



การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วม
ของสาหร่ายคอลเรลล่าและหญ้าเนเปียร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วม
ของสาหร่ายคอลเรลล่าและหญ้าเนเปียร์

วิชุดา พุ่มพวง

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

๗๑

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี)

วันที่ 24 เดือน ก.ค. พ.ศ. 60

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

๗๒

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธูปน ชื่นบาล)

วันที่ 24 เดือน ก.ค. พ.ศ. 60

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

๗๓

(อาจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร)

วันที่ 24 เดือน ก.ค. พ.ศ. 60

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร

๗๔

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่ 24 เดือน ก.ค. พ.ศ. 60

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

๗๕

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 29 เดือน ก.ค. พ.ศ. 60

ชื่อเรื่อง	การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมของสาหร่ายคอลเรลล่าและหญ้าเนเปียร์
ชื่อผู้เขียน	นางสาววิชุดา พุ่มพวง
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี

บทคัดย่อ

งานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่ 1 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และหญ้าเนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด ส่วนที่ 2 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และหญ้าเนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อนำสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด มาทดสอบหาช่วงอุณหภูมิที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน และส่วนที่ 3 เป็นการนำสัดส่วนและอุณหภูมิที่ได้นั้น มาทดสอบในถังหมักแบบ CSTR ขนาด 50 ลิตรเป็นแนวทางในการต่อยอดเพื่อนำไปใช้จริงในครัวเรือน

โดยในส่วนแรกนั้น สัดส่วนที่มีปริมาณของแข็งรวม 10 และ 15% ให้ประสิทธิภาพการทดลองที่ดีใกล้เคียงกันจึงทำการเลือกสัดส่วนของหญ้าเนเปียร์หมัก ต่อ สาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 10 และ 15% มาทดสอบหาช่วงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนมากที่สุดในส่วนที่ 2 ซึ่งพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 45 ± 2 องศาเซลเซียสนั้น ที่ปริมาณของแข็งรวม 15% TS มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุด 68.7% และมีประสิทธิภาพการกำจัด COD, TS และ VS เท่ากับ 83.46%, 84.01% และ 85.52% ตามลำดับในส่วนที่ 3 นำผลการทดลองในส่วนที่ 2 มาหมักอีกครั้งในถังแบบ CSTR ปริมาตรหมัก 45 ลิตร พบว่า ในระยะเวลาของการหมักร่วมทั้งสิ้น 42 วัน มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ เฉลี่ยอยู่ที่ 12 ลิตร/วัน และจากการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องมือ Gas Chromatography (GC) พบว่าอัตราส่วนของก๊าซมีเทนที่ได้นั้นมีค่า ร้อยละ 74.61 ของปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด จึงสรุปได้ว่าการใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* และหญ้าเนเปียร์หมัก เหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการหมักร่วมเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

Title	Enhancement of Biogas Production by Co - Digestion of <i>Chlorella sp.</i> and Napier grass
Author	Miss. Wichuda Pumpoung
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisor Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Natthawud Dussadee

ABSTRACT

This research is divided into 3 main parts: Part 1: Evaluation of biogas potential from *Chlorella sp.* and Napier grass at the laboratory scale. Part 2: Evaluating the potential of biogas from *Chlorella sp.* and Napier grass at the laboratory scale to determine the best proportion as well as to test the temperature optimizing the production of biogas and methane. Part 3: Use the ratio and temperature to test in a 50 liter continuous tank as a guideline for further use in the household.

In the first part, the ratio of 10% and 15%TS of Napier grass yielded similar good test results. Selection of the ratio of Napier grass to *Chlorella sp.* At% TS 10 and 15 was used to determine the temperature that affected the biogas and methane. It was found that at a temperature range of 45 ± 2 ° C at a 15%TS ratio of Napier grass fermented has the highest methane yield, 68.7% and COD, TS and VS removal efficiency was 83.46%, 84.01% and 85.52%, respectively. All experiments were repeated in a continuous stirring tank or 50 liters of CSTR. The total biogas content was 42 days. The average is 12 L/day. With gas samples were tested with gas chromatography, the gas ratio in the methane content was 74.61 percent of the total biogas content. Concluding that a relatively high proportion of methane. Occurred in the co-fermentation of *Chlorella sp.* And Napier grass.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ สติปัญญา กำลังกายและกำลังใจ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ พร้อมกับ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐปน ชื่นบาล และ อาจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้สละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาตลอดจนให้ความดูแลและเอาใจใส่เป็นอย่างดี จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจาก ทุนอุดหนุนในโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา และศูนย์วิจัยพลังงานมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ในการวิจัย และขอบคุณคุณรุ่งตะวัน ปันทะวงศ์ ที่คอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นขณะปฏิบัติการทดลองได้อย่างใกล้ชิดและเป็นกันเอง รวมไปถึง บิดา มารดา คณาจารย์ทุกท่าน และเพื่อนนักศึกษาร่วมชั้นปี วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด จึงขอขอบคุณ มา ณ ที่นี้

วิชุดา พุ่มพวง
กรกฎาคม 2560

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
สารบัญตารางผนวก	(12)
สารบัญภาพผนวก	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มา	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตการศึกษา	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
การตรวจเอกสาร	24
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	34
วัสดุ อุปกรณ์ และชุดทดสอบ	34
วิธีดำเนินงานวิจัย	39
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย	47
ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของหญ้าเนเปียร์และ สาหร่าย <i>Chlorella sp.</i>	47

ผลการวิเคราะห์การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเลี้ยง สาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> และหญ้าเนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม	52
ผลการวิเคราะห์การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเลี้ยง สาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> และหญ้าเนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสัดส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสม	62
ผลการวิเคราะห์การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเลี้ยง สาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> และหญ้าเนเปียร์ โดยใช้สัดส่วนและอุณหภูมิที่ เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า มาทดสอบในถังหมัก แบบต่อเนื่องขนาด 50 ลิตร	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	79
การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของ สาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> และหญ้าเนเปียร์	79
ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การเพาะเลี้ยงสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i>	90
ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบและวิธีการวัด องค์ประกอบก๊าซ	101
ภาคผนวก ค การคำนวณ	112
ภาคผนวก ง Reactor แบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร	115
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซจากเครื่อง Gas Chromatography	124
ภาคผนวก ฉ ประวัติผู้วิจัย	126

สารบัญตาราง

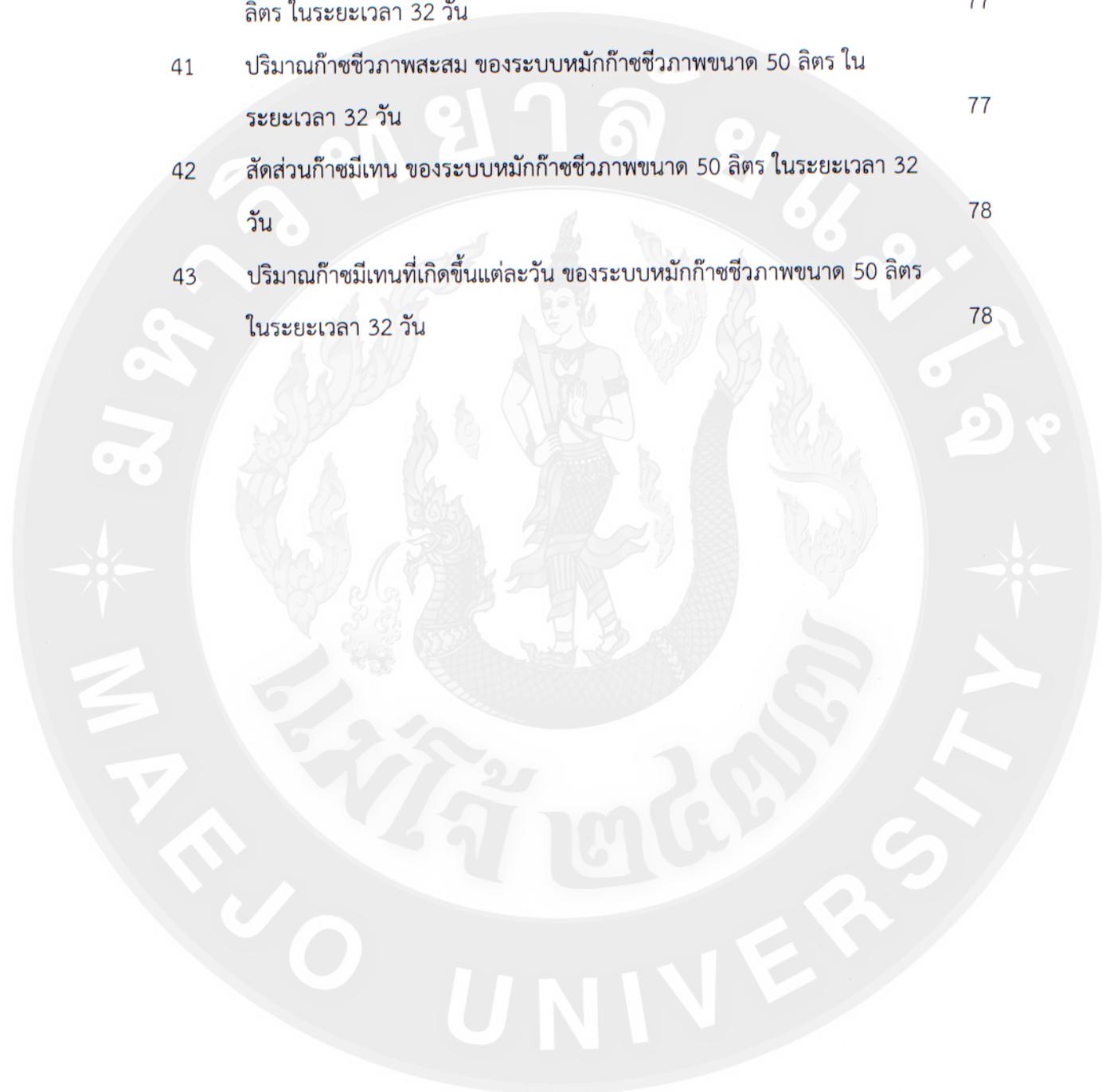
ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	5
2	คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ	5
3	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของหญ้าเนเปียร์	19
4	กรดไขมันที่มีในสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i>	21
5	สารอาหารที่เป็นประโยชน์ในสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i>	21
6	แสดงปริมาณก๊าซต่างๆที่ลดลงจากความเข้มแสงที่ต่างกัน	29
7	พารามิเตอร์ที่ทดสอบและการเก็บข้อมูล	37
8	ชุดการทดลอง	44
9	องค์ประกอบธาตุและปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของหญ้าเนเปียร์	48
10	องค์ประกอบธาตุและปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i>	49
11	ผลการวิเคราะห์แบบ Proximate analysis และพารามิเตอร์อื่นๆของหญ้าเนเปียร์และสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i>	51
12	คุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบ	52
13	สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการหมัก เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม	54
14	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการหมักร่วมเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม ก่อน - หลังเดินระบบ	55
15	ช่วงอุณหภูมิ และสัดส่วนการหมัก	62
16	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการหมักร่วมเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม ก่อน - หลังเดินระบบ	64
17	ประสิทธิภาพการกำจัด TS, VS และ COD หลังการทดลอง 23 วัน	65
18	สัดส่วนของการหมักร่วมระหว่างสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> และหญ้าเนเปียร์ 15%TS	71
19	พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างทุกๆ 3 วัน	71
20	ปริมาณก๊าซและองค์ประกอบของก๊าซ	75

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ	8
2	บ่อปิด	13
3	บ่อโตมคกที่	14
4	บ่อหมักเร็วน้ำชั้น	15
5	ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น	15
6	ถังปฏิกรณ์แบบตรึงเซลล์บนผิววัสดุตัวกลาง	16
7	ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบผสมกวน	17
8	แสดงสายพันธุ์หญ้าเนเปียร์ที่นิยมปลูก	18
9	แสดงลักษณะเซลล์ของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> กำลังขยาย 10^5 เท่า	20
10	แสดงกระบวนการเกิดก๊าซมีเทนระหว่างระบบที่มีสาหร่ายและไม่มีสาหร่าย	26
11	แสดงพลังงานสุทธิจากกระบวนการเกิดก๊าซมีเทนระหว่างระบบที่มีสาหร่ายและไม่มีสาหร่าย	27
12	แสดงระบบการเพิ่มเพิ่มประสิทธิภาพก๊าซชีวภาพด้วยสาหร่ายและความเข้มแสงต่างๆ จากหลอดฟลูออโรเรสเซนต์	28
13	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากสาหร่าย ที่ผลิตในช่วงเวลาในการหมักในถังปฏิกรณ์แบบ Batch	30
14	แสดงปริมาณก๊าซสะสมในเวลา 36 วัน	31
15	แสดงปริมาณก๊าซมีเทนในเวลา 36 วัน	31
16	แบบจำลองชุดทดสอบ BMP	35
17	ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร	36
18	กรอบความคิดของงานวิจัย	38
19	วัสดุอุปกรณ์ของชุดการทดลอง	42
20	การต่อชุดอุปกรณ์เก็บก๊าซเข้ากับขวดหมัก และการพันด้วยพาราฟิล์มเพื่อป้องกันอากาศเข้า - ออก	43
21	แสดงภาพเซลล์สาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ที่ส่องได้จากกล้องจุลทรรศน์	50
22	ถังหมักก๊าซชีวภาพและระบบกักเก็บก๊าซในระดับห้องปฏิบัติการ	54

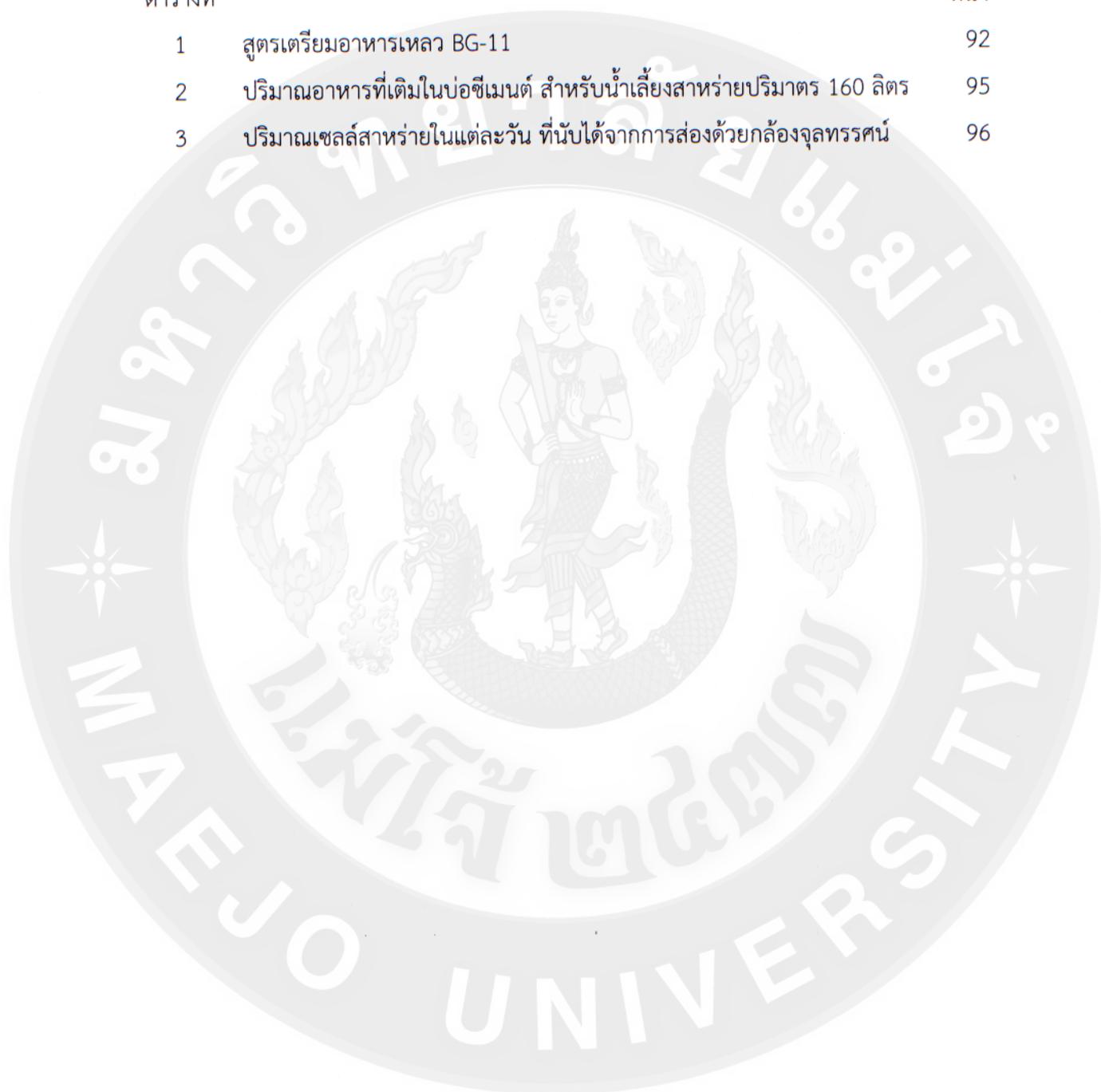
ภาพที่	หน้า	
23	ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบหมักก๊าซชีวภาพ	57
24	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ของระบบหมักก๊าซชีวภาพ	58
25	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ของระบบหมักก๊าซชีวภาพ	59
26	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นในระบบหมักก๊าซชีวภาพ ระยะเวลากการทดลอง 21 วัน	60
27	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นในระบบหมักก๊าซชีวภาพ ระยะการทดลอง 21 วัน	60
28	การติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิในระบบหมักก๊าซชีวภาพ ขนาด 2 ลิตร	63
29	ชุดถังหมักก๊าซชีวภาพและระบบกักเก็บก๊าซในระดับห้องปฏิบัติการ	63
30	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตรในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	65
31	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่ายในระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตรในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	66
32	ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณ COD ในระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตรในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	67
33	ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	68
34	การผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเกิดขึ้นในระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	68
35	สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	69
36	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	69
37	ถังหมักแบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร	72
38	ปริมาณ COD ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 45 ลิตร	73
39	การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในระยะเวลา 32 วัน	76

ภาพที่		หน้า
40	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในระยะเวลา 32 วัน	77
41	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในระยะเวลา 32 วัน	77
42	สัดส่วนก๊าซมีเทน ของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในระยะเวลา 32 วัน	78
43	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแต่ละวัน ของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในระยะเวลา 32 วัน	78



สารบัญตารางผนวก

ตารางที่		หน้า
1	สูตรเตรียมอาหารเหลว BG-11	92
2	ปริมาณอาหารที่เติมในบ่อซีเมนต์ สำหรับน้ำเลี้ยงสาหร่ายปริมาณ 160 ลิตร	95
3	ปริมาณเซลล์สาหร่ายในแต่ละวัน ที่นับได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์	96



สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวกที่		หน้า
1	หัวเชื้อสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ในขวดแก้วปิดสนิท ขนาด 15 มิลลิตร	91
2	รูปร่างเซลล์ของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์	91
3	การถ่ายหัวเชื้อสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ลงใน Flask ขนาด 250 มิลลิตร	93
4	การนับเซลล์ของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i>	93
5	สาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ปริมาตร 20 ลิตร ในโหลแก้วที่มีการเติมอากาศ	94
6	แสดงสีของน้ำเลี้ยงสาหร่ายที่เปลี่ยนแปลงไป ใน 2 สัปดาห์	95
7	การเจริญเติบโตของสาหร่าย	99
8	ปริมาณเซลล์ของสาหร่าย <i>Chlorella sp.</i> ในแต่ละวัน	100
9	หน้าตาของการคำนวณองค์ประกอบก๊าซในโปรแกรม Microsoft Excel	113
10	ระบบถังหมักก๊าซชีวภาพ	116
11	ถังหมักก๊าซชีวภาพ	117
12	ฝาครอบถังหมัก	118
13	ใบกวนและสกรูลำเลียง	119
14	ถังเก็บก๊าซชั้นนอก	120
15	ถังเก็บก๊าซชั้นใน	121
16	โครงถังเก็บก๊าซ	122
17	ถังเก็บตัวอย่างก๊าซ	123
18	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ	125

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญ ทั้งทางด้านปัจจัยพื้นฐานการผลิต ในภาคธุรกิจ และอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการขับเคลื่อนทางด้านเศรษฐกิจ และยังมีส่งผลต่อการพัฒนาของประเทศ จึงมีการให้ความสำคัญในการจัดการพลังงานมากยิ่งขึ้น เพื่อให้มีพลังงานเพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง พลังงานจากแหล่งอื่น ๆ นั้น มีปริมาณน้อย จึงนำไปสู่การคิดค้นที่จะนำพลังงานจากแหล่งอื่น ๆ มาใช้ น้ำมันถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญ ซึ่งได้จากแหล่งพลังงานจากใต้พิภพหรือพลังงานปิโตรเลียม แต่จากสถานการณ์ความไม่แน่นอนของราคาน้ำมันดิบที่เพิ่มสูงขึ้นอยู่ตลอดเวลา รวมทั้งปริมาณการผลิตที่ลดลง ส่งผลกระทบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ และพลังงานที่มีอยู่นั้นเป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด และผลกระทบที่ตามมาจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงคือ ปัญหาภาวะโลกร้อน เนื่องมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ และยังก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมตามมา ทำให้หลายๆประเทศเริ่มตระหนักถึงความต้องการในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และต้นตอที่จะหาเชื้อเพลิงในรูปแบบอื่นเพิ่มเติม หรือแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy) เพื่อใช้ทดแทนน้ำมัน และยังช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิงที่นำเข้ามาจากต่างประเทศได้อีกด้วย อาทิเช่น พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar Thermal Energy) พลังงานน้ำ (Water Energy) พลังงานลม (Wind Energy) พลังงานจากชีวมวล (Biomass Energy) โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานจากก๊าซชีวภาพ (Biogas Energy) เป็นพลังงานที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และในการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถลดการเกิดภาวะเรือนกระจกอันเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย (จิโตเลียมไทย, 2554)

ในปัจจุบัน หลายๆประเทศหันมาสนใจการผลิตพลังงานทดแทน โดยเฉพาะ การผลิตก๊าซชีวภาพ ถือเป็นพลังงานทางเลือก และถือได้ว่าเป็นเชื้อเพลิงสะอาด (Clean Fuel) ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ (Zero Emission) อีกทั้งยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (กระทรวงพลังงาน, 2555) ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันนั้น ฟาร์มสุกรสามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียที่เกิดขึ้นภายในฟาร์ม แต่คุณภาพและศักยภาพของการผลิตนั้นยังไม่เพียงพอ จึงมีการคิดค้นหาวัตถุดิบที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ผลิตก๊าซชีวภาพร่วมกัน โดยของเสียจากฟาร์มสุกรนั้นเป็นเพียงส่วนที่ใช้เสริมประสิทธิภาพด้านจุลินทรีย์เท่านั้นเอง วัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้หนึ่งในนั้นคือ “สาหร่าย” เพราะเป็นสิ่งมีชีวิตในไฟลัมคลอโรไฟตา ขยายพันธุ์ง่าย ได้ปริมาณมากและไม่เปลืองพื้นที่

การเพาะเลี้ยง มีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ สามารถใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักแบบไร้
 อากาศได้ (กิตติพล และคณะ, 2555) และพืชโตเร็วอีกหนึ่งชนิดที่ได้รับความสนใจอีกทั้งยังเป็นพืช
 พลังงานที่มีการเพาะปลูกอย่างกว้างขวางในเขตพื้นที่ภาคเหนือของประเทศ นั่นคือ หญ้าเนเปียร์ เป็น
 พืชพลังงานที่มีซึ่งมีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ โดยหญ้าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้
 ถึง 160-190 ลูกบาศก์เมตร/หญ้าสด 1 ตัน (สุริยา, 2552) และอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ (ศูนย์วิจัย
 พลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2555 : Lauris et al., 2005) โดยทั่วไปการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถทำ
 ได้โดยการหมักด้วยวัตถุดิบเพียงประเภทเดียว เช่น การใช้มูลสัตว์เป็นวัสดุหมัก แต่ปัจจุบันได้มีการ
 หมักร่วมกันระหว่างสองวัตถุดิบหรือมากกว่า ที่เรียกว่าการหมักร่วม ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพใน
 การผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้น โดยจะทำให้ได้ก๊าซชีวภาพในปริมาณที่มากขึ้นและได้ผลผลิตของก๊าซ
 มีเทนสูงขึ้น (รุ่งตะวัน, 2558)

งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้
 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) ด้วยระบบ
 การหมักร่วม (Co-fermentation) ของหญ้าเนเปียร์ร่วมกับสาหร่าย *Chlorella sp.* โดยทำการศึกษา
 อัตราส่วนของสาหร่ายต่อหญ้าเนเปียร์ และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพให้ได้
 ปริมาณมากและมีคุณภาพดีที่สุด โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab Scale) และทำการ
 ทดลองหมักร่วมโดยการขยายระบบหมัก เป็นระบบที่ใหญ่ขึ้นในถังหมักขนาด 50 ลิตร ในระบบการ
 หมักแบบต่อเนื่อง (Continuous) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดไปสู่กระบวนการผลิตที่ใหญ่
 ขึ้นในระดับครัวเรือนและในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการหมักก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ระบบการหมักแบบไร้อากาศ
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและหญ้าเนเปียร์ที่มีผลต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ
3. เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมระหว่างสาหร่ายและหญ้าเนเปียร์ที่มีผลต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ
4. เพื่อศึกษาปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนอย่างเหมาะสม
5. เพื่อศึกษาปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการหมักร่วมระหว่างสาหร่ายและหญ้าเนเปียร์

ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella sp.* ร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการหมักแบบแบทช์ ขนาด 2 ลิตร
2. ใช้ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน
3. คัดเลือกสัณฐาน และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ในระดับห้องปฏิบัติการ มาทำการหมักแบบ CSTR ในถังปฏิกรณ์ขนาด 50 ลิตร
4. ขั้นตอนการทดลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิ จะทำการควบคุมโดยใช้ฮีทเตอร์ทำความร้อนผ่านน้ำ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างระบบหมักระดับห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการหมักในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรม
2. เป็นการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
3. เพื่อส่งเสริมให้เกษตรกรหันมาปลูกพืชพลังงานกันมากขึ้น เป็นการสร้างอาชีพและเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร
4. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดไปสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใหญ่ขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

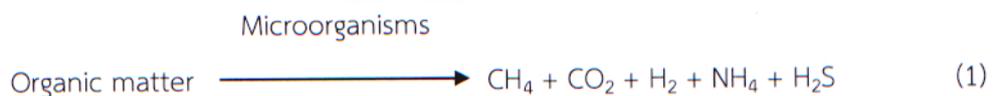
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการดำเนินงานวิจัยต่างๆ จะต้องมีการค้นคว้าทฤษฎี หลักการ และทำการศึกษาเอกสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เพื่อเป็นการนำข้อมูลเหล่านั้นมาเป็นพื้นฐาน และอ้างอิงความเป็นไปได้ ของงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยดำเนินไปในทางที่ถูกต้อง เหมาะสม นำไปสู่การวิเคราะห์ผล และการ นำเสนอผลอย่างถูกต้อง ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาทฤษฎี และการตรวจสอบเอกสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. ก๊าซชีวภาพ

1.1 หลักการของการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดย จุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน (Anaerobic Digestion) ด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียผลิตกรด (Acid Forming Bacteria) และแบคทีเรียผลิตมีเทน (Methane Forming Bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มี ขนาดเล็กลง จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กนั้นเป็นอาหาร ซึ่ง กระบวนการนี้จะเกิดก๊าซขึ้น ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) รองลงมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจน (N_2) ไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซอื่น ๆ เหล่านี้เป็นก๊าซองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ดัง สมการที่ (1) และตารางที่ 1 ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่มีองค์ประกอบมากที่สุด มีคุณสมบัติไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟได้ เบากว่าอากาศ แต่ที่มีกลิ่นเหม็นนั้นเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือ “ก๊าซไข่เน่า” ซึ่งเมื่อจุดไฟแล้ว กลิ่นเหม็นจะหมดไป (กระทรวงพลังงาน, 2555) ส่วนการเผาไหม้ของก๊าซชีวภาพนั้น จะสะอาดกว่าการใช้น้ำมันทั่วไป จึงปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่อากาศน้อย เป็นการ ลดภาวะปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ได้อีกทางหนึ่งด้วย (พีทีที เอนเนอร์ยี, 2557) โดยคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพจะแสดงดังตารางที่ 2



ตารางที่ 1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ชนิดของก๊าซ	ปริมาณ(%)
มีเทน (CH ₄)	50 – 70
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	30 – 50
อื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O ₂) ไนโตรเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์(H ₂ S) และไอน้ำ	เล็กน้อย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติ	ค่าคุณสมบัติ
ค่าความร้อน	ประมาณ 21 เมกกะจูล/ลูกบาศก์เมตร (ที่ปริมาณมีเทน 60 %)
ความเร็วเปลวไฟ	25 เซนติเมตร/วินาที
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิจุดติดไฟ	600 องศาเซลเซียส
ค่าความจุความร้อน	1.6 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร- องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	1.15 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2555)

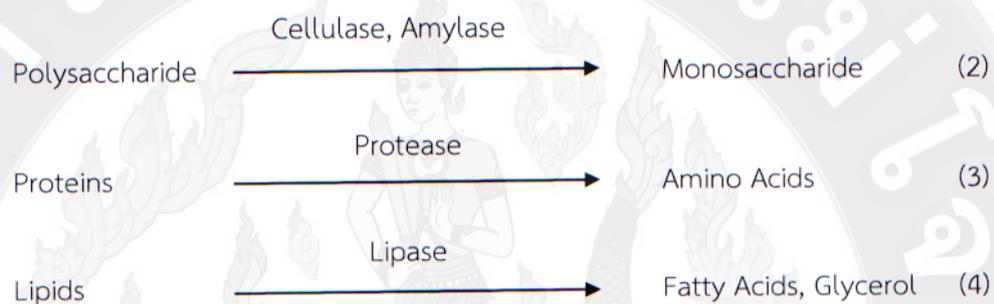
1.2 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ โดยผ่านการย่อยสลายของแบคทีเรียในระบบ ได้ผลผลิตเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)
- ขั้นตอนที่ 2. อะซิโดจีเนซิส (Acidogenesis)
- ขั้นตอนที่ 3. อะซิโดจีเนซิส (Acitogenesis)
- ขั้นตอนที่ 4. เมทาโนจีเนซิส (Methanogenesis)

1. ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้เล็กลงไปเป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน กรดไขมัน กลูโคส และกลีเซอรอล ดังสมการ (2) , (3) และ (4) โดยแบคทีเรียจำพวก Facultative Anaerobic Bacteria สำหรับสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของลิกนิน เช่น พืชต่างๆ จะเกิดการย่อยสลายได้ช้ากว่าสารอินทรีย์ที่ได้จากมูลสัตว์ นอกจากนี้ยังขึ้นกับปัจจัยอีกหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ เอนไซม์ อุณหภูมิ เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ,2546)

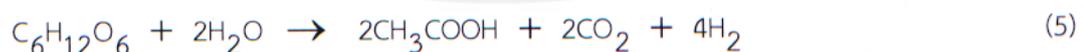


2. อะซิโดจีเนซิส (Acidogenesis)

ขั้นตอนนี้จะใช้ผลผลิตจากขั้นตอนแรกเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา แบคทีเรียในขั้นตอนนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนผลผลิตหรือสารอาหารจากขั้นตอนแรกให้เป็นกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (Acid Forming Bacteria) และเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในขั้นตอนนี้ด้วย แบคทีเรียสร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี แต่หากเกิดกรดมากเกินไปจะส่งผลให้แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนหยุดการเจริญเติบโต ส่งผลต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด

ชนิดของผลผลิตในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับสถานะความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจน แบ่งเป็น 2 สถานะคือ ในสถานะที่ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าต่ำ (Low Hydrogen Partial Pressure) ผลผลิตที่ได้คือ กรดอะซิติก , ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ และในสถานะที่ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าสูง (High Hydrogen Partial Pressure) ผลผลิตที่ได้คือ กรดโพรพอนิกส์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (5) และ (6) ต่อไปนี้

สถานะ Low Hydrogen Partial Pressure



สภาวะ High Hydrogen Partial Pressure



3. อะซิโตจีเนซิส (Acetogenesis)

ในขั้นตอนนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากที่แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ผลิตก๊าซมีเทนต้องการสารอาหารที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง ประกอบไปด้วย กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลลามีน เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของแบคทีเรียจำเป็นต้องย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านั้นให้มีอะตอมของคาร์บอนลดลงกลายเป็นกรดอะซิติก แบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria) เมื่อทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์แล้ว ผลผลิตที่ได้จะประกอบด้วย กรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นในสภาวะ Low Hydrogen Partial Pressure ดังสมการที่ (7) และ (8) ต่อไปนี้



นอกจากนี้ยังพบว่าแบคทีเรียบางกลุ่มที่สามารถสร้างกรดอะซิติกได้จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ (9)



4. เมทาโนจีเนซิส (Methanogenesis)

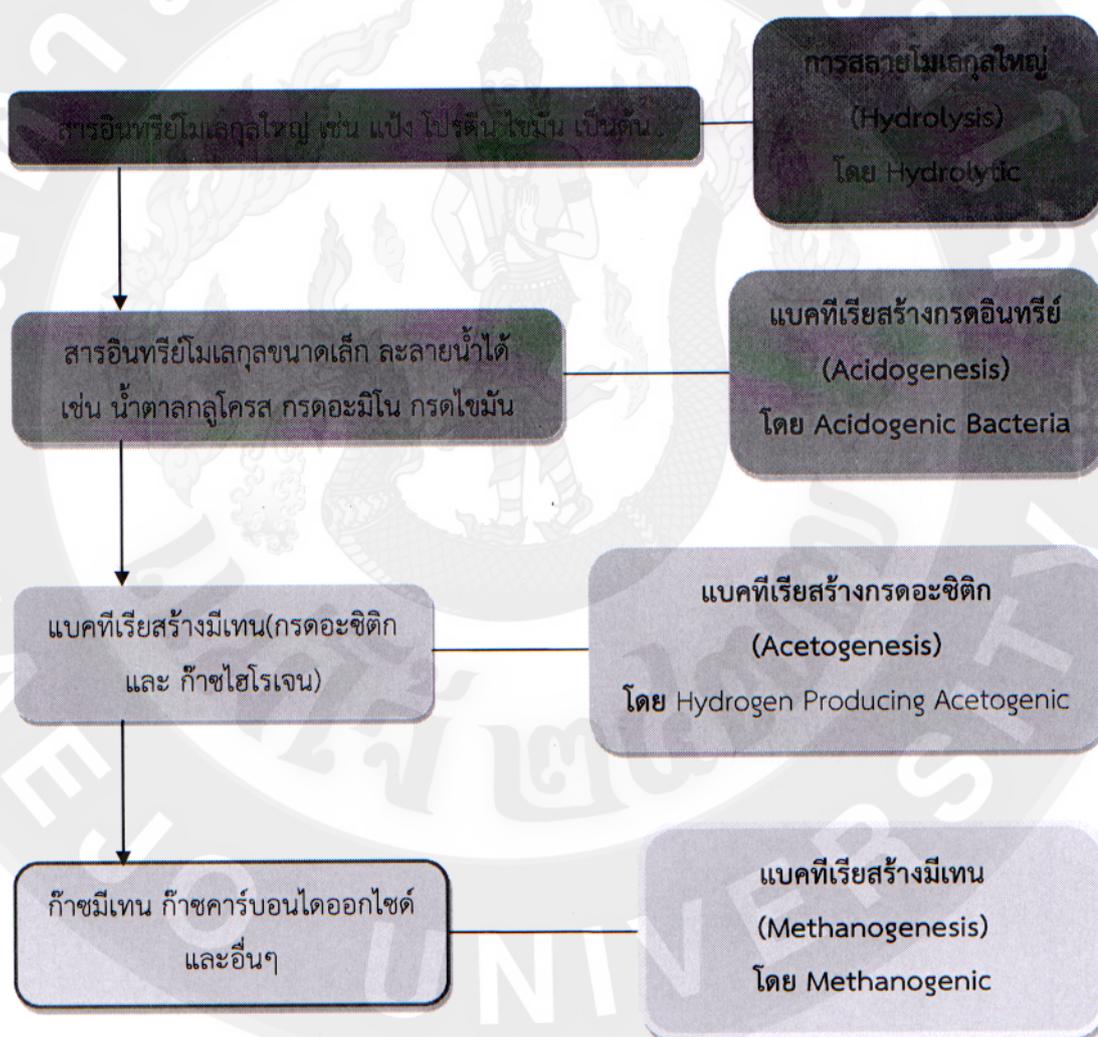
กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรด จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน (Methane Forming Bacteria)

ก๊าซมีเทนเกิดได้ 2 แบบ คือ แบบแรก เกิดจากการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งมีก๊าซมีเทนประมาณ 70% ของก๊าซมีเทนที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ และอีกแบบคือเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียประเภท Hydrogen - Utilizing Methane Bacteria ดังสมการที่ (10) และ (11) ดังต่อไปนี้





แบคทีเรียสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ช้าและสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก ช่วงความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจึงแคบ ประมาณ 6.5 – 7.5 กลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทนจึงเป็นกลุ่มแบคทีเรียหลักของการควบคุมความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดในระบบ เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้เติบโตช้า และมีข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อมมากกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่น โดยขั้นตอนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังภาพที่ 1 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557)



ภาพที่ 1 แสดงกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2557)

1.3 ปัจจัยและสภาพแวดล้อมต่างๆที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

เพื่อให้แบคทีเรียที่อยู่ในระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องรักษา สภาพแวดล้อมให้เป็นไปอย่างเหมาะสม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยใหญ่ๆ 2 ประการ คือ ปัจจัยทางด้าน สิ่งแวดล้อม และปัจจัยด้านการทำงาน

1. ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Factor)

1.1 อุณหภูมิในการเดินระบบ (Operating Temperature)

เมทานोजินไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่ต่ำมากหรือสูงมากได้ ถ้าหากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส แบคทีเรียจะหยุดทำงาน โดยช่วงอุณหภูมิแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ดังนี้

1.1.1 อุณหภูมิช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) ทำงานได้ดีคือประมาณ 30 – 40 องศาเซลเซียส แบคทีเรียที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า Mesophilic Bacteria

1.1.2 เทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่สูง ประมาณ 50 - 60 องศาเซลเซียส หรืออาจสูงขึ้นไปถึง 70 องศาเซลเซียส

แบคทีเรียเมโซฟิลิกนั้นมีจำนวนสปีชีส์มากกว่าเทอร์โมฟิลิก นอกจากนี้ยังสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าเทอร์โมฟิลิกอีกด้วย ทำให้ระบบหมักก๊าซชีวภาพที่ใช้ เมโซฟิลิกเสถียรกว่า แต่ขณะเดียวกันอุณหภูมิที่สูงกว่าในระบบที่ใช้เทอร์โมฟิลิกก็เป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซสูงกว่าแต่เสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบ ข้อเสียอีกข้อของระบบเทอร์โมฟิลิก คือการที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกมาเพิ่มความร้อนให้ระบบ อาจทำให้ได้พลังงานสุทธิที่ต่ำกว่า

1.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH Value)

ค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพคือระหว่าง 6.5 – 7.5 ค่า pH ในถังหมักขึ้นอยู่กับช่วงของการหมักด้วย เพราะในช่วงแรกแบคทีเรียที่สร้างกรดจะสร้างกรดเป็นจำนวนมากและทำให้ค่า pH ลดลง ซึ่งถ้าหาก pH ลดลงต่ำกว่า 5 ก็หยุดกระบวนการย่อยและหมักทั้งหมดหรืออีกนัยหนึ่งก็คือแบคทีเรียตาย Methanogen นั้นอ่อนไหวต่อความเป็นกรดต่างมาก และจะไม่เจริญเติบโตหาก pH ต่ำกว่า 6.5 ซึ่งส่งผลให้การทำงานของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว สามารถป้องกันได้โดยการเติมสารเคมีจำพวกต่างๆลงไปในระบบ เช่น ปูนขาว (CaO), โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) เป็นต้น หรืออาจจะลดปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบลง (Diaz et al., 1995) ในช่วงท้ายของกระบวนการ ความเข้มข้นของ NH₄ จะมากขึ้นตามการย่อยสลายไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้น อาจเกิน 8 จนกระทั่งระบบผลิตเริ่มมีความเสถียร

1.3. กรดไขมันระเหย

กรดไขมันระเหย เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทีริก กรดโพรพิโอนิก กรดฟอร์มิก เป็นต้น หากพบว่ามี การสะสมของกรดไขมันระเหยเหล่านี้ในระบบบ่อยมาก มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ ในช่วงแรกกรดไขมันเหล่านี้มีผลทำให้ค่าความเป็นด่างของระบบลดลง ต่อมาหากยังไม่มี การใช้หรือกำจัดกรดไขมันระเหยเหล่านี้ ออกให้มีปริมาณลดลง ค่าพีเอชของระบบจะยิ่งต่ำลง จะส่งผลโดยตรงต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน วิธีแก้ไขที่ดีที่สุดหากในระบบมีกรดไขมันในปริมาณมาก คือ หยุดป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ จนกระทั่งความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยเข้าสู่ระดับปกติ แล้วจึงป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบอีกครั้ง

1.4 สารอาหาร (Nutrient)

สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อการเจริญเติบโต นอกเหนือไปจากคาร์บอนและไฮโดรเจนแล้ว ยังมีไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โบตาสเซียม แคลเซียม นอกจากนี้ก็มีธาตุที่จำเป็นในปริมาณน้อยมากๆ เช่น เหล็ก แมงกานีส ลิบดินัม สังกะสี โคบอลต์ ซิลิเนียม ทังสเตน และนิกเกิล เป็นต้น แต่ขยะอินทรีย์โดยทั่วไปจะมีธาตุอาหารเหล่านี้ในระดับที่สมดุลพอเพียง เพราะฉะนั้น ในการหมักจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารใดๆ ลงไป

1.5 สารยับยั้งและสารพิษ (Inhibiting and Toxic Materials)

สารพิษ เช่น กรดไขมันระเหยได้ ไฮโดรเจน หรือแอมโมเนีย รวมถึงธาตุไอออน, สารพิษ, โลหะหนัก, สารทำความสะอาดต่างๆ เช่น สบู่ น้ำยาล้างต่างๆ และยาปฏิชีวนะ สามารถส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตและการผลิตก๊าซของแบคทีเรียได้ ธาตุไอออนในปริมาณน้อย (เช่น โซเดียม, โบตาสเซียม, แคลเซียม, แมกนีเซียม, ซัลเฟอร์, แอมโมเนีย) สามารถช่วยกระตุ้นการเติบโตของแบคทีเรียเช่นกัน แต่ถ้าหากปริมาณนั้นมากก็จะส่งผลเป็นพิษได้ ยกตัวอย่างเช่นแอมโมเนีย ในปริมาณ 50-200 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นผลดี ช่วยในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่เมื่อใดที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงกว่า 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็จะเริ่มส่งผลเสีย ในทางเดียวกัน โลหะหนักบางประเภท (เช่น ทองแดง, นิกเกิล, โครเมียม, สังกะสี, ตะกั่ว และอื่นๆ) ในปริมาณที่น้อยๆ ช่วยในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่เมื่อความเข้มข้นสูงก็จะเป็นพิษ

2. ปัจจัยทางด้านการดำเนินงาน (Operational Factor)

2.1 ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (Organic Loading Rate, OLR)

ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบคือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่เราเติมใส่ถังหมักในแต่ละวัน ซึ่งถ้าหากว่าปริมาณที่เราเติมนั้นมากเกินไป ก็จะส่งผลให้ค่า pH ลดลงมากเกินไป (เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการคือ acidogenesis กรดจะถูกผลิตขึ้นมา) จนทำให้ระบบล้มเหลวเนื่องจาก

methanogen ตายหมด ซึ่งหากสิ่งนี้เกิดขึ้นจริงก็จะต้องเริ่มต้นระบบใหม่หมด แต่ถ้าหากปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อยก๊าซที่ผลิตได้ก็จะน้อยตามไปด้วย เท่ากับว่าไม่ได้เดินระบบเต็มตามกำลังการผลิต ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่เกินไปโดยไม่จำเป็น

2.2 ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ (Hydraulic Retention Time, HRT)

ระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมักขึ้นอยู่กับปริมาณ และประเภทของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติที่ต่างกันไป รวมถึงรูปแบบของระบบถังหมัก หากระยะเวลาในการกักเก็บสั้นไปก็จะเป็นไม่พอสำหรับแบคทีเรียที่จะผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้แบคทีเรียยังจะถูกถ่ายออกจากระบบเร็วเกินไปส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียลดลง ทำให้แบคทีเรียที่เหลืออยู่ทำการย่อยไม่ทันและอาจทำให้ค่า pH ในถังหมักลดลงขึ้น ขณะเดียวกัน การที่ระยะเวลาการกักเก็บนานเกินไปจะทำให้เกิดตะกอนของสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายแล้วสะสมอยู่ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่โดยไม่จำเป็น ระยะเวลาในการกักเก็บส่วนใหญ่จะประมาณ 14 - 60 วัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ ค่าปริมาณของแข็ง (TSC) อุณหภูมิ ขนาดและประเภทของถังหมัก และปริมาณสารอินทรีย์ที่เติม ระยะเวลาในการกักเก็บนั้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าแบคทีเรียจะมีชีวิตได้นานเท่าไรโดยไม่มีการเติมอาหาร เนื่องจากระยะเวลาการกักเก็บนั้นหมายถึงระยะเวลาที่แบคทีเรียต้องการเพื่อย่อยอาหารให้หมด ดังนั้นเมื่อไหร่ก็ตามที่แบคทีเรียย่อยอาหารไม่หมดก็หมายความว่าแบคทีเรียจะยังไม่ตายจากการขาดอาหาร

2.3 ปริมาณของแข็ง (Total Solid Content, TSC)

ปริมาณของแข็งของสารอินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพแบ่งเป็นสองระดับ ดังนี้คือ ปริมาณของแข็งสูง (High-solid) TSC สูงกว่า ~ 20% และ ปริมาณของแข็งต่ำ (Low-solid) TSC ต่ำกว่า ~ 15%

ถังหมักที่ออกแบบสำหรับเติมสารอินทรีย์ จะต้องใช้พลังงานมากกว่าในการสูบน้ำตะกอน (Slurry) แต่เนื่องจากในระบบปริมาณของแข็งสูง ความเข้มข้นของน้ำในถังหมักสูงกว่า พื้นที่ที่ใช้ก็จะน้อยกว่า ในทางกลับกัน ถังหมักปริมาณของแข็งต่ำ สามารถใช้เครื่องสูบน้ำทั่วไปที่ใช้พลังงานน้อยกว่าสูบน้ำตะกอน แต่ก็ต้องใช้พื้นที่มากกว่าเนื่องจากปริมาตรต่อสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปสูงขึ้น กระนั้นก็ดี การที่น้ำตะกอนมีความใสกว่าก็ทำให้การหมุนเวียนและกระจายตัวของแบคทีเรียและสารอินทรีย์ดีขึ้นและการที่แบคทีเรียสามารถสัมผัสสารอินทรีย์อย่างทั่วถึงก็ช่วยให้การย่อยและการผลิตก๊าซเร็วขึ้น

2.4 การคลุกเคล้า (Mixing)

การคลุกเคล้าตะกอน น้ำ และ สารอินทรีย์ เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนเพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดก๊าซเร็วขึ้นและมากขึ้น นอกจากนี้ยังป้องกันการตกตะกอนและตะกอนลอย (Scum) ซึ่งตะกอนลอยที่เกิดขึ้นจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวจากถัง

2. การหมักร่วม

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ในแต่ละปีจะมีผลผลิตด้านการเกษตรเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมากตามไปด้วย รัฐบาลจึงมีนโยบายให้เกษตรกรให้ความสำคัญกับการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานหรือนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทางเลือกหนึ่งในนั้นคือการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถทำได้โดยการหมักโดยใช้วัตถุดิบเพียงชนิดเดียว เช่น มูลสัตว์ แต่ปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงความหลากหลายของการหมัก ซึ่งพบว่า การหมักร่วม โดยใช้วัตถุดิบหมักตั้งแต่สองประเภทหรือมากกว่านั้น จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้น มีปริมาณมากขึ้น อีกทั้งองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซธรรมชาติยังสูงขึ้นอีกด้วย วิธีนี้จึงเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ดีมากอีกทางหนึ่ง

การหมักร่วม (Co-Digestion) เป็นกระบวนการหมักร่วมกันระหว่างสองวัตถุดิบหรือมากกว่า กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ในอดีตจะใช้วัตถุดิบเพียงชนิดเดียวในการหมัก ทำให้ได้ผลผลิตของก๊าซมีเทนน้อย (Parawira et al., 2004) ในปัจจุบันได้มีการนำวัตถุดิบหลายชนิดมาหมักร่วมกัน เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทน

หลักการพื้นฐานของการเลือกวัตถุดิบที่จะนำมาหมักร่วมกันนั้น อย่างแรกเลยจะต้องเป็นวัตถุดิบที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ กล่าวคือได้จากธรรมชาติ และอาจมีเส้นใย ซึ่งมีไฟเบอร์หรือเส้นใยเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากไฟเบอร์จะมีสารประกอบพวกเซลลูโลสในปริมาณมาก เป็นสารอาหารให้กับแบคทีเรียในระบบ การนำเศษพืชมาปรับสภาพด้วยแบคทีเรียสร้างกรดก่อนจะนำไปหมักร่วมกับมูลสัตว์จะยิ่งทำให้ได้ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นอีกด้วย (Neureiter et al., 2005)

จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยของการหมักร่วมที่ผ่านมา พบว่าการหมักร่วมสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนได้สูง แก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ทั้งเรื่องพื้นที่การย่อยสลายของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ลดปัญหาการเผาทำลายซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ อีกทั้งก๊าซชีวภาพที่ได้นั้นเป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจกอีกด้วย การศึกษาของ Lindorfer et al. (2007) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของมูลสัตว์กับพืชพลังงาน พบว่าสามารถ

เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ที่ระบบรับได้มากขึ้นถึงหนึ่งเท่าตัว ส่งผลให้สามารถเพิ่มกำลังผลิตกระแสไฟฟ้า จากเดิม 500 กิโลวัตต์ เป็น 1,000 กิโลวัตต์ นอกจากนี้ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ทำการหมักร่วมทดลองหาวัตถุดิบที่จะหมักร่วมกับของเสียจากฟาร์มสุกร โดยทดลองกับวัตถุดิบ 5 ชนิด คือเศษอาหาร กลีเซอริน หญ้าเนเปียร์ ฟางข้าวและต้นข้าวโพด โดยพบว่าวัตถุดิบที่มีไฟเบอร์สูง คือหญ้าเนเปียร์ ฟางข้าว และต้นข้าวโพด ต้องผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อนและนำไปแช่ในสารเคมี ก่อนจะนำไปหมักร่วมกับของเสียจากฟาร์มสุกร พบว่าฟางข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 60 ของของแข็งระเหย หมักร่วมกับของเสียจากฟาร์มสุกรมีอัตราการผลิตมีเทนมากที่สุด รองลงมาคือหญ้าเนเปียร์ ข้าวโพด , เศษอาหาร และกลีเซอรินตามลำดับ

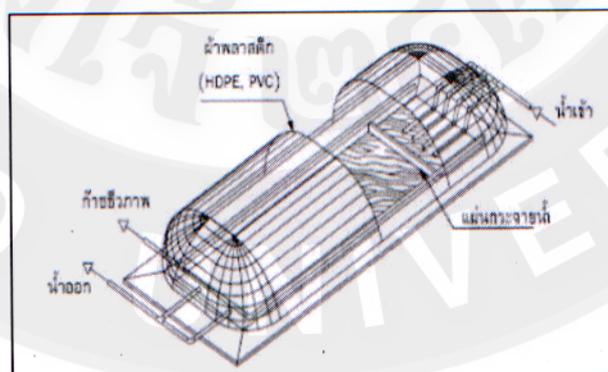
3. เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในประเทศไทย

เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันทั่วไปในประเทศไทยสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภท ดังนี้

3.1 บ่อปิด (Covered Lagoon)

บ่อหมักระบบปิดเป็นบ่อหมักก๊าซชีวภาพรูปแบบหนึ่ง โครงสร้างบ่ออาจเป็นบ่อคอนกรีตหรือดินขุดก็ได้ ในกรณีที่เป็นบ่อดินขุดอาจปูแผ่นยางที่ใช้ปูสระเก็บน้ำมาปูทับ เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วซึมของเสียลงสู่ดิน ด้านบนของบ่อคลุมด้วยผืนพลาสติกขนาดใหญ่ เพื่อรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในบ่อและเพื่อป้องกันไม่ให้กลิ่นแพร่กระจาย หลักการทำงานของระบบนี้เนื่องจากด้านบนมีพลาสติกคลุมทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายอินทรีย์ในน้ำเสียในสภาพไร้ออกซิเจนได้ซึ่งก่อให้เกิดก๊าซชีวภาพ ดังภาพที่

2



ภาพที่ 2 บ่อปิด

3.2 บ่อโดมคงที่ (Fixed Dome)

เป็นบ่อหมักก๊าซที่ส่งเสริมให้มีการใช้ในฟาร์มสุกรขนาดเล็ก โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นทรงกลมฝังอยู่ใต้ดิน ส่วนที่เก็บก๊าซมีลักษณะเป็นโดมซึ่งข้อดีของระบบนี้ คือ ประหยัดพื้นที่บริเวณฟาร์ม เนื่องจากถังหมักอยู่ใต้ผิวดิน จึงทำให้สามารถระบายน้ำมูลสุกรจากโรงเรือนไปสู่บ่อหมักโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง อุณหภูมิในบ่อหมักค่อนข้างคงที่ ทำให้การหมักของมูลสัตว์เป็นไปอย่างต่อเนื่อง สำหรับข้อเสียของระบบนี้ คือ ในบริเวณที่ระดับน้ำใต้ดินสูงการทำงาน และการสร้างบ่อหมักจะค่อนข้างลำบากและในบริเวณส่วนโค้งของถังหมักจะต้องใช้เทคนิคและความชำนาญสูง ดังภาพที่ 3

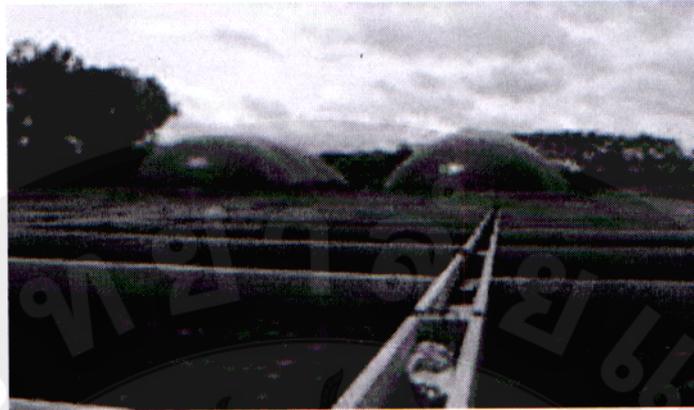


ภาพที่ 3 บ่อโดมคงที่

ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2555)

3.3 บ่อหมักเร่วน้ำขึ้น (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB)

ลักษณะการทำงานของบ่อ UASB คือ น้ำเสียจะถูกสูบเข้าก้นถังตะกอนแบคทีเรียที่กั้นถังแบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นล่างหรือ Sludge Bed เป็นตะกอนเม็ดเป็นแบคทีเรียชนิดเส้นใยยาวเกาะกันแน่นมีความหนาแน่นสูง ส่วนชั้นที่ 2 เรียกว่า Sludge Blanket เป็นแบคทีเรียตะกอนเบาช่วงบนของถังหมักจะมีอุปกรณ์แยกก๊าซชีวภาพและตะกอนแบคทีเรีย ข้อดีของถังหมักแบบ UASB คือ เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและค่าก่อสร้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ แต่ข้อเสีย คือ มีความยุ่งยากในการเลี้ยงตะกอนเม็ดจากตะกอนเบาและไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง ดังภาพที่ 4

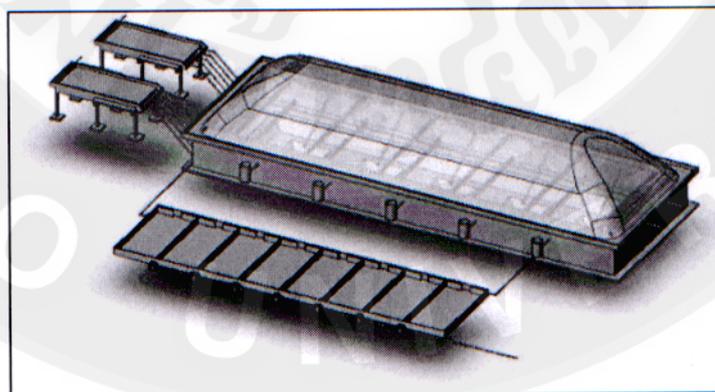


ภาพที่ 4 บ่อหมักเรื้อวน้ำขึ้น

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2555)

3.4 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น (Anaerobic Baffled Reactor)

ระบบน้ำเสียแบบนี้มีลักษณะเป็นถังหรือบ่อดินที่มีแผ่นกั้นขวางหลายแผ่นติดตั้งไว้ การไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะเป็นในลักษณะไหลขึ้นลงสลับกันหลายครั้ง โดยมีความเร็วในการไหลขึ้นลงประมาณ 0.2-0.4 เมตรต่อชั่วโมง ขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวภาพจะคล้ายกับระบบ UASB ระบบนี้สามารถใช้กับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง แต่ระบบมีขนาดใหญ่ทำให้ต้องใช้พื้นที่มากกว่าระบบ UASB ดังภาพที่ 5

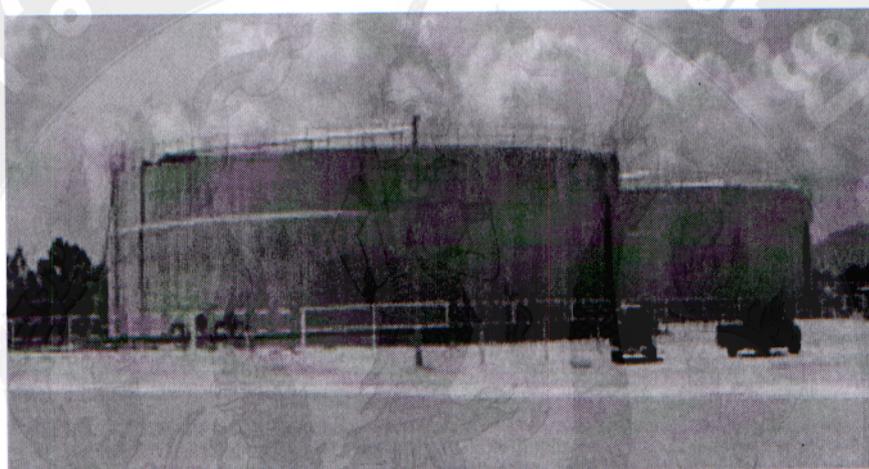


ภาพที่ 5 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น

ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2556)

3.5 ถังปฏิกรณ์แบบตรึงเซลล์บนผิววัสดุตัวกลาง (Anaerobic Filter/Fixed Film)

เป็นถังหมักภายในบรรจุด้วยตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเพื่อให้แบคทีเรียเกาะและมีรูพรุนสูง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะต้องผ่านถึงตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนแบคทีเรียออก ข้อดีของระบบนี้คือ การดูแลและควบคุมและระบบง่าย มีประสิทธิภาพสูงและสามารถรับการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสียได้ดี ข้อเสีย คือ วัสดุตัวกลางมีราคาแพงและมีปัญหาอุดตันได้ง่าย ดังนั้น การใช้งานจะต้องใช้ตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูงโดยบรรจุเพียง 10-20 % ของปริมาตรถัง ดังภาพที่ 6

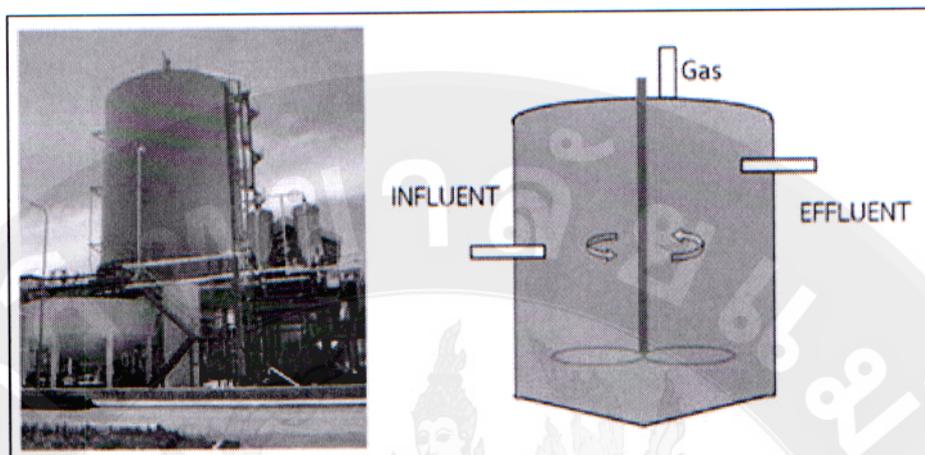


ภาพที่ 6 ถังปฏิกรณ์แบบตรึงเซลล์บนผิววัสดุตัวกลาง

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2555)

3.6 ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบผสมกวน (Completely Stirred Tank Reactor: CSTR)

เป็นการเรียกตามลักษณะของสสารที่อยู่ภายในถังซึ่งมีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากันทุกจุด (Completely Mixed) ถังปฏิกรณ์แบบนี้ถือเป็นถังปฏิกรณ์อุดมคติ (Ideal Reactor) แบบหนึ่ง และเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศที่เก่าแก่ที่สุดประเภทหนึ่งด้วย โดยถังกวนผสมแบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากถังย่อยสลัดจ์ซึ่งเป็น Conventional Anaerobic Digester ที่มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากการกวนผสมไม่ดีทำให้ระยะเวลาย่อยสลายยาวนาน จึงได้มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสกันของสารอาหารในน้ำเสียและจากถังย่อยสลัดจ์ (Septic Tank) โดยมีการติดตั้งใบกวน เช่น แบบ Paddle แบบสกรู (Screw) หรือ ใช้ Gas Diffuser ในการกวนผสม เพื่อให้จุลินทรีย์และสารอาหารในถังปฏิกรณ์มีการสัมผัสกันมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียดีขึ้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555) ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ถึงปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบผสมกวน

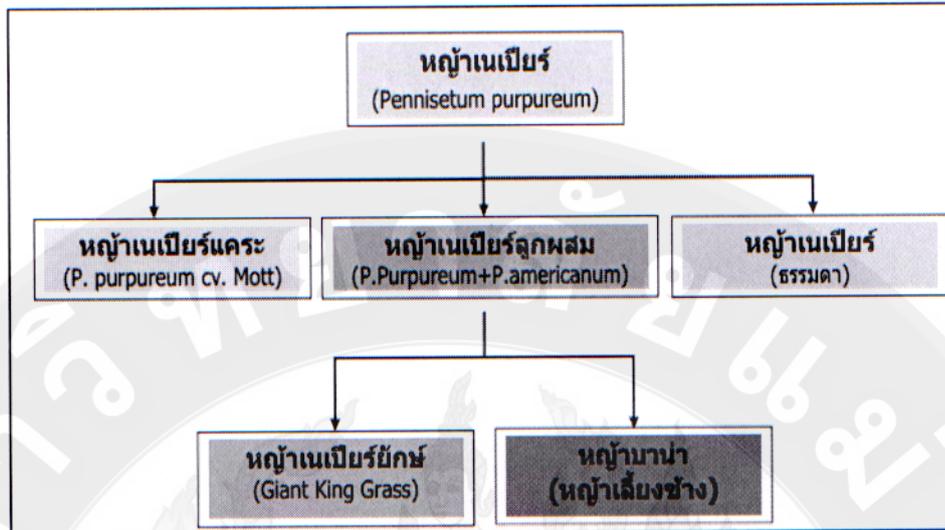
ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2556)

4. หนุ่เนเปียร์

มีแหล่งดั้งเดิมอยู่ในทวีปแอฟริกาเขตร้อน สำหรับประเทศไทยมีการนำเข้ามาจากมาเลเซีย เมื่อ พ.ศ. 2472 เป็นหนุ่เนอายุหลายปี กอสูงคล้ายอ้อย สูงประมาณ 1.6 - 1.9 เมตร ช่อดอกสีน้ำตาล เหลือง เป็นรูปทรงกระบอกคล้ายหางกระรอก เป็นพืชที่มีผลผลิตสูงถึง 40 - 50 ตันต่อไร่ต่อปี หนุ่เนมี ศักยภาพสูงในการนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ โดยหนุ่เนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 160 - 190 ลูกบาศก์เมตร/หนุ่เนสด 1 ตัน (สุรียา, 2552) เป็นพืชโตเร็ว ปลูกครั้งเดียวสามารถเก็บเกี่ยวได้นานถึง 6 - 7 ปี (ไกลลาศ, 2555) และอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ (ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2555ก : Lauris et al., 2005)

4.1 สายพันธุ์ที่นิยมปลูก

- หนุ่เนเปียร์แคระ (*P. purpureum* cv. Mott) สูง 1 - 2 เมตร
- หนุ่เนเปียร์ (ธรรมดา) สูง 3 - 4 เมตร
- หนุ่เนเปียร์ลูกผสม (*P. Purpureum* x *P. americanum*) ซึ่งมี 2 สายพันธุ์ คือ หนุ่เนเปียร์ยักษ์ และ หนุ่เนบาน่า โดยสายพันธุ์ต่างๆของหนุ่เนเปียร์ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงสายพันธุ์หญ้าเนเปียร์ที่นิยมปลูก

ที่มา: ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (2555ก)

4.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของหญ้าเนเปียร์

หญ้าเนเปียร์ก่อนการปรับสภาพเบื้องต้นมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และเส้นใยรวม เท่ากับ ร้อยละ 8.37, 2.04, 0.45 และ 8.22 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้ จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการหมักย่อยในสภาวะไร้อากาศเพื่อถูกใช้ในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ และเปลี่ยนสารอาหารเป็นก๊าซชีวภาพ หากมีปริมาณสารอาหารในระบบที่เหมาะสมและเพียงพอ จะช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยงานวิจัยของ Lauris et al., (2005) กล่าวว่าไนโบของหญ้าเนเปียร์มีปริมาณโปรตีนสูง และองค์ประกอบส่วนใหญ่ของใบนั้นจะเป็น พวกลิกโนเซลลูโลสและไฟเบอร์ ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มที่สามารถจะผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ดีอีกทางหนึ่งด้วย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Vladimir et al., (2008) ที่พบว่าหญ้ามานามีความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหาร เป็นพืชที่เจริญเร็วและมีแนวโน้มในการที่จะมีศักยภาพสำหรับเป็นพืชพลังงานได้ในอนาคต ดังนั้นจึงเห็นว่าหญ้าเนเปียร์มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นพืชพลังงานสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของหญ้าเนเปียร์

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของหญ้าเนเปียร์

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี	ปริมาณ
คาร์โบไฮเดรต (%)	8.37
โปรตีน (%)	2.04
ไขมัน (%)	0.45
เส้นใยรวม (%)	8.22
ความชื้น (%)	77.74
ปริมาณเถ้า (%)	3.18
ค่า pH	4.85
Carbon (%)	44.19
Hydrogen (%)	5.22
Oxygen (%)	39.18
Nitrogen (%)	0.44

ที่มา : ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (2555ข)

4.3 ข้อดีของหญ้าเนเปียร์ในการนำมาผลิตพลังงานทดแทน

- ไม่ใช่พืชอาหารคน และไม่เป็นวัชพืช
- เป็นพืชโตเร็ว ปลูกครั้งเดียวสามารถเก็บเกี่ยวได้นานถึง 6 - 7 ปี
- ให้ผลผลิตสูงถึงไร่ละ 8 ตัน หรือ 40 - 50 ตันต่อไร่ต่อปี
- อุดมไปด้วยสารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีนในอัตราที่สูง ซึ่งสารเหล่านี้

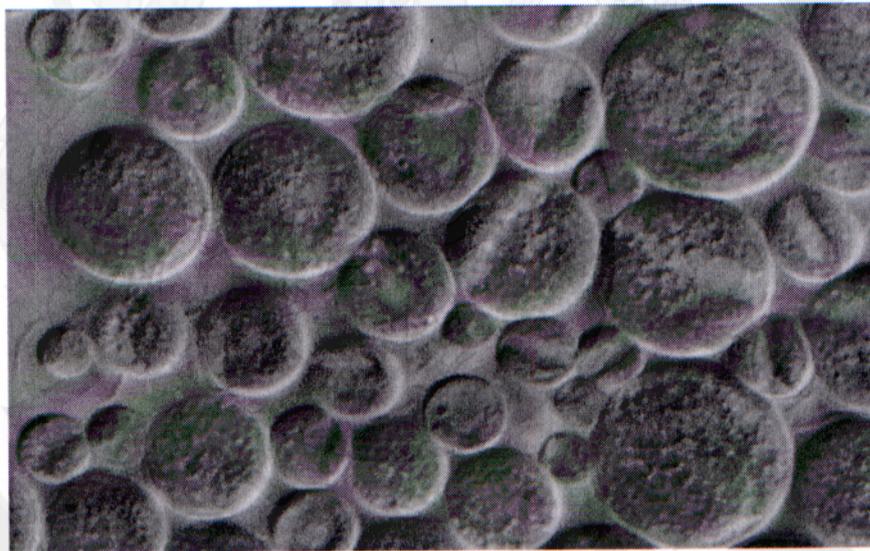
ถูกนำไปใช้ในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์และเปลี่ยนสารอาหารเป็นก๊าซชีวภาพ

- ให้อัตราการผลิตมีเทนสูงถึง 0.12 - 0.26 ลูกบาศก์เมตร CH_4 /กิโลกรัม VS_{added} (ศูนย์วิจัย

พลังงาน ม.แม่โจ้, 2555ข: Chynoweth et al., 1993)

5. สาหร่าย *Chlorella sp.*

สาหร่าย *Chlorella sp.* ดังภาพที่ 9 เป็นสาหร่ายเซลล์เดี่ยว มีขนาดเล็กประมาณ 2 - 12 ไมโครเมตร มีรูปร่างกลม หรือรี และผนังเซลล์ค่อนข้างบาง คลอโรพลาสต์เป็นแบบแถบข้างเซลล์ และมีพรีริโนยด์ 1 อัน อยู่บนคลอโรพลาสต์ มีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศอย่างเดียว โดยการสร้าง ออโตสปอร์ (Autospores) มีจำนวน 4 , 8 หรือ 16 เซลล์ ถูกล้อมรอบด้วยผนังเซลล์ลูโลสบางๆ และพบ สปอโรพอสลินิน (Sporopose Lignin) ในผนังเซลล์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถพบได้ที่ผนังของอับละอองเรณูในพืชชั้นสูง มีคลอโรพลาสต์เป็นรูปถ้วย อาจมีหรือไม่มีพรีริโนยด์ ไม่มีแฟลกเจลลา มีสติกมา และคอนแทรกไทล์ แวกิวโอล พบนิวเคลียสอยู่ตรงกลางเซลล์ มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส 2 ชั้น พบไมโทคอนเดรีย กอนจิบอดี และแวคิวโอล เล็กน้อยในไซโตพลาสซึม (Bold & Wynne, 1978)



ภาพที่ 9 แสดงลักษณะเซลล์ของสาหร่าย *Chlorella sp.* กำลังขยาย 10^5 เท่า

ที่มา: DasSarma (2549)

สาหร่ายขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงเหมือนกับพืช สามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อยสามารถเจริญเติบโตได้ดี ทั้งในน้ำกร่อยและน้ำเค็ม และมีวงจรชีวิตสั้น (Scragg et al., 2002; Hammond and Glatz, 1988) นอกจากนี้ข้อดีของสาหร่ายขนาดเล็กในด้านของพลังงาน คือ ปริมาณน้ำมันที่ได้ต่อพื้นที่ในการเพาะเลี้ยงมากกว่าพวกพืชน้ำมัน (Oilseed Crops) และชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก 1 กิโลกรัมสามารถใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้

ถึง 1.8 กิโลกรัม (Rodolfi et al., 2009) สาหร่ายขนาดเล็กให้ออกซิเจนออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงเหมือนพืช นั่นคือสามารถใช้พลังงานจากแสงเป็นแหล่งพลังงาน ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน และนอกจากนั้นสารอินทรีย์ต่างๆ สามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานโดยสาหร่ายขนาดเล็กหลายสายพันธุ์ (Yang et al., 2000)

5.1 การใช้ประโยชน์จากสาหร่าย

สถาบันวิจัยโภชนาการ ได้ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของสาหร่าย โดยได้รับทุนสนับสนุน จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ จากการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ พบว่าคุณค่า ทางด้านโปรตีน อยู่ระหว่าง 10 - 40 กรัม ต่อสาหร่าย 100 กรัม ซึ่งถ้าเทียบกับอาหารที่เป็นแหล่ง โปรตีนที่ดี เช่น เนื้อสัตว์ที่นำมาทำแห้ง เช่น เนื้อวัวอบแห้ง หมูแผ่น กุ้งแห้ง ซึ่งจะมีโปรตีนประมาณ 11, 50, 60 กรัม ต่อสาหร่าย 100 กรัม ตามลำดับ นอกจากนี้คุณค่าทางด้านใยอาหาร (Dietary fiber) ก็พบว่า มีอยู่สูงตั้งแต่ 27 - 41 กรัมต่อสาหร่าย 100 กรัม โดยกรดไขมันจะแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 กรดไขมันที่มีในสาหร่าย *Chlorella sp.*

กรดไขมัน	ปริมาณของกรดไขมัน (มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์แห้ง)	
Stearic acid	0.85	(3.4)
Oleic acid	4.07	(16.5)
linoleic acid	19.79	(80.0)
linolenic acid	0.03	(0.1)
รวม	24.74	(100)

ตารางที่ 5 สารอาหารที่เป็นประโยชน์ในสาหร่าย *Chlorella sp.*

สารอาหาร	ประโยชน์
กรดโฟลิก	ในจุลสาหร่ายมีกรดโฟลิกมากกว่า ไข่ นม และ ตับ หลายสิบ เท่ากรดโฟลิกในสาหร่าย ช่วยบำรุงเลือด ป้องกันโรคโลหิตจาง และ ป้องกันความผิดปกติในลำไส้

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สารอาหาร	ประโยชน์
กรดไขมันจำเป็น	กรดไขมันจำเป็นคือกรดไขมันที่ร่างกายสร้างขึ้นเองไม่ได้ มีกรดไขมันจำเป็นมากกว่าที่พบในดอกคำฝอยและน้ำมันพริมโรส กรดไขมัน GLA สามารถทำให้ผิวเนียนนุ่ม ผมนุ่มดำเป็นเงางาม และยังช่วยเสริมรากผมให้แข็งแรงและหยุดอาการผมร่วง
วิตามินบี12	ในสาหร่ายจะมีวิตามินบี12 มากกว่าที่มีในอาหารชนิดอื่นและมากกว่าดับถึง 250 เปอร์เซ็นต์ สาหร่ายสไปรูลิน่าจึงเหมาะสำหรับผู้บริโภคอาหารมังสวิรัตินอกจากนี้วิตามินบี 12 น้อยมากหรือไม่มีเลย
วิตามินอี	ในสาหร่ายจะมีวิตามินอีเป็น 3 เท่าของจมูกข้าวสาลีเป็นสาร แอนตีออกซิเดนท์ที่ช่วยป้องกัน และลดการเกิดอนุมูลอิสระในร่างกาย ช่วยชะลอกระบวนการของความชรา ลดการเกิดริ้วรอย และการเสื่อมสลายของเซลล์
โปรตีนและกรดอะมิโน	ในสาหร่ายจะมีโปรตีนอยู่ถึงร้อยละ 60 - 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นโปรตีนจากพืช จะเห็นว่าในสาหร่ายจะมีโปรตีนมากกว่าถั่วเหลือง เนื้อสัตว์ และนม เนื่องจากโปรตีนจากสาหร่ายเป็นโปรตีนจากพืชจึงสามารถถูกย่อยและดูดซึมได้ดีกว่าโปรตีนจากเนื้อสัตว์ สาหร่ายมีกรดอะมิโนที่จำเป็น ซึ่งร่างกายไม่สามารถสร้างเองได้ อยู่ครบในสัดส่วนที่เหมาะสม

ที่มา: Lee, J-Y et al. (2009)

จากข้อมูลดังกล่าวมาสาหร่ายจึงเป็นสิ่งมีชีวิตที่เราสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน ได้แก่

- ใช้เป็นอาหารมนุษย์ เนื่องจากมีโปรตีนสูง จึงนำมาใช้เป็นอาหารเสริม เช่น สาหร่ายเกลียวทอง หรือ สาหร่ายสีแดง (*Porphyra*) หรือที่เรียกว่า จีฉ่าย มาทำอาหารพวกแกงจืด หรือ ผสม *Chlorella sp.* ลงในชา ชุป น้ำผลไม้ บะหมี่ และไอศกรีม เป็นต้น

- ใช้เป็นอาหารสัตว์ สาหร่ายสามารถนำไปเลี้ยงสัตว์กระเพาะเดี่ยว เช่น หมู และสัตว์ปีกได้เป็นอย่างดี และยังเป็นอาหารที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำวัยอ่อนที่กินพืชเป็นอาหาร

- ใช้ในการกำจัดน้ำเสีย การใช้สาหร่ายในการกำจัดน้ำเสียร่วมกับแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียจะทำการย่อยสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน ให้เป็นสารประกอบ อินทรีย์ เช่น แอมโมเนียม ไนเตรต คาร์บอนไดออกไซด์ และเกลือแร่ต่างๆ ในสภาพการเกิดที่มีอากาศ (*Aerobic*) หรือไม่มีอากาศ (*Anaerobic*) จากนั้นสาหร่ายจะใช้สารประกอบเหล่านี้ ในกระบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆ สำหรับสาหร่ายที่ได้จากระบบกำจัดน้ำเสียนี้ อาจนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ ปุ๋ยพืชสด หรือใช้ในการทำ ก๊าซชีวภาพได้

- ใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว (*Blue Green Algae*) รู้จักกันแพร่หลายในแง่ของการใช้ เป็นปุ๋ยชีวภาพ จากการวิจัยของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในนาข้าวบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนในอากาศให้ เป็นสารประกอบไนโตรเจน เช่น แอมโมเนียม ทำให้ข้าวเจริญเติบโต ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ *Anabaena sp.* และ *Nostoc sp.* พันธุ์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย พบในประเทศและให้ผลผลิตดี มีชื่อว่า *Anabaena Siamensis*

- ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง สาหร่ายประกอบด้วยสารเคมีบางชนิดที่ช่วยในการรักษาผิวหนัง เครื่องสำอางที่ผสมสาหร่ายและสารสกัดจากสาหร่ายเกลียวทองช่วยให้ผิวพรรณดีขึ้นและลดริ้วรอย ส่วนในประเทศไทยก็ได้มีบริษัทหลายแห่งที่ใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นเครื่องสำอางในรูปครีม บำรุงผิว

- ใช้ในอุตสาหกรรมยา นักวิทยาศาสตร์และนายแพทย์หลายท่านได้ทดลองใช้สาหร่ายเกลียวทองในการป้องกันและรักษาโรคต่าง ๆ เช่น โรคเบาหวาน โรคกระเพาะ อีกทั้งยังช่วยลดความเครียดและความไม่สมดุลในร่างกาย สาหร่ายเกลียวทองทาแผล ทำให้แผลแห้งเร็วขึ้น นอกจากนี้สาหร่ายบางชนิดสารปฏิชีวนะซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์ ได้แก่ *Cyanophycin* หรือ *Marinamycin* ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ ได้

- ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ สาหร่ายสีแดงพวก *Gelidium*, *Gracilaria* สามารถนำไปสกัดทำเป็นวุ้น เพื่อนำไปใช้ในการประกอบอาหาร และเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์สาหร่ายสีน้ำตาลพวก

Laminaria, Ascophyllum, Macrocystis นำไปสกัดเป็น แอลจินหรือแอลจิเนต ซึ่งนำไปใช้ในการทำนม ขนมห้าง ไอศกรีม ขนมหวาน ลูกกวาด สบู่ แชมพูสระผม เป็นต้น

การตรวจเอกสาร

กิตติพล และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris* โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25 - 40 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่าง 6 - 8 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 1 ลิตรและให้แสงตลอดเวลา และทำการตรวจสอบปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่ามีสัดส่วนโดยปริมาตรของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยประมาณ 1.6 - 7.7% โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 29.6 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่าง 7.26 และการทดลองภายใต้สภาวะให้แสงตลอดเวลา พบว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 2.46%

ชัยศรี และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาหากระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรร่วมกับพีชน้ำ โดยทำการทดลองในระดับปฏิบัติการและในระดับชุมชน ซึ่งในส่วนของผลผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้งหมด 4 ประเภท ประกอบด้วย วุ้นมะพร้าว เปลือกส้มโอ สาหร่ายหางกระรอก และผักตบชวา โดยการหมักร่วมกับมูลโค ซึ่งใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ ภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ ในสัดส่วนต่างกัน ปริมาตร 10 ลิตร (ถังอะคริลิก แบบปลั๊กโพลว) ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 101.44 มิลลิลิตร ในระยะเวลาการหมัก 45 วัน ได้ก๊าซมีเทนสูงสุด 77.70% และนำผลการศึกษาไปทำการออกแบบการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับชุมชน โดยสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบปลั๊กโพลว ความจุ 4,000 ลิตร พบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด 115.86 ลิตร และสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด 80.5% ในระยะเวลา 30 - 45 วัน

จิตรลดา และคณะ (2554) ทำการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักสาหร่ายขนาดเล็ก สายพันธุ์ *Chlorella sp.* ศึกษาองค์ประกอบของก๊าซที่ได้ และเปรียบเทียบก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักสาหร่ายแบบเติมจุลินทรีย์และไม่เติมจุลินทรีย์ ในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง โดยศึกษาอิทธิพลของแสงและอิทธิพลของจุลินทรีย์ โดยจะใช้สาหร่าย ทำการหมักในขวดหมักทดลองขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในสภาวะไร้อากาศ (ขวดหมักปิดสนิท ไม่มีการรบกวน) ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่า การหมักสาหร่ายแบบเติมจุลินทรีย์ที่สภาวะมีแสงให้ปริมาณก๊าซมีเทนมากที่สุด 60.5% ของปริมาณก๊าซทั้งหมด

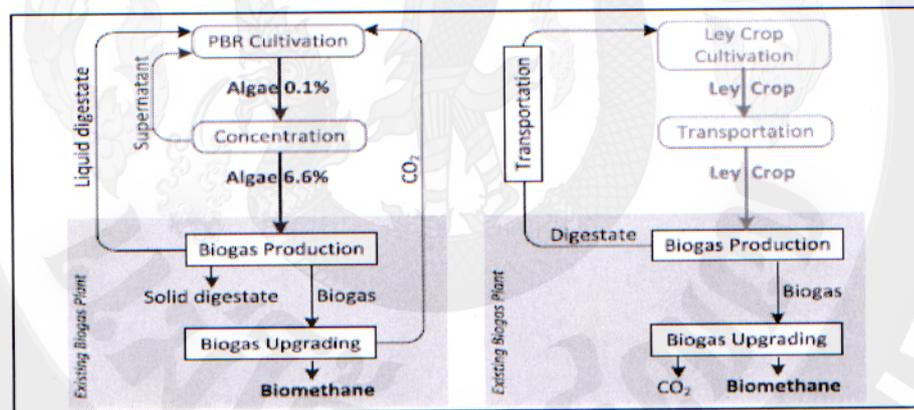
น้ำเพชร และคณะ (2555) ศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยก๊าซชีวภาพ ที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และ Giraldo-Gomez และคณะ (2534) ศึกษากระบวนการสร้างมีเทนของจุลินทรีย์ (Methanogenic Bacteria) โดยการเปลี่ยน Acetate ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ดังนั้นสามารถคำนวณปริมาณของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากธาตุองค์ประกอบของพืช โดยพบว่าก๊าซผสมของสาหร่าย *Chlorella vulgaris* มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนสูงถึงร้อยละ 47.53 ซึ่งหมายความว่าสารอินทรีย์ในสาหร่าย สามารถย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ประมาณร้อยละ 47.53 และคิดเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพได้ 369.45 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ward et al. (2551) กล่าวว่า การผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลของพืชมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 48 - 65 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 36 - 41

ศุภย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (2555) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของหญ้าเนเปียร์ พบว่ามีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และมีเส้นใยในอัตราที่สูง คิดเป็นร้อยละ 8.31 , 2.04 , 0.45 และ 8.22 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากการคำนวณปริมาณของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากธาตุองค์ประกอบของหญ้าเนเปียร์ พบว่า สารอินทรีย์ในหญ้าเนเปียร์ สามารถย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ประมาณสูงถึงร้อยละ 54.82 และคิดเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพได้ 369.45 ลิตรต่อกิโลกรัม และยังพบว่า หญ้าเนเปียร์มีค่า VS /TS อยู่ในช่วง 0.63 ซึ่งอยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสมสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นหญ้าเนเปียร์ จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นพืชพลังงานสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพได้

อานิตา ปาเก (2556) ได้ทำการประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากซีรัมน้ำยางสกิมในแง่ของการนำของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำยางเข้มข้นมาใช้ประโยชน์ สาหร่ายขนาดใหญ่สามารถเพาะเลี้ยงในระบบบำบัดน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถนำมาใช้ผสมร่วมกับซีรัมน้ำยางสกิมเพื่อเพิ่มสารอาหารในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ การผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่ายขนาดใหญ่ครั้งนี้ใช้สาหร่ายสองชนิด คือ *Chaetomorpha sp.* และ *Ulva intestinalis*. โดยเป็นการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการผลิตแบบการหมักร่วมของวัตถุดิบ โดยทำการทดลองทั้งหมด 6 ชุดการทดลอง ในสัดส่วนของ *Chaetomorpha sp.* ต่อ *Ulva intestinalis*. ต่อซีรัมน้ำยางสกิมที่ 3:0:1 , 2:0:2 , 1:0:3 , 0:1:3 , 0:2:2 และ 0:3:1 พบว่าระบบการหมักร่วมของวัตถุดิบ ที่ผสมซีรัมน้ำยางสกิมในสัดส่วนที่เท่ากับสาหร่ายหรือมากกว่าสองส่วน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด (2:0:2 , 1:0:3 , 0:1:3 และ 0:2:2) และพบว่าชุดการทดลองที่เหมาะสมสำหรับระบบแบบผสมรวมวัตถุดิบนั้นมีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ 15 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TSC) ที่ 11% TSC และค่าความเป็นกรดต่างที่ 7 และเมื่อขยายขนาดของการหมักโดยหมักในถังปฏิกรณ์ขนาด 500 มิลลิลิตรเป็น 6 ลิตร

พบว่าหลังการหมักกับซีรุ่มน้ำยางสกิมร่วมกับสาหร่ายทั้งสองชนิดนี้เป็นเวลา 45 วัน มีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด 65.96% ของปริมาณก๊าซทั้งหมด

Wang et al. (2013) ได้กล่าวถึงสาหร่ายว่าเป็นพืชที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากมีอัตราการเจริญที่สูงกว่าพืชที่ขึ้นบนผิวดิน เราจึงนิยมนำเอาสาหร่ายมาเพาะปลูกเพื่อผลิตเป็นก๊าซชีวภาพซึ่งจะมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบการเกิดก๊าซมีเทนระหว่างระบบที่มีสาหร่ายและไม่มีสาหร่ายเป็นวัตถุดิบตั้งต้น ดังภาพที่ 10 ก๊าซมีเทนชีวภาพที่ได้จากการปลูกสาหร่ายแบบบูรณาการนี้แม้จะมีอัตราส่วนพลังงานสุทธิ (NER) 1.54 ซึ่งต่ำกว่าปริมาณก๊าซมีเทนชีวภาพจากการปลูกพืชหลากหลาย (1.78) แต่เมื่อเทียบกับข้อดีด้านพื้นที่ ระยะเวลา และอื่นๆ นับว่าสาหร่ายมีศักยภาพในการปลูกทดแทนพืชบนดินได้ โดยงานวิจัยนี้้นำเอาสาหร่ายมาเพาะเลี้ยงในถังชีวภาพในสภาวะแวดล้อมที่เป็นเรือนกระจก โดยเพาะเลี้ยง 2 แบบ คือแบบที่ใช้และไม่ใช้ความร้อนจากเรือนกระจก จากการทดลองพบว่าสาหร่ายผลิตก๊าซมีเทนโดยไม่ใช้ความร้อนจากเรือนกระจก จะได้ปริมาตรสุทธิ 1.54 ซึ่งมากกว่าแบบใช้ความร้อนจากเรือนกระจก ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 แสดงกระบวนการเกิดก๊าซมีเทนระหว่างระบบที่มีสาหร่ายและไม่มีสาหร่าย

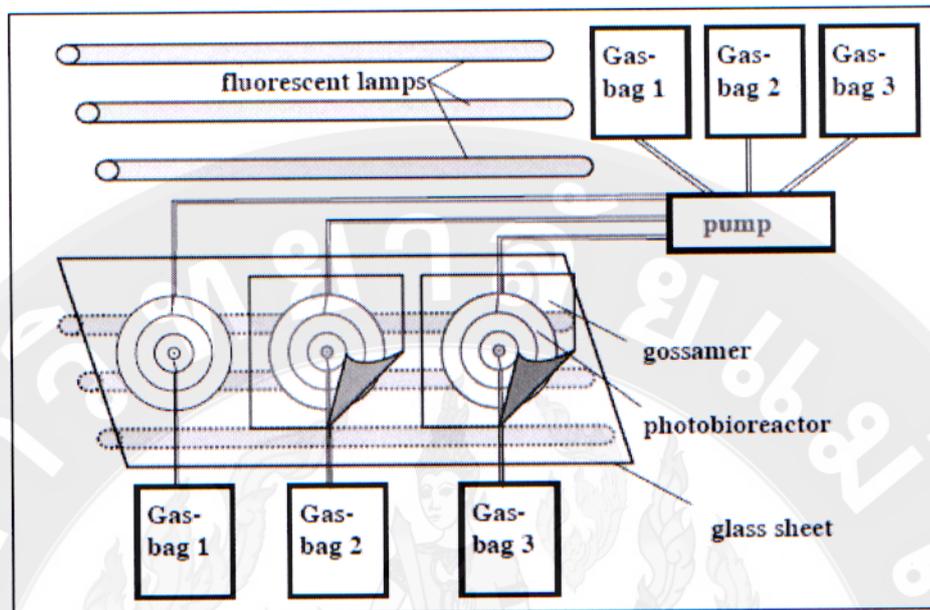
	I_i unit	Option I: algae, 180 days			Option II: algae, 330 days			Option III: ley crop, whole year		
		I_i	E	G	I_i	E	G	I_i	E	G
Infrastructure			30.25	3.10		16.50	1.69			
PBR glass [23,38]	m ²	0.23	25.42	2.60	0.12	13.87	1.42			
Greenhouse glass [23,38]	m ²	0.04	4.82	0.49	0.02	2.63	0.27			
Land use ^c	m ²	2.60			1.42			176.83 ^a		
Cultivation			206.95	21.42		555.86	27.82		144.33 ^b	25.77 ^b
Air pumping [17]	kWh	56.36	206.95	21.42	56.36	206.95	21.42			
Greenhouse heating ^c	kWh	0.00	0.00	0.00	87.91	348.91	6.51			
Concentration[3]			22.37	2.32		22.37	2.32			
Natural settling	kWh	1.63	5.97	0.62	1.63	5.97	0.62			
Centrifugation	kWh	4.47	16.40	1.70	4.47	16.40	1.70			
Biogas production [3,14]			312.31	13.61		312.31	13.61			
Electricity	kWh	25.00	91.80	9.50	25.00	91.80	9.50	25.00	91.80	9.50
District heat	kWh	55.56	220.51	4.11	55.56	220.51	4.11	55.56	220.51	4.11
Biogas upgrading [3,14]			78.54	8.13		78.54	8.13			
Electricity	kWh	21.39	78.54	8.13	21.39	78.54	8.13	21.39	78.54	8.13
Transportation [6,11,26]									26.07	1.98
Ley crop to Digester									4.14	0.31
Digestate to farm land									21.93	1.66
Biomethane (E_p), Mj										
E_{FC} , Mj	1000									
G_{FC} , kg CO ₂ e	1000	650.42			985.58			561.25		
NER		49			54			49		
		1.54			1.01			1.78		

Note: I_i , the amount of Input type i ; E, Energy consumption, $E = I_i \times EI_i$; G, GHGs emission, $G = I_i \times GI_i$; EI_i and GI_i are the energy and GHGs intensities of Input type i , respectively

ภาพที่ 11 แสดงพลังงานสุทธิจากกระบวนการเกิดก๊าซมีเทนระหว่างระบบที่มีสาหร่ายและไม่มีสาหร่าย

ที่มา: Wang et al. (2013)

G. Mann et al. (2009) ศึกษาการนำสาหร่าย *Chlorella vulgaris*. มาทำการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยวิธีอโตเคลปแล้วหมักในถังหมักขนาด 1000 มิลลิลิตร มีค่าความเป็นกรดต่างที่ 5.5 ทำการหมักในสภาวะให้แสงธรรมชาติ ได้ก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของมีเทน 58% คาร์บอนไดออกไซด์ 42% และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 438 พีพีเอ็ม เก็บก๊าซชีวภาพที่ได้ในถุงเก็บก๊าซ จากนั้นเปลี่ยนเป็นใช้สาหร่าย *Chlorella sp.* เลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อเช่นเดิม ทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง ต่อบริเวณเข้ากับถุงเก็บก๊าซที่ได้จากตอนแรกโดยใช้ปั๊มเป็นตัววนระบบ โดยถังหมักทั้ง 3 ชุดการทดลองถูกเลี้ยงโดยใช้ความเข้มแสงที่แตกต่างกัน คือ 35 , 60 และ 100 ไมโครโมลต่อตารางเมตรวินาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดงระบบการเพิ่มเพิ่มประสิทธิภาพก๊าซชีวภาพด้วยสาหร่ายและความเข้มแสงต่างๆ จากหลอดฟลูออโรเรสเซนต์

ที่มา: G. Mann et al. (2009)

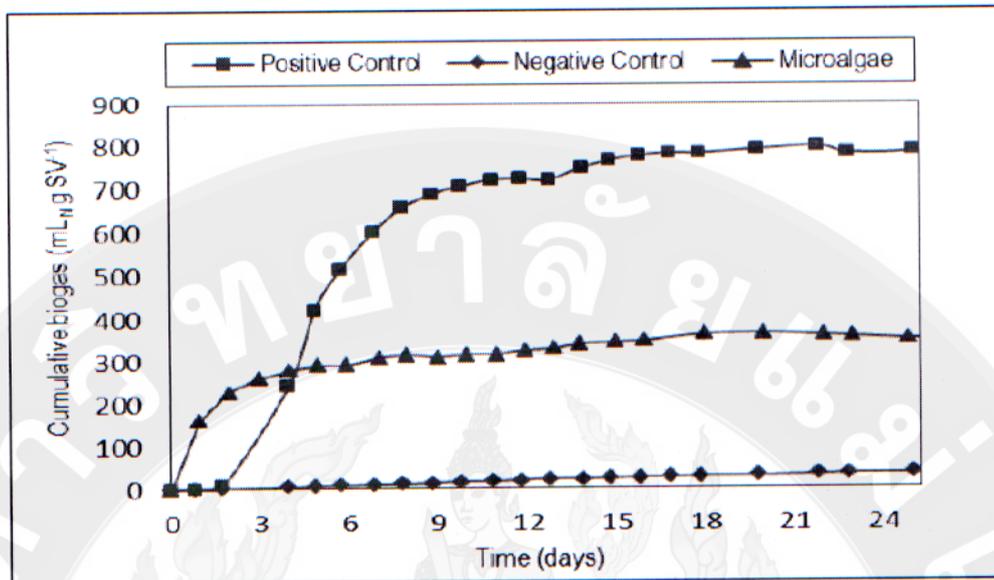
ซึ่งพบว่า อัตราส่วนองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเปลี่ยนไป ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง จากเดิม 42% เหลือ 2.3% , 1.2% และ 2.5% ตามลำดับ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลง 100% ส่วน ก๊าซมีเทนลดลงเล็กน้อย จากเดิม 58% ลดลงเหลือ 52.2% , 50.1% และ 53.3% ตามลำดับ ดังแสดง ในตารางที่ 6 ซึ่งความเข้มแสงที่แตกต่างกันนี้มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและการนำก๊าซ เหล่านี้ไปใช้ในการเจริญเติบโตของสาหร่าย เพราะพบว่ามีก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นในระบบด้วย ส่วน สาเหตุที่ก๊าซมีเทนลดลงเล็กน้อยนั้นอาจมาจากการปนเปื้อนของแบคทีเรียชนิดอื่น เช่น Methanotropic ซึ่งใช้ก๊าซมีเทนในการเจริญเติบโต และยังพบว่าค่าความเป็นกรดต่างยังเพิ่มขึ้นตาม ค่าความเข้มแสงอีกด้วย

ตารางที่ 6 แสดงปริมาณก๊าซต่างๆที่ลดลงจากความเข้มแสงที่ต่างกัน

Gas component		Proportion before cultivation	Proportion after cultivation at light intensity of		
			53	60	100
$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$					
CO ₂	%	41.0	2.3	1.2	2.5
O ₂	%	1.0	21.5	23.4	18.2
H ₂ S	(ppm)	438.0	0.0	0.0	0.0
CH ₄	%	57.5	52.2	50.1	53.3

ที่มา: G. Mann et al. (2013)

Simone et al. (2013) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella vulgaris* ใน reactors ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 วัน ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสม 364 มิลลิลิตร/กรัมของของแข็งระเหยง่าย มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน 62.6 % สอดคล้องกับงานวิจัยของ จิตรลดา และคณะ (2554) ได้ทำการทดลองหมักสาหร่าย *Chlorella sp.* ในขวดหมักทดลองขนาด 500 มิลลิลิตร ที่สภาวะไร้อากาศ แบบกะ (Batch) ไม่มีระบบการกวน จากผลการทดลองพบว่าสาหร่ายแบบเติมจุลินทรีย์ที่สภาวะมีแสงให้ปริมาณก๊าซมีเทนมากที่สุด 60.5% ของปริมาณก๊าซที่ได้ทั้งหมด ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากสาหร่าย ที่ผลิตในช่วงเวลาดังภาพที่



ภาพที่ 13 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากสาหร่าย ที่ผลิตในช่วงเวลาในการหมัก
ในถังปฏิกรณ์แบบ Batch

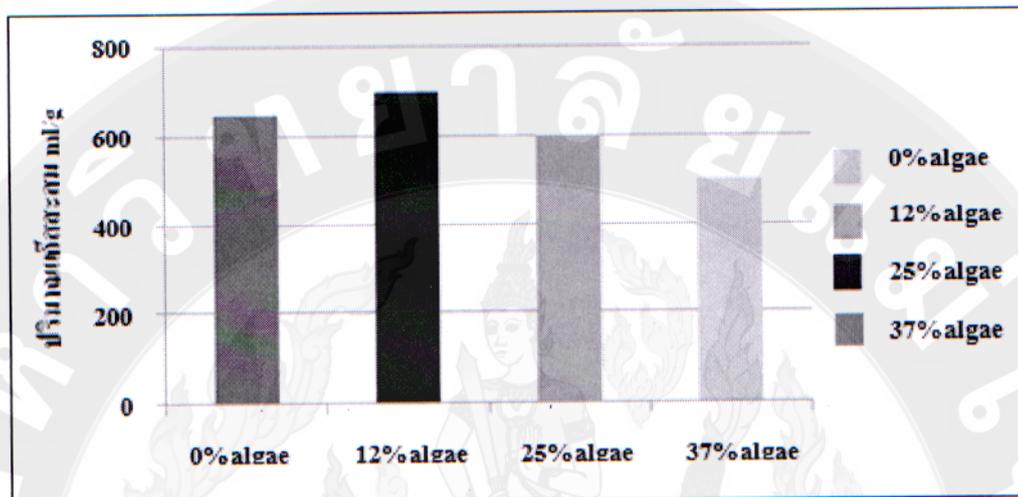
ที่มา: Simone et al. (2013)

J.H. Mussnug et al. (2010) ได้ทำการตรวจสอบหาความเหมาะสมของชนิดของสาหร่าย ทั้งสาหร่ายน้ำจืดและสาหร่ายน้ำเค็มทั้งหมด 6 สายพันธุ์ เพื่อมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และการปรับสภาพของสาหร่าย ในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่าการหมักของสาหร่ายสีเขียว *Chlamydomonas reinhardtii*. ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 587 มิลลิลิตร ในขณะที่การหมัก *Scenedesmus*. ผลิตได้เพียง 287 มิลลิลิตร

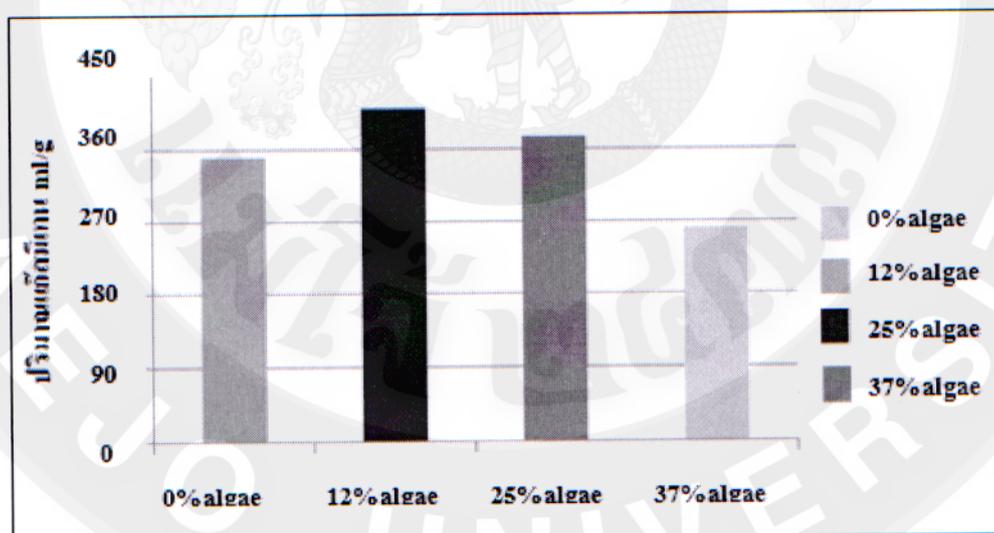
Jehad et al. (2011) พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าหมัก (Grass Silage) จะช่วยเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงถึงร้อยละ 70 - 80 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chynoweth et al. (1993) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์สด เปรียบเทียบกับหญ้าเนเปียร์หมัก พบว่าหญ้าหมักสามารถผลิตก๊าซมีเทน 0.264 ลูกบาศก์เมตรมีเทนต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหยง่าย มีอัตราผลิตสูงกว่าหญ้าสด ซึ่งสามารถผลิตได้ 0.257 ลูกบาศก์เมตรมีเทนต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหยง่าย

Krustok et al. (2013) ได้ศึกษาการหมักก๊าซชีวภาพจากการนำสาหร่ายขนาดเล็กมาหมัก ร่วมกับเศษอาหารจากชุมชน โดยใช้ชุดการทดลองทั้งหมด 4 ชุด คือ ใช้เศษอาหารเพียงอย่างเดียว เติมสาหร่ายลงไป 12% , 25% และ 37% ของน้ำหนักเศษอาหารทั้งหมดตามลำดับ หมักเป็นเวลา 36 วัน ผลที่ได้คือ ชุดการทดลองที่มีสัดส่วนของสาหร่าย 12% มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นมากที่สุด

รองลงมาคือ 25% และ 37% ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่มีแต่เศษอาหารเพียงอย่างเดียวนั้นมี ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อยที่สุด ดังภาพที่ 14 และ 15



ภาพที่ 14 แสดงปริมาณก๊าซสะสมในเวลา 36 วัน



ภาพที่ 15 แสดงปริมาณก๊าซมีเทนในเวลา 36 วัน

Urribarri et al. (2005) ได้ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตก๊าซชีวภาพ จากหญ้าสายพันธ์ต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการทำการวิจัย จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า หญ้าเนเปียร์มีความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหาร เป็นพืชที่เจริญเร็วและมีแนวโน้มในการที่

จะมีศักยภาพสำหรับเป็นพืชพลังงานได้ในอนาคต ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการหมักย่อยในสภาวะไร้อากาศเพื่อใช้เป็นอาหารของจุลินทรีย์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Lauris et al. (2005) ที่พบว่าในใบของหญ้าเลี้ยงช้างมีปริมาณโปรตีนสูง และองค์ประกอบส่วนใหญ่ของใบนั้นจะเป็นพวกกลีโคเซลลูโลสและไฟเบอร์ ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มที่สามารถจะผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้อีกทางหนึ่ง

Lehtomäki et al. (2004) พบว่าการปรับสภาพด้วยด่าง NaOH 2% ใช้เวลาในการปรับสภาพ 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เพิ่มการผลิตก๊าซมีเทน 17% เนื่องจากสารเคมีมีผลต่อโครงสร้างของพืช ทำให้โครงสร้างผนังเซลล์พืชอ่อนตัวลงและสามารถย่อยสลายได้ง่าย Selim et al. (2004) และการปรับสภาพเบื้องต้นช่วยให้ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) มีค่าเพิ่มขึ้น ในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียอินทรีย์ ค่า TS และ VS ส่งผลต่อการออกแบบระบบ เมื่อค่า TS และ VS มีค่าสูงก็จะส่งผลให้กระบวนการสร้างก๊าซชีวภาพมากขึ้นตามไปด้วย แต่หากสูงเกินไปมีผลต่อระบบอย่างมาก เนื่องจากในระบบมีความชื้นน้อยเกินไป ซึ่งความชื้นมีผลต่อการกระจายของเชื้อและสารอาหาร Jewell et al. (1980) ขนาดของวัตถุดิบก็มีผลต่อการย่อยสลายอย่างมาก ยิ่งวัตถุดิบมีขนาดเล็กมากเท่าใดอัตราการย่อยสลายยิ่งมีมากขึ้น เพราะเป็นการเพิ่มพื้นที่ของผิวสัมผัสระหว่างวัตถุดิบและแบคทีเรีย โดย Kaparaju et al. (2002) ได้สรุปไว้ว่าขนาดที่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย และสามารถเพิ่มอัตราการผลิตมีเทน คือ ขนาด 10 มิลลิเมตร สำหรับพืชในกลุ่มหญ้า และกลุ่มถั่ว

Rameshprabu Ramaraj et al. (2014) ศึกษาสภาวะการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยใช้วิธี Photo-Bioreactor หรือการให้แสงสว่างโดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescence) เพื่อเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ความต้องการคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตรึง: คาร์บอน, COD เพิ่มขึ้น สำหรับไนโตรเจน ไนเตรตจะเกิดขึ้นมากในสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นด่างสูง

Rameshprabu Ramaraj et al. (2014) ศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้นคือปริมาณสารอาหาร และแสง โดยให้แสงสว่างโดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescence) ทั้งกลางวันและกลางคืน หรือที่เรียกว่า Photoautotrophic ความสว่างที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้เฉลี่ยอยู่ที่ 27.02 ไมโครโมลต่อตารางเมตร และ อุณหภูมิ 28.38 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และ ของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (VSS) ได้ 0.14 และ 0.08 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ อัตราส่วนคาร์บอนไนโตรเจนและฟอสฟอรัส (CNP) คือ 9: 27: 1

Natthawud Dussadee et al. (2013) ทำการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยการหมักร่วมของมูลสุกรและหญ้าช้าง เพื่อเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้โดยตรงสำหรับรถยนต์ ในระบบการกวน

แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ถังกวน (CSTRs) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสหรือในระยะ Mesophilic ในรูปแบบของก๊าซชีวภาพก๊าซมีเทนอัด (CBG) ได้ผลผลิต 14,400 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (CH_4 60-70%) และปริมาณของ CBG เป็น 9,600 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ได้รับการปรับปรุงโดยใช้ ตะแกรงโมเลกุลเมมเบรน สำหรับการกำจัดความชื้น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ลดลงพร้อมกับ มีเทน (CH_4) ที่เพิ่มขึ้นถึง 90%

N. Tippayawong et al. (2010) การผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดย ของเสียอินทรีย์เป็นสารตั้งต้น ก๊าซชีวภาพโดยทั่วไปมีก๊าซมีเทน (CH_4) 50 - 65% ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่เกิดขึ้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จะลดคุณภาพของก๊าซชีวภาพ ใน งานวิจัยนี้เสนอวิธีการทำให้ก๊าซชีวภาพบริสุทธิ์ คือทำให้ มีเทน(CH_4) มีค่าสูงขึ้น โดยการใส่คอลัมน์ เป็นตัวดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งในคอลัมน์ ประกอบไปด้วย โซดาไฟ (NaOH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH_2) และ Ethanolamin ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$) ซึ่งผลการทดลอง เห็นได้ชัดว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) มีค่าลดลง

Farzad Mohseni et al. (2012) ทำการเพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซชีวภาพจากกระบวนการ ก๊าซ ชิฟเคชั่น (Gasification) ในขั้นตอนของการกระบวนการ Sabatier โดยการฉีดไอน้ำแรงดันสูง (Water gas-Shift) ลงไปที่ชีวมวลที่มีความร้อนสูง พบว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ลดลงและมีเทน (CH_4) สูงขึ้น

F. Osorio et al. (2009) ทำการศึกษากระบวนการหมักก๊าซชีวภาพที่เป็นผลพลอยได้จาก การบำบัดน้ำเสีย ก๊าซที่ได้มีกลิ่นฉุนเนื่องจากมี การปนเปื้อนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่มาก จนเกินไปทั้งนี้ยังส่งผลให้คุณภาพของก๊าซชีวภาพด้อยลงด้วย ผู้ทำวิจัยได้ใช้วิธีการเดิมต่าง นั่นคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่า ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ถูก กำจัดออกไป ส่งผลให้ไม่เกิดกลิ่นเหม็นและเป็นการอัพเกรดก๊าซชีวภาพไปในตัวด้วย

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

วัสดุ อุปกรณ์ และชุดทดสอบ

ในการดำเนินงานวิจัย ได้มีการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดสอบ และติดตามผลของงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็นอุปกรณ์ตามขอบเขตงานวิจัย คือ การหาสัดส่วนที่เหมาะสม การหาสภาวะด้านอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมระหว่างสาหร่ายคอลเรลล่าร่วมกับหญ้าเนเปียร์ และใช้ของเสียจากฟาร์มสุกรเป็นหัวเชื้อตั้งต้นในระดับห้องปฏิบัติการขนาด 2 ลิตร และนำผลการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการนั้นมาใช้ในการหมักร่วมในถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องขนาด 50 ลิตร ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบ

1. หัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella* sp. (TTSTR 8262) จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
2. ของเสียจากฟาร์มสุกรป่าแดง อ.สันทราย จ.เชียงใหม่
3. หญ้าเนเปียร์สด จากไร่คุณเอ็ม อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่
4. หญ้าเนเปียร์หมัก จาก บริษัท ยูเอซี โกลบอล จำกัด (มหาชน) อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่

2. ชุดทดสอบ

1. ชุดทดสอบ BMP (Biochemical Methane Potential)

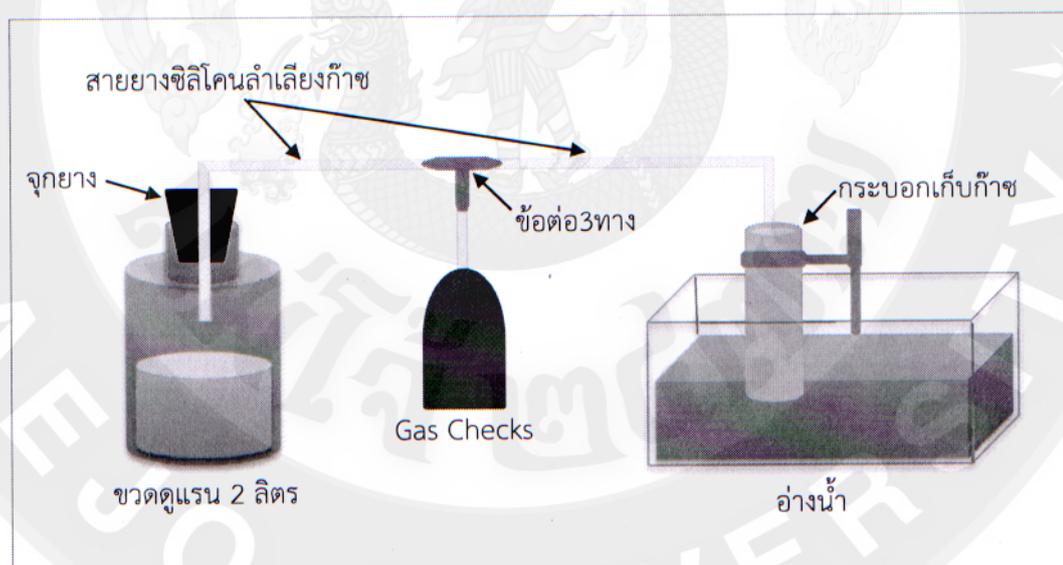
วัสดุอุปกรณ์

1. ขวดดูแรนส์ ขนาด 2 ลิตร
2. กระจกบอทดวง ขนาด 500 มิลลิเมตร
3. สายยางซิลิโคน ขนาด 7 x 10 มิลลิเมตร
4. ตู้อาบน้ำขนาด 12 นิ้ว
5. ทางปลาทองเหลือง ขนาดใหญ่กว่าสายยางซิลิโคนเล็กน้อย
6. สามทางพลาสติก
7. เทอร์โมมิเตอร์สำหรับติดในตู้กระจก
8. ฮีทเตอร์ทำความร้อน

9. ชุดกล่องควบคุมเทอร์โมสแตท

10. จุกยาง ขนาด 12 นิ้ว เจาะรูตรงกลาง

ในส่วนของการทดสอบชุด BMP จะทำการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ซึ่งเป็นการหมักก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ในงานวิจัยนี้ใช้ขวดดูแรน (Duran Bottle) ขนาด 2 ลิตร ปิดสนิทด้วยจุกยางเบอร์ 13 เจาะรูพอดีกับขนาดของสายยางซิลิโคนขนาด 7x10 มิลลิเมตร เป็นสายลำเลียงก๊าซ ผ่านข้อต่อ 3 ทาง ปลายด้านหนึ่งต่อกับสายยางซิลิโคนสั้น สามารถปิด-เปิดได้ เพื่อวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้กับเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Checks) หรือเก็บตัวอย่างก๊าซใส่ถุงเก็บก๊าซ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อกับสายยางซิลิโคนออกไป ยังกระบอกเก็บก๊าซทำจากกระบอกตวงพลาสติกปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่กั้นกระบอกตวงเจาะรูต่อเข้ากับข้อต่อเกลียวนอกทองเหลืองขนาด ¼ จากนั้นใช้ซิลิโคนยาแนวชนิดไสยาแนวโดยรอบรอยต่อ ทำหน้าที่เป็นบาร์โรมิเตอร์ ซึ่งมีสเกลที่กระบอกชัดเจน ลอยอยู่ในอ่างน้ำ โดยการทดลองนี้ใช้ตู้ปลาขนาด 12 นิ้ว ทุกรอยต่อของสายยางซิลิโคน จะพันด้วยพาราฟิล์มเพื่อป้องกันการรั่วซึมของก๊าซ ดังภาพที่ 16



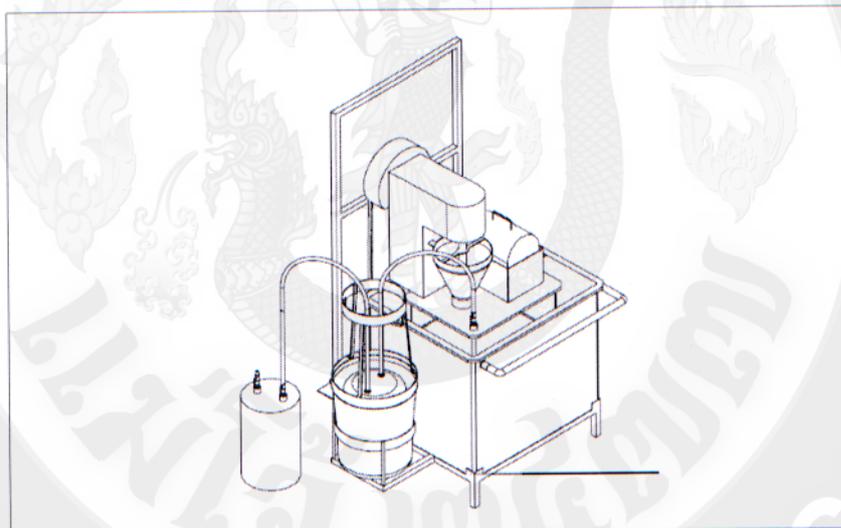
ภาพที่ 16 แบบจำลองชุดทดสอบ BMP

2. ชุดทดสอบ CSTR ขนาด 50 ลิตร

วัสดุอุปกรณ์

1. ชุดถังหมักแบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร โดยใช้แบบจากศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
2. ฮีตเตอร์ทำความร้อน ชุดควบคุมเทอร์โมสตัท
3. เทอร์โทคัพเปิล
4. ถังเก็บก๊าซ

ในส่วนของการขยายสเกลการทดสอบเป็นขนาด 50 ลิตร จะใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 50 ลิตร (อ้างอิงแบบจากศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้) ติดตั้งฮีตเตอร์ ที่มีชุดควบคุมอุณหภูมิและสามารถตั้งเวลาการกวนได้ ดังภาพที่ 17

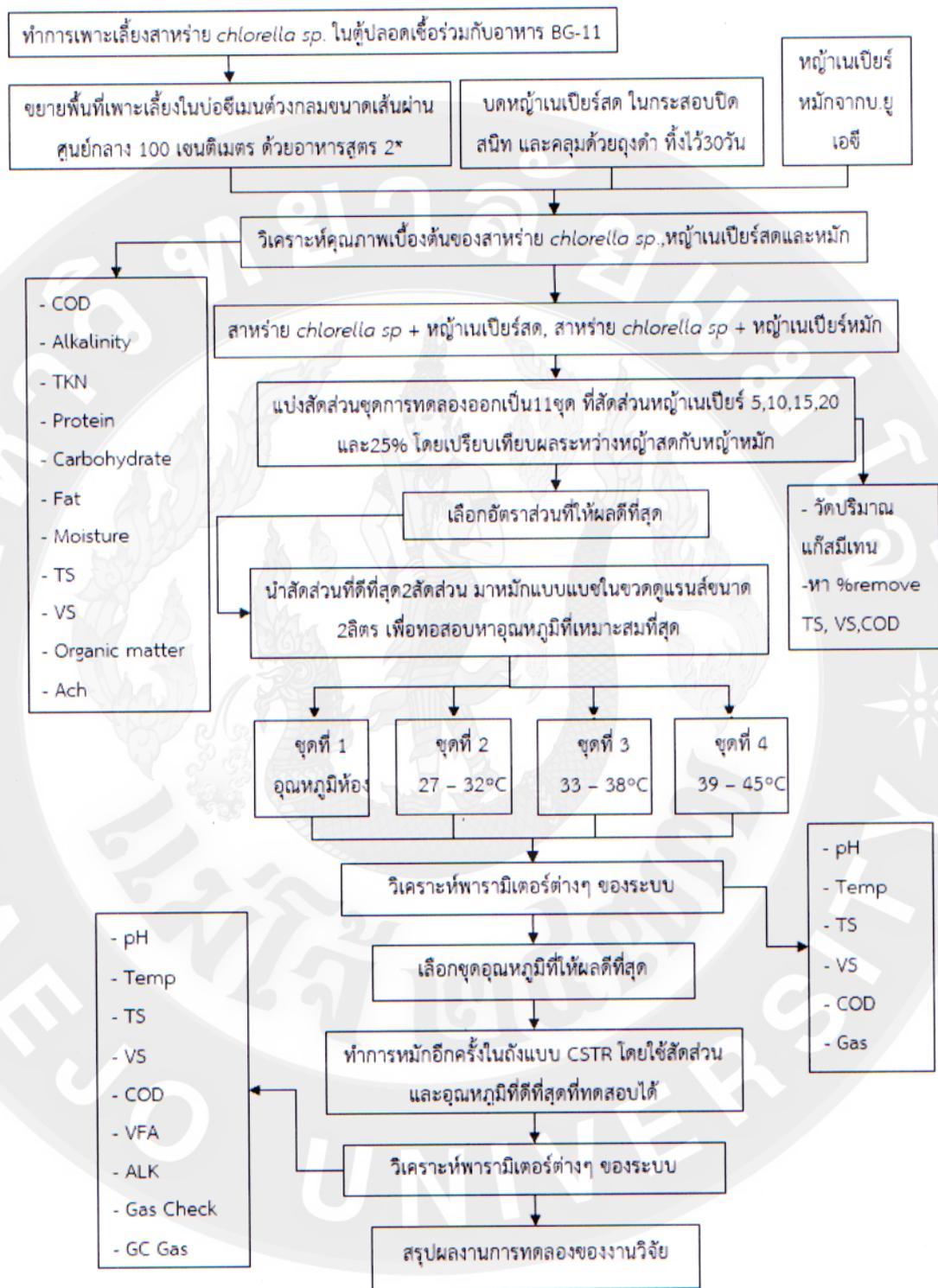


ภาพที่ 17 ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร

ที่มา: ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (2558)

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ที่ทดสอบและการเก็บข้อมูล

พารามิเตอร์	วัตถุประสงค์	วิธีการ
pH	ความเป็นกรด-ด่าง	pH meter
COD (Chemical Oxygen Demand)	ปริมาณสารอินทรีย์	Closed reflux method
TS (Total Solid)	ปริมาณของแข็งรวม	Gravimetric method
VS (Valatile Solid)	ปริมาณสารระเหยง่าย	Gravimetric method
Moisture	ปริมาณน้ำในวัตถุดิบ	APAC, 1995
ก๊าซ และองค์ประกอบของก๊าซ	ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น	Gas Check รุ่น GeoThech Biogas 5000



ภาพที่ 18 กรอบความคิดของงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งวิธีดำเนินการทดลองออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

1. ส่วนที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบ

1. การเตรียมสาหร่าย *Chlorella sp.*

น้ำเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่นำมาใช้ในการขั้นตอนการหมักร่วมของงานวิจัยนี้ เพาะเลี้ยงหัวเชื้อ *Chlorella sp.* ที่ได้จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย จึงจำเป็นต้องขยายปริมาณจากหัวเชื้อ *Chlorella sp.* เข้มข้น โดยขั้นตอนการเพาะเลี้ยงเพื่อให้ได้ปริมาณตามต้องการนั้นเริ่มจาก นำหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* 10 มิลลิลิตร เลี้ยงในอาหารเหลวสำเร็จรูป BG-11 ที่ได้จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยเช่นเดียวกัน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดจุกด้วยสำลี ให้แสงตลอดเวลา และเขย่าทุกๆ 6 ชั่วโมง ในตู้ปลอดเชื้อ ที่อุณหภูมิปกติ ต่อเนื่องเป็นเวลา 7 วัน สังเกตสีเขียวของสาหร่ายที่เข้มข้น บ่งบอกถึงการเพิ่มปริมาณของสาหร่าย *Chlorella sp.* หรืออาจใช้วิธีนับเซลล์จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อความแม่นยำที่มากยิ่งขึ้น เมื่อครบ 7 วัน ทำการขยาย Flask โดยการถ่ายสาหร่าย *Chlorella sp.* จาก Flask 250 มิลลิลิตร ลงใน Flask ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมอาหารเหลวสำเร็จ BG-11 200 มิลลิลิตร ปิดจุกด้วยสำลี ให้แสงตลอดเวลา และเขย่าทุกๆ 6 ชั่วโมง ในตู้ปลอดเชื้อ ที่อุณหภูมิปกติ ต่อเนื่องเช่นเดิมอีกเป็นเวลา 7 วัน ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนได้ปริมาณหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* ประมาณ 20 ลิตร

ขั้นต่อไปเป็นการขยายออกสู่สเกลใหญ่ เพื่อใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป เริ่มจากการเตรียมบ่อซีเมนต์ การทดลองนี้ใช้บ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ล้างบ่อให้สะอาด ปิดรูน้ำออกให้สนิท และใส่น้ำสะอาดลงในบ่อ ให้ระดับน้ำสูงประมาณ 20 เซนติเมตร เติมอาหารที่จะใช้เลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ประกอบด้วย ยูเรีย ฟอสเฟต รำ ปุ๋ยนา ปลาป่น คนส่วนผสมทุกอย่างให้ละลายในน้ำก่อนเติมลงไปบ่อ เพื่อป้องกันให้ตกตะกอนน้อยที่สุด เติมอากาศในน้ำตลอดเวลา ด้วยปั๊มเติมอากาศ บ่อซีเมนต์ควรอยู่ในที่ที่รับแสงแดดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสาหร่าย *Chlorella sp.* ต้องการแสงแดดเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ทั้งไว้ 7 วัน จึงเติมหัวเชื้อ *Chlorella sp.* จำนวน 20 ลิตรที่เตรียมไว้ ลงไป สังเกตความเปลี่ยนแปลงของสีน้ำสาหร่ายในบ่อจากสีครีมขุ่น จะเริ่มเขียวและใสขึ้น ช่วงสัปดาห์ที่ 2-3 ของการเพาะเลี้ยงจะเป็นช่วงที่ดีที่สุด ที่จะนำน้ำสาหร่าย *Chlorella sp.* ไปใช้ในการทดลองหมักร่วม เพราะเป็นช่วงที่สาหร่าย *Chlorella sp.* เจริญเติบโตเต็มที่ โดยข้อมูลการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้น แสดงไว้ในภาคผนวก ก และหากต้องการขยายพันธุ์เพิ่ม ให้ทำการเก็บหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* จากบ่อซีเมนต์แรกนี้ 20 ลิตร

แล้วทำเช่นเดียวกัน เนื่องจากบ่อซีเมนต์ต้องตั้งอยู่ในที่ที่แสงแดดส่องถึง จึงอาจตั้งอยู่กลางแจ้ง ทำให้โอกาสที่ยุงจะมาวางไข่และสิ่งปนเปื้อนอื่นๆตกลงไปนั้น เป็นไปได้ง่าย จึงควรนำผ้าขาวบางแบบบาง มาคลุมบ่อไว้ ไม่ควรใช้แบบหนาหรือที่บจนเกินไป เพราะอาจทำให้การรับแสงนั้นเป็นไปได้ไม่เต็มที่

2. การเตรียมหญ้าเนเปียร์

งานวิจัยชิ้นนี้ เลือกใช้หญ้าเนเปียร์ สายพันธุ์ปากช่อง 1 ซึ่งการคัดเลือกหญ้าเนเปียร์ที่จะนำมาใช้ในการทดสอบนั้น สิ่งแรกที่ต้องคำนึงคือเรื่องของความสมบูรณ์ของหญ้า และอายุการเพาะปลูก หากหญ้าเนเปียร์มีอายุน้อยเกินไปจะมีองค์ประกอบทางเคมีต่ำ หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าคุณค่าทางโภชนาการน้อย จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นพบว่า ควรเลือกใช้หญ้าเนเปียร์ที่มีอายุประมาณ 45 – 60 วัน จะมีองค์ประกอบทางเคมีเหมาะสมที่สุด (Jirapat., 2014)

ในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ จะเริ่มจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ที่แตกต่างกัน คือ หญ้าเนเปียร์สดที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดปุ๋ย จนมีขนาดเล็กลง ประมาณครึ่งเซนติเมตร และแบบไซเลจหรือที่เรียกว่าหญ้าหมัก คือหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการบดและหมักด้วยแบคทีเรีย ซึ่งในช่วงแรกหญ้าเนเปียร์หมักที่นำมาทดสอบนั้นได้มาจาก บริษัท ยูเอซี โภภอล จำกัด(มหาชน) อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่ แต่ในช่วงหลังทางบริษัท ได้ประสบปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบ จึงต้องทำการหมักหญ้าเนเปียร์เอง โดยการนำหญ้าเนเปียร์สดจากไร่คุณเอ็ม อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่ มาบดละเอียด ด้วยเครื่องบดปุ๋ยจนมีขนาดเล็ก ประมาณครึ่งเซนติเมตร แล้วนำไปใส่ถุงกระสอบพลาสติกที่ปิดสนิท คลุมด้วยถุงดำอีกชั้น เพื่อกันไม่ให้อากาศเข้า ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 เดือน แบคทีเรียจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แล้วจึงนำหญ้าเนเปียร์หมักนั้นมาใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป

3. การเตรียมหัวเชื้อตั้งต้น

ในการหมักก๊าซชีวภาพนั้น ช่วงแรกๆปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้ามาก เนื่องจากไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยากว่าแบคทีเรียจะเดินระบบย่อยสลายวัตถุดิบนั้นใช้เวลาค่อนข้างมาก จึงต้องมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นคือ หัวเชื้อตั้งต้นลงไป เพื่อย่นระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรก ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้หัวเชื้อตั้งต้นเป็นของเสียจากฟาร์มสุกรป่าแดง อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ เมื่อได้ตะกอนจากฟาร์มสุกรดังกล่าวมาแล้วทำการเปิดฝาแล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการตกตะกอน เพราะในการทดสอบจะเลือกใช้เพียงส่วนที่เป็นตะกอนชั้นสีดำเท่านั้น

2. ส่วนที่ 2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของหญ้าเนเปียร์และสาหร่าย *Chlorella sp.*

1. การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของหญ้าเนเปียร์และสาหร่าย *Chlorella sp.*

โดยเบื้องต้นได้ทำการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นจากแหล่งทุติยภูมิ ซึ่งเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องก่อน เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ ทั้งในด้านเกษตร เกี่ยวกับการเพาะปลูกหรือด้านกายภาพ ด้านชีวภาพ ด้านเคมีและข้อมูลทั่วไปที่เกี่ยวข้อง เช่น ปริมาณธาตุอาหาร คุณค่าทางโภชนาของวัตถุดิบ ดังนี้

ปริมาณธาตุ ประกอบด้วย

- Carbon (C)
- Hydrogen (H)
- Oxygen (O)
- Nitrogen (N)

คุณค่าทางโภชนา ได้แก่

- Carbohydrate
- Protein
- Fat
- Fiber

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของหญ้าเนเปียร์และสาหร่าย *Chlorella* sp.

ในการทดสอบนี้จะใช้การปรับสภาพหญ้าเนเปียร์สองแบบ คือแบบสดที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดปุ๋ย ให้มีขนาดประมาณ 0.5 - 1.0 เซนติเมตร และแบบหมัก หรือที่เรียกอีกชื่อว่า หญ้าไซเลจ แต่เนื่องจากการทดสอบในงานวิจัยชิ้นนี้ จะใช้การเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ 2 แบบ คือแบบสดและแบบหมัก ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของหญ้าเนเปียร์นั้น จึงต้องแบ่งออกเป็น 2 ตัวอย่างด้วย โดยวิธีการวิเคราะห์นั้น จะคล้ายกันเนื่องจากหญ้าเนเปียร์มีลักษณะแรกเริ่มเป็นของแข็ง ในกรณีที่ต้องใช้ตัวอย่างหญ้าเนเปียร์ในลักษณะของของเหลว จะนำตัวอย่างหญ้าเนเปียร์ประมาณ 200 กรัม มาโคลกละเอียด ห่อตัวอย่างด้วยผ้าขาวบาง แล้วบิดเอาแต่น้ำมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งหากเป็นการทดสอบค่าความต้องการออกซิเจนในปฏิกิริยาเคมี (COD) จะใช้น้ำตัวอย่างหญ้าเนเปียร์ประมาณ 0.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้เป็น 10 มิลลิลิตร และเติมสารเคมีต่างๆในขั้นต่อไปตามลำดับ ส่วนการวิเคราะห์อื่นๆ จะประกอบด้วย วัตถุแห้ง (Dry Matter) ปริมาณเถ้า (Ash) ความชื้น (Moisture) ปริมาณสารอินทรีย์ (Organic Matter) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณของแข็ง (TS) ปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS)

ส่วนการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาหร่าย *Chlorella sp.* นั้น จะทำเช่นเดียวกับหญ้าเนเปียร์ ต่างกันที่สถานะของสาหร่าย *Chlorella sp.* นั้นเป็นของเหลวอยู่แล้ว จึงสามารถนำมาใช้ทดสอบได้เลย ไม่ต้องผ่านกระบวนการการโกลกละเอียด

3. ส่วนที่ 3 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และหญ้าเนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด

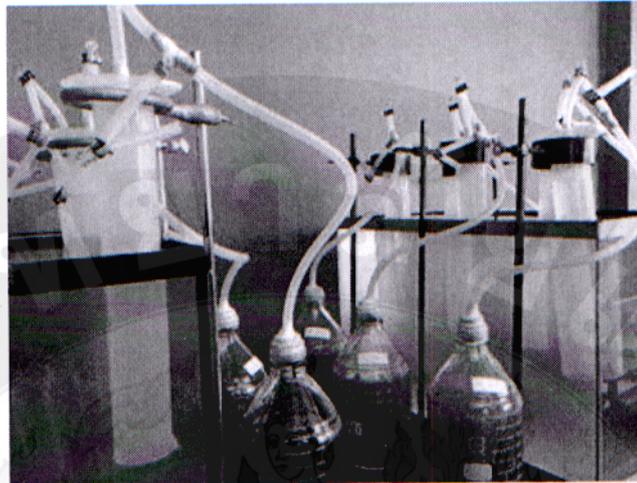
โดยใช้วัตถุดิบที่ผ่านการปรับสภาพจากส่วนที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ มาหมักร่วมกับน้ำสาหร่าย *Chlorella sp.* ด้วยกระบวนการ BMP (Biochemical Methane Potential) ใช้วิธีการหมักแบบแบดซ์ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งชุดการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ประกอบด้วย ขวดดูแรน (Duran Bottle) ขนาด 2 ลิตร จำนวน 22 ใบ (ทดสอบ 2 ซ้ำ) ต่อเชื่อมกับอุปกรณ์วัดก๊าซ โดยการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นนั้น ทำโดยอาศัยหลักการแทนที่ของน้ำ ประกอบไปด้วย ตู้กระจกใสบรรจุน้ำ ครอบกบตวงพลาสติกขนาด 500 มิลลิลิตร ปริมาณก๊าซทั้งหมดนั้นถูกเก็บไว้ในส่วนนี้ และสามารถอ่านค่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นได้จากสเกลข้างครอบกบ การทดสอบนี้ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ (ทดสอบโดยใช้อุณหภูมิห้องอยู่ที่ 28-31 องศาเซลเซียส) แสดงในภาพที่

19



ภาพที่ 19 วัสดุอุปกรณ์ของชุดการทดลอง

จากภาพที่ 20 จะเห็นว่า ขวดดูแรนขนาด 2 ลิตรที่ใช้หมักนั้น ปิดสนิทด้วยจุกยางเจาะรูพอดีกับขนาดของสายยางซิลิโคน เป็นสายลำเลียงก๊าซชีวภาพ ผ่านข้อต่อ 3 ทาง ปลายด้านหนึ่งต่อกับสายยางซิลิโคนสั้น สามารถปิด-เปิดได้ เพื่อเก็บตัวอย่างก๊าซใส่ถุงเก็บก๊าซ และนำมาวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้กับเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Checks) ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อสายยางซิลิโคนออกไปยังครอบกบเก็บก๊าซ ซึ่งมีสเกลที่ครอบกบชัดเจน ลอยอยู่ในตู้กระจก โดยการทดลองนี้ใช้ตู้ปลาขนาด 12 นิ้ว ทุกรอยต่อจะพันด้วยพาราฟิล์มเพื่อป้องกันการรั่วออกของก๊าซชีวภาพ ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การต่อชุดอุปกรณ์เก็บก๊าซเข้ากับขวดหมัก และการพันด้วยพาราฟิล์มเพื่อป้องกันอากาศ
เข้า - ออก

เพื่อเลือกใช้ประเภทการปรับสภาพและอัตราส่วนที่เหมาะสมของสาหร่าย *Chlorella sp.* ต่อหญ้าเนเปียร์ ที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพดีที่สุดในการศึกษา

- 1 การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับหญ้าเนเปียร์สดบด
- 2 การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับหญ้าเนเปียร์หมัก
- 3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TS), ของแข็งระเหยได้ (VS) และความต้องการออกซิเจนในปฏิกิริยาเคมี (COD)

ทำการประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการ BMP (Biochemical Methane Potential) โดยแบ่งตัวอย่างการหมักออกเป็น 11 ตัวอย่าง ในการทดลองนี้จะคิดตามปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ที่ระบบรับได้ 5 อัตราส่วน คือ 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% เป็นเวลา 20 - 30 วัน จนกว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะเริ่มลดลง จนมีค่าน้อยมาก ปริมาตรของการหมักรวมนั้นอยู่ที่ 1,800 มิลลิลิตร โดยทำการเติมหัวเชื้อลงไป 100 มิลลิลิตรด้วย

วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมของระบบ โดยพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้แก่

- TS (Gravimetric method)
- VS (Gravimetric method)
- Moisture (Gravimetric method)
- Organic matter (Dry method)

- การวิเคราะห์ปริมาณความต้องการออกซิเจนในระบบ COD (Closed reflux method)
- ความเป็นกรด – ต่างของระบบ (pH)
- ปริมาณก๊าซชีวภาพ

โดยทำการวิเคราะห์ 2 ครั้ง คือวันแรก และวันสิ้นสุดการทดสอบ เนื่องระบบหมักแบบแบตซ์ คือการเติมวัตถุดิบเพียงครั้งเดียว และไม่มีการรบกวนระบบอีก แล้วนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพการกำจัด ประกอบกับการให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุด เพื่อนำสัดส่วนที่ดีที่สุดไปใช้ในการทดสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อไป

4. ส่วนที่ 4 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และหลู๋นาเนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อนำสัดส่วนที่ได้จากส่วนที่ 3 มาทดสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

ทำการประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการ BMP (Biochemical Methane Potential) โดยใช้สัดส่วนที่ดีที่สุดจากการทดสอบในส่วนที่ 2 แบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง (3 ช่วงอุณหภูมิ) โดยแบ่งเป็น ชุดที่ 1 อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิอยู่ในช่วง 28 – 31 องศาเซลเซียส ไม่คงที่), ชุดที่ 2 27±2 องศาเซลเซียส, ชุดที่ 3 35±2 องศาเซลเซียส และชุดที่ 4 45±2 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งชุดการทดลองที่ 1-3 ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ฮีตเตอร์ และกล่องควบคุมอุณหภูมิ ที่ตั้งค่าไม่ให้อุณหภูมิเกินจากที่กำหนดไว้

ตารางที่ 8 ชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ช่วงอุณหภูมิ
1	อุณหภูมิห้อง
2	27±2°C
3	35±2°C
4	45±2°C

หมายเหตุ : ขวดดูแลนขนาด 2 ลิตร ปริมาตรหมัก 1.8 ลิตร

4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

- TS (Gravimetric method)
- VS (Gravimetric method)
- Moisture (Gravimetric method)

- Organic matter (Dry method)
- การวิเคราะห์ปริมาณความต้องการออกซิเจนในปฏิกิริยาเคมี COD (Closed reflux method)
- ความเป็นกรด – ด่างของระบบ (pH)
- ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ
- องค์ประกอบของก๊าซ (ประกอบด้วย มีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์, ออกซิเจน, ไฮโดรเจนซัลไฟด์)

โดยทำการวิเคราะห์ 2 ครั้ง คือวันแรก และวันสิ้นสุดการทดสอบ เนื่องระบบหมักแบบแบดซ์คือการเติมวัตถุดิบเพียงครั้งเดียว และไม่มีการรบกวนระบบอีก เช่นเดียวกับในการทดสอบส่วนที่ 3 แล้วนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบ หาประสิทธิภาพการกำจัด ประกอบกับการให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพ และองค์ประกอบของก๊าซมีเทนที่ได้ เพื่อนำสัดส่วนที่ดีที่สุด ไปใช้กับการทดสอบในระบบที่ใหญ่ขึ้น คือขนาด 50 ลิตร และเป็นการหมักแบบต่อเนื่อง

5. ส่วนที่ 5 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และหญ้าเนเปียร์ โดยใช้สัดส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด จากส่วนที่ 3 และ 4 มาทดสอบในถังหมักแบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร

นำสัดส่วนการหมักรวมของสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับหญ้าเนเปียร์ และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด ที่ได้จากการทดสอบในส่วนที่ 3 และ 4 มาทำการหมักแบบ CSTR ในถังหมักขนาด 50 ลิตร ที่ปริมาตรการหมักคือ 90% ของถังหมัก และมีการฟีดวัตถุดิบออก และเติมเข้า ครั้งละ 1 ลิตร วันละ 1 ครั้ง ทุกวัน ควบคุมอุณหภูมิด้วยฮีตเตอร์ ตั้งเวลากวน ทุกๆ 3 ชั่วโมง ครั้งละ 5 นาที วันปริมาณก๊าซชีวภาพทุกวัน และวัดองค์ประกอบก๊าซ ทุกวันจันทร์ – ศุกร์ ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบด้วยพารามิเตอร์ดังนี้

- TS (Gravimetric method)
- VS (Gravimetric method)
- Moisture (Gravimetric method)
- Organic matter (Dry method)
- การวิเคราะห์ปริมาณความต้องการออกซิเจนในปฏิกิริยาเคมี COD (Closed reflux method)
- ความเป็นกรด – ด่างของระบบ (pH)

โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะทำการวิเคราะห์ 3 ครั้งต่อสัปดาห์ และวิเคราะห์ ค่ากรดไขมันระเหย (VFA) ในวันแรกและวันสุดท้ายของการวิเคราะห์ โดยระยะเวลาการทดสอบ คือ 1 เดือน และ

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการหมักร่วมของสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับ
หญ้าเนเปียร์ ในส่วนนี้จะส่งก๊าซชีวภาพที่ได้วิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Gas
Chromatography (GC) ด้วย



บทที่ 4

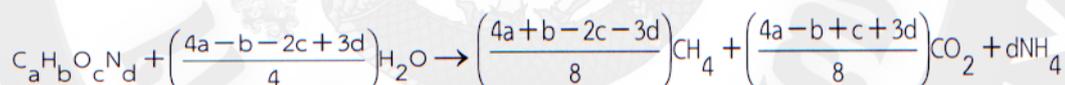
ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

ในบทนี้จะทำการนำเสนอผลวิเคราะห์การดำเนินงานวิจัย โดยจะแบ่งผลการวิจัยออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของหญาเนเปียร์และสาหร่าย *Chlorella sp.* ส่วนที่ 2 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และหญาเนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด ส่วนที่ 3 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และหญาเนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อนำสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด มาทดสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสม และส่วนที่ 4 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และหญาเนเปียร์ โดยใช้สัดส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสม ที่วิเคราะห์ได้ มาทดสอบในถังหมักแบบต่อเนื่องขนาด 50 ลิตร ซึ่งผลการทดสอบมีรายละเอียดต่อไปนี้

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของหญาเนเปียร์และสาหร่าย *Chlorella sp.*

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของหญาเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 อายุประมาณ 50 วัน จากไร่คุณเอี่ยม อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่ พบว่าหญาเนเปียร์ มีองค์ประกอบของปริมาณสารอินทรีย์ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมันและเยื่อใยรวม เท่ากับ 35.1 , 14.8 , 1.3 และ 40.4% ของวัตถุแห้ง ตามลำดับ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ เฉลาและคณะ (2553) ซึ่งในใบของหญาเนเปียร์นั้น องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพวกกลีโคเซลลูโลสและไฟเบอร์ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติอย่างรวดเร็ว เมื่อนำมาหมักจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารใดใดเพิ่มเติม ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนหรือในสภาวะไร้อากาศ เพื่อให้จุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิต และเปลี่ยนสารอาหารเหล่านี้เป็นก๊าซชีวภาพ (ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2555)และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีแบบ Ultimate Analysis เพื่อหาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหญาเนเปียร์ และสาหร่าย *Chlorella sp.* ดังแสดงในตารางที่ 8 และ 9 โดยธาตุองค์ประกอบเหล่านี้ สามารถนำมาคำนวณเข้ากับสมการที่ 12 (น้ำเพชรและสุภาววัฒน์, 2555) เพื่อหาปริมาณก๊าซชีวภาพและสัดส่วนของก๊าซมีเทน จากธาตุ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N) ที่เป็นองค์ประกอบ

ในส่วนของสาหร่าย *Chlorella sp.* จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาหร่าย *Chlorella sp.* พบว่า สาหร่ายมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ได้แก่ โปรตีน 46.4% คาร์โบไฮเดรต 19.9% ไขมัน 14.8% และเยื่อใย 0.3% โดยน้ำหนัก ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Steenblock (1987) และยังประกอบด้วยสารอาหารพวกวิตามิน เกลือแร่ ในปริมาณที่สูง อีกทั้งสาหร่ายยังมีความสามารถในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง และมีความทนทานต่อ สภาวะที่รุนแรง โดยสาหร่ายบางสายพันธุ์สามารถเจริญเติบโตในสภาวะที่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นแสง และอุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นจึงเห็นว่าสาหร่ายมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหมักร่วมสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ และจากการสืบค้นข้อมูลเบื้องต้น ได้พบว่า สาหร่ายขนาดเล็กหรือ Microalgae บางสายพันธุ์ มีปริมาณน้ำมันและปริมาณสารอินทรีย์ไฮโดรคาร์บอนเหมาะสมที่จะผลิตเป็นพลังงาน และใช้เวลาในการเจริญเติบโตเพียง 1-2 สัปดาห์ก็สามารถนำไปสกัดน้ำมันได้ เมื่อคำนึงถึงสภาวะแวดล้อมของประเทศไทย พบว่ามีสภาพเหมาะสมในการทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายท้องถิ่นเซลล์เดียวหรือที่เรียกว่า คลอเรลล่า(*Chlorella*) มากกว่าสาหร่ายอื่นๆ จากการศึกษาของ Kuruno et al. (1995) ; นงคณูช และเพ็ญจิตร (2545) เกี่ยวกับสาหร่าย *Chlorella sp.* เพื่อเป็นกระบวนการหลักในการเปรียบเทียบเลือกใช้ พบว่าสาหร่าย *Chlorella sp.* มีข้อได้เปรียบ คือให้อัตรากาเจริญเติบโตที่รวดเร็วเมื่อเทียบกับต้นไม้ ทำให้ขยายพันธุ์ได้ง่าย ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปผลิตในเชิงอุตสาหกรรม



ตารางที่ 9 องค์ประกอบธาตุและปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของหญ้าเนเปียร์

Content	From Sample	Mol ¹	CH ₄ *	CO ₂ *	NH ₃ *	Biogas
CaHbOcNd	(g/100 g D.M.)	(Mole/100 g)	((4a+b-2c-3d)/8)	((4a-b+2c+3d)/8)	(d)	L/kg**
C	43.2	3.60				
H	5.16	5.16				
O	41.49	2.59	1.76	1.84	0.09	902.08
N	1.22	0.09				
%Content	91.07		47.84	49.79	2.36	

หมายเหตุ : Mol¹ = น้ำหนัก(g)/มวลโมเลกุล , * Percentage by mass , ** dry weighth

ตารางที่ 10 องค์ประกอบธาตุและปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของสาหร่าย *Chlorella sp.*

Content	From Sample	Mol ¹	CH ₄ *	CO ₂ *	NH ₃ *	Biogas
CaHbOcNd	(g/100 g D.M.)	(Mole/100 g)	$((4a+b-2c-3d)/8)$	$((4a-b+2c+3d)/8)$	(d)	L/kg
C	44.995	3.75				
H	7.15	7.15				
O	31.19	1.95	2.03	1.71	0.66	1,060.1
N	9.195	0.66				
%Content	92.53		46.18	38.91	14.91	

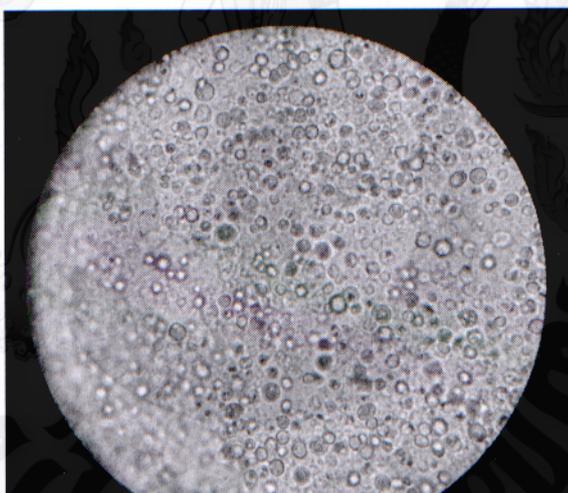
หมายเหตุ : Mol¹ = น้ำหนัก(g)/มวลโมเลกุล , * Percentage by mass

จากตารางที่ 9 และ 10 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน และไนโตรเจนของหญ้าเนเปียร์ มาคำนวณในสมการที่ 12 พบว่าหญ้าเนเปียร์สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงถึง 47.84% ซึ่งหมายความว่าสารอินทรีย์ในหญ้าเนเปียร์ สามารถย่อยสลายและผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงถึง 902.08 L/kg ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2557 และศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2558 คือ 49.81 และ 48.38% ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) สามารถคำนวณปริมาณของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากธาตุองค์ประกอบของพืช โดยพบว่า สาหร่าย *Chlorella sp.* มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนสูงถึง 46.16% ซึ่งหมายความว่าสารอินทรีย์ใน สาหร่าย *Chlorella sp.* สามารถย่อยสลายและผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1,060.09 L/kg ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Word et al.(2008) ที่กล่าวว่า การผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลของพืชมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน 48-65% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 36-41%

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์แบบประมาณ หรือ Proximate Analysis และพารามิเตอร์อื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 11 ซึ่งหญ้าเนเปียร์ที่นำมาใช้สำหรับการทดลองในครั้งนี้มีอายุประมาณ 50 วัน จากการศึกษาข้อมูลของหญ้าเนเปียร์พบว่า หญ้าที่มีอายุน้อยจะมีองค์ประกอบทางเคมีต่ำกว่าหญ้าที่มีอายุมาก (เฉลาและคณะ, 2553) และจากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 10 นั้น พบว่ามีสัดส่วนของวัตถุแห้งถึง 19.5% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการหมัก โดยสัดส่วนของวัตถุแห้งที่เหมาะสมนั้นอยู่ที่ 26% (Haigh, 1990) และหากพิจารณาสัดส่วนของเยื่อใยรวมของหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 นี้ อยู่ที่ 40.4% ซึ่งสูงกว่าหญ้าในลักษณะใกล้เคียงกันคือ หญ้ากินนี หญ้ารูซี่ หญ้าขน และหญ้านาคา ซึ่งมีสัดส่วนของเยื่อใยรวมเท่ากับ 21.89, 22.60, 22.26 และ 34.75% ตามลำดับ โดยเยื่อใยหรือไฟเบอร์

ของหญ้านั้นเมื่อถูกย่อยสลายจะถูกนำไปเป็นอาหารของจุลินทรีย์ในระบบ ดังที่กล่าวไว้ในทฤษฎีแล้ว (รุ่งตะวัน, 2558)

ส่วนการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* นั้น ทำการเพาะเลี้ยงจากหัวเชื้อ ดังที่กล่าวไว้ในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบและภาคผนวก ก ซึ่งสาหร่ายที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้ มีอายุ 2 สัปดาห์ โดยอายุ 2 สัปดาห์นี้ เลือกได้จากการนำตัวอย่างสาหร่ายในบ่อเลี้ยง มาส่องกล้องจุลทรรศน์ทุกวัน เพื่อบันทึกเซลล์ แสดงในภาพผนวก 4 ส่วนภาพที่ 21 แสดงภาพเซลล์สาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ส่องได้จากกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งการวัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายสามารถทำได้หลายวิธี (Kumar and Singh, 1976 ; สมพงษ์, 2544) และพบว่าหลังจาก 2 สัปดาห์นั้น สาหร่ายเริ่มตาย จำนวนสาหร่ายที่เห็นจากกล้องจุลทรรศน์เริ่มลดลง เป็นไปตามทฤษฎีของ Kumar and Singh (1976) ที่ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ก



ภาพที่ 21 แสดงภาพเซลล์สาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ส่องได้จากกล้องจุลทรรศน์

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์แบบ Proximate analysis และพารามิเตอร์อื่นๆของหญาเนเปียร์และสาหร่าย *Chlorella sp.*

พารามิเตอร์	หญาเนเปียร์	สาหร่าย <i>Chlorella sp.</i>
COD mg/L	11,946.00	7,868.85
TS mg/kg	241,168.70	1,635.40
VS mg/kg	216,143.10	1,124.30
C/N Ratio	35.40	4.89
% Moisture	5.79	6.67
% วัตถุแห้ง	25.67	9.50
% เถ้า	15.74	3.20
Volatile matter	76.89	66.92
pH	7.2	7.3

ผลการวิเคราะห์การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และ
 หนุ่เนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม

1. การปรับสภาพหนุ่เนเปียร์

ในส่วนนี้จะเป็นการหมักร่วมโดยใช้น้ำเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับหนุ่เนเปียร์ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจะมีการเปรียบเทียบระหว่างการหมักโดยใช้นุ่เนเปียร์สด อายุ 50 วัน ที่ผ่านการปรับสภาพทางกายภาพ (Physical pretreatment) โดยการบด ด้วยเครื่องบดปุยให้มีขนาดประมาณ 0.5 – 1 เซนติเมตร เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับจุลินทรีย์ (Kaparaju et al., 2002) และหนุ่เนเปียร์ที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี (Chemical pretreatment) โดยการหมักกับจุลินทรีย์แล้ว จาก บริษัท ยูเอซี โกลบอล จำกัด(มหาชน) อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่ การปรับสภาพวัตถุดิบเบื้องต้นจะช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ ทำให้โครงสร้างพืชอ่อนตัวลงง่ายต่อการย่อยสลาย (Selim et al., 2004) อีกทั้งการทำหนุ่เนเปียร์นั้น จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นการหมัก จะไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในขั้นตอนการหมักเสมือนเป็นการทำให้เกิดการย่อยสลายผนังเซลล์เบื้องต้น (ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2556) หลังจากทำการปรับสภาพแล้ว ได้นำวัตถุดิบมาวิเคราะห์หาปริมาณความต้องการออกซิเจนในระบบ (COD), ปริมาณของแข็ง (TS), ของแข็งระเหยได้ (VS), ค่าวิเคราะห์ความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk), ค่าความเป็นกรด (Volatile Fatty Acid, VFA) และ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 คุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบ

content	<i>Chlorella sp.</i>	การปรับสภาพหนุ่เนเปียร์		หัวเชื้อ
		สด	หมัก	
COD (mg/L)	7,868.85	11,946.00	14,644.07	21,559.32
TS (mg/kg)	23,159.39	241,168.7	244,628.00	64,591.25
VS (mg/kg)	7,536.07	216,143.1	218,290.53	42,405.60
Alk (mgCaCO ₃ /L)	120.0	-	900.0	291.2

ตารางที่ 12 (ต่อ)

content	<i>Chlorella sp.</i>	การปรับสภาพหญ้าเนเปียร์		หัวเชื้อ
		สด	หมัก	
VFA (mgCH ₃ COOH/L)	58.4	-	798.7	136.4
pH	7.3	7.2	6.7	7.1

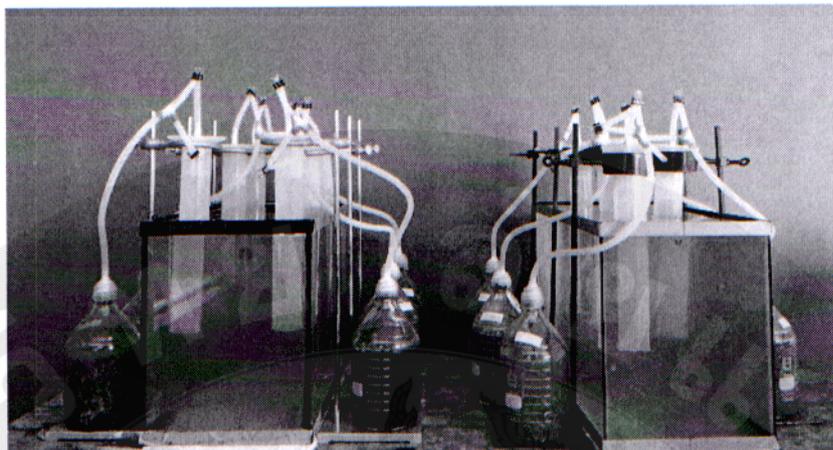
จากข้อมูลคุณสมบัติทางเคมีในตารางที่ 12 จะเห็นว่า หญ้าเนเปียร์นั้นมีปริมาณค่าของแข็งระเหย (VS) ค่อนข้างสูง แสดงว่ามีปริมาณสารอินทรีย์อยู่มาก อีกทั้งเมื่อทำการคำนวณอัตราส่วนระหว่าง VFA / ALK ของทั้งหญ้าเนเปียร์ อยู่ที่ 0.88 และสาหร่าย *Chlorella sp.* พบว่ามีค่าอยู่ที่ 0.48 โดยเฉพาะอัตราส่วนของสาหร่าย *Chlorella sp.* ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กระทรวงพลังงานกล่าวไว้คือ 0.4 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

2. การประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ทำการทดสอบการหมักก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยกระบวนการ BMP (Biochemical Methane Potential) โดยหมักแบบแบทช์ในระดับห้องปฏิบัติการเป็นการหาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม คือ การหาปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสมกับระบบซึ่งให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด นำหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการปรับสภาพแล้วทั้ง 2 แบบ มาหมักร่วมกับน้ำเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ในขวดดูแรนขนาด 2 ลิตร

ทำการนำหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการปรับสภาพแล้วทั้ง 2 แบบ มาหมักร่วมกับน้ำเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ด้วยกระบวนการ BMP (Biochemical Methane Potential) แบบแบตช์ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ขวดดูแรนขนาด 2 ลิตร โดยชุดหมักนี้แสดงในภาพที่ 22 เพื่อเลือกใช้ประเภทการปรับสภาพและอัตราส่วนที่เหมาะสมของสาหร่าย *Chlorella sp.* ต่อหญ้าเนเปียร์ โดยศึกษา

1. การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับหญ้าเนเปียร์สด
2. การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับหญ้าเนเปียร์หมัก



ภาพที่ 22 ถังหมักก๊าซชีวภาพและระบบกักเก็บก๊าซในระดับห้องปฏิบัติการ

ทำการประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการ BMP (Biochemical Methane Potential) โดยแบ่งตัวอย่างการหมักออกเป็น 10 ตัวอย่าง คัดอัตราส่วนโดยใช้ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ที่ระบบปรับได้ 5 อัตราส่วน คือ 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% และ วัสดุติดหมักแบบ 1 : 1 โดยน้ำหนัก คือ หญ้าเนเปียร์สดหมักกับหัวเชื้อ (C1), หญ้าเนเปียร์หมักหมักกับหัวเชื้อ (C2), สาหร่าย *Chlorella sp.* หมักกับหัวเชื้อ (C3) และสาหร่ายหมักกับหญ้าเนเปียร์ (C4) แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ ปริมาตรหมักรวม 1,800 มิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ 13 เป็นเวลา 21 วัน

ตารางที่ 13 สัดส่วนของวัสดุที่ใช้ในการหมัก เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม

ชุดทดลอง	% ของแข็ง รวม	น้ำเลี้ยง สาหร่าย (ml)	หญ้าเนเปียร์ สด (kg)	หญ้าเนเปียร์ หมัก (kg)	หัวเชื้อ (ml)
1	5%	1,615	0.085	-	100
2	10%	1,530	0.170	-	100
3	15%	1,445	0.255	-	100
4	20%	1,360	0.340	-	100
5	25%	1,275	0.425	-	100
6	5%	1,615	-	0.085	100

ตารางที่ 13 (ต่อ)

ชุดทดลอง	% ของแข็ง	น้ำเลี้ยง	หญ้าเนเปียร์	หญ้าเนเปียร์	หัวเชื้อ (ml)
	รวม	สำหรับ (ml)	สด (kg)	หมัก (kg)	
7	10%	1,530	-	0.170	100
8	15%	1,445	-	0.255	100
9	20%	1,360	-	0.340	100
10	25%	1,275	-	0.425	100

จากผลการการประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการ (Biochemical Methane Potential, BMP) ทำการเลือกสำหรับ *Chlorella sp.* ในการทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ใช้เวลาในการหมักรวม 21 วัน วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมของระบบ โดยพารามิเตอร์ต่างๆที่วิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TS), ปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS), ปริมาณความต้องการออกซิเจนในระบบ (COD) รวมถึงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TS), ของแข็งระเหยได้ (VS), ปริมาณความต้องการออกซิเจนในระบบ (COD) และความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของระบบ แสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการหมักร่วมเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม ก่อน - หลังเดินระบบ

ชุดทดลอง	COD (mg/L)		%COD _{remo}	VS (mg/L)		%VS _{remove}	TS (mg/L)		%TS _{remove}
	ก่อน	หลัง		ก่อน	หลัง		ก่อน	หลัง	
C1	9,882.0	3,723.0	62	8,807.0	2,804.0	68	12,129.0	8,593.0	29
C2	10,428.0	6,989.0	33	13,411.0	5,820.0	56	15,832.0	10,700.0	32
C3	8,475.0	1,862.0	78	5,526.0	1,895.0	65	7,299.0	5,705.0	21
C4	14,847.0	2,014.0	86	16,532.0	2,332.0	85	19,666.0	14,200.0	27
1	56,841.0	26,146.9	54	14,106.0	3,385.4	76	27,774.0	17,775.4	36
2	60,959.0	22,554.8	63	16,063.0	5,943.3	63	29,889.0	21,221.2	29
3	65,077.0	26,681.6	59	18,021.0	6,848.0	62	32,004.0	23,683.0	26
4	69,195.0	26,294.1	62	19,978.0	7,791.4	61	35,106.0	24,574.2	30

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ชุดทดลอง	COD (mg/l)			VS (mg/l)			TS (mg/l)		
	ก่อน	หลัง	%COD _{remo}	ก่อน	หลัง	%VS _{remove}	ก่อน	หลัง	%TS _{remove}
5	73,313.0	21,993.9	70	21,936.0	8,116.3	63	36,234.0	28,262.5	22
6	56,485.0	8,472.8	85	15,970.0	2,395.5	85	30,060.0	11,723.4	61
7	60,171.0	7,822.2	87	19,758.0	2,371.0	88	34,480.0	11,378.4	67
8	63,860.0	7,663.2	88	23,545.0	2,119.1	91	38,790.0	7,758.0	80
9	67,553.0	7,430.8	89	27,333.0	2,733.3	90	43,108.0	9,483.8	78
10	71,248.0	7,124.8	90	31,120.0	2,800.8	91	47,408.0	9,955.7	79

หมายเหตุ : ชุดการทดลองที่

C1= หญ้าเนเปียร์สดหมัก+หัวเชื้อ

C2= หญ้าเนเปียร์หมักหมัก+หัวเชื้อ

C3= สาหร่าย+หัวเชื้อ

C4= สาหร่าย+หญ้าเนเปียร์สด

1= ปริมาณของแข็งรวม 5% (สาหร่าย+หญ้าสด+หัวเชื้อ)

2= ปริมาณของแข็งรวม 10% (สาหร่าย+หญ้าสด+หัวเชื้อ)

3= ปริมาณของแข็งรวม 15% (สาหร่าย+หญ้าสด+หัวเชื้อ)

4= ปริมาณของแข็งรวม 20% (สาหร่าย+หญ้าสด+หัวเชื้อ)

5= ปริมาณของแข็งรวม 25% (สาหร่าย+หญ้าสด+หัวเชื้อ)

6= ปริมาณของแข็งรวม 5% (สาหร่าย+หญ้าหมัก+หัวเชื้อ)

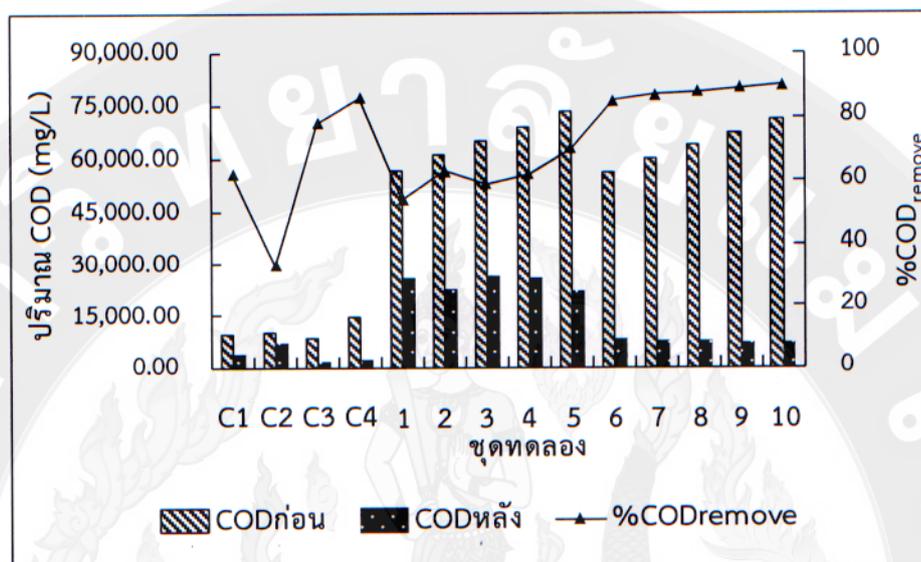
7= ปริมาณของแข็งรวม 10% (สาหร่าย+หญ้าหมัก+หัวเชื้อ)

8= ปริมาณของแข็งรวม 15% (สาหร่าย+หญ้าหมัก+หัวเชื้อ)

9= ปริมาณของแข็งรวม 20% (สาหร่าย+หญ้าหมัก+หัวเชื้อ)

10= ปริมาณของแข็งรวม 25% (สาหร่าย+หญ้าหมัก+หัวเชื้อ)

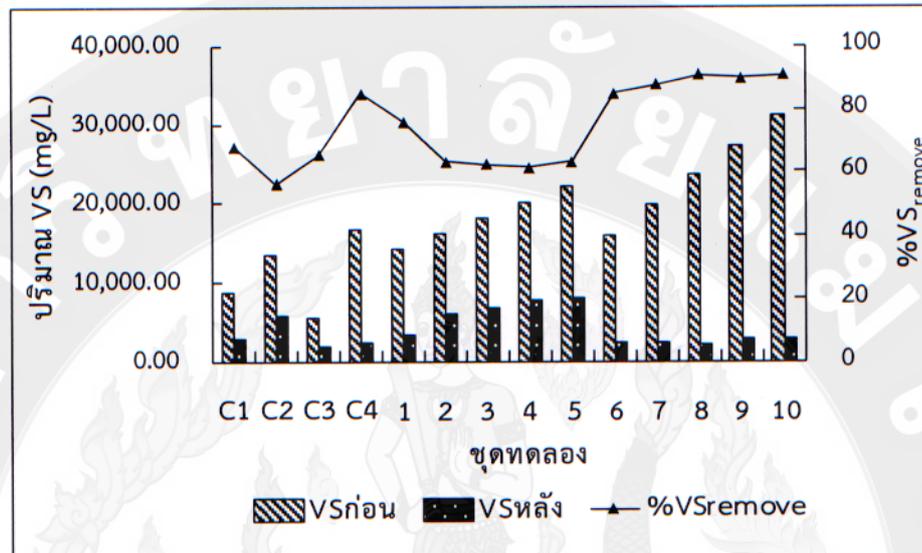
จากตารางที่ 14 โดยทำการวิเคราะห์ 2 ครั้ง คือ เริ่มต้นและสิ้นสุดปฏิกิริยาที่ 21 วัน (ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีน้อยมาก หรือไม่เกิดแล้ว) สามารถอธิบายได้ดัง ภาพที่ 23 - 25



ภาพที่ 23 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบหมักก๊าซชีวภาพ

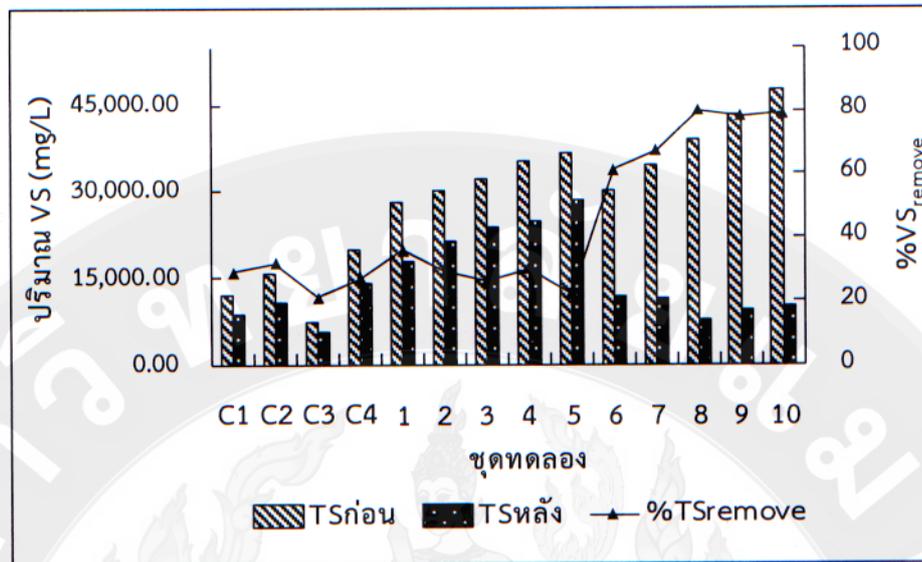
จากภาพที่ 23 จะแสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนของแท่งกราฟก่อน และหลังการทดลอง โดยเส้นตรงบนสุดนั้นจะเป็นการแสดงประสิทธิภาพการกำจัด COD เป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงที่สุดนั้นเป็นของชุดการทดลองที่ 6 - 10 ซึ่งได้จากการหมักร่วมโดยใช้หญ้าเนเปียร์หมักร่วมกับสาหร่าย *Chlorella sp.* และที่ชุดการทดลองที่ 10 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 25% นั้น กำจัด COD ได้สูงที่สุด 64,123.2 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 90% รองลงมาคือชุดการทดลองที่ 9 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 20% และชุดการทดลองที่ 8 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% มีประสิทธิภาพการกำจัด COD 89% และ 88% ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันจะเห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่เป็นการหมักแยกของวัตถุดิบแต่ละชนิดนั้น (C1 - C4) มีประสิทธิภาพการกำจัดไม่เท่าการหมักร่วม แม้ว่าชุดการทดลอง C3 ที่ได้จากการหมักของสาหร่าย *Chlorella sp.* กับหัวเชื้อ และ C4 ที่ได้จากการหมักสาหร่าย *Chlorella sp.* กับหญ้าเนเปียร์สดโดยไม่มีการเติมหัวเชื้อ จะมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ค่อนข้างสูงก็ตาม แต่ชุดการทดลองที่ 6 - 10 ที่ได้จากการหมักร่วมระหว่างหญ้าเนเปียร์หมักร่วมกับ สาหร่าย *Chlorella sp.* และมีการเติมหัวเชื้อลงไปด้วยมีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องมาจากมีปริมาณของสารอินทรีย์มากกว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD นี้ แสดงถึงประสิทธิภาพในการทำงานของ

จุลินทรีย์ในชุดการทดลอง ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของอนุภาคของแข็ง และสารละลาย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ได้ (Korenaga et al.,1990)



ภาพที่ 24 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ของระบบหมักก๊าซชีวภาพ

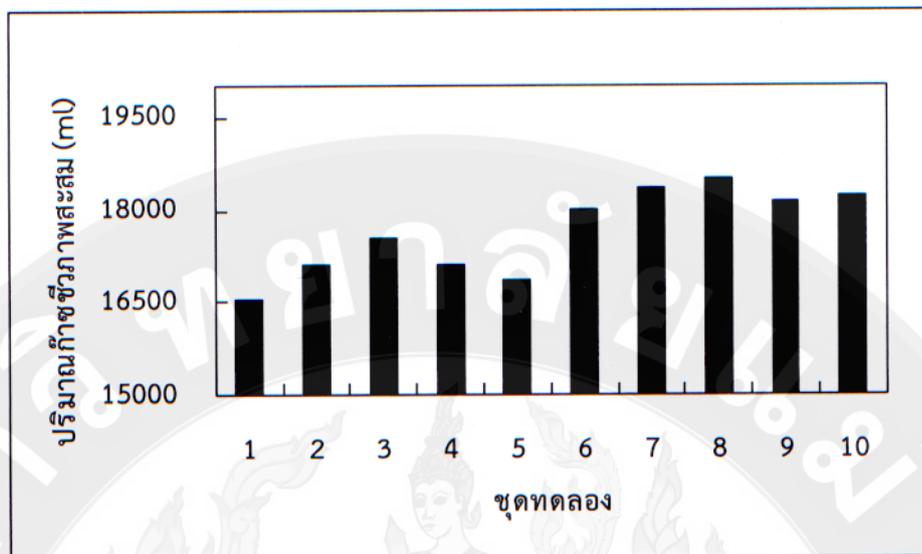
ภาพที่ 24 เป็นภาพที่แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในรูปของเปอร์เซ็นต์ จะเห็นความแตกต่างของแท่งกราฟก่อน และหลังการทดลองอย่างชัดเจน โดยประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้น เป็นคือชุดการทดลองที่ 6 – 10 ซึ่งได้จากการหมักร่วมโดยใช้ หนุ่เนเปียร์หมักร่วมกับสาหร่าย *Chlorella sp.* มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งสูงที่สุดตั้งแต่ 61 – 80% และที่ชุดการทดลองที่ 8 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% นั้น กำจัด COD ได้สูงที่สุด 31,032 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 80% รองลงมาคือชุดการทดลองที่ 10 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 25% และชุดการทดลองที่ 9 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 20% ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันจะเห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่เป็นการหมักแยกของ วัตถุดิบแต่ละชนิดนั้น (C1 –C4) มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดไม่สูงเท่าการหมักแบบหมัก ร่วมเช่นเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัด COD



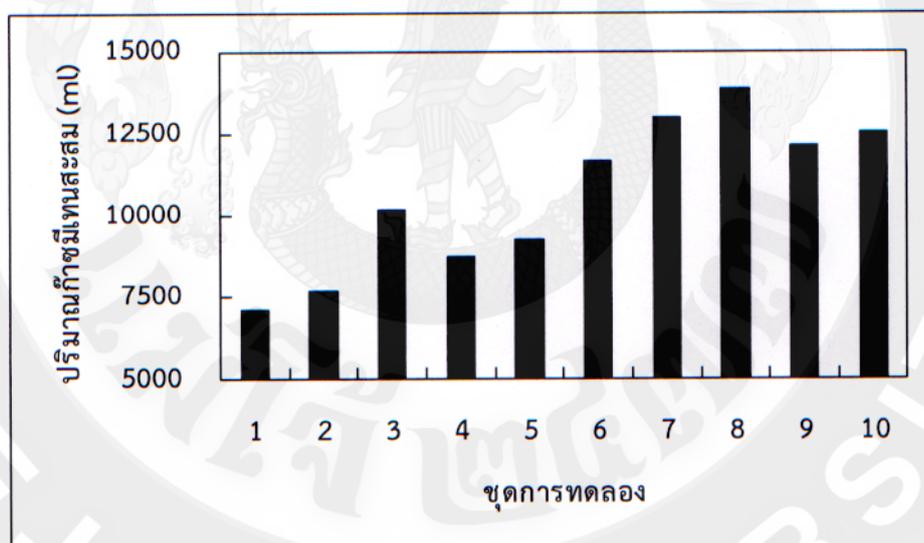
ภาพที่ 25 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ของระบบหมักก๊าซชีวภาพ

จากภาพที่ 25 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย จะเห็นความแตกต่างของกราฟเส้นตรงที่บอกเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการกำจัดอย่างชัดเจน ว่าชุดการทดลองที่ 6 – 10 ซึ่งได้จากการหมักร่วมโดยใช้ เหง้าเนเปียร์หมักร่วมกับสาหร่าย *Chlorella sp.* มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายสูงสุด เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัด COD และประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) โดยชุดการทดลองที่ 8 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และชุดการทดลองที่ 10 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 25% นั้น กำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ได้สูงที่สุด 21,425.9 - 28,320 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 91%

เนื่องจากการหมักร่วมเพื่อหาประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุด ในระหว่างทำการหมักร่วมจึงมีการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักทุกวัน โดยดูจากการแทนที่ของน้ำในบารอมิเตอร์น้ำของชุดทดสอบ และนำมาคำนวณเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ดังแสดงในภาพที่ 26 และ 27 เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้



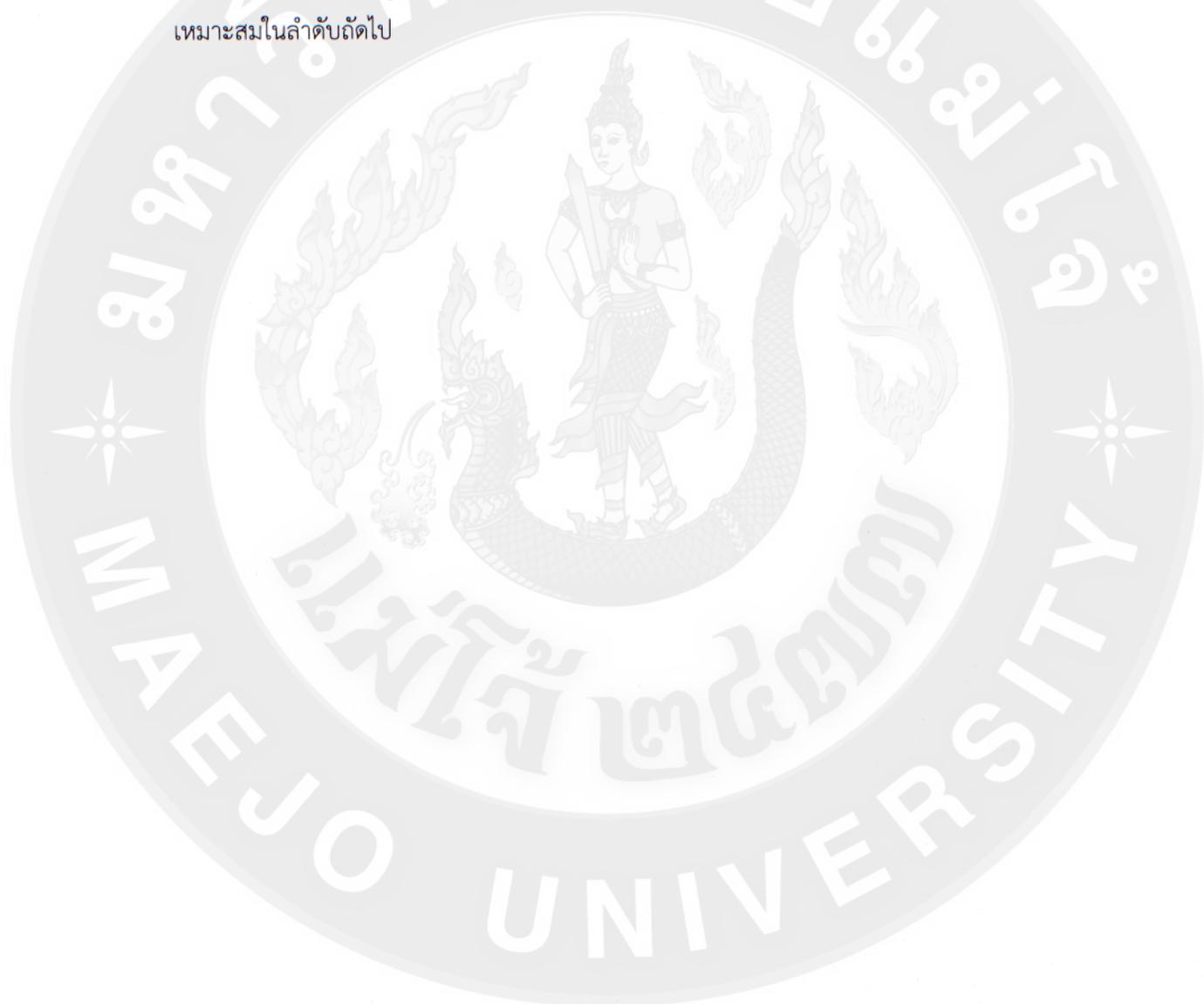
ภาพที่ 26 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นในระบบหมักก๊าซชีวภาพ ระยะเวลารทดลอง 21 วัน



ภาพที่ 27 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นในระบบหมักก๊าซชีวภาพ ระยะการทดลอง 21 วัน

จากการทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการหมักร่วมระหว่างสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับหญ้าเนเปียร์ โดยการเปรียบเทียบระหว่างการใช้อุณหภูมิหมักและหญ้าสดนั้น จากกราฟในภาพที่ 27 และ 28 จะเห็นได้ชัดเจนว่าในช่วงการทดลอง 21 วัน จนสิ้นสุดปฏิกิริยานั้น ชุดการทดลองที่ 6 – 10 จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงกว่าชุดการทดลองที่ 1 – 5 ซึ่งชุดการทดลองที่ 6 – 10 นั้น เป็นชุดการทดลองที่ใช้ สาหร่าย *Chlorella sp.* หมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์

หมัก ซึ่งพบว่าชุดการทดลองที่ 8 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน เท่ากับ 12,333.3 มิลลิลิตร CH_4 / กรัม $\text{VS}_{\text{remove}}$ ในระยะเวลาการหมัก 21 วัน คิดเป็น 587.3 มิลลิลิตร CH_4 / กรัม $\text{VS}_{\text{remove}}$ ต่อวัน ใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ 7 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 10% คือ 485.02 มิลลิลิตร CH_4 / กรัม $\text{VS}_{\text{remove}}$ โดยมีศักยภาพการย่อยสลายร้อยละ 34.7 และ 32.57 ตามลำดับ และจากข้อมูลที่ผ่านมาจึงพบว่า ชุดการทดลองที่ 8 และ 9 นั้น มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD , VS, TS สูงอีกด้วย จึงเลือก 2 ชุดการทดลองนี้เข้าสู่กระบวนการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในลำดับถัดไป



ผลการวิเคราะห์การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และ
 หญ้าเนเปียร์ ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม

1. การประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

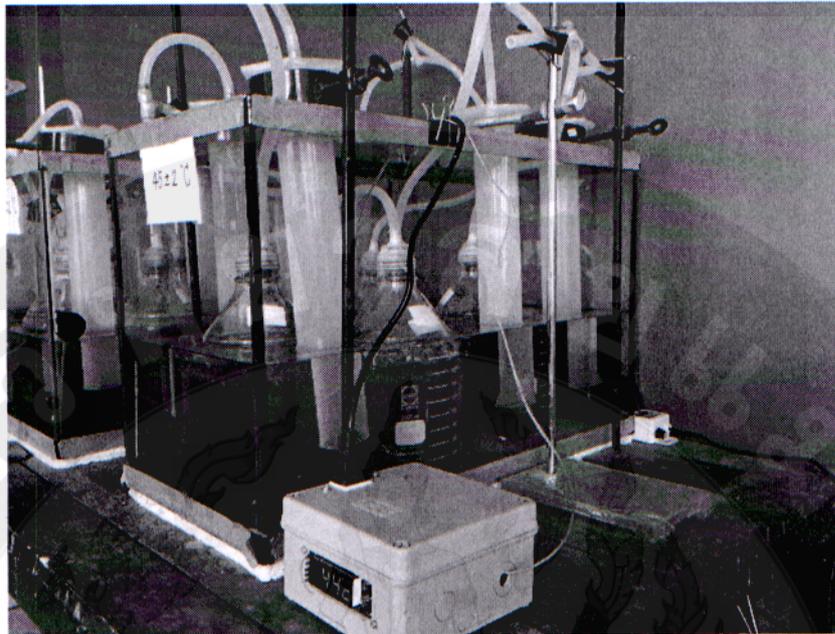
เพื่อให้การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพที่ดีและเพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนนั้น จะต้องพิจารณาปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีหลายอย่าง เกี่ยวกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องย่อยหรือเครื่องหมักนั้น เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับเครื่องหมัก สามารถลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาภายในระบบได้ (Ramaraj and Unpaprom, 2016)

ทำการทดสอบการหมักก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยกระบวนการ BMP (Biochemical Methane Potential) โดยหมักแบบแบตช์ เพื่อนำสัดส่วนที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพดีที่สุดจากการทดลองก่อนหน้า คือ ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 10% และ 15% มาหมักซ้ำเพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทำการแบ่งช่วงอุณหภูมิออกเป็น 4 ช่วง คือ อุณหภูมิห้อง (ตั้งทิ้งไว้ โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิ ณ เวลาที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 25 – 31 องศาเซลเซียส), 27 ± 2 องศาเซลเซียส, 35 ± 2 องศาเซลเซียส และ 45 ± 2 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ช่วงอุณหภูมิ และสัดส่วนการหมัก

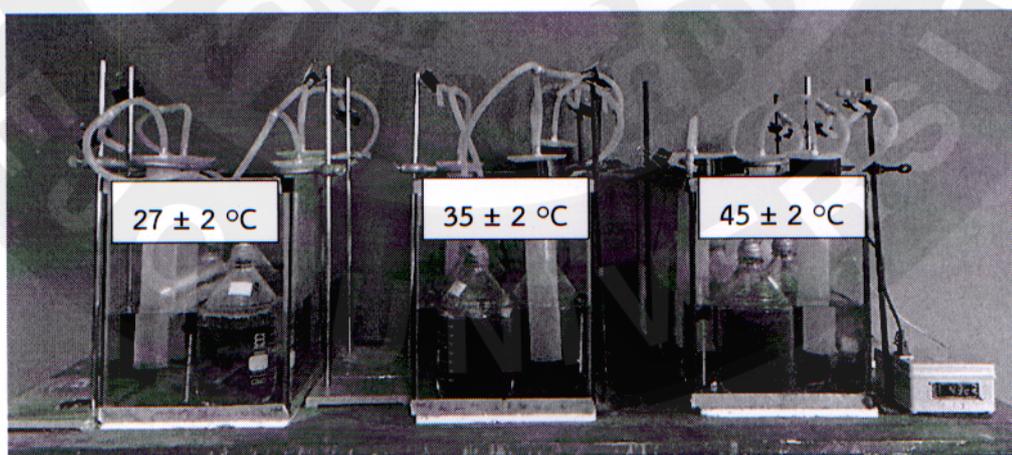
ชุดทดลอง	ช่วงอุณหภูมิ	สัดส่วนการหมัก (ปริมาณของแข็งทั้งหมด,%)	
		10% TS	15% TS
1	27 ± 2 °C	10% TS	15% TS
2	35 ± 2 °C	10% TS	15% TS
3	45 ± 2 °C	10% TS	15% TS
4	อุณหภูมิห้อง.	10% TS	15% TS

โดยการควบคุมอุณหภูมินั้น ทำได้โดยการให้ความร้อนด้วยฮีเตอร์ที่มีตัวควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) สามารถควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิดที่ก้ำกัณฑ์ได้ ผ่านน้ำที่หล่อขวดหมักในตู้กระจก แสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 การติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิ ในระบบหมักก๊าซชีวภาพ ขนาด 2 ลิตร

จากภาพที่ 28 จะเห็นว่าการให้อุณหภูมิแก่ขวดหมักนั้น อาศัยน้ำในตู้กระจกเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนแก่ขวดหมัก ส่วนชุดตัวอย่างที่เป็นอุณหภูมิห้องนั้น จะตั้งทิ้งไว้ด้านนอกตู้กระจก อุณหภูมิจะเปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อมซึ่งอยู่ในช่วง 25 – 31 องศาเซลเซียสไม่คงที่ และต่อชุดเก็บก๊าซเข้ากับขวดหมักเช่นเดิม ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 ชุดถังหมักก๊าซชีวภาพและระบบกักเก็บก๊าซในระดับห้องปฏิบัติการ

ซึ่งชุดการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ประกอบด้วย ขวดดูแรน (Duran Bottle) ขนาด 2 ลิตร ใช้เวลาในการหมักร่วมจนสิ้นสุดปฏิกิริยาที่ 23 วัน วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมของระบบ โดยพารามิเตอร์ต่างๆที่วิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TS), ปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS), ปริมาณความต้องการออกซิเจนในระบบ (COD) ซึ่งจะวิเคราะห์ในวันแรกและวันสุดท้ายของการทดลอง รวมถึงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมด(TS), ของแข็งระเหยได้ (VS), ปริมาณความต้องการออกซิเจนในระบบ (COD) ความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของระบบ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น และองค์ประกอบของก๊าซที่ได้ แสดงในตารางที่ 16 – 18

ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการหมักร่วมเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม ก่อน - หลังเดินระบบ

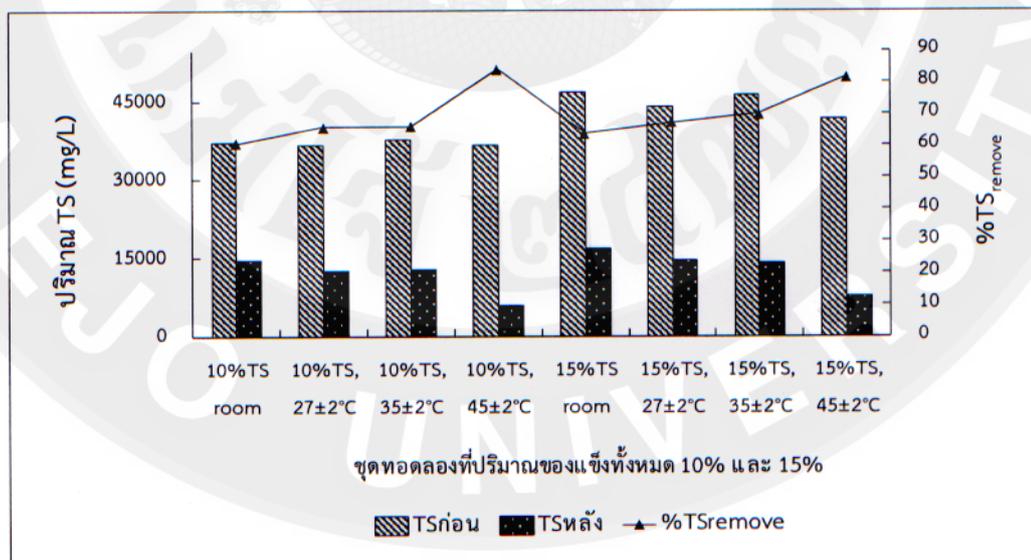
ชุดทดลอง	รายละเอียดชุดการทดลอง	TS (mg/l)		VS (mg/l)		COD (mg/l)	
		ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	10%TS room	37140.0	14640.6	20361.6	6941.3	56967.7	18349.3
2	15%TS room	46951.0	17024.4	20104.4	6521.9	58903.2	18283.6
3	10%TS, 27±2°C	36728.5	12583.2	19983.4	6092.9	55032.3	21374.5
4	15%TS, 27±2°C	44177.9	14490.4	26573.2	7100.4	56967.7	23191.6
5	10%TS, 35±2°C	37790.9	12811.1	20911.6	4882.9	55225.8	13182.4
6	15%TS, 35±2°C	46412.7	13988.8	27465.4	5581.0	55806.4	11535.2
7	10%TS, 45±2°C	36706.0	5869.3	24706.0	3577.4	54451.6	9006.3
8	15%TS, 45±2°C	41830.1	7717.6	23802.5	3132.4	56967.7	6591.2

จากตารางที่ 16 โดยทำการวิเคราะห์ 2 ครั้ง คือ วันแรกและวันสุดท้ายของการทดลอง โดยใช้ระยะเวลาการหมักทั้งหมด 23 วัน พบว่าค่าพีเอช (pH) ในระบบ อยู่ในช่วง 6.86-7.44 และยังพบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) และปริมาณ COD ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งตารางที่ 17 จะแสดงการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 17 ประสิทธิภาพการกำจัด TS, VS และ COD หลังการทดลอง 23 วัน

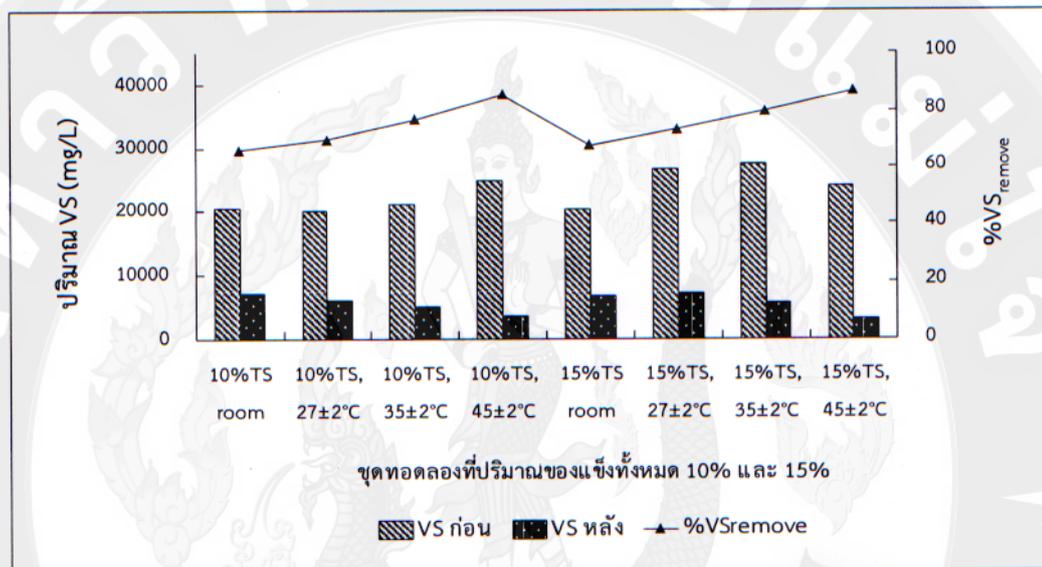
ชุดการทดลอง	รายละเอียดชุดการทดลอง	%TS remove	%VS remove	%COD remove
1	10%TS room	60.58	65.91	67.79
2	15%TS room	63.74	67.56	68.96
3	10%TS, 27±2°C	65.74	69.51	61.16
4	15%TS, 27±2°C	67.20	73.28	59.29
5	10%TS, 35±2°C	66.10	76.65	76.13
6	15%TS, 35±2°C	69.86	79.68	79.33
7	10%TS, 45±2°C	84.01	85.52	83.46
8	15%TS, 45±2°C	81.55	86.84	88.43

และเมื่อนำผลการทดลองมาเขียนเป็นกราฟแท่ง เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตแนวโน้ม ประสิทธิภาพการกำจัดได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยจะแบ่งเป็น 2 กราฟ คือ กราฟแสดง ประสิทธิภาพการกำจัด ที่สัดส่วน 10%TS และ 15%TS แสดงในภาพที่ 30 และ 31 ตามลำดับ



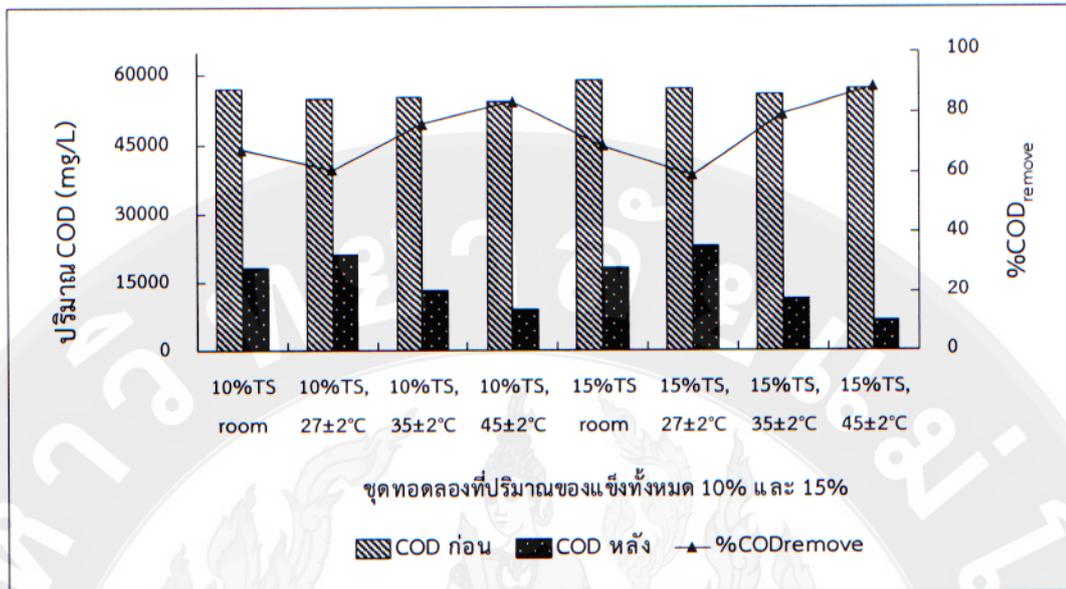
ภาพที่ 30 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมด ในระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ

จากภาพที่ 30 จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดของทั้งสองสัปดาห์นั้นมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และสูงที่สุดในช่วงอุณหภูมิที่ 45 ± 2 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายถึงในช่วงอุณหภูมินี้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยชุดการทดลองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 10% นั้น สามารถกำจัด TS ได้สูงถึง 30,836.7 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 84%



ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่าย ในระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ

จากภาพที่ 31 และข้อมูลในตารางที่ 16 จะพบว่าในขั้นตอนการเริ่มต้นของปฏิกริยานั้น ปริมาณของแข็งระเหยง่ายค่อนข้างสูง และลดลงเมื่อปฏิกริยาสิ้นสุดลง เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 29 จะเห็นได้ชัดว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายของชุดการทดลองทั้งสองนั้น มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยชุดการทดลองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% สามารถกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่ายได้ดีที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 45 ± 2 องศาเซลเซียส ซึ่งกำจัดได้ถึง 20,670 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 86% สอดคล้องกับผลการทดลองของ Fisher et al. (1983) ที่พบว่าในช่วงแรกของการทดลองจะมีแนวโน้มของของแข็งระเหยง่ายในปริมาณที่สูง และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ปริมาณของแข็งระเหยง่ายจะลดลงจนสิ้นสุดปฏิกริยา ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึงร้อยละ 65

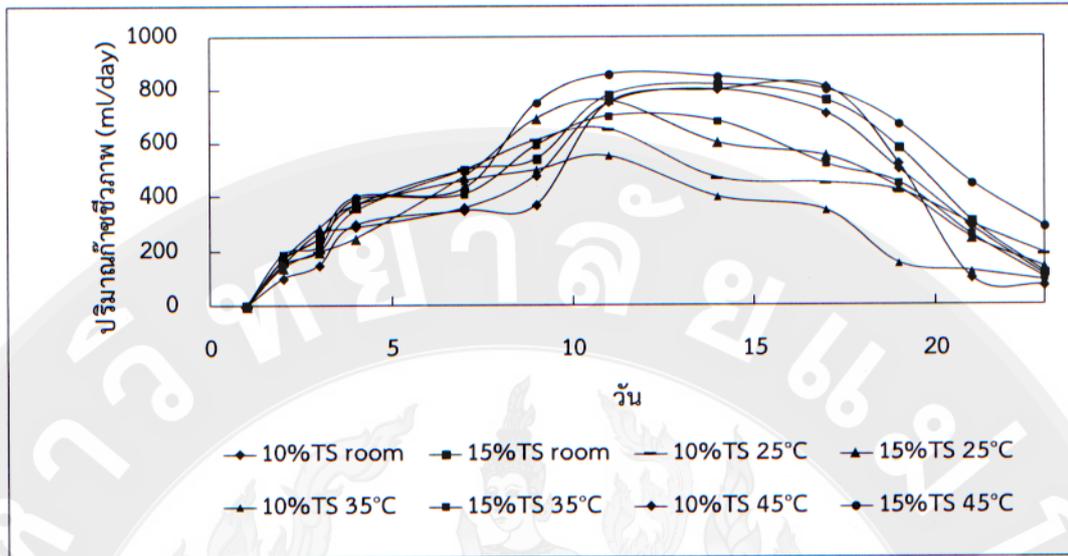


ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณ COD ในระบบหมักก๊าซชีวภาพ ขนาด 2 ลิตร ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ

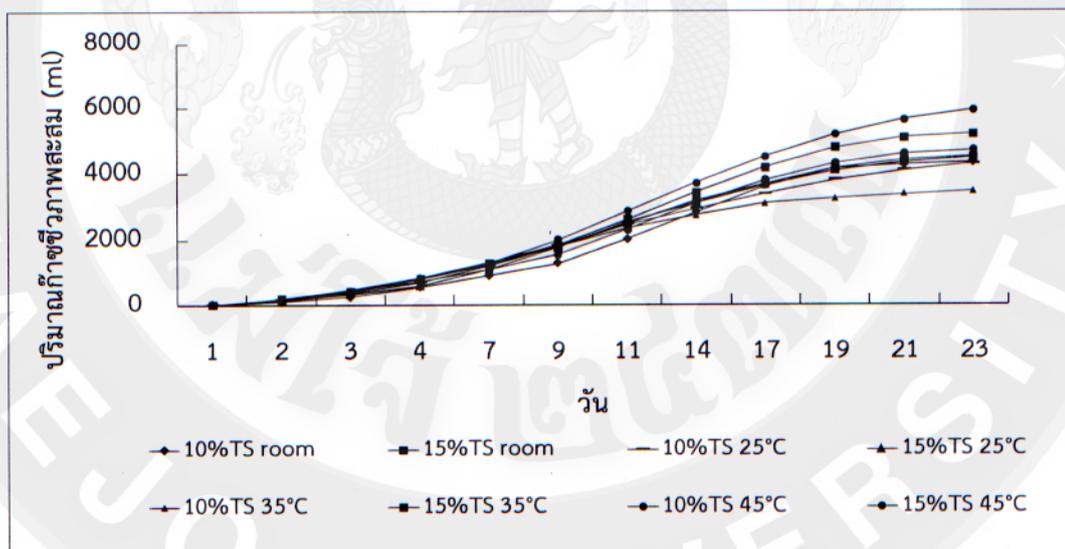
จากภาพที่ 32 และข้อมูลในตารางที่ 16 พบว่าค่า COD ของน้ำเข้าและน้ำออกนั้นมีปริมาณแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งประสิทธิภาพของทั้ง 2 ชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงที่สุดอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 45 ± 2 องศาเซลเซียส และชุดการทดลองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% สามารถกำจัด COD ได้ถึง 50,376 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งความสัมพันธ์ของปริมาณ COD ของน้ำเข้าและออกที่แตกต่างกันนี้ บ่งบอกถึงการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในระบบ จึงทำให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีปริมาณลดลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป

การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของสารอินทรีย์เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการย่อยสลายจุลินทรีย์ต่างๆ ในกระบวนการแบบจำเพาะเจาะจง ในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลายและอาจมีความต้องการด้านสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิและภาวะของแข็ง เป็นต้น (Khalid et al., 2011)

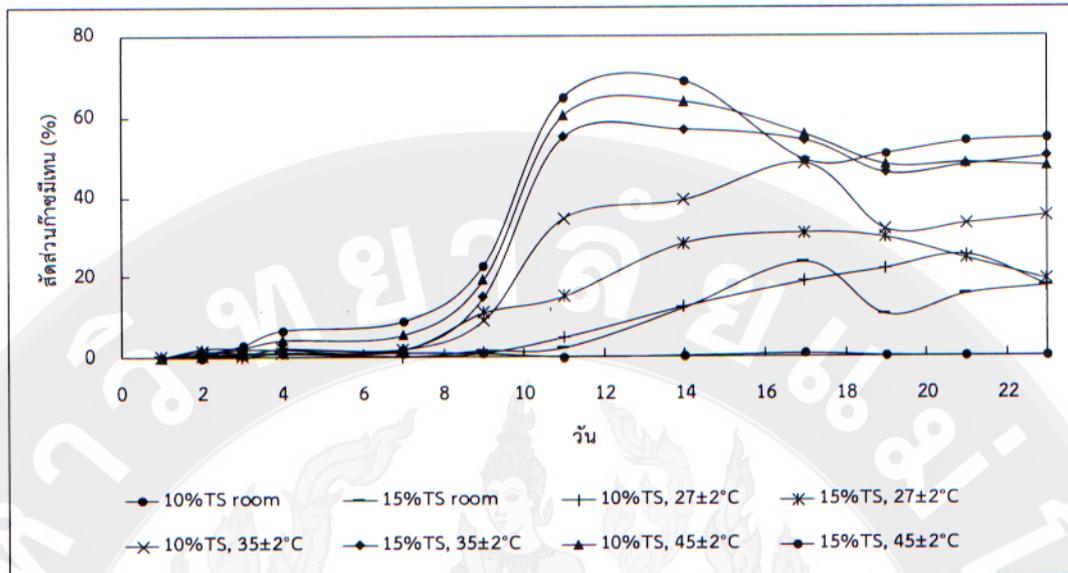
ตั้งนั้นการศึกษานี้จึงมีการวัดการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยทำการวัดปริมาณก๊าซ 14 วัน จากการทดลอง 23 วัน แสดงในภาพที่ 33 ผลการผลิตก๊าซชีวภาพสะสม แสดงในภาพที่ 34 ผลการผลิตก๊าซมีเทนในแต่ละวัน แสดงในภาพที่ 35 ผลการผลิตก๊าซมีเทนสะสม แสดงในภาพที่ 36



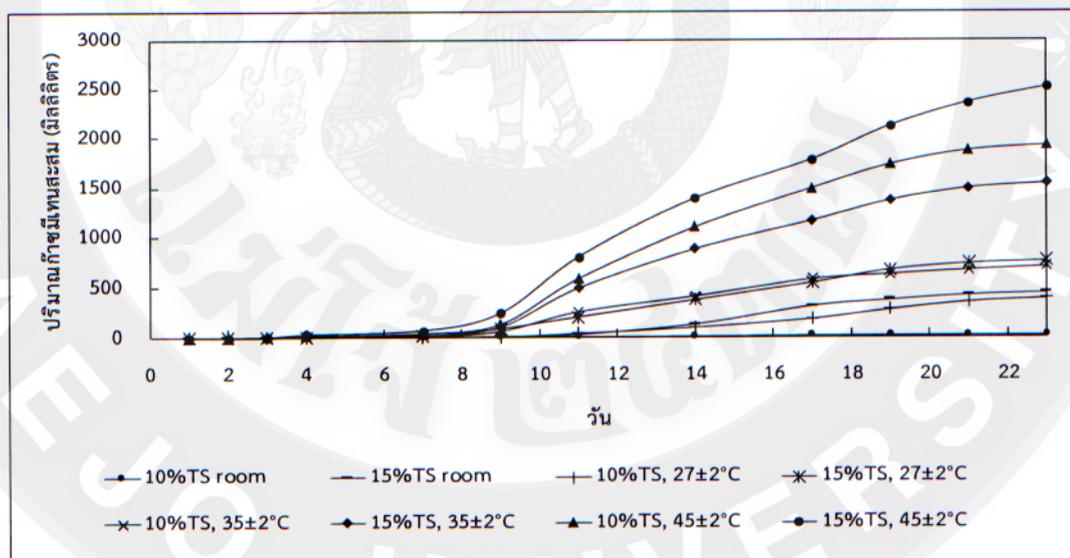
ภาพที่ 33 ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 34 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเกิดขึ้นในระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่อุณหภูมิและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 35 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่ อุณหภูมิและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 36 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 2 ลิตร ที่ อุณหภูมิและอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

จากการทดลองเพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน ของหมัก ร่วมระหว่างสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับหญ้าเนเปียร์ ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 10% และ 15%

จะเห็นว่า ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนของชุดการทดลองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% อุณหภูมิ 45 ± 2 องศาเซลเซียส มีการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในวันที่ 11 และ 14 ของการทดลอง คือ 860 และ 850 มิลลิลิตร โดยการทดลองทั้งหมด 23 วัน สามารถคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมได้ 5,920 มิลลิลิตร ให้สัดส่วนก๊าซมีเทนสูงสุด 68.7% ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม 2,522.5 มิลลิลิตร มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 11,483.39 มิลลิลิตร CH_4 / กรัม $\text{VS}_{\text{remove}}$ คิดเป็น 499.28 มิลลิลิตร CH_4 / กรัม $\text{VS}_{\text{remove}}$ ต่อวัน และจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัด COD, ของแข็งทั้งหมด (TS) และ ของแข็งระเหยง่าย (VS) ที่ผ่านมานั้น พบว่า ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% อุณหภูมิ 45 ± 2 องศาเซลเซียส ยังมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงอีกด้วย จึงเลือกสัดส่วนการทดลองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% อุณหภูมิ 45 ± 2 องศาเซลเซียส ไปทดสอบในถังหมักแบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร ในลำดับถัดไป

ผลการวิเคราะห์การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่าย *Chlorella sp.* และ
 หญ้าเนเปียร์ โดยใช้สัดส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า มาทดสอบ
 ในถังหมักแบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร

จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่า สัดส่วนการหมักร่วมของสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับ
 หญ้าเนเปียร์ คือ 15%TS ของหญ้าเนเปียร์หมัก แสดงสัดส่วนการหมักในตารางที่ 18 ใช้ถังหมักแบบ
 Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR ขนาด 50 ลิตร ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์แบบถังหมักจาก
 ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ดังภาพที่ 37 ใช้ปริมาตรการหมักรวมคือ 90% ของถังหมัก คือ
 45 ลิตร และมีการฟีดวัตถุดิบออก และเติมเข้า ครั้งละ 1 ลิตร วันละ 1 ครั้ง ทุกวัน ให้ความร้อนด้วย
 ฮีตเตอร์ที่ 45 องศาเซลเซียส โดยติดตั้งตู้คอนโทรลเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ตั้งเวลา
 กวน ทุกๆ 3 ชั่วโมง ครั้งละ 5 นาที วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันจากการอ่านปริมาตรที่ถัง
 เก็บก๊าซ และวัดองค์ประกอบก๊าซ ทุกวันจันทร์ – ศุกร์ ด้วยเครื่อง Gas check ยี่ห้อ GEO tech รุ่น
 BIO Gas 5000 ใช้เวลาในการหมักร่วม 42 วัน (ปล่อยให้จุลินทรีย์ในระบบปรับสภาพก่อน 7 วัน จึง
 เริ่มเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ในวันที่ 8 ของการหมัก) เก็บตัวอย่างทั้งหมด 14 ครั้ง วิเคราะห์พารามิเตอร์
 ที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมของระบบ โดยพารามิเตอร์ต่างๆและความถี่ในการวิเคราะห์ แสดงใน
 ตารางที่ 19

ตารางที่ 18 สัดส่วนของการหมักร่วมระหว่างสาหร่าย *Chlorella sp.* และหญ้าเนเปียร์

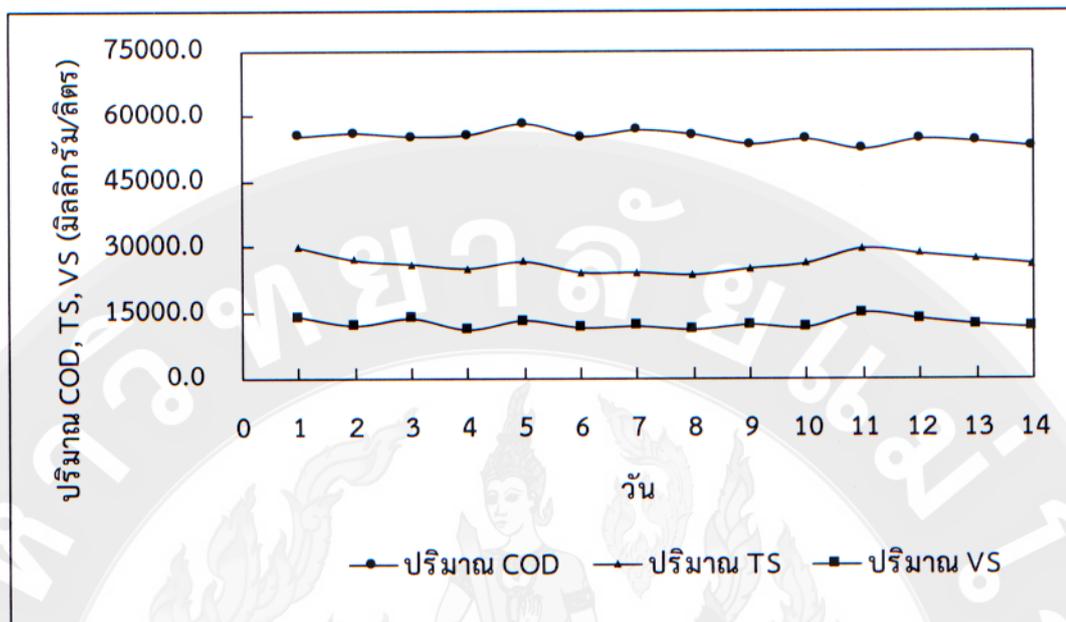
น้ำเลี้ยงสาหร่าย (L)	หญ้าเนเปียร์หมัก (kg)	หัวเชื้อ (L)	ปริมาตรรวม (L)
36.125	6.375	2.5	45



ภาพที่ 37 ถังหมักแบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร

ตารางที่ 19 พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง 3 ครั้งต่อสัปดาห์

วันที่	พารามิเตอร์		
	COD (มิลลิกรัม/ลิตร)	TS (มิลลิกรัม/ลิตร)	VS (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	55250.00	29885.00	14053.00
2	55970.00	27075.00	12097.50
3	55220.00	26150.50	13670.00
4	55567.56	25192.18	11076.16
5	58189.60	26697.79	13200.93
6	55224.40	24281.76	11523.93
7	56636.40	24249.71	11885.49
8	55648.00	23783.08	11108.37
9	53427.20	25098.11	12204.77
10	54518.40	26300.10	11617.00
11	52259.20	29559.32	14973.46
12	54518.40	28425.00	13565.00
13	53953.60	27297.50	12315.00
14	52824.00	26117.50	11477.50



ภาพที่ 38 ปริมาณ COD ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่าย ของระบบหมักก๊าซชีวภาพ ขนาด 45 ลิตร

จากตารางที่ 19 จะเห็นว่า ตลอดระยะเวลาการทดลอง 42 วัน ปริมาณ COD ในช่วง 52,000 – 55,000 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) อยู่ในช่วง 23,000 – 28,000 มิลลิกรัม/ลิตร และปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) อยู่ในช่วง 11,000 – 14,000 มิลลิกรัม/ลิตร เห็นได้ชัดเจนในภาพที่ 38 เนื่องจากการเติมสารอินทรีย์เข้าในระบบ และดึงสารอินทรีย์ออกในปริมาณที่เท่ากันทุกวัน การย่อยสลายจึงดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง เป็นเหตุผลที่ทำให้ปริมาณ COD ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) อยู่ในช่วงเดียวกันอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน แสดงในตารางที่ 20 โดยค่าเหล่านี้แสดงถึงประสิทธิภาพในการทำงานของจุลินทรีย์ในถังหมัก ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปอนุภาคของแข็งและสารละลาย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ได้ (Korenaga et al, 1990)

ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA) มีค่า 382.50 – 40.625 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งพบว่ามีค่าสูงในช่วงแรกและค่อยๆลดลง นั้นเป็นเพราะหลังจากที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงที่แล้ว ปริมาณของกรดอะซิติกก็จะอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alexiou and Panter, (2004) , Siedlecka, (2008) ที่พบว่า สารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะถูกย่อยสลาย โดยสารอินทรีย์ที่ผ่านขั้นตอนย่อยจะถูกแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ ซึ่งปกติแล้วกรด

ไขมันระเหยง่าย ควรมีค่าอะซิดิกประมาณ 20 – 200 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งในระบบนั้นมีความต้องการใช้กรดอะซิดิกเป็นสารตั้งต้นหลัก สำหรับเปลี่ยนแปลงก๊าซมีเทน

ค่าความเป็นด่าง (Alkaline, Alk) มีค่าอยู่ระหว่าง 781.5 - 460.25 มิลลิกรัม/ลิตรนั้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Osman and Delia, 2005 ; Kim et al, 2003 ที่พบว่า สภาพต่างควรมีค่าอยู่ในช่วง 1,000 – 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมของระบบ โดยค่า VFA และ Alk จะทำการวิเคราะห์ 2 ครั้งคือ วันแรกและวันสุดท้ายของการทดลอง

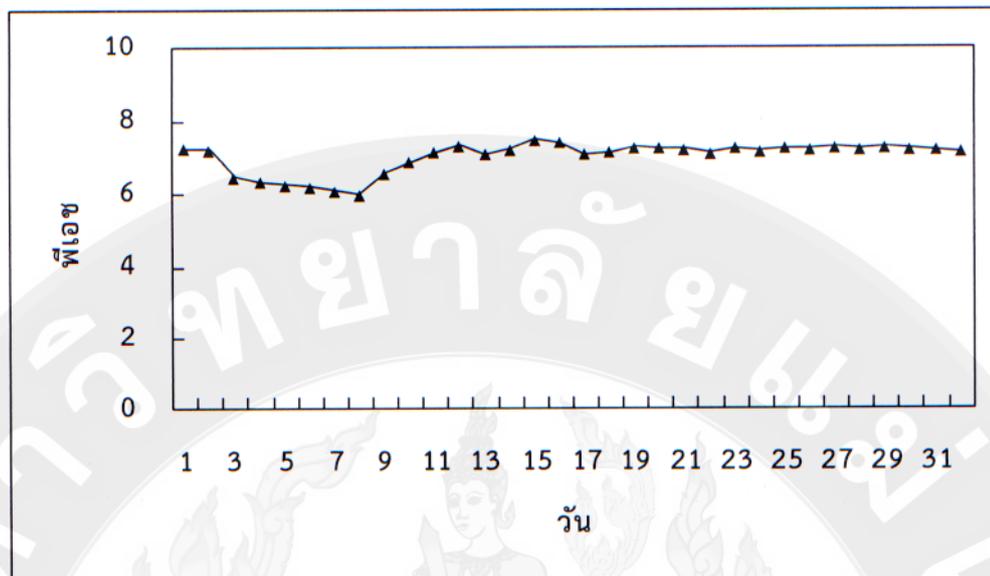
ตารางที่ 20 ปริมาณก๊าซและองค์ประกอบของก๊าซ

วันที่	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพที่ผลิตได้ (ลิตร/วัน)	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (ลิตร)	องค์ประกอบของก๊าซ				Temp (°C)	pH
			CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S		
1	7	7	-	-	-	-	45±2	7.26
2	10	17	-	-	-	-	45±2	7.23
3	10	27	-	-	-	-	45±2	6.48
4	10	37	-	-	-	-	45±2	6.36
5	14	51	-	-	-	-	45±2	6.28
6	14	65	-	-	-	-	45±2	6.22
7	14	79	-	-	-	-	45±2	6.12
8	13	92	-	-	-	-	45±2	6.01
9	14	106	74.6	30.1	0.6	815	45±2	6.58
10	13.5	119.5	76.6	38.8	0.8	752	45±2	6.89
11	12	131.5	78.1	37.8	0.7	409	45±2	7.16
12	13	144.5	78.9	33.7	1.5	288	45±2	7.34
13	14	158.5	81.6	31.4	1.1	347	45±2	7.09
14	13	171.5	-	-	-	-	45±2	7.23
15	12	183.5	-	-	-	-	45±2	7.49
16	12.5	196	81.8	32.5	1	241	45±2	7.43
17	11	207	78.9	19.6	2.4	524	45±2	7.10
18	12	219	75.7	23.4	2.2	492	45±2	7.16

ตารางที่ 20 (ต่อ)

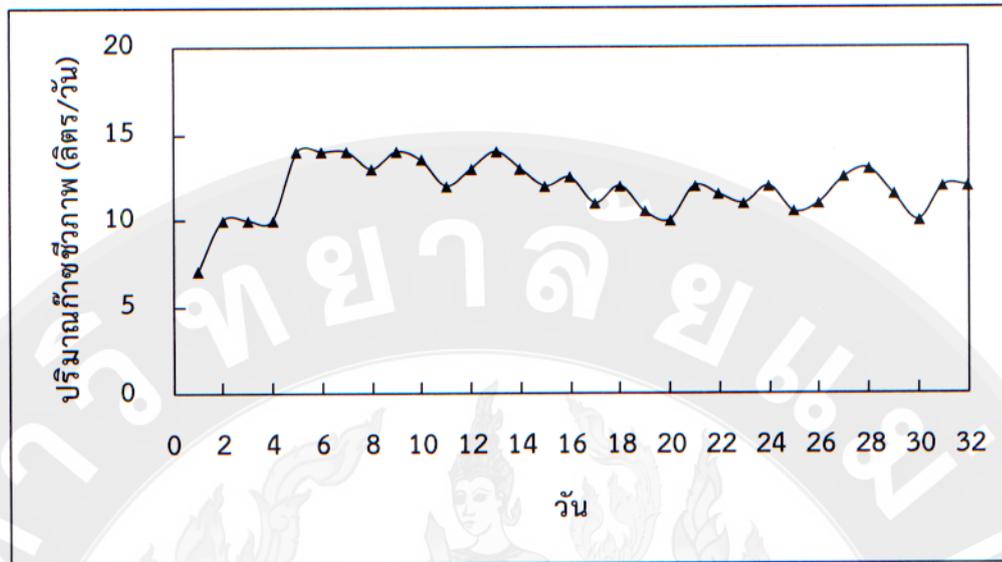
วันที่	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพที่ผลิตได้ (ลิตร/วัน)	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (ลิตร)	องค์ประกอบของก๊าซ				Temp (°C)	pH
			CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S		
19	10.5	229.5	74.8	26.2	1.7	414	45±2	7.28
20	10	239.5	75	27.1	0.9	454	45±2	7.26
21	12	251.5	-	-	-	-	45±2	7.24
22	11.5	263	-	-	-	-	45±2	7.12
23	11	274	77.9	30.4	0.6	584	45±2	7.25
24	12	286	76.1	29.6	0.5	471	45±2	7.19
25	10.5	296.5	75.7	28.6	0.6	412	45±2	7.26
26	11	307.5	74.6	25.7	0.8	376	45±2	7.24
27	12.5	320	74.8	26.9	0.9	222	45±2	7.29
28	13	333	-	-	-	-	45±2	7.23
29	11.5	344.5	-	-	-	-	45±2	7.29
30	10	354.5	76.2	30.1	0.9	349	45±2	7.23
31	12	366.5	74.9	27.8	0.6	298	45±2	7.20
32	12	367.7	74.7	26.6	0.9	232	45±2	7.16

ผลการทดลอง จะเห็นว่า ค่าพีเอชตลอดช่วงการทดลองวันแรกจะอยู่ที่ 7.2 และเริ่มลดลงอยู่ในช่วง 6 – 7 แสดงให้เห็นชัดเจนในภาพที่ 39 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Bryant.,1991 และ Yu and Fang.,2002 ที่พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมแก่การสร้างกรด มีค่าเท่ากับ 6 ซึ่งในช่วงแรกนั้นแบคทีเรียที่มีหน้าที่สร้างกรดจะมีเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ค่าพีเอชลดลง และเพิ่มขึ้นเมื่อแบคทีเรียสร้างมีเทนทำงาน หลังจากวันที่ 10 จึงเห็นว่า ค่าพีเอชเข้าสู่ช่วงปกติคืออยู่ในช่วง 6.8 – 7.2 เป็นช่วงที่แบคทีเรียสร้างมีเทนจะทำงานได้ดี ดังที่กล่าวไว้แล้วในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และการที่ระบบสามารถรักษาค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้นั้น เป็นผลมาจากส่วนผสมของของเสียที่อยู่ในถังหมักที่ประกอบด้วยน้ำเสียจากฟาร์มสุกรซึ่งมีปริมาณแอมโมเนียสูง จึงสามารถเพิ่มสภาพต่างทำให้พีเอชอยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้

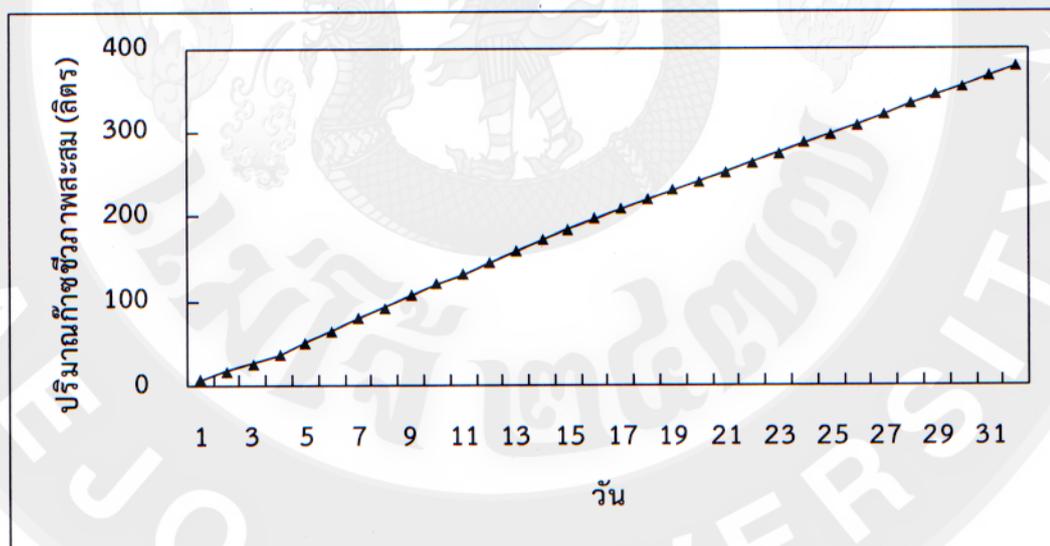


ภาพที่ 39 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในระยะเวลา 32 วัน

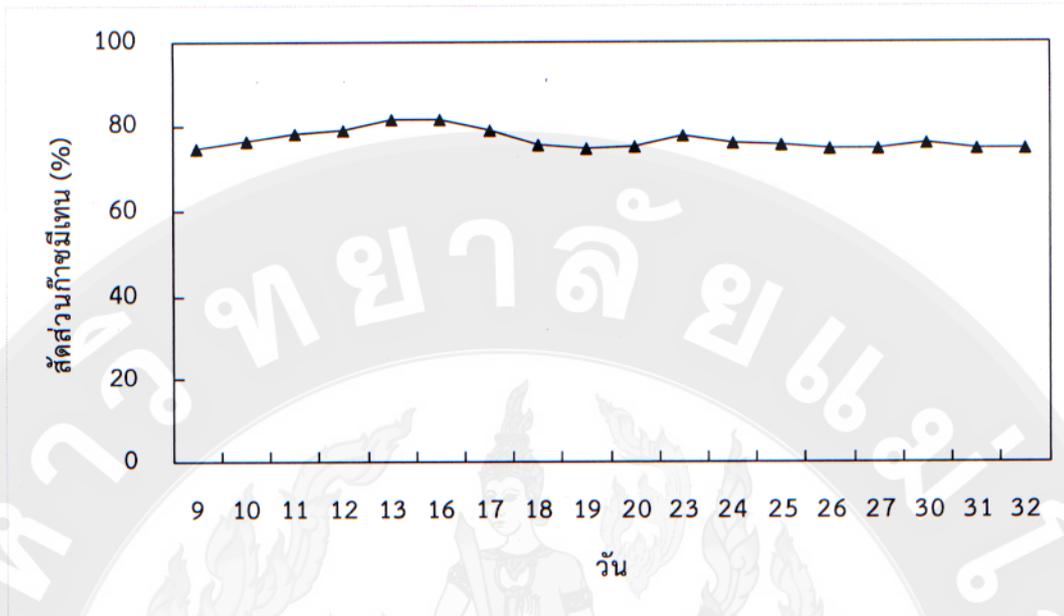
ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบหมักแบบ CSTR ปริมาตรหมัก 45 ลิตร โดยทำการวัดปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ 2 ครั้ง/วัน พบว่า ในช่วงแรกของการทดลองปริมาณของก๊าซชีวภาพจะต่ำ เนื่องจากอยู่ในสภาวะการปรับตัวของแบคทีเรียในกลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทน และปริมาณของแบคทีเรียที่ยังมีน้อย เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ปริมาณก๊าซจึงเพิ่มมากขึ้น อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 12 ลิตร/วัน (ภาพที่ 40) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม อยู่ที่ 378.5 ลิตร (ภาพที่ 41) และจากการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยเครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ ด้วยเครื่อง Gas check พบว่ามีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 76.7 ของปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด ใกล้เคียงกับการวัดองค์ประกอบของก๊าซมีเทนด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่าอัตราส่วนของก๊าซมีเทนที่ได้นั้นมีค่า ร้อยละ 74.61 ของปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด (ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพแสดงในภาคผนวก จ) ซึ่งก๊าซมีเทนเริ่มคงที่ในวันที่ 23 แสดงในภาพที่ 42 โดยการทดลองนี้ ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม 164 ลิตร จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมแสดงไว้ในภาพที่ 43



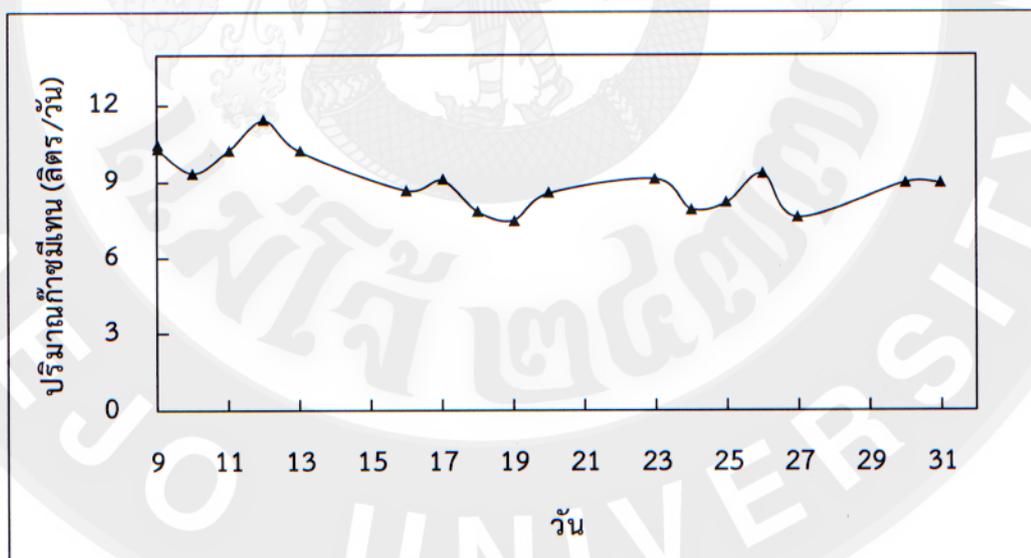
ภาพที่ 40 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในระยะเวลา 32 วัน



ภาพที่ 41 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในระยะเวลา 32 วัน



ภาพที่ 42 สัดส่วนก๊าซมีเทน ของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในระยะเวลา 32 วัน



ภาพที่ 43 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแต่ละวัน ของระบบหมักก๊าซชีวภาพขนาด 50 ลิตร ในระยะเวลา 32 วัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของ สาหร่าย *Chlorella sp.* และหญ้าเนเปียร์

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาแนวทางในการหาสภาวะที่เหมาะสม ในการผลิต ก๊าซชีวภาพ และปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักร่วมของสาหร่าย *Chlorella sp.* และ หญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 สามารถสรุปรายละเอียดในแต่ละเงื่อนไขได้ดังนี้

1. ความเหมาะสมของวัตถุดิบ

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 พบว่ามีศักยภาพพอที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมได้ เนื่องจากมี ส่วนประกอบของสารอินทรีย์ในปริมาณสูง ซึ่งพิจารณาจากปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่อของแข็ง ทั้งหมดมีค่าสูงถึง 87.01 ในขณะที่สาหร่าย *Chlorella sp.* นั้นมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่อ ของแข็งทั้งหมดมีค่า 5.79

2. การปรับสภาพวัตถุดิบ และสัดส่วนที่เหมาะสม

ในการทดลองเพื่อเลือกการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ที่จะนำมาใช้ในการหมักร่วมนั้น พบว่า หญ้าเนเปียร์หมัก ให้ผลการทดลองที่ดีกว่าหญ้าเนเปียร์สด ในระยะเวลาการทดลอง 21 วัน ผลการ วิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัด COD เป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงสุดนั้นบนเป็นของชุดการทดลองที่ 10 ที่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด 25% นั้น กำจัด COD ได้สูงสุด 64,123.2 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 90% รองลงมาคือชุดการทดลองที่ 9 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 20% และชุดการทดลองที่ 8 ที่ปริมาณ ของแข็งทั้งหมด 15% มีประสิทธิภาพการกำจัด COD 89% และ 88% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการ กำจัดของแข็งสูงสุดอยู่ที่ชุดการทดลองที่ 8 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% นั้น กำจัด COD ได้สูง ที่สุด 31,032 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 80% ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายสูงสุด เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัด COD และ ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) โดยชุดการทดลองที่ 8 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% กำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ได้สูงสุด 21,425.9 - 28,320 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็น 91%

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจนถึงสุดปฏิกิริยา 21 วัน พบว่าชุดการทดลองที่ 8 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 12,333.3 มิลลิลิตร CH_4 / กรัม $\text{VS}_{\text{remove}}$ ในระยะเวลาการหมัก 21 วัน คิดเป็น 587.3 มิลลิลิตร CH_4 / กรัม $\text{VS}_{\text{remove}}$ ต่อวัน ใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ 7 ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 10% คือ 485.02 มิลลิลิตร CH_4 / กรัม $\text{VS}_{\text{remove}}$ โดยมีศักยภาพการย่อยสลายร้อยละ 34.7 และ 32.57 ตามลำดับ และจากข้อมูลที่ผ่านมาจึงพบว่าชุดการทดลองที่ 8 และ 9 นั้น มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD, VS, TS สูงอีกด้วย จึงเลือก 2 ชุดการทดลองนี้เข้าสู่กระบวนการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในลำดับถัดไป

3. อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดต่อปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน

จากผลการทดลองที่นำสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด 10 และ 15% มาทดสอบเพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนนั้น พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมของสาหร่าย *Chlorella sp.* ร่วมกับหญ้าเนเปียร์หมัก ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน โดยการทดลองทั้งหมด 23 วัน พบว่า ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% อุณหภูมิ 45 ± 2 องศาเซลเซียส มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมได้ 5,920 มิลลิลิตร ให้สัดส่วนก๊าซมีเทนสูงสุด 68.7% ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม 2,522.5 มิลลิลิตร มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 11,483.39 มิลลิลิตร CH_4 / กรัม $\text{VS}_{\text{remove}}$ คิดเป็น 499.28 มิลลิลิตร CH_4 / กรัม $\text{VS}_{\text{remove}}$ ต่อวัน และจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัด COD, ของแข็งทั้งหมด (TS) และ ของแข็งระเหยง่าย (VS) ที่ผ่านมานั้น พบว่า ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% อุณหภูมิ 45 ± 2 องศาเซลเซียส ยังมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงอีกด้วย จึงเลือกสัดส่วนการทดลองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% อุณหภูมิ 45 ± 2 องศาเซลเซียส ไปทดสอบในถังหมักแบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร ในลำดับถัดไป

4. นำผลการทดสอบที่ได้มาทดสอบในถังหมักแบบต่อเนื่อง CSTR ขนาด 50 ลิตร

ที่ปริมาตรการหมักรวมคือ 90% ของถังหมัก คือ 45 ลิตร และ วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันจากการอ่านปริมาตรที่ถังเก็บก๊าซ และวัดองค์ประกอบก๊าซ ทุกวันจันทร์ – ศุกร์ ด้วยเครื่อง Gas check ใช้เวลาในการหมักรวม 42 วัน มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ เฉลี่ยอยู่ที่ 5,492 มิลลิลิตร/วัน และจากการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องมือ Gas data Geo-tech BIOGAS 5000 มีอัตราส่วนมีเทนเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 84.58 และได้นำตัวอย่างก๊าซไปทดสอบกับเครื่อง Gas Chromatography (GC) พบว่าอัตราส่วนของก๊าซมีเทนที่ได้นั้นมีค่า ร้อยละ 74.61 ของปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด ซึ่งจากค่าที่ได้นั้น ถือได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทน ที่เกิดขึ้นจากการหมักร่วมของสาหร่าย *Chlorella sp.* และหญ้าเนเปียร์ อยู่ในเกณฑ์ที่มีคุณภาพสูง

นำสัดส่วนการหมักที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% หมักแบบ CSTR ปริมาตรหมัก 45 ลิตร มีการเปิดวัตุดิบออก และเติมเข้า ครั้งละ 1 ลิตร วันละ 1 ครั้ง ทุกวัน ควบคุมอุณหภูมิด้วยฮีตเตอร์ที่ 45 องศาเซลเซียส ตั้งเวลาทวน ทุกๆ 3 ชั่วโมง ครั้งละ 5 นาที ให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 12 ลิตร/วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม อยู่ที่ 378.5 ลิตร และจากการตรวจวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยเครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ ด้วยเครื่อง Gas check พบว่ามีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 76.7 ของปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด ใกล้เคียงกับการวัดองค์ประกอบของก๊าซมีเทนด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่าอัตราส่วนของก๊าซมีเทนที่ได้นั้นมีค่า ร้อยละ 74.61 ของปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด โดยการทดลองนี้ ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสะสม 164 ลิตร จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการพัฒนากระบวนการกักเก็บก๊าซมีเทน ให้ง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์สำหรับครัวเรือน
2. อาจจัดให้มีการรณรงค์ให้เกษตรกรเห็นถึงความสำคัญ ของวัตุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรมากขึ้น เพราะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมาย
3. เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่ได้ มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่สูง แต่มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จำนวนมากในอนาคต หากมีการต่อยอดการศึกษางานวิจัยนี้ อาจใช้วิธีนำถ่านกัมมันต์มาดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น ก่อนนำไปใช้จริง
4. พลังงานทดแทนเป็นเรื่องใกล้ตัว ส่วนใหญ่เป็นวัตุดิบที่มีอยู่แล้วในครัวเรือน หากรัฐมีการสนับสนุน ให้ความรู้และทุนในเรื่องนี้อย่างจริงจัง พลังงานทดแทนจะเป็นสิ่งที่จับต้องได้ง่ายมากยิ่งขึ้น ส่งผลดีให้กับเศรษฐกิจของประเทศในอนาคต

บรรณานุกรม

- กระทรวงพลังงาน. 2555. สถานการณ์พลังงาน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/sit_dec_55/sit_12Dec55.pdf. (20 กุมภาพันธ์ 2558).
- _____. 2556. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกเป็นร้อยละ 25 ในปี 2564. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf>. (3 พฤศจิกายน 2558).
- กิตติพล กลสิการ, วัชระ เวียงแก้ว, ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร และชนาธิป สามารถ. 2555. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยง *Chlorella vulgaris*. *KKU Sci. J.* 40 (1), 188-197.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2546. คู่มือการเลือกใช้และการบำรุงรักษาระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรตามแบบมาตรฐานกรมปศุสัตว์. กรุงเทพฯ: สำนักพัฒนาการปศุสัตว์และถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมปศุสัตว์.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิต การควบคุม คุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักเทคโนโลยีและความปลอดภัย.
- โครงการการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์และเศษอาหาร เพื่อใช้ในครัวเรือนชุมชนบ้านป่าตึงอำเภอพาน จังหวัดเชียงราย. 2557. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/20111261832311.pdf>. (15 ธันวาคม 2557).
- โครงการศึกษา วิจัย ต้นแบบวิสาหกิจชุมชน พลังงานสีเขียวจากพืชพลังงาน(ก๊าซชีวภาพจากพืช พลังงาน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://green-energy.ete.eng.cmu.ac.th/index.php>. (12 ธันวาคม 2557).
- จิตรลดา สีเสน และญานินท์ ลักษณะนารักษ์. 2554. การผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็กเซลล์เดียว. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ชัยศรี ธาราสวัสดิ์พิพัฒน์ และโกวิท สุวรรณหงษ์. 2554. การผลิตพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรร่วมกับวัชพืชน้ำ ในอำเภอมัญจาคีรี จังหวัดขอนแก่น. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.

- เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ. 2556. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.ku.ac.th/e-magazine/september43/biogas/>. (15 ธันวาคม 2557).
- บริษัท ปีโตรเลียมไทย คอร์ปอเรชั่น จำกัด. 2558. การใช้พลังงานในประเทศไทย [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.ptgenenergy.co.th/knowledge_detail.php?k=5 (03 ตุลาคม 2558).
- ไปรมา ยงมานิตชัย. 2546. สาทรรายกับสารระที่นำรู้ [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.ku.ac.th/emagazine/july46/agri/seaweed.html>. (12 ธันวาคม 2557).
- มหาวิทยาลัยแม่โจ้. ศูนย์วิจัยพลังงาน 2555ก. การพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่ายร่วมกับหญ้าเนเปียร์. เชียงใหม่: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) _____, 2555ข. โครงการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีการหมักในสภาพไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมุนเวียนน้ำชะ. เชียงใหม่: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน. 2552. โครงการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในรูปแบบการหมักย่อยร่วมโดยดั่งปฏิกรณ์ USAB และ CSTR เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สายัณห์ ทัดศรี. 2540. พืชอาหารสัตว์เขตร้อน การผลิตและการจัดการ. กรุงเทพฯ: ไร่เขียว.
- สาโรช บุญยกิจสมบัติ. 2557. พลังงานทดแทนก๊าซชีวภาพ (Biogas) ผลิตกันอย่างไร. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue8/articles/article1.html>. (10 ธันวาคม 2557).
- สาหร่ายน้ำจืดในประเทศไทย. 2556. เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สาหร่ายวิทยา. 2549. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่ : ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อวัสดา ฉานนุวัฒน์. 2545. อิทธิพลของระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อานีตา ปาเก. 2556. การผลิตก๊าซชีวภาพจากสาหร่ายขนาดใหญ่ร่วมกับซีรัมจากการผลิตน้ำยางข้น. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: [<http://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2010/8964>]. (15 ธันวาคม 2557).

- Alexiou I.E and Panter K. 2004. A review of tow phase application to define best practice for the treatment of various waste streams pp. 1178-1186. In **Anaerobic Digestion Anaerobie**. 10th World congress. Step 2004. Montrel, Quebcc, Canada: IWA Publishing Company.
- APHA-AWWA-WPCF. 2005. **Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st ed. Washington, DC: APHA-AWWA-WPCF.
- Benemann, J.R. and W.J. Oswald. 1996. **Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO₂ to biomass**. Washington, DC: Pittsburgh Energy Technology Center.
- B.T.Nijaguna. 2006. **Biogas echnology**. Bangalore: JSS Academy of Technical Education
- Bligh, E.G. and W.J. Dyer. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. **J. Biochem. Physiol.** 37, 911-917.
- Chien-Ya K. 2013. Ability of a mutant strain of the microalgae *Chlorella sp.* To capture carbon dioxide for biogas upgrading. **Applied Energy** 93, 176-183.
- Chittra Y. and Benjamas C. 2010. Effect of nitrogen, salt, and iron content in the growth medium and light intensity on lipid production by microalgae isolated from freshwater sources in Thailand. **J. Bioresource Technology** 102, 3034-3040.
- Chiu, S. Y., Kao, C. Y., Chen, C. H., Kuan, T. C., Ong, S. C. and Lin, C. S. 2008. Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella sp.* in a semicontinuous photobioreactor. **J. Bioresource Technology**, 179, 254-260.
- Chynoweth, D. P., Turick, C. E., Owens, J. M., Jerger, D. E. & Peck, M. W. 1993 . Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. **Biomass, Bioenergy** 5, 95-111.
- Cohen. Z., A. Vonshak and A. Richmond. 1988. Effect of environmental conditions on fatty acids composition of the red algae *Porphyridium cruentum*: correlation to the growth rate. **J. Phycology**. 24,328-332.
- Dussadee N, Reansuwan K, Ramaraj R. 2014. Potential development of compressed bio-methane gas production from pig farms and elephant

- grass silage for transportation in Thailand. **Bioresour Technol.** 155,438-441.
- _____. 2016. Cultivation of Green Microalga, *Chlorella vulgaris* for Biogas Purification. **International Journal of New Technology and Research**, 2 (3), 117-122
- Energy Research and Development Intitute-Nakornping Chiang Mai University, 2011, **Biogas Production from Argicultural Products**, [Online], Available: <http://www.erdicmu.ac.th/downloads/CompanyProfileEn.pdf>. (20 June 2016).
- Fischer, J.R., E.L. Iannotti and C.D. Fulhage 1983. Production on of methane gas from combinations of wheat straw and swine manure. **Transactions of the American Society of Agriculture Engineers.** 26(2), 546-548
- G. Mann, M. Schlegel, R. Schumann, A. Sakalauskas. 2009. Biogas-conditioning with microalgae. **University of Rostock, Rostock. Agronomy Research** 7(1), 33-38.
- J.H. Mussnug., V. Klassen. A. Schlüter. And O. Kruse. 2010. Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combinedbiorefinery concept. (2010). Bielefeld University, Center for Biotechnology. **Journal of Biotechnology.** 150(2010), 51–56
- Jehad AD, Angela O, Elaine G and David R. 2011. Batch and continuous biogas production from grass silage liquor. **Bioresource Technology.** 102, 10922–10928.
- Kaparaju, P. and R. Rintala. 2005. Anaerobic co-digestion of potato tuber and industrial by products with pig resour. **Conserv. Recycl.** 43, 175-188.
- Kaparaju, P., Luostarinen, S., Kalmari, E., Kalmari, J. & Rintala, J. 2002 Codigestion of energy crops and industrial confectionery by- products with cow manure: Batch scale and farm-scale evaluation. **Wat.Sci. Technol.** 45, 275–280.
- Khalid A, Arshad M, Anjum M, Mahmood T, Dawson L. 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Manag,** 31, 1737–1744.

- Kim M, S.M. Youn, S.H. Shin, J.G. Jang, S.H. Han, M.S. Hyun, G.M. Gadd and H.J. Kim, 2003. Practical field application of a novel BOD monitoring system. *J. Environ. Monit.* 5, 640-643.
- Korenaga, T., Takahashi, T., Moriwake, T., Sanuki, S., 1990. Water quality monitoring system using flow-through sensing device. pp. 625-631 In **Advances in Water Pollution Control**. Ed. Briggs R., London: University Gent.
- Krustok I., Nehrenheim E., Odlare M., Liu X. and Li S. 2013. **Cultivation of indigenous algae for increased biogas production**. International Conference on Applied Energy. Pretoria, South Africa. [Online] Available <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:608367/FULLTEXT01.pdf>. (19 March 2016).
- Kukkonen C. 2010. Dedicated energy crops for bioenergy. School of environment and energy, Shenzhen graduate school, China: Peking University, (20), 177-189
- Lauris Urribarri, Alexis Freere and Alejandro Colina. 2005. Leaf Protein from Ammonia-Treated Dwarf Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum CV.Mott). **Applied Biochemistry and Biotechnology**. (05), 121 – 124.
- Marcin Debowski, Marcin Zielinski, Anna Grala n, Magda Dudek. 2013. Algae biomass as an alternative substrate in biogas production technologies Review. **Renewable and Sustainable Energy**. 596–604.
- Metclaf and Eddy. 2003. Inc. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4th Edition. New York: Mc Graw Hill, Inc.
- Mohammed, I.Y., Abakr, A.Y., Kazi, F.K., Yusup, S., Alshareef, I., Soh, A.C. 2015. Pyrolysis of Napier grass in a fixed bed reactor: effect of operating conditions on product yields and characteristics. **BioResources**10 (4), 6457–6478
- Osman N.A., D.T. Sponza. 2005. Anaerobic/aerobic treatment of municipal landfill leachate in sequential two-stage up-flow anaerobic sludge blanket reactor (USAB)/completely stirred tank reactor, CSTR systems. **Process Biochemistry**, 40: 895-902.

- Pavlostathis, S.G. and Giraldo-Gomez, E. 1991. Kinetics of anaerobic treatment: A critical review, *Critical Reviews in Environmental Control*, 21(5-6) 411-490.
- Pantawong R, Chuanchai A, Thipbunrat P, Unpaprom Y, Ramaraj R. 2015. Experimental investigation of biogas production from water lettuce, *Pistia stratiotes* L. *Emergent Life Sciences Research*, 3(1): 1-10.
- P. Collet, A. Hélias, L. Lardon, M. Monique Ras, R.A. Goyc, J.P. Steyer. 2011. Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresour Technol*, 102, 207–214
- Pouech, P., Fruteau, H. & Bewa, H. 1998. Agricultural crops for biogas production on anaerobic digestion plants. Carmen, Straubing Germany: Proc. 10th European Conf. *Biomass for Energy and Industry*, 3(1): 163– 165.
- Pumpoung W, Dussadee N, Cheunbarn T, Chanathaworn J. 2016. **Potentiality of Biogas Production by Co-fermentation from *Chlorella sp.* and Napier Grass**, 12th Conference on Energy Technology Network of Thailand; ENETT, Naresuan University, Phitsanulok.
- _____. 2016. Temperature Affects to the Potential of Biogas Production by Co-fermentation from *Chlorella sp.* and Napier grass. **Proceeding In 23rd Tri-U International Joint Seminar and Symposium**, Indonesia: Bogor Agricultural University.
- Ramaraj R, Unpaprom Y. 2016. Effect of temperature on the performance of biogas production from Duckweed. *Chemistry Research Journal*. 1, 58–66
- Ramaraj R, Unpaprom Y, Dussadee N. 2016. Cultivation of Green Microalga, *Chlorella vulgaris* for Biogas Purification. *International Journal of New Technology and Research*, (2-3) 117-122.
- Ramaraj, R., Unpaprom, Y., Whangchai, N., & Dussadee, N. 2015. Culture of macroalgae *Spirogyra ellipsospora* for long-term experiments, stock maintenance and biogas production. *Emergent Life Sciences Research*, 1: 38-45.
- Selim, A.S.M., J. Pan, T. Takano, T. Suzuki, S. Koike, Y. Kobayashi, K. Tanaka, 2004. Effect of ammonia treatment on physical strength of rice straw,

distribution of straw particles and poetical-associated bacteria in sheep rumen. *Anim. Feed Sci. Technol.* 115, 117-128.

Sharma, S. K., Mishra, I. M., Sharma, M. P. & Saini, J.S. 1988. Effect of particle size on biogas generation from biomass residues. *Biomass.* (17): 251–263

Simone P., Ricardo L.R. S., Melissa P. M., Estela O. N., Marcio L.B. da S. 2013. Biogas production from microalgae biomass. *Symposium In international sobre gerenciamento de residuos agropecuarioise agroindustriais.* 27,551–563

Takdastan A, Movahedian H, Jafarzadeh N, Bina B. 2005. The Efficiency of Anaerobic Digesters on Microbial Quality of Sludge in Isfahan and Shahinshahr Waterwaste Treatment Plant. *Iranian Journal of Environmental Health Science Engineering*, 2(Suppl 1):56–59.

Thailand Energy and Environment Network. 2014. [Online] Available <http://teenet.cmu.ac.th/btc/introbiogas02.php>. (10 December 2014).

Ward AJ, Hobbs PJ, Holliman PJ, Jones DL. 2008. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour Technol.* 99, 7928–7940

Xiaoqiang Wang, Eva Nordlander, Eva Thorin and Jinyue Yan. 2012. **Microalgal Biomethane Production Integrated with An Existing Biogas Plant: A case study in Sweden.** [Online] Available <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A573945&dswid=-3431>. (14 March 2016).

Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F. and Li, Y. 2014. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production; review, *Progress in Energy and Combustion Science.* 42, 35-53.

Zieminski, K., and Frac, M., 2012, “Methane Fermentation Process as Anaerobic Digestion of Biomass: Transformations, Stages and Microorganisms”, *African Journal of Biotechnology.* 11, 4127- 4139.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

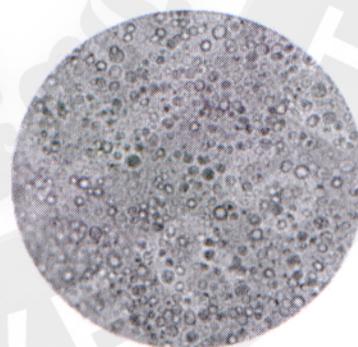
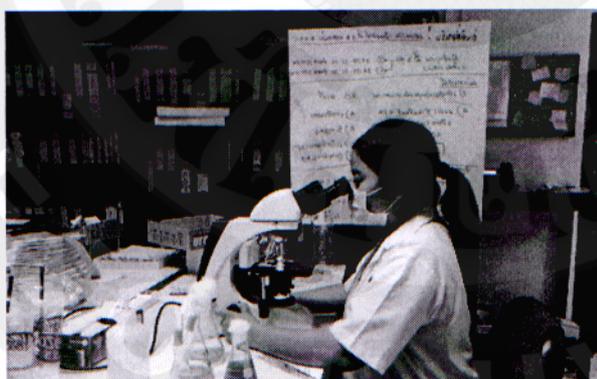
การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.*

1. การเตรียมหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.*

หัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำการสั่งหัวเชื้อมาจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (ขนาด 15 มิลลิลิตร) แสดงในภาพผนวก 1 และ 2



ภาพผนวกที่ 1 หัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* ในขวดแก้วปิดสนิท ขนาด 15 มิลลิลิตร



ภาพผนวกที่ 2 รูปร่างเซลล์ของสาหร่าย *Chlorella sp.* เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

โดยหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* นั้น มาในรูปแบบที่บรรจุอยู่ในขวดแก้วใส ที่มีฝาเกรียวปิดสนิท พันทับด้วยพาราฟิล์มภายในมีอาหารเหลวสำเร็จรูป BG-11 โดยสูตรการเตรียมอาหารเหลวนั้นแสดงในตารางผนวก 1

ตารางผนวกที่ 1 สูตรเตรียมอาหารเหลว BG-11

สารเคมี	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)
NaNO ₃	15.0
K ₂ HPO ₄	0.4
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.75
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.36
Citric Acid	0.06
Ferric ammonium citrate	0.06
EDTA disodium magnesium salt	0.01
Na ₂ CO ₃	0.02
Trace metal mix A5	1.0

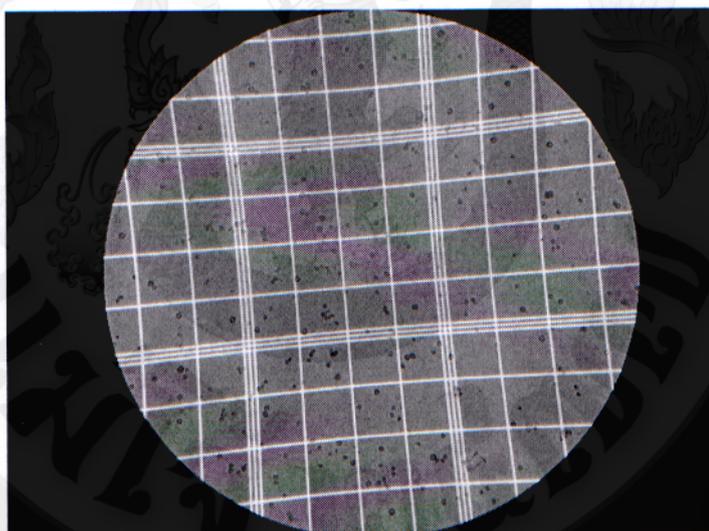
ที่มา: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.) (2557)

2. ต่อหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* เพื่อทำการขยายปริมาณ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* พบว่า ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่างและการให้แสงสว่าง มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย (กิตติพล และคณะ, 2555) ซึ่งขั้นตอนการเพาะเลี้ยงเพื่อให้ได้ปริมาณตามต้องการนั้น ผู้ทำงานวิจัยได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลการเพาะเลี้ยงจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และกรมประมง จังหวัดเชียงใหม่ โดยเริ่มจาก นำหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* 10 มิลลิลิตร เลี้ยงในอาหารเหลวสำเร็จรูป BG-11 ที่ได้จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยเช่นเดียวกัน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดจุกด้วยสำลี (แสดงในภาพผนวกที่ 3) ให้แสงตลอดเวลา และเขย่าวนทุกๆ 6 ชั่วโมง ในตู้ปลอดเชื้อที่อุณหภูมิห้อง - 35 องศาเซลเซียส ต่อเนื่องเป็นเวลา 7 วัน สังเกตสีเขียวของสาหร่ายที่เข้มข้น เป็นตัวบ่งบอกถึงการเพิ่มปริมาณของสาหร่าย *Chlorella sp.* ได้ และทำการนับเซลล์ผ่านช่องตาราง โดยส่องจากกล้องจุลทรรศน์ แสดงในภาพผนวก 4

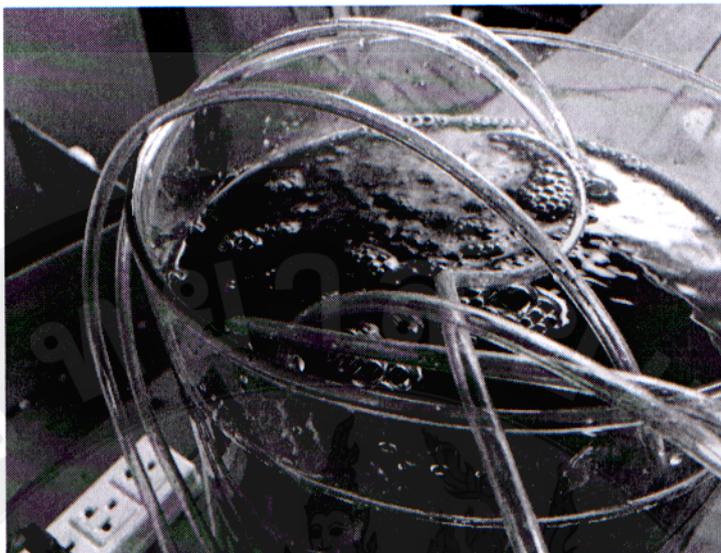


ภาพผนวกที่ 3 การถ่ายหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* ลงใน Flask ขนาด 250 มิลลิลิตร



ภาพผนวกที่ 4 การนับเซลล์ของสาหร่าย *Chlorella sp.*

เมื่อครบ 7 วัน ทำการขยาย Flask โดยการถ่ายสาหร่าย *Chlorella sp.* จาก Flask 250 มิลลิลิตร ลงใน Flask ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมอาหารเหลวสำเร็จ BG-11 200 มิลลิลิตร ปิดจุกด้วยสำลี ให้แสงตลอดเวลา และเขย่าทุกๆ 6 ชั่วโมง ในตู้ปลอดเชื้อ ที่อุณหภูมิปกติ ต่อเนื่องเช่นเดิมอีกเป็นเวลา 7 วัน ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนได้ปริมาณหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* ประมาณ 20 ลิตร



ภาพผนวกที่ 5 สำหรับ *Chlorella sp.* ปริมาตร 20 ลิตร ในโหลแก้วที่มีการเติมอากาศ

เมื่อได้ปริมาตรสาหร่ายครบ 20 ลิตรตามต้องการแล้ว โหลแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 เซนติเมตร สูง 32 เซนติเมตร จำนวน 2 โหล) เติมอากาศตลอดเวลา เพื่อไม่ให้เกิดการตกตะกอนของสาหร่าย แล้วตั้งโหลที่แจ่งเพื่อให้ได้รับแสงแดด และสังเคราะห์แสงได้เต็มที่ (ตั้งแต่ขั้นตอนนี้ไม่ต้องทำในตู้ปลอดเชื้อแล้ว) ในตอนกลางคืน ปิดไฟจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อให้แสงสว่างแทนแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ คลุมโหลด้วยผ้าขาวบาง เพื่อกันแมลงตกลงไป

3. ขยายสเกลลงบ่อซีเมนต์ทรงกลมขนาด (ปริมาตรน้ำเลี้ยงสาหร่าย 160 ลิตร)

ขั้นต่อไปเป็นการขยายออกสู่สเกลใหญ่ เพื่อใช้ในการทดสอบขั้นต่อไป เริ่มจากการเตรียมบ่อซีเมนต์ การทดลองนี้ใช้บ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ล้างบ่อให้สะอาด ปิดรูน้ำออกให้สนิท เติมน้ำจนเกือบเต็มบ่อ หันหยวกกล้วยเป็นชั้นๆ แซ่ในบ่อซีเมนต์ เติมกรดซัลฟิวริก จนกระทั่งน้ำในบ่อใสภาพเป็นกลาง ทิ้งไว้แบบนี้ 7 วัน เมื่อครบกำหนดให้ปล่อยน้ำทิ้ง และนำกากหยวกกล้วยที่แช่น้ำไว้ออกให้หมด ทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดอีกครั้ง จากนั้นปิดรูน้ำออก และใส่น้ำสะอาดลงในบ่อ ให้ระดับน้ำสูงประมาณ 20 เซนติเมตร เติมอาหารที่จะใช้เลี้ยงสาหร่าย *Chlorella sp.* ประกอบด้วย ยูเรีย ฟอสเฟต รำ ปุ๋ยนา ปลาป่น (กรมประมง จังหวัดเชียงใหม่) โดยสัดส่วนปริมาณของอาหารที่เติมลงไปบ่อ แสดงในตารางผนวก 2 คนส่วนผสมทุกอย่างให้ละลายในน้ำก่อนเติมลงไปบ่อ เพื่อป้องกันให้ตกตะกอนน้อยที่สุด เติมอากาศในน้ำตลอดเวลา ด้วยปั๊มเติมอากาศ แสดงในภาพผนวก 6 บ่อซีเมนต์ควรอยู่ในที่ที่รับแสงแดดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสาหร่าย *Chlorella sp.* ต้องการแสงแดดเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ทิ้งไว้ 7 วัน จึงเติมหัวเชื้อ *Chlorella sp.*

จำนวน 20 ลิตรที่เตรียมไว้ ลงไป สังเกตความเปลี่ยนแปลงของสีน้ำสาหร่ายในบ่อจากสีครีมขุ่น จะเริ่มเขียวและใสขึ้น แสดงในภาพผนวก 6 ช่วงสัปดาห์ที่ 2-3 ของการเพาะเลี้ยงจะเป็นช่วงที่ดีที่สุด ที่จะนำน้ำสาหร่าย *Chlorella sp.* ไปใช้ในการทดลองหมักร่วม เพราะเป็นช่วงที่สาหร่าย *Chlorella sp.* เจริญเติบโตเต็มที่ และหากต้องการขยายพันธุ์เพิ่ม ให้ทำการเก็บหัวเชื้อสาหร่าย *Chlorella sp.* จากบ่อซีเมนต์แรกนี้ 20 ลิตร แล้วทำเช่นเดียวกัน เนื่องจากบ่อซีเมนต์ต้องตั้งอยู่ในที่ที่แสงแดดส่องถึง จึงอาจตั้งอยู่กลางแจ้ง ทำให้โอกาสที่ยุ่งจะมารวมไขและสิ่งปนเปื้อนอื่นๆตกลงไปนั้น เป็นไปได้ง่าย จึงควรนำผ้าขาวบางแบบบางมาคลุมบ่อไว้ ไม่ควรใช้แบบหนาหรือที่บังจนเกินไป เพราะอาจทำให้การรับแสงนั้นเป็นได้ไม่เต็มที่

ตารางผนวกที่ 2 ปริมาณอาหารที่เติมในบ่อซีเมนต์ สำหรับน้ำเลี้ยงสาหร่ายปริมาตร 160 ลิตร

อาหาร	ปริมาณ (กิโลกรัม)
ยูเรีย	0.048
ปุ๋ยนา	0.04
ฟอสเฟต	0.032
รำ	0.056
ปลาป่น	0.048



ภาพผนวกที่ 6 แสดงสีของน้ำเลี้ยงสาหร่ายที่เปลี่ยนแปลงไป ใน 2 สัปดาห์

4. วัดปริมาณการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* โดยการนับเซลล์

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเลี้ยงสาหร่ายในบ่อซีเมนต์เพื่อไปส่องกล้องจุลทรรศน์ นับเซลล์ทุกวัน สาหร่าย *Chlorella sp.* ทุกวัน จนครบ 14 วัน หรือ 2 สัปดาห์ โดยผลการนับเซลล์นั้นแสดงในตาราง ผนวก 3

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณเซลล์สาหร่ายในแต่ละวัน ที่นับได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

วันที่	จำนวน เซลล์/ช่อง					จำนวน เซลล์/25 ช่อง	Total ($\times 10^4$ เซลล์/มิลลิลิตร)
	1	2	3	4	5		
1	5	6	3	4	0	90	77.50
	1	2	5	1	4	65	
2	11	6	7	7	7	190	162.50
	7	4	7	5	4	135	
3	3	11	5	8	7	170	165.00
	4	3	10	6	9	160	
4	4	4	6	5	4	115	132.50
	5	7	10	4	4	150	
5	18	13	9	8	20	340	311.25
	12	12	11	23	6	320	
	13	15	12	16	14	350	
	11	9	12	6	9	235	
6	10	8	6	10	11	225	308.75
	10	11	15	6	26	340	
	13	5	16	13	10	285	
	28	12	16	12	9	385	
7	9	8	13	11	12	265	260.00
	9	14	8	8	11	250	
	10	11	16	8	5	250	
	4	8	12	12	14	250	
	11	5	13	11	14	270	

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

วันที่	จำนวน เซลล์/ช่อง					จำนวน เซลล์/25 ช่อง	Total ($\times 10^4$ เซลล์/มิลลิลิตร)
	1	2	3	4	5		
	12	13	9	10	11	275	
8	20	15	14	8	15	360	298.33
	23	13	17	17	11	405	
	12	8	7	22	7	280	
	13	15	14	6	11	295	
	6	12	7	12	5	210	
	19	9	9	5	6	240	
9	22	27	27	26	31	665	575.83
	24	18	26	19	18	525	
	6	11	10	16	12	275	
	21	18	17	26	21	515	
	26	25	27	20	22	600	
	36	26	39	40	34	875	
10	35	21	28	36	41	805	728.33
	27	26	43	43	40	895	
	26	16	24	17	29	560	
	13	27	26	20	27	565	
	21	30	21	35	33	700	
	32	43	35	38	21	845	
11	17	41	26	22	15	605	825.00
	38	25	34	33	32	810	
	29	33	38	45	34	895	
	39	42	30	41	30	910	
	39	33	32	31	45	900	
	33	25	34	34	40	830	

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

วันที่	จำนวน เซลล์/ช่อง					จำนวน เซลล์/25 ช่อง	Total ($\times 10^4$ เซลล์/มิลลิลิตร)
	1	2	3	4	5		
12	40	58	68	56	58	1,400	1,185.00
	27	58	44	50	42	1,105	
	40	55	65	43	58	1,305	
	28	33	44	32	43	900	
	55	58	35	44	35	1,135	
13	70	62	65	72	80	1,745	1,508.33
	64	74	69	64	72	1,715	
	54	42	80	45	45	1,330	
	70	59	70	65	43	1,535	
	39	34	67	49	58	1,235	
	42	77	69	58	52	1,490	
14	42	56	44	50	51	1215	1263.33
	71	58	73	70	57	1645	
	25	26	45	47	40	915	
	58	65	86	59	79	1735	
	28	36	49	48	39	1000	
	51	34	28	43	58	1070	

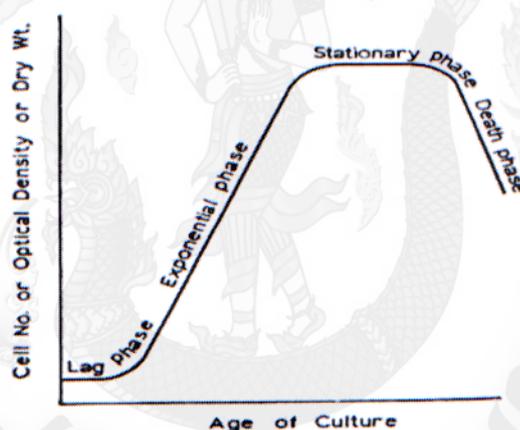
เมื่อนำผลการนับจำนวนเซลล์ในตารางมาเขียนเป็นกราฟ แสดงในภาพผนวก 8 พบว่าจำนวนเซลล์ของสาหร่ายนั้นมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละวัน สูงที่สุดในวันที่ 13 หลังจากนั้นก็ลดลงอย่างชัดเจนในวันที่ 14 สอดคล้องกับทฤษฎีของ Kumar and Singh. (1976) และ ผกาวดี และคณะ (2552) ที่ พบว่าหลังจาก 2 สัปดาห์นั้น สาหร่ายเริ่มตาย จำนวนสาหร่ายที่เห็นจากกล้องจุลทรรศน์เริ่มลดลง ดังนี้

ระยะปรับตัว (Lag Phase) เป็นระยะที่สาหร่ายเริ่มมีการปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อม ระยะนี้สาหร่ายจะยังคงไม่มีการเพิ่มจำนวนเซลล์

ระยะเอกโพเนนเชียล (Exponential Phase) เป็นระยะที่สาหร่ายมีการเพิ่มจำนวนเซลล์และเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมในการเลี้ยงเช่น ความอุดมสมบูรณ์ของอาหาร ความเข้มแสง อุณหภูมิที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง เป็นต้น

ระยะคงที่ (Stationary Phase) เป็นระยะที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตคงที่ซึ่งหมายถึงมีการเจริญเติบโตเท่ากับอัตราการตาย เนื่องจากปริมาณธาตุลดลงอย่างรวดเร็ว และเกิดสารพิษจากขบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) หรือการสลายตัวของเซลล์เพิ่มมากขึ้น

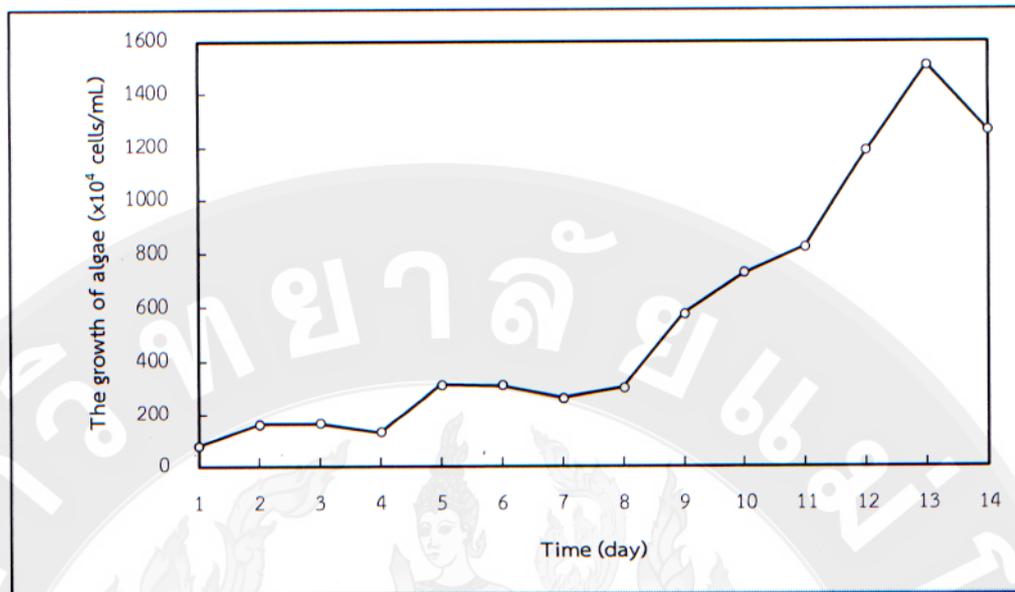
ระยะการตาย (Death Phase) เป็นระยะที่สาหร่ายมีการหยุดการเจริญเติบโต และมีอัตราการตายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากธาตุอาหารหมด และสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและมีของเสียเกิดขึ้นปริมาณมาก เซลล์สาหร่ายจะเริ่มตายและจะตายเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (ผกา วดี แก้วและคณะ, 2552) แสดงในภาพผนวกที่ 7



ภาพผนวกที่ 7 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

ที่มา: Kumar and Singh. (1976)

ดังนั้น ช่วงเวลาที่เหมาะสมของอายุสาหร่ายที่จะนำไปใช้ในการหมักร่วม อยู่ในวันเพาะเลี้ยงที่ 13 และ 14



ภาพผนวกที่ 8 ปริมาณเซลล์ของสาหร่าย *Chlorella sp.* ในแต่ละวัน



ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ และวิธีการวัดองค์ประกอบก๊าซ

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ และวิธีการวัดองค์ประกอบก๊าซ

1. การวิเคราะห์ค่า COD (Determination of Chemical Oxygen Demand)

หลักการทั่วไป

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดี เป็นการวัดความสกปรกของน้ำเสีย โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ โดยใช้สารเคมี (dichromate) ซึ่งมีอำนาจในการออกซิไดซ์สูงในสารละลายที่เป็นกรด

การ Reflux มี 2 วิธี คือ แบบเปิด (Open Reflux) และแบบปิด (Closed Reflux) ทั้งสองวิธีการมีหลักการเหมือนกัน ต่างกันตรงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และแบบปิดสารอินทรีย์ที่ระเหยจะสามารถถูกออกซิไดซ์ได้มากกว่าระบบเปิด เพราะมีเวลาในการสัมผัสกับสารออกซิไดซ์ได้นานกว่า โดยงานวิจัยนี้จะเป็นการทดลองโดยใช้วิธี แบบปิด (Closed Reflux)

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดี (COD) แบบ Close Reflux

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดเก็บตัวอย่างน้ำ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. หลอด COD ขนาด 30 มิลลิลิตร
3. ที่ใส่หลอดทดลอง (Test tube rack)
4. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 150 ± 2 องศาเซลเซียส.
5. ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร
6. ปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร
7. ลูกยางปิเปต
8. บีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร
9. บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
10. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร

การเตรียมสารรีเอเจนต์

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (Standard potassium dichromate solution) ความเข้มข้น 0.0167 โมลาร์ - (Digestion reagent)

ชั่งสารมาตรฐานปฐมภูมิ (primary standard) โพแทสเซียมไดโครเมต 4.913 กรัม ซึ่งถูกทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นนำไปละลายในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ค่อย ๆ เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) 167 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต ($HgSO_4$) ลงไป 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. กรดซัลฟูริกเข้มข้นที่ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต (H₂SO₄ reagent)

ละลาย AgSO₄ 22 กรัมใน Conc. H₂SO₄ 1 ขวด ซึ่งมีน้ำหนัก 4.0 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) แล้วตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ละลาย

3. สารละลายเฟอโรอิน อินดิเคเตอร์ (Feroin)

ละลาย 1,10 – phenanthroline monohydrate (C₁₂H₈N₂·H₂O) 1.485 กรัม และ Iron(II)sulphate heptahydrate (FeSO₄·7H₂O) 0.695 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรครบ 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ละลาย [Fe (NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O] 39.2 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.H₂SO₄) 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร สารละลายนี้ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่จะนำมาใช้

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS)

1. ปิเปิดน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมสารละลาย Digestion reagent 7 มิลลิลิตร
3. ค่อยๆ เติม H₂SO₄ reagent ปริมาตร 7 มิลลิลิตร ให้ไหลลงก้นหลอดแก้วเพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นของตัวอย่างน้ำ และน้ำย่อยสลาย (ใช้ปิเปิด)
4. ทิ้งไว้ให้เย็น
5. นำมาไทเทรตกับสารละลาย FAS 0.10 โมลาร์ โดยใช้ Feroin จำนวน 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์
6. สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียว และเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ
7. นำค่าที่ได้ไปคำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS ดังนี้

การคำนวณ

$$\text{Molarity ของ FAS (M)} = \frac{\text{ปริมาตรของ } 0.0167 \text{ โมลาร์ } K_2Cr_2O_7 \times 0.10}{\text{ปริมาตร FAS ที่ใช้ไทเทรต}}$$

ตอนที่ 2 หาค่า COD ของตัวอย่างน้ำ

1. ล้างหลอด COD และฝาปิดด้วยกรด H_2SO_4 20% ก่อนใช้ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์
2. ปิเปิดตัวอย่างน้ำมา 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอด COD แล้วเติม Digestion reagent ลงไป 3 มิลลิลิตร
3. ค่อย ๆ เติม H_2SO_4 reagent ลงไป 7 มิลลิลิตร ให้ไหลลงก้นหลอดแก้ว เพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ที่ชั้นของน้ำตัวอย่างและ Digestion reagent
4. ปิดฝาหลอด COD ให้แน่น แล้วคว่ำหลอดไปมาหลายๆ ครั้งอย่างทั่วถึงก่อนจะนำตัวอย่างไป reflux เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนสะสมอยู่ที่ก้นหลอด ซึ่งอาจแตกได้ในขณะที่ทำการ reflux
5. ให้ทำ Blank โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างด้วยวิธีการทดลองเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างประมาณ 1-2 หลอด
6. นำหลอด COD ทั้งหมดที่ใส่น้ำตัวอย่างและ Blank วางบนที่ตั้งหลอดทดลอง (Rack) แล้วเข้าเตาอบที่ทำให้อุณหภูมิสูงถึง 150 ± 2 องศาเซลเซียส ก่อนหน้านั้นแล้ว เมื่อครบเวลา 2 ชม.ให้นำตัวอย่างออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งเย็น
7. เทตัวอย่างจากหลอดใส่ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไทเทรตกับสารละลาย FAS 0.10 โมลาร์ โดยใช้ Ferriin จำนวน 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์ จนกระทั่งถึงจุดยุติ จะเห็นการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ อ่านปริมาตรที่ไทเทรตตอนเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลแดงทันที

การคำนวณ

$$\text{ซีไอดี (COD)} = \frac{(A - B) \times M \times 8,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ, ลูกบาศก์เซนติเมตร}}$$

- โดย ;
- A = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรต Blank (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - B = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - M = ความเข้มข้นของ FAS (โมลาร์)

2. การวิเคราะห์ค่าของแข็ง (Determination of solid)

หลักการ

ทีเอส หรือ สารทั้งหมด (Total Solids, TS)

ทีเอส หมายถึง ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะภายหลังจากระเหยน้ำออกจากตัวอย่างน้ำจนหมด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น ก็จะได้ปริมาณของของแข็งหรือสารทั้งหมด มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร

สารระเหยง่ายและสารคงตัว (Volatile Solids and Fixed Solids)

สารระเหยง่าย หรือ วีเอส หมายถึง ปริมาณของสารที่สลายกลายเป็นไอไปได้ที่อุณหภูมิ 550 ± 50 องศาเซลเซียสส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่และไม่สลายไปเรียกว่าสารคงตัว หรือ เอฟเอส ส่วนใหญ่จะเป็นสารอนินทรีย์

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดเก็บตัวอย่างน้ำ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. โถตุดความชื้น
3. ถ้วยครุชเชิล
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
5. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส
6. Hot plate
7. ปากคืบ
8. เตาเผาความร้อนสูง

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1

1. เก็บน้ำตัวอย่างใส่ขวดเก็บน้ำ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. เตรียมถ้วยครุชเชิลโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 -105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1

ชั่วโมง

3. ทำให้เย็นในโถตุดความชื้น
4. ชั่งถ้วยครุชเชิล (A)
5. ตวงน้ำตัวอย่างปริมาตร 20-50 มิลลิลิตร ใส่ลงในถ้วยครุชเชิล (ขึ้นอยู่กับความ

สกปรกของน้ำ)

6. นำไปประเหยบน Hotplate
7. นำถ้วยครุชิวเบิลที่ระเหยแห้งแล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 103 -105 องศาเซลเซียส 15 นาที
8. ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น
9. ชั่งถ้วยครุชิวเบิล (B)
10. นำไปเผาที่ 550 องศาเซลเซียส, 15 นาที
11. ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น
12. ชั่งถ้วยครุชิวเบิล (C)

การคำนวณ

$$TS \text{ (Total Solid)} = \frac{B - A}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ}} \quad \text{หน่วยเป็น (มิลลิกรัม/ลิตร)}$$

$$VS \text{ (Volatile Solid)} = \frac{B - C}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ}} \quad \text{หน่วยเป็น (มิลลิกรัม/ลิตร)}$$

3. การวิเคราะห์สภาพกรด-สภาพด่าง (Acidity and Alkalinity)

สภาพกรด

สภาพกรดของสารละลายใดๆ คือความสามารถของสารละลายนั้นในการแตกตัวให้โปรตอน ซึ่งรวมทั้งกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอนิก กรดแทนนิก สารละลายเกลือที่แตกตัวด้วยน้ำ เช่น เกลือเหล็ก (II) ซัลเฟต หรืออะลูมิเนียมซัลเฟต ในสารละลายใดๆ ที่มีกรดแร่ (mineral acid) เจือปนอยู่จะวัดสภาพกรดได้ค่าที่พีเอชต่ำกว่า 4 น้ำทิ้งที่มีสภาพกรด คำนวณเป็น มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร แคลเซียมคาร์บอเนต จะมีพีเอชต่ำกว่า 8.2

สภาพด่าง

สภาพด่างของสารละลายใดๆ คือ ความสามารถของสารละลายนั้นในการรับโปรตอน สภาพด่างของน้ำธรรมชาติ หรือน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว เพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภค เกิดขึ้นจากองค์ประกอบของสารละลายไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ ซึ่งหาปริมาณได้โดยวิธีการไทเทรตกับกรดแร่ที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน $[H^+]$ สูง เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน เป็นต้น เมื่อจุดสมมูล (equivalent point) จะสังเกตได้จากสีของอินดิเคเตอร์ที่จะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งแสดงว่าความเป็นด่างในน้ำนั้นทำปฏิกิริยาได้หมดพอดีกับกรดที่ใช้ไทเทรตน้ำทิ้งที่มีสภาพด่าง คำนวณเป็น มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) จะมีพีเอชสูงกว่า 4 การเก็บตัวอย่างควรใช้ขวดโพลีเอทิลีน หรือขวดแก้วไพเร็กซ์ในการเก็บตัวอย่างน้ำ เพื่อป้องกันการก่อก้อน และควรทำการวิเคราะห์โดยทันทีหรืออย่างช้าภายใน 1 วัน โดยเก็บไว้ในตู้เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์หาสภาพกรด โดยวิธีอินดิเคเตอร์

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. กระจกบอทวง
3. ปิเปต
4. บิวเรตต์ ขนาด 50 มิลลิลิตร
5. ปีกเกอร์

สารเคมี

1. น้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์
2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0200 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร
3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ เมื่อพีเอชของตัวอย่างน้ำสูงกว่า 4
4. สารละลายเมทิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์ เมื่อพีเอชของตัวอย่างน้ำต่ำกว่า 4
5. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 0.1 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร

วิธีวิเคราะห์

1. เลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำที่เหมาะสม เพื่อที่จะใช้สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่เกิน 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในการไทเทรต โดยทั่วไปจะใช้ตัวอย่างน้ำ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ไล่คลอรีนอิสระที่อาจจะมีอยู่ในตัวอย่างน้ำ โดยหยดสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร ลงไป 1 หยด (0.05 ลูกบาศก์เซนติเมตร)
2. ตูดหรือตวงตัวอย่างน้ำ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์จนได้ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่
3. หยดอินดิเคเตอร์ 3 หยด (เมื่อ $\text{pH} > 4$ หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน, เมื่อ $\text{pH} < 4$ หยดสารละลายเมทิลออเรนจ์)
4. ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0200 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร จนกระทั่งถึงจุดสมมูล (จะมีสีชมพูอ่อนเมื่อใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ และสีส้มเมื่อใช้เมทิลออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์)

การคำนวณ

สภาพกรดทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร CaCO_3)
 = ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้, ลูกบาศก์เซนติเมตร \times 1,000
 ปริมาตรของตัวอย่างน้ำ, ลูกบาศก์เซนติเมตร

การวิเคราะห์หาสภาพต่าง โดยวิธีอินดิเคเตอร์

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. กระบอกตวง
3. ปิเปต
4. บิวเรตต์ ขนาด 50 มิลลิลิตร
5. ปีกเกอร์

สารเคมี

1. น้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์
2. สารละลายมาตรฐาน กรดซัลฟูริก 0.0100 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร
3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์
4. สารละลายเมทิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์
5. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 0.1 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร

วิธีวิเคราะห์

1. เลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำที่เหมาะสม เพื่อที่จะใช้สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกไม่เกิน 25 ลูกบาศก์เซนติเมตรในการไทเทรต โดยทั่วไปจะใช้ตัวอย่างน้ำ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่คลอรีนอิสระที่อาจจะมีอยู่ในตัวอย่างน้ำ โดยหยดสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร ลงไป 1 หยด (0.05 ลูกบาศก์เซนติเมตร)
2. ตูดหรือตวงตัวอย่างน้ำ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์จนได้ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ และตูดน้ำปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่อีกใบหนึ่ง
3. หยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ ลงไปขวดละ 3 หยด
4. ถ้าตัวอย่างน้ำมีสีชมพู ไทเทรตด้วยกรดซัลฟูริก 0.0100 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร จนกระทั่งสีชมพูหายไป
5. บันทึกปริมาตรของกรดซัลฟูริกทั้งหมดที่ใช้ (P)
6. หยดเมทิลออเรนจ์อินดิเคเตอร์ ลงไปขวดละ 3 หยด

7. ถ้าตัวอย่างมีสีเหลืองเรื่อยๆ โทเทรตต่อไปด้วยกรดซัลฟูริก 0.0100 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร จนกระทั่งสังเกตเห็นสีเริ่ม เปลี่ยนเป็นสีส้ม โดยเทียบสีกับสีในขวดที่มีน้ำกลั่น แสดงว่าถึงจุดสมมูล

8. บันทึกปริมาตรของกรดซัลฟูริก 0.0100 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร ทั้งหมดที่ใช้ (T)

การคำนวณ

สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร CaCO_3)

= ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้ ลูกบาศก์เซนติเมตร $\times 1,000$

ปริมาตรของตัวอย่างน้ำ ลูกบาศก์เซนติเมตร

4. การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ VFA (Volatile Fatty Acid)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ปีกเกอร์
2. ปิเปต
3. ขวดรูปชมพู่
4. บิวเรต
5. Hot plate
6. ชุดกลั่น
7. ขวดวัดปริมาตร

สารเคมีที่ใช้

1. NaOH
2. H_2SO_4

การเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 0.1 M NaOH

1.1 ชั่ง NaOH 4 กรัม

1.2 จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำ กลั่น เป็น 1000 มิลลิลิตร

- 2 การเตรียมสารละลาย H_2SO_4 (1:1)

2.1 เติมน้ำกลั่นลงไปในปีเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2.2 เติม H_2SO_4 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในปีเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.3 กวนให้เข้ากัน

2.4 วางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วจึงสามารถนำไปใช้งานได้

วิธีการทดลอง

1. วางตัวอย่าง ปล่อยให้เกิดการตกตะกอน
2. นำของเหลวส่วนที่ใส ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมลงไปใน boiling flask
3. เติมน้ำกลั่น ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงไปผสมกัน
4. ใส่ Glass bead ลงไป 3-4 เม็ด
5. ใช้ปิเปตดูดกรด H₂ SO₄ (1:1) เติมลงไป 5.0 มิลลิลิตร
6. เขย่า ให้เข้ากัน แล้วต่อเข้ากับชุดกลั่น
7. เปิดสวิตซ์เตาหลุม
8. หลังจากกลั่น ได้ 5 นาที ให้เทของเหลวส่วนที่กลั่นออกมาได้ ทิ้งก่อน เพื่อป้องกันการปนเปื้อน
9. เมื่อกลั่นครบ 30 นาที หรือจนของเหลวใน boiling flask ลดลงมาก ให้หยุดกลั่น
10. ปิเปตของเหลวส่วนที่กลั่นได้ ได้ 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่แล้วนำไปวางบน Hot plate เป็นเวลา 2 นาที
11. หยด Phenolphthalein 5 หยดแล้วนำไปไทเทรตกับ 0.1 M NaOH
12. จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากใสไม่มีสี กลายเป็นสีชมพูอ่อนๆ
13. บันทึกปริมาตรของ 0.1 M NaOH ที่ใช้

การคำนวณ

$$\text{VFA (มิลลิกรัม / ลิตร)} = \frac{\text{ปริมาตร 0.1 M NaOH ที่ใช้} (6000)}{\text{ปริมาตรของของเหลวที่ใช้ไทเทรต}(0.77)}$$

5. วิธีการคำนวณอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

1. จดบันทึกปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น นำมาคำนวณก๊าซสะสมทั้งหมดหลังจากครบระยะเวลาที่กำหนด ในการทำการทดลอง

2. นำปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด หาดด้วยจำนวนวันที่ทำการหมัก

สมมุติ : ชุดการทดลองหนึ่ง มีปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมดเป็น 5,000 มิลลิลิตร ซึ่ง การทดลองนี้ ใช้ระยะเวลาในการหมักเป็นเวลา 30 วัน

วิธีการ

$$\begin{aligned} \text{อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ} &= 5,000 \text{ มิลลิลิตร} / 30 \text{ วัน} \\ &= 167 \text{ มิลลิลิตร} \cdot \text{วัน}^{-1} \text{ working volume} \end{aligned}$$

สรุป : ชุดการทดลองนี้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเป็น 167 มิลลิลิตร·วัน⁻¹ working volume

6. การคำนวณผลเปอร์เซ็นต์มีเทน GC (Gas Chromatography)

วิธีการทดลอง

1. ฉีดก๊าซมีเทนมาตรฐาน ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร จำนวน 2 ซ้ำ
2. นำพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละครั้ง มาหาค่าเฉลี่ย (A)
3. ฉีดก๊าซตัวอย่าง ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร
4. นำพื้นที่ใต้กราฟ ณ เวลาของก๊าซมีเทน (B) มาใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์มีเทน
สูตรในการคำนวณ

$$\% \text{ แก๊สมีเทน} = \frac{B}{A} * 100$$

A

ปริมาตรที่ได้มีหน่วยเป็น %v/v





ภาคผนวก ค

การคำนวณ

การคำนวณ

1. การคำนวณองค์ประกอบของก๊าซโดยใช้ปริมาณธาตุ

เมื่อทำการทดสอบหาองค์ประกอบของธาตุ โดยวิธี Ultimate Analysis ได้แล้ว นำองค์ประกอบธาตุ ที่ประกอบด้วย Carbon, Hydrogen, Oxygen และ Nitrogen มาคำนวณโดยใช้สมการที่ (12) ที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 แล้ว และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงได้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel เข้ามาช่วยให้การคำนวณนั้นง่ายขึ้น แสดงในภาพผนวก 9

Content	From Sample	Mol.	CH ₄	CO ₂	NH ₃	
			[1]	[2]	[3]	[1+2+3]
C _a H _b O _c N _d	(g/100 g D.M.)	(Mole/100 g)	$((4a+b-2c-3d)/8)$	$((4a-b+2c+3d)/8)$	(d)	
a	44.995	3.75	2.03	1.71	0.66	4.41
b	7.15	7.15				
c	31.19	1.95				
d	9.195	0.66				
% Content	92.53		46.18	38.91	14.91	

ภาพผนวกที่ 9 หน้าตาของการคำนวณองค์ประกอบก๊าซในโปรแกรม Microsoft Excel

2. คำนวณประสิทธิภาพการกำจัด (% remove)

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด COD (\%COD remove)} = \frac{(\text{COD}_{\text{ก่อน}} - \text{COD}_{\text{หลัง}})}{\text{COD}_{\text{ก่อน}}} \times 100$$

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด TS (\%TS remove)} = \frac{(\text{TS}_{\text{ก่อน}} - \text{TS}_{\text{หลัง}})}{\text{TS}_{\text{ก่อน}}} \times 100$$

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด VS (\%VS remove)} = \frac{(\text{VS}_{\text{ก่อน}} - \text{VS}_{\text{หลัง}})}{\text{VS}_{\text{ก่อน}}} \times 100$$

3. การหาคักยภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้ก๊าซมีเทน (% BMP)

ศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนหาได้จากการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน แล้วนำมาแสดงในรูปแบบของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมตามระยะเวลาที่ทำการทดลอง

$$\%BMP = \frac{\text{ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด (L)}}{\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี (L)}} \times 100$$

จากทฤษฎี VS 1 kg เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน 400 L (Suebsagoon Yuiopom, *et al.* (2010))

4. ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Specific Methane Yield)

ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนหาได้จากการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน เพื่อนำมาเขียน กราฟแสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมตามระยะเวลาที่ทดลอง

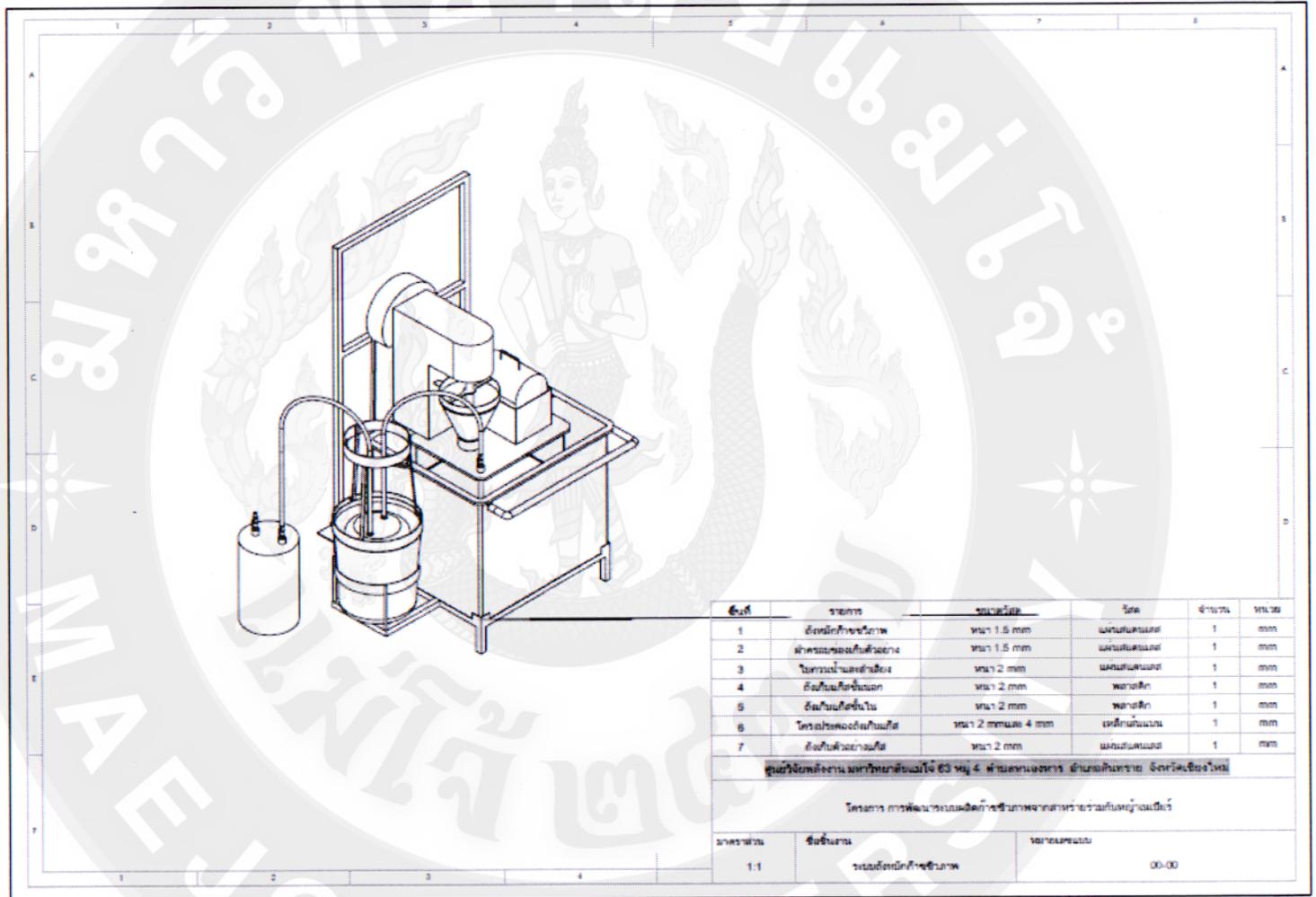
$$\text{Specific Methane Yield} = \frac{\text{ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด (mL)}}{\text{ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (mg)}}$$

ที่มา : สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2554)

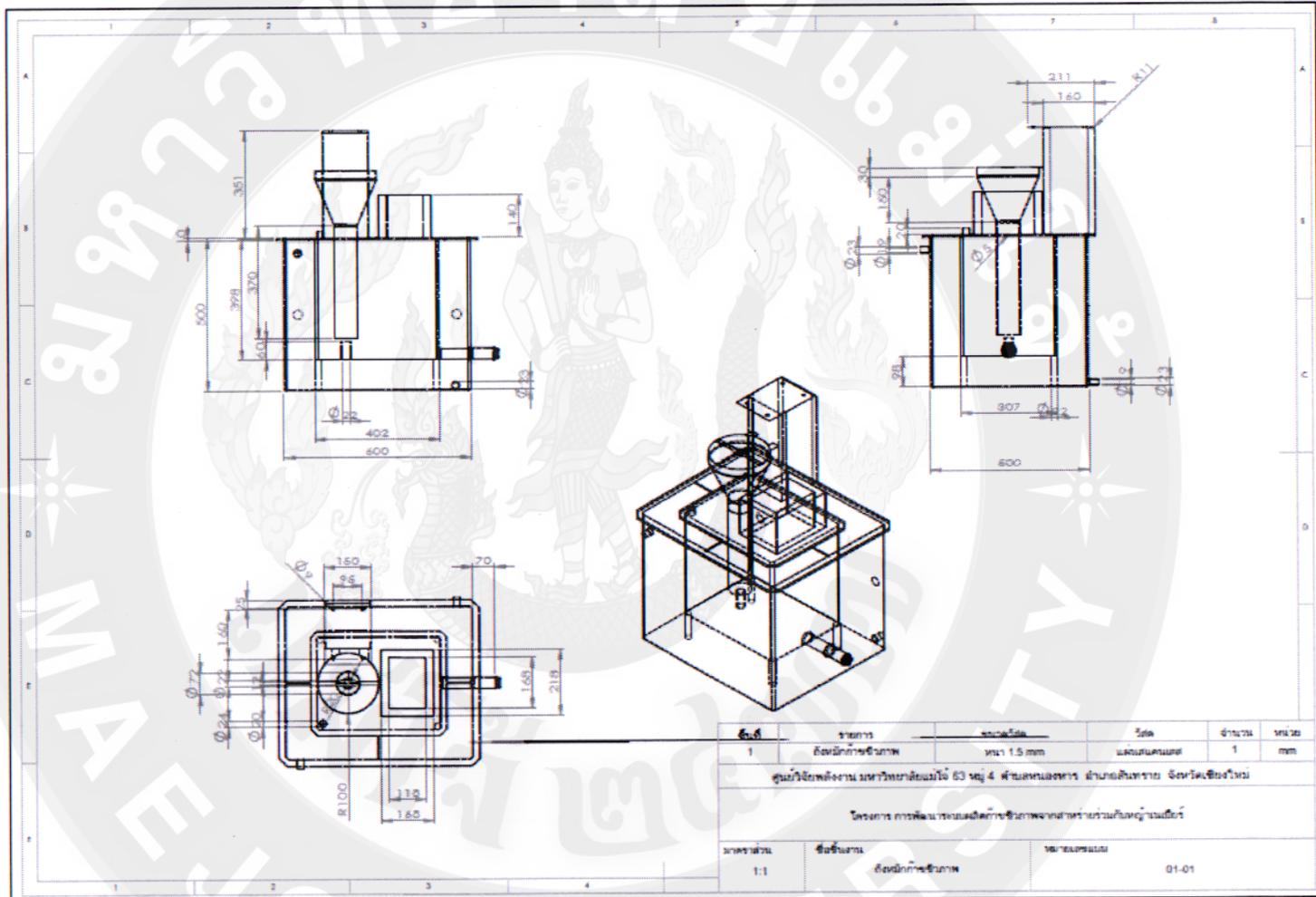


ภาคผนวก ง

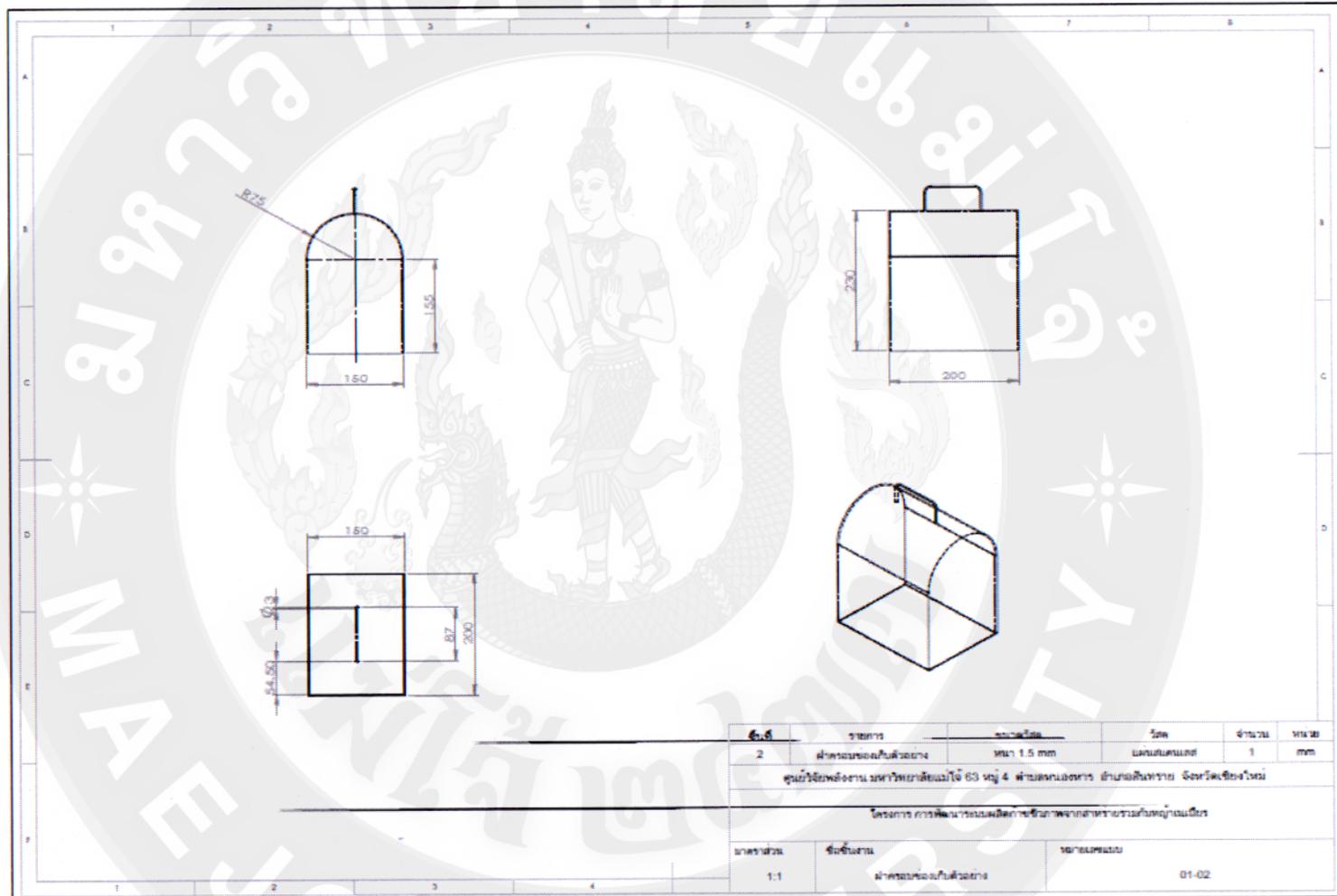
Reactor แบบ CSTR ขนาด 50 ลิตร



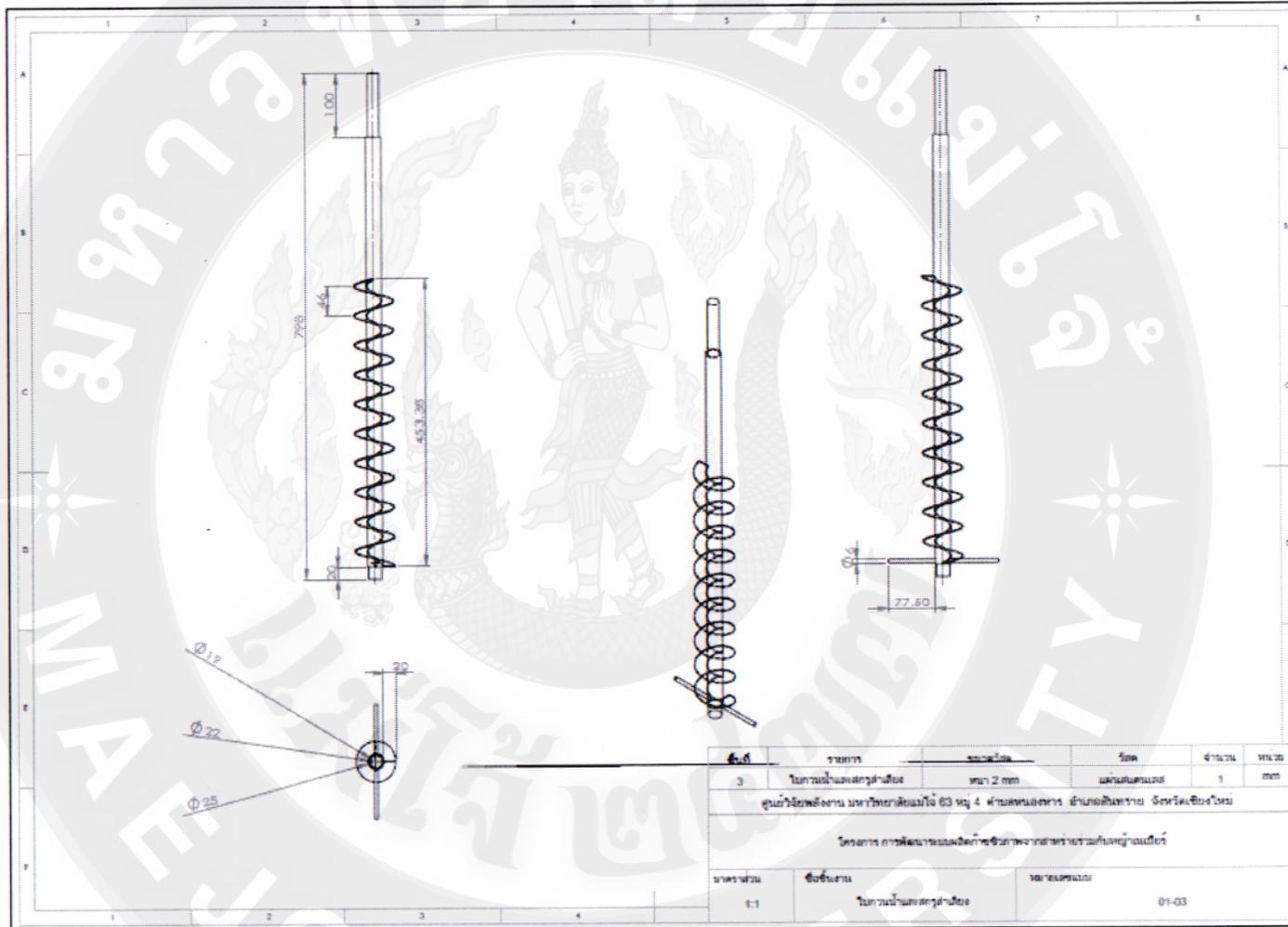
ภาพผนวกที่ 10 ระบบถังหมักก๊าซชีวภาพ



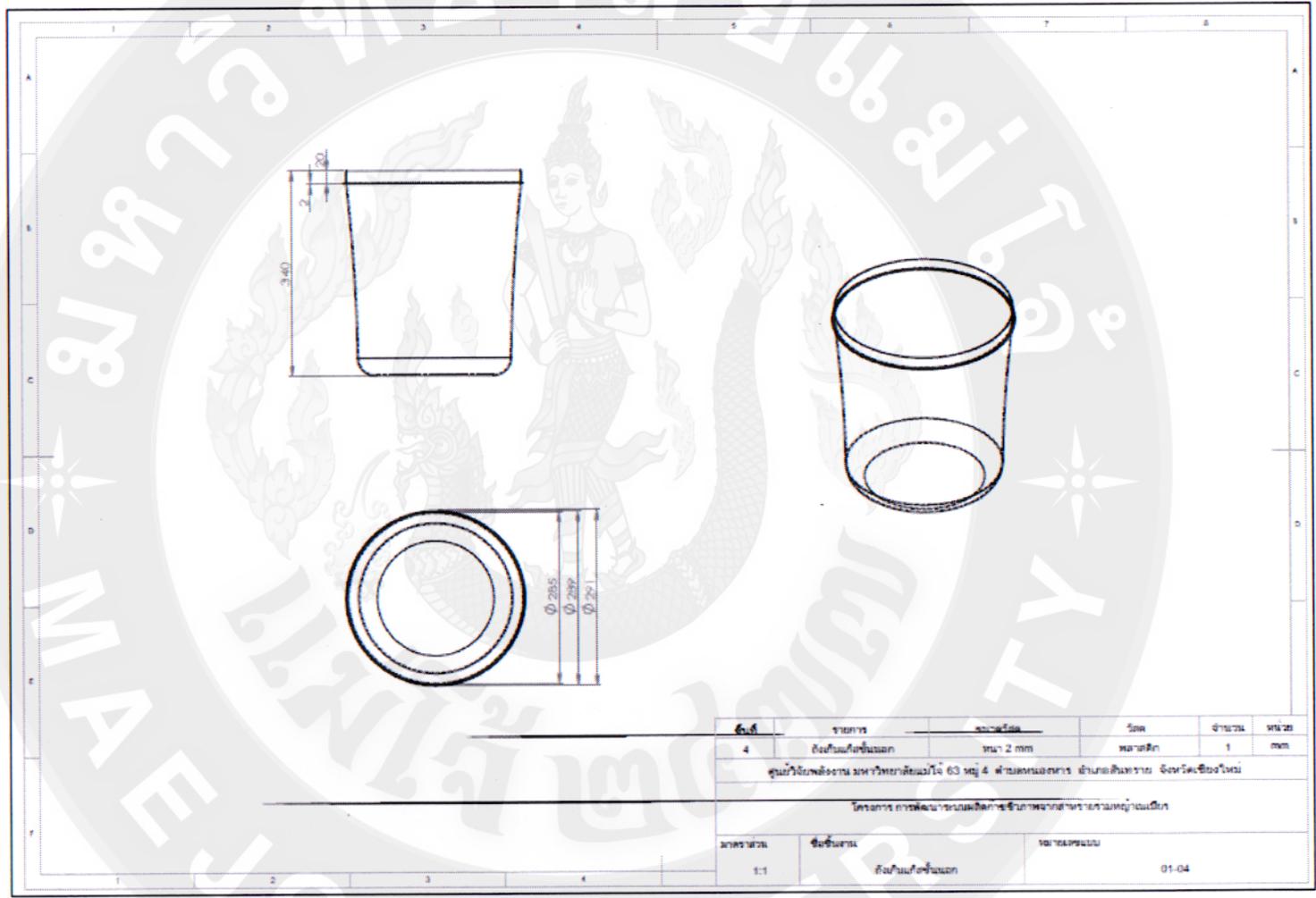
ภาพผนวกที่ 11 ถังหมักก๊าซชีวภาพ



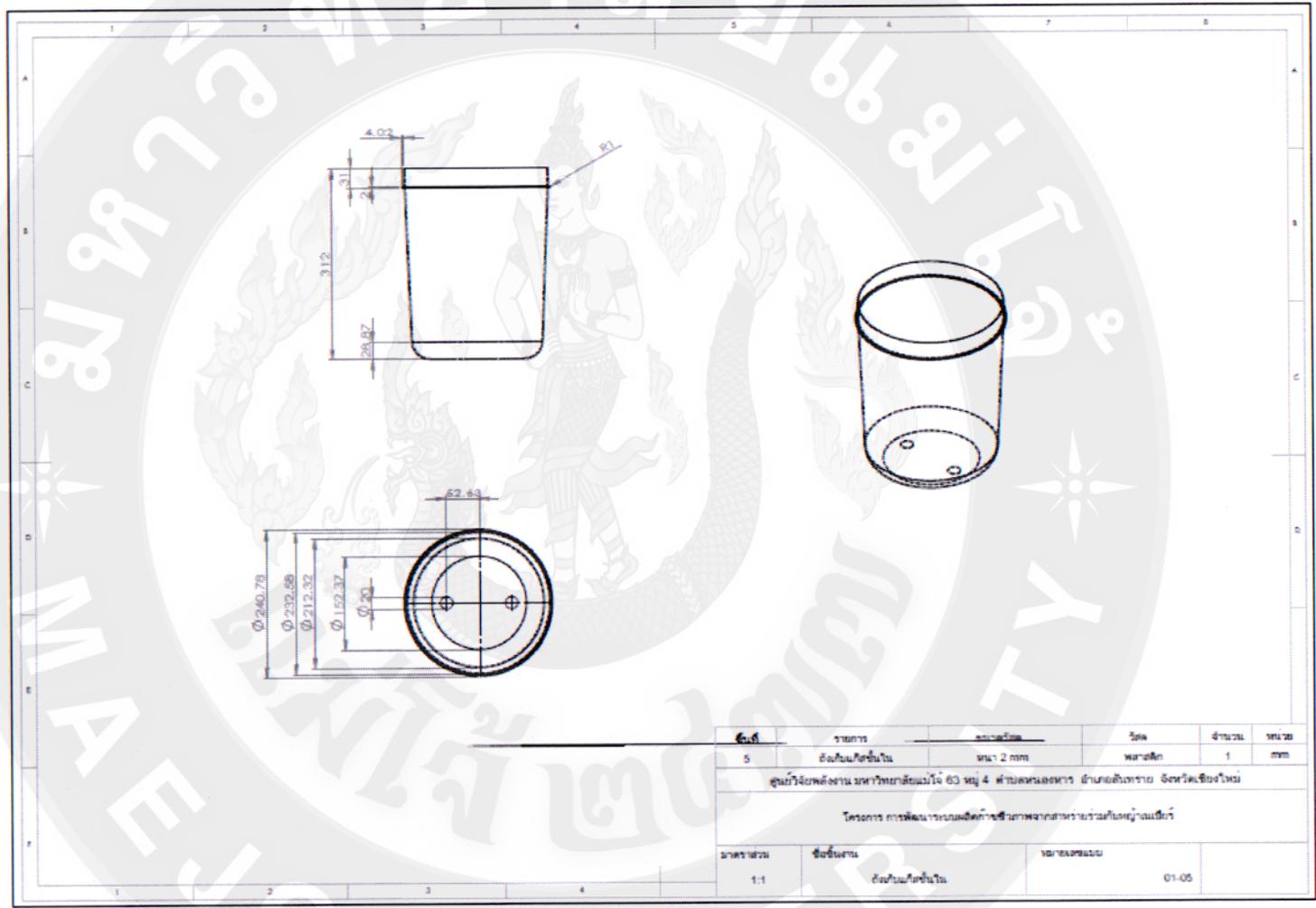
ภาพผนวกที่ 12 ฝาคอครบถึงหมัก



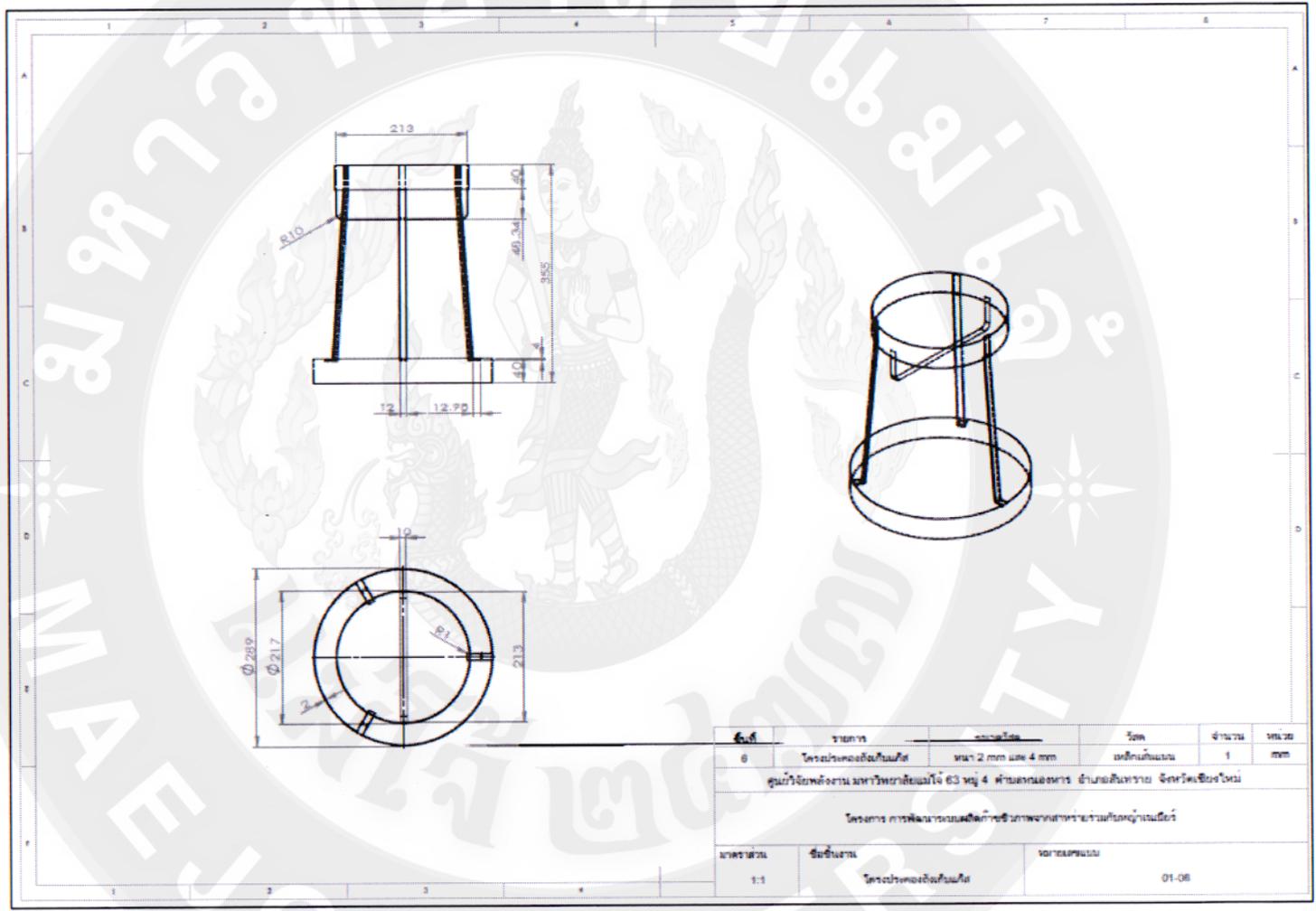
ภาพผนวกที่ 13 ใบกวนและสกรูล้ำเสียง



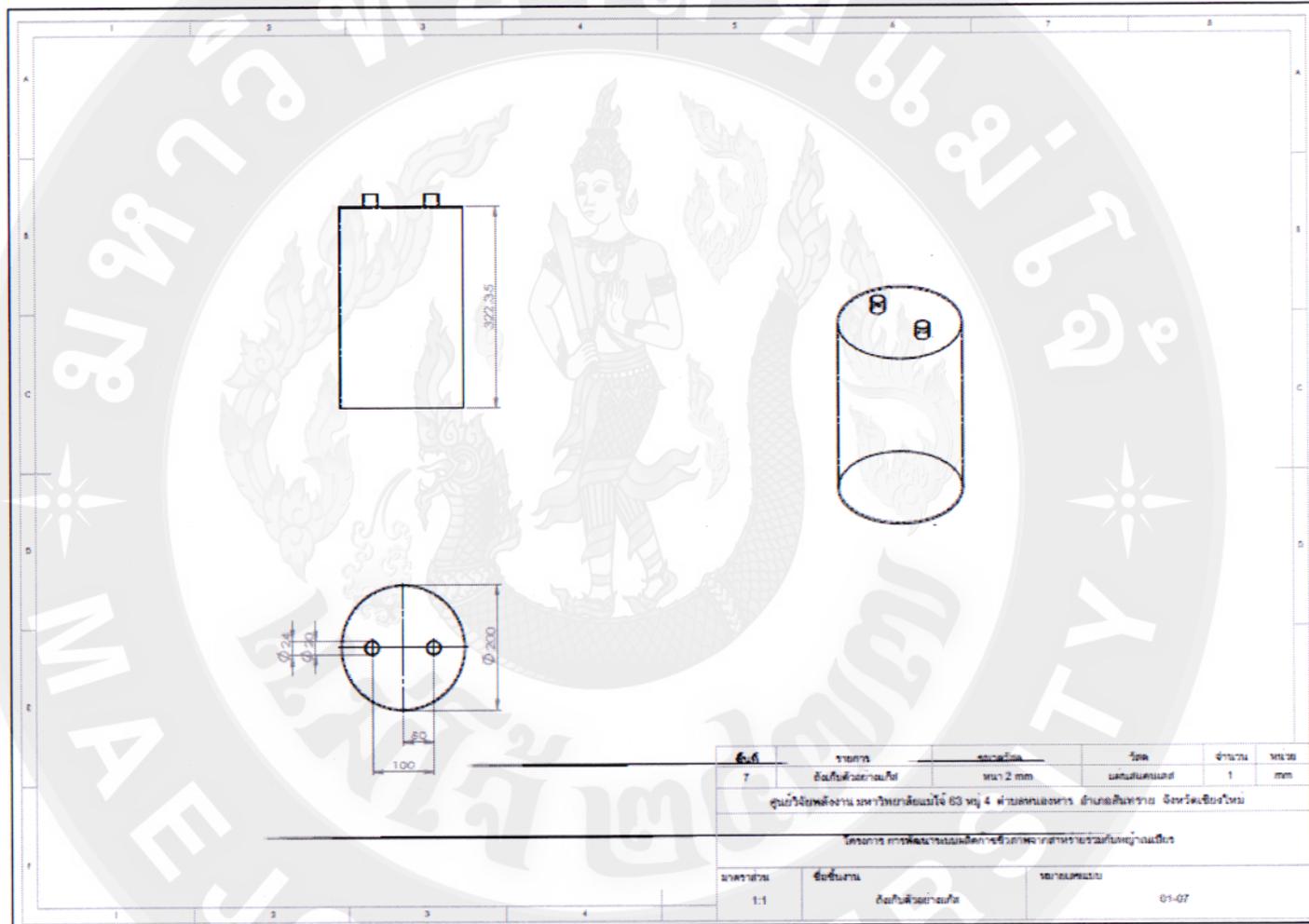
ภาพผนวกที่ 14 ถังเก็บก๊าซชั้นนอก



ภาพผนวกที่ 15 ถังเก็บก๊าซชั้นใน



ภาพผนวกที่ 16 โครงตั้งเก็บก๊าซชีวภาพ



ภาพผนวกที่ 17 ถังเก็บตัวอย่างก๊าซ



ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซจากเครื่อง Gas Chromatography



ERDI - Nakomping
Energy Research and Development Institute-Nakomping
Chiang Mai University
สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Energy Research and Development Institute-Nakomping, Chiang Mai University

ERDI-2013-01 Rev. 09
ฉบับพิมพ์เมื่อ : ๑๖/๑๒

ใบรายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน ERDI 60/396 : หน้า 1/1

ชื่อผู้รับบริการ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ที่อยู่ : วิทยาลัยพลังงานทดแทน 63 หมู่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ. เชียงใหม่ 50290

รายละเอียดตัวอย่าง : Biogas / ตัวอย่างวันที่ 23 มกราคม 2560

ลักษณะ/สภาพตัวอย่าง : เก็บใส่ถุงเก็บแก๊ส สภาพตัวอย่างปกติ

วันที่รับตัวอย่าง : 24 มกราคม 2560 (รหัสตัวอย่าง 60/1/24 932)

วันที่ทดสอบ : 24 มกราคม 2560

ผลการทดสอบ :

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ / เทคนิคที่ใช้
1. Methane (CH ₄)	74	% mole	*part 2720 C. **part D 1945
2. Carbon dioxide (CO ₂)	21	% mole	
3. Oxygen (O ₂)	1.0	% mole	
4. Nitrogen (N ₂)	4.5	% mole	

หมายเหตุ : * In house methods based on Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22nd edition, 2012

** In house methods based on American Society for Testing and Materials (ASTM), Volume 05.06 2015

ลงชื่อ จิรัชญา มณีศิริ

(นางจิรัชญา มณีศิริ)

ผู้จัดการวิชาการ

ลงชื่อ อนงค์นาถ ชัยยศ

(นางสาวอนงค์นาถ ชัยยศ)

หัวหน้างานห้องปฏิบัติการ

วันที่รายงาน (..... 25 มกราคม 2560))

รายงานฉบับนี้เป็นเอกสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น รายงานผลการทดสอบจึงมีอยู่เฉพาะฉบับจริงของสำเนาเท่านั้นโดยไม่มีให้บริการอื่นนอกเหนือจากนี้หากมีข้อสงสัยหรือข้อผิดพลาด กรุณาแจ้งมาที่สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ ม.จ.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถนนสุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
Energy Research and Development Institute-Nakomping, Chiang Mai University
239 Huay Kaew Rd., Suthep, Muang, Chiang Mai 50200, Thailand
Tel: 053-942007-9 Fax: 053-903760, 053-903763 <http://erdi.cmu.ac.th>

ภาพผนวกที่ 18 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบก๊าซชีวภาพ



ภาคผนวก ฉ

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาววิชุดา พุ่มพวง	
เกิดเมื่อ	4 มีนาคม 2535	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม
	พ.ศ. 2553	มัธยมศึกษาตอนต้น - ปลาย โรงเรียนวินิตศึกษา ในพระราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ลพบุรี
ประวัติการฝึกงาน	พ.ศ. 2556	เจ้าหน้าที่วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บริษัท บุญรอดบริวเวอรี่จำกัด
อีเมล	Chaaumaum_pp@hotmail.com	
ผลงานด้านวิชาการ	พ.ศ. 2559	การนำเสนอผลงานการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 “E-nett” ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร เรื่อง ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมของน้ำเลี้ยงสาหร่ายคอลเรลล่าและหญ้านาเนเปียร์
	พ.ศ. 2559	The 23 rd Tri-U International Joint Seminar and Symposium “Tri-U” at Bogor Agricultural University (IPB), Indonesia. In the topic Temperature Affects to the Potential of Biogas Production by Co – Fermentation from <i>Chlorella</i> sp. And Napier Grass.
	พ.ศ. 2560	การนำเสนอผลงานการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 “E-nett” ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เรื่อง การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของสาหร่ายคอลเรลล่า <i>Chlorella</i> sp. และ หญ้านาเนเปียร์ เพื่อนำไปสู่การใช้ในระดับครัวเรือน