุดถึง $0.1176 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg VS}_{\text{added}}$ มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (biochemical methane potential : BMP) สูงสุดถึง 61.67% มีปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทนสูงสุด 73.20% ในวันที่ 32 ของกระบวนการทั้งหมด 60 วัน จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนมีผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวา โดยพบว่าอัตราส่วนที่มีศักยภาพที่ดีที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก คือ อัตราส่วน 1: 1

59406202 : Major (ENERGY ENGINEERING)

Keyword : Biogas Water-hyacinth Mesophilic Thermophilic

MISS CHESSADABHORN KITJETTANEE : BIOGAS PRODUCTION FROM WATER OF WATER-HYACINTH LEAF AND PETIOLE CO-DIGESTION WITH MICROORGANISM UNDER MESOPHILIC AND THERMOPHILIC CONDITION THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR TEERASAK HUDAKORN

The objective of this research was to study the effect of the ratio from water of water hyacinth leaf and petiole co-digestion with microorganisms on the production potential of biogas at mesophilic and thermophilic conditions. The digester was made from the 20-L of the PVC tank with a 16-L work volume. In this experiment, it was conducted in a room controlled temperature in the mesophilic state 37 ± 2 °C and in the thermophilic state of 51 ± 1 °C in hydraulic retention time (HRT) 60 days. The volume of biogas was measured by using water displacement methods once per day and the composition of biogas such as CH₄, CO₂, and O₂ was used to analyze by a portable biogas monitor. The results of 5 ratios there are 4: 1, 2: 1, 1: 1, 1: 2, and 1: 4 it was found that the biogas production from water of water hyacinth leaf and petiole co-digestion with microorganisms in the mesophilic condition at the ratio 1: 1. It can produce a specific methane yield (SMY) up to $0.2387 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg VS}_{\text{added}}$ and gave a maximum biochemical methane potential (BMP) of 51.89%. In addition, the methane percentage was highest to 73.07% occurs on the 37th day. For experiments in thermophilic conditions, it was found that at the ratio 1: 1 can produce a specific methane yield (SMY) up to $0.1176 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg VS}_{\text{added}}$. The potential to produce a biochemical methane potential (BMP) up to 61.67% and gave highest methane gas percentage up to 73.20% on the 32nd day. Based on the results of the study, the ratio of water from water hyacinth leaf and petiole co-digestion with microorganisms affect to the biogas production potential we found that the ratio of the best potential to produce biogas in the mesophilic and thermophilic conditions is the ratio of 1: 1.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ หุตากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทสพล เขตเจนการ ประธานกรรม ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก่งกมล วิรัตน์เกษม ผู้ทรงคุณวุฒิในการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่อการทำวิจัย ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยศิลปากร ในส่วนของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลประจำปีงบประมาณ 2560 ที่ได้สนับสนุนมอบทุนอุดหนุนแก่งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมอย่างยั่งยืน(RDSE-SU)ที่อนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการก๊าซชีวภาพ และเครื่องมือวัดก๊าซชีวภาพ ตลอดจนบุคคลที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามที่ให้การช่วยเหลือและสนับสนุนการทำวิจัยนี้ตลอดมา จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เจษฎาพร กิจเจตน์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย	3
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย.....	4
1.7 ความจำกัดของการวิจัย	4
1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ผักตบชวา	6
2.1.1 ประเภทสายพันธุ์.....	6
2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา.....	6
2.1.2.1 ลำต้น	7
2.1.2.2 ใบ	7

2.1.2.3 ดอก	7
2.1.2.4 ผล.....	8
2.1.2.5 เมล็ด	8
2.1.3 โครงสร้างชีวมวลของผักตบชวา.....	8
2.1.4 ส่วนประกอบทางเคมีของผักตบชวา	11
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ	12
2.2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	12
2.2.2 กระบวนการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้ออกาศ (Anaerobic Digestion)	13
2.2.3 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.2.4 สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้ออกาศ	18
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	27
3.1 เครื่องมือสำหรับงานวิจัย.....	27
3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบในการหมักก๊าซชีวภาพ	27
3.2 สถานที่ทำการวิจัย	33
3.3 ระยะเวลาการวิจัย	33
3.4 งบประมาณการวิจัย.....	34
3.5 การวางแผนการวิจัย	35
3.5.1 แผนการดำเนินงาน.....	35
3.5.2 แผนการทดลอง.....	35
3.6 วิธีกรทดลอง.....	36
3.7 การวิเคราะห์ผล	37
3.7.1 การวัดปริมาตรการผลิตก๊าซทั้งหมด	37

3.7.2 เครื่องมือตรวจวัดค่าความเป็นกรด/ด่าง (pH meter).....	37
3.7.3 เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ก๊าซ.....	38
3.7.5 วิเคราะห์ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	40
4.1 คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของวัตถุดิบ	40
4.2 ผลของปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก (Daily biogas volume under Mesophilic condition).....	42
4.3 การเปรียบเทียบปริมาณของร้อยละก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก.....	43
4.4 ผลของปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก.....	44
4.5 ผลของปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมต่อปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก	45
4.6 ผลของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก.....	46
4.7 ผลของศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก.....	47
4.8 ผลของปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก (Daily biogas volume under thermophilic condition).....	49
4.9 การเปรียบเทียบปริมาณของร้อยละก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก	50
4.10 ผลของปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก	51
4.11 ผลของปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมต่อปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก.....	52
4.12 ผลของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก	53
4.13 ผลของศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	56
รายการอ้างอิง	58
ภาคผนวก	61



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบในรูปเซลล์โลส เฮมิเซลล์โลส และลิกนิน ของชีวมวลประเภทต่าง ๆ [25]	10
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของผักตบชวา.....	12
ตารางที่ 2.3 ผลการทดลองของ Klass et.al.....	20
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน/ช่วงระยะเวลาดำเนินงานวิจัยและผลที่ได้.....	33
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ.....	41
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบในแต่ละอัตราส่วน.....	41



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์โลสที่แสดงถึงการยึดโยงของโมเลกุลกลูโคส	9
รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ [29].....	13
รูปที่ 2.3 ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกาศ [30].....	15
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผักตบชวา.....	27
รูปที่ 3.2 เครื่องสับหยาบ.....	28
รูปที่ 3.3 เครื่องสับละเอียด	28
รูปที่ 3.4 เครื่องคั้นน้ำ	28
รูปที่ 3.5 ถังโพลีเอธีลีน (PVC).....	29
รูปที่ 3.6 ครอบกวดวงพลาสติกฐานหกเหลี่ยมขนาด 250 ml.....	29
รูปที่ 3.7 สายยางซิลิโคนใส.....	29
รูปที่ 3.8 สามทางทองเหลือง.....	30
รูปที่ 3.9 ข้อต่อทองเหลืองเกลียวนอก.....	30
รูปที่ 3.10 วาล์วทองเหลือง.....	30
รูปที่ 3.11 พาราฟิล์ม	31
รูปที่ 3.12 ครอบกวดอะคริลิก.....	31
รูปที่ 3.13 ครอบกวดวงแก้ว.....	31
รูปที่ 3.14 ถังเก็บแก๊ส	32
รูปที่ 3.15 แบบจำลองถังหมักของการหมักร่วมกันของน้ำผักตบชวากับจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ33	
รูปที่ 3.16 แสดงแผนการวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์	35
รูปที่ 3.17 แสดงแผนการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์	36

รูปที่ 3.18 การวัดปริมาตรการเกิดก๊าซทั้งหมด โดยเครื่องวัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ.....	37
รูปที่ 3.19 เครื่องตรวจวัดค่าความเป็นกรด/ด่าง (PH-220)	38
รูปที่ 3.20 เครื่องมือวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ.....	38
รูปที่ 3.21 เครื่อง Gas Cromatography	38
รูปที่ 4.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน..	42
รูปที่ 4.2 ปริมาณของร้อยละก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน	43
รูปที่ 4.3 ปริมาณของร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกตามระยะเวลา เก็บกัก 60 วัน	44
รูปที่ 4.4 ปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน.....	45
รูปที่ 4.5 ปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมต่อปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกตามระยะเวลา เก็บกัก 60 วัน	46
รูปที่ 4.6 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกในแต่ละอัตราส่วน	46
รูปที่ 4.7 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกในแต่ละอัตราส่วน	47
รูปที่ 4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน	49
รูปที่ 4.9 ปริมาณของร้อยละก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน	50
รูปที่ 4.10 ปริมาณของร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกตาม ระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน	51
รูปที่ 4.11 ปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน	52
รูปที่ 4.12 ปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมต่อปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกตาม ระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน	53
รูปที่ 4.13 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกแต่ละอัตราส่วน.....	53
รูปที่ 4.14 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกในแต่ละอัตราส่วน.....	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในกิจกรรมการดำรงชีวิตของมนุษย์และทวีความสำคัญมากยิ่งขึ้นเรื่อยๆ ตามการพัฒนาก้าวกระโดดของสังคม วัฒนธรรมและเทคโนโลยี ซึ่งแหล่งพลังงานค่อย ๆ เปลี่ยนไปเป็นแหล่งพลังงานที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีในการผลิตมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามประเทศไทยมีแหล่งพลังงานหลายประเภทด้วยกัน แต่มีในปริมาณค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับประเทศอื่น ๆ บางครั้งวิกฤตการณ์ของโลกอาจจะทำให้ประเทศไทยได้รับอิทธิพลอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [1] เนื่องจากปริมาณการใช้พลังงานของประเทศไทยยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด ทำให้กระทรวงพลังงานซึ่งเป็นผู้รับผิดชอบเกี่ยวกับการจัดหาพลังงานต้องทำหน้าที่อย่างหนักในการจัดหาพลังงานจากแหล่งต่าง ๆ ให้เพียงพอกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นนี้ ดังนั้นกระทรวงพลังงานจึงหันมามุ่งพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนที่ใช้วัตถุดิบภายในประเทศให้มากขึ้น โดยจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan : AEDP2015) เพื่อกำหนดกรอบและทิศทางการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศ รวมทั้งให้ความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากวัตถุดิบพลังงานทดแทนที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้เต็มตามศักยภาพ ทั้งในรูปของพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพภายใต้แผน AEDP2015 เป็นร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี 2579 ซึ่งจะเป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยลดการทำลายทรัพยากรที่อาจเป็นภัยคุกคามอย่างร้ายแรงต่อโลกและมนุษยชาติ อีกทั้งยังช่วยรักษาสมดุลของธรรมชาติ โดยจะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีชีวมวล (Biomass) จำนวนมาก เพราะประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานได้หลากหลายรูปแบบทั้งการนำไปใช้โดยตรงโดยการเผา การเปลี่ยนรูปให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Biofuels) ก๊าซชีวมวล (Producer Gas from Gasification) และก๊าซชีวภาพ (Biogas) [2]

ในแหล่งน้ำทั่ว ๆ ไปของประเทศไทยมีผักตบชวา (Water hyacinth) อยู่จำนวนมาก ซึ่งเป็นพืชน้ำที่มีการขยายพันธุ์และแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดปัญหาที่ระบบนิเวศทางน้ำของไทยมาอย่างยาวนาน เช่น ก่อให้เกิดน้ำเน่าเสีย กีดขวางการไหลของน้ำ รวมไปถึงการทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ซึ่งปัญหาทั้งหลายส่งผลกระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของประชากร ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีหน่วยงานหลายฝ่ายทั้งทางหน่วยราชการและภาคประชาชนร่วมมือร่วมใจเข้ามาจัดการกับปัญหานี้

แต่ก็ยังไม่สามารถที่จะกำจัดให้หมดไปได้ จากการคาดการณ์ในอนาคตคาดว่าผักตบชวาจะเป็นปัญหาเรื้อรังที่แก้ไม่ตกและไม่หมดไปจากประเทศไทยง่าย ๆ อย่างแน่นอน จากผลการศึกษาวิจัยของสถาบันทรัพยากรชายฝั่ง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พบว่า เมล็ดของผักตบชวาสามารถอยู่ได้นานถึง 30 ปี และสามารถสืบพันธุ์ได้ด้วยวิธีการแตกไหลแล้วกลายเป็นลำต้น [3] อย่างไรก็ตามสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นวัสดุในการเพาะเห็ด ใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ ใช้ผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล ยิ่งไปกว่านั้นสามารถนำไปย่อยสลายหรือหมักในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion) เพื่อผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas)

การนำผักตบชวามาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ที่สามารถผลิตและใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานฟอสซิล (น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน) หรือจัดเป็นพลังงานทางเลือก (Alternative Energy) ที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศ [4] จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา โดยการหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ในผักตบชวา ซึ่งอาศัยกลุ่มของจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ ไม่ว่าจะการใช้ผักตบชวาเป็นวัตถุดิบในการหมัก [5-7] ใช้ผักตบชวาหมักร่วมกับของเสียในครัวเรือน [5, 6] ใช้ผักตบชวาหมักร่วมกับจุลินทรีย์ [8-12] ใช้ผักตบชวาหมักร่วมกับมูลสุกร [13] ใช้ผักตบชวาหมักร่วมกับมูลโค [13-19] และใช้ผักตบชวาหมักร่วมกับมูลแกะ [20] พบว่าการใช้ผักตบชวาหมักร่วมกับจุลินทรีย์ มูลสุกร และมูลโค สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างผักตบชวาและวัตถุดิบที่นำมาหมักร่วม รวมถึงชนิดของวัตถุดิบที่นำมาหมักร่วม ทั้งนี้ยังสามารถนำผักตบชวาที่ย่อยสลายไปใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพซึ่งไม่ก่อให้เกิดสารเคมีตกค้างในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

แม้ว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา ไม่ว่าจะใช้ผักตบชวาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นเพียงอย่างเดียว หรือใช้หมักร่วมกับวัตถุดิบอื่นๆ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้ก็ยังไม่เป็นที่น่าพอใจมากนัก จึงมีการคิดค้นการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนทำการหมัก ไม่ว่าจะเป็นการปรับสภาพวัตถุดิบโดยการหั่น การสับ หรือการบด [8, 18, 21, 22] เป็นการลดขนาดวัตถุดิบหรือการเพิ่มพื้นที่เพื่อให้เซลล์โลสและเฮมิเซลล์โลสที่อยู่ข้างในถูกย่อยสลายได้มากขึ้น การใช้ความร้อน [21] หรือการใช้ของเหลวไอออนิก [22] รวมทั้งการหมักก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง [21, 23] เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการผลิตก๊าซชีวภาพจะเกิดขึ้นในอัตราสูงมากในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic) และอุณหภูมิสูง (Thermophilic)

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการใช้ผักตบชวาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการหมักจำเป็นจะต้องใช้ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบกวนต่อเนื่อง (CSTR) และมีขนาดใหญ่ เนื่องจากการใช้ผักตบชวามีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง ทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีราคาแพง จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้น้ำจากใบและต้นผักตบชวาเป็นวัตถุดิบตั้งต้น เพื่อลดปริมาณของแข็งแขวนลอย และถังหมักก๊าซชีวภาพที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการลด

ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพอีกด้วย เนื่องจากถังหมักก๊าซชีวภาพมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ใช้น้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของใบและลำต้นของผักตบชวา ร่วมกับจุลินทรีย์ที่สภาวะอุณหภูมิเมโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic)

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนการหมักร่วมของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวากับ จุลินทรีย์ที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่สภาวะอุณหภูมิเมโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic)

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ช่วงอุณหภูมิเมโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) มีผลต่อ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.3.2 อัตราส่วนการหมักร่วมระหว่างน้ำของใบและลำต้นผักตบชวากับจุลินทรีย์มีผลต่อ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการหมักก๊าซชีวภาพ คือ น้ำของใบและลำต้นของผักตบชวา และ จุลินทรีย์

1.4.2 ทำการทดลองแบบกะ (Batch) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิเมโซฟิลิก (30-40 °C) และ เทอร์โมฟิลิก (45-55 °C) ในระยะเวลาพักเก็บ (Hydraulic Retention Time) 60 วัน ภายในถัง PVC ความจุ 20 ลิตร

1.4.3 ทำการศึกษามูลของอัตราส่วนของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาต่อจุลินทรีย์ที่ อัตราส่วน 4: 1, 2: 1, 1: 1, 1: 2 และ 1: 4

1.4.4 วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และออกซิเจน (O₂)

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

1.5.1 รวบรวมข้อมูลและศึกษากระบวนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion)

1.5.2 ทำการทดลองหมักก๊าซชีวภาพด้วยน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ เพื่อทราบอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของผักตบชวา

1.5.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการกระบวนการย่อยสลาย

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย

1.6.1 การทดลองการหมักร่วมกันของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาและจุลินทรีย์ในสถานะไร้อากาศในอัตราส่วนต่าง ๆ จะดำเนินการการหมักแบบกะภายในถัง PVC ขนาด 20 ลิตร วัดปริมาตรก๊าซด้วยการแทนที่น้ำ โดยทำการทดลองที่คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

1.6.2 การทดลองหาผลของอัตราส่วนที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจะทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ในขอบเขตของการทดลองเท่านั้น

1.7 ความจำกัดของการวิจัย

1.7.1 ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและผลของอัตราส่วนการหมักร่วมกันของน้ำผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ที่สภาวะอุณหภูมิเมโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic)

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.8.1 ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ทั่ว ๆ ไปที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติที่ได้จากพืชและสัตว์ โดยสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (แกลบ ขานอ้อย ชังข้าวโพด) รวมถึงขยะมูลฝอย และของเสียจากสัตว์โดยอาจจะไม่ต้องผ่านหรือผ่านกระบวนการแปรรูปต่าง ๆ เพื่อให้ได้เป็นพลังงาน

1.8.2 ผักตบชวา (Water hyacinth) คือ พืชน้ำล้มลุกที่ลอยอิสระบนพื้นน้ำและสามารถอาศัยอยู่ได้ในทุกสภาพน้ำ มีถิ่นกำเนิดในแถบลุ่มน้ำแอมะซอน ประเทศบราซิล ในทวีปอเมริกาใต้ มีดอกสีม่วงอ่อน คล้ายช่อดอกกล้วยไม้ นอกจากนี้ยังแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วจนกลายเป็นวัชพืชที่ร้ายแรงในแหล่งน้ำทั่วไป

1.8.3 จุลินทรีย์ (Microorganism) คือ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ได้แก่ แบคทีเรีย อาร์เคีย รา และยีสต์ เป็นต้น ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถพบได้ทุกสภาวะแวดล้อม แม้แต่ในสภาวะแวดล้อมที่สิ่งมีชีวิตอื่นอยู่ไม่ได้ แต่จุลินทรีย์บางชนิดสามารถปรับตัวอาศัยอยู่ได้ หรือแม้กระทั่งในบริเวณที่ไม่มีออกซิเจน

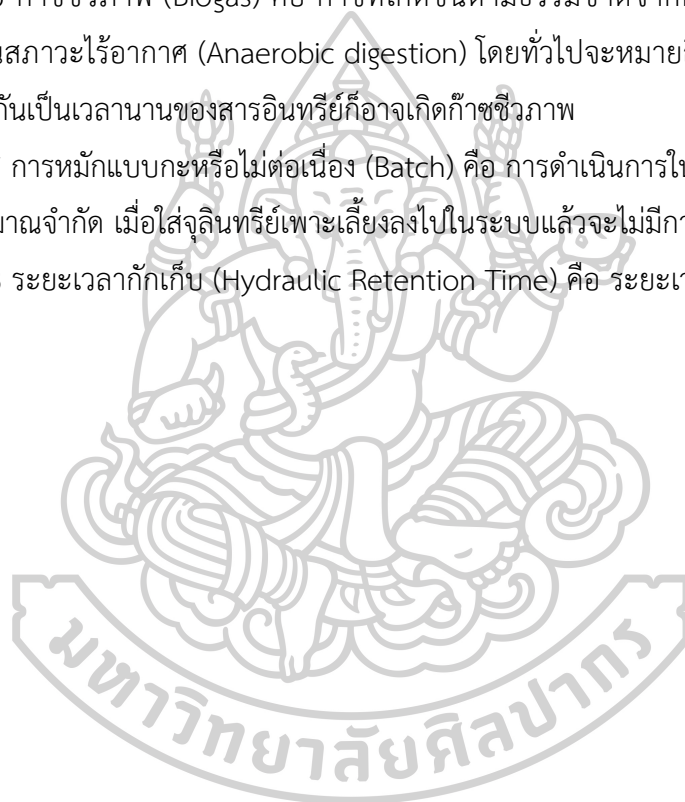
1.8.4 กระบวนการปรับสภาพ (Pre-treatment) คือ กระบวนการกำจัดสารประกอบจำพวกลิกนินและเซลลูโลสออกไปเพื่อให้การย่อยสลายเป็นได้ง่ายขึ้น แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์ และการปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ

1.8.5 การย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion) คือ กระบวนการที่อาศัยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน

1.8.6 ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion) โดยทั่วไปจะหมายถึง ก๊าซมีเทน ที่เกิดจากการหมักหมมกันเป็นเวลานานของสารอินทรีย์ก็อาจเกิดก๊าซชีวภาพ

1.8.7 การหมักแบบกะหรือไม่ต่อเนื่อง (Batch) คือ การดำเนินการในระบบปิดที่มีสารอาหารเริ่มต้น ในปริมาณจำกัด เมื่อใส่จุลินทรีย์เพาะเลี้ยงลงไปในระบบแล้วจะไม่มีสารเติมสารใด ๆ ลงไปอีก

1.8.8 ระยะเวลาที่กักเก็บ (Hydraulic Retention Time) คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการกักเก็บน้ำเสียในถังหมัก



บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างชีวมวลและส่วนประกอบทางเคมีของ ผักตบชวา การผลิตก๊าซชีวภาพ การวิเคราะห์ศักยภาพและผลของอัตราส่วนในการผลิตก๊าซชีวภาพ ของการหมักร่วมระหว่างน้ำผักตบชวากับจุลินทรีย์ รวมทั้งการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยในบทนี้ทำการรวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ผักตบชวา

2.1.1 ประเภทสายพันธุ์

1) ชีววิทยาของผักตบชวา

ผักตบชวา เป็นพืชน้ำที่รู้จักกันทั่วไป ซึ่งมีสายพันธุ์จากต่างถิ่น หรือที่เรียกกันว่า “เอเลี่ยน สปีชีส์” มีชื่อสามัญว่า Water Hyacinth, Floating water hyacinth, Java Weed, Water Orchid ชื่อวิทยาศาสตร์ *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (ชื่อพ้องวิทยาศาสตร์ *Eichhornia speciosa* Kunth) จัดอยู่ในวงศ์ผักตบ (Pontederiaceae) ชื่อตามท้องถิ่นอื่นๆ ที่คนเรียกกันมี ผักปง (นครราชสีมา) ผักปอด (อ่างทอง) ผักปอง (สุพรรณบุรี) บัวลอย (เชียงราย) ผักตบ (ภาคตะวันตกเฉียงเหนือ), ผักตบปอง สวะ (ภาคกลาง) ผักยะวา (ประเทศจีน) อันแท้จริงผักตบชวามีถิ่นกำเนิดอยู่ที่ประเทศบราซิล [24]

2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชที่เจริญอยู่บนผิวน้ำ จัดเป็นประเภทลอยน้ำ (Floating plant) โดยปกติรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดิน จึงถูกกระแสน้ำหรือน้ำพัดพาไปได้ไกล ๆ แต่ถ้าน้ำตื้นแล้วรากจะหยั่งยึดติดกับพื้นดินได้ลักษณะทรงต้น ประกอบด้วยกลุ่มของใบเรียงกันเป็นกระจุก ในต้นหนึ่ง ๆ จะมีใบตั้งแต่สองใบขึ้นไป ที่โคนก้านใบจะมีกาบใบ (Sheath) ลักษณะเป็นเยื่อบาง ๆ สีขาวแกมเขียวอ่อน แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล บริเวณสีน้ำตาลแกมม่วงเป็นส่วนของกาบใบที่เชื่อมติดกันโดยมีไหล (Stolon) ซึ่งเป็นลำต้นที่ทอดตามผิวน้ำช่วยในการเพิ่มจำนวนของผักตบชวา ซึ่งผักตบชวาต้นหนึ่งๆจะมีไหลแตกออกไปได้หลายอัน เมื่อไหลแตกออกไปจะเจริญขึ้นเป็นต้นใหม่ แต่ยังติดกับต้นเดิมอยู่และเกิดเป็นกอพร้อมทั้งมีรากเกิดขึ้น รากของผักตบชวาเป็นรากฝอย (Fibrous root) ที่มีรากย่อยๆ เป็นกระจุก รากที่แทงออกจะมีลักษณะอวบสีขาว เมื่อมีอายุมากขึ้นจึงจะมีรากขนอ่อน (Root hair) ที่มีสี

น้ำตาลอ่อน และเมื่อแก่รากขนอ่อนนี้จะเป็นสีน้ำตาลแก่จนถึงสีดำ ความยาวของรากจะแตกต่างกันไป บางเส้นก็ยาวเกือบถึงหนึ่งเมตร (60-90 เซนติเมตร)

2.1.2.1 ลำต้น

มีลำต้นสั้นแตกใบเป็นกอลอยไปตามน้ำ มีไหล ซึ่งเกิดตามซอกใบแล้วเจริญเป็นต้นอ่อนที่ปลายไหล ลำต้นมีลักษณะอวบน้ำ ผิวลำต้นเรียบเป็นสีเขียวอ่อนและเข้ม ลำต้นจะมีขนาดสั้นหรือยาวจะขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของแม่น้ำ ก้านใบจะพองออกตรงช่องกลาง ภายในมีลักษณะเป็นรูพรุน จึงช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ ลำต้นสั้น มีความสูงได้ประมาณ 3-90 เซนติเมตร

2.1.2.2 ใบ

เป็นแบบใบเดี่ยว (Simple leaf) ประกอบด้วยแผ่นใบ (Blade) และก้านใบ (Petiole) แผ่นใบมีลักษณะคล้ายรูปไต (Reniform) หรือคล้ายรูปหัวใจ (Cordate) มักมีความกว้างมากกว่ายาวหรือเกือบจะเท่ากัน ในระยะแรกปลายใบมักจะมน แต่เมื่ออายุมากขึ้นปลายใบจะแหลม มีสีเขียวเข้มและขอบใบมีลักษณะเรียบ ระบบเส้นใบ (Venation) ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและอาหารเป็นเส้นใบแบบขนาน ก้านใบมีลักษณะเรียวยาวและอวบน้ำ ลำต้นผักตบชวาเจริญอยู่ห่างๆ กัน ลำต้นจะเล็กและก้านใบมักจะพองออกเป็นท่อนลอยน้ำ ซึ่งลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Buoyancy leaf แต่ถ้าผักตบชวาเจริญอยู่ในที่เบียดชิดกัน โดยเฉพาะในน้ำนิ่งก้านใบจะลีบ นอกจากนั้นก้านใบยังยาวมาก บางแห่งพบว่ายาวถึงหนึ่งเมตรก็มี การเกิดใบอ่อนจะเกิดตรงกลางกอ โดยแผ่นใบของใบอ่อนจะม้วนหุ้มรอบโคนก้านใบใกล้เคียงและมีกาบใบบางใสหุ้มรอบอีกทีหนึ่ง ปลายกาบใบนี้จะมีลักษณะคอดแล้วบานขอบหยักเล็กน้อยเป็นเยื่อบางๆ เมื่อใบอ่อนโตขึ้น ก้านใบก็จะยาวขึ้นต้นกาบใบที่ห่อหุ้มนั้นออก แผ่นใบก็จะค่อยคลี่เป็นอิสระจากโคนก้านใบเดิมในระยะแรกใบจะมีสีเขียวอ่อนต่อไปจะมีสีเขียวเข้มขึ้น กาบใบนั้นก็คงติดอยู่ตรงโคนก้านใบ

2.1.2.3 ดอก

ผักตบชวามีดอกสีฟ้าแกมม่วงสวยงามมาก ดอกออกเป็นช่อไม่มีก้านดอก (Spike) ในช่อหนึ่ง ๆ จะมีจำนวนดอกแตกต่างกันไป ถ้าช่อดอกเล็กจะมีดอกประมาณ 4-5 ดอก ถ้าช่อดอกใหญ่อาจมีจำนวนดอกเพิ่มขึ้นจนถึง 60 ดอก ช่อดอกจะเกิดบริเวณกลางๆ ต้น การเกิดของช่อดอกมีลักษณะคล้ายกับการเกิดใบ คือ ที่โคนก้านจะมีกาบใบบาง ๆ หุ้มไว้และที่ปลายก้านมีแผ่นใบเล็ก ๆ เกิดขึ้นด้วย ช่อดอกจะเจริญมาจากโคนก้านใบเล็ก ๆ นี้ โดยที่ใบครั้งแรกจะมีกาบใบบาง ๆ หุ้มช่อดอกไว้ที่หนึ่งและมีกาบใบอีกอันหุ้มโคนก้านใบไว้ เมื่อช่อดอกเจริญขึ้นก้านช่อดอกจะค่อย ๆ ยาว

พองใหญ่ขึ้น ทำให้ภายในที่หุ้มก้านช่อดอกกับก้านใบช่อดอก และเมื่อก้านช่อดอกเจริญมากขึ้นจะดัน กาบใบด้านในช่อดอก ก้านช่อดอก (Peduncle) จะแทงช่อดอกเจริญโผล่ขึ้นมาโดยมีใบเล็ก ๆ ที่ปลาย ก้านใบและภายในทำหน้าที่เป็นใบประดับ (Bract) รองรับช่อดอกอีกทีหนึ่ง เมื่อเจริญเต็มที่แล้วดอก มักจะบานพร้อมกันหมดทั้งช่อ โดยจะค่อยๆ บานตั้งแต่แสงอาทิตย์เริ่มส่องแสงแล้วบานเต็มที่เมื่อ แสงแดดส่องจ้า ดอกจะบานเพียง 1 วัน หลังจากนั้นกลีบดอกจะหุบเหี่ยวขดเป็นเกลียว แล้วก้านช่อดอกจะโค้งงอลงสู่พื้นน้ำ ผักตบชวาต้นหนึ่งๆ จะมีดอกได้หลายช่อ โดยจะทยอยกันออกดอก ดอกแต่ละดอกประกอบด้วยกลีบดอก (Perianth) 6 กลีบ ปลายกลีบแยกเป็นแฉก มีขนาดแตกต่างกัน ส่วนโคนกลีบจะติดกันเป็นหลอด (Tube) มีสีเขียว หลอดนี้จะติดไปถึงก้านช่อดอก ส่วนกลีบรวมนั้นจะเป็นสีม่วงอ่อน มีกลีบอันหนึ่งอยู่ตรงกลางขนาดใหญ่กว่ากลีบอื่น มีแต้มสีเหลืองทับอยู่บนสีม่วงทำให้ ดอกมีสีส้มสวยงามมาก นอกจากนี้ยังมีเกสรตัวผู้ (Stamen) 6 อัน สั้น 3 ยาว 3 ติดอยู่ที่ตอนล่างของ กลีบดอก อับเกสรตัวผู้ (Anther) มีสีเหลือง ส่วนเกสรตัวเมีย (Pistil) มีส่วนตรงปลายเรียกว่า sigma มีสีม่วงอ่อนอยู่บนก้าน (Style) ต่อมาจากรังไข่ (Ovary) ซึ่งอยู่เหนือกลีบดอก (Superior ovary) รัง ไข่นี้เมื่อได้รับการผสมแล้ว จะเจริญขึ้นเป็นผล

2.1.2.4 ผล

เป็นแบบแคปซูลแห้งและแตกได้ ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก แบ่งเป็นพู 3 พู เมื่อแก่จะแตกกลางพู ภายในมีเมล็ดจำนวนมาก ลักษณะของเมล็ดเป็นรูปกลมขนาดเล็ก

2.1.2.5 เมล็ด

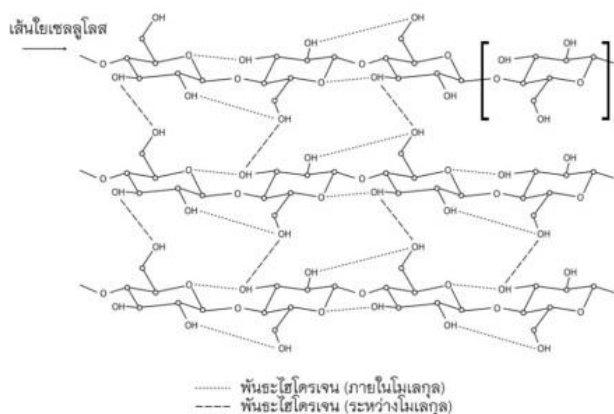
ตามปกติแล้วในสภาพแวดล้อมในประเทศไทยมักจะไม่ค่อยพบว่ามี การผสม ของดอกผักตบชวาจึงไม่ค่อยพบเมล็ด (Seed) ผักตบชวา ในกรณีที่มีการผสมเมล็ดมีขนาดเล็กมากสี น้ำตาลเข้ม มีรายงานจากต่างประเทศ พบว่าหลังจากที่ดอกบานได้ 48 ชั่วโมง และไม่มีแมลงมาช่วย ผสมเกสรจะเกิดการผสมตัวเอง หลังจากนั้น 3 สัปดาห์ เมล็ดเล็ก ๆ สีดำจะแก่และก้านช่อดอกจะโค้ง งอลงเบื้องล่าง เมื่อกระเปาะผลแตกเมล็ดก็จะหลุดลงสู่พื้นท้องน้ำในเนื้อที่ 1 ไร่ จะมีเมล็ดตกในโคลน ตมใต้พื้นน้ำถึง 18 ล้านเมล็ด และสามารถรักษาความงอกอยู่ได้นานถึง 15 ปี เพราะฉะนั้นภายใต้พื้น น้ำของดินแดนต่าง ๆ ที่เคยมีผักตบชวาขึ้นอยู่อาจจะมีเมล็ดผักตบชวาสะสมอยู่นับเป็นพันล้านเมล็ด รอคอยที่จะงอกจากเมล็ดเป็นต้นอ่อนเมื่อถึงคราวจำเป็น

2.1.3 โครงสร้างชีวมวลของผักตบชวา

โครงสร้างชีวมวลของผักตบชวาซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้างชีวมวลของหญ้า โดยมีชีวมวลที่มีโครงสร้างเป็นลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic Biomass) ซึ่งประกอบด้วย

เซลลูโลส(Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) โดย 40 ถึง 60% ของผนังเซลล์พืชประกอบด้วย เซลลูโลสที่เป็นพอลิเมอร์สายตรงซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของกลูโคสหลายๆ โมเลกุล นอกจากนี้ในเซลลูโลสยังประกอบด้วยกลุ่มของสารจำพวกไฮดรอกซิล (OH) ซึ่งทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนทั้งระหว่างสายเดียวกันของเซลลูโลสและระหว่างสายที่อยู่ติดกัน (รูปที่ 2.1) การเกิดพันธะดังกล่าวส่งผลให้เกิดไมโครไฟบริล (Microfibrils) และความแข็งแรงของโครงสร้างพืช ทั้งนี้การเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสไม่ได้มีความสม่ำเสมอทั้งโครงสร้างของพืช ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของระดับความแข็งแรงในโครงสร้างของพืช

เมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้าน มีรูปร่างไม่แน่นอน ประกอบด้วยน้ำตาลสายสั้น ๆ หลายชนิด ด้วยลักษณะของโครงสร้างดังกล่าวทำให้เฮมิเซลลูโลสถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่าย ทั้งนี้พืชมีส่วนประกอบที่เป็นเฮมิเซลลูโลส 20 ถึง 40% โดยความสามารถในการละลายของเฮมิเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ รวมถึงพารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น ความชื้น และพีเอช



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลสที่แสดงถึงการยึดโยงของโมเลกุลกลูโคส

ลิกนินเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากในโลกเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส โดยมีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ลิกนินเป็นสารโมเลกุลใหญ่โดยมีลักษณะสมบัติเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และมีโครงสร้างเป็นสารอะโรมาติก ด้วยลักษณะสมบัตินี้ ทำให้ลิกนินไม่ละลายน้ำและทำปฏิกิริยาได้น้อย

ส่วนประกอบของชีวมวลประเภทต่าง ๆ ในรูปเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แสดงได้ในตารางที่ 2.1 จากข้อมูลในตารางจะเห็นได้ว่า ลิกนินซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพของชีวมวลประเภทลิกนินเซลลูโลส มีปริมาณน้อยในชีวมวลบางประเภท ชีวมวลที่มีลักษณะสมบัติดังกล่าวต้องการการบำบัดเบื้องต้นที่ไม่เข้มข้นมากเท่ากับชีวมวลในกลุ่มที่มีลิกนินสูง

(ชีวมวลบางประเภทมีลิกนินถึงครึ่งหนึ่งของน้ำหนักทั้งหมด) หากพิจารณาเฉพาะชีวมวลประเภท ผักตบชวา จะพบว่ามีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน 16.2%, 55.3% และ 6.1% ตามลำดับ โดยมีปริมาณลิกนินค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลประเภทอื่นๆ ทำให้ในกระบวนการเปลี่ยนรูประงอินทรีย์ในผักตบชวาให้เป็นก๊าซชีวภาพ ไม่ยุ่งยากในการบำบัดเบื้องต้นเหมือนชีวมวลประเภทอื่นๆ

ในการย่อยสลายชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพ จำเป็นต้องมีการบำบัดเบื้องต้นเพื่อให้เกิดกระบวนการสำคัญ 3 กระบวนการ คือ กระบวนการกำจัดลิกนิน (Delignification) ซึ่งจะทำให้เกิดการปลดปล่อยเซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลสจากการยึดเกาะของลิกนิน และกระบวนการเปลี่ยนรูปโพลิเมอร์ (Depolymerisation) หรือ ไฮโดรไลซิสของโพลิเมอร์ คาร์โบไฮเดรตเพื่อปลดปล่อยน้ำตาล และ ค) การหมักย่อยของน้ำตาลเฮกโซสและเพนโทสในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากลักษณะสมบัติของชีวมวลประเภทผักตบชวาซึ่งมีปริมาณลิกนินต่ำ ดังนั้นในการบำบัดเบื้องต้น ก่อนใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพนั้น จะทำการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ (Mechanical Pretreatment) โดยวิธีการที่นิยมใช้คือการลดขนาด โดยการทำให้วัสดุมีขนาดเล็กลง เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับผักตบชวามากขึ้น นอกจากนี้การลดขนาดยังเป็นการเพิ่มพื้นที่เพื่อให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่อยู่ในตัวผักตบชวาก่อย่อยสลายได้มากขึ้น โดยวิธีการที่นิยมใช้ในการลดขนาดคือ การหั่น สับ บด หรือทุบ ซึ่งวิธีการลดขนาดวัตถุดิบนี้มักใช้เป็นขั้นตอนแรกของการบำบัดเบื้องต้นของผักตบชวาก่อนใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบในรูปเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของชีวมวลประเภทต่าง ๆ [25]

ชีวมวล	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ไม้เนื้อแข็ง	40-55	24-40	18-25
ไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-35	25-35
เปลือกถั่ว	25-30	25-35	30-40
ซังข้าวโพด	45	35	15
หญ้า	25-40	35-50	10-30
กระต่าย	85-99	0	0-15
ฟางข้าวสาลี	30	50	15

ชีวมวล	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ขยะที่ถูกคัดแยก	60	20	20
ใบไม้	15-20	80-85	0
ใยเมล็ดฝ้าย	80-95	5-20	0
กระดาษหนังสือพิมพ์	40-55	25-40	18-30
ของเสียทางเคมีจากการผลิตเยื่อกระดาษ	60-70	10-20	5-10
ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นต้น	8-15	ไม่มีข้อมูล	24-29
ผักตบชวา [5]	16.2	55.3	6.1
มูลสุกร	6	28	ไม่มีข้อมูล
มูลวัว	1.6-4.7	1.4-3.3	2.7-5.7

2.1.4 ส่วนประกอบทางเคมีของผักตบชวา

จากการที่กลุ่มงานวิเคราะห์อาหารสัตว์ กองอาหารสัตว์ ได้สุ่มเก็บตัวอย่างผักตบชวา มาวิเคราะห์หาคุณค่าทางอาหาร พบว่าต้นผักตบชวาสด (ใบรวมก้านใบ) มีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่สูงถึง 90% มีโปรตีน 1% เถ้า 1.4% และเยื่อใย (NDF) 5.2% จะเห็นได้ว่าต้นผักตบชวาสดมีคุณค่าทางอาหารสัตว์ต่ำ แต่เมื่อนำไปตากแห้งพบว่าคุณภาพจะสูงขึ้น โดยที่ส่วนใบจะมีคุณค่าทางอาหารสูงคือ มีโปรตีน 16.8% NDF 50% แต่ก้านใบมีโปรตีนเพียง 6.5% และ NDF 51.6% การที่คุณค่าทางอาหารของใบ และก้านใบมีความแตกต่างกันเช่นนี้ อาจจะเป็นเนื่องมาจากใบของพืชมีหน้าที่ในการสังเคราะห์แสงสร้างอาหาร ดังนั้นจึงมีโภชนะต่าง ๆ สะสมอยู่มากกว่าส่วนอื่น [26]

ผักตบชวาแห้งทั้งส่วนใบ และก้าน มีแคลเซียมประมาณ 2% ฟอสฟอรัส ประมาณ 0.5% และไลซีน 6.7 กรัมต่อโปรตีน 100 กรัม [27] นอกจากธาตุอาหารต่าง ๆ เหล่านี้แล้ว Lopez และคณะ(1981) [28] ได้รายงานว่าผักตบชวาสดมีแคโรทีนสูงถึง 584-667 ppm. จึงเห็นได้ว่าผักตบชวามีคุณค่าทางอาหารสัตว์จัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เพราะมีโปรตีนไลซีนและแคโรทีนสูง อีกทั้งยังมีแคลเซียมและฟอสฟอรัส อยู่ในระดับเท่าที่มีอยู่ในพืชอาหารสัตว์ทั่วไปอีกด้วย แต่ผักตบชวามีสารพิษชนิดหนึ่งคือ กรดออกซาลิก จากตัวอย่างที่กลุ่มงานวิเคราะห์อาหารสัตว์ ได้ตรวจสอบพบว่า ที่ส่วนใบ และส่วนก้าน มีกรดออกซาลิกประมาณ 1% ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำมาก ระดับของกรดออกซาลิกที่สัตว์จะแสดงอาการเป็นพิษ คือ แกะได้รับกรดออกซาลิก 685 กรัม และม้าได้รับโซเดียมออกซาลิก 450

กรัม ดังนั้นเมื่อพิจารณาสัตว์แต่ละชนิด เช่น โคกระบือจะต้องกินผักตบชวาแห้ง 68.5 กิโลกรัม จึงจะเป็นอันตราย แต่โดยทั่วไปแล้ว โคกระบือจะกินอาหารหยาบวันละประมาณ 15 กิโลกรัม ซึ่งถ้าใช้ผักตบชวาแห้ง เลี้ยงสัตว์จะได้รับกรดอ็อกซาลิกเพียง 150 กรัมเท่านั้น ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของผักตบชวา

ตัวอย่าง	On Dry Basis(%)									
	Dry Matter	Protein	Cullulose	ADF	NDF	Hemicellulose	Lignin(ADL)	Calcium	Phosporus	Ocalic acid
ใบ	14.9	16.8	27.2	28.8	50	21.2	1.3	2.1	0.5	0.7
ต้น(ใบรวมก้านใบ)	10	10.4	32.7	34.2	52.2	18	1.3	2	0.4	1
ก้านใบ	8.1	6.5	36.5	37.5	51.6	14.1	1.3	1.9	0.5	0.8

ที่มา : กลุ่มงานวิเคราะห์อาหารสัตว์ [26]

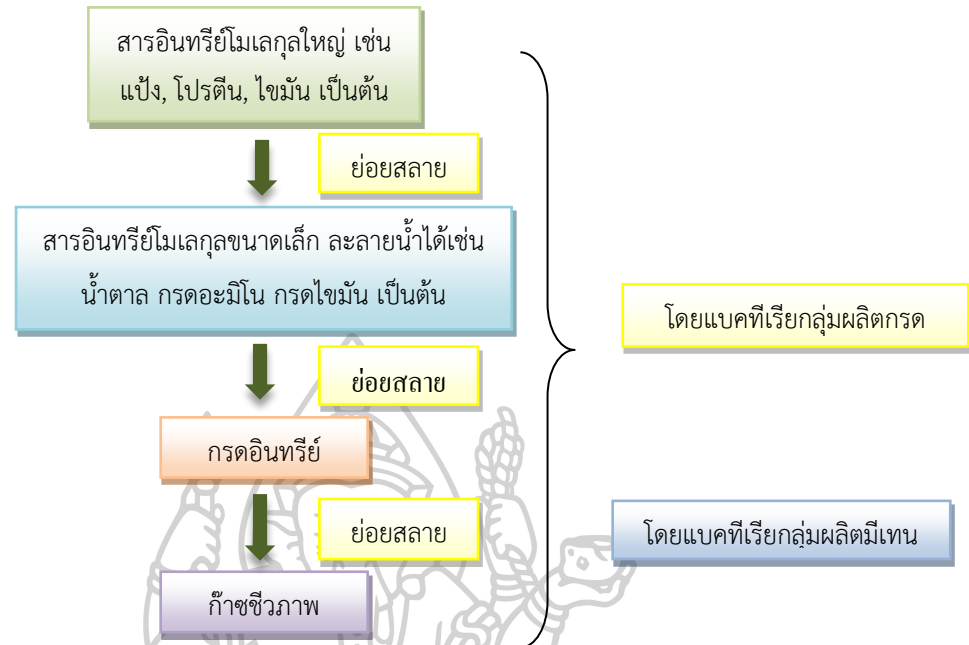
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ

2.2.1 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) หมายถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกาศด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีก๊าซอื่น ๆ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่า และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลง ก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เมื่อมีแบคทีเรีย สารอินทรีย์ และอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในสภาวะที่ไม่มีอากาศ ในธรรมชาตินั้นก๊าซชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมัก เช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ บึงและนาข้าวที่มีน้ำท่วมขัง เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพแสดงได้ตามรูปที่ 2.3 ซึ่งองค์ประกอบก๊าซชีวภาพประกอบด้วย

ก๊าซมีเทน	ประมาณ 60-75%
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ประมาณ 30-35%

ก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) ประมาณ 2%



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ [29]

2.2.2 กระบวนการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้ออกาศ (Anaerobic Digestion)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกาศ เป็นระบบที่มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ (Organic matter) ปริมาณความเข้มข้นสูง ภายในระบบจะมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่มีออกาศซึ่งประกอบด้วย การย่อยสลายหลายขั้นตอนที่มีความซับซ้อน โดยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายกลุ่ม แต่ละกลุ่มก็จะทำหน้าที่ต่างกันในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลายเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้

1) ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกาศ

ในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน เป็นต้น ให้มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ ผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระยะเวลา

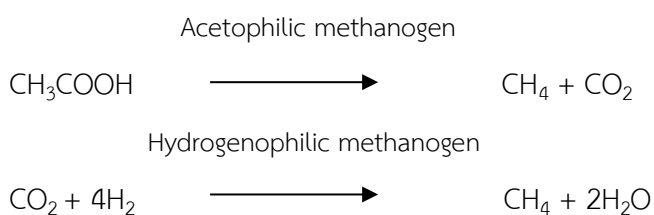
กักเก็บน้ำเสียและองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ แบคทีเรียกลุ่มที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้คือ แบคทีเรียกลุ่มไฮโดรไลติก (Hydrolytic bacteria) และกลุ่มเฟอร์เมนเตทีฟ (Fermentative bacteria)

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำซึ่งถูกสร้างโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส จะถูกแบคทีเรียที่ดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative bacteria) ใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงาน โดยในช่วงแรกของการย่อยสลายขั้นตอนนี้ ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ซึ่งที่โมเลกุลมีอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดโพรพิโอนิก ($\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$) กรดบิวทีริก ($\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$) เป็นต้น และสารอื่นๆ เช่น เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) ซึ่งชนิดของแบคทีเรียจะถูกเรียกแตกต่างกันไปตามชนิดของสารอินทรีย์นั้นๆ ขั้นตอนที่ตามมากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจเนติก (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นอะซิเตต พอร์เมต ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจเรียกว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen forming bacteria) เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มผลิตไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ด้วย แต่ตัวที่ผลิตกรดได้อาจไม่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ จึงถือว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นชนิดของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดด้วย แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดอาจรวมเรียกว่าเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ผลิตก๊าซมีเทน (Non-methanogenic bacteria)

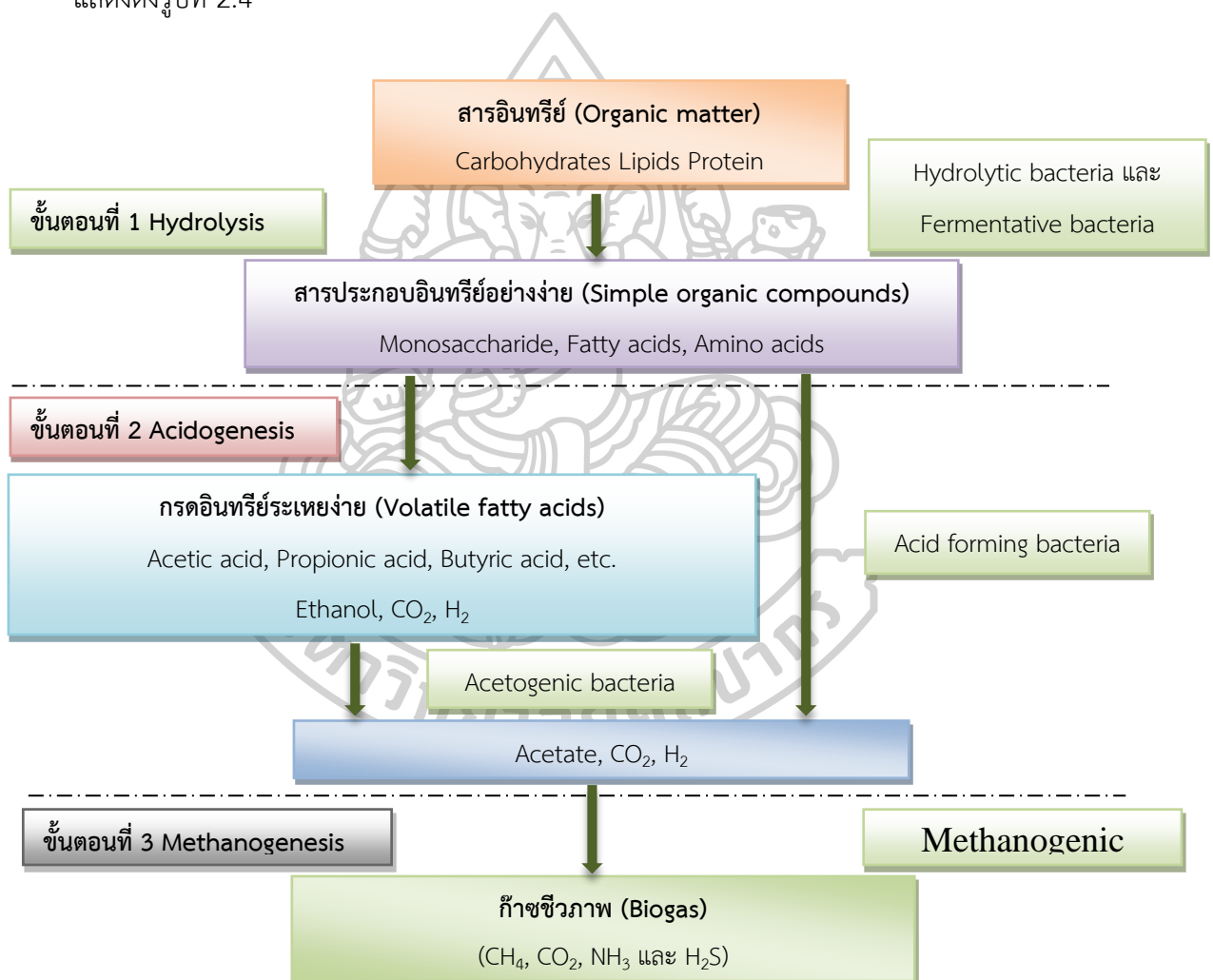
ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะแบบไม่ใช้อากาศ ผลผลิตสุดท้ายคือ ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) สารตั้งต้นของขั้นตอนนี้เป็นผลผลิตที่ได้มาจากขั้นตอนการผลิตกรด โดยสารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุดคือกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปฏิกิริยาดังสมการ



แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้มีความเฉพาะเจาะจงสูง คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenic producing bacteria) ได้แก่ กลุ่ม Acetoclastic methanogenic bacteria (Acetophilic methanogen) และ Hydrogenophilic methanogen

ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกาศนี้ แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมาก และมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่น ๆ ดังนั้นการเจริญเติบโตและปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกาศแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกาศ [30]

2.2.3 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกภาค ต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดร่วมกัน ซึ่งแบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกภาคแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria)

1) แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

แบคทีเรียส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้คือ Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีอากาศ โดยได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดไขมัน กรดอินทรีย์ระเหยง่าย แอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.0-6.5 และทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1.1) อะซิโตเจนนิคแบคทีเรีย

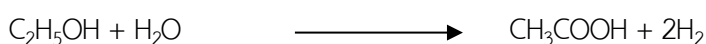
แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่ที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกภาค เนื่องจากสามารถใช้อาหารได้หลายชนิดและมีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก กรดฟอร์มิก เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้สารประกอบพวกแอลกอฮอล์ คีโตน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน แบคทีเรียในกลุ่มนี้ประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ชอบอากาศและแบคทีเรียกลุ่มที่เจริญได้ทั้งที่มีอากาศและไม่มีอากาศ (Facultative anaerobic bacteria)

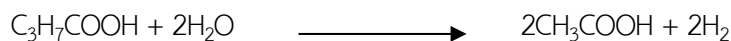
1.2) อะซิโตเจนนิคแบคทีเรีย

แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นพวกย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายในกระบวนการไฮโดรไลซิสและอะซิโตเจนิซิส แล้วเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

ก) Hydrogen producing acetogenic bacteria

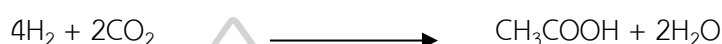
แบคทีเรียในกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส ได้แก่ แอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลายตัวแล้วได้เป็นกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน หรือกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนเป็นผลผลิต ดังสมการ





ข) Homoacetogenic bacteria แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1) Autotroph ได้แก่ แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ในการเจริญเติบโตและได้ผลผลิตสุดท้ายเป็น อะซิเตต (หรือกรดอะซิติก) ดังสมการ



2) Heterotroph ได้แก่ แบคทีเรียที่ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน หลายอะตอมในการเจริญเติบโต ผลผลิตที่ได้มีทั้งอะซิเตตและโพรพิอเนตซึ่งเป็นสารตัวกลางที่สำคัญ ในการผลิตก๊าซมีเทน ดังสมการ



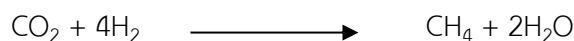
*หมายเหตุ: การที่กรดอินทรีย์ซึ่งเป็นกรดอ่อน เมื่อละลายน้ำแล้วจะอยู่ในรูปเกลือของกรด เรียกว่าเป็น-เอต เช่น กรดอะซิติก เมื่อแตกตัวได้เป็นอะซิเตต และไฮโดรเจนไอออน

2) แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนสามารถใช้สารอาหารได้เพียงไม่กี่ชนิด แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถ แบ่งตามชนิดการใช้สารอาหารตั้งต้นได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1) Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophs

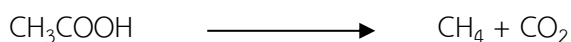
ซึ่งเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการ



แบคทีเรียกลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญคือจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนขั้นตอนที่ 2 โดยช่วยคงสภาวะให้มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่ำลง ซึ่งมีผลต่อการเกิดอะซิเตตอย่างต่อเนื่อง

2.2) Acetotrophic methanogens หรือ Acetoclastic bacteria

ซึ่งจะเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ประมาณ 2 ใน 3 เกิดจากการเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่ม Acetotrophic methanogens และที่เหลือเป็นผลของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens

2.2.4 สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

การผลิตก๊าซชีวภาพ จำเป็นต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดที่เจริญเติบโตร่วมกัน ดังนั้นในการเริ่มต้นเดินระบบจึงต้องมีสภาวะแวดล้อมและปัจจัยในระบบที่เหมาะสม หากสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่เจริญเติบโต จะทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจนอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ ดังนั้นสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย สภาวะแวดล้อมและปัจจัยดังกล่าวมีดังนี้

1) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิที่แบคทีเรียเจริญเติบโตได้เป็นอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของเซลล์และกิจกรรมของเอนไซม์ภายในเซลล์ อุณหภูมิถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ

- ก) ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส
- ข) ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียส
- ค) ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 องศาเซลเซียส

สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วงที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นในระบบได้ดี คือ ช่วง 30 – 38 องศาเซลเซียส และช่วง 48 – 57 องศาเซลเซียส

2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นตัวที่วัดค่าความเป็นกรดหรือด่างในการผลิต สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 6.6–7.4 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งพบว่าในการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำ โดยสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังปฏิกรณ์ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ โดยถ้ามีการป้อนสารอินทรีย์เข้าในปริมาณมากเกินไป ก็จะทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด ผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก จนแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้ได้ทัน จึงเกิดการสะสมของกรด

อินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ จึงส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลง ดังนั้นจะต้องมีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างที่ดี เพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ หากระบบมีค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่มากพอ ก็จะ สามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบได้

3) ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity: Alk)

ค่าความเป็นด่างเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง และยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของระบบ กล่าวคือถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างสูง แสดงว่าระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์สูง สามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบให้คงตัวอยู่ได้นาน โดยไม่เกิดการแปรปรวนของค่าความเป็นกรด-ด่าง ได้ง่ายเมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในระบบ โดยพบว่าค่าความเป็นด่างภายในระบบควรมีอยู่ในช่วง 1,000 – 3,000 มิลลิกรัมของ CaCO_3 /ลิตร ค่าความเป็นด่างที่มีในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศไม่ควรจะต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัมของ CaCO_3 /ลิตร ที่จะช่วยต้านทานกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นในการควบคุมระบบให้ทำงานเป็นปกติ จำเป็นต้องรักษาค่าความเป็นด่างไม่ให้มีค่าต่ำจนเกินไป เพื่อรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบบำบัด

4) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids: VFA)

ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งกรดอินทรีย์ระเหยง่ายประกอบด้วย กรดอะซิติก กรดบิวทิริกและกรดโพรพิโอนิก เป็นต้น ส่วนใหญ่ผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด หากพบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีมากขึ้น มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ ในระบบที่มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก ($> 2,000$ มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ลิตร) ช่วงแรกจะทำให้ค่าความเป็นด่างของระบบลดลง และถ้ายังไม่มีการกำจัดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้น้อยลง ต่อมาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบก็จะลดต่ำลง และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน หากยังไม่ได้ทำการแก้ไขปล่อยให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดต่ำลงถึง 4.5 – 5.0 ก็จะทำให้ระบบเสียสมดุลเป็นผลให้ระบบล้มเหลวได้ ในสภาวะปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในถังปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ลิตร และวิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุดควรให้มีค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่างไม่ควรเกิน 0.3 – 0.4

5) อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR)

อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ มีหน่วยเป็นน้ำหนักของชีโอดีที่อยู่ในน้ำเสียที่

ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดต่อปริมาตรของบ่อบำบัดต่อวัน (kg COD/m³.วัน) อัตราภาระการรับสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด (Feeding rate) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Klass et.al. (1980) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการหมักผักตบชวาแบบไร้อากาศในสภาวะกึ่งต่อเนื่องในถังทรงกระบอกขนาด 7 ลิตร กวนต่อเนื่องที่ความเร็ว 130 รอบต่อนาที ผักตบชวาที่ใช้ในการทดลองเก็บมาจากบ่อบำบัดน้ำเสียของ NASA National Space Technology Laboratory โดยทำการสับผักตบชวาขนาดไม่เกิน 3 นิ้ว ทำการทดสอบที่ 2 สภาวะ คือ สภาวะเมโซฟิลิก และสภาวะเทอร์โมฟิลิก ซึ่งมีผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 2.3

จากผลการทดลองพบว่า ที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกของทุกชุดทดสอบจะให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าสภาวะเมโซฟิลิก แต่มีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนต่ำกว่า

ตารางที่ 2.3 ผลการทดลองของ Klass et.al.

ชุดทดสอบ	1M-B	2M-B	1M-4	2M-3	1M-8	1T-5	1T-8	1T-10	1T-11
สภาวะการทำงาน									
อุณหภูมิ (°C)	35	35	35	35	35	55	55	55	55
pH	7.05	7.05	7.02	6.99	6.72	7.08	7.00	6.82	6.80
ปริมาณโซดาไฟที่ใส่ (meq/l)	49	45	47	50	0	21	17	4	5
Loading Rate (lb VS/ft ³ -day)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.21	0.30	0.30
ระยะเวลาในการกักเก็บ (day)	12	12	12	12	12	16.7	12	6	6
ปริมาณของแข็งทั้งหมดในการป้อน (% wt)	2.47	2.47	2.47	2.47	2.41	3.70	5.19	7.41	7.41
ของแข็งระเหยง่ายในการป้อน (% wt)	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	2.87	4.03	5.76	5.76
ไนเตรตที่ใส่เพิ่ม	0	0	N	MN	0	0	N	N	0

ชุดทดสอบ	1M-B	2M-B	1M-4	2M-3	1M-8	1T-5	1T-8	1T-10	1T-11
อัตราส่วน C/P ในการ ป้อน	89.3	89.3	89.3	73.2	89.3	89.3	89.3	89.3	89.3
ระยะเวลาในการทำงาน	5.1	5.1	2.8	2.8	2.7	1.0	1.4	3.0	1.0
ผลผลิตก๊าซ									
อัตราการผลิตก๊าซ (vol/vol-day)	0.480	0.497	0.477	0.483	0.488	0.688	0.865	1.062	1.026
Gas yield (SCF/lb VS added)	4.81	4.98	4.76	4.82	4.88	4.58	4.11	3.55	3.41
ความเข้มข้นของมีเทน (mol %)	64.0	62.8	62.3	60.6	57.4	57.5	58.7	57.9	57.3
Methane yield (SCF/lb VS added)	3.08	3.13	2.97	2.92	2.80	2.63	2.42	2.06	1.95
อัตราการผลิตมีเทน จำเพาะ (SCF/lb VS added-day)	0.26	0.26	0.25	0.24	0.23	0.16	0.20	0.34	0.33

หมายเหตุ : “0” หมายถึง ไม่มีการเพิ่มไนเตรต, “MN” หมายถึง เพิ่มสารไนเตรต และ “N” หมายถึง เพิ่มสารแอมโมเนียมคลอไรด์

Chynoweth et.al. (1981) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาและของเสียจากครัวเรือน โดยใช้ถังหมักแบบกวนต่อเนื่อง (CSTR) พบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับ 0.19, 0.52 และ 0.28 $l/g_{VS\text{added}}$ สำหรับการหมักโดยใช้ผักตบชวา ของเสียจากครัวเรือน และผักตบชวาร่วมกับของเสียจากครัวเรือน (อัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ

Chynoweth et.al. (1982) ศึกษาการหมักก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาแบบกะ (batch) โดยใช้ผักตบชวาขนาด 0.76 mm. พบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับ 0.34 $l/g_{VS\text{added}}$

Delgado et.al. (1992) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากผักตบชวา พบว่าเมื่อหมักในถังหมักแบบไร้ออกซิเจน สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้มากถึง 130 ลิตร/กิโลกรัมของแข็งระเหย โดยมีเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนถึง 64% และมีระยะเวลาเก็บกักของน้ำในระบบ (Hydraulic Retention Time, HRT) 10 วัน ขณะที่เมื่อหมักในถังปฏิกรณ์แบบสัมผัส สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด 162 ลิตร/กิโลกรัมของของแข็งระเหย โดยมีเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนถึง 65% และมีระยะเวลาเก็บกักของน้ำในระบบ 15 วัน ส่วนการหมักในถังกวนแบบผสม (Mixed Flow Reactor) สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด 146 ลิตร/กิโลกรัมของของแข็งระเหย โดยมีเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนถึง 65% และมีระยะเวลาเก็บกักของน้ำ

ในระบบ 25 วัน โดยมีความเข้มข้นกรดระเหยสำหรับการหมัก เท่ากับ 71 มิลลิกรัมกรดอะซีตริก/ลิตร ซึ่งมีระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมัก (Retention time) 10 วัน 65 มิลลิกรัมกรดอะซีตริก/ลิตร ซึ่งมีระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมัก 15 วัน และ 58 มิลลิกรัมกรดอะซีตริก/ลิตร ซึ่งมีระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมัก 25 วัน สำหรับถังหมักแบบไร้ออกซิเจน ถึงปฏิกิริยาแบบสัมผัส และถังกวนแบบผสม ตามลำดับ

Moorhead et.al. (1993) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคผักตบชวา ปริมาณไนโตรเจนในผักตบชวา และปริมาตรเชื้อจุลินทรีย์ของการหมักก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาแบบกะ (Batch) โดยทำการแปรขนาดอนุภาคผักตบชวาที่ 1.6, 6.4 และ 12.7 mm. ปริมาณไนโตรเจนที่ 10 และ 34 mg ไนโตรเจน/kg ผักตบชวาแห้ง และปริมาตรเชื้อจุลินทรีย์ที่ 2.5, 5 และ 10 ลิตร ที่อุณหภูมิ 35 °C พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเกิดขึ้นมากที่สุดในวันที่ 15 หลังจากการหมัก และอุณหภูมิที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด คือ อนุภาคขนาด 6.4 mm. โดยมีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพรวมอยู่ระหว่าง 0.2-0.28 l/g VS และพบอีกว่าหลังจากทำการหมักไปแล้ว 60 วัน การผลิตก๊าซชีวภาพรวม และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับทุกๆขนาดอนุภาคผักตบชวา ปริมาณไนโตรเจนในผักตบชวา และปริมาตรเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำการแปรในการทดลอง

Srivastava (1995) ทำการศึกษาจลนศาสตร์ของการหมักก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาสดในสภาวะกึ่งต่อเนื่อง โดยแปรความเข้มข้นสารระเหยง่าย (VS) ของผักตบชวาเหลวชั้นที่ 20, 30 และ 40 g/l VS ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 °C พบว่าความเข้มข้นสารระเหยง่าย (VS) ของผักตบชวาเหลวชั้นเพิ่มขึ้น อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นสารระเหยง่าย (VS) ของผักตบชวาเหลวชั้น 40 g/l VS ให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 0.908 l/L.day ที่ระยะเวลาการกักเก็บ 10 วัน และจะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง เมื่อระยะเวลาการกักเก็บเพิ่มขึ้น

Singhal et.al. (2002) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาและหญ้าที่ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวามีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 23,650 cc/kg น้ำหนักแห้ง และ 29,900 cc/kg น้ำหนักแห้ง สำหรับกรณีที่ใช้ผักตบชวา และหญ้าในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ ที่อัตราส่วน 20% ภายหลังจากระยะเวลาการหมักก๊าซชีวภาพ 21 วัน

Jayaweera et.al. (2007) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาภายใต้การเจริญเติบโตของความเข้มข้นไนโตรเจนที่แตกต่างกัน โดยทำการแปรความเข้มข้นของไนโตรเจน 1 เท่า (28 มิลลิกรัม/ลิตรของไนโตรเจนทั้งหมด (TN)) 2 เท่า, 1/2 เท่า, 1/4 เท่า และ 1/8 เท่า ซึ่งผักตบชวาที่ใช้ในการทดลองถูกเก็บจากแหล่งน้ำเสีย ดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 4 เดือน ที่อุณหภูมิแวดล้อมเมโซฟิลิก (Mesophilic) ที่ 30.3 - 31.3 องศาเซลเซียส โดยใช้ถัง ขนาด 45 ลิตร จำนวน 6 ชุด ชุดละ 3 ถัง เป็นถังหมักก๊าซ ทำการเติมมูลโคสดที่มีอัตราส่วน C/N ต่ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

8 เพื่อลดอัตราส่วนของ C/N ของสารตั้งต้นอย่างผักตบชวา อย่างไรก็ตามการผลิตก๊าซจะเริ่มผลิต 3 วันหลังจากเติมลงถังหมักก๊าซ และอัตราการผลิตก๊าซจะมีค่าเพิ่มขึ้นภายใน 4-7 วัน การย่อยสลายของแข็งระเหยง่าย (VS) และการผลิตก๊าซของผักตบชวาตามขั้นตอนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกภาคในกระบวนการอะซิโตเจเนซิส และกระบวนการเมทาโนเจเนซิส จะใช้ระยะเวลาประมาณ 27-30 วัน และ 27-51 วัน ตามลำดับ สารตั้งต้นในบ่อหมักที่มีผักตบชวาภายใต้ความเข้มข้นของไนโตรเจน 1 เท่า (28 มิลลิกรัม/ลิตรของไนโตรเจนทั้งหมด) มีค่าของแข็งระเหยง่ายต่ำสุดที่ 45.3 กรัม/ลิตร ซึ่งมีอัตราส่วน C/N สูงสุดเท่ากับ 16 แสดงให้เห็นว่าอัตราการผลิตก๊าซค่อนข้างสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (10-27 วัน) ซึ่งมีก๊าซมีเทนสูงประมาณ 50-65% (27-51 วัน) นอกจากนี้ ค่าของแข็งระเหยง่ายโดยรวมสูงสุด (81.7%) จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งแสดงได้จากผลการหมักผักตบชวาภายใต้ความเข้มข้นของไนโตรเจน 1 เท่า มีอัตราการผลิตก๊าซค่อนข้างสูงและผลผลิตก๊าซที่ค่อนข้างสูงกว่าถังหมักที่มีผักตบชวาภายใต้ความเข้มข้นของไนโตรเจน 2 เท่า ซึ่งมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 14 และถังหมักที่มีผักตบชวาที่ถูกเก็บจากน้ำเสีย ที่มีอัตราส่วน C/N ต่ำที่สุด 9.7 ซึ่งมีปริมาตรของแข็งระเหยง่ายค่อนข้างสูงถึง 56 กรัม/ลิตร การผลิตก๊าซมีเทนจะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับถังหมักที่มีผักตบชวาภายใต้ความเข้มข้นของไนโตรเจน 1/8 เท่า, 1/4 เท่า, 1/2 เท่า ที่มีค่าของแข็งระเหยง่ายค่อนข้างมากด้วยอัตราส่วนของ C/N ที่แตกต่างกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าผักตบชวาที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยไม่คำนึงถึงการเจริญเติบโตภายใต้ความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงหรือต่ำกว่าเพียงใด และไม่มีผลจำเป็นที่จะทำให้อัตราส่วนของ C/N อยู่ในช่วงที่เหมาะสม 20-32 สำหรับการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าลักษณะทางชีวเคมีของสารตั้งต้นมีนัยสำคัญหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อผลิตก๊าซชีวภาพนอกเหนือจากอัตราส่วนของ C/N

ธนันชัย และคณะ (2552) ได้ทำการทดลองหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักพืช 6 ชนิด คือ ข้าวโพด ผักตบชวา กัลวีย มะละกอ อ้อย และผักกาดขาว ภายใต้กระบวนการหมักแบบไร้ออกภาค ซึ่งใช้มูลสุกรเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมัก วัดปริมาณและคุณภาพของก๊าซที่เกิดขึ้นจากพืชทั้ง 6 ชนิด ตลอดระยะเวลาการหมัก 30 วัน ในถังหมักขนาด 20 ลิตร และควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 38 °C ผลการทดลองพบว่ามะละกอให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด 537.02 L_N/kg.ODM/30day รองลงมาคือ กัลวีย ข้าวโพด อ้อย และผักกาดขาว ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 385.10, 368.31 352.07 และ 190.54 L_N/kg.ODM/30day ตามลำดับ ส่วนผักตบชวาให้ปริมาณก๊าซชีวภาพน้อยที่สุดเท่ากับ 56.62 L_N/kg.ODM/30day

Ferrer et.al. (2010) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาที่สภาวะเมโซฟิลิก และสภาวะเทอร์โมฟิลิก โดยใช้ผักตบชวาสับขนาด 1 mm. ทำการปรับปรุงสภาพด้วยความร้อนก่อนทำการหมักที่อุณหภูมิ 80 °C พบว่าการปรับปรุงสภาพของผักตบชวาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C จะเป็นการเพิ่มค่าปริมาณของออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องใช้สำหรับทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอินทรีย์ที่อยู่ใน

น้ำ (COD) โดยเพิ่มขึ้นจาก 4% เป็น 8% หลังจากทำการปรับสภาพไปแล้ว 30 นาที และไม่มีผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าที่สภาวะเมโซฟิลิกถึง 2 เท่า กล่าวคือที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนระหว่าง 6-6.5 L CH₄/kg COD.day และสภาวะเมโซฟิลิกมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนระหว่าง 3-3.5 L CH₄/kg COD.day

ชัยศรี และคณะ (2554) ได้ทำการวิจัยการผลิตพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรร่วมกับวัชพืชน้ำในพื้นที่อำเภออัมพวา จังหวัดสมุทรสงคราม โดยทดลองหมักก๊าซชีวภาพในถังหมักขนาด 10 ลิตร ใช้วัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ 5 ชนิด โดยใช้ส่วนผสมในการหมักในอัตราส่วนต่างๆ ทิ้งไว้ 45 วัน ทำการวัดค่าปริมาตรก๊าซตลอดการทดลอง พบว่าสามารถผลิตแก๊สชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 4 ประเภท ประกอบด้วย วัชมะพร้าว เปลือกส้มโอ สาหร่ายหางกระรอก ผักตบชวา ร่วมกับมูลโคในสัดส่วน 1:0:0:0:1 โดยน้ำหนักในปริมาตร 10 ลิตร สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุดที่ 101.44 มิลลิลิตร ในระยะเวลา 45 วัน ผลิตแก๊สมีเทนได้สูงสุด 77.70 เปอร์เซ็นต์ และจากการนำผลการศึกษาไปสู่การการออกแบบผลิตแก๊สชีวภาพในระดับชุมชนโดยสร้างระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบปลั๊กโพลว์ ความจุ 4,000 ลิตร พบว่า สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูง 115.86 ลิตร และผลิตแก๊สมีเทนได้สูงสุด 80.5 เปอร์เซ็นต์

Yusuf et. al. (2011) ทำการศึกษาผลของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่มีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการหมักก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับมูลโค ซึ่งใช้ผักตบชวา และน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โดยทำการตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์ ระยะเวลา 30 วัน จากนั้นทำการอบแห้งด้วยตู้อบ และทำการบดเป็นผง หมักร่วมกับมูลโคแห้ง ซึ่งทำการตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์ ระยะเวลา 20 วัน อัตราส่วนในการหมักรวมจะใช้ผงผักตบชวาแห้งและมูลโคในปริมาณคงที่ ที่ 5 กรัม และทำการแปรน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่ 4, 8, 12 และ 20 กรัม จากผลการทดลองพบวาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในแต่ละอัตราส่วนมีค่าเท่ากับ 0.282, 0.262, 0.233 และ 0.2176 L/g VS fed

Asikong et.al. (2012) ทำการศึกษาศักยภาพของก๊าซชีวภาพด้วยผักตบชวาและเปลือกมันสำปะหลังในแม่น้ำครอส ประเทศไนจีเรีย เพื่อผลิตพลังงานก๊าซชีวภาพ ซึ่งออกแบบและแก้ไขให้เข้ากับชุมชน ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดในบ่อหมักโดยปราศจากหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ก่อนมีการย่อยสลายอยู่ในช่วงตั้งแต่ 3.80×10⁷- 5.60×10⁷ cfu/g และหลังจากที่มีการย่อยสลาย 2.35×10⁵- 4.15×10⁵ cfu/g ส่วนปริมาณเชื้อราทั้งหมดตั้งแต่ 1.46×10⁴- 4.15×10⁴ cfu/g และ 1.20×10²- 2.95×10² cfu/g เป็นจำนวนเชื้อราก่อนและหลังการย่อยสลาย ตามลำดับ ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดในบ่อหมักโดยมีหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ก่อนที่จะมีการย่อยสลายอยู่ในช่วงตั้งแต่ 4.60 - 6.40×10⁸ cfu/g และหลังจากย่อยสลาย 3.35 - 4.55×10⁵ cfu/g ในขณะที่ปริมาณเชื้อราทั้งหมดตั้งแต่ 2.46 -

6.60×10^4 และ $2.20 \times 10^2 - 3.95 \times 10^2$ cfu/g เป็นจำนวนเชื้อร่าก่อนและหลังการย่อยสลายตามลำดับ ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมที่ได้ คือ 83, 386 และ 404 มิลลิลิตร ตามลำดับ สำหรับผักตบชวบน้ำหนัก 1, 2 และ 3 กิโลกรัม ใน 20 วัน ของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของผักตบชวาโดยปราศจากหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ส่วนที่มีหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสม คือ 340, 405 และ 650 มิลลิลิตร ตามลำดับ ส่วนเปลือกมันสำปะหลัง การผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสม คือ 77.7 มิลลิลิตร ซึ่งใช้เปลือกมันสำปะหลังน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ภายใน 25 วัน และ 310 และ 315 มิลลิลิตร ในบ่อหมักที่มีเปลือกมันสำปะหลังน้ำหนัก 2 และ 3 กิโลกรัม ตามลำดับ ภายใน 30 วัน ของการหมักแบบไร้ออกซิเจนโดยปราศจากหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ส่วนการหมักโดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น พบว่าผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมเท่ากับ 202, 305 และ 375 มิลลิลิตร ในบ่อหมักที่มีเปลือกมันสำปะหลังน้ำหนัก 1, 2 และ 3 กิโลกรัมภายใน 30 วัน สำหรับการหมักร่วมระหว่างผักตบชวากับเปลือกมันสำปะหลังโดยปราศจากหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น จะทำให้เกิดผลผลิตที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ 255, 420 และ 590 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากในบ่อหมักที่มีผักตบชวผสมกับเปลือกมันสำปะหลังน้ำหนัก 1, 2 และ 3 กิโลกรัม ในขณะการหมักโดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น มีผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสม คือ 390, 555 และ 635 มิลลิลิตร ตามลำดับ

Gao et.al. (2013) ทำการศึกษาผลของการปรับสภาพผักตบชวด้วยของเหลวไอออนิกที่มีต่อองค์ประกอบโครงสร้าง และการผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวา ซึ่งใช้ผักตบชวาที่แห้งเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นทำการอบแห้งที่ 45°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบดเป็นผง ทำการปรับสภาพด้วยของเหลวไอออนิก 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate ([Emim]Ac), 1-N-butyl-3-methylimidazolium chloride ([Bmim]Cl), Dimethyl acetamide (DMAC), Dimethyl sulfoxide (DMSO) และสารละลายร่วมของของเหลวไอออนิก พบว่า หลังจากทำการปรับสภาพด้วยของเหลวไอออนิก และสารละลายร่วมของเหลวไอออนิก ลิกนินในผักตบชวาจะถูกดึงออกไปถึง 27.1-60.4% ความเป็นผลึกของโครงสร้างมีค่าลดลง และศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจะมีค่าเพิ่มขึ้น 16.3-97.6% และ 13.2-28.3% ตามลำดับ การปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงและใช้ระยะเวลาหลายๆ จะให้ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการปรับสภาพผักตบชวาที่อุณหภูมิ 120°C ในเวลา 120 นาที ด้วยสารละลายของเหลวไอออนิกร่วม [Bmim]Cl/DMSO จะให้ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด

Sudhakar et.al. (2013) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากส่วนผสมของผักตบชวาแห้ง และมูลโค โดยมีอัตราส่วนของแห้ง ผักตบชวา และมูลโค ในอัตราส่วน 1:1:2 ซึ่งในการทดลอง จะทำการผสมกับน้ำในถังหมักก๊าซชีวภาพ ขนาด 20 ลิตร ในอัตราส่วน 1:1 โดยควบคุมการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนภายใน 35 วัน มีการเก็บรักษาและช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียเม

โซฟิลิกอยู่ที่ 26-35 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง พบว่าการผลิตก๊าซจะเพิ่มขึ้นจากวันแรกถึงวันที่ 16 และจะลดลงในวันที่ 17 และหลังจากวันที่ 22 ของการทดลองการผลิตก๊าซจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง โดยปริมาณก๊าซมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 19 ของการทดลอง ซึ่งมีค่าปริมาตรก๊าซสูงสุดเท่ากับ 1.21 ลิตร และจากการทดลองยังพบอีกว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.326 ลิตรต่อวัน

Booddachan et.al. (2013) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในครัวเรือนโดยใช้ผักตบชวา โดยใช้ผักตบชวาในพื้นที่จังหวัดปราจีนบุรี ตัดเป็นชิ้นความยาว 1-2 เซนติเมตร แต่ละชิ้น จะทำการนำเอาน้ำออกให้มีความชื้นน้อยกว่า 50% ถังหมักก๊าซชีวภาพทำจากถัง PVC ความจุ 200 ลิตร ซึ่งมีการติดตั้งไบโวกวน และท่อเติม ถังเก็บก๊าซชีวภาพทำจากวัสดุเดียวกันกับถังหมักก๊าซ ชีลกันไม่ให้แก๊สรั่วออกด้วยน้ำด้านบน เริ่มต้นการหมักด้วยมูลวัวเหลว 40 กิโลกรัม โดยจะทำการเติมผักตบชวาทุกๆ 2 วัน ก๊าซชีวภาพที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ จากผลการทดลองพบว่า ส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้ ประกอบด้วย มีเทน 53.18 % ไนโตรเจน 14.68 % และคาร์บอนไดออกไซด์ 32.13 % และพบอีกว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้นตามเวลา

Patil et.al. (2014) ทำการศึกษาการหมักก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับมูลแกะ โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก (ช่วงอุณหภูมิ 30-37 °C) พบว่าอัตราส่วนที่ผลิตก๊าซชีวภาพดีที่สุดคือ อัตราส่วนของผักตบชวา: มูลแกะ: น้ำ เท่ากับ 4:12.01:83.90 โดยมีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.36 l/g VS ซึ่งมีส่วนประกอบของก๊าซมีเทน 60.84% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 21.53% และอื่นๆ (H₂, N₂, H₂O และ H₂S) 17.63% และพบอีกว่าอัตราส่วนการหมักร่วมของผักตบชวาและมูลแกะมีผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 3

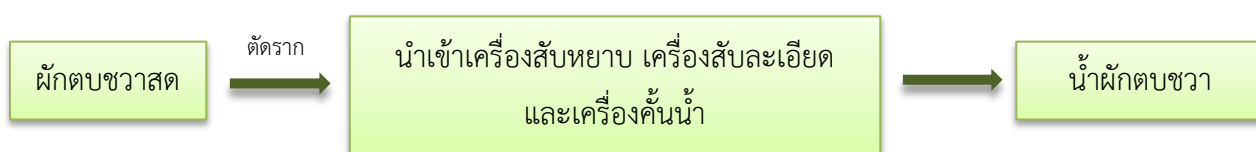
วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของจากใบและลำต้นของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก โดยใช้วัตถุดิบหลักในการทดลองนี้คือ น้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวา และจุลินทรีย์ ทำการควบคุมอุณหภูมิในการหมัก 2 ช่วงคือ อุณหภูมิเมโซฟิลิก (30-40 °C) และเทอร์โมฟิลิก (45-55 °C) สถานที่ใช้ทำการศึกษาคือ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ สำหรับขั้นตอนโดยเริ่มจากการสับหยาบและสับละเอียดผักตบชวา เพื่อลดขนาดให้มีขนาดที่เล็กลง จากนั้นนำผักตบชวาสับละเอียดมาทำการคั้นเอาน้ำออก เพื่อนำน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวามาทำการหมักร่วมกับจุลินทรีย์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิเมโซฟิลิก (30-40 °C) และเทอร์โมฟิลิก (45-55 °C) โดยใช้ระยะเวลาในการหมัก 60 วัน หรือจนกระทั่งอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลง แล้วนำก๊าซชีวภาพที่ได้ดังกล่าวมาทำการหาค่าประกอบของก๊าซชีวภาพ เช่น CH₄, CO₂, O₂ และก๊าซที่ได้อื่นๆ เป็นต้น ศึกษาภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และศึกษาภาพการผลิตก๊าซมีเทน เพื่อหาอัตราส่วนและสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำจากใบและลำต้นผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์

3.1 เครื่องมือสำหรับงานวิจัย

3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบในการหมักก๊าซชีวภาพ

ผักตบชวา (WH) สำหรับงานวิจัยนี้ได้รับการเก็บรวบรวมจากบริเวณแม่น้ำท่าจีน ตำบลหินมูล จังหวัดนครปฐม โดยในสำหรับแต่ละการทดสอบทุก ๆ อัตราส่วนของทั้ง 2 สภาวะ อุณหภูมิถึงหมักมีปริมาตร 16 ลิตร ในอัตราส่วน 4: 1, 2: 1, 1: 1, 1: 2, และ 1: 4 ถูกเตรียมจากน้ำผักตบชวาและจุลินทรีย์ในอัตราส่วน 12.75: 3.25, 10.5: 5.5, 8: 8, 5.5: 10.5, และ 3.25: 12.75 ลิตร ตามลำดับ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผักตบชวา

3.1.1.1 เครื่องสับหยาบ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อลดขนาดชีวมวล



รูปที่ 3.2 เครื่องสับหยาบ

3.1.1.2 เครื่องสับละเอียด ความเร็ว 100 รอบต่อนาที จำนวน 1 เครื่อง



รูปที่ 3.3 เครื่องสับละเอียด

3.1.1.3 เครื่องคั้นน้ำ



รูปที่ 3.4 เครื่องคั้นน้ำ

3.1.2 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.2.1 ชุดทดลองแบบกะ (Batch)

- 1.) ถังโพลีเอธีลีน (PVC) ความจุ 20 ลิตร จำนวน 30 ใบ



รูปที่ 3.5 ถังโพลีเอธีลีน (PVC)

- 2.) ครอบกวดวงพลาสติกฐานหกเหลี่ยม ขนาด 250 ml (สำหรับการวัดปริมาณก๊าซแบบแทนที่น้ำ) จำนวน 30 ใบ



รูปที่ 3.6 ครอบกวดวงพลาสติกฐานหกเหลี่ยมขนาด 250 ml

- 3.) สายยางซิลิโคนใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5x8 mm (สำหรับต่อจากท่อที่ถังหมักมายังชุดกักเก็บแก๊ส)



รูปที่ 3.7 สายยางซิลิโคนใส

4.) สามทางทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/16 inch (สำหรับเชื่อมต่อระหว่างถังหมัก อุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนทีน้ำ) จำนวน 30 อัน



รูปที่ 3.8 สามทางทองเหลือง

5.) ข้อต่อทองเหลืองเกลียวนอก เกลียวนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 inch ปลายที่ต่อท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/16 inch (ต่อเข้ากับฐานกระบอกลงพลาสติก 1 อันและอีก 2 อันต่อเข้ากับปลายทั้ง 2 ของวาล์วทองเหลือง รวมเป็น 2 อันต่อชุด) จำนวน 60 อัน



รูปที่ 3.9 ข้อต่อทองเหลืองเกลียวนอก

6.) วาล์วทองเหลืองSFC ขนาด 1/4 inchจำนวน 60 อัน



รูปที่ 3.10 วาล์วทองเหลือง

7.) พาราฟิล์ม ขนาด 4 inch x 125 ft.จำนวน 1 ม้วน



รูปที่ 3.11 พาราฟิล์ม

8.) ครอบอะคลีลิกจำนวน 30 ใบ



รูปที่ 3.12 ครอบอะคลีลิก

9.) ครอบตวงแก้ว ขนาด 500 mlจำนวน 1 ใบ



รูปที่ 3.13 ครอบตวงแก้ว

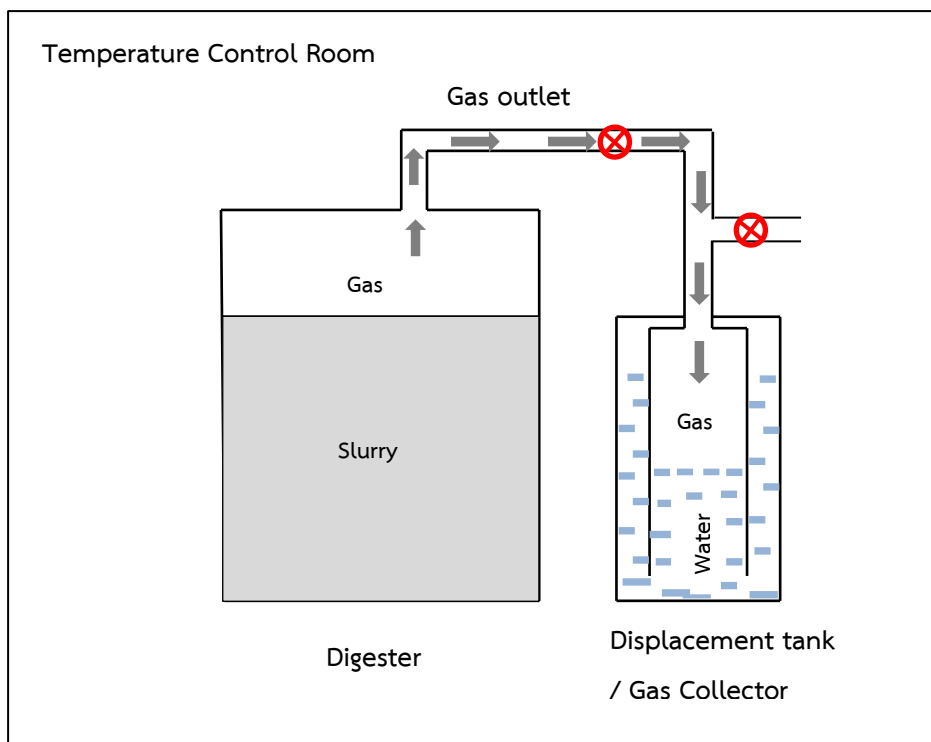
10.) ถุงเก็บแก๊ส ขนาดจุ 1 ลิตร



รูปที่ 3.14 ถุงเก็บแก๊ส

3.1.3. การตั้งค่าการทดลองและการดำเนินงาน

การทดลอง 2 ชุดถูกสร้างขึ้นมาเพื่อตรวจสอบผลของอัตราส่วนในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยในสภาวะไร้อากาศของน้ำผักตบชวากับจุลินทรีย์ ซึ่งในการตั้งค่าชุดการทดลองที่หนึ่งสำหรับการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศในช่วงอุณหภูมิ Mesophilic และชุดการทดลองทั้ง 2 สำหรับการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศในช่วงอุณหภูมิ Thermophilic ถังหมักทำจากถังโพลีเอธิลีน (PVC) ความจุ 20 ลิตรที่ใช้สำหรับการทดลองแต่ละชุด แผนภาพของการตั้งค่าจะแสดงในรูปที่ 3.15 ถังหมักถูกเชื่อมต่อกับถังสะสมก๊าซและถังเก็บน้ำ ท่อพลาสติกถูกนำมาใช้ในการเชื่อมต่อถังหมักและถังสะสมก๊าซ ก๊าซที่ผลิตได้ในถังหมักผ่านไปยังถังสะสม อีกท่อพลาสติกถูกใช้สำหรับในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ การย่อยสลายทำในห้องที่ถูกควบคุมอุณหภูมิ ในระหว่างการตรวจสอบปริมาตรของก๊าซที่ผลิตได้ถูกวัดด้วยวิธีการทดสอบการแทนที่ด้วยน้ำ โดยพิจารณาปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่ผลิตเท่ากับน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นในถังเก็บน้ำ ถังหมักถูกใช้งานในแบบกะ ในช่วงเวลาของการทดลองเหล่านี้ทำให้มั่นใจได้ว่าถังหมักเกิดก๊าซอย่างเต็มที่



รูปที่ 3.15 แบบจำลองถังหมักของการหมักร่วมกันของน้ำผักตบชวากับจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ

3.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการก๊าซชีวภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

3.3 ระยะเวลาการวิจัย

เริ่มดำเนินงานวิจัยรวมระยะเวลาทั้งสิ้น 24 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560 ถึงเดือนกรกฎาคม 2562 โดยมีแผนการดำเนินงานและช่วงระยะเวลาดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน/ช่วงระยะเวลาดำเนินงานวิจัยและผลที่ได้

เดือนที่	กิจกรรม	Output
0 - 3	<ul style="list-style-type: none"> - ทำการศึกษาเอกสารงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง - ทำการเตรียมวัตถุดิบ และหาคู่ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักก๊าซชีวภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> - ได้ข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวกับงานวิจัย - ได้วัตถุดิบที่ใช้ในการหมัก และหาคู่ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้
4 - 7	<ul style="list-style-type: none"> - ทำการทดลองหมักก๊าซชีวภาพ เพื่อหาอัตราส่วนที่ 	<ul style="list-style-type: none"> - ได้ก๊าซชีวภาพจากการหมักระหว่าง

เดือนที่	กิจกรรม	Output
	<p>เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก</p> <ul style="list-style-type: none"> - วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนการหมักร่วมของน้ำผักตบชวากับจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน 	<p>น้ำของผักตบชวาและจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก</p> <ul style="list-style-type: none"> - ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก
8 – 11	<ul style="list-style-type: none"> - ทำการทดลองหมักก๊าซชีวภาพ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก - วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนการหมักร่วมของน้ำผักตบชวากับจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน 	<ul style="list-style-type: none"> - ได้ก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างน้ำของผักตบชวาและจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก - ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก
12 – 24	<ul style="list-style-type: none"> - สรุปผลการทดลองทั้งหมด และนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนบทความทางวิชาการ พร้อมทั้งวิทยานิพนธ์ 	<ul style="list-style-type: none"> - บทความวิชาการในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มีอยู่ในระบบฐานข้อมูล ISI (Web of Science), Scopus หรือที่สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ยอมรับ และวิทยานิพนธ์

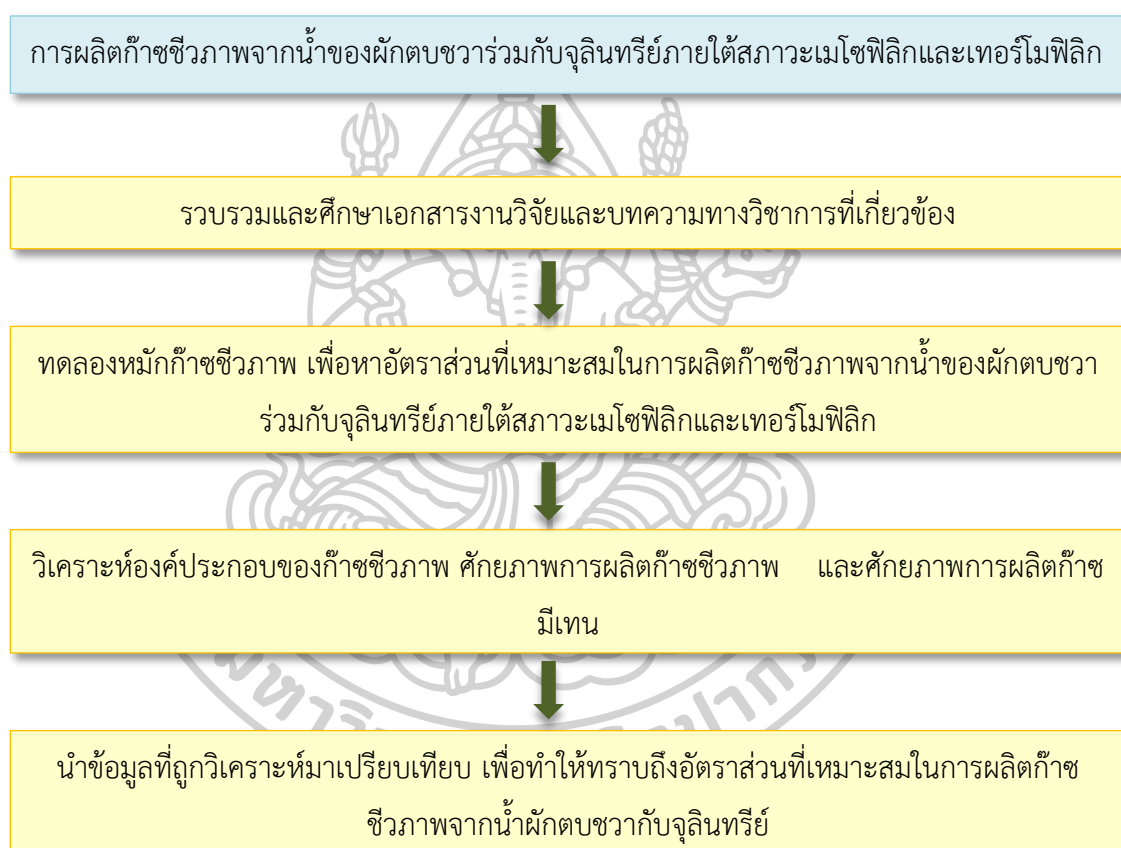
3.4 งบประมาณการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้งบประมาณเพื่อดำเนินการศึกษาและวิจัยเป็นจำนวนเงินโดยประมาณ 200,000 บาท โดยได้รับการสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและสร้างสรรค์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยศิลปากร ในส่วนของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลประจำปีงบประมาณ 2560

3.5 การวางแผนการวิจัย

3.5.1 แผนการดำเนินงาน

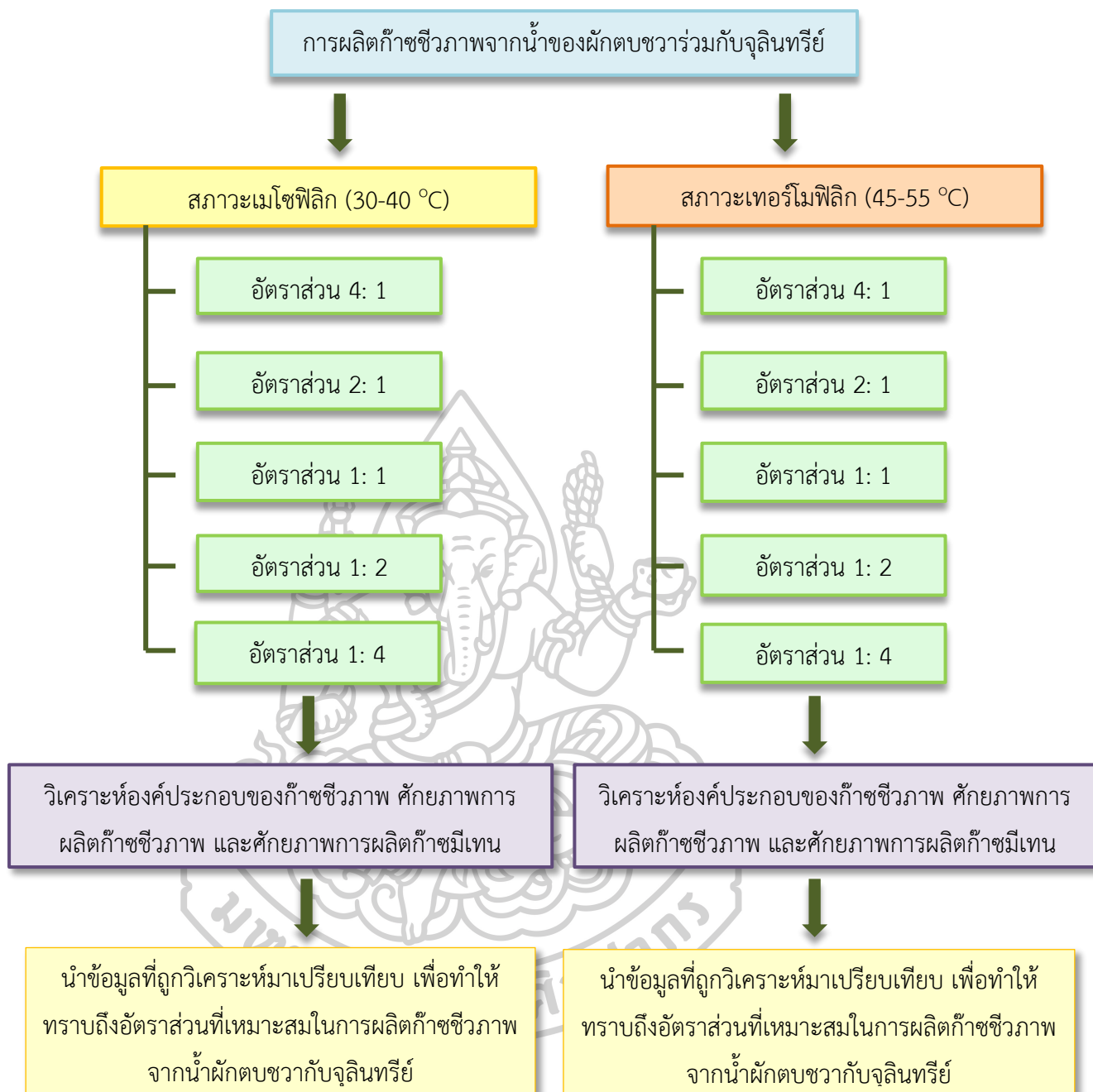
แผนการวิจัยในการศึกษานี้เพื่อหาผลของอัตราส่วนการหมักร่วมกันของน้ำผักตบชวา กับจุลินทรีย์ที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะอุณหภูมิเมโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) จากนั้นจะถูกวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน, ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ, รวมทั้งวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนซึ่งแสดงดังรูป 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงแผนการวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก

3.5.2 แผนการทดลอง

ในการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกใช้อัตราส่วนทั้งสิ้นจำนวน 5 อัตราส่วน ได้แก่ 4: 1, 2: 1, 1: 1, 1: 2 และ 1: 4 แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงแผนการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์

3.6 วิธีการทดลอง

จากรูป 3.17 แสดงถึงขั้นตอนวิธีการทดลองของงานวิจัยนี้ ซึ่งในการทดลองได้กำหนดอัตราส่วนทั้งหมด 5 เงื่อนไข (4: 1, 2: 1, 1: 1, 1: 2 และ 1: 4) และช่วงอุณหภูมิ 2 สภาวะ (เมโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก) ซึ่งในที่นี้จะอธิบายการทดลองที่อุณหภูมิในสภาวะเมโซฟิลิก (30-40 °C) และเทอร์โมฟิลิก (45-55 °C) ดังต่อไปนี้ เตรียมผักตบชวาที่จะนำมาที่ผ่านอุปกรณ์สับหยาบและสับ

ละเอียดมาซึ่งน้ำหนักพร้อมจดบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้น นำผักตบชวาที่ผ่านอุปกรณ์การสับละเอียดแล้วมาคั้นน้ำเพื่อใช้ในการทดลอง จากนั้นนำน้ำผักตบชวาที่ได้ตวงให้ได้ตามปริมาตรที่กำหนด รวมถึงการตวงปริมาตรจุลินทรีย์ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อนำไปใส่ลงในถังหมักความจุ 20 ลิตร โดยก่อนปิดฝาดังหมักต้องผสมส่วนผสมให้เข้ากัน นอกจากนี้ต้องทำการปรับค่า pH ให้เป็นกลาง (pH7) จึงสามารถปิดฝาดังหมัก โดยถังหมักจะถูกนำไปเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิตามสภาวะที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น

3.7 การวิเคราะห์ผล

3.7.1 การวัดปริมาตรการเกิดก๊าซทั้งหมด

การวัดปริมาณการเกิดก๊าซทั้งหมด โดยสังเกตระดับน้ำเริ่มต้นและระดับน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยก๊าซในกระบอกตวงของแต่ละวันที่ทำการทดลอง และนำค่าระดับน้ำมาคำนวณหาปริมาตรการเกิดก๊าซ โดยระดับน้ำที่ถูกแทนที่ ลบด้วยค่าระดับน้ำเริ่มต้น จะได้ปริมาตรก๊าซในหน่วย ml แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การวัดปริมาตรการเกิดก๊าซทั้งหมด โดยเครื่องวัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ

3.7.2 เครื่องมือตรวจวัดค่าความเป็นกรด/ด่าง (pH meter)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบค่าความเป็นกรด/ด่าง (pH meter) รุ่น PH-220 Range; 0-14 pH บอกราคา 2 ตำแหน่ง พร้อมโพรบ pH electrode รุ่น PE-11 Range 0-13 pH ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10x130 mm จำนวน 1 ชุด แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 เครื่องตรวจวัดค่าความเป็นกรด/ด่าง (PH-220)

3.7.3 เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์ก๊าซ

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการอ่านค่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ โดยรูปแบบเครื่องมือวัดจะใช้สำหรับวัดค่า CH_4 , CO_2 , และ O_2 แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เครื่องมือวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

3.7.4 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ

เครื่อง Gas Chromatography รุ่น GC-14A ยี่ห้อ Shimadzu (Temp ไม่เกิน 400°C Injector: Split, Detector: FID ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิได้ 5 ระดับ มีระบบควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเป็นแบบ Regulator Pressure Gauge พร้อมกับระบบแปลงความดันไปเป็นอัตราการไหล และมี Software 32 bit ควบคุมการทำงาน Graphical user interface) แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่อง Gas Chromatography

3.7.5 วิเคราะห์ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี

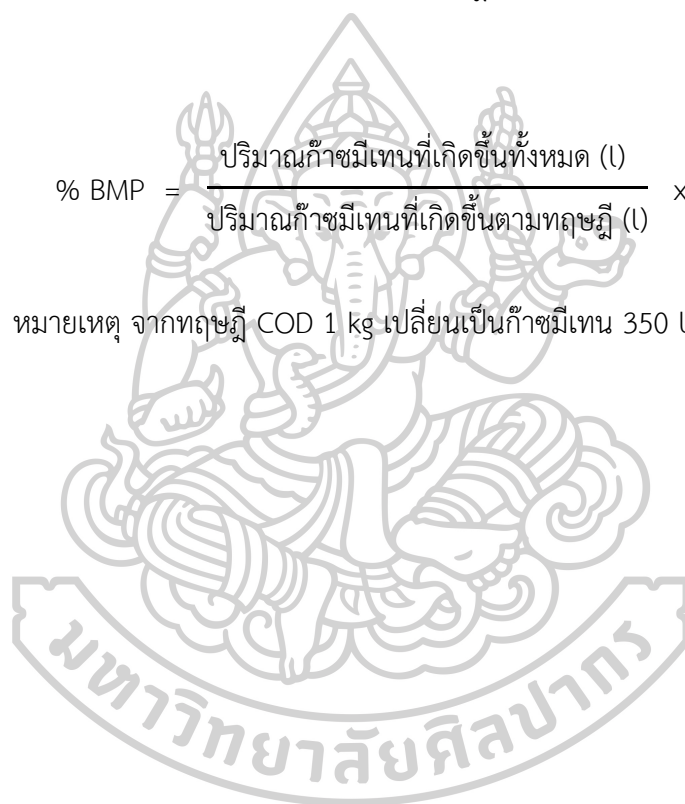
การคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Specific Methane Yield) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\text{Specific Methane Yield (m}^3\text{CH}_4\text{/kgVS}_{\text{added}}) = \frac{\text{Cumulative Methane}}{\text{VS}_{\text{added}}} \quad (1)$$

การหาศักยภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้ก๊าซมีเทน (% BMP) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\% \text{ BMP} = \frac{\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมด (l)}}{\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี (l)}} \times 100$$

หมายเหตุ จากทฤษฎี COD 1 kg เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน 350 l



บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การศึกษ้อัตราส่วนที่มีผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำของกากใบและลำต้นผักตบชวา โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากการหมักการทำฟาร์มสุกรมาเป็นส่วนผสมในอัตราส่วน 4: 1 2: 1 1: 1 1: 2 และ 1: 4 เก็บข้อมูลที่ตรวจวัดเป็นระยะเวลา 60 วัน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการโดยการในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 37 ± 2 องศาเซลเซียส ในสภาวะเมโซฟิลิก และการควบคุมอุณหภูมิ 51 ± 1 องศาเซลเซียส ในสภาวะเทอร์โมฟิลิก ซึ่งผลการทดลองที่ทำการวิเคราะห์มีรายละเอียด ดังนี้

4.1 คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของวัตถุดิบ

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์องค์ประกอบทางเคมีที่ทำการวิเคราะห์ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปแบบของค่าซีโอดี(COD) ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด(TS) ปริมาณของของแข็งระเหยง่าย(VS) และปริมาณไนโตรเจน(TKN) แสดงดังตารางที่ 4.1 จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก พบว่ามีองค์ประกอบของปริมาณของแข็งระเหยง่าย(VS) ต่อปริมาณของแรงทั้งหมด(TS)ร้อยละ 53.29 และจุลินทรีย์มีปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 30.73 และคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก พบว่ามีองค์ประกอบของปริมาณของแข็งระเหยง่าย(VS) ต่อปริมาณของแรงทั้งหมด(TS) 51.19 และจุลินทรีย์มีปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 45.78 และคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ที่อัตราส่วน 4: 1 2: 1 1: 1 1: 2 และ 1: 4 แสดงดังตารางที่ 4.2 จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวามักร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก พบว่ามีองค์ประกอบของปริมาณของแข็งระเหยง่าย(VS) ต่อปริมาณของแรงทั้งหมด(TS)ร้อยละ 33.05 42.88 32.11 43.17 และ 34.85 ตามลำดับ และคุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวามักร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก พบว่ามีองค์ประกอบของปริมาณของแข็งระเหยง่าย(VS) ต่อปริมาณของแรงทั้งหมด(TS)ร้อยละ 39.34 50.50 47.58 44.84 และ 34.78 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ชนิดของวัตถุดิบ	
		น้ำผักตบชวา	จุลินทรีย์
COD(mg/L)	Potassium Dicromate Digestion	17,400 ^M	1,960 ^M
		13,700 ^T	5,480 ^T
TS(mg/L)	Total Solids Dried at 103-105°C	26,985 ^M	4,735 ^M
		24,076 ^T	8,900 ^T
VS(mg/L)	Volatile Solid Lgnited at 550°C	14,380 ^M	1,455 ^M
		12,324 ^T	4,074 ^T
TKN(mg/L)	Macro-kjedahl Method	734 ^M	534 ^M
		645 ^T	1,176 ^T

* หมายเหตุ M สภาวะเมฟิลิก และ T สภาวะเทอร์โมฟิลิก

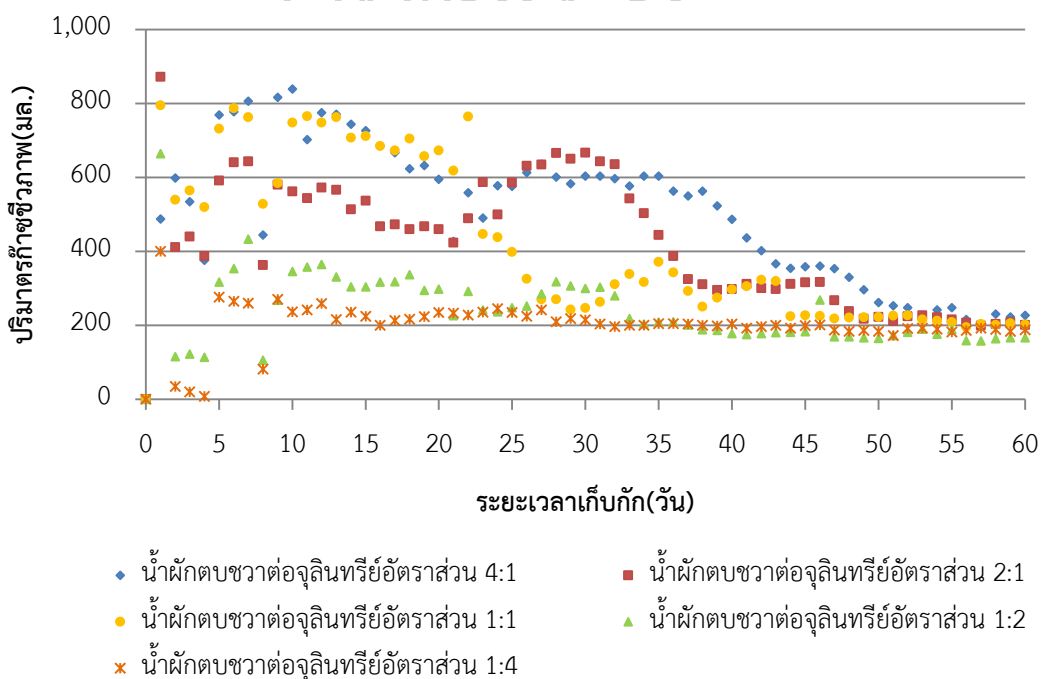
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบในแต่ละอัตราส่วน

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	อัตราส่วน				
		1:1	1:2	1:4	2:1	4:1
COD(mg/L)	Potassium Dicromate Digestion	5,960 ^M	7,115 ^M	3,520 ^M	10,800 ^M	10,200 ^M
		9,449 ^T	8,504 ^T	5,858 ^T	12,440 ^T	12,598 ^T
TS(mg/L)	Total Solids Dried at 103-105°C	10,760 ^M	13,220 ^M	7,345 ^M	20,470 ^M	23,025 ^M
		19,650 ^T	13,402 ^T	9,702 ^T	22,924 ^T	33,992 ^T
VS(mg/L)	Volatile Solid Lgnited at 550°C	3,455 ^M	5,700 ^M	2,560 ^M	8,655 ^M	7,610 ^M
		7,730 ^T	6,768 ^T	4,616 ^T	10,280 ^T	11,822 ^T
TKN(mg/L)	Macro-kjedahl Method	408 ^M	546 ^M	538 ^M	507 ^M	456 ^M
		817 ^T	1,001 ^T	955 ^T	794 ^T	703 ^T

* หมายเหตุ M สภาวะเมฟิลิก และ T สภาวะเทอร์โมฟิลิก

4.2 ผลของปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก (Daily biogas volume under Mesophilic condition)

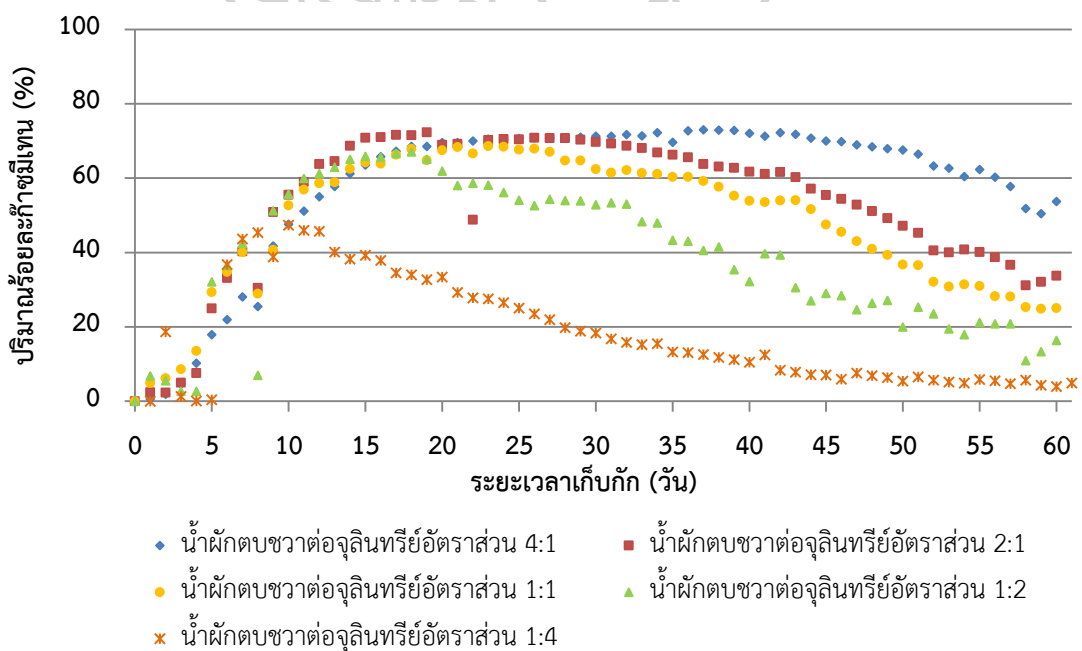
จากการทดลองภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ถูกเก็บรวบรวมในแต่ละอัตราส่วนมีปริมาณที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าที่อัตราส่วน 4:1 โดยรวมมีปริมาณก๊าซชีวภาพในแต่ละวันเกิดขึ้นมากที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 2:1 ในช่วงตั้งแต่วันที่ 45-60 ของกระบวนการปริมาณก๊าซชีวภาพอยู่ในสภาวะคงที่ทุก ๆ ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงสุดที่อัตราส่วน 2: 1 รองลงมา 4:1 1:1 1:2 และ 1:4 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 872 839 795 664 และ 400 ml ตามลำดับ เมื่อพิจารณาร่วมกับปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าในช่วงแรกของกระบวนการหมักร่วมของน้ำผักตบชวากับจุลินทรีย์นั้นปริมาณร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างมากเมื่อเทียบปริมาณร้อยละก๊าซมีเทน นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับปริมาณก๊าซมีเทนอีกด้วย แสดงดังรูปที่ 4.4 ทำให้ทราบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงสุดที่อัตราส่วน 2: 1 รองลงมา 4:1 1:1 1:2 และ 1:4 ที่เกิดขึ้นสูงสุดในช่วงแรกของกระบวนการนั้นส่วนมากมีเพียงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน

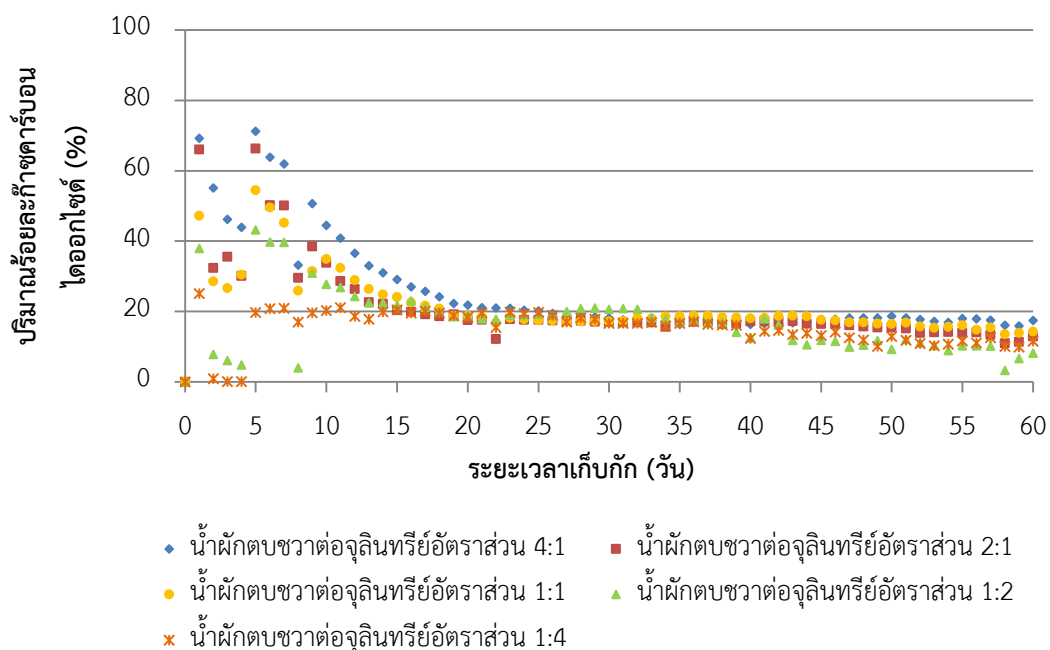
4.3 การเปรียบเทียบปริมาณของร้อยละก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก

จากการทดลองภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก พบว่าปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนที่ถูกเก็บรวบรวมทุกวันเป็นเวลา 60 วัน แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าในช่วงวันที่ 3 ของกระบวนการหมักร่วมกันของน้ำของผักตบชวากับจุลินทรีย์ในทุก ๆ อัตราส่วน เริ่มเกิดก๊าซมีเทน และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วน 4:1 มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดร้อยละ 73.07 ในวันที่ 37 ของกระบวนการ ที่เกิดอย่างต่อเนื่องและค่อย ๆ ลดลงในช่วงท้ายของกระบวนการ ซึ่งมีปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วน 1:1 1:2 1:4 และ 2:1 มีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 68.67 67.10 47.33 และ 70.87 ตามลำดับ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนในช่วงต้นสัปดาห์ที่ 2 เริ่มมีก๊าซมีเทนถึงร้อยละ 60 ในทุกๆ อัตราส่วนยกเว้นอัตราส่วน 1:4 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณจุลินทรีย์มากกว่าปริมาณสารอาหาร (น้ำผักตบชวา) ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าปริมาณสารอาหารที่มีในระบบไม่พอเพียงพอต่อจุลินทรีย์ที่จะย่อยสลายอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนได้ อย่างไรก็ตามในอัตราส่วนนี้เกิดจุดสูงสุดของปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนได้เร็วกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และลดลงเร็วกว่าอัตราส่วนอื่นๆเช่นกัน เพราะจุลินทรีย์มีปริมาณมากกว่าปริมาณสารอาหาร



รูปที่ 4.2 ปริมาณของร้อยละก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน

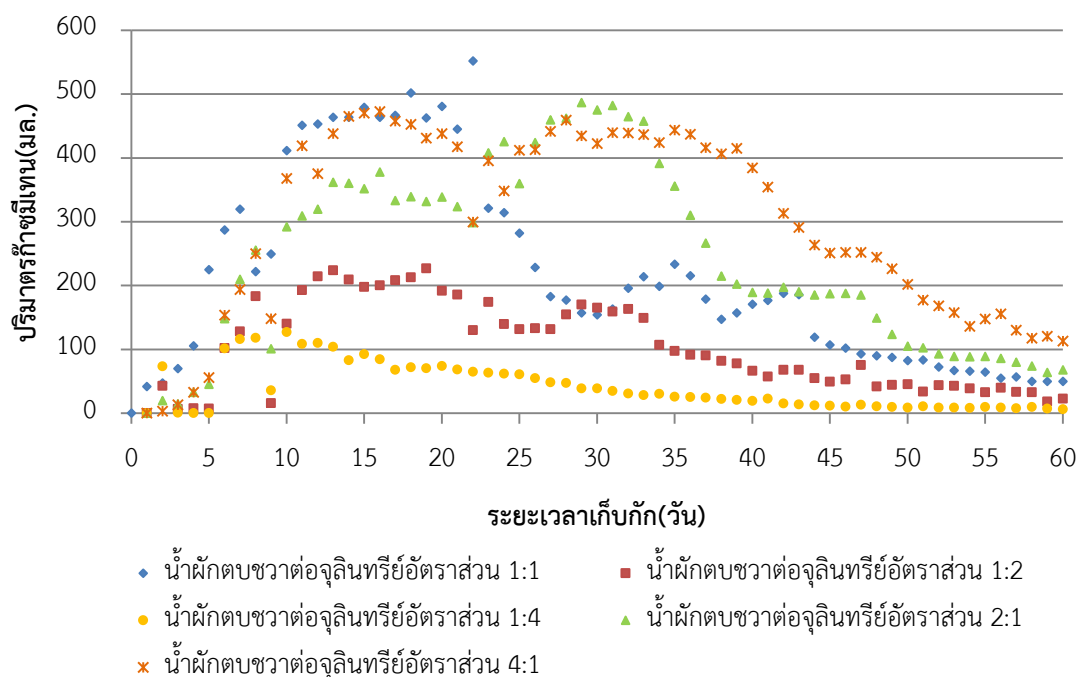
แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่าปริมาณร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงสัปดาห์แรกของกระบวนการมีปริมาณสูงและลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน จนกระทั่งอยู่ในสภาวะคงที่ในทุก ๆ อัตราส่วน แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยจะได้ว่าที่อัตราส่วน 4: 1 ปริมาณร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่เริ่มกระบวนการ ซึ่งส่งผลทำให้การเกิดปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนค่อนข้างน้อยตามไปด้วย



รูปที่ 4.3 ปริมาณของร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน

4.4 ผลของปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก

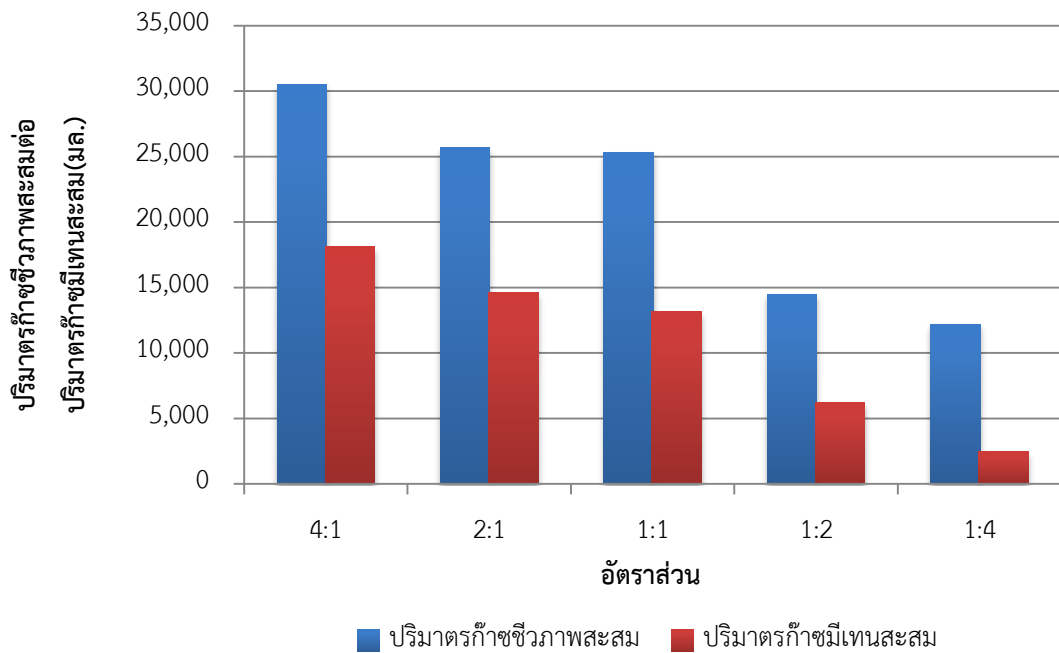
ปริมาตรก๊าซมีเทนในแต่ละอัตราส่วนมีปริมาณที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าที่อัตราส่วน 4:1 โดยรวมมีปริมาตรมีเทนในแต่ละวันเกิดขึ้นมากที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1:1 1:2 1:4 และ 2:1 ถึงแม้ว่าในช่วงตั้งแต่วันที่ 45-60 ของกระบวนการปริมาตรก๊าซชีวภาพอยู่ในสภาวะคงที่ทุกๆ อัตราส่วน แต่ในขณะที่ปริมาตรก๊าซมีเทนยังมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าในอัตราส่วน 4:1 ก็ยังคงมีปริมาตรก๊าซมีเทนสูงกว่าทุกๆ อัตราส่วน โดยปริมาตรก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 551 ml รองลงมา 486 472 226 และ 127 ml ที่อัตราส่วน 1:1 2:1 4:1 1:2 และ 1: 4 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาตรก๊าซชีวภาพรายวัน กล่าวคือเมื่อมีปริมาตรก๊าซชีวภาพมาก ปริมาตรก๊าซมีเทนก็มากเช่นกัน



รูปที่ 4.4 ปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน

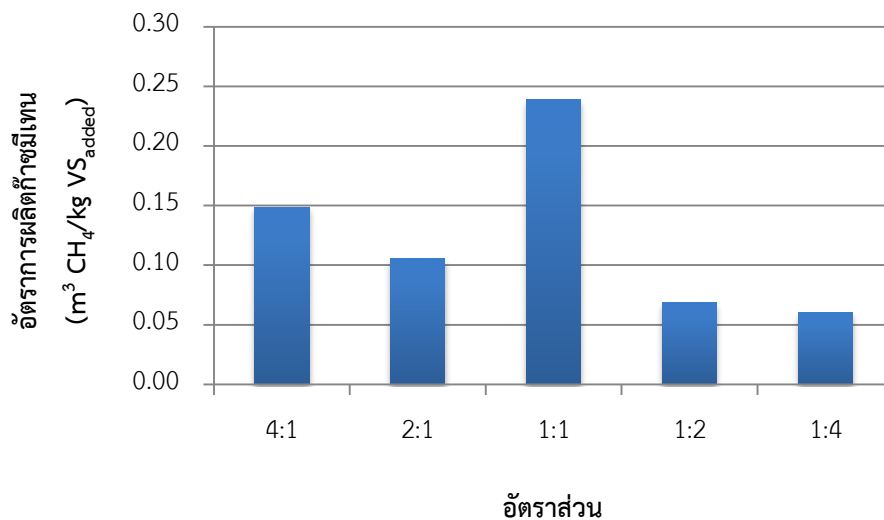
4.5 ผลของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมกับปริมาณก๊าซมีเทนสะสมในแต่ละอัตราส่วน พบว่าในทุก ๆ อัตราส่วนมีความสัมพันธ์ไปทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนของน้ำผักตบชวาลดลงในขณะเดียวกันอัตราส่วนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นไปตามอัตราส่วนที่ทำการทดลอง ส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและปริมาณก๊าซมีเทนสะสมลดลง ด้วย จากอัตราส่วนทั้งหมดจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 4:1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด 30,531.33 ml ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุด 18,112.89 ml รองลงมาคืออัตราส่วน 2:1, 1:1, 1:2 และ 1:4 ตามลำดับ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 25,692.33 25,342.67 14,499.33 และ 12,204.67 ml และมีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 14,595.60 13,193.71 6,235.26 และ 2,471.09 ml ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน

4.6 ผลของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก

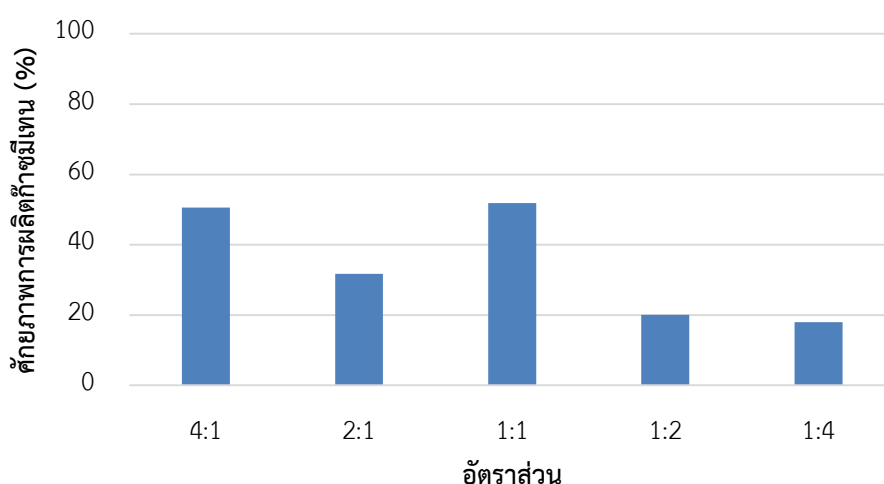


รูปที่ 4.6 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกในแต่ละอัตราส่วน

จากรูปที่ 4.6 เมื่อคำนวณค่า Specific Methane Yield จากสมการที่ 1 พบว่าอัตราส่วนการหมักร่วมกันของน้ำจากไบโและลำต้นของผักตบชวาต่อจุลินทรีย์ 1:1 สามารถให้ผลผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดถึง 0.2387 m³ CH₄/kg VS_{added} ซึ่งมีความใกล้เคียงกับวิจัยของ Patil et.al. (2014) ทำการศึกษาการหมักก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา ร่วมกับมูลแกะ โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะเม

โซฟีลิก (ช่วงอุณหภูมิ 30-37 °C) มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.36 L/g VS จากงานวิจัยของ Yusuf et. al. (2011) ทำการศึกษาผลของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่มีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการหมักก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาพร้อมกับมูลโค จากผลการทดลองพบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในแต่ละอัตราส่วนมีค่าเท่ากับ 0.282 0.262 0.233 และ 0.2176 L/g VS fed และจากงานวิจัยของ Moorhead et.al. (1993) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคผักตบชวา ปริมาณไนโตรเจนในผักตบชวา และปริมาตรเชื้อจุลินทรีย์ของการหมักก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาแบบกะ (Batch) ที่อุณหภูมิ 35 °C พบว่ามีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพรวมอยู่ระหว่าง 0.2-0.28 L/g VS อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาหมักร่วมกับจุลินทรีย์ที่อัตราส่วน 1: 1 พบว่ามีองค์ประกอบของปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) สูงกว่าอัตราส่วน 1: 2 และ 1: 4 แต่น้อยกว่า 2: 1 และ 4: 1 เนื่องจากปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่สูงกว่าเป็นผลมาจากน้ำของผักตบชวาเป็นจุลชีพที่เป็นของแข็งระเหยยากกว่า ซึ่งคุณสมบัติของผักตบชวามีองค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลสสูง ถึงแม้ว่าในงานวิจัยนี้ใช้ผักตบชวาที่ถูกคั้นให้เหลือเพียงแต่น้ำแล้วนำมาใช้ในการทดลอง แต่ก็ยังคงมีเศษชิ้นเล็ก ๆ (ขนาด >1 mm) ของผักตบชวาที่เล็กกว่าผ้าที่ใช้กรองหลุดรอดลงไปด้วย จึงส่งผลให้อัตราการย่อยสลายของจุลชีพเกิดปฏิกิริยาช้าลง ดังนั้นอัตราส่วน 1: 1 เป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณของแข็งระเหยง่ายเหมาะสมกับกระบวนการหมักร่วมของน้ำผักตบชวากับจุลินทรีย์มากที่สุด

4.7 ผลของศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเมโซฟีลิก

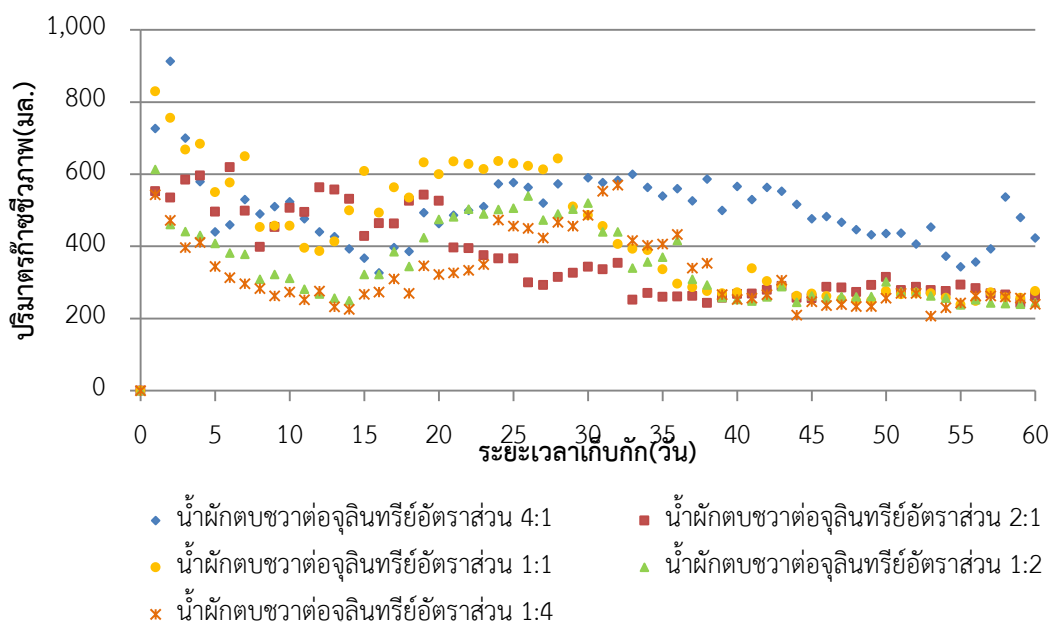


รูปที่ 4.7 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเมโซฟีลิกในแต่ละอัตราส่วน

ศักยภาพในการผลิตมีเทนหาได้จากการสมการที่ 2 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นได้ชัดว่า ศักยภาพในการผลิตมีเทนสูงสุดถึง 51.89% รองลงมา 50.54% 31.71% 20.04% และ 17.94% ใน อัตราส่วน 1: 1 4: 1 2: 1 1: 2 และ 1: 4 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับงานวิจัย ของ V. Singhal และ J.P.N. Rai ได้ทำการศึกษากาการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาและสันตะวาใบ ข้าว ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่ามีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (%BMP) มากที่สุดเท่ากับ 53.18% และ B. E. ASIKONG et. al. ได้ทำการศึกษาศักยภาพของการผลิตก๊าซ ชีวภาพจากผักตบชวาและเปลือกมันสำปะหลัง พบว่ามีค่า %BMP มากที่สุดเท่ากับ 52.43% นอกจากนี้ยังมีความสอดคล้องกับผลผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดถึง $0.2387 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg VS}_{\text{added}}$ ใน อัตราส่วน 1: 1



4.8 ผลของปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก (Daily biogas volume under thermophilic condition)



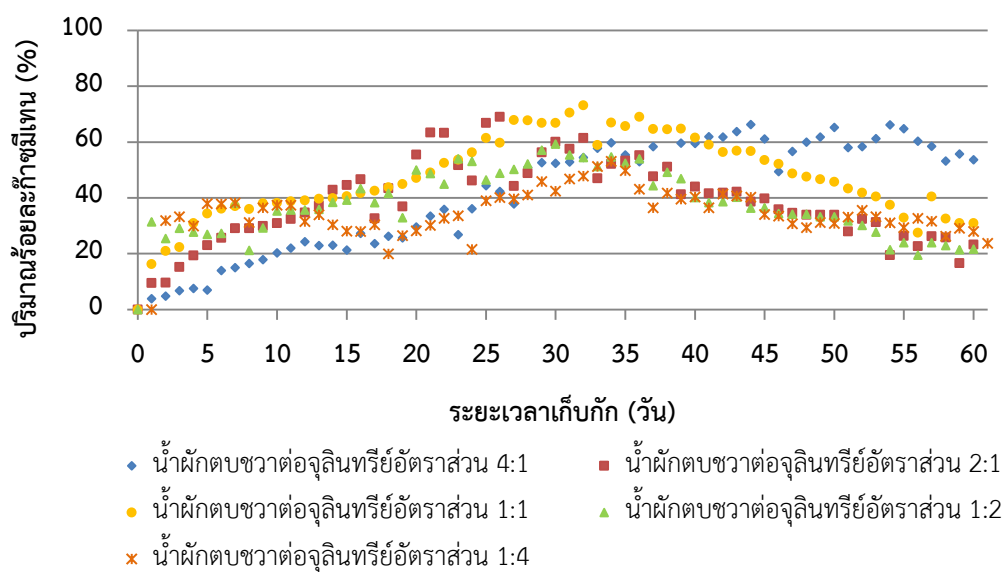
รูปที่ 4.8 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน

จากการทดลองภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ถูกเก็บรวบรวมในแต่ละอัตราส่วนมีปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าที่อัตราส่วน 4:1 โดยรวมมีปริมาณก๊าซชีวภาพในแต่ละวันเกิดขึ้นมากที่สุด สังเกตตั้งแต่วันที่ 33 เป็นต้นไป เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ พบว่าที่อัตราส่วน 4: 1 ยังคงมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ในขณะที่อัตราส่วนอื่น ๆ ลดลงและลดลงค่อนข้างใกล้เคียงกัน ผู้วิจัยจึงสันนิษฐานว่าอาจจะเกิดจากปริมาณสารอาหาร(น้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวา) มีปริมาณลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ได้ย่อยสลายจนเกือบหมดจึงส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามอัตราส่วนที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดคือ 4: 1 รองลงมา 1: 1 2: 1 1: 2 และ 1: 4 โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 913 ml รองลงมา 830 619 613 และ 570 ml เมื่อพิจารณาร่วมกับปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ พบว่าในช่วงแรกของกระบวนการหมักร่วมของน้ำผักตบชวากับจุลินทรีย์นั้นปริมาณร้อยละของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างมากเมื่อเทียบปริมาณร้อยละก๊าซมีเทน นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับปริมาณก๊าซมีเทนอีกด้วย แสดงดังรูปที่ 4.11 จึงทำให้ทราบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงสุดที่อัตราส่วน 4: 1

รองลงมา 1: 1 2: 1 1: 2 และ 1: 4 ที่เกิดขึ้นสูงสุดในช่วงแรกของกระบวนการนั้นส่วนมากมีเพียงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.9 การเปรียบเทียบปริมาณของร้อยละก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก

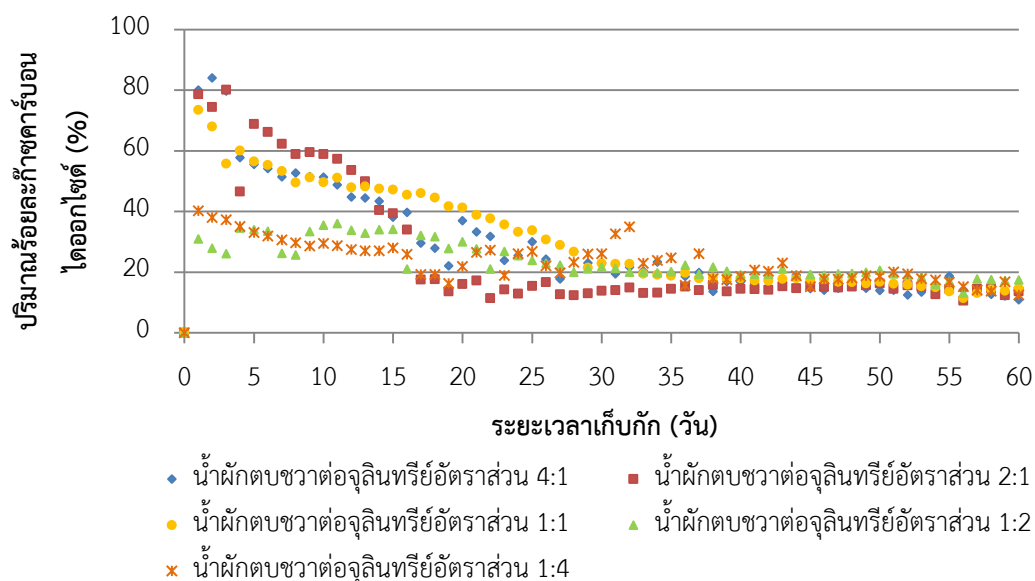
จากการทดลองภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก พบว่าปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนที่ถูกเก็บรวบรวมทุกวันเป็นเวลา 60 วัน แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าในช่วงวันที่ 2 ของกระบวนการหมักร่วมกันของน้ำของผักตบชวากับจุลินทรีย์ในทุก ๆ อัตราส่วน เริ่มเกิดก๊าซมีเทนขึ้น และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วน 1:1 มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดร้อยละ 73.20 ในวันที่ 32 ของกระบวนการ ที่เกิดอย่างต่อเนื่องและค่อย ๆ ลดลงในช่วงท้ายของกระบวนการ ซึ่งมีปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วน 4:1 2:1 1:2 และ 1:4 มีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 66.27 67.07 59.27 และ 53.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ปริมาณของร้อยละก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน

แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่าปริมาณร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงสัปดาห์แรกของกระบวนการมีปริมาณสูงและลดลงอย่างเห็นได้ชัด จนกระทั่งอยู่ในสภาวะคงที่ในทุก ๆ อัตราส่วน แสดงดังรูปที่

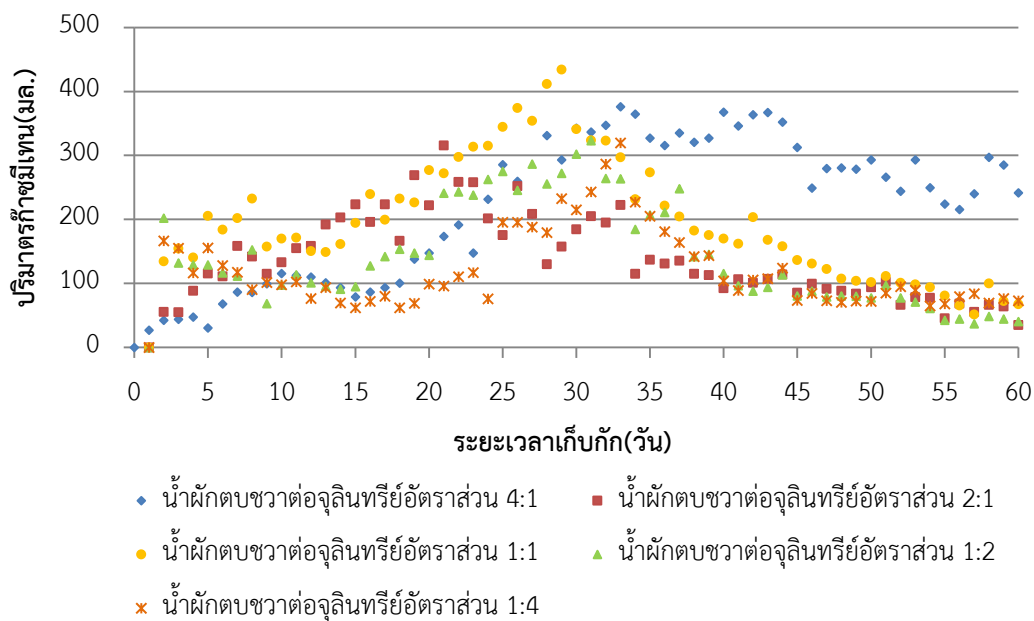
4.10



รูปที่ 4.10 ปริมาณของร้อยละกล้าซาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน

4.10 ผลของปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก

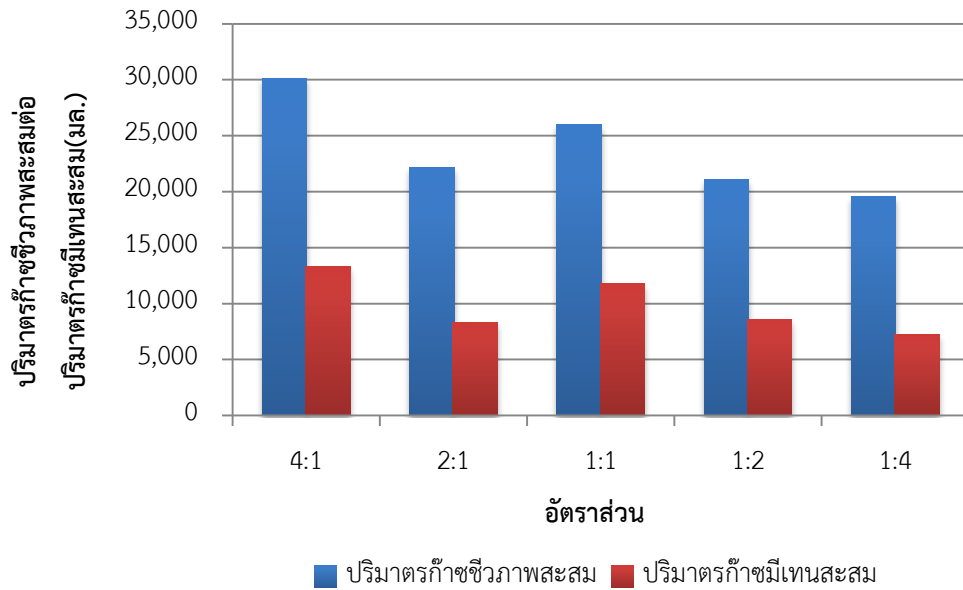
ปริมาตรก๊าซมีเทนในแต่ละอัตราส่วนมีปริมาตรที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัด แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าในทุก ๆ อัตราส่วนมีปริมาตรก๊าซมีเทนค่อย ๆ สูงขึ้นจนกระทั่งมีปริมาตรสูงสุดในช่วงวันที่ 21 - 33 นอกจากนี้ที่อัตราส่วน 4:1 ตั้งแต่หลังวันที่ 35 มีปริมาตรก๊าซมีเทนสูงกว่า เมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1:1 1:2 1:4 และ 2:1 เนื่องจากในอัตราส่วนดังกล่าวมีปริมาณสารอาหารที่มากเพียงพอต่อจุลินทรีย์ที่ทำการย่อยสลายให้ก๊าซเป็นก๊าซมีเทน อย่างไรก็ตามในช่วงตั้งแต่วันที่ 45-60 ของกระบวนการ ปริมาตรก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มลดลงทุกๆ อัตราส่วน แต่ในขณะที่ปริมาตรก๊าซมีเทนยังมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าในอัตราส่วน 4:1 ก็ยังคงมีปริมาตรก๊าซมีเทนสูงกว่าทุกๆ อัตราส่วน



รูปที่ 4.11 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน

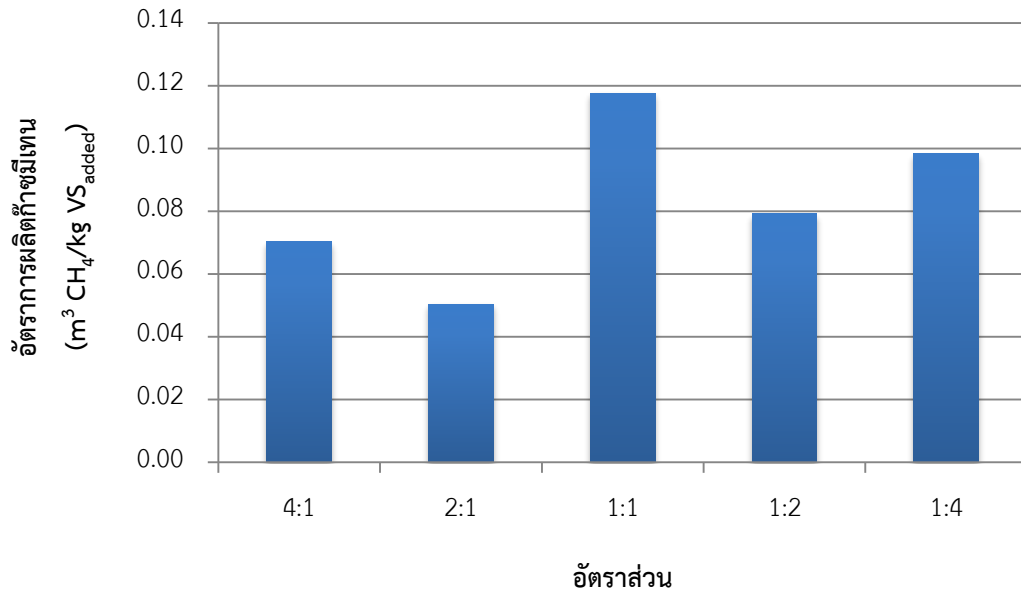
4.11 ผลของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมกับปริมาณก๊าซมีเทนสะสมในแต่ละอัตราส่วน พบว่าในทุก ๆ อัตราส่วนมีความสัมพันธ์ไปทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนของน้ำผักตบชวาลดลงในขณะที่เดียวกันอัตราส่วนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นไปตามอัตราส่วนที่ทำการทดลอง ส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและปริมาณก๊าซมีเทนสะสมลดลง ด้วย จากอัตราส่วนทั้งหมดจะเห็นว่าที่อัตราส่วน 4:1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 30,159.33 ml ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดเท่ากับ 13,277.07 ml รองลงมาคืออัตราส่วน 1:1 2:1 1:2 และ 1:4 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 26,002.00 22,146.67 21,052.67 และ 19,585.00 ml ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 11,766.50 8,286.09 8,568.02 และ 7,259.92 ml ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกตามระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน

4.12 ผลของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก

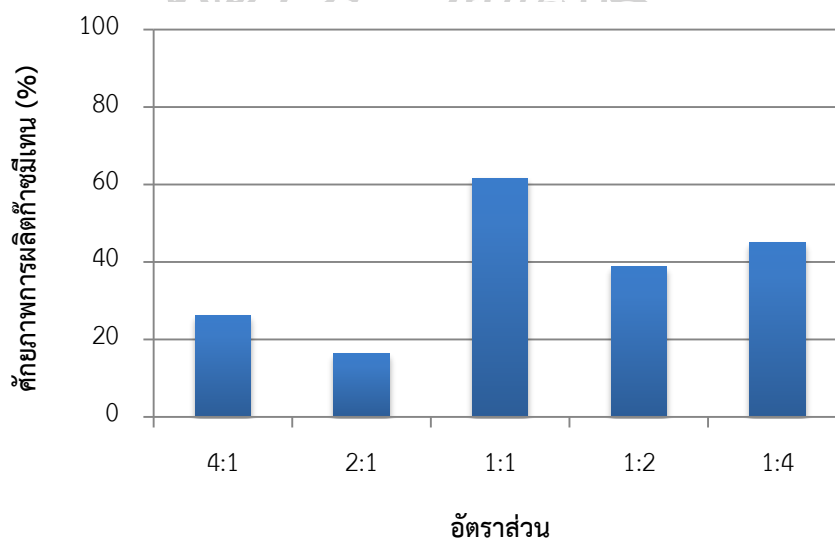


รูปที่ 4.13 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิกแต่ละอัตราส่วน

จากรูปที่ 4.13 เมื่อคำนวณค่า Specific Methane Yield จากสมการที่ 1 พบว่าอัตราการหมักร่วมกันของน้ำจากไบโและลำต้นของผักตบชวาต่อจุลินทรีย์ 1: 1 สามารถให้ผลผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดถึง 0.1176 m³ CH₄/kg VS_{added} รองลงมาที่อัตราส่วน 1: 4 1: 2 4: 1 และ 2: 1 มีผลผลิต

ก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.0983 0.0791 0.0438 และ 0.0702 $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาหมักร่วมกับ จุลินทรีย์ที่อัตราส่วน 1: 1 พบว่ามีองค์ประกอบของปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) สูงกว่าอัตราส่วน 1: 2 และ 1: 4 แต่น้อยกว่า 2: 1 และ 4: 1 เนื่องจากปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่สูงกว่าเป็นผลมาจากน้ำของผักตบชวาเป็นจุลชีวะที่เป็นของแข็งระเหยยากกว่า ซึ่งคุณสมบัติของผักตบชวามี องค์ประกอบของลิกนินและเซลลูโลสสูง ถึงแม้ว่าในงานวิจัยนี้ใช้ผักตบชวาที่ถูกคั้นให้เหลือเพียงแต่น้ำ แล้วนำมาใช้ในการทดลอง แต่ก็ยังคงมีเศษชิ้นเล็ก ๆ (ขนาด $>1 \text{ mm}$) ของผักตบชวาที่เล็กกว่าผ้าที่ใช้ กรองหลุดรอดลงไปด้วย จึงส่งผลให้อัตราการย่อยสลายของจุลชีวะเกิดปฏิกิริยาช้าลง ดังนั้นอัตราส่วน 1: 1 เป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณของแข็งระเหยง่ายเหมาะสมกับกระบวนการหมักร่วมของน้ำผักตบชวา กับจุลินทรีย์มากที่สุด นอกจากนี้ในอัตราส่วน 1: 2 และ 1: 4 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนที่สูงกว่าใน อัตราส่วนเดียวกันในสถานะเมโซฟิลิก จากรายงานของ Ferrer, Gao และ Diaz อุณหภูมิถือเป็น ปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบให้เกิดก๊าซมีเทนมากขึ้น

4.13 ผลของศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สถานะเทอร์โมฟิลิก



รูปที่ 4.14 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนภายใต้สถานะเทอร์โมฟิลิกในแต่ละอัตราส่วน

ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนที่สามารถหาได้จากสมการที่ 2 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นได้ชัดว่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดถึง 61.67% รองลงมา 45.03% 38.72% 26.09% และ 16.30% ในอัตราส่วน 1: 1 1: 4 1: 2 4: 1 และ 2: 1 ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.14 นอกจากนี้ในอัตราส่วน 1: 2 และ 1: 4 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่สูงกว่าในอัตราส่วนเดียวกันในสภาวะเมโซฟิลิก จากรายงานของ Ferrer, Gao และ Diaz อุณหภูมิถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบให้เกิดก๊าซมีเทนมากขึ้น



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่องการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและศึกษาผลของอัตราส่วนการหมักร่วมกันของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวากับจุลินทรีย์ที่มีต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่สภาวะอุณหภูมิเมโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) สามารถสรุปได้ดังนี้

จากการวิเคราะห์ผลของการหมักร่วมกันของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาร่วมกับจุลินทรีย์ในสภาวะเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกทั้ง 5 อัตราส่วน ได้แก่ 4: 1 2: 1 1: 1 1: 2 และ 1: 4 ในห้องที่ถูกควบคุมอุณหภูมิ 37 และ 51 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีระยะเวลาเก็บกัก 60 วัน ในถัง PVC ขนาด 20 ลิตร พบว่าการหมักร่วมกันของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาต่อจุลินทรีย์ในสภาวะเมโซฟิลิกที่อัตราส่วน 1: 1 สามารถให้ผลผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดถึง $0.2387 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$ มีศักยภาพในการผลิตมีเทนสูงสุดถึง 51.89% มีปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทนสูงถึง 68.67% ในวันที่ 23 ของกระบวนการทั้งหมด 60 วัน มีปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 25,342.67 ml และปริมาตรก๊าซมีเทนเท่ากับ 13,193.71 ml ในส่วนของการทดลองในสภาวะเทอร์โมฟิลิกพบว่าที่อัตราส่วน 1: 1 สามารถให้ผลผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดถึง $0.1176 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$ มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดถึง 61.67% มีปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทนสูงสุด 73.20% ในวันที่ 32 ของกระบวนการทั้งหมด 60 วัน มีปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 26,002.00 ml และปริมาตรก๊าซมีเทนเท่ากับ 13,193.71 ml จากผลการศึกษาดังกล่าวจะเห็นว่าอัตราส่วนมีผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ถึงแม้ว่าบางอัตราส่วนมีปริมาตรก๊าซชีวภาพและปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมมาก แต่ก็ไม่ได้หมายความว่ามีความจะมีศักยภาพที่สูงที่สุด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่มีผลต่อในแต่ละอัตราส่วน ดังนั้นผู้วิจัยจึงสามารถสรุปได้ว่าการนำน้ำของผักตบชวาจากลำต้นและใบมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพร่วมกับจุลินทรีย์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันมีนัยสำคัญต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำจากใบและลำต้นของผักตบชวาต่อจุลินทรีย์ในสภาวะเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก และบ่งบอกได้ว่าอัตราส่วนที่มีศักยภาพดีที่สุดของการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกคือ อัตราส่วน 1: 1 ที่มีอัตราส่วนปริมาณจุลินทรีย์กับสารอาหาร

นอกจากนี้การที่ผลการทดลองในสภาวะเทอร์โมฟิลิกมีจุดสูงสุด(peak)ร้อยละก๊าซมีเทนต่ำกว่าในสภาวะเมโซฟิลิก ผู้วิจัยพบว่าค่า COD และ TKN ที่มาก หมายถึงจุลินทรีย์มีการขับถ่ายในระบบมากขึ้นเมื่อมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการหมัก จึงเป็นสาเหตุที่จุดสูงสุดของร้อยละก๊าซมีเทนในสภาวะเทอร์โมฟิลิกเกิดต่ำกว่าสภาวะเมโซฟิลิก ซึ่งก็อาจจะเป็นไปได้ว่าในช่วงที่นำเอาจุลินทรีย์มาใช้เป็นช่วงที่จุลินทรีย์อยู่ในช่วงการเจริญเติบโตระยะ stationary phase ที่ธาตุอาหารเริ่มเป็นปัจจัยจำกัด อัตราการตายของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับอัตราเจริญเติบโต ดังนั้นเมื่อนำจุลินทรีย์มาใช้ในการทดลองจึงเป็นเหตุให้เกิดจุดสูงสุดของร้อยละก๊าซมีเทนต่ำกว่าปกติ และอาจจะเป็นไปได้ว่าในช่วงเวลา 28 วันเป็นช่วงที่จุลินทรีย์กำลังฟื้นฟูหรือแบ่งเซลล์ใหม่ในระยะเวลาสั้นๆ เมื่อจุลินทรีย์มีอัตราการเติบโตใหม่อีกครั้ง จึงส่งผลให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้เต็มประสิทธิภาพจนถึงจุดสูงสุดของก๊าซมีเทนในช่วงวันที่ 30

ข้อเสนอแนะ

1. ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักของน้ำจากผักตบชวากับจุลินทรีย์ควรเพิ่มวิธีการควบคุมปัจจัยการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น วิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ (ประเภทของจุลินทรีย์ จำนวนจุลินทรีย์ และระยะการเจริญเติบโต)
2. การทดลองนี้หากมีการนำไปประยุกต์ใช้ในครัวเรือนควรทำในสภาวะเมโซฟิลิกที่ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยปกติ (35 - 37 องศาเซลเซียส) เนื่องจากในสภาวะเทอร์โมฟิลิกจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) เพื่อให้มีอุณหภูมิที่สูง (50 - 55 องศาเซลเซียส) ที่ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยปกติของประเทศไทย จึงส่งผลทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ในสภาวะเมโซฟิลิกยังให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากกว่าในสภาวะเทอร์โมฟิลิกอีกด้วย

รายการอ้างอิง

1. Quality, D.o.E. ความสำคัญของพลังงาน. 2017; Available from:
<https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet6/envi2/energy/energy.htm>.
2. Efficiency, D.o.A.E.D.a., *Alternative Energy Development Plan (AEDP2015)*, M.o. Energy, Editor. 2558. p. 1-22.
3. B.Ngamwitroj, et al., *Water hyacinth management in watershed*. 2009: p. 1-25.
4. Efficiency, D.o.A.E.D.a. ก๊าซชีวภาพ. Available from:
http://biogas.dede.go.th/biogas/web_biogas/
5. Chynoweth, D.P., et al. *Biogasification of blends of water hyacinth and domestic sludge*. in *International Gas Research Conferences*. 1981. Los Angeles.
6. Chynoweth, D.P., et al., *Kinetics and advanced digester design for anaerobic digestion of water hyacinth and primary sludge*. Biotechnology and Bioengineering Symposium, 1982. 12: p. 381–398.
7. M. Delgado, E.G. and M. Bigeriego, *Methane generateion from water hyacinth biomass*. J Environ Sci Health 1992. 27(4): p. 347-354.
8. D. L. Klass and S. Ghosh, *Methane Production by Anarebic Digestion of Water Hyacinth (Eichhornia Crassipes)* 1980, Institute of Gas Technology p. 221-232.
9. Nordstedt, K.K.M.a.R.A., *Batch Anaerobic Digestion of Water Hyacinth: Effecys of Particle Size, Plant Notrogen Content, and Inoculum Volume** Bioresource Technology 1993. 44 p. 71-76
10. Srivastava, R.C., *Kinetics of fresh water hyacinth digestion in semi-continuous operation* The Chemical Engineering Journal, 1995. 56: p. 109-113
11. V. Singhal and J.P.N. Rai, *Biogas production from water hyacinth and channel grass used for phytoremediation of industrial effluents*. Bioresource Technology 2003. 86().
12. Asikong, B.E., J. Epoke, and E.E. and Antai, *Potentials of Biogas Generation by Water Hyacinth (EICHHORNIA CRASSIPES) and Cassava (MANIHOT ESCULENTUM) Peels in Cross River State Nigeria*,. Global Journal of Environment Sciences., 2012. 11(1 & 2): p. 9-20.
13. ธนันชัย ชัยยืน, et al. การศึกษาศักยภาพการผลิตไบโอแก๊สของพืชเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกสำหรับ

- ชุมชน. in การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน 2552. นครปฐม: .
14. D. Madamwar, et al., *Effect of Mixture of Surfactants and Adsorbents on Anaerobic Digestion of Water Hyacinth-Cattle Dung* Applied Biochemistry and Biotechnology, 1992. 36: p. 163-169.
 15. Jayaweera, M., J. Dilhani, Kularatne, R., , and S. Wijeyekoon, *Biogas production from water hyacinth (Eichhornia crassipes (Mart.) Solms) grown under different nitrogen concentrations*, *Journal of Environmental Science and Health*. Environmental Science and Engineering and Toxicology, 2007. 42(7): p. 925-932.
 16. ชัยศรี ธาราสวัสดิ์พิพัฒน์ and โ. สุวรรณหงษ์, การผลิตพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ร่วมกับวัชพืชน้ำในพื้นที่ อำเภอมัญจาคีรี จังหวัดขอนแก่น. 2554, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
 17. Yusuf, et al., *The effect of waste paper on the kinetics of biogas yield from the co-digestion of cow dung and water hyacinth*. Biomass and Bioenergy, 2011. 35(3): p. 1345-1351.
 18. Booddachan, K. and S. Wannapakhea, *Household Biogas from Water Hyacinth*, in *Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB V)*. 2013: Luang Prabang, Lao PDR.
 19. Sudhakar, K., Abhishek Goyal, and R. Ananthakrishnan, *Biogas Production from a mixture of Water Hyacinth, Water Chestnut and Cow Dung*. International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), 2013. 2: p. 35-37.
 20. Patila J.H., et al., *Anaerobic Co-Digestion of Water Hyacinth and Sheep Waste*. Energy Procedia, 2014. 52: p. 572 – 578.
 21. Ferrer, I., et al., *Mesophilic and thermophilic anaerobic biodegradability of water hyacinth pre-treated at 80 degrees C*. Waste Management, 2010. 30(10): p. 1763-1767.
 22. Gao, J., et al., *Effect of ionic liquid pretreatment on the composition, structure and biogas production of water hyacinth (Eichhornia crassipes)*. Bioresource Technology, 2013. 132: p. 361-364.
 23. Díaz, A., et al. *Anaerobic digestion of Eichhornia crassipes (water hyacinth) in a vertical downflow thermophilic reactor with leachate recirculation*. in *Anaerobic Digestion World Congress*. 2001. Antwerpen (Belgium).
 24. หนังสือพจนานุกรมสมุนไพรไทย and ด.ว. เทียงบูรธรรม., ผักตบชวา. Vol. 5.
 25. Sun, Y. and J. Cheng, *Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a*

- review*. *Bioresource Technology*, 2002. 83: p. 1–11.
26. กรมโรงงานอุตสาหกรรม and กระทรวงอุตสาหกรรม, คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (*Biogas*) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. 2553.
27. Breure, A.M. and J.G. Andel, *Bioenvironmental Systems*. 1987, CRC Press: Cambridge Scientific, Florida.
28. L.P.Lopez, R.P.M.a.M.D.B., *The potential of leaf protein concentrate and supplement in broiler ration*. *Veterinary and Animal Sciences*, 1981. 7(1): p. 38.





ภาคผนวก

- ค่าเฉลี่ยปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก

Average %มีเทน					
HRT	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4	AVG 2:1	AVG 4:1
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	4.87	6.83	18.67	2.37	0.60
2	6.23	5.50	1.27	2.33	1.90
3	8.57	2.67	0.07	4.97	4.63
4	13.53	2.67	0.40	7.57	10.23
5	29.33	32.13	36.80	25.00	17.90
6	34.80	36.50	43.63	33.13	21.93
7	40.13	42.43	45.43	40.33	28.03
8	28.93	7.00	38.87	30.50	25.53
9	40.70	51.23	47.33	50.93	41.73
10	52.73	55.73	46.03	55.60	47.60
11	56.93	59.93	45.73	58.97	51.17
12	58.67	61.27	40.17	63.83	55.03
13	58.93	63.00	38.20	64.63	57.77
14	62.53	65.10	39.27	68.73	61.23
15	64.30	65.87	37.93	70.90	63.60
16	63.90	65.60	34.50	71.10	65.83
17	66.30	66.70	34.03	71.63	67.27
18	67.87	67.10	32.73	71.60	68.57
19	64.83	65.13	33.40	72.33	68.57
20	67.57	61.90	29.29	69.03	69.60
21	68.43	58.03	27.80	69.27	69.63
22	66.70	58.67	27.53	48.80	70.03
23	68.67	58.17	26.50	70.30	70.57
24	68.47	56.17	25.10	70.53	70.53
25	67.67	54.07	23.53	70.43	70.73

HRT	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4	AVG 2:1	AVG 4:1
26	67.97	52.63	22.00	70.87	70.87
27	67.13	54.33	19.80	70.83	70.87
28	64.80	53.97	18.87	70.80	70.80
29	64.80	53.93	18.37	70.33	71.10
30	62.47	52.87	16.77	69.77	71.30
31	61.50	53.40	15.83	69.37	71.37
32	62.23	53.07	15.23	68.70	71.77
33	61.40	48.30	15.47	68.17	71.43
34	61.13	48.00	13.30	66.97	72.27
35	60.40	43.30	13.10	66.30	69.67
36	60.37	43.07	12.60	65.67	72.80
37	59.30	40.53	11.80	63.83	73.07
38	57.73	41.50	11.20	63.13	72.97
39	55.33	35.40	10.53	62.83	72.83
40	53.93	32.23	12.47	61.80	72.07
41	53.57	39.67	8.37	61.20	71.30
42	54.00	39.37	7.83	61.63	72.27
43	54.07	30.60	7.17	60.33	71.87
44	51.67	27.03	7.07	57.20	70.83
45	47.53	29.03	5.90	55.50	70.07
46	45.60	28.40	7.57	54.47	69.87
47	43.03	24.67	6.90	52.89	69.03
48	41.03	26.33	6.37	51.17	68.47
49	39.40	27.13	5.40	49.23	67.93
50	36.77	19.97	6.57	47.20	67.60
51	36.57	25.33	5.63	45.27	66.50
52	32.13	23.50	5.20	40.57	63.30
53	30.87	19.50	4.93	40.07	62.67
54	31.47	17.90	5.83	40.83	60.50

HRT	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4	AVG 2:1	AVG 4:1
55	31.00	21.17	5.53	40.10	62.40
56	28.23	20.87	4.77	38.80	60.27
57	28.17	20.83	5.63	36.70	57.80
58	25.33	10.90	4.27	31.17	51.87
59	24.87	13.33	3.93	32.17	50.43
60	25.03	16.37	4.87	33.73	53.77



- ค่าเฉลี่ยปริมาณร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก

Average %คาร์บอนไดออกไซด์					
HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	80.00	78.63	73.50	30.90	40.27
2	84.03	74.43	68.00	27.87	37.97
3	79.67	80.10	55.70	26.03	37.27
4	57.80	46.57	60.10	34.50	35.03
5	55.57	68.83	56.53	33.97	33.07
6	54.20	66.20	55.33	33.43	31.93
7	51.37	62.27	53.33	26.17	30.67
8	52.73	58.93	49.47	25.63	29.67
9	51.57	59.50	51.23	33.33	28.67
10	51.33	58.90	49.63	35.43	29.43
11	48.73	57.30	51.13	36.00	28.70
12	44.80	53.60	47.90	33.77	27.43
13	44.50	49.93	48.23	32.83	27.00
14	43.43	40.43	47.47	34.03	27.00
15	38.17	39.40	47.17	34.13	27.93
16	39.67	34.00	45.50	21.00	25.90
17	29.60	17.53	46.03	32.10	19.23
18	27.90	17.60	44.57	31.67	19.27
19	22.07	13.60	41.67	27.80	16.27
20	36.93	16.07	41.33	30.00	21.90
21	33.27	17.17	38.87	27.70	26.50
22	31.83	11.43	37.73	21.07	27.23
23	23.83	14.23	35.70	26.87	18.87
24	25.47	12.90	33.27	25.50	26.13
25	30.03	15.47	33.83	23.87	26.80

HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
26	24.33	16.70	30.73	22.93	22.03
27	17.70	12.67	28.90	22.33	19.77
28	26.77	12.33	26.67	19.93	23.23
29	23.00	12.97	21.43	21.17	26.00
30	23.07	13.80	22.95	21.63	26.10
31	19.40	14.00	22.73	21.20	32.67
32	21.60	14.90	22.73	20.00	34.97
33	20.37	13.10	19.43	20.10	22.87
34	23.30	13.23	19.10	19.77	23.91
35	19.57	14.47	18.80	20.20	24.70
36	18.60	15.17	19.73	22.23	15.63
37	19.83	14.10	18.00	19.37	26.13
38	13.60	15.70	18.20	21.67	17.90
39	16.87	13.63	17.90	20.30	17.50
40	16.83	14.43	18.00	19.10	18.60
41	16.13	14.33	17.17	19.33	20.70
42	17.80	14.17	17.07	19.37	20.27
43	16.57	15.30	17.70	21.03	23.00
44	18.97	14.67	17.93	18.97	18.83
45	14.55	15.37	17.43	19.27	15.20
46	14.10	15.07	17.67	19.00	17.73
47	14.73	14.90	16.80	19.40	17.60
48	15.37	15.17	16.70	19.53	18.10
49	14.73	15.60	16.30	19.97	18.77
50	13.93	16.23	16.83	20.57	18.57
51	14.10	14.50	16.20	19.40	20.10
52	12.50	15.63	15.80	19.03	19.47
53	13.37	15.17	15.37	18.33	17.90
54	14.23	12.63	15.00	16.00	17.47

HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
55	18.67	14.47	13.63	16.97	16.70
56	14.17	10.60	11.40	13.13	15.17
57	13.33	14.50	13.07	17.73	14.10
58	12.70	14.53	14.30	17.57	13.70
59	12.17	12.37	13.80	17.23	16.83
60	10.87	13.60	14.53	17.47	12.43



- ค่าเฉลี่ยปริมาตรก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก

Average ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ml)					
HRT	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4	AVG 2:1	AVG 4:1
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	795.33	664.00	400.00	872.00	488.00
2	540.00	115.33	34.33	411.33	598.33
3	564.67	122.00	19.67	440.00	534.00
4	520.00	113.33	8.00	387.33	376.00
5	732.00	316.67	276.67	591.33	768.67
6	787.33	353.33	264.67	641.33	778.00
7	763.33	433.33	260.00	643.33	806.67
8	528.67	105.33	81.33	362.67	444.00
9	584.33	268.00	270.00	580.00	816.67
10	748.67	345.33	236.67	562.00	839.33
11	766.00	357.33	241.33	544.00	702.67
12	748.00	364.67	259.33	572.67	775.33
13	762.67	330.67	216.00	566.67	770.67
14	708.00	304.00	235.33	513.33	744.00
15	712.00	304.00	224.00	537.00	726.67
16	685.33	317.33	200.00	468.00	685.33
17	673.00	318.00	213.33	472.67	666.67
18	705.33	337.33	216.67	460.00	623.33
19	657.33	294.67	223.33	467.33	632.67
20	673.33	298.00	234.67	460.00	594.67
21	618.00	226.00	233.33	423.33	426.67
22	764.67	292.00	228.00	489.33	558.67
23	446.67	242.00	235.33	587.33	490.00
24	438.67	236.67	245.33	499.33	577.33
25	398.00	247.33	234.67	586.00	576.00

HRT	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4	AVG 2:1	AVG 4:1
26	326.00	252.00	224.00	631.33	613.33
27	270.67	284.67	241.33	634.67	636.00
28	270.00	318.00	210.00	666.00	601.33
29	242.67	306.67	218.00	650.67	582.67
30	246.67	300.00	214.67	666.67	603.33
31	263.33	303.33	203.33	643.33	603.33
32	311.33	280.00	196.67	635.33	596.67
33	338.67	218.67	200.00	543.33	576.67
34	316.67	203.33	200.00	503.33	603.33
35	371.33	208.67	204.67	444.67	603.33
36	343.33	209.33	204.67	387.33	563.33
37	292.67	201.33	203.33	324.67	550.00
38	250.00	188.00	200.00	310.67	563.33
39	274.67	186.67	198.67	295.33	523.33
40	297.33	178.00	204.00	298.00	486.67
41	306.00	174.67	192.00	312.00	436.67
42	323.33	177.33	196.67	300.67	402.00
43	320.00	180.00	200.00	298.00	366.67
44	224.67	181.33	192.67	312.00	354.00
45	226.67	182.67	199.33	316.00	358.67
46	225.33	268.67	200.67	316.67	360.00
47	218.67	169.33	187.33	267.33	353.33
48	220.67	168.67	184.00	238.00	330.00
49	222.00	166.67	186.67	217.33	296.67
50	222.67	164.67	183.33	222.67	262.00
51	226.00	172.67	172.00	211.33	252.67
52	226.67	180.67	191.33	224.00	247.33
53	216.00	190.00	192.67	226.67	214.33
54	212.00	176.00	189.33	222.00	242.00

HRT	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4	AVG 2:1	AVG 4:1
55	208.67	188.67	182.00	215.33	248.00
56	194.67	158.67	186.00	206.67	216.00
57	203.33	157.33	192.67	199.33	204.00
58	201.33	164.00	188.67	204.00	230.67
59	205.33	166.00	184.00	208.00	222.67
60	202.00	166.00	188.00	200.67	226.67
NET.	25,342.67	14,499.33	12,204.67	25,692.33	30,531.33



- ค่าเฉลี่ยปริมาตรก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก

Average ปริมาตรก๊าซมีเทน(ml)					
HRT	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4	AVG 2:1	AVG 4:1
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	41.77	42.60	73.38	19.67	3.27
2	47.22	6.98	0.95	14.78	13.36
3	69.77	7.84	0.01	33.02	32.88
4	105.56	7.04	0.01	45.12	55.91
5	224.76	102.13	101.57	148.31	153.83
6	286.85	128.19	115.91	209.57	193.98
7	319.59	183.38	118.05	255.38	249.78
8	221.94	15.74	35.79	101.17	148.09
9	249.24	140.11	127.17	291.95	367.85
10	411.25	192.82	108.72	309.22	418.64
11	450.90	214.35	109.89	319.39	375.31
12	452.90	223.99	103.97	361.51	438.08
13	463.53	209.11	83.00	359.92	465.08
14	463.23	197.97	92.27	351.72	470.13
15	478.90	200.34	84.65	377.70	472.38
16	463.33	208.21	67.98	332.91	457.32
17	466.34	212.54	72.04	339.32	452.58
18	501.60	226.66	70.43	331.66	430.70
19	462.60	191.76	74.13	338.55	437.89
20	480.56	185.80	68.28	323.46	417.25
21	444.84	130.30	64.99	298.26	299.68
22	551.44	174.07	63.18	407.55	395.34
23	320.84	139.40	61.97	425.22	348.21
24	314.00	131.54	60.83	359.84	411.78
25	281.85	132.84	55.08	423.90	412.68

HRT	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4	AVG 2:1	AVG 4:1
26	228.36	131.63	48.50	459.45	441.44
27	182.71	154.79	47.12	462.07	458.99
28	177.11	170.22	38.91	486.42	434.41
29	157.16	165.12	38.87	474.86	422.39
30	154.16	158.91	34.82	481.97	439.30
31	163.20	162.93	30.89	464.49	438.72
32	195.68	149.06	28.21	457.38	436.26
33	213.64	106.99	30.16	391.40	423.68
34	198.62	97.69	25.65	355.90	443.47
35	233.14	91.43	25.38	310.02	436.75
36	215.08	90.44	24.17	266.24	415.72
37	178.75	81.82	22.23	214.90	406.31
38	146.86	77.92	20.59	202.25	414.83
39	157.26	66.32	19.07	189.15	384.16
40	170.44	57.53	22.58	188.23	354.37
41	176.57	68.01	15.48	197.17	313.07
42	187.59	67.81	13.91	190.24	291.02
43	185.60	54.79	12.19	185.10	263.63
44	119.18	49.13	11.83	186.98	251.05
45	107.18	53.05	10.40	187.54	251.75
46	102.02	75.64	13.03	185.42	251.74
47	93.21	41.87	10.85	149.07	244.18
48	90.20	44.47	9.67	123.45	226.41
49	87.22	45.43	8.67	104.97	201.61
50	82.48	33.81	10.90	102.37	177.36
51	83.49	43.72	8.50	93.14	168.39
52	72.59	42.99	8.77	89.08	157.43
53	66.99	39.00	8.19	88.52	136.17
54	66.14	32.79	9.87	88.72	147.60

HRT	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4	AVG 2:1	AVG 4:1
55	64.23	39.90	8.57	85.70	155.43
56	55.05	33.12	7.78	79.94	130.20
57	56.97	32.85	9.80	73.92	117.53
58	50.09	18.17	7.12	63.73	120.32
59	50.10	22.72	6.36	67.94	112.91
60	49.84	27.42	7.79	68.74	122.29
NET.	13,193.71	6,235.26	2,471.09	14,595.60	18,112.89



- ค่าเฉลี่ยปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก

Average %มีเทน					
HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	3.83	9.47	16.27	31.37	31.80
2	4.77	9.63	21.00	25.43	33.23
3	6.73	15.23	22.37	29.07	29.93
4	7.50	19.30	30.97	27.70	37.90
5	7.00	23.07	34.33	26.97	37.83
6	13.93	25.67	36.10	27.23	38.17
7	14.97	29.13	36.97	38.10	31.10
8	16.47	29.13	36.00	21.17	36.47
9	17.80	29.90	38.07	29.23	37.33
10	20.23	30.90	38.20	35.27	37.40
11	22.00	32.47	38.77	35.63	31.50
12	24.27	34.73	39.10	35.63	33.90
13	22.90	37.20	39.63	35.87	30.30
14	23.03	42.90	39.90	38.43	28.10
15	21.23	44.63	40.53	39.17	27.90
16	27.20	46.63	41.73	43.30	30.40
17	23.57	32.60	42.50	38.23	19.90
18	26.27	43.43	43.80	41.57	26.43
19	25.63	36.90	44.93	32.90	28.13
20	29.60	55.50	47.07	49.97	30.17
21	33.43	63.37	49.07	48.77	32.63
22	35.83	63.27	52.47	44.97	33.60
23	26.80	51.67	53.67	54.00	21.53
24	36.13	46.20	56.33	53.03	38.93
25	44.30	66.87	61.43	46.37	40.07

HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
26	42.30	69.07	59.73	48.83	39.60
27	37.77	44.20	67.87	50.23	41.00
28	50.87	48.80	67.77	52.13	45.87
29	52.60	56.27	66.83	57.10	42.37
30	52.37	60.10	66.87	59.27	46.80
31	52.83	57.57	70.57	55.37	47.77
32	54.40	61.50	73.20	54.40	51.27
33	57.77	46.93	58.97	51.20	53.10
34	59.77	52.10	67.00	54.63	49.77
35	55.37	53.27	65.67	52.37	43.13
36	52.93	55.23	69.00	54.03	36.40
37	58.33	47.70	64.63	44.30	41.70
38	50.87	51.17	64.50	49.17	39.57
39	59.67	41.30	64.80	46.83	40.37
40	59.53	44.03	61.57	40.07	36.40
41	61.90	41.60	59.00	38.30	41.37
42	61.80	41.87	56.43	38.57	40.63
43	63.70	42.13	56.83	40.23	40.23
44	66.27	38.57	56.70	36.33	34.07
45	61.13	39.80	53.50	36.47	33.47
46	49.40	35.90	52.10	34.33	30.70
47	56.63	34.63	48.73	34.10	29.37
48	59.90	33.93	47.53	34.13	31.13
49	61.77	33.97	46.67	33.23	30.87
50	65.27	33.90	45.77	33.27	33.10
51	57.97	28.00	43.30	31.77	35.47
52	58.30	32.37	41.87	30.13	33.27
53	61.27	31.27	40.43	27.67	31.03
54	66.10	19.50	37.43	21.43	29.37

HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
55	64.73	26.33	32.90	23.97	32.63
56	60.30	22.63	27.43	19.50	31.57
57	58.43	26.23	40.47	23.90	26.20
58	53.20	25.80	32.53	22.87	29.10
59	55.70	16.53	30.97	21.37	28.00
60	53.70	23.27	30.97	21.63	23.70



- ค่าเฉลี่ยปริมาณร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก

Average %คาร์บอน					
HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	80.00	78.63	73.50	30.90	40.27
2	84.03	74.43	68.00	27.87	37.97
3	79.67	80.10	55.70	26.03	37.27
4	57.80	46.57	60.10	34.50	35.03
5	55.57	68.83	56.53	33.97	33.07
6	54.20	66.20	55.33	33.43	31.93
7	51.37	62.27	53.33	26.17	30.67
8	52.73	58.93	49.47	25.63	29.67
9	51.57	59.50	51.23	33.33	28.67
10	51.33	58.90	49.63	35.43	29.43
11	48.73	57.30	51.13	36.00	28.70
12	44.80	53.60	47.90	33.77	27.43
13	44.50	49.93	48.23	32.83	27.00
14	43.43	40.43	47.47	34.03	27.00
15	38.17	39.40	47.17	34.13	27.93
16	39.67	34.00	45.50	21.00	25.90
17	29.60	17.53	46.03	32.10	19.23
18	27.90	17.60	44.57	31.67	19.27
19	22.07	13.60	41.67	27.80	16.27
20	36.93	16.07	41.33	30.00	21.90
21	33.27	17.17	38.87	27.70	26.50
22	31.83	11.43	37.73	21.07	27.23
23	23.83	14.23	35.70	26.87	18.87
24	25.47	12.90	33.27	25.50	26.13
25	30.03	15.47	33.83	23.87	26.80

HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
26	24.33	16.70	30.73	22.93	22.03
27	17.70	12.67	28.90	22.33	19.77
28	26.77	12.33	26.67	19.93	23.23
29	23.00	12.97	21.43	21.17	26.00
30	23.07	13.80	22.95	21.63	26.10
31	19.40	14.00	22.73	21.20	32.67
32	21.60	14.90	22.73	20.00	34.97
33	20.37	13.10	19.43	20.10	22.87
34	23.30	13.23	19.10	19.77	23.91
35	19.57	14.47	18.80	20.20	24.70
36	18.60	15.17	19.73	22.23	15.63
37	19.83	14.10	18.00	19.37	26.13
38	13.60	15.70	18.20	21.67	17.90
39	16.87	13.63	17.90	20.30	17.50
40	16.83	14.43	18.00	19.10	18.60
41	16.13	14.33	17.17	19.33	20.70
42	17.80	14.17	17.07	19.37	20.27
43	16.57	15.30	17.70	21.03	23.00
44	18.97	14.67	17.93	18.97	18.83
45	14.55	15.37	17.43	19.27	15.20
46	14.10	15.07	17.67	19.00	17.73
47	14.73	14.90	16.80	19.40	17.60
48	15.37	15.17	16.70	19.53	18.10
49	14.73	15.60	16.30	19.97	18.77
50	13.93	16.23	16.83	20.57	18.57
51	14.10	14.50	16.20	19.40	20.10
52	12.50	15.63	15.80	19.03	19.47
53	13.37	15.17	15.37	18.33	17.90
54	14.23	12.63	15.00	16.00	17.47

HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
55	18.67	14.47	13.63	16.97	16.70
56	14.17	10.60	11.40	13.13	15.17
57	13.33	14.50	13.07	17.73	14.10
58	12.70	14.53	14.30	17.57	13.70
59	12.17	12.37	13.80	17.23	16.83
60	10.87	13.60	14.53	17.47	12.43



- ค่าเฉลี่ยปริมาตรก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก

Average ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ml)					
HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	726.67	553.33	830.00	613.33	543.33
2	913.33	535.33	756.00	460.67	472.67
3	700.00	585.33	668.67	441.33	396.67
4	580.00	596.67	684.67	430.67	411.33
5	440.00	496.67	550.00	408.00	344.67
6	460.00	619.33	576.67	382.00	313.33
7	530.00	498.67	650.00	378.67	296.67
8	490.00	398.67	453.33	308.67	283.33
9	510.00	454.00	457.33	322.00	263.33
10	523.33	506.67	457.33	312.00	273.33
11	476.67	495.33	396.00	281.33	252.33
12	440.00	564.00	387.33	268.67	276.67
13	427.33	557.33	414.00	256.67	232.67
14	393.33	532.00	500.00	249.33	225.33
15	367.33	428.67	608.67	322.67	267.33
16	326.67	464.00	493.33	322.00	273.33
17	396.67	463.33	564.00	385.33	310.00
18	386.67	526.00	535.33	344.67	270.00
19	493.33	543.33	632.67	424.67	346.67
20	463.33	526.67	600.00	474.67	322.67
21	486.67	396.67	635.33	482.00	326.67
22	500.00	395.33	628.67	503.33	334.00
23	510.00	375.33	614.67	490.00	350.00
24	573.33	366.67	636.67	502.67	473.33
25	576.67	366.67	630.00	506.00	456.67

HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
26	563.33	300.00	623.33	540.00	450.00
27	520.00	293.33	613.33	473.33	423.33
28	573.33	315.33	643.33	490.00	466.67
29	510.00	326.67	510.00	503.33	456.67
30	590.00	343.33	486.67	520.00	486.67
31	576.67	336.67	456.67	440.00	553.33
32	583.33	354.67	406.67	440.00	570.00
33	600.00	252.67	393.33	340.00	416.67
34	563.33	271.33	390.00	356.67	403.33
35	540.00	260.00	336.67	370.00	406.67
36	560.00	261.33	296.67	416.67	433.33
37	526.67	263.33	286.67	308.67	340.00
38	586.67	243.33	276.67	293.33	353.33
39	500.00	257.33	270.00	258.67	266.67
40	566.67	268.00	272.67	253.33	253.33
41	530.00	269.33	339.33	248.67	256.67
42	563.33	280.00	303.33	260.00	266.67
43	553.33	290.67	292.00	288.67	306.67
44	516.67	258.00	263.33	245.33	210.00
45	476.67	256.67	269.33	263.33	246.67
46	483.33	288.00	262.00	256.67	236.67
47	466.67	286.00	253.33	261.33	238.67
48	446.67	273.33	250.00	260.00	233.33
49	432.00	293.33	250.00	261.33	233.33
50	436.00	315.33	276.00	302.00	256.67
51	436.67	278.67	267.33	274.67	270.00
52	406.67	287.33	271.33	274.67	270.00
53	453.33	278.67	270.00	263.33	206.67
54	373.33	276.67	258.00	256.67	230.00

HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
55	343.33	294.00	239.33	238.00	243.33
56	356.67	284.00	248.67	252.67	263.33
57	393.33	270.00	272.67	243.33	263.33
58	536.67	266.67	258.67	242.00	260.00
59	480.00	243.33	257.33	240.00	256.67
60	423.33	263.33	276.67	244.67	240.00
NET.	30,159.33	22,246.67	26,002.00	21,052.67	19,585.00



- ค่าเฉลี่ยปริมาตรก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก

Average ปริมาตรก๊าซมีเทน(ml)					
HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	27.15	55.68	134.58	202.07	166.70
2	42.65	54.89	154.66	132.27	155.09
3	44.16	88.52	140.60	129.20	116.81
4	47.41	115.58	205.74	129.12	155.67
5	30.73	111.07	184.26	116.60	128.26
6	67.97	158.63	202.43	111.57	117.50
7	86.45	142.25	232.78	152.72	90.78
8	86.06	115.35	157.69	68.73	101.64
9	99.45	133.08	170.17	97.79	98.18
10	115.45	155.11	171.42	113.41	102.60
11	112.55	158.47	150.82	101.34	76.56
12	110.29	192.31	149.18	95.82	93.40
13	101.05	203.37	161.61	90.97	69.39
14	93.73	223.94	194.69	95.32	62.12
15	78.94	196.11	239.59	127.89	71.90
16	86.75	223.76	199.88	142.25	80.02
17	93.85	166.89	232.47	153.66	62.31
18	100.85	269.07	226.52	147.52	69.13
19	137.98	222.27	277.16	144.28	99.35
20	147.68	315.93	272.11	241.20	96.12
21	173.87	258.90	297.91	243.02	110.64
22	191.53	258.16	313.68	238.21	116.92
23	147.46	201.61	315.42	262.87	75.97
24	231.77	175.82	344.87	275.11	195.62
25	285.82	252.10	374.16	245.69	195.51

HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
26	259.60	208.77	354.03	286.81	188.37
27	208.76	130.15	411.80	255.59	179.64
28	331.32	157.81	434.22	272.13	232.57
29	293.08	184.51	341.10	302.33	215.02
30	342.90	205.43	323.95	323.23	243.16
31	336.90	195.22	323.18	264.07	286.69
32	347.38	222.86	297.14	263.67	319.97
33	376.14	114.90	231.55	184.73	227.40
34	364.84	136.92	273.72	207.30	205.02
35	327.18	131.06	221.93	210.99	181.35
36	315.82	135.49	204.89	248.10	164.15
37	335.11	115.26	182.85	142.06	142.07
38	320.59	113.10	175.47	145.72	143.62
39	327.04	92.87	170.26	115.41	104.32
40	367.55	106.47	161.96	96.38	89.24
41	346.49	100.90	203.73	87.91	105.51
42	363.92	107.04	168.23	94.11	107.88
43	367.30	114.05	158.04	113.61	124.31
44	352.24	85.55	136.73	80.55	73.53
45	312.88	99.63	131.11	88.17	84.58
46	249.06	91.86	122.45	79.33	73.26
47	279.89	88.81	107.85	80.62	70.43
48	280.85	83.93	104.11	79.96	72.52
49	278.49	94.29	102.09	77.84	72.07
50	293.47	102.48	111.71	96.88	84.95
51	266.14	66.59	101.18	77.83	95.19
52	244.02	78.56	98.85	71.35	89.49
53	293.04	77.37	93.99	61.24	65.06
54	249.72	45.85	80.92	42.70	68.26

HRT	AVG 4:1	AVG 2:1	AVG 1:1	AVG 1:2	AVG 1:4
55	224.09	68.85	65.44	44.46	79.72
56	215.45	55.49	51.65	37.12	84.15
57	240.27	66.57	100.00	48.46	69.62
58	297.09	64.00	72.42	44.63	76.67
59	285.21	35.32	67.47	40.51	73.35
60	241.64	59.29	76.09	43.56	58.56
NET.	13,277.07	8,286.09	11,766.50	8,568.02	7,259.92



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เจษฎาพร กิจเจตน์
วัน เดือน ปี เกิด	12 เมษายน 2537
สถานที่เกิด	พระนครศรีอยุธยา
วุฒิการศึกษา	ปริญญาเทคโนโลยีบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 สาขาธุรกิจวิศวกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร 2558
ที่อยู่ปัจจุบัน	27/2 ม.2 ต.บ้านหลวง อ.เสนา จ.พระนครศรีอยุธยา 13110

