

การใช้ประโยชน์เปลือกและกากมันสำปะหลังในการผลิตก๊าซชีวภาพ



นางสาวยุวดี มาทอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Utilization of Cassava Peel and Pulp for Biogas Production

Miss Yuvadee Mathong



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

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ประโยชน์เปลือกและกากมันสำปะหลังในการผลิต ก๊าซชีวภาพ
โดย	นางสาวยุวดี มาทอง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรณะเดช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุเนตร ชุตินธรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรณะเดช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ
(ดร. สุภาวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. วรพงศ์ ตั้งอิทธิพลากร)

5887194620 : MAJOR ENERGY TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

KEYWORDS: BIOGAS / CASSAVA PEEL / CASSAVA PULP / PRETREATMENT / CO-DIGESTION

YUVADEE MATHONG: Utilization of Cassava Peel and Pulp for Biogas Production. ADVISOR: ASSOC. PROF. DAWAN WIWATTANADATE, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 127 pp.

This research aims to study potential to produce biogas from peel and pulp from cassava starch industry. Preliminary potential of biogas production from the solid wastes was investigated by BMP method. Biogas production efficiency improvement by either pretreatment with 3% sodium hydroxide (NaOH) solution or co-digestion of peel or pulp with waste water from the cassava starch production process was also comparatively studied. The study found that single substrate fermentation of either pulp or waste water produced high biogas production potential with 0.601 and 0.589 m³/kg VS added respectively. While the peel produced only 0.306 m³/kg VS added, but increased up to 0.400 m³/kg VS added or only 31% increasing after pretreatment with 3% NaOH solution for 48 h. The result of co-digestion between pulp and waste water, peel and waste water, or peel and pulp showed no significant potential increasing of the biogas production. Hence, it can be concluded that both solid wastes and waste water from the cassava starch industry have high potential for biogas production. It also showed that the cassava pulp can be utilized to produce biogas directly without pretreatment of co-digestion. While utilizing the cassava peel as a co-substrate with either pulp or waste water is one more alternative for the solid waste management even though the peel produced lower potential of biogas production than the pulp and waste water from the production process.

Field of Study: Energy Technology and Student's Signature

Management Advisor's Signature

Academic Year: 2016 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์ ดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ดาววัลย์ วิวรรณะเดช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา แนวความคิดและแนวทางในการทำวิจัยที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนการตรวจทานและแก้ไขจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติศักดิ์ บุญปราโมทย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.สุภวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.วรพงศ์ ตั้งอิทธิพลากร กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในหลักสูตรเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้และประสบการณ์ที่มีประโยชน์ต่อผู้ทำวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท ชลเจริญ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบในการทำวิจัย รวมทั้งข้อมูลเบื้องต้นและความรู้เกี่ยวกับก๊าซชีวภาพในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ หลักสูตรเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา พี่ๆ และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างเต็มที่ ให้คำปรึกษาที่ดีและกำลังใจในการก้าวผ่านอุปสรรคต่างๆ จนการวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ก๊าซชีวภาพ.....	5
2.2 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ	7
2.2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis).....	8
2.2.2 ปฏิกิริยาอะซิโดเจเนนิซิส (Acidogenesis).....	8
2.2.3 ปฏิกิริยาอะซิโดเจเนนิซิส (Acetogenesis).....	9
2.2.4 ปฏิกิริยาเมทาโนเจเนนิซิส (Methanogenesis).....	9
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ	11
2.3.1 อุณหภูมิ (Temperature).....	11
2.3.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	11
2.3.3 อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio).....	12

2.3.4 สารอาหารและธาตุอาหาร (Nutrients and elements)	12
2.3.5 สภาพด่างไคคาร์บอเนต (Alkalinity).....	13
2.3.6 สารยับยั้งและสารที่เป็นพิษ (Inhibiting and Toxic materials).....	13
2.3.7 การกวนผสม.....	14
2.4 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	15
2.4.1 เทคโนโลยี Anaerobic Covered Lagoon	15
2.4.2 เทคโนโลยี Modified Anaerobic Covered Lagoon.....	16
2.4.3 เทคโนโลยี UASB (Up – flow Anaerobic Sludge Blanket).....	16
2.4.4 เทคโนโลยี CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor).....	17
2.4.5 เทคโนโลยี ABR (Anaerobic Baffle Reactor).....	17
2.4.6 เทคโนโลยี AFFR (Anaerobic fixed film reactor).....	18
2.5 การปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment).....	19
2.5.1 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางกล (Mechanical Pretreatment).....	20
2.5.2 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Pretreatment).....	20
2.5.3 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางความร้อน (Thermal Pretreatment).....	21
2.5.4 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological Pretreatment).....	21
2.6 การหมักร่วม (Co-digestion)	22
2.7 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี.....	22
2.8 น้ำมันสำปะหลัง.....	23
2.9 อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง.....	26
2.9.1 การใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลังในอุตสาหกรรม	26
2.9.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	29
2.9.3 ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง	33

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย	44
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	44
3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	46
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	46
3.3.1 วัตถุประสงค์/การเตรียมวัตถุประสงค์	46
3.3.2 การปรับสภาพเบื้องต้น	48
3.3.3 การหมักก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี	48
3.3.4 วิธีวิเคราะห์และความถี่ของการวิเคราะห์.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	52
4.1 องค์ประกอบของวัตถุประสงค์ก่อนการทดลอง.....	53
4.2 องค์ประกอบของเปลือกมันสำปะหลังหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	54
4.3 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP).....	56
4.3.1 ผลการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีของของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	57
4.3.2 ผลการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	58
4.3.3 ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วมระหว่างของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง	61
4.3.4 เปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีของแต่ละชุดการทดลอง	66
4.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	68
4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปซีโอไลต์ละลาย	68

4.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปของแข็งระเหยได้.....	70
4.4.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช	72
4.4.4 กรดไขมันระเหย ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็น ต่าง	73
4.5 การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	77
4.6 ผลการศึกษาคุณสมบัติของตะกอนสลัดจ์ภายหลังการหมัก	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	82
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	85
รายการอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	93
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ	103
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	106
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	127

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบและคุณสมบัติทั่วไปของก๊าซชีวภาพ.....	5
ตารางที่ 2-2 เนื้อที่เพาะปลูก ผลผลิต และมูลค่าผลผลิตตามราคาที่เกษตรกรขายได้ ปี พ.ศ. 2550 – 2558	24
ตารางที่ 2-3 ส่วนประกอบหลักในหัวมันสำปะหลัง	25
ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง.....	28
ตารางที่ 2-5 ค่าเฉลี่ยสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง	35
ตารางที่ 2-6 ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังเปรียบเทียบกับ แหล่งน้ำเสียจากโรงงานประเภทอื่นๆ	35
ตารางที่ 2-7 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง	36
ตารางที่ 2-8 คุณสมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารของเปลือกมันสำปะหลัง	37
ตารางที่ 3-1 การศึกษาผลของเปลือกมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วย สารละลาย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นเวลา 48 ชม.	49
ตารางที่ 3-2 การศึกษาผลของการหมักร่วมของเปลือกมันสำปะหลังกับของเสียจากกระบวนการ ผลิต.....	49
ตารางที่ 3-3 พารามิเตอร์ที่วัดและการวิเคราะห์.....	51
ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและหัวเชื้อจุลินทรีย์.....	53
ตารางที่ 4-2 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกมันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	55
ตารางที่ 4-3 ปริมาณกรดไขมันระเหย ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่า ความเป็นด่างในแต่ละชุดการทดลอง	77
ตารางที่ 4-4 การเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment) และการหมักร่วม (Co-digestion) ของการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ.....	78
ตารางที่ 4-5 การเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment) และการหมักร่วม (Co-digestion) ของการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ (ต่อ)	79

ตารางที่ 4-6 ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (mg/kg by wet weight) ของ
ตะกอนสลัดจ์ภายหลังการหมักของชุดการทดลองหมักร่วม อัตราส่วน 1:3..... 80



สารบัญภาพ

ภาพที่ 1-1 เป้าหมายของแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579.....	1
ภาพที่ 2-1 รูปแบบการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์.....	6
ภาพที่ 2-2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบการย่อยภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	10
ภาพที่ 2-3 ระบบ Anaerobic Covered Lagoon.....	15
ภาพที่ 2-4 ระบบ Up – flow Anaerobic Sludge Blanket.....	16
ภาพที่ 2-5 ระบบ Continuous Stirred Tank Reactor.....	17
ภาพที่ 2-6 ระบบ Anaerobic Baffle Reactor.....	18
ภาพที่ 2-7 ระบบ Anaerobic fixed film reactor	18
ภาพที่ 2-8 การปรับสภาพเบื้องต้นกับการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ย่อยสลายชีวมวล	19
ภาพที่ 2-9 ประเทศผู้ผลิตมันสำปะหลังที่สำคัญ 10 อันดับแรก ปี 2558.....	23
ภาพที่ 2-10 การตลาดมันสำปะหลัง	27
ภาพที่ 2-11 แผนผังกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง	33
ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการวิจัย	45
ภาพที่ 3-2 ของเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ ได้แก่.....	47
ภาพที่ 3-3 ถังปฏิกรณ์ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดปราศจากออกซิเจน (Anaerobic fixed film reactor: AFFR) ของบริษัท ชลเจริญ จำกัด	47
ภาพที่ 3-4 ขวดเซรั่มสีชาสำหรับการทดลองชุดบีเอ็มพี (BMP).....	48
ภาพที่ 3-5 ชุดการทดลองบีเอ็มพีในการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพ	50
ภาพที่ 4-1 เปลือกมันสำปะหลังสด และเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ	54
ภาพที่ 4-2 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของเปลือกมันสำปะหลังสดและเปลือกมัน สำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	56

ภาพที่ 4-3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของของเสียจากกระบวนการผลิต แป้งมันสำปะหลัง	57
ภาพที่ 4-4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลัง	59
ภาพที่ 4-5 ปริมาณซีโอดีและซีโอดีละลายเริ่มต้นในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพของเปลือกมัน สำปะหลังสดและเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	60
ภาพที่ 4-6 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชวันเริ่มต้นและวันสุดท้ายของการทดลอง.....	61
ภาพที่ 4-7 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกกับกากมันสำปะหลัง.....	62
ภาพที่ 4-8 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย	63
ภาพที่ 4-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง กากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย	64
ภาพที่ 4-10 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพ (m^3/kg VS added) จากการคำนวณและ ผลการทดลองจริงของการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง.....	65
ภาพที่ 4-11 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพ (m^3/kg VS added) จากการคำนวณและ ผลการทดลองจริงของการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย	65
ภาพที่ 4-12 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพ (m^3/kg VS added) จากการคำนวณและ ผลการทดลองจริงของการหมักร่วมระหว่างกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย	66
ภาพที่ 4-13 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองต่างๆ	67
ภาพที่ 4-14 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของชุดการทดลองต่างๆ	68
ภาพที่ 4-15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอดีละลายในแต่ละชุดการทดลอง	69
ภาพที่ 4-16 เปรียบเทียบปริมาณซีโอดีละลายและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	70
ภาพที่ 4-17 เปรียบเทียบปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ที่ถูกใช้ไปและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ..	71
ภาพที่ 4-18 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชตลอดช่วงเวลาการทดลอง.....	73

ภาพที่ 4-19 ปริมาณกรดไขมันระเหย (VFA) ค่าความเป็นด่าง (ALK) และอัตราส่วนกรดไขมัน
 ระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/ALK) ในแต่ละชุดการทดลอง 76

ภาพที่ 4-20 ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (%) ของตะกอนสลัดจ์ภายหลังการ
 หมัก 81



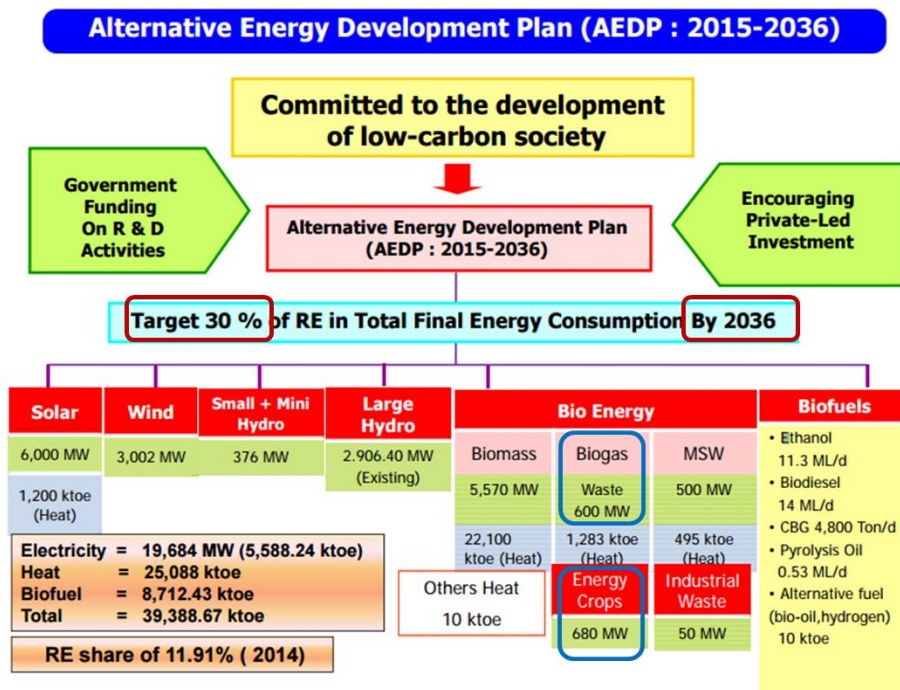
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลถือเป็นพลังงานหลักสำหรับประเทศไทย โดยพบว่าในปี พ.ศ. 2559 มีการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมากถึง 77% (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559) ขณะที่แหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มลดลง ประกอบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทั่วโลกจึงมีนโยบายที่จะพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานทางเลือก และหมุนเวียน (Alternative and Renewable Energy) เพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศโลก

ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015) ประเทศไทยกำหนดเป้าหมายการใช้พลังงานทางเลือก ร้อยละ 30 ภายในปี พ.ศ. 2579 (ค.ศ. 2036) โดยกำหนดเป้าหมายการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสีย 600 MW และจากพืชพลังงาน 680 MW ภายในปี พ.ศ. 2579 ดังภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 เป้าหมายของแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579

(<http://www.iie.or.th/iie2016/images/postdoc/files/3.แผนพลังงานทดแทน%20>

(AEDP%202558-2579)%20-%20พพ..pdf)

ก๊าซชีวภาพในประเทศไทยได้รับการส่งเสริมมานานกว่า 20 ปีแล้ว ทั้งในภาคอุตสาหกรรม ฟาร์มปศุสัตว์ และเศษอาหารจากสถานประกอบการขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบหรือสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพนั้นมีความหลากหลาย สามารถผลิตได้จากทั้งของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ วัสดุเหลือทิ้งทางเกษตร และยังสามารถผลิตได้จากพืชพลังงาน ภาคเกษตรกรรมจึงเป็นแหล่งพลังงานชีวภาพที่มีศักยภาพสูงสำหรับประเทศไทย

อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง เป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องของภาคเกษตรกรรม ที่มีการปล่อยน้ำเสียออกจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก โดยในการผลิตแป้ง 1 ตัน ก่อให้เกิดน้ำเสียประมาณ 20-35 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีค่าบีโอดี (BOD: Biochemical Oxygen Demand) และซีโอดี (COD: Chemical Oxygen Demand) สูง (เสวียน เปรมประสิทธิ์, 2544) ซึ่งเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังจึงได้รับการสนับสนุนในการติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพอย่างต่อเนื่อง นอกจากน้ำเสียแล้วอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังยังมีกากของเสียจากกระบวนการ ได้แก่ เปลือกและกากมันสำปะหลัง (โดยข้อมูลจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังแห่งหนึ่งพบว่าในการผลิตแป้งมันสำปะหลังก่อให้เกิดเปลือกและกากมันสำปะหลังโดยเฉลี่ยประมาณ 1 และ 330 ตันต่อวัน ตามลำดับ) ซึ่งกากของเสียทั้งสองนี้ โดยปกติจะทำการตากแห้งและขายให้กับผู้ผลิตอาหารสัตว์ โรงเพาะเชื้อเห็ด หรือผลิตเป็นปุ๋ยชีวภาพ ซึ่งยังไม่ค่อยคุ้มทุนและไม่เป็นที่นิยมเท่าที่ควร นอกจากนี้ในฤดูฝนไม่สามารถตากแห้งเปลือกและกากมันสำปะหลังได้ จึงก่อให้เกิดปัญหากลิ่นและของเสียตกค้างภายในโรงงานเป็นปัญหาที่ต้องได้รับการแก้ไขโดยเร่งด่วน

เนื่องจากเปลือกและกากมันสำปะหลังเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ การนำมาหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตามในมันสำปะหลังโดยเฉพาะเปลือก มีสารไซยาโนจีนิก กลูโคไซด์ (Cyanogenic Glucosides) เมื่อเนื้อเยื่อมันสำปะหลังถูกทำลาย สารไซยาโนจีนิก กลูโคไซด์ จะแตกตัวเป็นกรดไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic Acid, HCN) ซึ่งเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทนในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้ปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกในมันสำปะหลังสามารถลดได้หลายวิธี เช่น การตากแดด การอบด้วยตู้อบ การหมัก การต้ม และการแช่แข็ง เป็นต้น นอกจากนี้เปลือกมันสำปะหลังยังมีปริมาณของเซลลูโลสสูง 35.86% โดยน้ำหนักแห้ง (กัลยา อยู่นาน, 2546) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ที่สร้างความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์พืช จึงยากต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ การปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มอัตราการย่อยสลายในกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

Ofoefule et al. (2010) ศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารเคมีคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโพแทส (Potash) เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโพแทสให้ก๊าซชีวภาพใน

ปริมาณ 111 และ 124 ลิตร/มวลทั้งหมดของ slurry ในขณะที่เปลือกมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นให้ก๊าซชีวภาพเพียง 69 ลิตร/มวลทั้งหมดของ slurry

ปีท้าวรรณ ไชยพงศ์ (2557) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถิน เทพณรงค์โดยการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยวิธีบีเอ็มพี เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่า การปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินเทพณรงค์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 1.2 เท่า ด้วยศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 182.19 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารประกอบที่มีสมบัติเป็นต่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมทั้งศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยเทคนิคการหมักร่วม (Co-digestion) โดยทำการหมักร่วม ระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลัง

1.2.2 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วม ระหว่างเปลือกกับกากมันสำปะหลัง และเปลือกหรือกากมันสำปะหลัง กับน้ำเสียจากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ที่มีสัดส่วนต่างๆ กัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงวิชาการระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale Academic Research) ทำการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 30 องศาเซลเซียส ห้องปฏิบัติการภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตการวิจัยดังนี้

1.3.1 เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลังและน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ชลเจริญ จำกัด เก็บรักษาในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

1.3.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ ชนิดปราศจากออกซิเจน (Anaerobic fixed film reactor: AFFR) ของบริษัท ชลเจริญ จำกัด

1.3.3 ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) เป็นระยะเวลา 15 วัน และเติมตัวอย่างเพียงครั้งเดียว

1.3.4 ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

1.3.5 ศึกษาแนวทางการเพิ่ม BMP ด้วยการหมักร่วมเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแป้งมัน และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน ในอัตราส่วน ดังนี้

- เปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 w/w ของ VS

- เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 w/w ของ VS

- กากมันสำปะหลังกับน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 w/w ของ VS

1.3.6 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (TVS) สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ปริมาณความชื้น ค่าซีไอดี กรดไขมันระเหย ปริมาณเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส ปริมาณลิกนิน และปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

1.4.2 ทราบศักยภาพของการใช้เปลือกมันสำปะหลังเป็นวัสดุหมักร่วมกับของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ กากมันสำปะหลัง และ/หรือ น้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน

1.4.3 นำข้อมูลที่ได้มาเป็นแนวทางในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและกากมันสำปะหลังในระดับอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานทดแทน

1.4.4 เป็นแนวทางลดผลกระทบและเพิ่มมูลค่าของกากของเสียจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) เกิดเป็นกลุ่มก๊าซที่ประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (Methane, CH₄) เป็นส่วนใหญ่ รองลงมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) ไนโตรเจน (Nitrogen, N₂) ไฮโดรเจน (Hydrogen, H₂) และก๊าซอื่นๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2-1 โดยก๊าซมีเทนมีสมบัติ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เบากว่าอากาศ และติดไฟได้ (วรพจน์ คำจันลา, 2555)

จากคุณสมบัติการจุดติดไฟได้ของมีเทนที่เป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้ก๊าซชีวภาพถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนประเภทพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ในรูปแบบต่างๆ โดยก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถใช้เทียบเท่าหรือทดแทนพลังงานชนิดอื่นๆ ได้ เช่น ใช้เทียบเท่าหรือทดแทนพลังงานไฟฟ้าได้ 1.20 กิโลวัตต์ เทียบเท่าหรือทดแทนน้ำมันดีเซล 0.60 ลิตร น้ำมันเตา 0.55 ลิตร และก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม เป็นต้น นอกจากนี้การนำก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ยังเป็นการลดการเกิดภาวะเรือนกระจกสู่บรรยากาศโลกอีกด้วย (วรพจน์ คำจันลา, 2555)

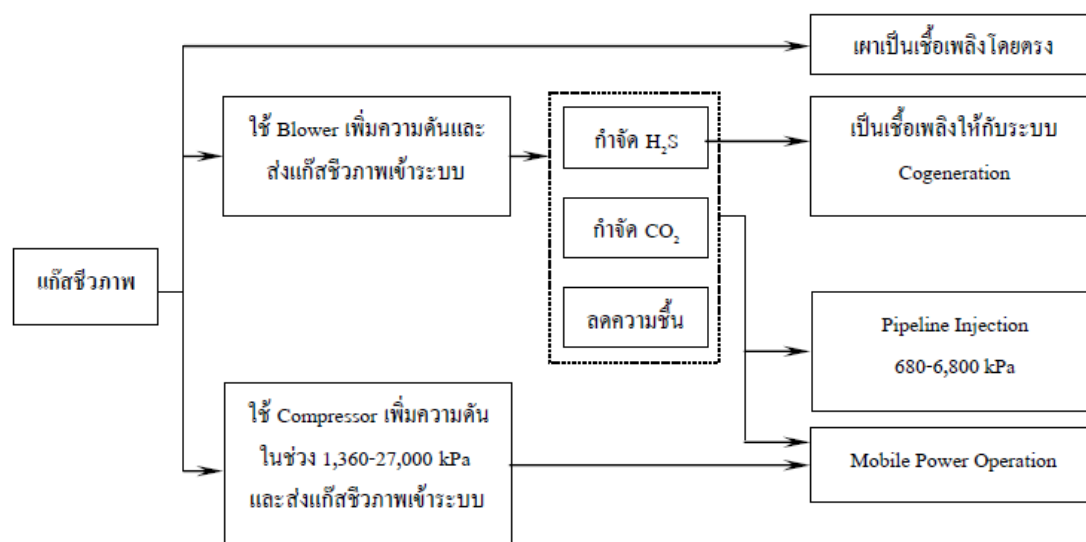
ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบและคุณสมบัติทั่วไปของก๊าซชีวภาพ

ชนิดของก๊าซ	ปริมาณ (% โดยปริมาตร)	คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ	คุณลักษณะ
มีเทน (CH ₄)	55-70	ค่าความร้อน	21 MJ/m ³ (CH ₄ 60%)
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	25-40	ความเร็วเปลวไฟ	25 cm/s
ไนโตรเจน (N ₂)	0.5-0.3	อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 °C
ไฮโดรเจน (H ₂)	0.5-1.5	อุณหภูมิจุดติดไฟของมีเทน	600 °C
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	0.5-1.5	ความจุความร้อน (Cp)	1.6 kJ/m ³ °C
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	0.01-0.05	ความหนาแน่น (P)	1.15 kg/m ³

(รัชพล พวงศรีรัตน์, 2558)

การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน มีหลักการเบื้องต้นคือการดัดแปลงก๊าซชีวภาพดังกล่าวให้อยู่ในรูปของพลังงาน เช่น การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตความร้อน แล้วใช้ประโยชน์จากความร้อนนั้นโดยตรง หรือนำความร้อนที่ได้ไปเป็นต้นกำลังสำหรับการผลิต

พลังงานอื่นๆ การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้า รวมไปถึงการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม และอื่นๆ ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 รูปแบบการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์

(ณัฐธิชา มะโน, 2548)

ปัทมวรรณ ไชยพงศ์ (2557) ได้จำแนกการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนออกเป็น 3 รูปแบบหลัก ดังนี้

1) การนำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน หรือการใช้ในการให้ความร้อนโดยตรง

การนำก๊าซชีวภาพไปผ่านกระบวนการเผาไหม้ (Combustion) เพื่อให้ความร้อนโดยตรง เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการนำก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ ตัวอย่างเช่น การใช้ทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) ในครัวเรือน การใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) ในโรงงานอุตสาหกรรม หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง เป็นต้น ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในเชิงความร้อนสูง เหมาะสำหรับฟาร์มหรืออุตสาหกรรมที่มีรูปแบบการใช้พลังงานความร้อนอยู่แล้ว ทั้งนี้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต้องมีปริมาณก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบที่สูงเพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง และควรคำนึงถึงปัญหาการอุดตันและการถูกกัดกร่อนของอุปกรณ์จากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ด้วย

2) การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนตสันดาปภายในเพื่อผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้า

รูปแบบของการใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้าสำหรับเครื่องยนต์ มีหลากหลายรูปแบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

(2.1) เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพร่วมกับน้ำมันดีเซล ซึ่งได้มีการพัฒนาให้ใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ถึง 60-70% วิธีการดัดแปลงเครื่องยนต์ง่าย ไม่ซับซ้อน และเสียค่าใช้จ่ายน้อย แต่ยังคงมีการใช้น้ำมันดีเซลด้วยส่วนหนึ่ง ใช้ก๊าซชีวภาพเพียงอย่างเดียวไม่ได้

(2.2) เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้ 100% มีค่าใช้จ่ายในการดัดแปลงเครื่องยนต์สูง เหมาะกับเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ กล่าวคือ มีกำลังผลิตมากกว่า 30 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นการดัดแปลงจากเครื่องยนต์ดีเซลให้มีการทำงานเหมือนเครื่องยนต์เบนซิน โดยสามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด

(2.3) เครื่องยนต์เบนซินดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้ 100% มีค่าใช้จ่ายในการดัดแปลงเครื่องยนต์น้อย เหมาะกับเครื่องยนต์ขนาด 10-25 กิโลวัตต์ โดยการดัดแปลงระบบผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด

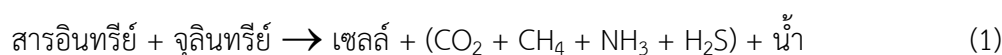
(2.4) เครื่องยนต์ที่สามารถใช้ก๊าซชีวภาพโดยเฉพาะ เป็นเครื่องยนต์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีราคาสูงมากเนื่องจากมีการออกแบบและสร้างสำหรับใช้ก๊าซชีวภาพโดยเฉพาะ เป็นเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิตมากกว่า 200 กิโลวัตต์

3) การผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System)

เป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วม ซึ่งเป็นแนวทางที่จะผลิตไฟฟ้าและนำความร้อนจากเครื่องต้นกำลังมาใช้ในระบบอย่างเหมาะสม ตัวอย่างเช่น การนำความร้อนทิ้งจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงาน หรือนำมาใช้ในการอุ่นบ่อหมักในส่วนของการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ เป็นต้น (ณัฐธิชา มะโน, 2548)

2.2 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ปฏิกริยาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังปฏิกริยาที่ (1) (ธีรพล วัฒนโกศล, 2548)



กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบดังกล่าว เป็นปฏิกิริยาชีวเคมี ที่ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังภาพที่ 2-2 คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยาอะซิโตเจเนนิซิส (Acidogenesis) ปฏิกิริยาอะซิโตเจเนนิซิส (Acetogenesis) และปฏิกิริยามีเทนโอเจเนนิซิส (Methanogenesis) ตามลำดับ

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

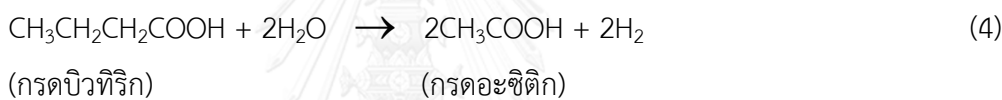
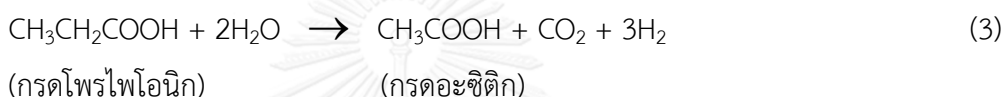
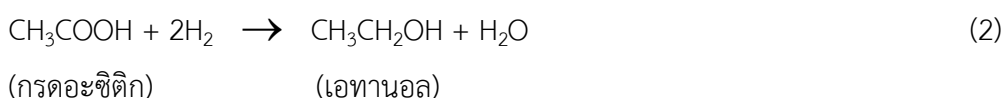
เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่มีองค์ประกอบซับซ้อน (Complex substrates) ที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ทันที ให้อยู่ในรูปที่ไม่ซับซ้อน (Simple substrates) และละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน น้ำตาลกลูโคส กรดไขมัน และกลีเซอรอล เพื่อให้ง่ายต่อการลำเลียงเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์พวกไฮโดรไลติกจุลินทรีย์ (Hydrolytic bacteria) ปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะถูกเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ที่อยู่นอกเซลล์ (Extracellular enzymes) ของจุลินทรีย์พวกไฮโดรไลติกจุลินทรีย์ โดยเอนไซม์ที่จุลินทรีย์ปล่อยออกมา ได้แก่ เซลลูเลส (Cellulases) อะไมเลส (Amylases) โปรตีเอส (Proteases) ลิเปส (Lipases) และเฮมิเซลลูเลส (Hemicelluloses) โดยการทำงานของเอนไซม์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น สารผลิตภัณฑ์ (Products) ที่ได้จากการย่อยสลายในปฏิกิริยานี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ตั้งต้น อย่างไรก็ตามการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ต้องใช้เวลาและมีข้อจำกัดในการย่อยสลายสารบางชนิด เช่น ลิกนิน (Lignin) และแว็กซ์ (Waxes) เป็นต้น

2.2.2 ปฏิกิริยาอะซิโตเจเนนิซิส (Acidogenesis)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดการย่อยสลายผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยอาศัยจุลินทรีย์ในกลุ่ม อะซิโตจีนิกจุลินทรีย์ (Acidogenic bacteria) ได้แก่ กลุ่ม Obligate anaerobes และ Facultative anaerobes สารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid: VFA) เช่น กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดบิวทีริก (Butyric acid) และสารตั้งต้นโดยตรงของมีเทน ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid) ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณน้อย นอกจากนี้ผลผลิตของปฏิกิริยานี้ยังมีแอลกอฮอล์และคีโตนร่วมด้วย เช่น เอทานอล เมทานอล และกลีเซอรอล

2.2.3 ปฏิกริยาอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)

เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอะซิโตเจเนซิส ได้แก่ กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทีริก และแอลกอฮอล์ ไปเป็นอะซิเตต (Acetate) ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะความดันไฮโดรเจนต่ำ โดยการทำงานของอะซิโตจีนิคจุลินทรีย์ หรือแบคทีเรียที่สร้างอะซิเตตและไฮโดรเจน (Acetate and H₂ – producing bacteria) ดังปฏิกิริยาที่ (2) - (4) (รัชพล พะวงค์รัตน์, 2558)



ปฏิกิริยาอะซิโตเจเนซิสเป็นปฏิกิริยาสำคัญที่ต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย (กรดโพรไพโอนิกและกรดบิวทีริก) และก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณสูง ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุทำให้ค่า pH ลดลงจนยับยั้งปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไป

2.2.4 ปฏิกริยาเมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis)

เป็นปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนจิคหรือเมทาโนเจน (Methanogens) ซึ่งมีทั้งจุลินทรีย์แกรมบวกและแกรมลบที่มีรูปร่างแตกต่างกัน มีชีวิตอยู่ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น เจริญได้ดีทั้งที่มีอุณหภูมิปานกลาง (35-40 °C) และช่วงอุณหภูมิสูง (55-60 °C) ค่า pH ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตและการผลิตมีเทนอยู่ในช่วงระหว่าง 6.5-7.8 และต้องการแอมโมเนียและซัลไฟด์ หรือซีเอทีน เป็นแหล่งไนโตรเจนและซัลเฟอร์ จุลินทรีย์กลุ่มนี้เจริญเติบโตได้ช้ามากในน้ำเสีย โดยเวลาที่จุลินทรีย์ใช้เพิ่มจำนวนเป็นสองเท่า (Generation time) อยู่ที่ 3 วัน ณ อุณหภูมิ 53 องศาเซลเซียส และ 50 วัน ณ อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนจิคสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้ (พงษ์พันธ์ พรหมพิภักต์, 2555)

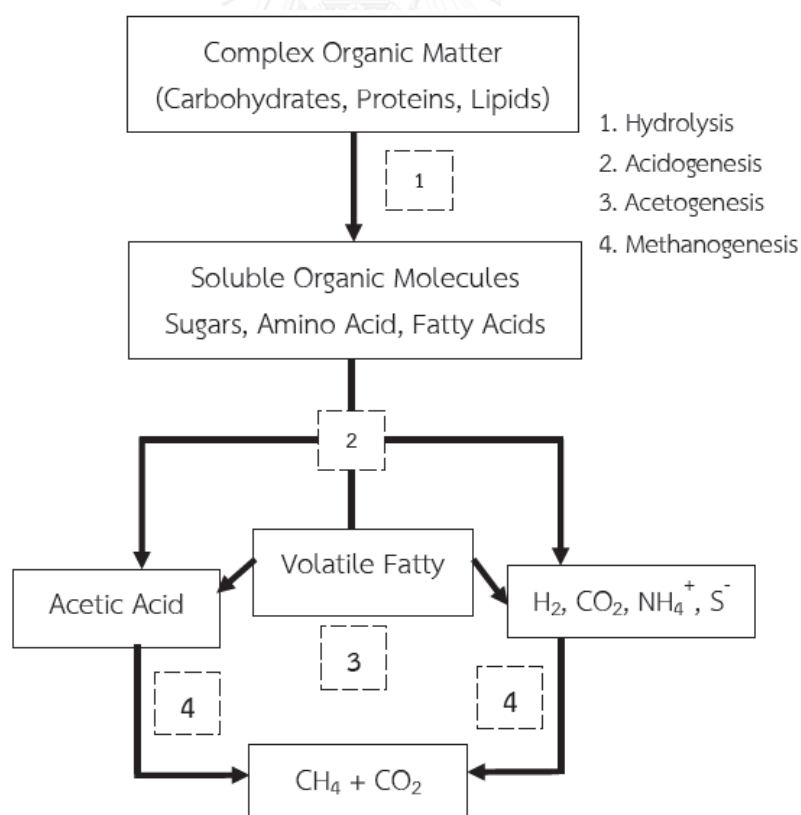
(1) Obligate acetotrophic methanogen คือ จุลินทรีย์ที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการสร้างมีเทน ซึ่งจะผลิตมีเทนในระบบถึงร้อยละ 70 ของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ทั้งหมด ดังปฏิกิริยาที่ (5)



(2) Obligate Hydrogenotrophic Methanogen คือ จุลินทรีย์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังปฏิกิริยาที่ (6)



(3) Hydrogenotrophic/ acetotrophic Methanogen คือ จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจน แต่สามารถใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานได้ดีกว่า ดังปฏิกิริยาที่ (7)



ภาพที่ 2-2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบการย่อยภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน
(รัชพล พะวงศ์รัตน์, 2558)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ประกอบไปด้วยจุลินทรีย์ 2 กลุ่มที่ทำงานอย่างสัมพันธ์กัน ได้แก่ จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรดและกลุ่มที่สร้างมีเทน การรักษาสภาวะแวดล้อมหรือระบบให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยปัจจัยหลักมีดังต่อไปนี้

2.3.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากความเร็วของปฏิกิริยาทางเคมีจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ โดยการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากตั้งแต่ 4 – 60 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้ (พงษ์พันธ์ พรหมพิพัตต์, 2555)

ช่วงการเกิดปฏิกิริยา	ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
Psychrophilic range	5-15
Mesophilic range	35-37
Thermophilic range	50-55

การควบคุมอุณหภูมิภายในถังหมักมักนิยมควบคุมให้อยู่ในช่วง Mesophilic เนื่องจากเป็นช่วงที่ทำให้เกิดอัตราการย่อยสลายสูง โดยจุลินทรีย์จะทำงานได้ดีในช่วง 20-42 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่จุลินทรีย์สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดคือประมาณ 35 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์จะลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อลดอุณหภูมิลงไป 10 องศาเซลเซียส (รัชพล พะวงศ์รัตน์, 2558)

2.3.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วง pH ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 6.7-7.5 โดยปริมาณกรดไขมันที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่อยู่ในระดับสูง จะส่งผลให้ค่า pH ลดลงต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว (รัชพล พะวงศ์รัตน์, 2558) หากค่า pH ต่ำกว่า 6.5 ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทนจะต่ำลง หากค่า pH ต่ำลงถึง 5 ก็จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์กลุ่มนี้อย่างรุนแรง ส่วนจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรดจะสามารถทนได้ถึงค่า pH 4.5 โดยไม่เป็นอันตราย (พงษ์พันธ์ พรหมพิพัตต์, 2555)

2.3.3 อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)

อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของสารอินทรีย์มีความสำคัญ เนื่องจากคาร์บอนและไนโตรเจน จะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสร้างเป็นโปรโตพลาสซึม (Protoplasm) ของเซลล์ใหม่ อัตราส่วนที่สามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพได้ คือ ตั้งแต่ 20-30 แต่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพคือประมาณ 23 ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมาก ไนโตรเจนจะถูกจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนนำไปใช้เพื่อเสริมโปรตีนในการเจริญเติบโต ทำให้ไนโตรเจนหมดไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้อัตราการเกิดเซลล์จุลินทรีย์ลดลง ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ก็จะลดน้อยลงไปด้วย แต่ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำมาก ไนโตรเจนที่มากเกินไปจนความจำเป็นของจุลินทรีย์จะเปลี่ยนมาสะสมอยู่ในรูปของแอมโมเนีย ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพได้เนื่องจากแอมโมเนียจะทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าหากค่า pH สูงถึง 8.5 จะเกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ นอกจากนี้อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมของกระบวนการหมักสารอินทรีย์ อาจเกิดจากการผสมสารอินทรีย์ที่มีอัตราส่วน C/N สูงและต่ำเข้าด้วยกัน เช่น ของเสียในรูปของแข็ง (Organic solid waste) กลุ่มวัสดุเหลือทิ้งเกษตรกรรม ซึ่งมี C/N ratio สูงผสมกับ น้ำเสียหรือมูลสัตว์ ซึ่งมี C/N ratio ต่ำ เป็นต้น (Balat and Balat, 2009)

2.3.4 สารอาหารและธาตุอาหาร (Nutrients and elements)

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ต้องใช้ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในสารอินทรีย์ คือ COD: N: P = 100: 1: 0.2 ซึ่งถ้าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่ำกว่าอัตราส่วนที่กำหนดจะทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพลดต่ำลง แต่หากมีมากเกินไปจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ (พงษ์พันธ์ พรหมพิพัตต์, 2555) และอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับคาร์บอน ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส คือ C: N: P = 700: 5: 1 (วรพจน์ คำจันลา, 2555) นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นๆ ที่มีความสำคัญในระดับรองลงไป เช่น แคลเซียม (Ca) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) แมกนีเซียม (Mg) และโซเดียม (Na) ซึ่งมีความสำคัญในส่วนของการทำงานมากกว่าเป็นองค์ประกอบของเซลล์ โดยเฉพาะธาตุเหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) ที่เป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบสูงในเซลล์ของจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน

2.3.5 สภาพต่างไปคาร์บอเนต (Alkalinity)

สภาพต่างไปคาร์บอเนต คือ ความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตอนในรูปของ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดย Alkalinity หมายถึง ความสามารถในการรักษาระดับความเป็นกรด-ด่าง โดย Alkalinity ในน้ำจะอยู่ในรูปของไปคาร์บอเนต คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ ซึ่งค่า pH จะเป็นตัวกำหนดจำนวนอนุภาค Alkalinity เหล่านี้ ค่า Alkalinity ที่เหมาะสมต่อการหมักมีค่าประมาณ 1,000-5,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต

2.3.6 สารยับยั้งและสารที่เป็นพิษ (Inhibiting and Toxic materials)

สารยับยั้งและสารที่เป็นพิษเป็นสารประกอบที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ที่อาจจะส่งผลโดยตรงหรือส่งผลทางอ้อมต่อจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดจากการมีสารนั้นๆ ในปริมาณมากเกินไปในระบบ

พงษ์พันธ์ พรหมพิทักษ์ (2555) ได้กล่าวไว้ว่าสารจำพวกที่มีน้ำหนักรวมสูงจะส่งผลที่เป็นพิษรุนแรงกว่าพวกที่มีน้ำหนักรวมเบา และไอออนที่มี Valency สูงจะส่งผลที่เป็นพิษรุนแรงกว่าพวกที่มี Valency ต่ำกว่า แต่ทั้งนี้พบว่าในน้ำเสียมีปริมาณของสารพิษปะปนอยู่ค่อนข้างสูงซึ่งน้ำเสียดังกล่าวก็สามารถถูกย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนได้ โดยระบบไม่ได้รับผลกระทบจากสารพิษดังกล่าว อาจเนื่องมาจากในกระบวนการหมักเกิดปฏิกิริยาที่หลากหลาย เช่น การตกตะกอนของสารพิษ การถูกทำลายกลายเป็นสารรูปอื่นๆ และการรวมตัวของไอออนต่างๆ เป็นต้น

สารยับยั้งและสารที่เป็นพิษมักจะมองในเชิงของปริมาณมากกว่าชนิดของสารพิษ เนื่องจากสารบางชนิดในปริมาณต่ำๆ อาจเป็นประโยชน์ต่อการทำงานของระบบ แต่ถ้ามีความเข้มข้นสูงมากเกินไปความจำเป็นก็จะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ส่งผลเสียต่อการทำงานของระบบเช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น

- **กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid)** อันเนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรดจากสารอินทรีย์จะมีอัตราการทำงานที่เร็วกว่าจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายกรดไขมันให้ได้เป็นก๊าซมีเทน หากมีการเติมสารอินทรีย์หรือน้ำเสียลงในระบบการหมักก๊าซชีวภาพมากเกินไป จึงส่งผลให้มีการสะสมของกรดไขมันในระบบสูงซึ่งเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน

- **แอมโมเนีย (Ammonia)** เกิดจากการย่อยสลายโปรตีนในน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารที่มีความจำเป็นต่อระบบก๊าซชีวภาพ เนื่องจากแอมโมเนียเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อจุลินทรีย์และช่วยลดความเป็นกรดจากกรดไขมันที่สะสมในระบบ อย่างไรก็ตามแอมโมเนียที่มีปริมาณมากเกินไปความจำเป็นจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน โดยทำหน้าที่เสมือนเป็นสารปฏิชีวนะ

(Antibiotic) ที่ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง วิธีการแก้ไขคือการลดปริมาณสารอาหารที่เข้าสู่ระบบเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติ

นอกจากนี้สารยับยั้งและสารพิษที่มีความสำคัญต่อปฏิกิริยาการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่เกลือของโลหะ เช่น โซเดียม โปแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียม ที่จะแตกตัวให้ออออนที่มีประจุบวกที่เป็นพิษมากกว่าประจุลบ และโลหะหนักต่างๆ เช่น แมงกานีส สังกะสี แคดเมียม โคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง และโครเมียม การลดความเป็นพิษของโลหะหนักอาจทำได้โดยการเติมสารประกอบซัลไฟด์ที่ละลายน้ำได้ลงไปเพื่อจับตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นโลหะหนักซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำ

2.3.7 การกวนผสม

การกวนผสมเป็นการช่วยเพิ่มโอกาสให้จุลินทรีย์สัมผัสกับสารอินทรีย์ (สารอาหาร) มากยิ่งขึ้นและกระจายสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงเป็นการป้องกันการเกิดฝ้า (Scum) ที่จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น รวมทั้งป้องกันการตกตะกอนของสารอินทรีย์ที่ทำให้ปริมาตรการทำงาน (Working volume) ของถังปฏิกรณ์ลดลงอีกด้วย ในกรณีของน้ำเสียจากโรงงานแปงมันสำปะหลังการกวนผสมจะช่วยลดการจับตัวกันเป็นก้อนของแป้งช่วยให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น

พงษ์พันธ์ พรหมพิทักษ์ (2555) ได้ศึกษาอิทธิพลของการกวนผสมที่มีต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังในกระบวนการผลิตแปงมันสำปะหลัง โดยควบคุมการกวนผสมตั้งแต่ไม่กวนผสมจนถึงกวนผสมด้วยความถี่ 24, 8, 4, และ 2 ชั่วโมง/ครั้ง ครั้งละ 10 นาที พบว่ามีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย 140, 160, 190, 240, และ 280 ลิตร/วัน ดังนั้น เมื่อมีการกวนผสมที่ถี่ขึ้นอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพก็เพิ่มมากขึ้นด้วย

วรพจน์ คำจันลา (2555) ได้ศึกษาผลของการกวนผสมที่มีต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนบ่อพักน้ำเสียจากกระบวนการล้างหัวมันสำปะหลังที่ผ่านการสับของโรงงานแปงมันสำปะหลัง โดยผลการทดลองพบว่า การกวนผสม 15 นาที หยุด 15 นาที สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด 14.81 ลิตร/กิโลกรัม รองลงมาเป็นการกวนผสม 15 นาที หยุด 30 นาที และกวนผสม 15 นาที หยุด 45 นาที เนื่องจากการกวนผสมอย่างสม่ำเสมอจะช่วยป้องกันการเกิดแผ่นตะกอนจากกากตะกอนที่ลอยขึ้นด้านบนที่ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถได้รับสารอาหารที่เติมเข้าไปส่งผลให้จุลินทรีย์บางส่วนตายได้

การกวนผสมยังช่วยให้อุณหภูมิภายในระบบมีความสม่ำเสมอและทั่วถึง พร้อมทั้งช่วยลดระยะเวลาเก็บกักถังที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานภายในระบบ อย่างไรก็ตามการกวนผสม

มากจนเกินไปอาจทำให้จุลินทรีย์สัมผัสกับสารอินทรีย์ได้ดี จนเกิดการสร้างกรดไขมันระเหยเป็นปริมาณมาก เป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน รูปแบบในการกวนผสมมีทั้งแบบต่อเนื่องและเป็นช่วงเวลา โดยการใช้เครื่องกล เครื่องสูบลและการหมุนเวียนก๊าซ

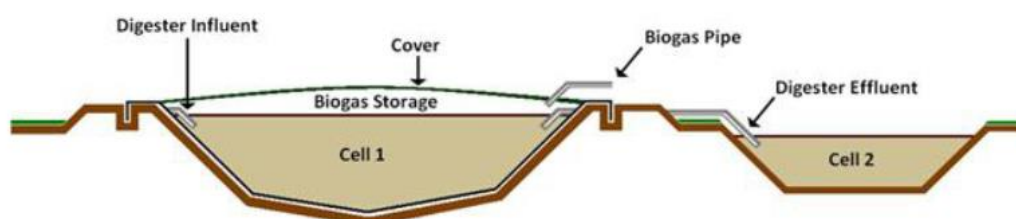
2.4 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ

ระบบการหมักแบบปราศจากออกซิเจนเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพหรือการบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันมีอยู่หลากหลายเทคโนโลยี ดังต่อไปนี้

2.4.1 เทคโนโลยี Anaerobic Covered Lagoon

ระบบ Anaerobic Covered Lagoon มีการดัดแปลงมาจากระบบบ่อปราศจากออกซิเจนที่มีการคลุมบ่อด้วยแผ่นพลาสติกประเภท High Density Polyethylene (HDPE) หรือแผ่นพีวีซี (PVC) เพื่อเก็บรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ การทำงานของระบบถูกออกแบบให้น้ำเสียไหลเข้าสู่ระบบทางด้านล่างของบ่อแล้วผสมกับตะกอนจุลินทรีย์ที่ตกตะกอนอยู่บริเวณก้นบ่อ จากนั้นให้ไหลไปตามแนวยาวของบ่อ โดยระบบรวบรวมน้ำออกจะอยู่ด้านบนของบ่อในอีกฝั่งหนึ่ง แต่ทั้งนี้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบ Anaerobic Covered Lagoon ยังไม่สามารถปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดในระบบบำบัดขั้นต่อไป ดังภาพที่ 2-3

จุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบ Anaerobic Covered Lagoon ประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนทั้งสองกลุ่ม คือ จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรดและกลุ่มที่สร้างมีเทน ผลกระทบเนื่องจากการทำงานของจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มจะไม่รุนแรงเหมือนในระบบบำบัดแบบที่มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง เพราะระบบ Anaerobic Covered Lagoon เป็นบ่อที่มีขนาดใหญ่และมีเวลาเก็บกักน้ำที่ยาวนานจึงทำให้จุลินทรีย์มีเวลาปรับตัวให้เข้ากับสภาวะของระบบ ข้อดีของระบบ Anaerobic Covered Lagoon คือ ไม่มีกลิ่นเหม็นรบกวน การควบคุมและการดูแลรักษาระบบทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อน จึงเป็นระบบที่เหมาะสมกับฟาร์มเลี้ยงสัตว์หรือชุมชนที่ต้องการก่อสร้างระบบที่ไม่ซับซ้อนและใช้เงินลงทุนต่ำ



ภาพที่ 2-3 ระบบ Anaerobic Covered Lagoon

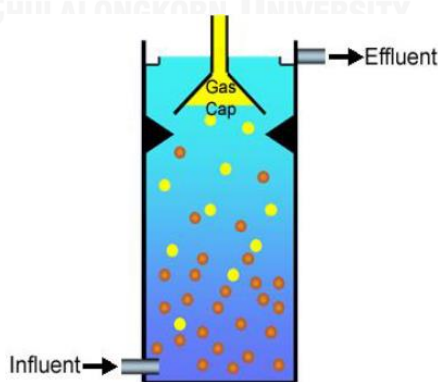
(ธัชกร ผลพันธ์, 2555)

2.4.2 เทคโนโลยี Modified Anaerobic Covered Lagoon

ระบบ Modified Anaerobic Covered Lagoon มีลักษณะเป็นบ่อ คลุมด้วยแผ่นพลาสติก เช่นเดียวกับระบบ Anaerobic Covered Lagoon แต่มีการปรับปรุง เพิ่มเติมลักษณะพิเศษให้กับระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น การเพิ่มบ่อหมักกรดหรือบ่อผลิตมีเทนและให้มีการไหลเป็นแบบอนุกรมตามขั้นตอนการย่อยสลายแบบปราศจากออกซิเจน การเพิ่มบ่อเพื่อตั้งตะกอนย้อนกลับมาใช้ใหม่ โดยเพิ่มบ่อดักตะกอนและท่อน้ำตะกอนย้อนกลับ การเพิ่มท่อกระจายน้ำให้ทั่วบ่อเพื่อให้เกิดการกวนผสมที่มีประสิทธิภาพขึ้น เป็นต้น

2.4.3 เทคโนโลยี UASB (Up – flow Anaerobic Sludge Blanket)

ระบบ UASB หรือระบบถังปฏิกรณ์ปราศจากออกซิเจนแบบชั้นสลัดจ์ เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้หลากหลาย สามารถลดความสกปรกของน้ำเสียในรูปซีโอดี ในช่วง 5,000-15,000 มิลลิกรัม/ลิตร ได้ถึง 75-85% โดยใช้เวลาในการบำบัดสั้นเพียง 4-12 ชั่วโมง หลักการทำงานของระบบนี้ คือ ให้น้ำเสียที่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของระบบทำให้น้ำเสียไหลขึ้นสู่ด้านบนของระบบ (Upflow feeding) สารอินทรีย์จากน้ำเสียจะสัมผัสกับชั้นตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง โดยชั้นตะกอนจุลินทรีย์นี้จะแขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นชั้นหนา (Blanket) ไม่ยึดเกาะกับวัสดุตัวกลาง (Media หรือ Supporting materials) เมื่อน้ำเสียผ่านเข้ามาและสัมผัสกับตะกอนจุลินทรีย์จะเกิดการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเกิดก๊าซชนิดต่างๆ ดังภาพที่ 2-4

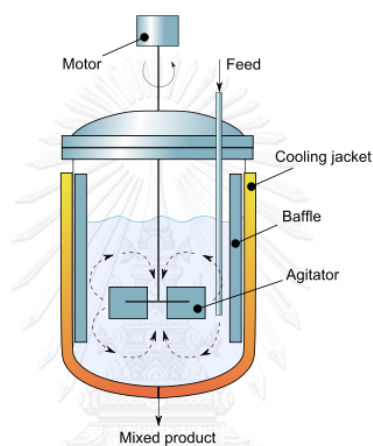


ภาพที่ 2-4 ระบบ Up – flow Anaerobic Sludge Blanket

(ธัชกร ผลพันธิน, 2555)

2.4.4 เทคโนโลยี CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor)

ระบบ CSTR หรือระบบถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบปราศจากออกซิเจน เป็นระบบที่ความเข้มข้นของสารละลายภายในถึงเท่ากันทุกจุด (Completely mixed) เนื่องจากมีการติดตั้งใบกวน (Agitator) เช่น แบบ Paddle แบบสกรู (Screw) หรือการใช้ Gas diffuser ในการกวนผสม ดังภาพที่ 2-5 เพื่อเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ให้มากยิ่งขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์รวมทั้งการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยระบบ CSTR เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง หรือมีสารพิษเจือปนสูง เนื่องจากระบบมีการกวนผสมตลอดเวลาทำให้สารแขวนลอยหรือสารพิษถูกเจือจางทันทีจึงไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อจุลินทรีย์

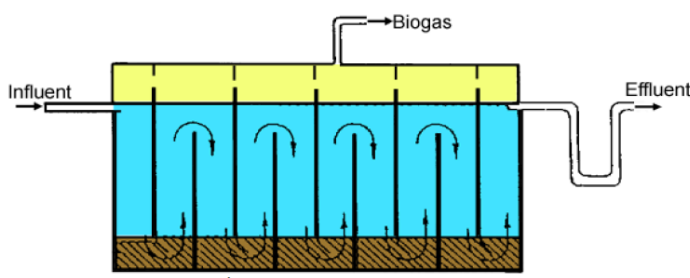


ภาพที่ 2-5 ระบบ Continuous Stirred Tank Reactor

(https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_stirred-tank_reactor)

2.4.5 เทคโนโลยี ABR (Anaerobic Baffle Reactor)

ระบบ ABR หรือระบบถังปฏิกรณ์ปราศจากออกซิเจนแบบแผ่นกั้น มีลักษณะเป็นถังยาวที่มีแผ่นกั้นขวางหลายแผ่นติดตั้งไว้ การไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะเป็นแบบไหลขึ้น ไหลลง (หรือซ้ายขวา) สลับกันไปหลายครั้ง ตามภาพที่ 2-6 เมื่อน้ำเสียไหลไปตามช่องทางที่ออกแบบไว้ในถัง สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะสัมผัสกับจุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้นจนความสกปรกของน้ำเสียลดลงก่อนออกจากระบบ

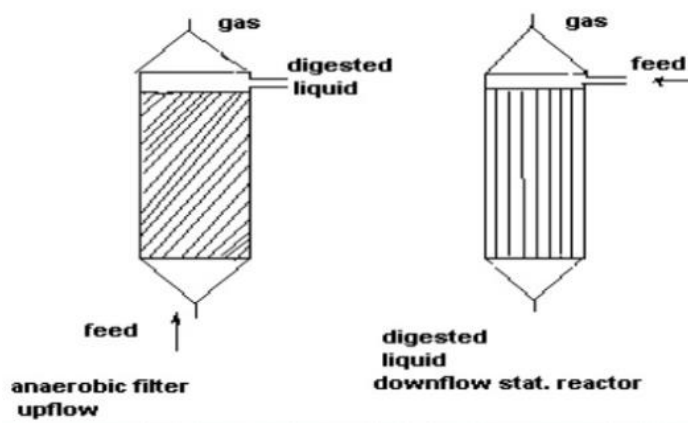


ภาพที่ 2-6 ระบบ Anaerobic Baffle Reactor
(รัชกร พลพันธ์, 2555)

2.4.6 เทคโนโลยี AFFR (Anaerobic fixed film reactor)

ระบบ AFFR หรือระบบบำบัดแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดปราศจากออกซิเจน เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีการกักเก็บเซลล์จุลินทรีย์ให้คงอยู่ในระบบบำบัด โดยการตรึงเซลล์จุลินทรีย์ไว้บนผิวของวัสดุตัวกลางที่บรรจุภายในระบบ เช่น ตาข่ายไนลอนหรือเชือกไนลอน เป็นต้น ให้อยู่ในรูปของฟิล์มชีวะ (Biofilm) ซึ่งทำให้ลดการสูญเสียจุลินทรีย์ออกไปพร้อมกับน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด ระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างคงที่และกลับสู่สภาวะการทำงานปกติได้เร็วขึ้น หากมีการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบหรือเกิดการระบรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate) สูงเกินไป

ระบบ AFFR อาจมีการป้อนน้ำเสียจากด้านล่างของถังปฏิกรณ์ (Up-flow anaerobic fixed film) หรือป้อนจากด้านบน (Down-flow anaerobic fixed film) ตามภาพที่ 2-7 โดยระบบที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือระบบที่ป้อนน้ำเสียจากด้านล่างของถังปฏิกรณ์เพื่อลดปัญหาการอุดตันลง



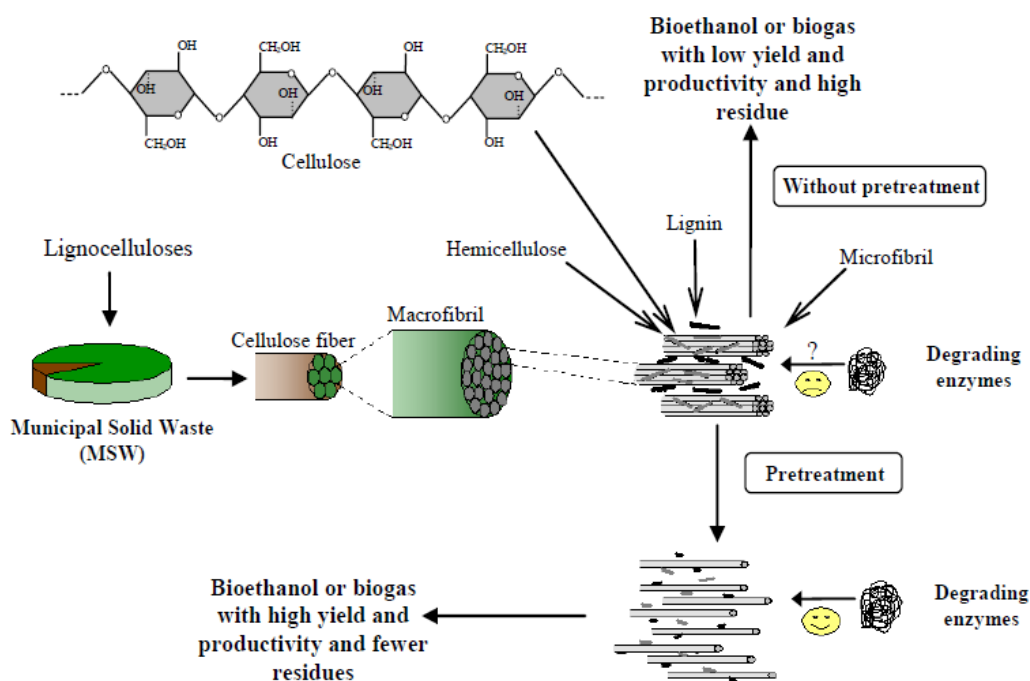
ภาพที่ 2-7 ระบบ Anaerobic fixed film reactor

(<http://www.slideshare.net/janapra/biogas-technology-27690334>)

2.5 การปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment)

ชีวมวลหรือมวลชีวภาพ (Biomass) เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานในรูปสารอินทรีย์ จึงเป็นวัตถุดิบที่นิยมนำมาศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานทดแทน เนื่องจากส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือของเสียต่างๆ เช่น แกลบ ชานอ้น กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด ขยะอินทรีย์ มูลสัตว์ เศษไม้ เป็นต้น โดยจะเห็นได้ว่าชีวมวลส่วนใหญ่มาจากส่วนของพืชที่มีสารโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ที่เรียกว่า ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) บริเวณผนังเซลล์ (Cell wall)

ลิกโนเซลลูโลสประกอบไปด้วยโพลีเมอร์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) โดยเฉพาะลิกนินที่ห่อหุ้มเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส นั้น มีคุณสมบัติทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านผนังเซลล์ได้ จึงขัดขวางการย่อยสลายจากจุลินทรีย์ (Hydrolysis) จำเป็นต้องกำจัดลิกนินออกไปด้วยการปรับสภาพผิวเบื้องต้น เพื่อให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงได้ง่าย เกิดการย่อยสลายได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 การปรับสภาพเบื้องต้นกับการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ย่อยสลายชีวมวล
(Taherzadeh and Karimi, 2008)

ทั้งนี้การปรับสภาพผิวเบื้องต้นสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

2.5.1 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางกล (Mechanical Pretreatment)

เป็นการบำบัดเบื้องต้นทางกายภาพ ด้วยวิธีการลดขนาดของชีวมวลเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย และลดระดับการเกิดโพลิเมอร์ (Degree of polymerization) ซึ่งสามารถทำได้โดยการตัด หั่น หรือบด โดยพบว่าวิธีการนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมีเทนได้ 5-25% ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล และไม่พบการผลิตสารยับยั้ง เช่น เฟอฟูรอล (Furfural) และ ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอล (Hydroxymethylfurfural: HMF) อย่างไรก็ตามควรคำนึงถึงความคุ้มค่าในการใช้พลังงานเพื่อลดขนาดชีวมวล

2.5.2 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Pretreatment)

สามารถทำได้ทั้งการปรับสภาพโดยใช้กรดหรือด่าง ดังนี้

การปรับสภาพโดยใช้กรด (Acid Pretreatment) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยกรดจะทำให้เฮมิเซลลูโลสละลาย เป็นผลให้เอนไซม์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ง่าย เกิดปฏิกิริยาย่อยสลายได้น้ำตาลในปริมาณสูงขึ้น กรดที่ใช้ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น ทั้งนี้ในการปรับสภาพอาจใช้กรดเข้มข้นหรือเจือจางก็ได้ อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาถึงปัจจัยเสี่ยงในการเกิดสารยับยั้งและการกัดกร่อนอุปกรณ์ ในเชิงอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กรดเจือจางมากกว่ากรดเข้มข้น

การปรับสภาพโดยใช้ด่าง (Alkali Pretreatment) เป็นการปรับสภาพ ลิกโนเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาสะบู่ (Saponification) ของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสกับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน ส่งผลให้ลิกนินซึ่งขัดขวางการทำงานของเอนไซม์หลุดออกจากโครงสร้าง ทำให้เอนไซม์สามารถทำปฏิกิริยาย่อยสลายเซลลูโลสได้ดียิ่งขึ้น ตัวอย่างของด่างที่ใช้ในการปรับสภาพ ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ของ โซเดียม โพแทสเซียม และแอมโมเนียม

สำหรับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะทำให้เกิดการบวมภายในพื้นผิวของเซลลูโลส ส่งผลให้พื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้นพร้อมทั้งลดระดับการเกิดโพลิเมอร์ เกิดการแยกตัวของโครงสร้างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส โดยพบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถเพิ่มปริมาณการย่อยสลายไม้เนื้อแข็งจาก 14% เป็น 55% จากการลดปริมาณลิกนินจาก 24-55% เป็น 20% ดังนั้นประสิทธิภาพของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการปรับสภาพโดยใช้ด่างจะขึ้นอยู่กับปริมาณของลิกนิน (ชุตินา สนันศรีสาคร, 2555)

2.5.3 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางความร้อน (Thermal Pretreatment)

การปรับสภาพโดยใช้ความร้อน ส่งผลให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินละลายตามลำดับ โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150-180 องศาเซลเซียส (มาศยา โชคสงวน, 2553) ในกรณีที่มีการปรับสภาพในสภาวะที่รุนแรงจะเกิดสารยับยั้งเฟอฟูรอล และไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรอลจากปฏิกิริยาการสลายตัวของน้ำตาล

การปรับสภาพด้วยวิธีทางความร้อนแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การปรับสภาพโดยใช้น้ำร้อน (Liquid hot water: LHW) และการปรับสภาพโดยใช้ไอน้ำหรือการระเบิดด้วยไอน้ำ (Stream pretreatment/Stream explosion: ST/SE)

การปรับสภาพโดยใช้น้ำร้อน มีวัตถุประสงค์เพื่อละลายเฮมิเซลลูโลส ซึ่งควรควบคุมพีเอชในกระบวนการปรับสภาพให้อยู่ในช่วง 4-7 เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดสารยับยั้ง นอกจากนี้วิธีการปรับสภาพโดยใช้น้ำร้อน ยังมีผลต่อการย่อยสลายไซแลน (Xylan) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลส โดยพบว่าการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสด้วยเอนไซม์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 6 เท่า นอกจากนี้วิธีการนี้ยังช่วยลดความเสี่ยงในการรวมตัวของสารยับยั้งเนื่องจากการใช้น้ำมากทำให้ความเข้มข้นของสารที่เกิดจากการละลายของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินเจือจางลง

การปรับสภาพโดยใช้ไอน้ำหรือการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นการละลายเฮมิเซลลูโลส เช่นเดียวกับการปรับสภาพโดยใช้น้ำร้อน ต่างกันที่ การลดความดันของชีวมวลอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการระเบิดของน้ำที่อยู่ภายในเซลล์ชีวมวล ส่งผลให้เกิดการแยกตัวขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส ซึ่งส่วนใหญ่จะทำที่อุณหภูมิ 160-220 องศาเซลเซียส ความดัน 0.69-4.82 เมกะปาสกาล อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีความเสี่ยงต่อการเกิดสารยับยั้ง

2.5.4 การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological Pretreatment)

เป็นการปรับสภาพชีวมวลโดยใช้จุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ทั้งแบคทีเรียและเชื้อรา รวมทั้งเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์เหล่านี้มาย่อยลิกนินและเฮมิเซลลูโลส

ส่วนเซลลูโลสนั้นสามารถย่อยสลายได้เพียงเล็กน้อยเนื่องจากเป็นส่วนที่ทนต่อการย่อยสลายได้มากกว่าส่วนอื่นๆ การปรับสภาพด้วยวิธีนี้ใช้พลังงานและต้นทุนต่ำ ไม่มีการใช้สารเคมี แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังให้อัตราการย่อยสลายชีวมวลที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น

2.6 การหมักร่วม (Co-digestion)

การหมักร่วมเป็นการนำสับสเตรทหรือสารอินทรีย์สองชนิดขึ้นไป มาทำการหมักร่วมกัน ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายเพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้ (Esposito et al, 2012) โดยการหมักร่วมจะช่วยสร้างความสมดุลระหว่างค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) โดยส่วนใหญ่จะช่วยเพิ่มค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนให้สูงขึ้นกว่าการหมักด้วยสับสเตรทเพียงชนิดเดียว (ชนกพร วงษ์วัน, 2555)

ในกรณีของชีวมวลที่มีองค์ประกอบเป็นลิกโนเซลลูโลส เมื่อผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นจะได้ไฮโดรไลเสต (Hydrolysate) ที่ประกอบด้วยโมเลกุลน้ำตาลต่างๆ โดยมีคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นหลัก ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเติมแหล่งไนโตรเจนเพื่อปรับสมดุลสารอาหารให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (สุรีย์วัลย์ สิทธิจันดา, 2557)

ชนกพร วงษ์วัน (2555) พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ร่วมกับของเสียกลีเซอรอลจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้น โดยการเติมกลีเซอรอล 1% โดยปริมาตรของระบบ จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด 170 L/kg VS removed ซึ่งเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ร้อยละ 52.6 กล่าวคือ กลีเซอรอลจะช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ในระบบทำให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น

นอกจากนี้ผลพลอยได้ของการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ กากตะกอนที่ได้จากการย่อยสลายสับสเตรทหรือสารอินทรีย์ ซึ่งประกอบด้วยธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช จึงสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพแทนการใช้ปุ๋ยเคมีที่มีราคาสูงและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกทางเลือกหนึ่ง

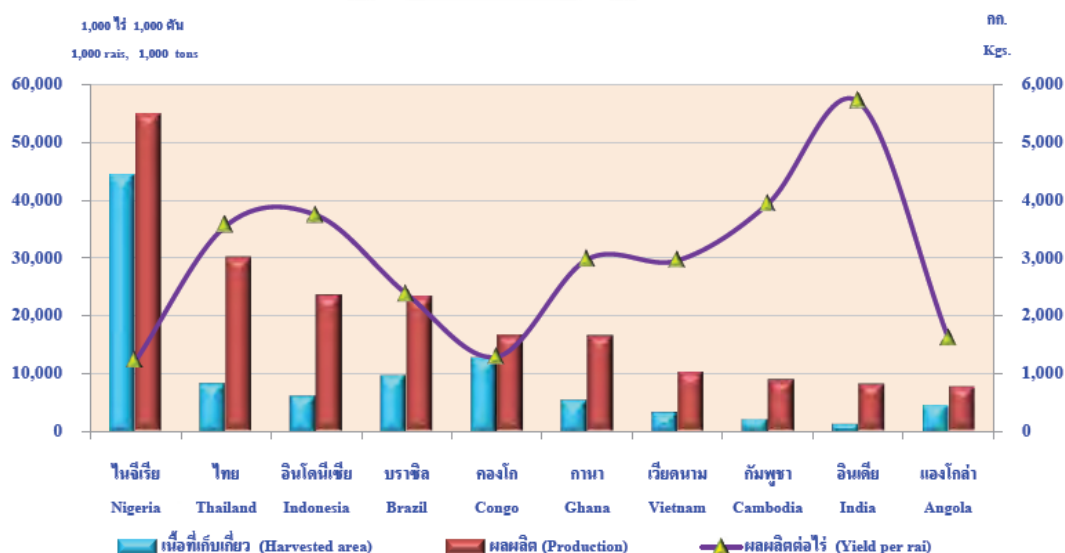
2.7 การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี

บีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) เป็นวิธีการทดลองเพื่อประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพผ่านการย่อยสลายของวัตถุดิบหรือสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยยังไม่มีวิธีการมาตรฐานที่ชัดเจน เนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายของวัตถุดิบหรือสารอินทรีย์ หัวเชื้อจุลินทรีย์ และสภาวะในการทดลอง (ปัทมวรรณ ไชยพงศ์, 2557) ดังนั้นในการทดลองด้วยวิธีบีเอ็มพีจึงต้องมีการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ พีเอช ความถี่ของการกวนผสม สมบัติทางเคมีของวัตถุดิบหรือสารอินทรีย์ รวมทั้งอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบหรือสารอินทรีย์และหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (S/I ratio) (Esposito et al, 2012)

ผลการทดลองจะอยู่ในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมซีไอดี (ml-CH₄/g-COD) หรือกรัมของของแข็งที่ระเหยได้ (ml-CH₄/g-VS) ของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ตัวอย่างเช่น น้ำเสียให้ค่าบีเอ็มพีเท่ากับ 1,000 mg CH₄/L COD แสดงว่าในน้ำเสีย 1 ลิตร มีสารอินทรีย์ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนและก่อให้เกิดก๊าซมีเทนคิดเทียบเท่าในเทอมซีไอดีได้ 1,000 มิลลิกรัม (มาโนช ผดุงเวียง, 2557)

2.8 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* (L.) Crantz หรือชื่อสามัญตามท้องถิ่นต่างๆ คือ Cassava, Tapioca, Yuca, Mandioa และ Manioc จัดเป็นพืชหัวที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจทั้งต่อประเทศไทยและโลก มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดจากทางตอนเหนือของประเทศอาร์เจนตินา ถึงทางใต้ของประเทศสหรัฐอเมริกา และได้มีการแพร่กระจายไปสู่ทวีปแอฟริกาและเอเชีย ในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 15 และ 18 ตามลำดับ (FAO, 2013) สำหรับการแพร่กระจายของมันสำปะหลังในทวีปเอเชียพบว่าเป็นผลมาจากการขยายอาณานิคมของชนชาติยุโรป โดยเส้นทางการแพร่กระจายเริ่มมาจากประเทศฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย มาเลเซีย และประเทศไทยในที่สุด จากข้อมูลปี 2558 ประเทศผู้ผลิตมันสำปะหลังที่สำคัญ 10 อันดับแรก ได้แก่ ไนจีเรีย ไทย อินโดนีเซีย บราซิล คองโก กานา เวียดนาม กัมพูชา อินเดีย และแองโกล่า (สำนักงานเศรษฐกิจเกษตร, 2559) ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ประเทศผู้ผลิตมันสำปะหลังที่สำคัญ 10 อันดับแรก ปี 2558
(สำนักงานเศรษฐกิจเกษตร, 2559)

ในปี 2558 ประเทศไทยมีปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังประมาณ 32 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าของผลผลิต 71,835 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) ซึ่งปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังของประเทศไทยในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาแนวโน้มที่สูงขึ้น ตามตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 เนื้อที่เพาะปลูก ผลผลิต และมูลค่าผลผลิตตามราคาที่เกษตรกรขายได้ ปี พ.ศ. 2550 – 2558

ปี พ.ศ.	เนื้อที่เพาะปลูก (1,000 ไร่)	ผลผลิต (1,000 ตัน)	มูลค่าของผลผลิตตามราคาที่เกษตรกรขายได้ (ล้านบาท)
2550	7,623	26,916	31,760
2551	7,750	25,156	48,551
2552	8,584	30,088	35,805
2553	7,669	22,006	40,491
2554	7,400	21,912	58,725
2555	8,513	29,848	62,382
2556	9,037	30,228	64,082
2557	8,976	30,022	63,947
2558	(p) 9,320	(p) 32,358	(p) 71,835

(p) : ตัวเลขเบื้องต้น (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559)

การเพาะปลูกมันสำปะหลังในประเทศไทยมีการแพร่กระจายอยู่ในทุกภูมิภาค โดยในปี 2558 มีพื้นที่การเพาะปลูกรวมทั้งประเทศ 9.32 ล้านไร่ ภูมิภาคที่มีพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังมากที่สุด คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 4.89 ล้านไร่ รองลงมา คือ ภาคกลาง 2.38 ล้านไร่ และภาคเหนือ 2.05 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) สาเหตุสำคัญที่มีการเพาะปลูกมันสำปะหลังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมากที่สุด เนื่องจากมันสำปะหลังเป็นพืชที่มีต้นกำเนิดในเขตร้อนสามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ แห้งแล้งและเป็นกรด จึงเหมาะที่จะเป็นพืชเกษตรสำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นสลับกับร้อนแห้งแล้ง อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 43.9 องศาเซลเซียส และลักษณะดินส่วนใหญ่เป็นดินทรายที่ไม่อุ้มน้ำ

มันสำปะหลังเป็นไม้พุ่มที่สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี จัดเป็นพืชล้มลุกที่มีอายุหลายปี (Shrubby perennial crop) อายุการเก็บเกี่ยวโดยทั่วไปประมาณ 12 เดือน มีรากที่ใช้ในการสะสมอาหารจำพวกแป้งหรือคาร์โบไฮเดรต โดยจะเห็นว่า องค์ประกอบหลักในหัวมันสำปะหลังนอกจากน้ำคือแป้ง ซึ่งมีปริมาณ 25 – 40 เปอร์เซ็นต์ ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้งเนื้อมันสำปะหลัง ตามตารางที่ 2-3 จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่มีความสำคัญต่อคนและสัตว์ โดยทั่วไปการ

ตรวจวัดปริมาณแป้งในมันสำปะหลังจะวัดจากความหนาแน่นของหัวมันสำปะหลังโดยการชั่งน้ำหนักหัวมันสำปะหลังในน้ำ (Buoyancy) หากน้ำหนักของหัวมันสำปะหลังในน้ำมาก แสดงว่าหัวมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งสูงและมีปริมาณน้ำน้อย

ตารางที่ 2-3 ส่วนประกอบหลักในหัวมันสำปะหลัง

องค์ประกอบในหัวมันสำปะหลัง	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักหัวมัน)
น้ำ	60.21 – 75.32
เนื้อ (ปริมาณแป้ง)	25.87 – 41.88
เปลือก	4.08 – 14.08
ไซยาไนด์ (ppm)	2.85 – 39.27
องค์ประกอบในหัวมันสำปะหลัง	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งเนื้อมัน)
แป้ง (Starch)	71.9 – 85.0
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง (Carbohydrate without starch)	3.59 – 8.66
เส้นใย (Cellulose)	1.77 – 3.95
โปรตีน (Protein)	1.57 – 5.78
เถ้า (Ash)	1.20 – 2.80
ไขมัน (Fats)	0.06 – 0.43

(กลุ่มอนุรักษ์ดินและน้ำ, 2545)

สำหรับมันสำปะหลังที่ปลูกกันอยู่ทั่วโลกนั้น สามารถแบ่งได้ตามปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิกซึ่งเป็นสารพิษประเภทหนึ่งที่พบในพืช เช่น มันสำปะหลัง หน่อไม้ เป็นต้น ซึ่งในมันสำปะหลังมีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกตั้งแต่ 2.85 – 39.27 ppm ขึ้นอยู่กับชนิดของมันสำปะหลัง โดยพบได้ในทุกส่วนของมันสำปะหลัง สารนี้เกิดจากการแตกตัวของสารประกอบไซยาโนเจนิกกลูโคไซด์ (Cyanogenetic glucosides) หากร่างกายได้รับในปริมาณสูงจะมีฤทธิ์ต่อระบบหัวใจและทางเดินโลหิต ทำให้ออกซิเจน (Oxygen) เข้าสู่สมองน้อยลง อาเจียน หายใจขัด ชักกระตุก กล้ามเนื้ออ่อนแรง และอาการเป็นพิษฉับพลัน นอกจากนี้ กรดไฮโดรไซยานิกยังส่งผลให้มันสำปะหลังมีรสชาติดขม ซึ่งจากสาเหตุดังกล่าวจึงแบ่งมันสำปะหลังออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดหวาน (Sweet type) และชนิดขม (Bitter type) ดังนี้

1) **ชนิดหวาน (Sweet type)** เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคต่ำ ส่งผลให้ไม่มีรสขม เหมาะสำหรับบริโภคสำหรับมนุษย์และใช้เป็นอาหารสัตว์ เช่น พันธุ์ห้านาที่ ที่มีเนื้ออ่อนนุ่ม เหมาะกับการนำไปทำอาหาร เป็นต้น

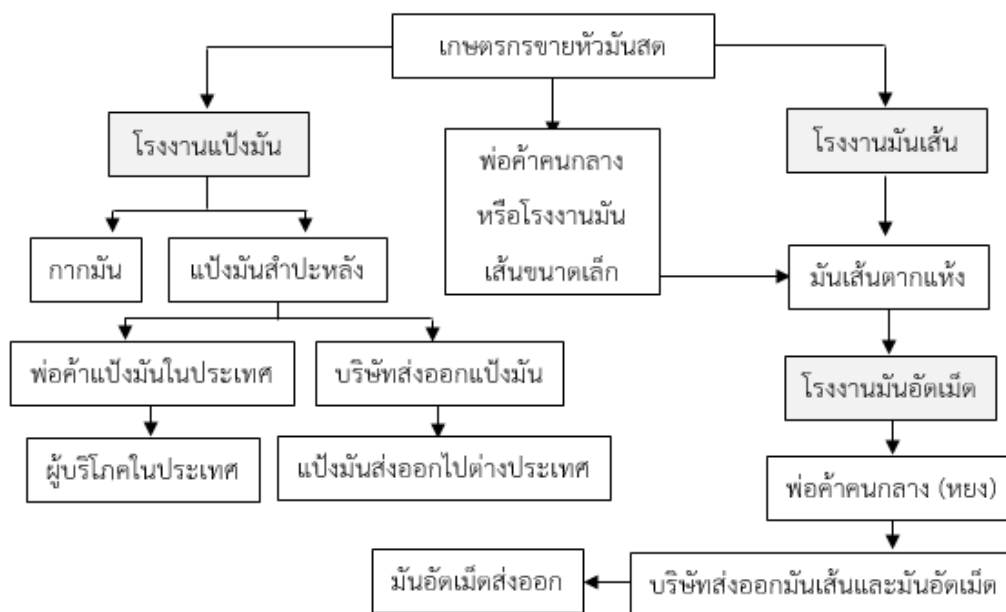
2) **ชนิดขม (Bitter type)** เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคสูง มีความเป็นพิษ มีปริมาณแป้งมากกว่าและมีรสขม ไม่เหมาะสำหรับการบริโภคหรือใช้เป็นอาหารสัตว์โดยตรง จึงใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง มันอัดเม็ด เอทานอล เป็นต้น ซึ่งสายพันธุ์ที่นิยมปลูกกันในประเทศไทยเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ พันธุ์พื้นเมือง พันธุ์ระยอง 1 พันธุ์ระยอง 3 (CM 407-7) พันธุ์ระยอง 2 (CM 305-21) พันธุ์ระยอง 5 พันธุ์ระยอง 60 (CM 24-63-43) พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (MKUC 28-77-3) พันธุ์ศรีราชา 1 เป็นต้น

2.9 อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

2.9.1 การใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลังในอุตสาหกรรม

การใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลังสามารถใช้ได้จากทุกส่วน ไม่ว่าจะเป็นหัวสด ใบ ลำต้น และเมล็ด แต่การใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมไม้อัด อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องตี๋ม อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลและแอลกอฮอล์ เป็นต้น

อุตสาหกรรมมันสำปะหลังเป็นอุตสาหกรรมเกษตรที่มีความสำคัญเป็นลำดับต้นๆ ของประเทศไทย เนื่องจากที่กล่าวมาแล้วว่าประเทศไทยมีปริมาณการผลิตมันสำปะหลังเป็นอันดับที่ 2 ของโลก การพัฒนาอุตสาหกรรมมันสำปะหลังจึงเป็นการสนับสนุนการผลิตพืชเศรษฐกิจตามนโยบายของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์การเกษตร โดยการตลาดของมันสำปะหลังจะเริ่มจากเกษตรกรขายหัวมันสำปะหลังสดเพื่อป้อนเข้าสู่โรงงานอุตสาหกรรม แปรรูปเป็นมันเส้น มันอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลัง ดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 การตลาดมันสำปะหลัง
(ละอองแก้ว เบญจประยูรศักดิ์, 2554)

มันสำปะหลังสดสามารถนำไปแปรรูปได้เป็น 3 อุตสาหกรรมหลัก ได้แก่ อุตสาหกรรมมันเส้น อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด และอุตสาหกรรมแปรงมันสำปะหลัง

1) อุตสาหกรรมมันเส้น

มันเส้นใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์และนำไปแปรรูปต่อเป็นมันอัดเม็ด โดยกระบวนการในการผลิตมันเส้น คือ การใช้เครื่องจักรหั่นหรือฝานหัวมันสำปะหลังสดให้เป็นเส้นหรือมีชิ้นเล็กกลอง (Cassava chip) แล้วตากบนลานซีเมนต์ให้แห้งประมาณ 2-3 วัน ให้มีค่ามาตรฐานความชื้นประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการผลิตมันเส้น 1 กิโลกรัม จะต้องใช้มันสำปะหลังสดที่มีปริมาณแป้ง 25 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จำนวน 2-2.5 กิโลกรัม โดยทั่วไปแล้วมันอัดเส้นประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ จะถูกส่งต่อไปให้กับโรงงานมันอัดเม็ดต่อไป

2) อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด

มันอัดเม็ดหรือมันเม็ดใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์เช่นเดียวกับมันเส้น แต่มันอัดเม็ดจะมีปริมาณแป้งมากกว่า 65 เปอร์เซ็นต์ จึงเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงานมากกว่ามันเส้น ทำให้มีมูลค่าเพิ่มมากขึ้นและใช้ในการส่งออกเป็นหลักเนื่องจากสามารถขนส่งได้สะดวกกว่า โดย

กระบวนการผลิตมันอัดเม็ดมาจากการแปรรูปมันเส้นและมันสำปะหลังสด ผ่านการบดให้ละเอียดด้วยเครื่องจักร อัดและอบแห้งจนมีลักษณะเป็นท่อนยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-1 เซนติเมตร (Cassava pellet) มีค่ามาตรฐานความชื้นประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์

3) อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังมีคุณสมบัติที่พิเศษกว่าแป้งชนิดอื่น คือ มีความขาว มันวาว ปราศจากกลิ่น รสชาติ และสี จึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้ประโยชน์โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งสำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มีการกำหนดหลักเกณฑ์เฉพาะสำหรับผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง ตามมาตรฐานเลขที่ มอก.274-2521 โดยได้จำแนกผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง ออกเป็น 3 ชั้น คุณภาพ รายละเอียดดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

คุณภาพ		ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	ชั้นคุณภาพ 3
ความชื้น	ไม่เกินร้อยละ	13	14	14
แป้ง*	ไม่น้อยกว่าร้อยละ	97.5	96	94
เถ้า*	ไม่เกินร้อยละ	0.15	0.3	0.5
เถ้าที่ไม่ละลายในกรด* (Acid insoluble ash)	ไม่เกินร้อยละ	0.05	0.10	0.15
โปรตีน*	ไม่เกินร้อยละ	0.3	0.3	0.3
เยื่อ (ลบ.ชม./แป้ง 50 กรัม ก่อนอบแห้ง)	ไม่เกิน	0.2	0.5	1.0
ความเป็นกรด-ด่าง	ไม่เกิน	4.5-7	3.5-7	3.0-7
ความละเอียดแป้งที่ค้ำบนตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร	ไม่เกินร้อยละ	1	3	5

*คำนวณจากน้ำหนักแห้ง (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556)

อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมมันสำปะหลัง เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมหลักและมีปริมาณการส่งออกที่สร้างรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังในประเทศไทย สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

3.1) อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังสำเร็จรูป (Native starch industry)

แป้งมันสำปะหลังสำเร็จรูปหรือแป้งมันสำปะหลังดิบ (Native starch) เป็นแป้งที่เกิดจากการแปรรูปมันสำปะหลังขั้นต้น กล่าวคือ ไม่มีการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการแปรรูป ไม่ได้มีการสกัดเส้นใยและกาก (Cellulose) ออก ตัวอย่างเช่น การบดมันสำปะหลังเพื่อให้ได้เป็นแป้ง แป้งมันสำปะหลังดิบสามารถใช้ทดแทนแป้งสาลีและแป้งข้าวเจ้าในอาหารบางประเภท เช่น เค้ก ขนมปัง คุกกี้ เป็นต้น

3.2) อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Modified starch industry)

แป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Modified starch) เป็นแป้งที่เกิดจากกระบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังดิบให้เกิดคุณสมบัติเฉพาะตัวโดยใช้เทคโนโลยีขั้นสูง เพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าของแป้งมันสำปะหลังดิบ

3.3) อุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์อื่นจากแป้งมันสำปะหลัง (Starch derivatives industry)

แป้งมันสำปะหลังไม่เพียงแต่จะถูกใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมไม้อัด อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมผงชูรส เป็นต้น

2.9.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังหรือสตาร์ชมันสำปะหลังมีหลักการสำคัญ คือ การใช้ น้ำเป็นตัวสกัดแป้งจากหัวมันสำปะหลัง แล้วแยกส่วนของโปรตีนและสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากแป้งมันสำปะหลัง โดยที่คุณภาพของแป้งมันสำปะหลังจะขึ้นอยู่กับขั้นตอนการสกัดแป้งและการทำให้บริสุทธิ์เป็นสำคัญ นอกจากนี้การผลิตแป้งมันสำปะหลังยังต้องใช้เวลาให้สั้นที่สุด เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีและปฏิกิริยาจากเอนไซม์ โดยกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบมาตรฐานแสดงรายละเอียดดังภาพที่ 2-11

1) การรับและการจัดเก็บหัวมันสำปะหลัง

เมื่อโรงงานรับซื้อหัวมันสำปะหลังจากเกษตรกรแล้ว หัวมันสำปะหลังจะผ่านการประเมินปริมาณแป้งด้วยวิธีการวัดค่าความหนาแน่นของหัวมันสำปะหลังในน้ำ โดยปกติแล้วหัวมันสำปะหลังที่ถูกส่งเข้าสู่โรงงานจะถูกส่งต่อเข้าสู่กระบวนการผลิตภายใน 24 ชั่วโมง เนื่องจากภายในหัวมัน

สำหรับยังคงมีการทำงานของเอนไซม์และจุลินทรีย์ที่เป็นเหตุให้ปริมาณแป้งในหัวมันสำปะหลัง ลดลง

2) การเตรียมหัวมันสำปะหลัง

- การกำจัดดินทรายและรากมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังที่ผ่านการคัดคุณภาพจะถูกนำเข้าสู่ตะแกรงร่อนดินทราย (Sand removal drum) เพื่อกำจัดของเสียจำพวกดินทรายที่ติดมากับหัวมันสำปะหลังและทำให้ผิวนอกของ มันสำปะหลังหลุดออกมา ของเสียที่ถูกกำจัดออกมาจะอยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วมันสำปะหลัง 1 ตัน จะมีของเสียในรูปของแข็งประมาณ 20 กิโลกรัม

- การปอกเปลือกและการล้างหัวมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังที่กำจัดของเสียออกแล้วจะถูกส่งผ่านสายพานหรือเครื่องยกจาก ตะแกรงร่อนดินทรายไปยังเครื่องปอกเปลือกและเครื่องล้างหัวมันสำปะหลัง ในขั้นตอนการปอก เปลือกหัวมันสำปะหลังจะถูกแยกเปลือกและสิ่งเจอปนที่ยังหลงเหลืออยู่ออกโดยเครื่องแยกที่มีรอบ การหมุนสูง จากนั้นหัวมันสำปะหลังจะถูกล้างทำความสะอาดด้วยการฉีดพ่นน้ำลักษณะเป็นฝอย ละออง ส่วนของเปลือกมันสำปะหลังที่ประกอบด้วยผิวด้านนอก (Corky layer) ที่ถูกกำจัดออกใน ขั้นตอนการปอกเปลือก จะสามารถนำไปขายต่อให้แก่โรงงานผลิตอาหารสัตว์หรือนำไปใช้ในการเพาะ เห็ดต่อไป

3) การบดหัวมันสำปะหลัง

- การสับและบดหัวมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมหัวมันสำปะหลังเรียบร้อยแล้ว จะถูกส่งต่อ โดยใช้สายพานต่อเนื่อง (Chain conveyor) หรือเครื่องตักหัวมัน (Rasp bucket conveyor) เพื่อเข้าสู่เครื่องสับ โดยจะสับหัวมันสำปะหลังให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว เป็นการลดขนาดของ หัวมันสำปะหลังลง เพื่อลดการใช้พลังงานในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดมัน (Root rasper) ได้เป็น หัวมันสำปะหลังที่เป็นเม็ดละเอียด จะทำให้เซลล์ของมันสำปะหลังแตกออกปล่อยเกล็ดแป้งที่สะสม ออกมา

- การแยก Fruit water โดยใช้ Decanter

มันสำปะหลังมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 60-75 ต่อ 100 กรัม ของน้ำหนักหัวมันสำปะหลัง ทำให้ในขั้นตอนการบดมีของเหลวที่เรียกว่า Fruit water ออกมาด้วย ซึ่งเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ เช่น เกลือ (Potassium) สารประกอบไนโตรเจน (Nitrogen) ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และน้ำตาล เป็นต้น สารประกอบดังกล่าวสามารถย่อยสลายได้ง่ายด้วย

เชื้อจุลินทรีย์ ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการในการผลิตแป้งมันสำปะหลัง เช่น กรดอินทรีย์ (Organic acid) และแอลกอฮอล์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องแยก Fruit water ออกจากแป้งและกากมันสำปะหลัง เพื่อให้ได้แป้งที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้น โดยโรงงานส่วนใหญ่จะใช้เครื่อง Decanter ที่มีลักษณะเป็นเครื่องเหวี่ยงแยกแบบแวนอนร่วมกับการใช้ Screw ซึ่งเหมาะสำหรับการแยกของแข็งและโปรตีนหรือไขมันก่อนสกัดแป้ง

นอกจากนี้ กรดไฮโดรไซยานิคยังสามารถละลายอยู่ใน Fruit water ได้ ดังนั้นโรงงานจะต้องใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตที่มีคุณภาพสูงและไร้สนิม ป้องกันการเกิดสารประกอบเฟอร์โรไซยาไนด์ (Ferrocyanides) ซึ่งทำให้เกิดสีน้ำเงินในแป้ง

4) การสกัดแป้งมันสำปะหลัง

การสกัดแป้งออกจากเส้นใยและกากมันสำปะหลัง (Cellulose) โดยทั่วไปจะใช้เครื่องสกัดที่ต่อเนื่องกัน (Multi-stage extractor) ซึ่งประกอบด้วยชุดสกัด 3-4 ชุดต่อเนื่องกัน โดยไม่มีถังพัก มีลักษณะเป็นตะแกรงหมุนเหวี่ยงรูปกรวย (Cone) ขนาดรูของตะแกรงจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงเรื่อยๆ ในแต่ละชุด โดยตะแกรงชุดแรกมีขนาด 60-80 Mesh และชุดสุดท้ายจะเป็นการสกัดละเอียดโดยใช้ผ้ากรองขนาด 90 Mesh น้ำแป้งเข้มข้นจะผ่านเข้าสู่เครื่องสกัดและมีการพ่นน้ำเข้ามาในทิศทางสวนทาง (Counter current) กับการไหลของน้ำแป้ง เพื่อให้เกิดการแยกตัวกันระหว่างแป้งและเส้นใย โดยในขั้นตอนนี้จะมีการเติมน้ำกำมะถัน (Sulfur) เพื่อยับยั้งการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่จะย่อยโมเลกุลของแป้งเป็นกรดแลคติก (Lactic acid)

5) การทำให้แป้งบริสุทธิ์

น้ำแป้งที่ได้จากการสกัดแป้งจะมีความเข้มข้นประมาณ 3 Beaume' (°Be') (เทียบเท่ากับแป้งแห้ง 54 กิโลกรัมในน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร) ซึ่งประกอบด้วยสิ่งเจือปนที่ละลายน้ำ (Fruit water) และกากใยที่ยังหลงเหลืออยู่ซึ่งไม่ละลายน้ำ โดยใช้เครื่องแยกแป้งชนิดหมุนเหวี่ยง (Centrifugal Separator) หรือไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ซึ่งจะแยกน้ำแป้งที่มีความเข้มข้น 20-22 Beaume' (°Be') ออกจากน้ำซึ่งเบากว่าและจัดเป็นของเสียที่ต้องเข้าสู่กระบวนการบำบัดหรือระบบก๊าซชีวภาพ (Biogas) เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพใช้ทดแทนน้ำมันเตาซึ่งเป็นเชื้อเพลิงในหัวเผาผลิตลมร้อนของเครื่องอบ หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตได้อีกครั้งหนึ่ง

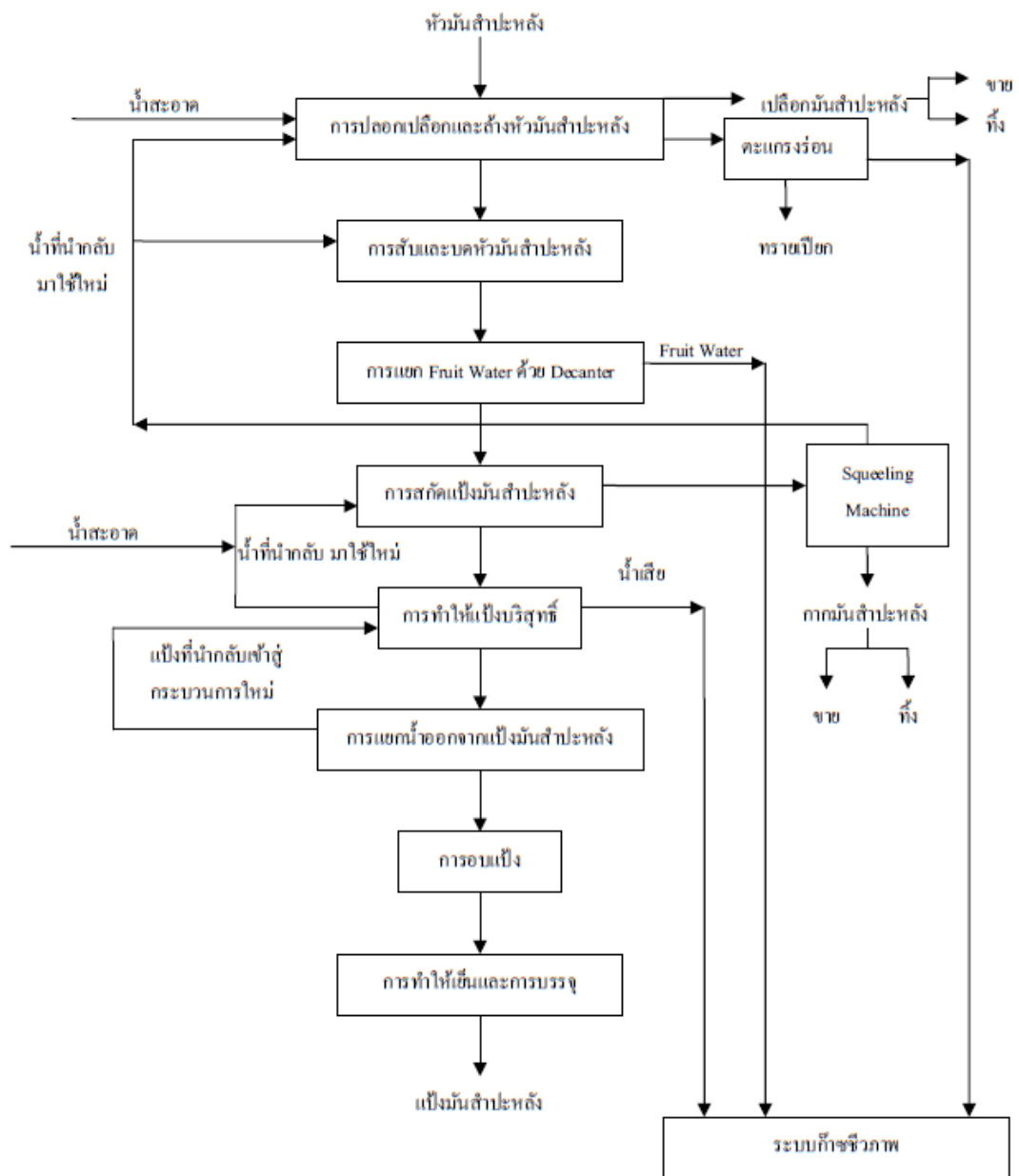
6) การแยกน้ำออกจากแป้งมันสำปะหลัง และการอบแห้ง

น้ำแป้งเข้มข้นจะถูกแยกน้ำออก และส่งเข้าสู่เครื่องอบแบบ Pneumatic flash dryer ที่ใช้ลมร้อนอุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการระเหยของน้ำ โดยจะใช้ระยะเวลาอบเพียงสั้นๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวเป็นก้อนและสลายตัวหรือเปลี่ยนสภาพ โดยในขั้นตอนการอบแห้งต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสูงเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ

7) การลดอุณหภูมิ และการบรรจุผลิตภัณฑ์

แป้งที่ผ่านการอบจะต้องถูกลดอุณหภูมิลงทันที ดังนั้น เครื่องอบแห้งจึงต้องมีการติดตั้งไซโคลนเย็น (Cooling cyclone) โดยไซโคลนร้อนและไซโคลนเย็นจะมีประสิทธิภาพการแยกแป้งจากอากาศสูงถึงร้อยละ 99.95 และควบคุมความชื้นให้อยู่ระหว่างร้อยละ 12-13 ด้วยเครื่องควบคุมอากาศอัตโนมัติ จากนั้นแป้งจะเข้าสู่กระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์ต่อไป





ภาพที่ 2-11 แผนผังกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง
(วรินญา จารุทรศน์พิมล, 2551)

2.9.3 ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

เสวียน เปรมประสิทธิ์ (2544) ได้แบ่งของเสียหรือวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ ของเสียที่เป็นของเหลวและของแข็ง โดยพบว่ากระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจากหัวมันสำปะหลังสด 1 กิโลกรัม สามารถผลิตแป้งได้ 0.2 กิโลกรัม และในการผลิตแป้ง 1 ตัน ก่อให้เกิดน้ำเสียประมาณ 20-35 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มี

ค่าบีโอดีและซีโอดีสูง กล่าวคือ ถ้าเป็นน้ำเสียจากขั้นตอนการล้างหัวมันสำปะหลังจะมีค่าซีโอดีประมาณ 6,000-15,000 mg/l แต่ถ้าเป็นน้ำเสียจากขั้นตอนการแยก Fruit water และการทำให้แป้งบริสุทธิ์จะมีค่าซีโอดีที่สูงกว่าถึงประมาณ 25,000-45,000 mg/l มีความสกปรกสูงต้องผ่านการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ปัจจุบันโรงงานแป้งมันสำปะหลังส่วนใหญ่จึงมีการติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ประโยชน์จากน้ำเสียที่เกิดขึ้น ส่วนของเสียที่เป็นของแข็งประกอบไปด้วย ดินทรายแห้ง 20 กิโลกรัม/ตันมันสำปะหลังสด ดินทรายเปียก 25 กิโลกรัม/ตันมันสำปะหลังสด เปลือกมันสำปะหลัง 30 กิโลกรัม/ตันมันสำปะหลังสด และกากมันสำปะหลัง 60 กิโลกรัม/ตันมันสำปะหลังสด ซึ่งเปลือกและกากมันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ย วัสดุเพาะเห็ด อาหารสัตว์ และเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จะเห็นว่าของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่สำคัญสามารถแบ่งได้ 3 ส่วน ได้แก่ น้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน กากมันสำปะหลัง และเปลือกมันสำปะหลัง

1) น้ำเสียจากกระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีการใช้น้ำเป็นจำนวนมากตลอดกระบวนการผลิต ส่งผลให้กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก ทั้งจากกระบวนการล้างทำความสะอาดมันสำปะหลัง การแยก Fruit water และการทำให้แป้งบริสุทธิ์ โดยคุณสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดจะมีความสกปรกในรูปของบีโอดี ซีโอดี และปริมาณของแข็งสูง ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดค่อนข้างต่ำซึ่งแสดงว่าองค์ประกอบในน้ำเสียส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ คุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังขนาดต่างๆ ดังตารางที่ 2-5

น้ำเสียที่เกิดขึ้นจะต้องผ่านการบำบัดเพื่อให้สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ตามมาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรม โดยวิธีการในการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ได้แก่ วิธีการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) วิธีการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) และวิธีการบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment) ซึ่งวิธีการบำบัดทางชีวภาพนี้เหมาะสมกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่สุด เนื่องจากน้ำเสียมีปริมาณของสารอินทรีย์สูงจุลินทรีย์นำไปใช้เป็นสารอาหารได้เป็นอย่างดี

ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-6 โดยจะเห็นว่าน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ 7 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โรงงานแป้งข้าวเจ้า และโรงฆ่าสัตว์ ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มยังคงสูงกว่า กล่าวคือปริมาณน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ถึง 15 ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2-5 ค่าเฉลี่ยสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแปงมันสำปะหลัง

พารามิเตอร์	โรงงานขนาดเล็ก	โรงงานขนาดกลาง	โรงงานขนาดใหญ่	มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2539
pH	4.75	4.69	6.33	5.5-9.0
COD (mg/l)	13,000	15,000	19,300	400
BOD (mg/l)	6,465	10,555	12,645	60
TKN (mg/l)	228	248	512	200
TS (mg/l)	13,030	12,550	19,845	-
SS (mg/l)	7,445	5,790	6,990	150
TDS (mg/l)	5,580	6,820	12,850	5,000

(กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2559)

ตารางที่ 2-6 ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานผลิตแปงมันสำปะหลังเปรียบเทียบกับแหล่งน้ำเสียจากโรงงานประเภทอื่นๆ

แหล่งของน้ำเสีย	ปริมาณน้ำเสีย (ลูกบาศก์เมตร)	ความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลูกบาศก์เมตร)
โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ	1	15.0
โรงงานแปงมันสำปะหลัง	1	7.0
ฟาร์มสุกร	1	3.5
โรงงานแปงข้าวเจ้า	1	2.4
โรงฆ่าสัตว์	1	0.7

(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

2) กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือทิ้งหรือของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแปงมันสำปะหลังซึ่งอยู่ในลักษณะของแข็งตั้งที่กล่าวข้างต้นที่มีปริมาณมากที่สุดจากกระบวนการ ลักษณะโดยทั่วไปของกากมันสำปะหลัง คือ มีความละเอียด สีขาวครีม และมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 75

มีปริมาณโดยเฉลี่ย 330 ตัน/วัน (บริษัท ชลเจริญ จำกัด, 2559) โดยกากมันสำปะหลังที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 55-56 มีปริมาณแป้งอยู่ปริมาณร้อยละ 50-60 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งแป้งนี้จะอยู่ในรูปกลีโคเจนเซลลูโลสและ เพคตินของเซลล์พืช ปริมาณเซลลูโลสและเส้นใย ร้อยละ 10-15 โปรตีน ร้อยละ 1.5-5 และไขมัน ร้อยละ 0.1-4 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 2-7 นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยแร่ธาตุในปริมาณที่ต่ำ กล่าวคือ กากมันสำปะหลังมีแร่ธาตุ Fe^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+} และ Zn^{2+} ในปริมาณ 155, 40, 1100, 4 และ 21 มิลลิกรัม/กิโลกรัมกากมันสำปะหลังแห้ง ตามลำดับ (ตีรณันท์ เอกสมทราเมษฐ์, 2551)

ตารางที่ 2-7 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	ปริมาณโดยน้ำหนักแห้ง (%)				
	สุนีย์ โซตินิรนาท (2539)	Agu (2543)	กระทรวง อุตสาหกรรม (2540)	ธัญยาภรณ์ นาวิวรรณ (2542)	กล้าณรงค์ ศรีรอด และคณะ (2548)
ความชื้น	-	71.70	-	-	-
คาร์โบไฮเดรต	66.22	58.02	56	67.46	62.46
เส้นใย	15.26	13.53	35.9	11.58	-
เซลลูโลส	-	14.35	-	-	10.98
โปรตีน	3.39	2.30	5.3	1.85	1.57
ไขมัน	0.24	1.00	0.1	4.18	0.15
เถ้า	2.65	1.50	2.7	-	2.09
อื่นๆ	-	9.3	-	-	-

(กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2559)

3) เปลือกมันสำปะหลัง

เปลือกมันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือทิ้งหรือของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังซึ่งอยู่ในลักษณะของแข็งเช่นเดียวกับกากมันสำปะหลัง เป็นส่วนที่ห่อหุ้มหัวมันสำปะหลังอยู่ มีสีน้ำตาล เปลือกมันสำปะหลังส่วนมากจะถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นอาหารสัตว์ เนื่องจากมีปริมาณเซลลูโลสสูง 35.86 % โดยน้ำหนักแห้ง (กัลยา อยู่นาน, 2546) แต่อย่างไรก็ตามเปลือกมันสำปะหลังไม่เป็นที่นิยมมากนักในการนำไปเป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์เนื่องจากมีคุณค่าทางสารอาหารต่ำ ดังตารางที่ 2-8

ทั้งนี้เปลือกมันสำปะหลังยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีกรดไฮโดรไซยานิคค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นสารพิษที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ วิธีการลดปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคใน

เปลือกมันสำปะหลังทำได้หลายวิธี เช่น การตากแดด การอบด้วยตู้อบ การหมัก การต้ม และการแช่แข็ง เป็นต้น Ofoefule and Uzodinma (2009) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังร่วมกับมูลสัตว์ชนิดต่างๆ โดยใช้วิธีการตากแห้งเปลือกมันสำปะหลังก่อนทำการทดลองเป็นเวลา 4 เดือน เพื่อลดปริมาณสารพิษดังกล่าว

ตารางที่ 2-8 คุณสมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารของเปลือกมันสำปะหลัง

คุณสมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหาร	ปริมาณ
ความชื้น (Moisture) (%)	4.06
ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)	6.94
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter) (%)	66.91
ปริมาณไนโตรเจน (Total Nitrogen) (%)	0.64
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	60.78
ปริมาณฟอสฟอรัส (Total Phosphorus) (mg/kg)	35.13
ปริมาณโพแทสเซียม (Total Potassium) (mg/kg)	949.49
ปริมาณแคลเซียม (Total Calcium) (%)	0.45
ปริมาณแมกนีเซียม (Total Magnesium) (%)	0.12
ปริมาณโซเดียม (Total Sodium) (mg/kg)	83.27
ปริมาณทองแดง (Total Copper) (mg/kg)	2.91
ปริมาณเหล็ก (Total Iron) (mg/kg)	5956.75
ปริมาณแมงกานีส (Total Manganese) (mg/kg)	840.45
ปริมาณสังกะสี (Total Zinc) (mg/kg)	13.22

(วิภา ประพินอักษร, 2550., ภาณุพันธ์ ศรีสมบุญ, 2557)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ofoefule and Uzodinma (2009) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังร่วมกับมูลสัตว์ชนิดต่างๆ ได้แก่ มูลวัว มูลไก่ และมูลสุกร ในอัตราส่วน 1:1 เปลือกมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองจะถูกทำให้แห้งก่อนเพื่อลดปริมาณของสารพิษเป็นเวลาสี่เดือน ใช้เวลาในการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทุกวันเป็นเวลา 30 วัน จากผลการทดลองพบว่า การหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังและมูลสุกรให้ผลได้ของก๊าซมีเทน (Methane yield) สูงที่สุด คือ 5.65 ± 2.62 ลิตร/มวลทั้งหมดของ slurry โดยอาจเกิดจากมูลสุกรมีองค์ประกอบของเส้นใย (Fiber) และคาร์บอน (Carbon) ในปริมาณสูง รองลงมาเป็นการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังและมูลไก่ มูลวัว และเปลือกมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว เป็นปริมาณ 5.55 ± 2.17 , 4.88 ± 1.73 และ 2.29 ± 0.97 ลิตร/มวลทั้งหมดของ slurry ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่สามารถจุดติดไฟได้ (ปริมาณมีเทนอย่างน้อย 45% ของปริมาณก๊าซชีวภาพ) ของการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังและมูลวัวหรือมูลไก่ เริ่มเกิดขึ้นเมื่อวันที่ 9 ของการหมัก ส่วนการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังและมูลสุกรเริ่มเกิดขึ้นเมื่อวันที่ 11 และการหมักมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวต้องใช้เวลามากที่สุด คือ วันที่ 59 ของการหมัก

ภาณุพันธ์ ศรีสมบุรณ์ (2557) ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังด้วยการหมักร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วนต่างๆ คือ 1:1, 1:2, 1:3, 2:1 และ 3:1 ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ 1:3 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เฉลี่ย 0.281 ลิตรต่อวัน ประกอบด้วยมีเทนร้อยละ 67.53 โดยปริมาตร โดยผลิตก๊าซชีวภาพได้ในวันที่ 4 ของการหมัก นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ปราศจากออกซิเจนแบบดริ่งฟิล์มชีวภาพ ได้แก่ ค่าของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในช่วง 0.24-4.0 kg COD/m³-d, การกวนผสมร้อยละ 0-500 ของการเวียนน้ำในถังปฏิกรณ์ และระยะเวลาการกักพักชลศาสตร์ (Hydraulic retention time) 1-4 วัน โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองนี้ คือ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.75 kg COD/m³-d, การกวนผสมที่ร้อยละ 275 ของการเวียนน้ำในถังปฏิกรณ์ และระยะเวลาการกักพักชลศาสตร์ที่ 2 วัน ซึ่งสภาวะนี้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 13.24 ลิตร โดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 67.46

วรพจน์ คำจันลา (2555) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนบ่อพักน้ำเสียร่วมกับน้ำเสียจากกระบวนการล้างหัวมันสำปะหลังที่ผ่านการสับของโรงงานแปรงมันสำปะหลัง ในถังหมักปริมาตร 13.7 ลิตร ระยะเวลา 24 วัน ทั้งแบบเดิมครั้งเดียว (Batch) และแบบการกวนผสมแบบกึ่ง

ต่อเนื่อง (Semi-continuous) การทดลองมีการใช้อัตราส่วนกากตะกอนต่อน้ำเสียเป็น 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยพบว่าอัตราส่วนที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด คือ อัตราส่วน 1:4 ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 10.3 ลิตร/กิโลกรัม ก๊าซมีเทนสูงสุดที่เป็นองค์ประกอบ 58.49% ค่าความร้อน 29.24 MJ/Kg จากนั้นผู้วิจัยได้ใช้อัตราส่วน 1:4 ในการทดลองวิธีการเติมสารอาหาร การปรับค่าพีเอชและการกวนผสม ได้ผลการทดลอง ดังนี้ การเติมสารอาหารแบบกึ่งต่อเนื่องสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าแบบเติมครั้งเดียว 1.44 เท่า ในปริมาณ 14.87 ลิตร/กิโลกรัม ก๊าซมีเทนสูงสุดที่เป็นองค์ประกอบ 58.77% ค่าความร้อน 29.38 MJ/Kg พร้อมทั้งสามารถเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าถึงที่ไม่ปรับค่าพีเอชถึง 2.75 เท่า นอกจากนี้ การกวนผสมยังมีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยผลการทดลองพบว่า การกวนผสม 15 นาที หยุด 15 นาที สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด 14.81 ลิตร/กิโลกรัม รองลงมาเป็นการกวนผสม 15 นาที หยุด 30 นาที และกวนผสม 15 นาที หยุด 45 นาที เนื่องจากการกวนผสมอย่างสม่ำเสมอจะช่วยป้องกันการเกิดแผ่นตะกอนจากกากตะกอนที่ลอยขึ้นด้านบนที่ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถได้รับสารอาหารที่เติมเข้าไปส่งผลให้จุลินทรีย์บางส่วนตายได้

พงษ์พันธ์ พรหมพิทักษ์ (2555) ศึกษาหาหวัเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อนำผลการทดลองที่เหมาะสมที่สุดมาควบคุมในระบบถังหมักก๊าซชีวภาพ เครื่องต้นแบบชนิดกวนผสมสมบูรณ์สองขั้นตอน การทดลองส่วนแรก ผู้วิจัยได้ใช้หวัเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากฟาร์มสุกร, ฟาร์มวัว และโรงงานแป้งมันสำปะหลัง ปรับค่าพีเอช เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า การหมักกากมันสำปะหลังกับหวัเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังเกิดก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด การทดลองส่วนที่สอง เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทำการทดลองตั้งแต่ 25-50 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นครั้งละ 5 องศาเซลเซียส ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 พบว่า อุณหภูมิที่เกิดก๊าซชีวภาพสูงที่สุด คือ 35 องศาเซลเซียส การทดลองส่วนที่สาม เป็นการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ ทำการทดลองตั้งแต่ pH 5-10 เพิ่มขึ้นครั้งละ 1.0 ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองส่วนที่สอง พบว่าพีเอชที่เกิดก๊าซชีวภาพสูงที่สุด คือ ค่าเท่ากับ 8 นำผลการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการทั้งสามส่วนมาใช้ควบคุมในระบบถังหมักก๊าซชีวภาพเครื่องต้นแบบชนิดกวนผสมสมบูรณ์สองขั้นตอน ที่ประกอบไปด้วย ถังหมักกรด 1 ถัง ถังหมักก๊าซมีเทน 2 ถัง และถังเก็บก๊าซจำนวน 1 ถัง โดยใช้หวัเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส และพีเอช 8 เติมสารอาหาร (กากมันสำปะหลังผสมน้ำ) แบบครั้งคราว (Batch feeding) ควบคุมการกวนผสมตั้งแต่ไม่กวนผสมจนถึงกวนผสมด้วยความถี่ 24, 8, 4, และ 2 ชั่วโมง/ครั้ง ครั้งละ 10 นาที พบว่ามีอัตรา

การเกิดก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย 140, 160, 190, 240, และ 280 ลิตร/วัน ดังนั้น เมื่อมีการกวนผสมที่ถี่ขึ้นอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพก็เพิ่มมากขึ้นด้วย

สมยศ เนตรสงคราม (2557) ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมสำหรับการทำการทดลองในถังต้นแบบขนาด 50 ลิตร โดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นการทดลองจากบ่อหมักก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานแป้งมัน การทดลองมีการใช้อัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังที่ทดลอง ได้แก่ 2:8, 4:6, 5:5, 6:4, 8:2 และกากมันสำปะหลังอย่างเดียว ซึ่งใช้ถังหมักขนาด 1,250 มิลลิลิตร ควบคุม pH เท่ากับ 8 ทำการทดลองเป็นเวลา 15 วัน พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเกิดก๊าซชีวภาพ คือ น้ำเสียโรงงานแป้งมัน 4 ส่วน ต่อกากมันสำปะหลัง 6 ส่วน (สัดส่วนโดยปริมาตร) มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ 1,294 ml และมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดต่อวัน 258 mL/day ประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน (CH₄) ร้อยละ 50.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ร้อยละ 45.9 และก๊าซอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วน 4:6 มีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพมากกว่าการใช้กากมันสำปะหลังอย่างเดียว, อัตราส่วน 8:2, อัตราส่วน 5:5, อัตราส่วน 6:4 และอัตราส่วน 2:8 เป็น 87.1%, 88.5%, 41.2%, 16.8% และ 15.9% ตามลำดับ โดยพบว่าก๊าซชีวภาพจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อการทดลองผ่านไป 3 วัน และมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงที่สุดเป็นระยะเวลา 4-5 วัน ได้แก่ วันที่ 6-9 ของการทดลอง

Cu et al. (2015) ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลในประเทศเวียดนาม ได้แก่ มูลสัตว์ ของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ และของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยวิธี Biochemical Methane Potential (BMP) โดยใช้ Batch Reactor ปริมาตร 1.1 ลิตร อัตราส่วนของหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (Inoculum) ต่อชีวมวลหรือสับสเตรท (Substrate) เท่ากับ 1:1 ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า มูลสุกรสามารถผลิตก๊าซชีวภาพให้ได้ปริมาณมีเทน (CH₄ yield) สูงที่สุด เป็นปริมาณ 443 normal litter (NL) CH₄/kg VS รองลงมาคือ จอกแหน (*Spirodela polyrrhiza*) ให้ปริมาณมีเทน 340 NL CH₄/kg VS นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้พัฒนาแบบจำลองการเกิดก๊าซมีเทน (CH₄) จากองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ซึ่งพบว่าลิพิด (Lipid) ลิกนิน (Lignin) โปรตีน และเซลลูโลส (Cellulose) เป็นองค์ประกอบที่เป็นปัจจัยสำคัญในการคาดการณ์ผลของวิธี BMP อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารอินทรีย์ (ลิพิด และโปรตีน) ที่มากเกินไปของสับสเตรทอาจก่อให้เกิดโฟม (Foaming) และตัวยับยั้ง (Inhibitor) ในการเกิดก๊าซชีวภาพได้

Esposito et al. (2012) ศึกษาการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักแบบเดี่ยวและการหมักร่วมของ Complex organic substrate โดยวิธี Bio-Methane Potential (BMP) ในขวด

แก้วขนาด 1,000 ml ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการหมักแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ของสารอินทรีย์จำพวกของแข็ง ค่าใช้จ่ายต่ำ และสามารถทำซ้ำได้ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การหมักแบบเดี่ยว ใช้มูลสุกร และของเสียจากผักและผลไม้ เป็นสับสเตรท การหมักร่วม ใช้มูลควายผสมกับข้าวโพดหมัก (Maize silage) ในอัตราส่วน 70% ต่อ 30% วัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทุกวันเป็นเวลา 100 วัน พบว่า กราฟการสะสมของมีเทนที่สูงที่สุด ได้แก่ การหมักของเสียจากผักและผลไม้ รองลงมาคือ การหมักร่วมระหว่างมูลควายและข้าวโพดหมัก และมูลสุกร สำหรับมูลสุกรผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากยูเรีย (Urea) ซึ่งมีปริมาณแอมโมเนีย (Ammonia) สูงเป็นตัวช่วยยังทำให้กระบวนการย่อยเกิดขึ้นได้ช้า ในขณะที่มูลควายประกอบไปด้วยเอนไซม์และจุลินทรีย์ที่หลากหลายยิ่งขึ้น และเมื่อหมักร่วมกับข้าวโพดหมักที่มีเซลลูโลส (Cellulose) มาก จึงยิ่งเสริมให้กระบวนการทางชีวภาพเกิดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์จากวิธี BMP เพื่อช่วยในการพิจารณาคาดการณ์ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากสับสเตรท ความสามารถในการย่อยสลายของสับสเตรท และสถานะในการทดลองที่ต่างกัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Specific rate ของการเกิดมีเทนและผลจากการทำงานร่วมกัน (Synergic effect) ของสับสเตรทจากกระบวนการหมักร่วม

Ofoefule et al. (2010) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพโดยเปรียบเทียบระหว่างเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารเคมี คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, 50% w/v) และโพแทส (Potash, 50% w/v) และเปลือกมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น สภาวะในการหมัก คือ ช่วงอุณหภูมิ 25-37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วัน ทั้งนี้เปลือกมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองผ่านการย่อยสลายในสภาวะมีอากาศเป็นเวลา 4 เดือนก่อนการทดลองเพื่อลดความเป็นพิษของเปลือกมันสำปะหลัง โดยผลการทดลองพบว่าเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโพแทสให้ก๊าซชีวภาพในปริมาณ 111 และ 124 ลิตร/มวลทั้งหมดของ slurry ในขณะที่เปลือกมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นให้ก๊าซชีวภาพในปริมาณ 69 ลิตร/มวลทั้งหมดของ slurry นอกจากนี้ยังพบว่าเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นช่วยลดระยะเวลาช่วง Lag period ลง โดยก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโพแทสมีช่วง Lag period เป็นวันที่ 10 และ 7 ตามลำดับ แต่การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นมีช่วง Lag period ที่ยาวนานกว่าคือวันที่ 58 ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารเคมี และจากการทดลองนี้พบว่าโพแทสเป็นสารเคมีที่ดีที่สุดในการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลัง

มาศยา โชคสงวน (2553) ศึกษาผลของการบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment) ด้วยกรดต่างๆ ต่อการสร้างซีโอดีละลาย (Soluble COD) และการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังด้วยวิธีการหาค่าต่อศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Bio-Methane Potential: BMP)

โดยการบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 สภาวะ ได้แก่

1) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 0-2.0% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 วัน

2) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 0-0.5% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 55-121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15-60 นาที

3) กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดโพรไพโอนิก (CH_3CH_2COOH) กรดไนตริก (HNO_3) หรือ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที

ผลการทดลองพบว่า การบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดซัลฟิวริก ที่อุณหภูมิ 25 และ 55 องศาเซลเซียส ไม่สามารถเพิ่มซีโอดีละลายต่อซีโอดีทั้งหมด (SCOD/TCOD) อย่างมีนัยสำคัญ แต่การใช้น้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและการบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดซัลฟิวริก ที่อุณหภูมิ 70, 90 และ 121 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มซีโอดีละลายต่อซีโอดีทั้งหมดได้สูงสุดร้อยละ 19.3, 42.5, 81.0 และ 83.5 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า กรดแก่ (กรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริก) สามารถเพิ่มซีโอดีละลายต่อซีโอดีทั้งหมดมากกว่ากรดอ่อน (กรดอะซิติกและกรดโพรไพโอนิก) ถึงร้อยละ 7

ชนกพร วงษ์วัน (2555) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีการต่างๆ คือ การปรับสภาพในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการใช้ความร้อน ร่วมกับของเสียกลีเซอรอลจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยผลการทดลองพบว่าต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดเท่ากับ 80.7 L/kg VS removed และสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 43.6 L/kg VS removed นอกจากนี้ การหมักร่วมระหว่างต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง กับกลีเซอรอลที่ร้อยละ 1 (V/V) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดถึงร้อยละ 52.6 เท่ากับ 170.1 L/kg VS removed และผลิตก๊าซมีเทนได้ 85.4 L/kg VS removed

ปัทมวรรณ ไชยพงศ์ (2557) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเบื้องต้นในกระถินเทพนรงค์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการหมักร่วม (Co-digestion) กับหญ้าเนเปียร์และตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

พบว่า ไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 182.19 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยเพิ่มสูงขึ้น 1.2 เท่า จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น นอกจากนี้ การหมักร่วมระหว่างไบโกระถินเทพณรงค์กับหญ้าเนเปียร์และตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ยังสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้นกว่าการหมักไบโกระถินเทพณรงค์ชนิดเดียว โดยการหมักร่วมที่เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดคือ การหมักร่วมระหว่างไบโกระถินเทพณรงค์สดกับหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:3

กนิษฐา วิมลรัตน์ (2552) ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการปรับสภาพเบื้องต้นกากตะกอนน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบมัน โดยการใช้ความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 125 องศาเซลเซียส สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 และการให้ความร้อนร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ การทดลองพบว่าการใช้ความร้อนพร้อมปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้สูงที่สุดเท่ากับ 0.18 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยทั้งหมด มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 39.37 นอกจากนี้การหมักร่วมระหว่างกากตะกอนเยื่อกระดาษกับขยะเศษอาหาร ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 พบว่าที่อัตราส่วน 1:1 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้สูงที่สุดเท่ากับ 0.12 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยทั้งหมด มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 69.99 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมได้แก่ การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการใช้ความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 125 องศาเซลเซียส พร้อมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 ก่อนการทดลองหมักร่วมกับขยะเศษอาหารในอัตราส่วน 1:1 โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.19 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยทั้งหมด มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 63.33

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้เปลือกมันสำปะหลังซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารประกอบที่มีสมบัติเป็นด่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พร้อมทั้งทำการหมักร่วม (Co-digestion) กับน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน หรือหมักร่วมระหว่างเปลือกกับกากมันสำปะหลัง โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1) ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของเปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน และหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ปริมาณเถ้า สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ค่าซีไอดี ค่าพีเอช และปริมาณเซลลูโลส

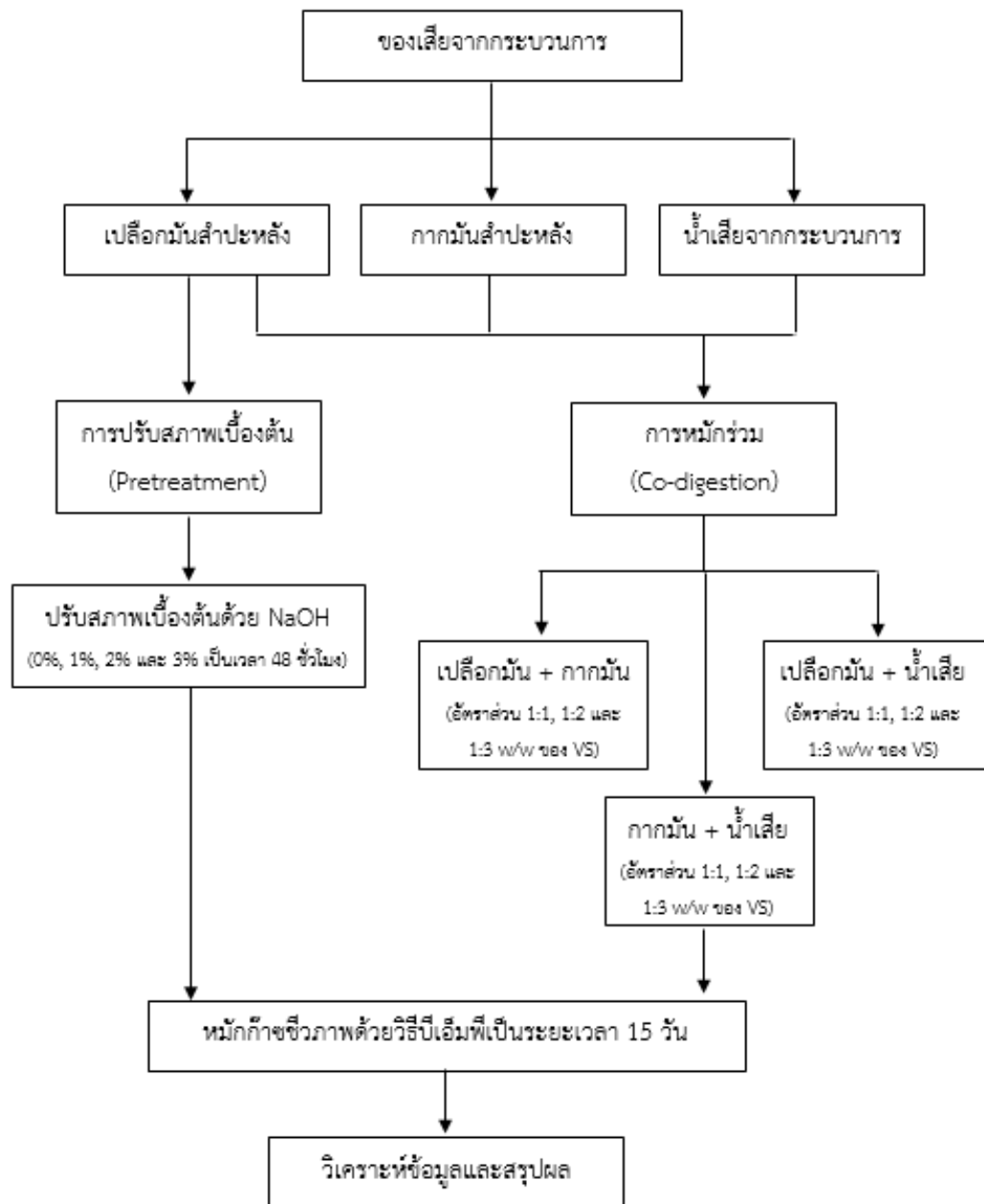
2) ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้เปลือกมันสำปะหลังด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) เป็นระยะเวลา 15 วัน

3) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

4) ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วมเปลือกมันสำปะหลังกับของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง 2 ชนิด ได้แก่ กากมันสำปะหลัง หรือน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน โดยทำการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) เป็นระยะเวลา 15 วัน

5) วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัยจากปริมาณก๊าซชีวภาพและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

โดยการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีแผนผังขั้นตอนการวิจัยแสดงดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนการวิจัย

3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance)
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) ที่ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) ที่ 150 องศาเซลเซียส
- เตาเผาควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) ที่ 550 ± 50 องศาเซลเซียส
- เครื่องวัดพีเอช (pH-meter)
- เครื่องเขย่าสาร (Shaker)
- เครื่องบด (Grinder)
- เตาแผ่น (Hot plate)
- เครื่องปั่นกวน (Magnetic stirrer)
- ขวดเซรามิกส์ขนาด 100 มิลลิลิตร
- กระบอกฉีดยาพลาสติก (Syringe)
- กระดาษกรอง GF/C
- เครื่องแก้วต่างๆ

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 วัตถุประสงค์/การเตรียมวัตถุดิบ

1) เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลังและน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันที่ใช้ในการทดลอง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ชลเจริญ จำกัด ตามภาพที่ 3-2 เก็บรักษาอุณหภูมิในระหว่างการเดินทางโดยใช้น้ำแข็ง อุณหภูมิ 0-2 องศาเซลเซียส และนำมาเก็บไว้ในตู้เย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 4 องศาเซลเซียส

2) เปลือกมันสำปะหลังถูกลดขนาดลงโดยการบดให้ละเอียด เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร ก่อนการทดลอง



(ก)



(ข)

(ค)

ภาพที่ 3-2 ของเสียจากโรงงานแปรงไม้สำหรับใช้ในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ ได้แก่
(ก) เปลือกไม้สำหรับ (ข) กากไม้สำหรับ (ค) น้ำเสียอุตสาหกรรมแปรงไม้

3) หัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดปราศจากออกซิเจน (Anaerobic fixed film reactor: AFFR) ของบริษัท ชลเจริญ จำกัด เก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำ ตามภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 ถังปฏิกรณ์ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดปราศจากออกซิเจน
(Anaerobic fixed film reactor: AFFR) ของบริษัท ชลเจริญ จำกัด

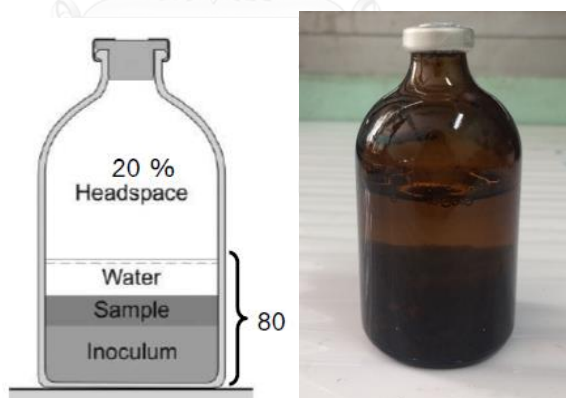
3.3.2 การปรับสภาพเบ้องต้น

1) นำเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการลดขนาดแล้วมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในอัตราส่วนเปลือกมันสำปะหลัง 1 กรัมต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 มิลลิลิตร

2) ล้างให้สะอาดด้วยน้ำ แล้ววิเคราะห์หองค์ประกอบทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ค่าพีเอช ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

3.3.3 การหมักก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี

1) กำหนดความเข้มข้นของแข็งระเหยได้ทั้งหมดเริ่มต้นร้อยละ 1 และกำหนดหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบมีค่าของแข็งระเหยได้ (VS) เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 2.5 โดยใช้ขวดเซรามิกส์ขนาด 100 มิลลิลิตร มีปริมาตรการทำงาน 80 มิลลิลิตร จากนั้นใส่วัตถุดิบที่ใช้ในการหมักโดยมีอัตราส่วนต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับ 60:40 (ปริมาตร/ปริมาตร) ตามภาพที่ 3-4 โดยมีชุดควบคุมคือหัวเชื้อจุลินทรีย์ ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหยร้อยละ 2.5 จากนั้นปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5 – 8.0 ด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)



ภาพที่ 3-4 ขวดเซรามิกส์สำหรับการทดลองชุดบีเอ็มพี (BMP)

โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาผลของเปลือกมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพเบ้องต้นด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และการศึกษาผลของการหมักร่วมของเปลือกมันสำปะหลัง (ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบ้องต้น) กับของเสียจากกระบวนการผลิต ตามตารางที่ 3-1 และ 3-2 โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำในทุกชุดการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 3-1 การศึกษาผลของเปลือกมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นเวลา 48 ชม.

ชุดการทดลองที่	สถานะที่ทดลอง
1	ไม่ปรับสภาพเบื้องต้น
2	ปรับสภาพเบื้องต้นด้วย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นเวลา 48 ชม.
3	ปรับสภาพเบื้องต้นด้วย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นเวลา 48 ชม.
4	ปรับสภาพเบื้องต้นด้วย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชม.
ชุดควบคุม	หัวเชื้อจุลินทรีย์ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหยร้อยละ 2.5

ตารางที่ 3-2 การศึกษาผลของการหมักร่วมของเปลือกมันสำปะหลังกับของเสียจากกระบวนการผลิต

ชุดการทดลองที่	อัตราส่วน (w/w ของ VS)		
	เปลือกมันสำปะหลัง	กากมันสำปะหลัง	น้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน
1	1	0	0
2	0	1	0
3	0	0	1
4	1	1	0
5	1	2	0
6	1	3	0
7	1	0	1
8	1	0	2
9	1	0	3
10	0	1	1
11	0	1	2
12	0	1	3
ชุดควบคุม	หัวเชื้อจุลินทรีย์ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหยร้อยละ 2.5		

2) ใส่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำขวดเซรั่มสีชาไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเขย่าด้วยอัตราเร็ว 165 รอบต่อนาที และวัดปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทุกวัน โดยใช้กระบอกจิตยาวัดปริมาตรก๊าซทั้งหมด (มิลลิลิตร) เป็นระยะเวลา 15 วัน ตามภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 ชุดการทดลองบีเอ็มพีในการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพ

3) บันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารของแต่ละชุดการทดลอง โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณในหน่วยลูกบาศก์เมตรของปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยได้ ดังสมการ

$$\text{ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (m}^3\text{/kg VS added)} = \frac{\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพชุดทดลอง (m}^3\text{)} - \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพชุดควบคุม (m}^3\text{)}}{\text{น้ำหนักของแข็งระเหยได้เริ่มต้น (kg)}}$$

3.3.4 วิธีวิเคราะห์และความถี่ของการวิเคราะห์

1) พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ตามวิธีการมาตรฐาน ทั้งในส่วนของสับสเตรท และระบบบีเอ็มพี มีรายละเอียดการวิเคราะห์และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 พารามิเตอร์ที่วัดและการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์	ความถี่
ปริมาณความชื้น	เปอร์เซ็นต์	Gravimetric method	ก่อนการทดลอง
สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	-	Walkley-Black and Kjeldahl method	ก่อนการทดลอง
ปริมาณเซลลูโลส	เปอร์เซ็นต์	Neutral-Detergent Fiber	ก่อนและหลังการปรับสภาพ
ปริมาณเฮมิเซลลูโลส	เปอร์เซ็นต์	Acid-Detergent Fiber	ก่อนและหลังการปรับสภาพ
ปริมาณลิกนิน	เปอร์เซ็นต์	Acid-Detergent Lignin	ก่อนและหลังการปรับสภาพ
พีเอช	-	pH meter	3 ครั้งต่อสัปดาห์
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อลิตร	Gravimetric method	3 ครั้งต่อสัปดาห์
ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อลิตร	Gravimetric method	3 ครั้งต่อสัปดาห์
ค่าซีโอดีละลาย	มิลลิกรัมต่อลิตร	Potassium Dichromate Digestion	3 ครั้งต่อสัปดาห์
กรดไขมันระเหย	มิลลิกรัมต่อลิตร	Titration method	3 ครั้งต่อสัปดาห์
ปริมาณไนโตรเจน	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Kjeldahl method	หลังการทดลอง
ปริมาณฟอสฟอรัส	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Colorimetric method	หลังการทดลอง
ปริมาณโพแทสเซียม	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Atomic Emission Spectrophotometer	หลังการทดลอง
ปริมาณก๊าซชีวภาพ	มิลลิลิตร	วัดปริมาตรก๊าซ	ทุกวัน

2) ทำการทดลอง 3 ซ้ำในทุกชุดการทดลองและการวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารประกอบที่มีสมบัติเป็นด่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) พร้อมทั้งศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยเทคนิคการหมักร่วม (Co-digestion) โดยทำการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน สามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้

1) ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของเปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน และหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ปริมาณเถ้า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และค่าพีเอช

2) ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของเปลือกมันสำปะหลังสด เปรียบเทียบกับเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3 ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ปริมาณเถ้า ค่าพีเอช ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

3) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) เป็นระยะเวลา 15 วัน

4) ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วมของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง และน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน โดยทำการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ด้วยวิธีบีเอ็มพี เป็นระยะเวลา 15 วัน

5) ศึกษาคุณสมบัติของตะกอนสลัดจ์ภายหลังการหมักเพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยชีวภาพ

4.1 องค์ประกอบของวัตถุดิบก่อนการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง และน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน สำหรับเปลือกมันสำปะหลังต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มโอกาสในการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ โดยมันสำปะหลังที่ทางโรงงานใช้เป็นวัตถุดิบมีหลายพันธุ์คละกัน เช่น พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 พันธุ์ระยอง 9 พันธุ์ห้วยบง 60 พันธุ์เขียวปลัดหนี่ เป็นต้น

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกมันสำปะหลังสด กากมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันและหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น พบว่าเปลือกและกากมันสำปะหลังสดมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 22.22 และร้อยละ 22.78 จากน้ำหนักสดตามลำดับ ซึ่งมากกว่าน้ำเสียซึ่งมี TS เพียงร้อยละ 4.72

สำหรับปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) พบว่า กากมันสำปะหลังมีปริมาณ VS ร้อยละ 22.43 สูงกว่าเปลือกมันสำปะหลังและน้ำเสีย ซึ่งมีปริมาณ VS ร้อยละ 21.24 และร้อยละ 4.53 ตามลำดับ โดยปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพ สารอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งระเหยสูงมีความเป็นไปได้ที่จะมีความสามารถสูงในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Nkodi et al, 2016)

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของเปลือกมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังมีค่า 25.87 และ 19.43 ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีค่าอยู่ระหว่าง 20-30 (Verma, 2002) ขณะที่น้ำเสียมีค่า C/N เพียง 2.62 นอกจากนี้พบว่าวัตถุดิบที่ใช้ทั้ง 3 ชนิดมีค่าพีเอชอยู่ในช่วงกรด การปรับ pH เริ่มต้นของระบบเพื่อควบคุมเสถียรภาพของ pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือ 6.6-7.4 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) จึงมีความสำคัญมาก

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและหัวเชื้อจุลินทรีย์

องค์ประกอบ	เปลือกมัน สำปะหลัง	กากมัน สำปะหลัง	น้ำเสีย	หัวเชื้อ จุลินทรีย์
ของแข็งทั้งหมด (TS) (%)	22.22	22.78	4.72	7.00
ความชื้น (Moisture) (%)	77.78	77.22	95.28	93.00
ของแข็งระเหยได้ (VS) (%)	21.24	22.43	4.53	6.32
เถ้า (Ash) (%)	0.98	0.35	0.19	0.68
อัตราส่วน C/N	25.87	19.43	2.62	8.67
ค่าพีเอช (pH)	5.29*	4.11*	3.61	7.38

หมายเหตุ: pH ของสารละลายแขวนลอย (Solid:Liquid = 1:5)

4.2 องค์ประกอบของเปลือกมันสำปะหลังหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การปรับสภาพเปลือกมันสำปะหลังเบื้องต้นโดยแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงเกินไปอาจยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยการยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพลดลง (Zheng et al, 2014)



ภาพที่ 4-1 เปลือกมันสำปะหลังสด และเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ลดลง กล่าวคือ ปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ลดลงจากร้อยละ 21.24 เหลือร้อยละ 7.03, 6.49 และ 6.29 ตามลำดับ ตามตารางที่ 4-2

สืบเนื่องจากการศึกษาครั้งนี้เป็นสเกลเล็ก ปริมาณสารน้อยจึงไม่ได้ทำการล้างต่างออกหลังการปรับสภาพเปลือกมันสำปะหลังด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จึงส่งผลให้ค่าพีเอชของสารแขวนลอย (Solid: Liquid 1:5) มีค่า pH 12.23, 12.62 และ 12.81 ตามลำดับ จึงต้องมีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1

ตารางที่ 4-2 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกมันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

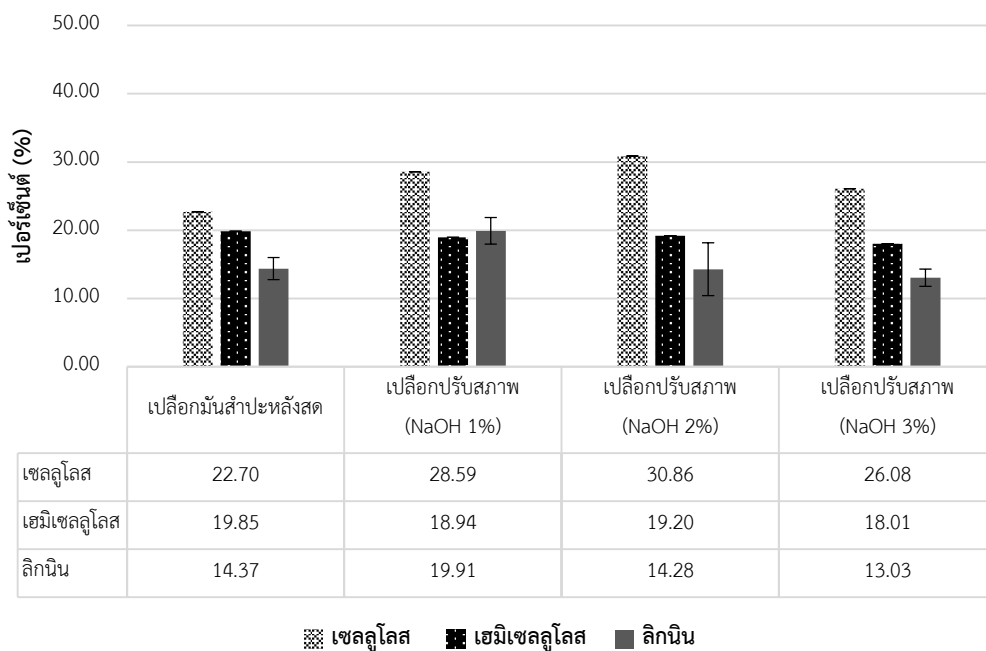
องค์ประกอบ	เปลือกมัน ลำปะหลัง	เปลือกมันที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH		
		ร้อยละ 1	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3
ของแข็งทั้งหมด (TS) (%)	22.22	7.80	7.63	7.26
ความชื้น (Moisture) (%)	77.78	92.20	92.37	92.74
ของแข็งระเหยได้ (VS) (%)	21.24	7.03	6.49	6.29
เถ้า (Ash) (%)	0.98	0.77	1.14	0.97
อัตราส่วน C/N	25.87	-	-	-
ค่าพีเอช (pH)	5.29*	12.23*	12.62*	12.81*

หมายเหตุ:

(-) หมายถึง ไม่ได้ทำการทดลอง

pH ของสารละลายแขวนลอย (Solid:Liquid = 1:5)

การปรับสภาพโดยใช้สารละลายต่าง (Alkali Pretreatment) เป็นการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสด้วยปฏิกิริยาสบู่ (Saponification) ของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสกับลิกนิน ส่งผลให้ลิกนินซึ่งขัดขวางการทำงานของเอนไซม์หลุดออกจากโครงสร้าง ทำให้เอนไซม์สามารถทำปฏิกิริยาย่อยสลายเซลลูโลสได้ดียิ่งขึ้น (ชุดิมา สนันศรีสาคร, 2555) โดยเปลือกมันลำปะหลังสดที่ใช้ในการวิจัยมีปริมาณลิกนินอยู่ในเกณฑ์ปานกลางเท่ากับร้อยละ 14.37 ดังนั้นการปรับสภาพโดยใช้สารละลายต่างจึงเป็นการเพิ่มปริมาณการชะละลายของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกมา (ซุซันท์ นิवासวงษ์ และเฉลิม เรืองวิริยะชัย, 2555) แต่จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เปลือกมันลำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไม่สามารถลดปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพที่ 4-2 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อการชะละลายของลิกนินของเปลือกมันลำปะหลัง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสารชีวมวลอื่นพบว่าปริมาณการชะละลายลิกนินนั้นมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เพิ่มมากขึ้น โดยงานวิจัยของ ปัทมวรรณ ไชยพงศ์ (2557) พบว่า การปรับสภาพเบื้องต้นในกระถินเทพมรงค์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.62 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณลิกนินลดลงมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 56.8 เนื่องจากการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะช่วยลดปริมาณลิกนินส่งผลให้เกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากลิกนินปริมาณสูงจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์จากโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กในขั้นตอนไฮโดรไลซิสต่ำลง (Li et al, 2012)



ภาพที่ 4-2 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของเปลือกมันสำปะหลังสดและเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.3 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP)

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีสำหรับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยชุดการทดลองทั้งสิ้น 16 ชุดการทดลอง ชุดควบคุม ชุดหมักเดี่ยว (ปรับและไม่ปรับสภาพเปลือกมัน) และชุดหมักร่วม ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ชุดควบคุม หัวเชื้อจุลินทรีย์ ของแข็งระเหยร้อยละ 2.5

ชุดการทดลองที่ 2 เปลือกมันสำปะหลังสด

ชุดการทดลองที่ 3 กากมันสำปะหลัง

ชุดการทดลองที่ 4 น้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน

ชุดการทดลองที่ 5-7 เปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

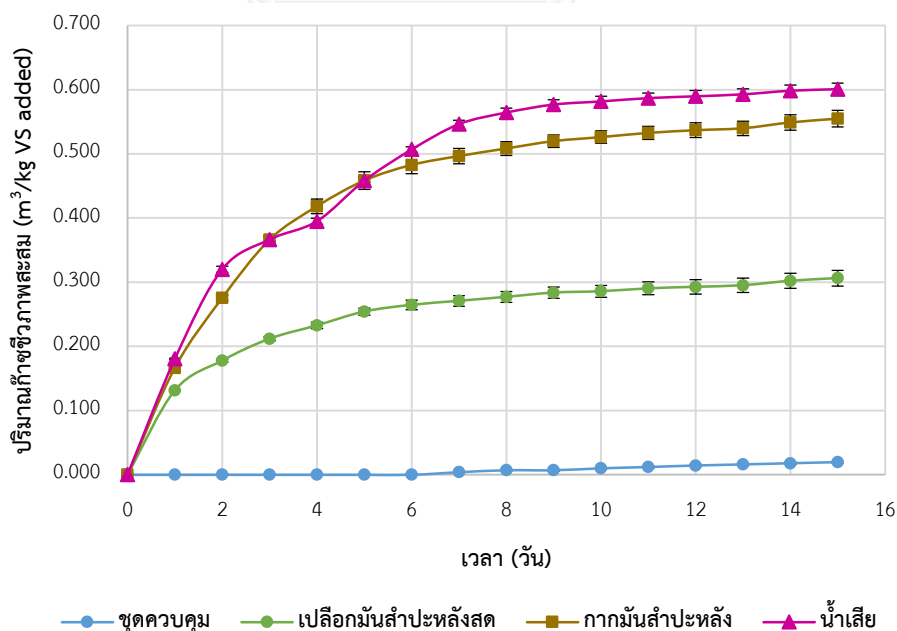
ชุดการทดลองที่ 8-10 เปลือกมันสำปะหลัง หมักร่วมกับ กากมันสำปะหลัง อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3 ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 11-13 เปลือกมันสำปะหลัง หมักร่วมกับ น้ำเสีย อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3 ตามลำดับ

ชุดการทดลองที่ 14-16 กากมันสำปะหลัง หมักร่วมกับ น้ำเสีย อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3 ตามลำดับ

4.3.1 ผลการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีของของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีของของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง และน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน พบว่าน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสามารถให้ผลการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ $0.601 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ เนื่องจากมีสารอินทรีย์ที่เป็นสารอาหารของจุลินทรีย์ในปริมาณสูง ซึ่งโดยปกติ น้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ 7 ลูกบาศก์เมตร (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549) รองลงมา คือ กากมันสำปะหลังที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพ $0.589 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ และเปลือกมันสำปะหลัง $0.306 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ ตามภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ($\text{m}^3/\text{kg VS added}$) ของของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยจุลินทรีย์ 2 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มผลิตกรด และกลุ่มผลิตมีเทน ในช่วงแรกของกระบวนการจะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้มีโมเลกุลเล็กลงสามารถลำเลียงเข้าสู่เซลล์จุลินทรีย์ได้ง่ายขึ้น จากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไปเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid) ด้วยจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด ตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนกรดไขมันระเหยไปเป็นอะซิเตต ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนสุดท้าย คือ การสร้างก๊าซมีเทน ที่เป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ โดยจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน จะเปลี่ยนอะซิเตต ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นมีเทน

จากผลการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-3 จะพบว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันและกากมันสำปะหลังมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีพอๆ กัน ขณะที่เปลือกมันสำปะหลังซึ่งมีลิกนินค่อนข้างสูง (ประมาณร้อยละ 14.37) มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำกว่าน้ำเสียและกากมันสำปะหลังมาก จึงทดลองเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลัง 2 แนวทาง คือ ปรับสภาพผิวเบื้องต้นด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้นร้อยละ 1-3 และการหมักร่วมกับกากมันสำปะหลัง เปรียบเทียบกับการหมักร่วมกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมัน ดังแสดงในภาพที่ 4-4 และ 4-7 ตามลำดับ

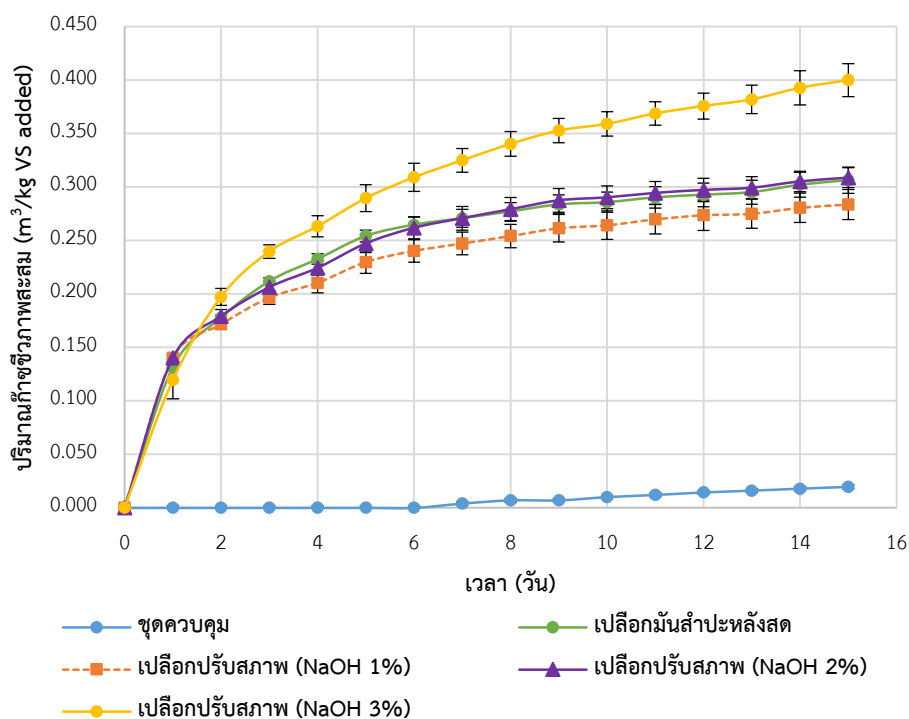
4.3.2 ผลการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายที่นิยมใช้ในวิธีการปรับสภาพโดยใช้สารละลายต่างๆ รวมทั้งมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในชีวมวลหลายชนิด เช่น ฟางข้าว เศษไม้ ทะลายปาล์ม ต้นข้าวโพด กากจากอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น (Zheng et al, 2014) โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังนี้

(1) ผลของการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

เปลือกมันสำปะหลังสด (ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยต่าง) มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ $0.306 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ หลังผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้นร้อยละ 1-3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่ามีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นเล็กน้อย กล่าวคือ เพิ่มขึ้นสูงสุดกรณีปรับ

สภาพด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้นร้อยละ 3 ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 0.306 m³/kg VS added เป็น 0.400 m³/kg VS added ตามภาพที่ 4-4

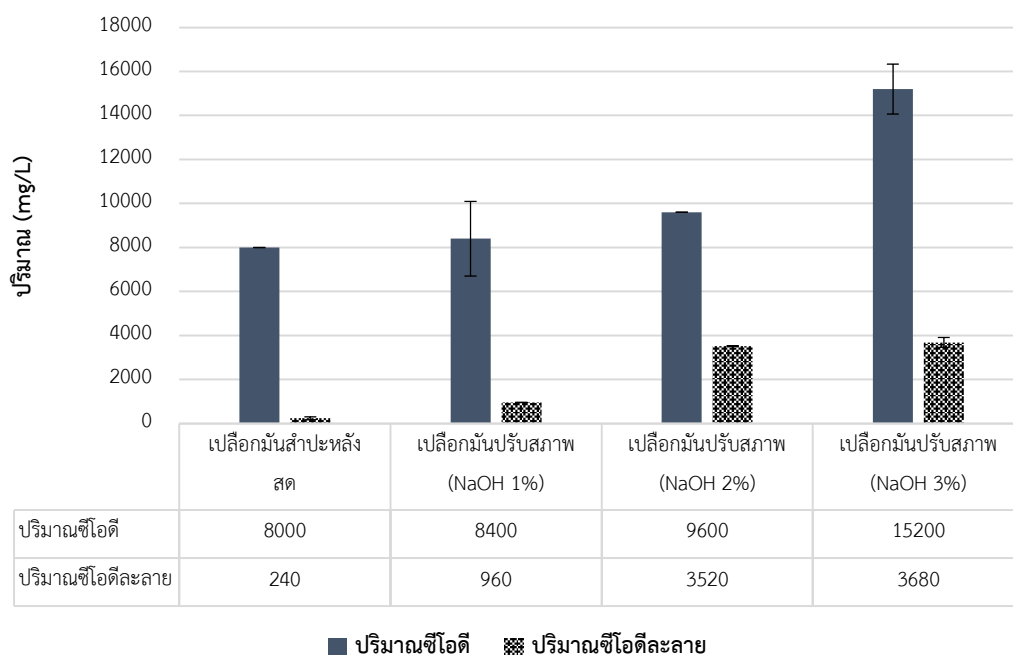


ภาพที่ 4-4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลัง

(2) ปริมาณซีโอติและซีโอติละลายเริ่มต้นของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

การปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้นร้อยละ 1-3 เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณซีโอติและซีโอติละลายเริ่มต้นของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 มีปริมาณซีโอติและซีโอติละลายสูงที่สุด คือ ปริมาณซีโอติ 15,200 mg/L และปริมาณซีโอติละลาย 3,680 mg/L ในขณะที่เปลือกมันสำปะหลังสดมีปริมาณซีโอติเพียง 8,000 mg/L และปริมาณซีโอติละลาย 240 mg/L ดังภาพที่ 4-5 ทั้งนี้เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดการแยกตัวกันของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสกับสารอื่นๆ เช่น ลิกนิน โครงสร้างผนังเซลล์จึงบวมเพิ่มพื้นที่ผิวและลดระดับการพอลิเมอร์ไรเซชัน เป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ จึงส่งผลให้ปริมาณซีโอติในสารละลายเพิ่มมากขึ้น (Zheng et al, 2014) อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูง

เกินไปอาจจะยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยการยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพลดลง (Zheng et al, 2014)

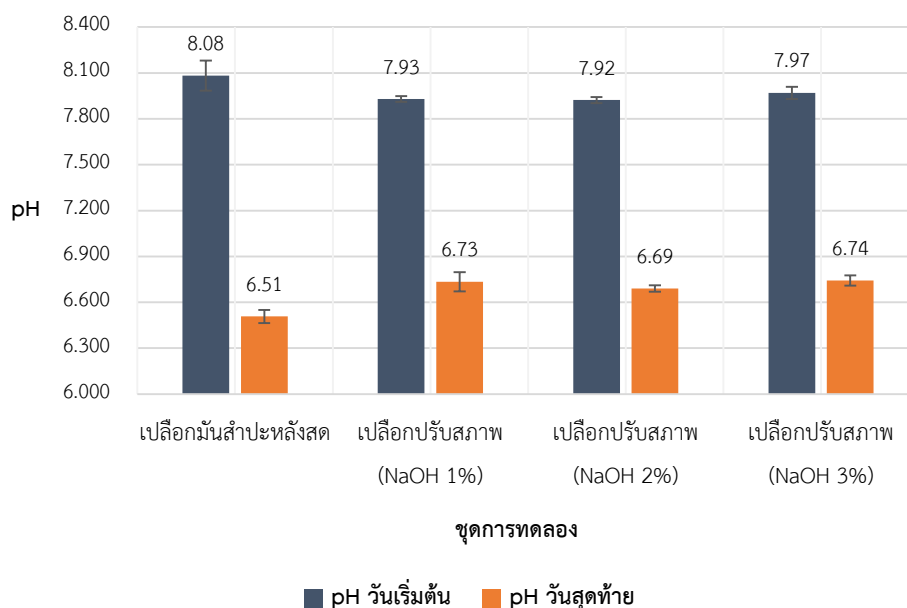


ภาพที่ 4-5 ปริมาณซีไอดีและซีไอดีละลายเริ่มต้นในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพของเปลือกมันสำปะหลังสดและเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

(3) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

การปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้นร้อยละ 1-3 ส่งผลให้พีเอชของสารแขวนลอยเปลือกมันสำปะหลังเพิ่มสูงขึ้นจาก 5.29 เป็น 12.13, 12.62 และ 12.81 ตามลำดับ การควบคุมค่าพีเอชของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพเริ่มต้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (pH 6.6-7.4) จึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์

สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ได้ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้อยู่ในช่วงพีเอช 7.9-8.0 ทุกชุดการทดลอง และพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 15 วัน ค่าพีเอชของทั้ง 4 ชุดการทดลองลดลง เหลือประมาณ 6.5-6.7 ดังภาพที่ 4-6 ซึ่งแสดงว่ามีการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นกรดไขมัน



ภาพที่ 4-6 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชวันเริ่มต้นและวันสุดท้ายของการทดลอง

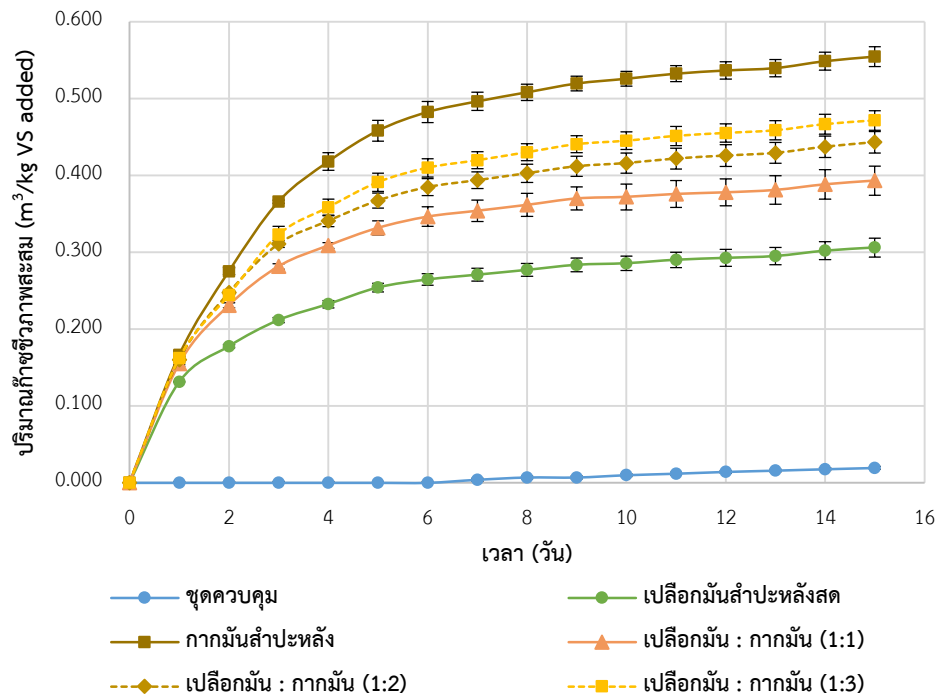
4.3.3 ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วมระหว่างของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอีกแนวทางหนึ่ง คือ กระบวนการหมักร่วม (Co-digestion) สำหรับงานวิจัยนี้เลือกทำการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ปรากฏผลดังต่อไปนี้

(1) การหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง

ผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังสดกับกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ไม่พบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเชิง Synergy กล่าวคือ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม มีค่าสูงกว่าการผลิตจากเปลือกมันเดี่ยวๆ แต่ต่ำกว่าการผลิตจากกากมันเดี่ยวๆ ดังภาพที่ 4-7

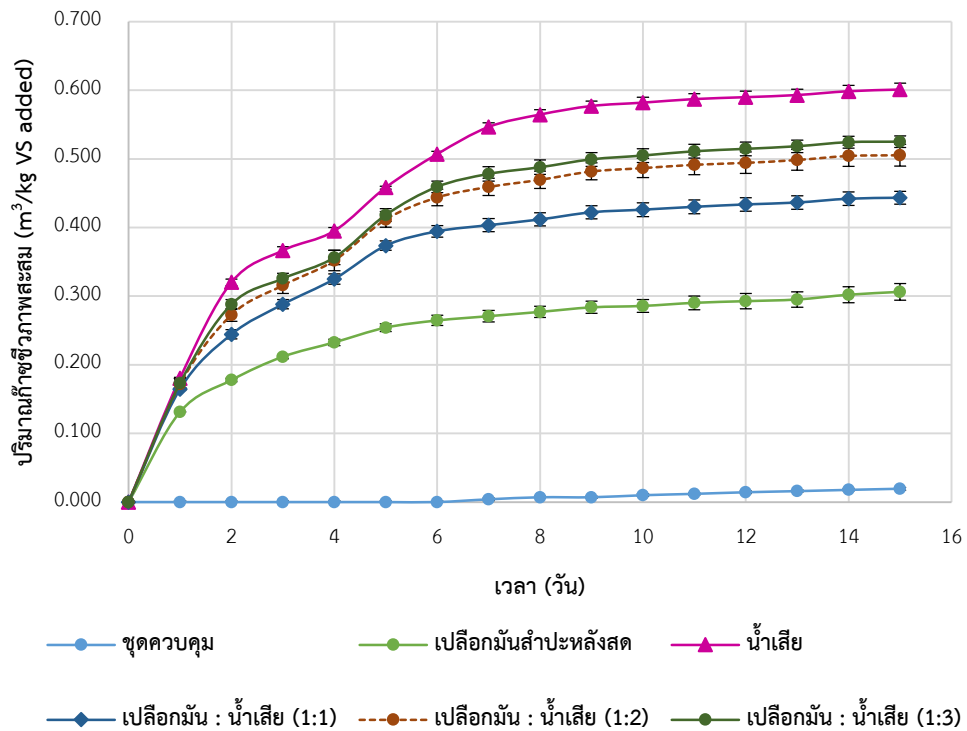
อย่างไรก็ตามการหมักเปลือกมันสำปะหลังสดร่วมกับกากมันสำปะหลัง เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการกำจัดหรือใช้ประโยชน์เปลือกมันสำปะหลังซึ่งเป็นปัญหาของเสียรอกำจัดของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังทั่วไป



ภาพที่ 4-7 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกกับกากมันสำปะหลัง

(2) การหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย

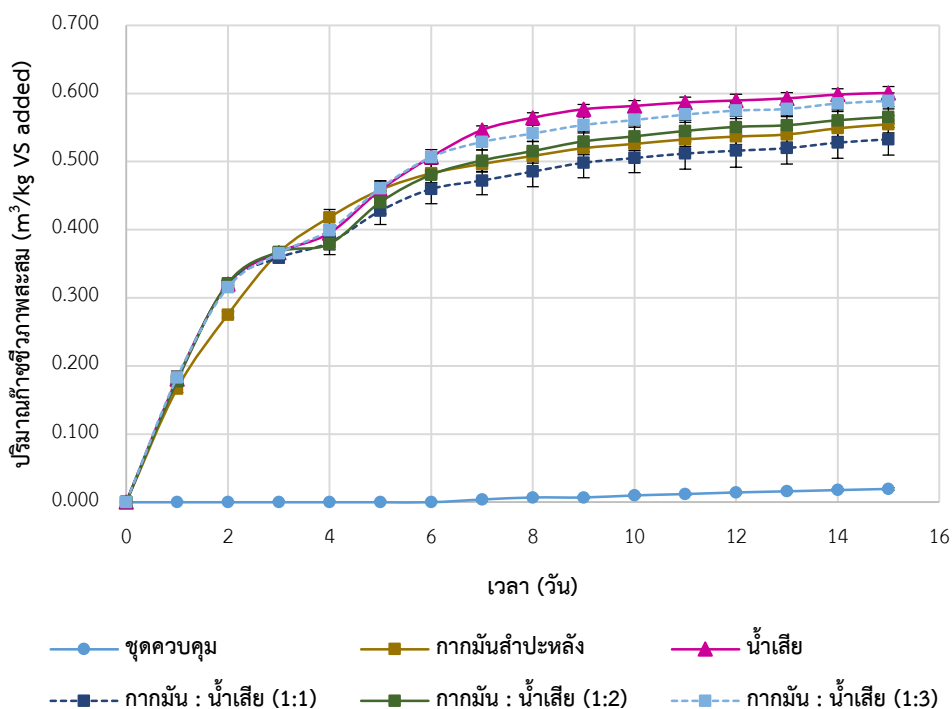
ผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังสดกับน้ำเสียที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ไม่พบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเชิง Synergy กล่าวคือ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม มีค่าสูงกว่าการผลิตจากเปลือกมันเดี่ยวๆ แต่ต่ำกว่าการผลิตจากน้ำเสียเดี่ยวๆ ดังภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ($\text{m}^3/\text{kg VS added}$) ของชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสียน้ำ

(3) การหมักร่วมระหว่างกากมันสำปะหลังกับน้ำเสียน้ำ

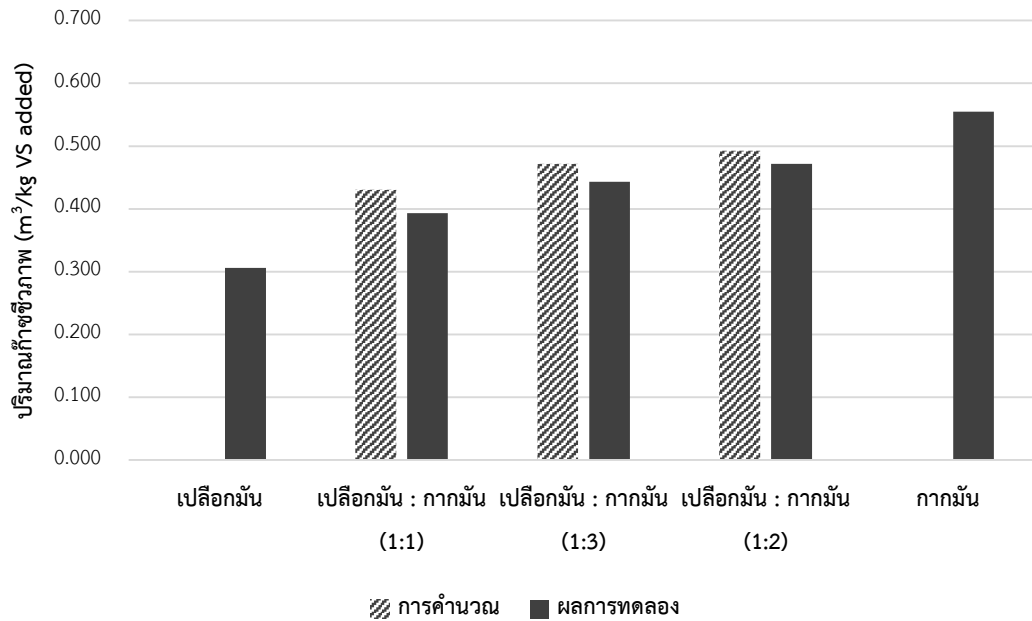
ผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างกากมันสำปะหลังกับน้ำเสียน้ำที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ไม่พบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเชิง Synergy กล่าวคือ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม มีค่าสูงกว่าการผลิตจากกากมันเดี่ยวๆ แต่ต่ำกว่าการผลิตจากน้ำเสียน้ำเดี่ยวๆ ดังภาพที่ 4-9 ประกอบกับกากมันเดี่ยวๆและน้ำเสียน้ำเดี่ยวๆ มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกันอยู่แล้ว จึงไม่มีความจำเป็นต้องนำน้ำเสียน้ำมาหมักร่วมกับกากของเสียน้ำ ทั้งกรณีเปลือกมันและกากมัน



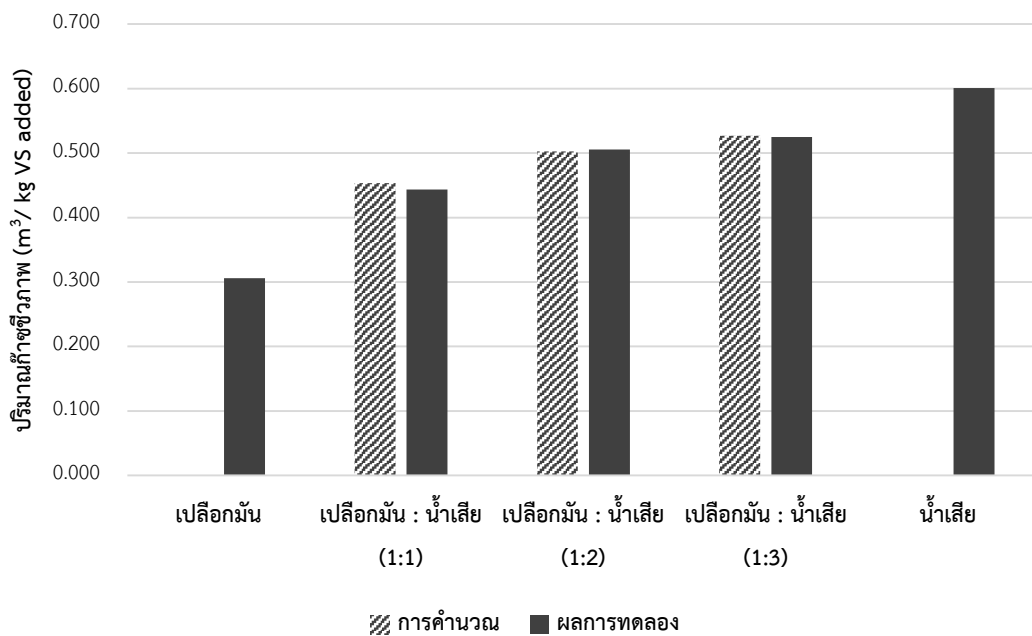
ภาพที่ 4-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย

(4) การเปรียบเทียบก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักร่วมกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

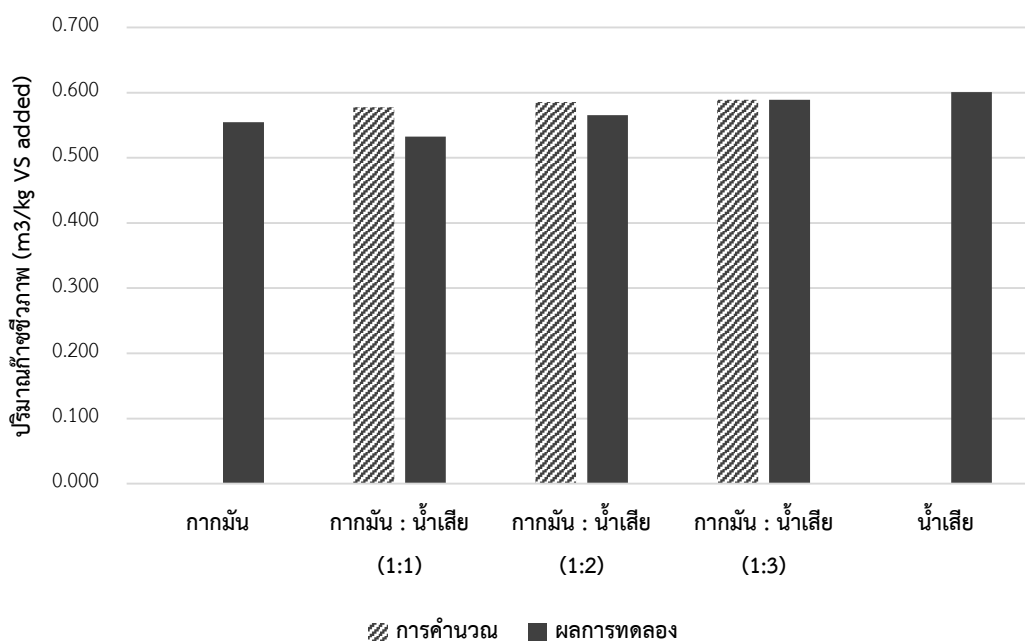
จากผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีจากการหมักร่วมของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง และน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการคำนวณตามอัตราส่วนผสม กับค่าที่ได้จากผลการทดลองจริง มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 4-10, 4-11, และ 4-12 ซึ่งยืนยันได้ว่าการหมักร่วมของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังไม่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเชิง Synergy



ภาพที่ 4-10 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพ (m³/kg VS added) จากการคำนวณและผลการทดลองจริงของการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง



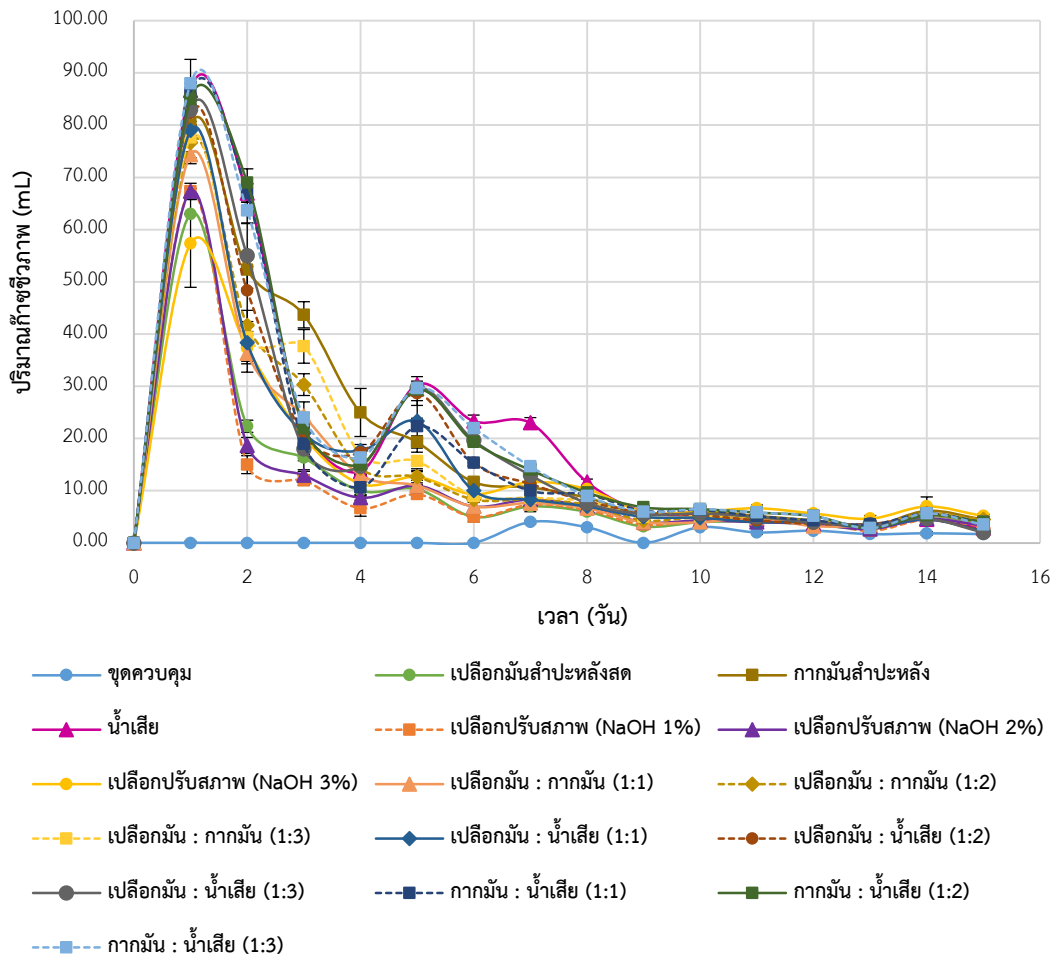
ภาพที่ 4-11 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพ (m³/kg VS added) จากการคำนวณและผลการทดลองจริงของการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย



ภาพที่ 4-12 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพ (m^3/kg VS added) จากการคำนวณและผลการทดลองจริงของการหมักร่วมระหว่างกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย

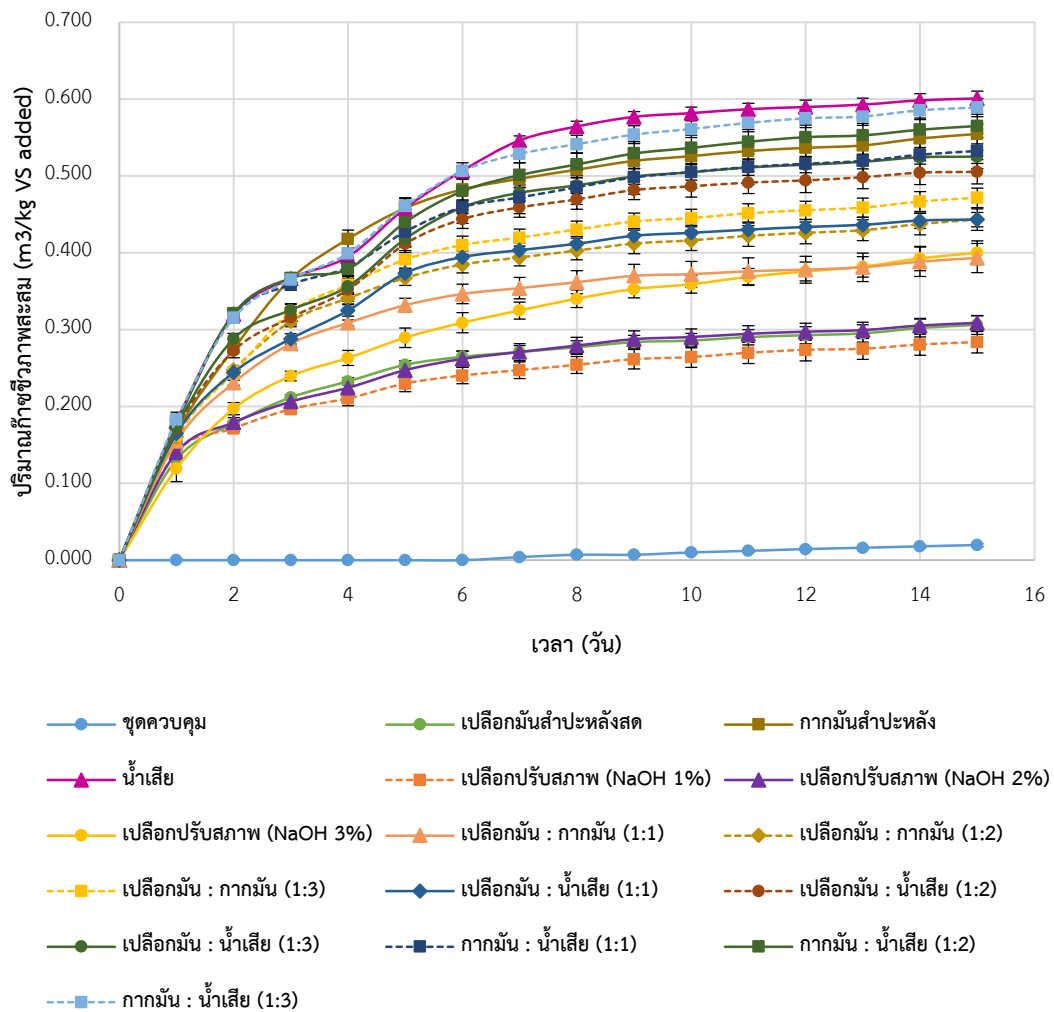
4.3.4 เปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีของแต่ละชุดการทดลอง

จากผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมัน กากมัน และน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งสำปะหลัง ทั้งกรณีหมักเดี่ยวและกรณีหมักร่วม พบว่ามีแนวโน้มการผลิตก๊าซชีวภาพคล้ายกันทุกชุดการทดลอง กล่าวคือ ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นสูงสุดในวันที่ 1 ของทุกชุดการทดลอง และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงวันที่ 2-4 แต่กลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันที่ 5 แล้วลดลงอย่างต่อเนื่องอีกครั้งจนถึงวันที่ 15 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการทดลอง ดังภาพที่ 4-13 ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองที่มีการเติมสับสเตรทเพียงครั้งเดียวตลอดการทดลอง จึงทำให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างต่อเนื่อง (สมยศ เนตรสงคราม, 2557) โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับชุดควบคุมซึ่งมีเพียงหัวเชื้อจุลินทรีย์ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหยร้อยละ 2.5 จะพบว่าช่วง 6 วันแรกของการทดลอง จะไม่มีการเกิดก๊าซชีวภาพ แต่พบเกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อยเมื่อวันที่ 7 และกลับลดลงจนจบการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในทุกชุดการทดลองเป็นผลมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ (สับสเตรท) ของหัวเชื้อจุลินทรีย์เกิดเป็นก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 4-13 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองต่างๆ

หากเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของแต่ละชุดการทดลอง ดังภาพที่ 4-14 พบว่าทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงวันเริ่มต้นการทดลองจนถึงวันที่ 7 ของการทดลอง และเริ่มคงที่ตั้งแต่วันที่ 8 จนถึงวันสุดท้ายของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ (สับสเตรท) ถูกย่อยสลายจนหมดในช่วง 7 วันแรก



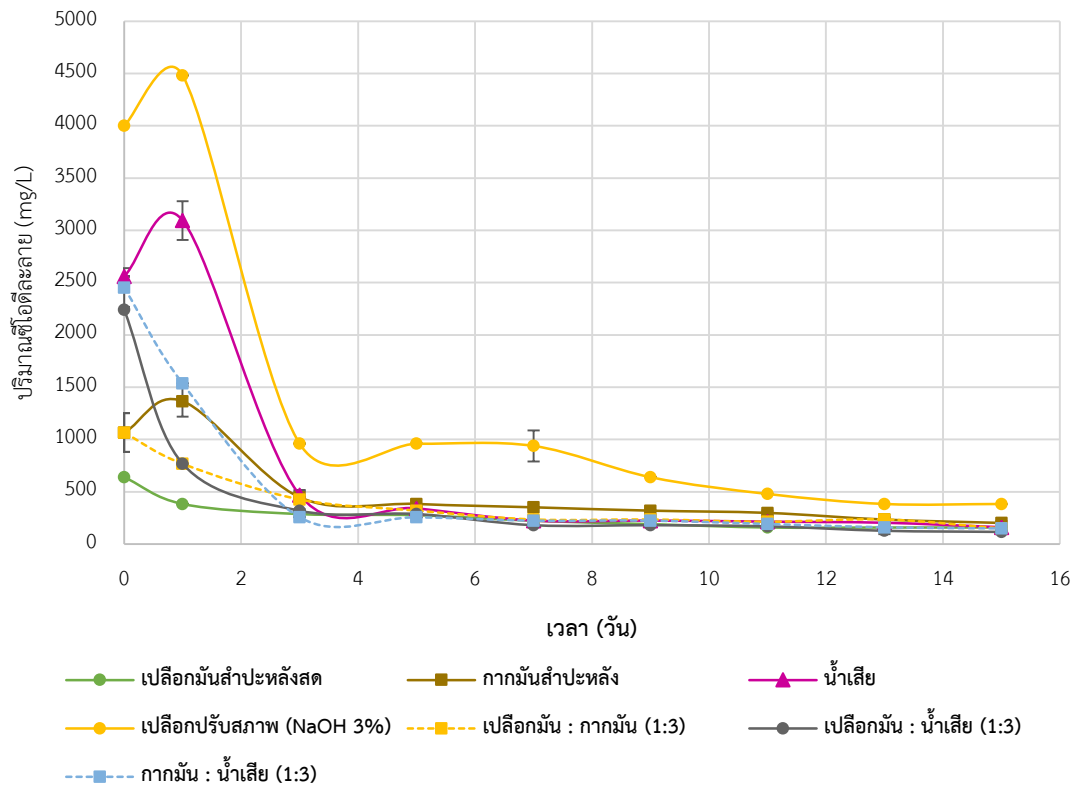
ภาพที่ 4-14 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m³/kg VS added) ของชุดการทดลองต่างๆ

4.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปซีโอติละลาย

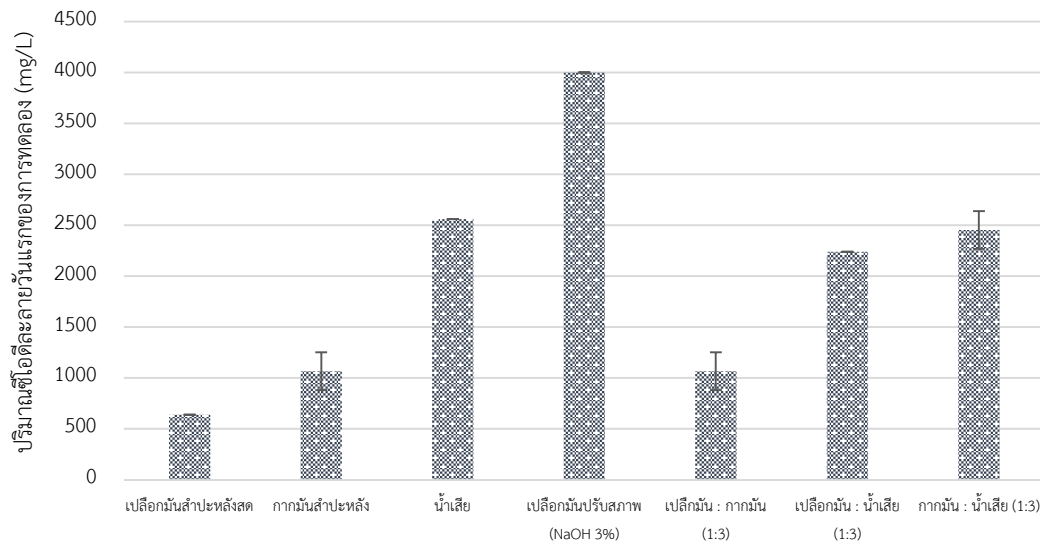
ปริมาณซีโอติละลายระหว่างการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีเป็นระยะเวลา 15 วัน ของชุดการทดลองต่างๆ พบว่า ปริมาณซีโอติละลายจะสูงในวันแรก และลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 3 วันแรก จากนั้นเริ่มคงที่หลังวันที่ 5 จนถึงวันสิ้นสุดการทดลอง ตามภาพที่ 4-15 เนื่องจากช่วงแรกจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ (สับสเตรท) เกิดเป็นกรดไขมันระเหยละลายอยู่ในระบบเป็นผลให้ค่าซีโอติละลายสูงขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปจุลินทรีย์กลุ่มที่สองมีการใช้กรดไขมันระเหยเพื่อเปลี่ยนเป็นมีเทนทำให้กรดไขมันระเหยลดลง ปริมาณซีโอติละลายจึงค่อยๆ ลดลง

ตามระยะเวลา ดังนั้น ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสูงสุดในวันแรกของการทดลองอาจเป็นไอของกรดไขมันระเหยร่วมด้วย

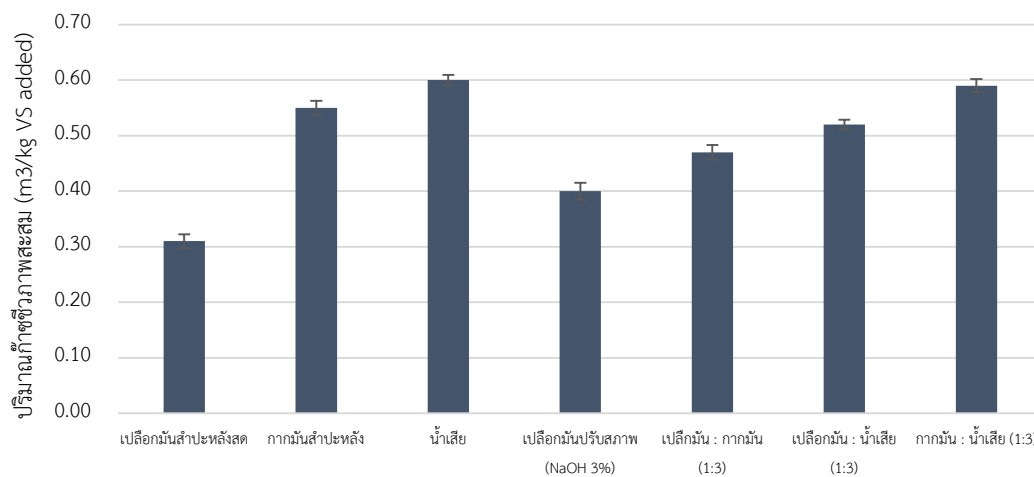


ภาพที่ 4-15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอดีละลายในแต่ละชุดการทดลอง

เมื่อพิจารณาปริมาณซีโอดีละลายวันแรกของการทดลอง เปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม พบว่า มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ตามภาพที่ 4-16 กล่าวคือ ในชุดการทดลองที่มีปริมาณซีโอดีละลายวันแรกของการทดลองต่ำ จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่ำ ขณะที่ชุดการทดลองที่มีปริมาณซีโอดีละลายวันแรกของการทดลองสูง จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงไปด้วย ยกเว้นในชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้นร้อยละ 3 ที่มีปริมาณซีโอดีละลายวันแรกของการทดลองสูงที่สุด แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมกลับต่ำกว่าในหลายๆ ชุดการทดลอง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการมีสารละลาย NaOH และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชรบกวนอยู่ภายในระบบมากเกินไป



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-16 เปรียบเทียบปริมาณซีไออดีละลายและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

(ก) ปริมาณซีไออดีละลายวันแรกของการทดลอง (mg/L)

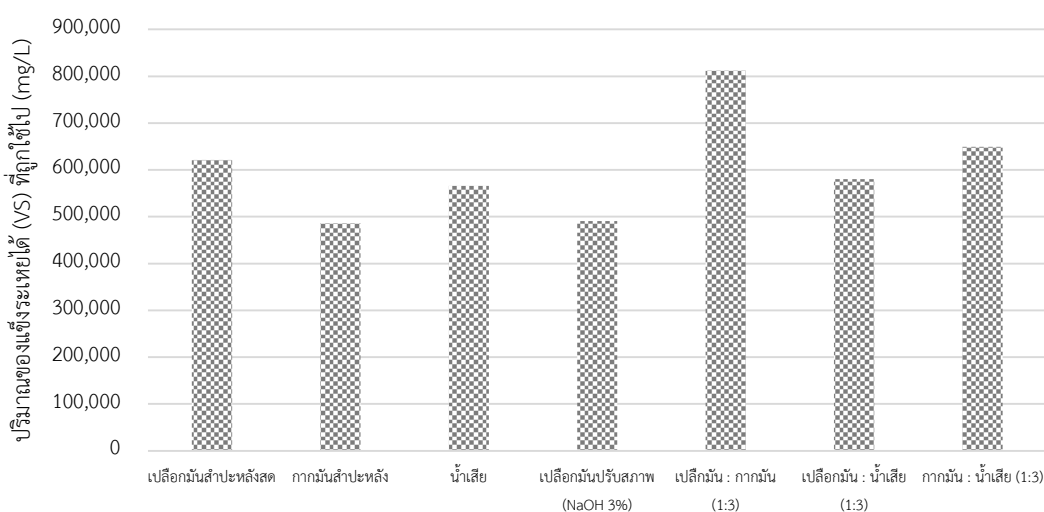
(ข) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m³/kg VS added)

4.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปของแข็งระเหยได้

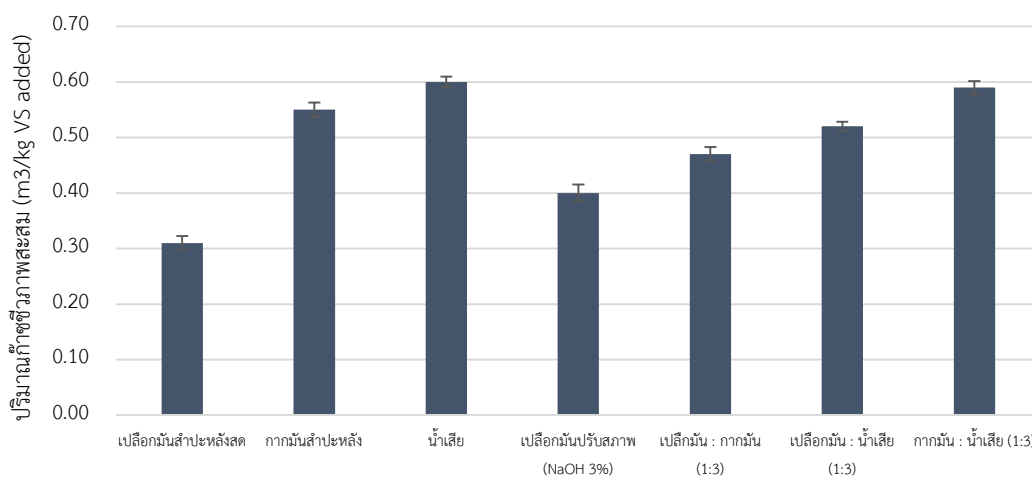
ปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ระหว่างการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีปีเอ็มพีเป็นระยะเวลา 15 วัน ของชุดการทดลองต่างๆ พบว่า วันแรกๆของทุกชุดการทดลองมีปริมาณของแข็งระเหยได้เท่ากันคือร้อยละ 1.28 หรือ 1,280,000 mg/L เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของแข็ง

ระเหยได้จะลดลงตามลำดับ เนื่องมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและผลิตก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้ปริมาณของแข็งระเหยได้ลดลง

เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ที่ถูกใช้ไปของแต่ละชุดการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม พบว่า ปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ที่ถูกใช้ไปไม่ได้เป็นแนวโน้มเดียวกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ตามภาพที่ 4-17 ดังนั้น ปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ที่ถูกใช้ไปจึงไม่ใช่ปัจจัยหลักในการกำหนดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพของงานวิจัยนี้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-17 เปรียบเทียบปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ที่ถูกใช้ไปและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

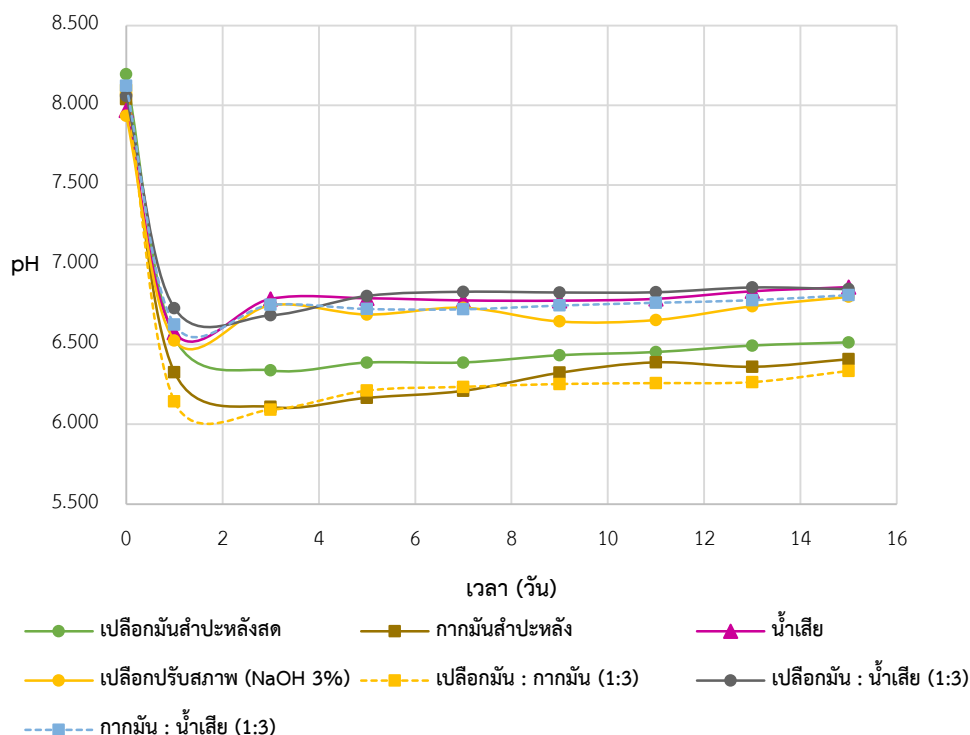
(ก) ปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ที่ถูกใช้ไป (mg/L)

(ข) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m³/kg VS added)

4.4.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช

การควบคุมค่าพีเอชเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วงพีเอชที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 6.6-7.4 โดยปริมาณกรดไขมันที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในระดับสูง จะส่งผลให้ค่าพีเอชลดลงต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ดังนั้นการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของชุดการทดลองให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญ จากผลการทดลองพบว่า การปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของชุดการทดลองให้อยู่ในช่วงพีเอช 7.9-8.1 ส่งผลให้ชุดการทดลองสามารถควบคุมเสถียรภาพของค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตลอดช่วงเวลาของการทดลองได้ คือ ชุดการทดลองน้ำเสีย ชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ชุดการทดลองการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย (1:3) และการหมักร่วมระหว่างกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย (1:3) ดังนั้น ในชุดการทดลองดังกล่าวจึงมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่ค่อนข้างสูง

แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีชุดการทดลองที่ค่าพีเอชต่ำกว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสม ได้แก่ ชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลังสด ชุดการทดลองกากมันสำปะหลัง และชุดการทดลองการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันและกากมันสำปะหลัง (1:3) เนื่องจากพีเอชที่ต่ำกว่า 6.7 เกิดจากการสะสมกรดไขมันระเหยในระบบมากเกินไปจนส่งผลให้จุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนตายลง เกิดการสะสมกรดมากขึ้นและทำให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพไม่เสถียร (Buekens, 2005) การผลิตก๊าซชีวภาพจึงลดลง ดังนั้น ชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลังสด ชุดการทดลองกากมันสำปะหลัง และชุดการทดลองการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันและกากมันสำปะหลัง (1:3) จึงมีปริมาณก๊าซชีวภาพค่อนข้างต่ำ ซึ่งถ้ามีการควบคุมค่าพีเอชตลอดช่วงการทดลองด้วยการเติม Na_2CO_3 (Cuzin et al, 1992) หรือเปลี่ยนจากการเติมสารอินทรีย์ (สับสเตรท) เพียงครั้งเดียวตลอดการทดลองเป็นการเติมสารอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง (Continuous feeding) อาจจะสามารถเพิ่มปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของทุกชุดการทดลองมีความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นสูงสุดในวันที่ 1 ของการทดลอง ส่งผลให้ค่าพีเอชลดต่ำลงอย่างรวดเร็วอยู่ในช่วง 6.1-6.7 จากการสะสมกรดไขมันในปริมาณสูง และค่าพีเอชเริ่มคงที่ในช่วงพีเอชที่เหมาะสมตั้งแต่วันที่ 3-15 ของการทดลอง ตามภาพที่ 4-18



ภาพที่ 4-18 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชตลอดช่วงเวลาการทดลอง

4.4.4 กรดไขมันระเหย ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง

กรดไขมันระเหย เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทีริก กรดโพรพิโอนิก และกรดฟอร์มิก ที่เป็นผลิตภัณฑ์สารตัวกลางที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในปฏิกิริยาอะซิโดเจเนซิส หากมีการสะสมของกรดไขมันระเหยปริมาณสูงมากจะเป็นผลเสียต่อระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างของระบบและค่าพีเอชลดลง ซึ่งค่าความเป็นด่างเป็นตัวบ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบ ถ้าค่าความเป็นด่างสูงแสดงว่าระบบบำบัดมีความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์สูง ส่งผลให้สามารถรักษาค่าพีเอชของระบบได้ดียิ่งขึ้น โดยปริมาณกรดไขมันระเหย ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่างของแต่ละชุดการทดลองมีผลการทดลองเป็นดังนี้

(1) กรดไขมันระเหย

ผลการทดลองพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยจะเพิ่มสูงขึ้นในกรณีของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการหมักร่วม กล่าวคือ ปริมาณกรดไขมันระเหยของเปลือกมันสำหรับหลังสดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 75 mg CH₃COOH/L แต่เมื่อผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 713 mg CH₃COOH/L ดังตารางที่ 14 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ (สับสเตรท) ได้มากขึ้นเกิดเป็นกรดไขมันระเหย โดยสังเกตได้จากปริมาณกรดไขมันระเหยที่เพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เพิ่มสูงขึ้นจากชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลังสตร้อยละ 31

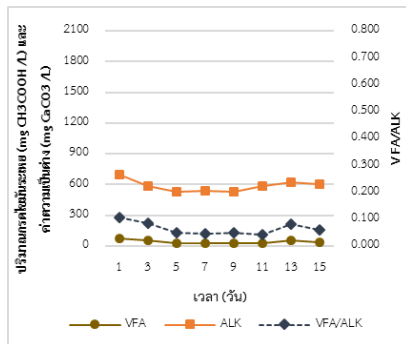
ผลการทดลองกระบวนการหมักร่วมก็แสดงให้เห็นว่าปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มสูงขึ้นกว่าชุดการทดลองสับสเตรทเพียงชนิดเดียว โดยพบว่าชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง และน้ำเสียมีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดเท่ากับ 75, 100 และ 1,175 mg CH₃COOH/L ตามลำดับ เมื่อทำการหมักร่วมได้แก่ เปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง (1:3) เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย (1:3) และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย (1:3) พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดจะเพิ่มสูงขึ้น คือ 275, 513 และ 888 mg CH₃COOH/L ตามลำดับ ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยที่เพิ่มสูงขึ้นก็สัมพันธ์กับปริมาณก๊าซชีวภาพที่มากขึ้นจากชุดการทดลองสับสเตรทเพียงชนิดเดียว เนื่องจากการหมักร่วมเป็นการเพิ่มโอกาสในการเลือกใช้สารตั้งต้น โดยจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยได้ง่ายที่สุดเป็นอันดับแรก (ปัทมวรรณ ไชยพงศ์ 2557) ตัวอย่างเช่น การหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง (1:3) จุลินทรีย์จะเลือกย่อยสลายกากมันสำปะหลังก่อนเปลือกมันสำปะหลัง ปริมาณกรดไขมันระเหยจึงเพิ่มสูงขึ้นจากการหมักสับสเตรทชนิดเดียว ทั้งนี้ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดของทุกชุดการทดลองเกิดขึ้นในวันแรกของการทดลอง เป็นแนวโน้มเดียวกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสูงสุดในวันแรกของการทดลองเช่นเดียวกัน จากนั้นปริมาณกรดไขมันระเหยจะลดต่ำลงจนคงที่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก ดังภาพที่ 4-19 โดยมาตรฐานของปริมาณกรดไขมันระเหยในการควบคุมการผลิตก๊าซชีวภาพคือไม่เกิน 2,000 mg CH₃COOH/L (Yadvika et al, 2004) หากปริมาณของกรดไขมันระเหยสูงจนเกินไปจะส่งผลให้กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพถูกยับยั้งได้ (Al Seadi et al, 2008)

(2) ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง

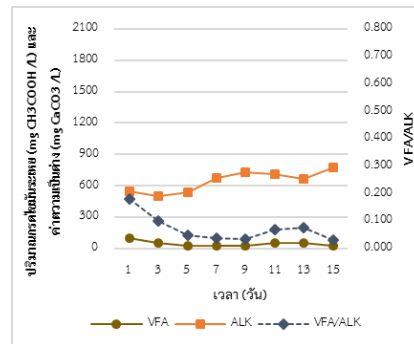
ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของระบบ โดยในชุดการทดลองที่มีการควบคุมค่าพีเอชตลอดการทดลองให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามหัวข้อที่ 4.4.3 จะมีค่าความเป็นด่างสูงขึ้นด้วยเช่นกันในชุดการทดลองน้ำเสีย (1,500-2,075 mg CaCO₃/L) เปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 (938-1,500 mg CaCO₃/L) ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย (1,738-1,925 mg CaCO₃/L) และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย (1,550-1,850 mg CaCO₃/L) ดังตารางที่ 4-3 เนื่องมาจากกิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบ

กรดคาร์บอนและไบคาร์บอเนต ส่งผลให้มีค่าสภาพต่างเพิ่มสูงขึ้น (นฤมล บุญส่ง, 2558) ดังนั้น ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดการทดลองดังกล่าวจึงมีปริมาณค่อนข้างสูง โดยค่าความเป็นต่างที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพควรอยู่ในช่วง 2,500-5,000 mg CaCO₃/L (Romano and Zhang, 2008) และไม่ควรต่ำกว่า 1,000 mg CaCO₃/L (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

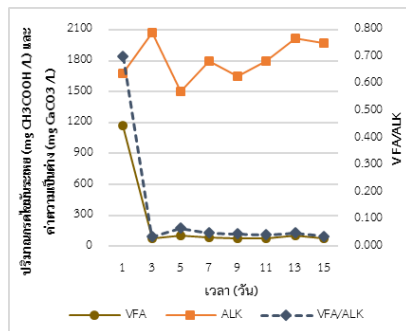
อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อความเป็นต่างเป็นการบอกถึงเสถียรภาพและความเหมาะสมของสภาวะในการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้ทราบถึงความสามารถในการรักษาค่าพีเอช (Buffering capacity) ภายในระบบ (นฤมล บุญส่ง, 2558) ซึ่งอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นต่างที่เหมาะสมควรมีค่าไม่เกิน 0.4 (ปัทมวรรณ ไชยพงศ์ 2557) แสดงว่าระบบมีความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้ดี ถ้าหากอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นต่างมีค่ามากกว่า 0.8 ระบบจะมีความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้ต่ำมาก ค่าพีเอชอาจจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) อย่างไรก็ตาม จากการทดลองยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าชุดการทดลองใดมีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อความเป็นต่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นการทดลองที่มีการเติมสับเสตรท (สารอินทรีย์) เพียงครั้งเดียวตลอดการทดลองเท่านั้น



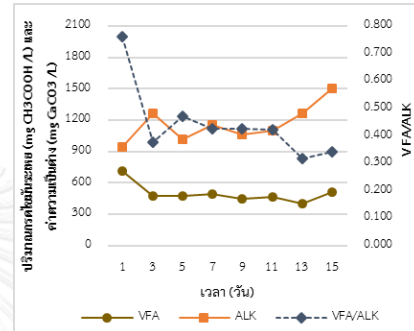
ก) ชุดการทดลองเปลี่ยนไขมันสำหรับหลังสด



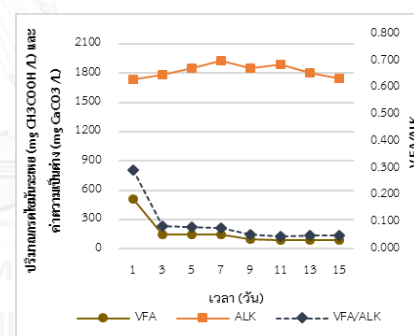
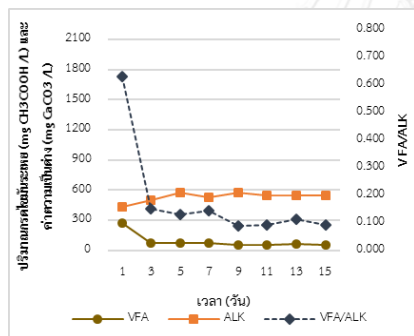
ข) ชุดการทดลองกากมันสำหรับหลังสด



ค) ชุดการทดลองน้ำเสีย

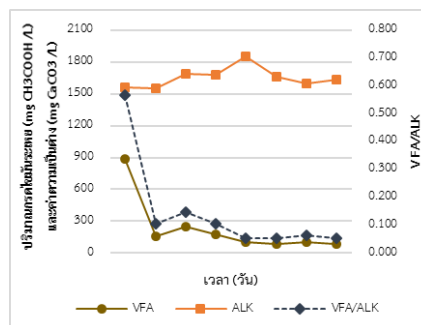


ง) ชุดการทดลองเปลี่ยนไขมันปรับสภาพด้วย NaOH 3%



จ) ชุดการทดลองหมักร่วมเปลี่ยนมันกับกากมัน (1:3)

ฉ) ชุดการทดลองหมักร่วมเปลี่ยนมันกับน้ำเสีย (1:3)



ช) ชุดการทดลองหมักร่วมกากมันกับน้ำเสีย (1:3)

ภาพที่ 4-19 ปริมาณกรดไขมันระเหย (VFA) ค่าความเป็นด่าง (ALK) และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/ALK) ในแต่ละชุดการทดลอง

ตารางที่ 4-3 ปริมาณกรดไขมันระเหย ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่างในแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	กรดไขมันระเหย (VFA) (mg CH ₃ COOH/L)	ค่าความเป็นด่าง (ALK) (mg CaCO ₃ /L)	อัตราส่วนกรดไขมันระเหย ต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/ALK)
เปลือกมันสำปะหลังสด	25 – 75	525 – 700	0.043 – 0.107
กากมันสำปะหลัง	25 – 100	500 – 775	0.032 – 0.182
น้ำเสีย	75 – 1,175	1,500 – 2,075	0.036 – 0.701
เปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 3%)	400 – 713	938 – 1,500	0.317 – 0.760
เปลือกมัน : กากมัน (1:3)	50 – 275	438 – 575	0.087 – 0.629
เปลือกมัน : น้ำเสีย (1:3)	88 – 513	1,738 – 1,925	0.046 – 0.295
กากมัน : น้ำเสีย (1:3)	88 – 888	1,550 – 1,850	0.053 – 0.568

4.5 การเปรียบเทียบผลการวิจัยกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลการทดลองพบว่าเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ 0.400 m³/kg VS added ซึ่งเพิ่มขึ้นจากการหมักเปลือกมันสำปะหลังสดที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.306 m³/kg VS added โดยคิดเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพียงร้อยละ 31 นอกจากการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอีกวิธีการหนึ่งคือ การหมักร่วม พบว่าการหมักร่วมของเสียจากระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลังและน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน โดยการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย อัตราส่วน 1:3 ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.472, 0.525 และ 0.589 m³/kg VS added ตามลำดับ ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ยังต่ำกว่าการหมักน้ำเสียและกากมันสำปะหลังแบบเดี่ยวๆ จากงานวิจัยนี้จึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการหมักร่วมยังไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังได้ แต่จากการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่ใกล้เคียงกันพบว่าผลของปริมาณก๊าซชีวภาพอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ดังตารางที่ 4-4 และ 4-5

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของ Ofoefule et al. (2010) ที่ทำการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังกับ Potash และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากถึงร้อยละ 81 และร้อยละ 62 ตามลำดับ นอกจากนี้ กากมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนและสารละลายกรด (H_2SO_4) ก็สามารถเพิ่มปริมาณมีเทนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพได้ (Zhang et al, 2011) ในส่วนของการหมักร่วมพบว่าการหมักร่วมเปลือกมันสำปะหลังร่วมกับมูลสัตว์ต่างๆ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซชีวภาพที่ได้จากเปลือกมันสำปะหลังสดเพียงอย่างเดียว แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพยังไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับงานวิจัยนี้ โดย Adelekan and Bamgboye (2009) พบว่าเปลือกมันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษามีอัตราส่วน C/N สูง การหมักร่วมกับมูลสัตว์ที่มีอัตราส่วน C/N ต่ำและย่อยสลายได้ง่ายกว่า จึงส่งผลให้เกิดสมดุลอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จึงเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4-4 การเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment) และการหมักร่วม (Co-digestion) ของการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ

งานวิจัย	สารตั้งต้น	สถานะที่ใช้ในการหมัก	ปริมาณก๊าซชีวภาพ	
			ปริมาณก๊าซเฉลี่ย	ปริมาณมีเทน
Cuzin et al. (1992)	เปลือกมันสำปะหลังสด	ถังหมักชนิด Transpaille เป็นเวลา 600 วัน	0.661 m ³ /kg VS (661 L/kg VS)	-
Ofoefule et al. (2010)	เปลือกมันสำปะหลังสด	ถังหมัก ปริมาณ 50 L ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ ในช่วง 25-37°C เป็นเวลา 30 วัน	68.7 L/Total mass of slurry	-
	เปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพด้วย Potash ความเข้มข้น 50% w/v		124.1 L/Total mass of slurry	-
	เปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพด้วย KOH ความเข้มข้น 50% w/v		111.3 L/Total mass of slurry	-
Zhang et al. (2011)	กากมันสำปะหลัง	ขวดเซรัม ปริมาตรการทำงาน 150 mL โดยหมักแบบเดิมครั้งเดียว (Batch) เป็นเวลา 14 วัน	-	158 mL/g VS หรือ L/kg VS
	กากมันสำปะหลังปรับสภาพด้วยความร้อนอุณหภูมิ 157.84°C และ H_2SO_4 ความเข้มข้น 2.99% เป็นเวลา 20.15 นาที		-	248 mL/g VS หรือ L/kg VS
Adelekan and Bamgboye (2009)	เปลือกมันสำปะหลังสด	ถังหมักปริมาตร 220 L โดยหมักแบบเดิมครั้งเดียว (Batch) เป็นเวลา 30 วัน	0.6 L/kg TS	-
	หมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับ มูลไก่ อัตราส่วน 1:1		13.7 L/kg TS	-
	หมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับ มูลสุกร อัตราส่วน 1:1		35.0 L/kg TS	-
	หมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับ มูลวัว อัตราส่วน 1:1		21.3 L/kg TS	-

ตารางที่ 4-5 การเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment) และการหมักร่วม (Co-digestion) ของการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ (ต่อ)

งานวิจัย	สารตั้งต้น	สภาวะที่ใช้ในการหมัก	ปริมาณก๊าซชีวภาพ	
			ปริมาณก๊าซเฉลี่ย	ปริมาณมีเทน
วรพจน์ คำจันลา (2555)	หมักร่วมระหว่างกากตะกอนปอกผักน้ำเสียน้ำเสียน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมัน อัตราส่วน 1:4	ถังหมักปริมาตรการทำงาน 10 L โดยการหมักระบบกึ่งต่อเนื่อง และแบบเติมครั้งเดียว เป็นเวลา 24 วัน	10.3 L/kg VS	ร้อยละ 58.49
Panichnumsin et al. (2010)	เปลือกมันสำปะหลังสด	หมักด้วยระบบ Semi-CSTR ปริมาตรการทำงาน 3 L ควบคุมอุณหภูมิให้ประมาณ 37°C เป็นเวลา 15 วัน	-	344 L/kg VS
	หมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับมูลสุกร อัตราส่วน 20% : 80%		-	391 L/kg VS
Nkodi et al. (2016)	เปลือกมันสำปะหลังสด	ขวดเซิร์มปริมาตรการทำงาน 750 mL โดยหมักแบบเติมครั้งเดียว (Batch) เป็นเวลา 14 วัน	49.19 L/kg TS	-
	หมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับยูเรีย (Urea) ความเข้มข้น 0.01%		80.79 L/kg TS	-
Jekayinfa and Scholz (2013)	เปลือกมันสำปะหลังสด	ถังหมักปริมาตรการทำงาน 2 L โดยหมักแบบเติมครั้งเดียว ควบคุมอุณหภูมิให้ประมาณ 37°C เป็นเวลา 30 วัน	0.66 m ³ /kg VS	0.28 m ³ /kg VS
งานวิจัยนี้	เปลือกมันสำปะหลังสด	ขวดเซิร์มปริมาตรการทำงาน 80 mL โดยหมักแบบเติมครั้งเดียว (Batch) เป็นเวลา 15 วัน	0.306 m ³ /kg VS (306 L/kg VS)	-
	กากมันสำปะหลัง		0.555 m ³ /kg VS (555 L/kg VS)	-
	น้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมัน		0.601 m ³ /kg VS (601 L/kg VS)	-
	เปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง		0.400 m ³ /kg VS (400 L/kg VS)	-
	หมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง อัตราส่วน 1:3		0.472 m ³ /kg VS (472 L/kg VS)	-
	หมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับน้ำเสียน้ำเสีย อัตราส่วน 1:3		0.525 m ³ /kg VS (525 L/kg VS)	-
	หมักร่วมระหว่างกากมันกับน้ำเสียน้ำเสีย อัตราส่วน 1:3		0.589 m ³ /kg VS (589 L/kg VS)	-

หมายเหตุ (-) หมายถึง ไม่ได้ทำการทดลอง

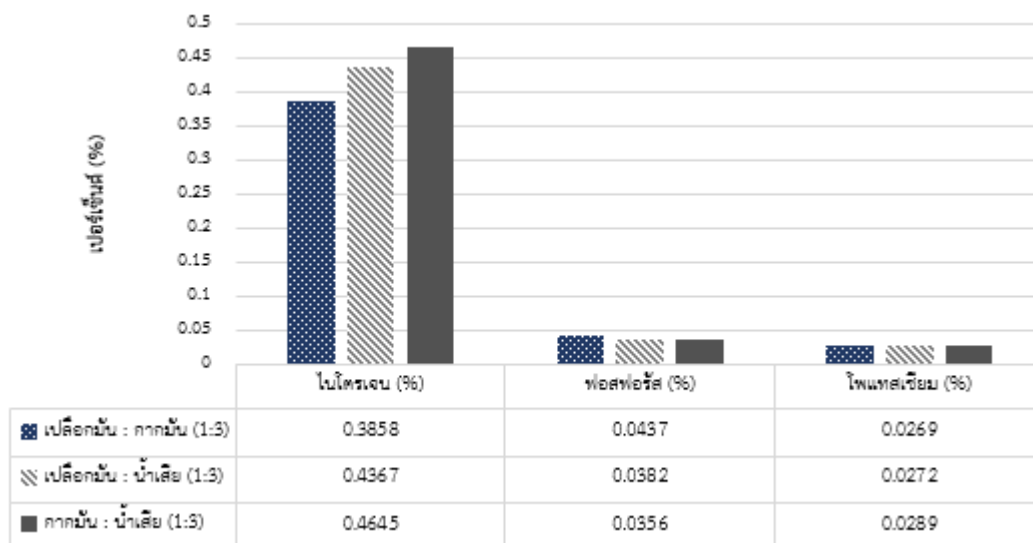
4.6 ผลการศึกษาคุณสมบัติของตะกอนสลัดจ์ภายหลังการหมัก

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้คัดเลือกชุดการทดลองกระบวนการหมักร่วมเพื่อศึกษาคุณสมบัติตะกอนสลัดจ์ที่เป็นผลพลอยได้ภายหลังการหมัก เนื่องจากกระบวนการหมักร่วมจะช่วยในการสร้างสมดุลของสารอาหารพร้อมทั้งเพิ่มค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน จึงเหมาะสมที่จะศึกษาคุณสมบัติการเป็นปุ๋ยชีวภาพของตะกอนสลัดจ์ โดยลักษณะของตะกอนสลัดจ์ที่ได้จากชุดการทดลองกระบวนการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง (1:3), เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย (1:3) และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย (1:3) มีสีดำคล้ำหรือดำปนน้ำตาลซึ่งเป็นลักษณะที่ดีของปุ๋ยหมักชีวภาพ โดยจากผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P_2O_5) และโพแทสเซียม (K_2O) พบว่าชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย (1:3) มีปริมาณไนโตรเจนและโพแทสเซียมสูงที่สุด คือ 4,645 และ 289 mg/kg by wet weight ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง (1:3) มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงที่สุดเท่ากับ 437 mg/kg by wet weight ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (mg/kg by wet weight) ของตะกอนสลัดจ์ภายหลังการหมักของชุดการทดลองหมักร่วม อัตราส่วน 1:3

ชุดการทดลอง	ไนโตรเจน (mg/kg by wet weight)	ฟอสฟอรัส (mg/kg by wet weight)	โพแทสเซียม (mg/kg by wet weight)
เปลือกมัน : กากมัน (1:3)	3,858	437	269
เปลือกมัน : น้ำเสีย (1:3)	4,367	382	272
กากมัน : น้ำเสีย (1:3)	4,645	356	289
ค่ามาตรฐานปุ๋ยหมัก (เกรด 1)	10,000	5,000	5,000

ตามมาตรฐานปุ๋ยหมัก (เกรด 1) ของกรมพัฒนาที่ดินระบุว่า ปริมาณไนโตรเจน (Total N) ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.00 ของน้ำหนัก ฟอสฟอรัส (Total P_2O_5) และโพแทสเซียม (Total K_2O) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.50 ของน้ำหนัก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2550) โดยผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ของทั้ง 3 ชุดการทดลองอยู่ในช่วงร้อยละ 0.3858-4.645, ร้อยละ 0.0356-0.0437 และร้อยละ 0.0269-0.0289 ตามลำดับ ตามภาพที่ 4-20 ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานปุ๋ยหมัก ดังนั้นหากจะนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นปุ๋ยหมักจึงควรมีการเติมธาตุอาหารเพิ่มเติมเพื่อให้ได้มาตรฐานตามที่กำหนด



ภาพที่ 4-20 ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (%) ของตะกอนสลัดจ์ภายหลังการหมัก



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

อุตสาหกรรมแป่งมันสำปะหลังถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพอย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากโรงงานแป่งมันสำปะหลังคิดเป็นร้อยละ 16.67 (170 Ktoe) เมื่อเทียบกับชีวมวลแหล่งต่างๆ (ประทีน กุลละวณิช และคณะ, 2550) นอกจากนี้แล้วอุตสาหกรรมแป่งมันสำปะหลังยังมีของเสียที่เกิดจากกระบวนการ ได้แก่ เปลือกมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังที่มีปริมาณมากในแต่ละวัน โดยมีปริมาณ 1 และ 330 ตันต่อวัน (บริษัท ชลเจริญ จำกัด) ตามลำดับ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและกากมันสำปะหลัง พร้อมทั้งศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ โดยผลการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) ผลการปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

เปลือกมันสำปะหลังมีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 22.22 จากน้ำหนักสด มีค่าของแข็งระเหยร้อยละ 95.60 มีปริมาณเซลลูโลสเท่ากับร้อยละ 22.70 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 19.85 และลิกนินร้อยละ 14.37 ซึ่งถือว่ามีปริมาณค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพอื่นๆ ตัวอย่างเช่น ของเสียจากมูลสัตว์ (มูลสุกร มูลวัว มูลกระบือ) มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 1.6-4.7 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 1.4-3.3 และลิกนินร้อยละ 2.7-5.7 (สุขใจ ชูจันทร์, 2554) ดังนั้นจึงทำการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเพิ่มปริมาณการละลายของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

การปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 สามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ $0.400 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ เมื่อเปรียบเทียบกับกากเปลือกมันสำปะหลังสดที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ $0.306 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ โดยคิดเป็นปริมาณการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพียงร้อยละ 31 ซึ่งถือว่ายังไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เพิ่มสูงขึ้นอาจเนื่องมาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดการแยกตัวกันของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสกับสารอื่นๆ โครงสร้างผนังเซลล์บวมเพิ่มพื้นที่ผิวและลด

ระดับการโพลีเมอร์ไรเซชัน เป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Zheng และคณะ, 2014) จึงส่งผลให้ปริมาณซีโอดีและซีโอดีละลายเริ่มต้นของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อีกด้วย ซึ่งการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ส่งผลให้มีปริมาณซีโอดีและซีโอดีละลายสูงที่สุดคือ ปริมาณซีโอดี 15,200 mg/L และปริมาณซีโอดีละลาย 3,680 mg/L ในขณะที่เปลือกมันสำปะหลังสดมีปริมาณซีโอดีเพียง 8,000 mg/L และปริมาณซีโอดีละลาย 240 mg/L

2) ผลจากกระบวนการหมักร่วมระหว่างของเสียจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการหมักร่วมเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่คาดว่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและกากมันสำปะหลัง จากการทดลองทำการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ผลการทดลองเป็นดังนี้

- การหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง พบว่าที่อัตราส่วน 1:3 สามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ $0.472 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ ในขณะที่การหมักเปลือกมันสำปะหลังสดและกากมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.306 และ $0.555 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ ตามลำดับ ดังนั้น การหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลังจึงไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักกากมันสำปะหลังแบบเดี่ยวๆ มีปริมาณสูงกว่าการหมักร่วม

- การหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสีย พบว่าที่อัตราส่วน 1:3 สามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ $0.525 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ ในขณะที่การหมักเปลือกมันสำปะหลังสดและน้ำเสียเพียงอย่างเดียวให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.306 และ $0.601 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ ตามลำดับ ดังนั้น การหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสียจึงไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักน้ำเสียแบบเดี่ยวๆ มีปริมาณสูงกว่าการหมักร่วม

- การหมักร่วมระหว่างกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย พบว่าที่อัตราส่วน 1:3 สามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ $0.525 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$ แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการหมักร่วมสำหรับสับสเตรททั้งสองชนิดไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างชัดเจน เนื่องจากทั้งกากมันสำปะหลังและน้ำเสียให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.555

และ 0.601 m³/kg VS added ตามลำดับ นอกจากนี้ ปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักน้ำเสียและกากมันสำปะหลังแบบเดี่ยวๆ ยังมีปริมาณสูงกว่าการหมักร่วม

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแสดงให้เห็นว่า ปริมาณซีโอดีละลายของทุกชุดการทดลองจะสูงมากในวันแรกของการทดลอง และลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 3 วันแรก จากนั้นเริ่มคงที่หลังวันที่ 5 จนถึงวันสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณกรดไขมันระเหย (VFA) ที่สูงที่สุดในวันแรกของการทดลองเช่นเดียวกัน หลังจากนั้นจะลดลงจนเริ่มคงที่หลังจากวันที่ 3 ของการทดลอง ส่งผลให้ค่าพีเอชลดลงอย่างรวดเร็วในวันแรก จากพีเอชเริ่มต้นประมาณ 7.9-8.0 เหลือประมาณพีเอช 6.5 เนื่องจากสารอินทรีย์ในระบบถูกย่อยสลายเป็นกรดไขมันระเหย (VFA) ส่งผลให้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดในวันแรกของการทดลอง

การปรับสภาพเบื้องต้นเปลือกมันสำปะหลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 และการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังกับกากมันสำปะหลัง เปลือกมันสำปะหลังกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน และกากมันสำปะหลังกับน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าการหมักกากมันเดี่ยวๆ มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ใกล้เคียงกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังจึงไม่จำเป็นต้องหมักร่วมกับน้ำเสีย สามารถแยกผลิตโดยการหมักเดี่ยวได้เลย ไม่ต้องไปรบกวนระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่มีอยู่เดิม ส่วนการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังจะลดลงตามปริมาณเปลือกมันที่ผสมลงไป อย่างไรก็ตาม ภาวะการเกิดกากของเสียในอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน ในแต่ละวันจะผลิตกากมันสำปะหลัง 330 ตัน ขณะที่มีเปลือกมันสำปะหลังเพียงวันละประมาณ 1 ตัน (ซึ่งไม่ถึง 1%) จึงสามารถผสมลงในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การผลิตก๊าซชีวภาพเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการใช้ประโยชน์จากเปลือกและกากมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังได้นอกจากเหนือจากการขายเป็นอาหารสัตว์ที่มีปริมาณความต้องการจำกัด นอกจากนี้ยังเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของพลังงานทดแทนประเภทก๊าซชีวภาพจากของเสีย (Biogas from waste) เพื่อตอบสนองแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015)

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเบื้องต้นด้วยวิธีการบีเอ็มพี จึงควรทำการทดลองขยายผลระดับนำร่อง (Pilot scale) ต่อไป เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดจริงมากที่สุด

5.2.2 วิธีการในการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยกระบอกฉีดยาพลาสติก (Syringe) อาจจะไม่แม่นยำ เนื่องจากความผิดของก้านกระบอกฉีดยาพลาสติกแต่ละขนาดมีความแตกต่างกัน รวมทั้งความดันของก๊าซจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาตร ส่งผลให้ปริมาณก๊าซที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้องเท่าที่ควร จึงควรใช้ขวดบีเอ็มพีขนาดใหญ่ขึ้นและใช้วิธีการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยระบบแทนที่น้ำเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้น



รายการอ้างอิง

- ปัทมวรรณ ไชยพงศ์ (2557). การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโกระถินโดยการปรับสภาพขั้นต้นด้วยต่างและการหมักร่วมด้วยชีวมวล. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553). คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิต การควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. 500 เล่ม, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : กรมโรงงานอุตสาหกรรม.
- ชุติมา สนั่นศรีสาคร (2555). ผลของการบำบัดขั้นต้นต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัชพืช. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- ชัชพันธ์ นินาสวงษ์ และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย (2555). การผลิตเซลล์ลูไลซิกเอทานอลในประเทศไทย. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 40(4): 1073-1088.
- สมยศ เนตรสงคราม (2557). ผลของอัตราส่วนน้ำเสียต่อกากมันสำปะหลังและการควบคุมความเร็วรอบการกวนที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ. สาขาวิศวกรรมพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- ชนกพร วงษ์วัน (2555). การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล. สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต.
- พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, สำนักวิจัย คำนวณพลังงาน. 2549. หลักสูตรเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมและมูลสัตว์. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- นฤมล บุญส่ง (2558). การผลิตก๊าซชีวภาพและปุ๋ยชีวภาพจากการหมักร่วมกันของเศษผลไม้และเศษอาหาร. สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต.
- เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. กรมพัฒนาที่ดิน (2550). มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูง) ของกรมพัฒนาที่ดิน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www1.ldd.go.th/ldd/Fertilizer/Organic_Fertilizer.pdf [14 พฤษภาคม 2560].

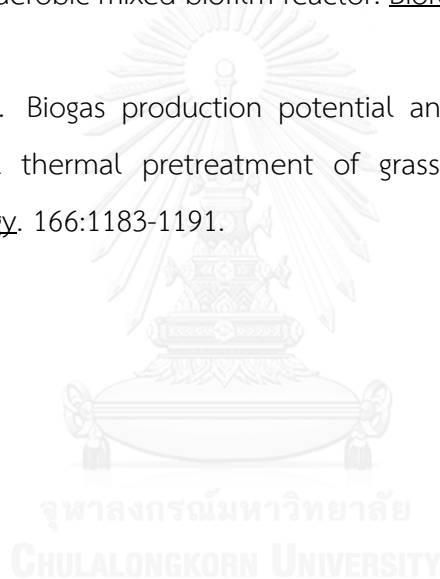
- ธีรวัฒน์ สิทธิพล (2557). การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ. สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- วิชชุดา ตุ่มทอง (2559). การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกากอุตสาหกรรมจากโรงงานผลิตเครื่องดื่มและโรงงานผลิตปุ๋ยอินทรีย์. สาขาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต.
- วรพจน์ คำจันทา (2555). การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนบ่อพักน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมัน. สาขาวิศวกรรมพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- ประทีน กุลละวณิช และคณะ. 2550. ภาพรวมเชิงสถานภาพและศักยภาพของเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในประเทศไทย. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับพิเศษ. ปีที่ 30 ฉบับที่ 4 (ตุลาคม – ธันวาคม): 693-700.
- สุขใจ ชูจันทร์ (2554). การผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้มูลชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มานิช ผดุงเวียง (2557). การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษเปลือกมันสำปะหลังโดยกระบวนการหมักไร้อากาศสองขั้นตอนแบบตรึงฟิล์มชีวภาพร่วมกับวิธีการวนน้ำหมัก. สาขาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2559). สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม-พฤษภาคม 2559. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/download/state_59/frontpagejan_may59.pdf [14 สิงหาคม 2559].
- เสวียน เปรมประสิทธิ์ (2544). การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้จากโรงงานแป้งมันสำปะหลังเพื่อผลิตปุ๋ยน้ำชีวภาพ. รายงานการวิจัย สาขาวิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- กัลยา อยู่นาน (2546). การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำตาลจากเปลือกและกากมันสำปะหลัง. สาขาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต.
- รัชพล พะวงศรีรัตน์ (2558). ศักยภาพและการใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิโกลินเซลลูโลสเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ. วารสารวิชาการปทุมวัน. ปีที่ 5 ฉบับที่ 14 (กันยายน – ธันวาคม): 67-78.

- ณัฐริชา มะโน (2548). ศักยภาพการใช้แก๊สชีวภาพจากโรงงานแป่งมันสำปะหลังในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม. สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- ธีรพล วัฒนโกศล (2548). ฐานข้อมูลระบบผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานแป่งมันสำปะหลัง. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- พงษ์พันธ์ พรหมพิพัตต์ (2555). การผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กากมันสำปะหลังจากกระบวนการผลิตแป่งมัน. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- ธัชกร ผลพันธิน (2555). การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียภาคอุตสาหกรรม. สาขาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต.
- มาศยา โชคสงวน (2553). ผลของการบำบัดเบื้องต้นด้วยกรดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- สุรีย์วัลย์ สิทธิจันดา (2557). การผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักย่อยร่วมของหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานฆ่าสัตว์. รายงานการวิจัย สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี.
- เกษตรและสหกรณ์การเกษตร, กระทรวง. สำนักงานเศรษฐกิจเกษตร (2559). สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2558 (Agricultural statistics of Thailand 2015). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ.
- กลุ่มอนุรักษ์ดินและน้ำ สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน (2545). มันสำปะหลัง. เอกสารวิชาการ ฉบับที่ 1001-Do 46.01.
- ละอองแก้ว เบญจประยูรศักดิ์ (2554). การลดต้นทุนการผลิตแป่งมันสำปะหลังของบริษัท สยามโปรดักส์ (1994) จำกัด กรณีศึกษาสาขาภาพสินธุ์. สาขาวิชาบริหารธุรกิจ วิทยาลัยบัณฑิตศึกษากิจการ การจัดการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ประกาศ เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์เฉพาะในการตรวจสอบเพื่อการอนุญาตสำหรับผลิตภัณฑ์แป่งมันสำปะหลัง มาตรฐานเลขที่ มอก. 274-2521. [ประกาศ ณ วันที่ 13 พฤศจิกายน 2556]

- วรินญา จารุทรศน์พิมล (2551). การลงทุนผลิตไฟฟ้าจากของเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง ในจังหวัดระยอง. สาขาวิชาธุรกิจการเกษตร ภาควิชาเศรษฐศาสตร์เกษตรและทรัพยากร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ศิลปศาสตรมหาบัณฑิต.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม (2559). คู่มือการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการใช้พลังงานสำหรับอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง. กรุงเทพฯ : กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม.
- ติรณันท์ เอกสมทราเมษฐ์ (2551). การใช้ประโยชน์จากเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอล. สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต.
- วิภา ประพินอักษร (2550). การใช้ประโยชน์จากเปลือกมันสำปะหลังเพื่อเป็นวัสดุเพาะเห็ดนางฟ้าฮังการีและนางฟ้าภูฐาน. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการประจำปี 2550, 29-30 พฤษภาคม 2550 ณ ศูนย์การศึกษาและฝึกอบรมนานาชาติ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่.
- ภาณุพันธ์ ศรีสมบูรณ์ (2557). การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบตรึงฟิล์มชีวภาพ. สาขาวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- กนิษฐา วิมลรัตน์ (2552). การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษกล่องขาวเคลือบมัน. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.
- Shefali Verma (2002). Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University. Degree in Earth Resources Engineering.
- Zheng, Y., et al. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. Progress in energy and combustion science. 42(2014): 35-53.
- Ofoefule, A.U., Eme, E.L., Uzodinma, E.O., and Ibeto, C.N. (2010). Comparative study of the chemical treatments on cassava (*Manihot utilisima*) peels for biogas production. Scientific Research and Essays. 5(24): 3808-3813.

- Zhang, Q., Tang, L., Zhang, J., Mao, Z., and Jiang, L. (2011). Optimization of thermal-dilute sulfuric acid pretreatment for enhancement of methane production from cassava residues. Bioresource Technology. 102(2011): 3958-3965.
- Adelekan, B.A., and Bamgboye, A.I. (2009). Comparison of biogas productivity of cassava peels mixed in selected ratios with major livestock waste types. African Journal of Agricultural Research. 4(7): 571-577.
- Nkodi, T.M., Taba, K.M., Kayembe, S., Mulaji, C., and Mihigo, S. (2016). Biogas production by co-digestion of cassava peels with urea. International Journal of Scientific Engineering and Technology. 5(3): 139-141.
- Balat, M., and Balat, H. (2009). Biogas as a Renewable Energy source – A Review. Energy sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 31: 1280-1293.
- Taherzadeh, M.J., and Karimi, K. (2008). Pretreatment of Lignocellulose Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. International Journal of Molecular Sciences. 9: 1621-1651.
- Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, Antonio., and Pirozzi, F. (2012). Bio-methane potential to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates. The Open Environmental Engineering Journal. 5:1-8.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). Save and Grow: Cassava, A guide to sustainable production intensification. Rome.
- Ofoefule, A.U., and Uzodinma, E.O. (2009). Biogas production from blends of cassava (*Manihot utilissima*) peels with some animal wastes. International Journal of Physical Sciences. 4(7): 398-402.
- Cu, T.T.T., et al. (2015). Biogas production from Vietnamese animal manure, plant residues and organic waste: influence of biomass composition on methane yield. Asian-Australasian Journal of Animal Science. 28(2): 280-289.
- Yadvika., Santosh., Sreekrishnan, T.R., Kohli, S., and Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques-a review. Bioresource Technology. 95(2004): 1-10.

- Buekens, A. (2005). Energy recovery from residual waste by means of anaerobic digestion technologies. *Conference "The Future of Residual Waste Management in Europe,"* Luxemburg, November 17-18.
- l Seadi, T., et al. (2008). *Biogas handbook*. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg.
- Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B., and Chaiprasert, P. (2010). Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. *Biomass and Bioenergy*. 34(2010): 1117-1124.
- Romano, R.T., and Zhang, R. (2008). Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using and anaerobic mixed biofilm reactor. *Bioresource Technology*. 99(2008): 631-637.
- Li, L., et al. (2012). Biogas production potential and kinetics of microwave and conventional thermal pretreatment of grass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 166:1183-1191.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- 2) กระจกบอกตวง (Measuring cylinder) ขนาด 10 mL
- 3) ปีกเกอร์ ขนาด 50 mL
- 4) เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 g
- 5) แท่งแก้วคนสาร

วิธีการวิเคราะห์

- 1) ชั่งตัวอย่าง 5 g ใส่ในปีกเกอร์
- 2) เติมน้ำกลั่นลงไป 25 mL ทำให้ได้สัดส่วนของตัวอย่างต่อน้ำเท่ากับ 1:5
- 3) คนตัวอย่างประมาณ 1 นาทีหลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนประมาณ 30 นาที จึงวัดค่าความเป็นกรด-ด่างส่วนที่เป็นน้ำใส

2. การวิเคราะห์หาค่าความชื้น (Moisture Content) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid: TS) และปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solid: VS)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ตู้อบ (Hot air oven)
- 2) เตาเผา (Muffle Furnace)
- 3) ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
- 4) เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 g
- 5) โถดูดความชื้น (Desiccator)

วิธีการวิเคราะห์

- 1) อบถ้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น นำไปชั่งและจดน้ำหนักที่ได้ (A)

- 2) นำตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ใส่ในถ้วยกระเบื้อง นำไปชั่งและจดน้ำหนักที่ได้ (B) จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างแห้งสนิท คือน้ำหนักตัวอย่างคงที่ ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น นำตัวอย่างไปชั่งและจดน้ำหนักที่ได้ (C)
- 3) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 2. (C) ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 ± 50 องศาเซลเซียส ประมาณ 3 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างไปใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำไปชั่งและจดน้ำหนักที่ได้ (D) และคำนวณหาค่าต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ความชื้น (MC), \% ฐานเปียก} = \frac{(B - A) - (C - A)}{(B - A)} \times 100$$

$$\text{ของแข็งทั้งหมด (TS), \%} = \frac{(C - A)}{(B - A)} \times 100$$

$$\text{ของแข็งระเหยได้ (VS), \%} = \frac{(D - A)}{(B - A)} \times 100 \quad \text{หรือ} \quad \text{VS, \% as TS} = \frac{(D - A)}{(C - A)} \times 100$$

3. การวิเคราะห์หาค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย (Digestion vessel)
- 2) เตาหลอม (Heater block)
- 3) ตู้อบ (Hot air oven)
- 4) บิวเรต
- 5) ขวดรูปกรวยขนาด 125 mL

การเตรียมสารเคมี

- 1) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (Standard potassium dichromate solution, $K_2Cr_2O_7$) ความเข้มข้น 0.1 N ได้จากการละลายโพแทสเซียมไดโครเมตซึ่งอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสหนัก 4.913 g เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในน้ำกลั่น 500 mL จากนั้นเติมกรดกำมะถันเข้มข้น 167 mL และปรอทซัลเฟต 33.3 g คนให้ละลายปล่อยให้ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น $1,000$ mL

- 2) สารละลายกรดซัลฟิวริก ได้จากการละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 8.8 g ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 L ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลายได้ทั้งหมดก่อนนำไปใช้
- 3) เพอโรอินอินดิเคเตอร์ ได้จากการละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous sulfate, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 695 mg และ 1,10-ฟีแนนโทรีนโมโนไฮเดรต (1,10-phenanthroline monohydrate, $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\text{H}_2\text{O}$) 1.485 g ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 100 mL
- 4) สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Standard ferrous ammonium sulfate, FAS) ความเข้มข้น 0.5 N ได้จากการละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 19.6 g ในน้ำกลั่นประมาณ 500 mL เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 mL คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1,000 mL

วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย FAS

สารละลาย FAS ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่น่ามาใช้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.1 N ปริมาตร 5.0 mL ใส่ขวดรูปกรวย เติมน้ำกลั่น 50 mL แล้วจึงค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 mL ปลดปล่อยทิ้งให้เย็น
- 2) เติมเพอโรอินอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS จนได้สีน้ำตาลเป็นจุดยุติ ความเข้มข้นของ FAS สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\text{ความเข้มข้นของ FAS, (N)} = (5.0 \times 0.1) / \text{FAS ที่ใช้, (mL)}$$

วิธีการวิเคราะห์ค่าซีโอดี

การเลือกขนาดของหลอดย่อยสลายสำหรับช่วงค่าซีโอดีให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ค่าซีโอดี โดยถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีโอดีต่ำควรเลือกใช้หลอดแก้วขนาด 25 x 150 mL (ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 10 mL) ถ้าซีโอดีค่อนข้างสูงสามารถใช้หลอดแก้วขนาด 16 x 100 mL (ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 5 mL) และถ้าซีโอดีสูงสามารถใช้หลอดแก้วขนาด 16 x 100 mL (ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 2.5 mL) หรือใช้หลอดขนาด 25 x 150 mL สำหรับซีโอดีที่มีค่าต่ำและขนาด 20 x 150 mL สำหรับซีโอดีที่มีค่าสูง หากตัวอย่างมีค่าสูงมากควรเจือจางตัวอย่างน้ำก่อนทำการทดลอง

การเลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นเดียวกัน โดยถ้าเป็นน้ำสะอาด น้ำธรรมชาติ หรือน้ำที่มีค่าซีโอดีต่ำๆ (มากกว่า 40 mg/L) ควรใช้ตัวอย่างน้ำ 10 mL โดยใช้หลอดขนาด 25 x 150 mL แต่ถ้ามีค่าซีโอดีสูงกว่านั้นให้ใช้หลอดแก้วขนาด 20 x 150 mL โดยเลือกใช้ตัวอย่างน้ำมากที่สุด 5 mL หรือใช้น้อยกว่า แล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 5 mL ควรประมาณค่าซีโอดีของตัวอย่างน้ำคร่าวๆ ก่อน

เพื่อที่จะเลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม การประมาณค่าซีโอดีสามารถทำได้โดยพิจารณาจากลักษณะตัวอย่างน้ำ แหล่งที่มาของน้ำ และจากค่า Rapid COD การเลือกขนาดตัวอย่างน้ำที่จะใช้วิเคราะห์ให้เหมาะสมอาจเทียบได้จากตารางที่ ก-1 โดยในทางปฏิบัติควรเลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำให้ผลต่างของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรต blank และตัวอย่างน้ำอยู่ระหว่าง 1-5 mL

ตารางที่ ก-1 ขนาดตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสม* (มาโนช ผดุงเวียง, 2557)

ช่วงซีโอดี	ขนาดตัวอย่าง (mL)	อัตราเจือจาง
>200	5	1 : 1
200-400	4	1 : 1
400-800	2	1 : 1
800-1,600	1	1 : 1
1,600-3,200	5	1 : 1
2,700-5,300	3	1 : 1
4,000-8,000	4	1 : 1
8,000-16,000	2	1 : 20
13,000-26,500	3	1 : 50
20,000-40,000	2	1 : 50
40,000-80,000	2	1 : 100
80,000-160,000	1	1 : 100

* เมื่อใช้ FAS ความเข้มข้น 0.05 N และสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.1 N

ตารางที่ ก-2 ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม

ขนาดของหลอดแก้ว (mm)	ตัวอย่างน้ำ (mL)	สารละลาย ไดโครเมต (mL)	สารละลาย กรดซัลฟิวริก (mL)	ปริมาตรทั้งหมด (mL)
16 x 100	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150	10.0	6.0	14.0	30.0

1) ใส่ตัวอย่างน้ำลงในหลอดแก้วขนาดที่เหมาะสม เติมน้ำยาล่อยสลายหรือสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ตามด้วยกรดกำมะถันอย่างช้าๆ ในปริมาตรตามตารางที่ ก-2 โดยถ้าใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำน้อยกว่าที่แสดงไว้ในตารางให้เติมน้ำกลั่นให้ครบตามจำนวน หลังจากนั้นปิดฝาให้

แน่นและเขย่าผสมให้เข้ากันดี สำหรับ blank ให้ใช้น้ำกลั่นแทนแล้วทำขั้นตอนเหมือนที่ทำกับน้ำตัวอย่าง

2) วางหลอดแก้วในบล็อกแล้วใส่ตู้อบอุณหภูมิ 150 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเวลานำออกจากตู้อบปล่อยให้เย็น

3) เทสารละลายออกจากหลอดแก้วลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมด แล้วเทรวมลงในขวดรูปกรวย เติมเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลาย FAS สีของสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนจากเหลืองเป็น เขียวอมเหลือง ฟ้ำ น้ำตาลแดง ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติแล้ว จดปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตเพื่อนำไปคำนวณตามสมการ ดังนี้

$$\text{ซีไอดี, mg O}_2/\text{L} = \frac{(A-B) \times N \times 8000}{\text{ตัวอย่างน้ำ, mL}}$$

เมื่อ A = FAS ที่ใช้ในการไทเทรต blank, mL

B = FAS ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำ, mL

N = ความเข้มข้นของ FAS, normality

4. การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบมวลชีวภาพ

4.1 การวิเคราะห์หาเยื่อใยที่ละลายในสารฟอกที่เป็นกลาง (Neutral-detergent fiber: NDF)

การวิเคราะห์หาเยื่อใยที่ละลายในสารฟอกที่เป็นกลางมีหลักการคือ ต้มตัวอย่างในสารฟอกที่เป็นกลาง ซึ่งส่งผลให้ส่วนประกอบภายในเซลล์ละลายออกมาอยู่ในสารละลาย ขณะที่ส่วนที่เป็นเยื่อใย (Cell wall) จะไม่ถูกย่อยสลาย โดยจะเรียกส่วนเยื่อใยนี้ว่า NDF ซึ่งประกอบไปด้วย cellulose, hemicellulose และ lignin

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องย่อย (Heating Mantle apparatus) เปิดเครื่องและเปิดน้ำให้ไหลเวียน
- 2) ขวดก้นกลม (Round bottom flask)
- 3) Crucible (อบที่ 105°C 2 ชั่วโมง ใส่ใน desicator ชั่งน้ำหนักและบันทึก)
- 4) เครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum pump)
- 5) โถดูดความชื้น (desicator)

สารเคมี

สารละลาย neutral-detergent (neutral detergent solution) ใน 1 ลิตร ประกอบด้วย

- Sodium lauryl sulphate
- Disodium ethylene diamine-tetraacetate (EDTA) dehydrate crystal
- Sodium borate decahydrate (borax) ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Disodium hydrogen phosphate anhydrous (Na_2HPO_4)
- Triethylene glycol หรือ 2-ethoxy ethanol

วิธีการ

- 1) นำ crucible ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า
- 2) ชั่งตัวอย่างเปลือกมันสำปะหลังอบแห้งประมาณ 1 กรัม ใส่ขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร เติมสารละลาย NDF ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปย่อยเป็นเวลา 60 นาที
- 3) นำตัวอย่างมาล้างใน crucible ที่ชั่งน้ำหนักแล้วข้างต้น และต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดอยู่ใน crucible หรือจนกว่าฟองจะหมด
- 4) จากนั้นล้างตัวอย่างด้วย acetone 3-5 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำล้างไม่มีสี
- 5) นำ crucible ที่มีตัวอย่างไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงหรือตลอดคืน
- 6) นำ crucible ที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้งเอาใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่าร้อยละ NDF
- 7) นำ crucible เเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักหาค่า

วิธีการคำนวณ

ร้อยละ NDF = $\frac{[(W1 - W2) \times 100] - \text{ร้อยละ Acid insoluble ash}}{W3}$

W3

เมื่อ W1 : น้ำหนัก crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 : น้ำหนัก crucible

W3 : น้ำหนักตัวอย่าง

ร้อยละ Acid insoluble ash : ร้อยละที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หาลิกนิน

4.2 การวิเคราะห์หาเยื่อใยที่ละลายในสารฟอกที่เป็นกรด (Acid-detergent fiber: ADF)

การวิเคราะห์หาเยื่อใยที่ละลายในสารฟอกที่เป็นกรด เป็นการย่อย NDF ออก โดย hemicellulose จะละลายอยู่ในสารฟอกที่เป็นกรด ส่วนที่เหลือที่ไม่ละลาย ได้แก่ โปรตีน cellulose lignin และ bound nitrogen

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องย่อย (Heating Mantle apparatus)
- 2) ขวดก้นกลม (Round bottom flask)
- 3) Crucible (อบที่ 105 °C 2 ชั่วโมง ใส่ใน desicator ชั่งน้ำหนักและบันทึก)
- 4) เครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum pump)
- 5) โถดูดความชื้น (desicator)

สารเคมี

สารละลาย acid-detergent (ADF) ประกอบด้วย

- Sulfuric acid (H_2SO_4)
- Cetyl trimethyl ammonium bromide (CTAB)

วิธีการ

- 1) นำ crucible ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า
- 2) ชั่งตัวอย่างเปลือกมันสำปะหลังอบแห้งประมาณ 1 กรัม ใส่ขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร เติมสารละลาย ADF ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปย่อยเป็นเวลา 60 นาที
- 3) นำตัวอย่างมาล้างใน crucible ที่ชั่งน้ำหนักแล้วข้างต้น และต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดอยู่ใน crucible หรือจนกว่าฟองจะหมด
- 4) จากนั้นล้างตัวอย่างด้วย acetone 3-5 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำล้างไม่มีสี
- 5) นำ crucible ที่มีตัวอย่างไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงหรือตลอดคืน
- 6) นำ crucible ที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้งเอาใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่าร้อยละ ADF

7) นำ crucible เเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ใน โถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักหาถ้ำ

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละ ADF} = \frac{[(W1 - W2) \times 100] - \text{ร้อยละ Acid insoluble ash}}{W3}$$

เมื่อ W1 : น้ำหนัก crucible + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 : น้ำหนัก crucible

W3 : น้ำหนักตัวอย่าง

ร้อยละ Acid insoluble ash : ร้อยละถ้ำที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หาลิกนิน

4.3 การวิเคราะห์หาลิกนิน (Acid-detergent lignin: ADL)

เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณลิกนิน ใน ADF โดยใช้ Sulfuric acid ในการละลาย cellulose ออกจากลิกนิน

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) Crucible ที่มีตัวอย่างจาก ADF
- 2) ถาดน้ำเย็น
- 3) แท่งแก้วคนสาร
- 4) เครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum pump)
- 5) โถดูดความชื้น (desicator)
- 6) ปีกเกอร์
- 7) เตาอบ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
- 8) เตาเผา อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

สารเคมี

72% Sulfuric acid (H₂SO₄)

วิธีการ

- 1) นำ crucible ที่มีตัวอย่างจากการวิเคราะห์หา ADF แล้วมาเติมสารละลาย ADL 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางลงในถาดสเตนเลส ใช้แท่งแก้วคนให้ทั่วเพื่อให้ตัวอย่างแยกจากกันไม่จับกันเป็นก้อน ควบคุมอุณหภูมิของ crucible ในถาดสเตนเลสที่ 20 องศาเซลเซียส
- 2) เติมสารละลาย ADL เมื่อสารละลายใน crucible แห้ง คนเป็นระยะๆ ใช้เวลาย่อยนาน 3 ชั่วโมง
- 3) ล้างสารละลายกรดออกจากตัวอย่างที่อยู่ในครุซิเบลที่ต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อน จนกรดหมด หรือประมาณ 1,000 มิลลิลิตร
- 4) นำ crucible ที่มีตัวอย่างไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน ใส่ไนโตรเจนความชื้น ปล่องให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละ cellulose} = \frac{[(W1 - W4) \times 100]}{W3}$$

- เมื่อ
- W1 : น้ำหนัก crucible + น้ำหนักตัวอย่างจากการวิเคราะห์ ADF
 - W3 : น้ำหนักตัวอย่าง
 - W4 : น้ำหนัก crucible + น้ำหนักตัวอย่างจากที่อบ

- 5) นำ crucible ที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หา cellulose ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
- 6) เอาออกใส่ไนโตรเจนความชื้น ปล่องให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก

วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละ cellulose} = \frac{[(W4 - W5) \times 100]}{W3}$$

- เมื่อ
- W4 : น้ำหนัก crucible + น้ำหนักตัวอย่างจากที่อบ
 - W4 : น้ำหนัก crucible + น้ำหนักตัวอย่างหลังการวิเคราะห์ cellulose
 - W3 : น้ำหนักตัวอย่าง

5. การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ (Volatile fatty acid: VFA) และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity: ALK)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
- 2) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- 3) เตาให้ความร้อน (Hotplate)
- 4) บิวเรต
- 5) ปีกเกอร์
- 6) แท่งแม่เหล็ก (Magnatic stirrer)

สารเคมี

- 1) Sulfuric acid (H_2SO_4) ความเข้มข้น 0.05 N
- 2) Sodium hydroxide (NaOH) ความเข้มข้น 0.05 N

วิธีการ

- 1) ตั้งตัวอย่างให้ตกตะกอนหรือ centrifuge ตัวอย่างประมาณ 5 นาที เพื่อใช้น้ำตัวอย่างเฉพาะส่วนที่ใสประมาณ 50 มิลลิลิตร
- 2) วัดค่าพีเอชของน้ำตัวอย่าง แล้วไทเทรตกับสารละลาย H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.05 N จนได้ค่าพีเอชเท่ากับ 4 บันทึกจำนวนกรดที่ใช้ แล้วไทเทรตต่อจนได้ค่าพีเอชเท่ากับ 3.5
- 3) ต้มบน hotplate เพื่อไล่ CO_2 ให้เดือดเบาๆ ประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งให้เย็น
- 4) ไทเทรตด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.05 N จนได้ค่าพีเอชเท่ากับ 4 แล้วไทเทรตต่อจนพีเอชเท่ากับ 7 บันทึกจำนวนสารละลายที่ใช้ไทเทรตจากพีเอช 4 ถึง 7

วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณกรดไขมันระเหย (VFA) (mg } CH_3COOH/L) = \frac{(\text{ปริมาณ NaOH ที่ใช้ปรับ pH จาก 4-7}) \times \text{normality} \times 50 \times 1,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง, mL}}$$

$$\text{ค่าความเป็นด่าง (ALK) (mg } CaCO_3/L) = \frac{(\text{ปริมาณ } H_2SO_4 \text{ ที่ใช้ปรับ pH เป็น 4}) \times \text{normality} \times 50 \times 1,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง, mL}}$$

ภาคผนวก ข
วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (m³/kg VS added)

1.1 จากชุดควบคุม หัวเชื้อจุลินทรีย์ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยระเหยร้อยละ 2.5

น้ำหนักของแข็งระเหยได้ของหัวเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับร้อยละ 6.32 (ร้อยละน้ำหนักสด)

ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 19.50 mL

1.2 จากชุดการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังสด

น้ำหนักของแข็งระเหยได้ของเปลือกมันสำปะหลังสดเท่ากับร้อยละ 21.24 (ร้อยละน้ำหนักสด)

ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 166.50 mL

ดังนั้น ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของเปลือกมันสำปะหลังสด เท่ากับ

$$\frac{(166.50 - 19.50 \text{ mL})}{(2.26 \text{ gVS} \times 21.24) / 100} = 306.23 \text{ mL/g VS added}$$

$$(2.26 \text{ gVS} \times 21.24) / 100$$

หรือ $= 0.306 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$

1.3 จากชุดการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง

น้ำหนักของแข็งระเหยได้ของกากมันสำปะหลังเท่ากับร้อยละ 22.43 (ร้อยละน้ำหนักสด)

ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 286.17 mL

ดังนั้น ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของกากมันสำปะหลัง เท่ากับ

$$\frac{(286.17 - 19.50 \text{ mL})}{(2.11 \text{ gVS} \times 22.43) / 100} = 554.80 \text{ mL/g VS added}$$

$$(2.11 \text{ gVS} \times 22.43) / 100$$

หรือ $= 0.555 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$

2. การคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพ (m³/kg VS added) ตามอัตราส่วนผสมของการหมักร่วม

2.1 จากชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกมันและกากมันสำปะหลัง

ปริมาณก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังเท่ากับ 0.306 m³/kg VS added

ปริมาณก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังเท่ากับ 0.555 m³/kg VS added

ดังนั้น ปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณตามอัตราส่วนของส่วนผสมมีค่าดังต่อไปนี้

เปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง อัตราส่วน 1:1 = $((0.306 \times 1) + (0.555 \times 1))/2 = 0.431 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$

เปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง อัตราส่วน 1:2 = $((0.306 \times 1) + (0.555 \times 2))/3 = 0.472 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$

เปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง อัตราส่วน 1:3 = $((0.306 \times 1) + (0.555 \times 3))/4 = 0.493 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$

2.2 จากชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกมันและน้ำเสีย

ปริมาณก๊าซชีวภาพจากเปลือกมันสำปะหลังเท่ากับ 0.306 m³/kg VS added

ปริมาณก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียเท่ากับ 0.601 m³/kg VS added

ดังนั้น ปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณตามอัตราส่วนของส่วนผสมมีค่าดังต่อไปนี้

เปลือกมันกับน้ำเสีย อัตราส่วน 1:1 = $((0.306 \times 1) + (0.601 \times 1))/2 = 0.454 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$

เปลือกมันกับน้ำเสีย อัตราส่วน 1:2 = $((0.306 \times 1) + (0.601 \times 2))/3 = 0.503 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$

เปลือกมันกับน้ำเสีย อัตราส่วน 1:3 = $((0.306 \times 1) + (0.601 \times 3))/4 = 0.527 \text{ m}^3/\text{kg VS added}$

2.3 จากชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างกากมันและน้ำเสีย

ปริมาณก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังเท่ากับ 0.555 m³/kg VS added

ปริมาณก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียเท่ากับ 0.601 m³/kg VS added

ดังนั้น ปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณตามอัตราส่วนของส่วนผสมมีค่าดังต่อไปนี้

กากมันกับน้ำเสีย อัตราส่วน 1:1 = $((0.555 \times 1) + (0.601 \times 1))/2 = 0.578 \text{ m}^3/\text{kg}$

VS added

กากมันกับน้ำเสีย อัตราส่วน 1:2 = $((0.555 \times 1) + (0.601 \times 2))/3 = 0.585 \text{ m}^3/\text{kg}$

VS added

กากมันกับน้ำเสีย อัตราส่วน 1:3 = $((0.555 \times 1) + (0.601 \times 3))/4 = 0.589 \text{ m}^3/\text{kg}$

VS added



ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ ค-1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกมันสำปะหลังสด

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
ของแข็งทั้งหมด (TS) (ร้อยละน้ำหนักสด)	22.26	22.37	21.85	22.38	22.22
ความชื้น (Moisture)	77.74	77.63	78.15	77.62	77.78
ของแข็งระเหยได้ (VS) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	95.84	95.71	95.30	95.54	95.60
เถ้า (Ash) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	4.16	4.29	4.70	4.46	4.40

ตารางที่ ค-2 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
ของแข็งทั้งหมด (TS) (ร้อยละน้ำหนักสด)	22.36	23.31	22.41	22.05	22.78
ความชื้น (Moisture)	76.64	76.69	77.59	77.95	77.22
ของแข็งระเหยได้ (VS) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	98.13	99.61	98.06	98.05	98.46
เถ้า (Ash) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	1.87	0.39	1.94	1.95	1.54

ตารางที่ ค-3 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสี้ยว

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
ของแข็งทั้งหมด (TS) (ร้อยละน้ำหนักสด)	4.75	4.63	4.79	4.72	4.72
ความชื้น (Moisture)	95.25	95.37	95.21	95.27	95.28
ของแข็งระเหยได้ (VS) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	95.93	95.90	95.89	95.92	95.91
เถ้า (Ash) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	4.07	4.10	4.11	4.08	4.09

ตารางที่ ค-4 องค์ประกอบทางเคมีของหัวเชื้อจุลินทรีย์

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
ของแข็งทั้งหมด (TS) (ร้อยละน้ำหนักสด)	8.42	6.56	6.55	6.47	7.00
ความชื้น (Moisture)	91.58	93.44	93.45	93.53	93.00
ของแข็งระเหยได้ (VS) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	91.39	94.27	87.67	87.57	90.23
เถ้า (Ash) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	8.61	5.73	12.33	12.43	9.77

ตารางที่ ค-5 องค์ประกอบทางเคมีของชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ของแข็งทั้งหมด (TS) (ร้อยละน้ำหนักสด)	8.25	7.67	7.48	7.80
ความชื้น (Moisture)	91.75	92.33	92.52	92.20
ของแข็งระเหยได้ (VS) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	89.50	91.31	89.54	90.12
เถ้า (Ash) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	10.50	8.69	10.46	9.88

ตารางที่ ค-6 องค์ประกอบทางเคมีของชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ของแข็งทั้งหมด (TS) (ร้อยละน้ำหนักสด)	7.48	7.86	7.56	7.63
ความชื้น (Moisture)	92.52	92.14	92.44	92.37
ของแข็งระเหยได้ (VS) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	84.47	87.88	82.61	84.99
เถ้า (Ash) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	15.53	12.12	17.39	15.01

ตารางที่ ค-7 องค์ประกอบทางเคมีของชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ของแข็งทั้งหมด (TS) (ร้อยละน้ำหนักสด)	7.38	7.27	7.12	7.26
ความชื้น (Moisture)	92.62	92.73	92.88	92.74
ของแข็งระเหยได้ (VS) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	87.85	88.58	83.49	86.64
เถ้า (Ash) (ร้อยละของแข็งทั้งหมด)	12.15	11.42	16.51	13.36

ตารางที่ ค-8 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลังสด และเปลือกมันสำปะหลังปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชุดการทดลอง	ปริมาณเซลลูโลส (ร้อยละ)			ปริมาณเฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)			ปริมาณลิกนิน (ร้อยละ)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
เปลือกมันสำปะหลังสด	23.21	22.19	22.70	19.36	20.34	19.85	15.51	13.23	14.37
เปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 1%)	27.66	29.53	28.59	18.55	19.33	18.94	21.28	18.54	19.91
เปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 2%)	27.84	33.88	30.86	18.78	19.62	19.20	17.02	11.55	14.28
เปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 3%)	25.69	26.46	26.08	17.88	18.14	18.01	13.92	12.15	13.03

ตารางที่ ค-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน (mL) ของแต่ละชุดการทดลอง

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน (mL)							
	ชุดควบคุม				ชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลังสด			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00
1	0.0	0.0	0.0	0.00	63.0	63.0	63.0	63.00
2	0.0	0.0	0.0	0.00	21.0	23.0	23.0	22.33
3	0.0	0.0	0.0	0.00	16.0	17.0	16.0	16.33
4	0.0	0.0	0.0	0.00	9.0	10.0	11.0	10.00
5	0.0	0.0	0.0	0.00	10.0	10.0	11.0	10.33
6	0.0	0.0	0.0	0.00	4.0	5.0	6.0	5.00
7	4.0	5.0	3.0	4.00	7.0	6.0	8.0	7.00
8	3.0	3.0	3.0	3.00	6.0	6.0	6.0	6.00
9	0.0	0.0	0.0	0.00	3.0	3.0	3.5	3.17
10	3.0	3.5	2.5	3.00	4.0	3.5	4.5	4.00
11	2.0	2.5	1.5	2.00	4.0	4.0	4.5	4.17
12	2.0	2.5	2.5	2.33	3.0	3.5	4.0	3.50
13	2.0	1.5	1.5	1.67	3.0	2.5	3.0	2.83
14	2.5	1.5	1.5	1.83	5.0	5.0	5.5	5.17
15	1.5	2.0	1.5	1.67	3.5	3.5	4.0	3.67

ตารางที่ ค-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน (mL) ของแต่ละชุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน (mL)							
	ชุดการทดลองกากมันสำปะหลัง				ชุดการทดลองน้ำเสีย			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00
1	82.0	81.0	77.0	80.00	86.0	87.0	87.0	86.67
2	52.0	52.0	53.0	52.33	65.0	68.0	68.0	67.00
3	41.0	44.0	46.0	43.67	22.0	23.0	22.0	22.33
4	21.0	30.0	24.0	25.00	14.0	13.0	14.0	13.67
5	18.0	20.0	20.0	19.33	32.0	30.0	29.0	30.33
6	12.0	12.0	11.0	11.67	22.0	24.0	24.0	23.33
7	12.0	10.0	10.0	10.67	22.0	23.0	24.0	23.00
8	9.0	8.0	9.0	8.67	11.0	12.0	12.0	11.67
9	6.0	5.0	5.5	5.50	6.0	6.0	6.0	6.00
10	6.0	6.0	6.0	6.00	5.0	6.0	5.0	5.33
11	5.0	5.5	5.0	5.17	4.5	4.5	4.5	4.50
12	4.0	5.0	4.0	4.33	3.0	4.0	4.0	3.67
13	3.0	3.0	3.5	3.17	3.5	3.0	3.0	3.17
14	6.0	6.5	6.0	6.17	4.5	5.0	4.0	4.50
15	4.0	5.0	4.5	4.50	2.5	3.5	2.5	2.83
วันที่	ชุดการทดลองเปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 1%)				ชุดการทดลองเปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 2%)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00
1	67.0	67.0	68.0	67.33	67.0	66.0	69.0	67.33
2	16.0	13.0	16.0	15.00	19.0	17.0	20.0	18.67
3	12.0	11.0	13.0	12.00	14.0	13.0	12.0	13.00
4	7.0	5.0	8.0	6.67	10.0	8.0	8.0	8.67
5	9.0	9.0	10.0	9.33	11.0	10.0	12.0	11.00
6	5.0	5.0	5.0	5.00	7.0	6.0	8.0	7.00
7	8.0	7.0	7.0	7.33	8.0	8.0	9.0	8.33
8	7.0	6.0	6.0	6.33	7.0	7.0	7.0	7.00
9	4.0	2.5	4.0	3.50	4.0	4.0	4.0	4.00
10	4.5	4.0	4.5	4.33	4.5	4.5	4.0	4.33
11	4.5	4.5	5.0	4.67	4.0	4.0	4.0	4.00
12	4.0	4.0	4.5	4.17	3.5	3.5	4.0	3.67
13	3.0	2.5	1.5	2.33	3.0	3.0	2.0	2.67
14	4.0	4.5	5.0	4.50	4.5	5.0	4.5	4.67
15	3.5	3.0	3.0	3.17	3.5	3.5	3.0	3.33

ตารางที่ ค-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน (mL) ของแต่ละชุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน (mL)							
	ชุดการทดลองเปลี่ยนน้ำมันปรับสภาพ (NaOH 3%)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลี่ยนน้ำมันกับกากมันสำปะหลัง (1:1)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00
1	67.0	52.0	53.0	57.33	74.0	75.0	74.0	74.33
2	32.0	40.0	40.0	37.33	38.0	36.0	35.0	36.33
3	13.0	26.0	22.0	20.33	24.0	25.0	24.0	24.33
4	9.0	12.0	13.0	11.33	13.0	13.0	13.0	13.00
5	11.0	13.0	14.0	12.67	13.0	12.0	8.0	11.00
6	9.0	9.0	10.0	9.33	8.0	8.0	5.0	7.00
7	13.0	10.0	12.0	11.67	8.0	8.0	7.0	7.67
8	10.0	11.0	10.0	10.33	7.0	7.0	6.0	6.67
9	6.0	6.0	6.0	6.00	4.0	4.0	4.0	4.00
10	6.0	6.0	6.0	6.00	4.5	4.5	3.0	4.00
11	7.0	6.0	7.0	6.67	5.0	5.0	4.5	4.83
12	5.0	6.0	6.0	5.67	4.0	2.5	3.5	3.25
13	4.0	5.0	5.0	4.67	3.0	4.0	2.5	3.50
14	5.5	9.0	6.5	7.00	5.5	5.5	5.0	5.33
15	5.5	5.0	5.0	5.17	4.0	4.0	4.0	4.00
วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลี่ยนน้ำมันกับกากมันสำปะหลัง (1:2)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลี่ยนน้ำมันกับกากมันสำปะหลัง (1:3)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00
1	72.0	79.0	79.0	76.67	77.0	77.0	79.0	77.67
2	45.0	40.0	40.0	41.67	40.0	38.0	40.0	39.33
3	31.0	28.0	32.0	30.33	39.0	34.0	40.0	37.67
4	14.0	13.0	16.0	14.33	17.0	17.0	17.0	17.00
5	12.0	12.0	14.0	12.67	16.0	15.0	16.0	15.67
6	8.0	8.0	9.0	8.33	9.0	9.0	9.0	9.00
7	9.0	8.0	8.0	8.33	9.0	9.0	8.0	8.67
8	7.0	7.0	8.0	7.33	8.0	8.0	8.0	8.00
9	4.0	4.0	5.0	4.33	5.0	5.0	5.0	5.00
10	5.0	5.0	5.0	5.00	5.0	5.0	5.5	5.17
11	5.0	4.5	5.0	4.83	5.0	4.5	5.5	5.00
12	4.0	4.0	4.5	4.17	4.0	4.5	4.0	4.17
13	3.5	3.5	3.0	3.33	3.5	3.0	3.5	3.33
14	5.5	5.5	6.0	5.67	5.5	5.5	6.0	5.67
15	4.5	4.5	4.5	4.50	4.0	4.0	4.0	4.00

ตารางที่ ค-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน (mL) ของแต่ละชุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน (mL)							
	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันกับน้ำเสีย (1:1)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันกับน้ำเสีย (1:2)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00
1	79.0	80.0	78.0	79.00	79.0	82.0	86.0	82.33
2	36.0	36.0	43.0	38.33	56.0	44.0	45.0	48.33
3	21.0	21.0	21.0	21.00	21.0	19.0	22.0	20.67
4	17.0	18.0	18.0	17.67	19.0	16.0	17.0	17.33
5	24.0	23.0	23.0	23.33	26.0	30.0	30.0	28.67
6	10.0	9.0	11.0	10.00	15.0	15.0	16.0	15.33
7	8.0	8.0	9.0	8.33	12.0	11.0	11.0	11.33
8	7.0	7.0	7.0	7.00	8.0	8.0	8.0	8.00
9	5.0	5.0	5.0	5.00	5.5	6.0	6.0	5.83
10	4.5	5.0	5.0	4.83	5.5	4.5	6.0	5.33
11	4.0	4.0	4.0	4.00	4.0	4.0	5.0	4.33
12	4.0	4.0	4.0	4.00	4.0	3.0	4.0	3.67
13	3.0	3.0	3.0	3.00	3.5	4.0	3.5	3.67
14	4.5	4.5	4.5	4.50	4.5	4.5	5.0	4.67
15	3.0	2.0	2.0	2.33	2.0	2.0	2.5	2.17
วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันกับน้ำเสีย (1:3)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง กากมันกับน้ำเสีย (1:1)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00
1	80.0	83.0	86.0	83.00	84.0	86.0	88.0	86.00
2	62.0	53.0	50.0	55.00	68.0	65.0	68.0	67.00
3	18.0	19.0	17.0	18.00	19.0	18.0	20.0	19.00
4	16.0	15.0	13.0	14.67	11.0	9.0	12.0	10.67
5	29.0	30.0	30.0	29.67	19.0	20.0	28.0	22.33
6	19.0	20.0	20.0	19.67	15.0	15.0	16.0	15.33
7	14.0	13.0	12.0	13.00	9.0	11.0	10.0	10.00
8	8.0	7.0	8.0	7.67	9.0	9.0	10.0	9.33
9	5.5	5.0	6.0	5.50	6.0	6.5	6.0	6.17
10	5.5	6.0	5.5	5.67	6.5	6.5	6.0	6.33
11	5.0	5.0	5.0	5.00	5.0	4.5	6.0	5.17
12	4.0	4.0	4.0	4.00	4.0	4.0	5.0	4.33
13	3.0	3.5	4.0	3.50	3.5	4.0	3.0	3.50
14	4.5	4.5	5.0	4.67	5.5	6.0	5.5	5.67
15	2.0	2.0	2.0	2.00	4.0	4.0	4.0	4.00

ตารางที่ ค-9 ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน (mL) ของแต่ละชุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน (mL)							
	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง กากมันกับน้ำเสีย (1:2)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง กากมันกับน้ำเสีย (1:3)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00
1	85.0	83.0	87.0	85.00	84.0	87.0	93.0	88.00
2	67.0	72.0	68.0	69.00	64.0	66.0	61.0	63.67
3	23.0	23.0	20.0	22.00	23.0	24.0	25.0	24.00
4	15.0	15.0	15.0	15.00	17.0	16.0	16.0	16.33
5	30.0	30.0	28.0	29.33	29.0	29.0	31.0	29.67
6	19.0	20.0	19.0	19.33	21.0	23.0	22.0	22.00
7	13.0	15.0	14.0	14.00	14.0	15.0	15.0	14.67
8	9.0	10.0	10.0	9.67	9.0	9.0	9.0	9.00
9	7.0	7.0	6.5	6.83	6.0	6.0	6.0	6.00
10	7.0	6.5	6.0	6.50	7.0	6.5	6.0	6.50
11	5.5	6.0	6.0	5.83	5.5	6.0	6.0	5.83
12	5.0	5.5	5.0	5.17	5.0	5.0	5.5	5.17
13	2.5	3.0	3.0	2.83	3.0	3.0	2.5	2.83
14	5.5	5.0	5.5	5.33	5.5	5.5	6.0	5.67
15	4.0	4.0	4.0	4.00	3.5	3.5	3.5	3.50

ตารางที่ ค-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของแต่ละชุดการทดลอง

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added)							
	ชุดควบคุม				ชุดการทดลองเปลี่ยนน้ำมันสำปะหลังสด			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.131	0.131	0.131	0.131
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.175	0.179	0.179	0.178
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.208	0.215	0.212	0.212
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.227	0.235	0.235	0.233
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.248	0.256	0.258	0.254
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.256	0.267	0.271	0.265
7	0.004	0.005	0.003	0.004	0.262	0.271	0.279	0.271
8	0.007	0.008	0.006	0.007	0.269	0.277	0.285	0.277
9	0.007	0.008	0.006	0.007	0.275	0.283	0.293	0.284
10	0.010	0.012	0.009	0.010	0.277	0.284	0.296	0.286
11	0.012	0.014	0.010	0.012	0.281	0.289	0.301	0.290
12	0.014	0.017	0.013	0.014	0.283	0.291	0.304	0.293
13	0.016	0.018	0.014	0.016	0.285	0.293	0.307	0.295
14	0.019	0.020	0.016	0.018	0.292	0.299	0.315	0.302
15	0.020	0.022	0.017	0.020	0.296	0.303	0.320	0.306
วันที่	ชุดการทดลองกากมันสำปะหลัง				ชุดการทดลองน้ำเสีย			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.171	0.169	0.160	0.166	0.179	0.181	0.181	0.180
2	0.279	0.277	0.270	0.275	0.314	0.323	0.323	0.320
3	0.364	0.368	0.366	0.366	0.360	0.371	0.369	0.367
4	0.408	0.431	0.416	0.418	0.389	0.398	0.398	0.395
5	0.445	0.472	0.458	0.458	0.456	0.460	0.458	0.458
6	0.470	0.497	0.481	0.483	0.502	0.510	0.508	0.507
7	0.487	0.510	0.493	0.497	0.539	0.550	0.550	0.546
8	0.499	0.520	0.506	0.508	0.556	0.569	0.569	0.564
9	0.512	0.531	0.517	0.520	0.569	0.581	0.581	0.577
10	0.518	0.537	0.523	0.526	0.573	0.587	0.585	0.582
11	0.524	0.544	0.529	0.533	0.578	0.592	0.590	0.587
12	0.528	0.550	0.533	0.537	0.579	0.596	0.594	0.590
13	0.531	0.552	0.537	0.540	0.583	0.599	0.597	0.593
14	0.539	0.562	0.545	0.549	0.589	0.605	0.601	0.598
15	0.544	0.569	0.551	0.555	0.590	0.609	0.603	0.601

ตารางที่ ค-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของแต่ละชุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added)							
	ชุดการทดลองเปลี่ยนไขมันปรับสภาพ (NaOH 1%)				ชุดการทดลองเปลี่ยนไขมันปรับสภาพ (NaOH 2%)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.140	0.140	0.142	0.140	0.140	0.137	0.144	0.140
2	0.173	0.167	0.175	0.172	0.179	0.173	0.185	0.179
3	0.198	0.190	0.202	0.197	0.208	0.200	0.210	0.206
4	0.212	0.200	0.219	0.210	0.229	0.217	0.227	0.224
5	0.231	0.219	0.240	0.230	0.252	0.237	0.252	0.247
6	0.242	0.229	0.250	0.240	0.267	0.250	0.269	0.262
7	0.250	0.235	0.256	0.247	0.275	0.258	0.279	0.271
8	0.258	0.242	0.262	0.254	0.283	0.267	0.287	0.279
9	0.267	0.247	0.271	0.261	0.292	0.275	0.296	0.287
10	0.270	0.249	0.274	0.264	0.295	0.278	0.298	0.290
11	0.275	0.254	0.280	0.270	0.299	0.282	0.302	0.294
12	0.278	0.258	0.285	0.274	0.301	0.285	0.306	0.297
13	0.281	0.259	0.284	0.275	0.304	0.287	0.306	0.299
14	0.286	0.265	0.291	0.281	0.310	0.294	0.312	0.305
15	0.290	0.268	0.294	0.284	0.314	0.298	0.315	0.309
วันที่	ชุดการทดลองเปลี่ยนไขมันปรับสภาพ (NaOH 3%)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลี่ยนไขมันกับกากมันสำปะหลัง (1:1)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.140	0.108	0.110	0.119	0.154	0.157	0.154	0.155
2	0.206	0.192	0.194	0.197	0.234	0.232	0.227	0.231
3	0.233	0.246	0.240	0.240	0.284	0.284	0.278	0.282
4	0.252	0.271	0.267	0.263	0.311	0.311	0.305	0.309
5	0.275	0.298	0.296	0.290	0.338	0.336	0.321	0.332
6	0.294	0.317	0.317	0.309	0.355	0.353	0.332	0.346
7	0.312	0.329	0.333	0.325	0.363	0.361	0.338	0.354
8	0.327	0.346	0.348	0.340	0.371	0.369	0.344	0.362
9	0.340	0.358	0.360	0.353	0.380	0.378	0.353	0.370
10	0.346	0.365	0.367	0.359	0.383	0.381	0.353	0.372
11	0.356	0.373	0.377	0.369	0.387	0.385	0.356	0.376
12	0.362	0.381	0.385	0.376	0.391	0.385	0.358	0.378
13	0.367	0.387	0.392	0.382	0.393	0.390	0.360	0.381
14	0.374	0.402	0.401	0.393	0.401	0.398	0.367	0.388
15	0.382	0.409	0.408	0.400	0.406	0.403	0.371	0.393

ตารางที่ ค-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของแต่ละชุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added)							
	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง (1:2)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง (1:3)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.151	0.165	0.165	0.160	0.161	0.161	0.165	0.162
2	0.245	0.249	0.249	0.247	0.244	0.240	0.249	0.244
3	0.309	0.307	0.316	0.311	0.326	0.311	0.332	0.323
4	0.339	0.335	0.349	0.341	0.361	0.347	0.368	0.358
5	0.364	0.360	0.378	0.367	0.395	0.378	0.401	0.391
6	0.381	0.376	0.397	0.385	0.413	0.397	0.420	0.410
7	0.391	0.385	0.406	0.394	0.424	0.407	0.428	0.420
8	0.399	0.393	0.416	0.403	0.434	0.418	0.439	0.430
9	0.408	0.401	0.427	0.412	0.445	0.428	0.449	0.441
10	0.412	0.406	0.431	0.416	0.449	0.432	0.454	0.445
11	0.418	0.411	0.437	0.422	0.455	0.437	0.462	0.451
12	0.422	0.414	0.442	0.426	0.459	0.442	0.465	0.455
13	0.426	0.418	0.444	0.429	0.463	0.445	0.469	0.459
14	0.433	0.426	0.453	0.437	0.470	0.452	0.478	0.467
15	0.439	0.432	0.459	0.443	0.475	0.457	0.482	0.472
วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันกับน้ำเสีย (1:1)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันกับน้ำเสีย (1:2)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.165	0.167	0.162	0.165	0.165	0.171	0.179	0.172
2	0.240	0.242	0.252	0.244	0.282	0.263	0.273	0.273
3	0.283	0.285	0.296	0.288	0.326	0.303	0.319	0.316
4	0.319	0.323	0.333	0.325	0.365	0.336	0.355	0.352
5	0.369	0.371	0.381	0.374	0.420	0.399	0.417	0.412
6	0.390	0.390	0.404	0.394	0.451	0.430	0.451	0.444
7	0.398	0.398	0.414	0.403	0.468	0.445	0.465	0.459
8	0.406	0.406	0.423	0.412	0.478	0.455	0.476	0.470
9	0.417	0.417	0.433	0.422	0.489	0.468	0.488	0.482
10	0.420	0.421	0.437	0.426	0.495	0.471	0.495	0.487
11	0.424	0.425	0.442	0.430	0.499	0.475	0.501	0.492
12	0.427	0.428	0.445	0.434	0.502	0.476	0.504	0.494
13	0.430	0.431	0.448	0.436	0.506	0.481	0.508	0.498
14	0.436	0.437	0.453	0.442	0.512	0.487	0.515	0.504
15	0.438	0.437	0.454	0.443	0.512	0.487	0.517	0.505

ตารางที่ ค-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added) ของแต่ละชุดการทดลอง (ต่อ)

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (m^3/kg VS added)							
	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันกับน้ำเสีย (1:3)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง กากมันกับน้ำเสีย (1:1)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.167	0.173	0.180	0.173	0.175	0.179	0.184	0.179
2	0.296	0.284	0.284	0.288	0.317	0.315	0.325	0.319
3	0.334	0.324	0.319	0.326	0.357	0.353	0.367	0.359
4	0.367	0.355	0.346	0.356	0.380	0.371	0.392	0.381
5	0.428	0.417	0.409	0.418	0.419	0.413	0.451	0.428
6	0.468	0.459	0.451	0.459	0.451	0.444	0.484	0.460
7	0.488	0.478	0.468	0.478	0.461	0.459	0.497	0.472
8	0.499	0.486	0.478	0.488	0.474	0.472	0.511	0.485
9	0.510	0.497	0.491	0.499	0.486	0.485	0.524	0.498
10	0.516	0.503	0.496	0.505	0.493	0.492	0.530	0.505
11	0.522	0.509	0.502	0.511	0.500	0.498	0.538	0.512
12	0.525	0.513	0.505	0.515	0.503	0.501	0.544	0.516
13	0.528	0.517	0.510	0.518	0.507	0.506	0.547	0.520
14	0.534	0.522	0.517	0.524	0.515	0.515	0.554	0.528
15	0.534	0.523	0.518	0.525	0.520	0.520	0.559	0.533
วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง กากมันกับน้ำเสีย (1:2)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง กากมันกับน้ำเสีย (1:3)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.177	0.173	0.182	0.177	0.175	0.181	0.193	0.183
2	0.317	0.323	0.323	0.321	0.308	0.318	0.320	0.315
3	0.365	0.371	0.365	0.367	0.356	0.368	0.372	0.365
4	0.396	0.373	0.367	0.379	0.391	0.401	0.406	0.399
5	0.459	0.436	0.425	0.440	0.451	0.462	0.470	0.461
6	0.499	0.478	0.465	0.480	0.495	0.509	0.516	0.507
7	0.517	0.501	0.486	0.501	0.516	0.532	0.539	0.529
8	0.530	0.515	0.501	0.515	0.528	0.545	0.551	0.541
9	0.545	0.530	0.514	0.530	0.541	0.557	0.564	0.554
10	0.553	0.537	0.520	0.537	0.549	0.565	0.570	0.561
11	0.560	0.545	0.529	0.545	0.556	0.573	0.578	0.569
12	0.566	0.552	0.534	0.551	0.562	0.578	0.585	0.575
13	0.568	0.555	0.537	0.553	0.565	0.581	0.586	0.577
14	0.575	0.561	0.545	0.560	0.572	0.589	0.595	0.585
15	0.580	0.566	0.550	0.565	0.576	0.593	0.599	0.589

ตารางที่ ค-11 ปริมาณซีโอดีและซีโอดีละลายของเปลือกมันสำปะหลังสดและเปลือกมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชุดการทดลอง	ปริมาณซีโอดี (mg/L)			ปริมาณซีโอดีละลาย (mg/L)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
เปลือกมันสำปะหลังสด	8,000	8,000	8,000	288	192	240
เปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 1%)	9,600	7,200	8,400	960	960	960
เปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 2%)	9,600	9,600	9,600	3,520	3,520	3,520
เปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 3%)	14,400	16,000	15,200	3,840	3,520	3,680

ตารางที่ ค-12 ปริมาณซีโอดีละลาย (mg/L) และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลาย (%) ของชุดการทดลองที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

วันที่	ชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลัง				
	ปริมาณซีโอดีละลาย (mg/L)				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลาย (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	640.00	640.00	640.00	640.00	0.00
1	384.00	384.00	384.00	384.00	40.00
3	288.00	288.00	288.00	288.00	55.00
5	288.00	288.00	256.00	277.33	56.67
7	224.00	224.00	224.00	224.00	65.00
9	192.00	192.00	192.00	192.00	70.00
11	160.00	160.00	160.00	160.00	75.00
13	160.00	160.00	160.00	160.00	75.00
15	160.00	160.00	160.00	160.00	75.00
วันที่	ชุดการทดลองกากมันสำปะหลัง				
	ปริมาณซีโอดีละลาย (mg/L)				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีละลาย (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	1,280.00	960.00	960.00	1,066.67	0.00
1	1,536.00	1,280.00	1,280.00	1,365.33	-28.00
3	448.00	448.00	448.00	448.00	58.00
5	384.00	384.00	384.00	384.00	64.00
7	352.00	352.00	352.00	352.00	67.00
9	320.00	320.00	320.00	320.00	70.00
11	288.00	320.00	288.00	298.67	72.00
13	256.00	224.00	224.00	234.67	78.00
15	224.00	192.00	192.00	202.67	81.00

ตารางที่ ค-12 ปริมาณซีโอทีละลาย (mg/L) และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีละลาย (%) ของชุดการทดลองที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

วันที่	ชุดการทดลองน้ำเสีย				
	ปริมาณซีโอทีละลาย (mg/L)				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีละลาย (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2,560.00	2,560.00	2,560.00	2,560.00	0.00
1	2,880.00	3,200.00	3,200.00	3,093.33	-20.83
3	448.00	448.00	512.00	469.33	81.67
5	352.00	352.00	320.00	341.33	86.67
7	224.00	224.00	224.00	224.00	91.25
9	224.00	224.00	224.00	224.00	91.25
11	224.00	192.00	224.00	213.33	91.67
13	192.00	224.00	192.00	202.67	92.08
15	160.00	160.00	160.00	160.00	93.75
วันที่	ชุดการทดลองเปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 3%)				
	ปริมาณซีโอทีละลาย (mg/L)				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีละลาย (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	4,000.00	4,000.00	4,000.00	4,000.00	0.00
1	4,480.00	4,480.00	4,480.00	4,480.00	-12.00
3	960.00	960.00	960.00	960.00	76.00
5	960.00	960.00	960.00	960.00	76.00
7	1,024.00	1,024.00	768.00	938.67	76.53
9	640.00	640.00	640.00	640.00	84.00
11	480.00	480.00	480.00	480.00	88.00
13	384.00	384.00	384.00	384.00	90.40
15	384.00	384.00	384.00	384.00	90.40
วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมัน (1:3)				
	ปริมาณซีโอทีละลาย (mg/L)				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีละลาย (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	960.00	1,280.00	960.00	1,066.67	0.00
1	768.00	768.00	768.00	768.00	28.00
3	480.00	480.00	320.00	426.67	60.00
5	288.00	384.00	288.00	320.00	70.00
7	224.00	224.00	256.00	234.67	78.00
9	224.00	256.00	224.00	234.67	78.00
11	192.00	224.00	224.00	213.33	80.00
13	224.00	224.00	256.00	234.67	78.00
15	128.00	160.00	160.00	149.33	86.00

ตารางที่ ค-12 ปริมาณซีโอทีละลาย (mg/L) และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีละลาย (%) ของชุดการทดลองที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

วันที่	ชุดการทดลองหมักรวมระหว่างเปลือกมันกับน้ำเสีย (1:3)				
	ปริมาณซีโอทีละลาย (mg/L)				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีละลาย (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2,240.00	2,240.00	2,240.00	2,240.00	0.00
1	768.00	768.00	768.00	768.00	65.71
3	320.00	320.00	320.00	320.00	85.71
5	288.00	288.00	288.00	288.00	87.14
7	160.00	192.00	192.00	181.33	91.90
9	192.00	192.00	160.00	181.33	91.90
11	160.00	192.00	160.00	170.67	92.38
13	128.00	160.00	96.00	128.00	94.29
15	128.00	128.00	96.00	117.33	94.76
วันที่	ชุดการทดลองหมักรวมระหว่างกากมันกับน้ำเสีย (1:3)				
	ปริมาณซีโอทีละลาย (mg/L)				ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีละลาย (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	2,560.00	2,240.00	2,560.00	2,453.33	0.00
1	1,536.00	1,536.00	1,536.00	1,536.00	37.39
3	256.00	256.00	256.00	256.00	89.57
5	256.00	256.00	256.00	256.00	89.57
7	224.00	224.00	224.00	224.00	90.87
9	224.00	224.00	224.00	224.00	90.87
11	192.00	192.00	192.00	192.00	92.17
13	160.00	160.00	160.00	160.00	93.48
15	128.00	160.00	160.00	149.33	93.91

ตารางที่ ค-13 ปริมาณของแข็งระเหยได้ (%) และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ (%) ของชุดการทดลองที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

วันที่	ชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลัง				ชุดการทดลองกากมันสำปะหลัง			
	ปริมาณของแข็งระเหยได้ (%)			ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ (%)	ปริมาณของแข็งระเหยได้ (%)			ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	1.280	1.280	1.280	0.00	1.280	1.280	1.280	0.00
1	1.103	1.098	1.101	14.01	1.109	1.104	1.107	13.55
3	0.944	1.029	0.987	22.90	0.981	1.083	1.032	19.35
5	0.941	0.883	0.912	28.76	1.061	1.054	1.058	17.38
7	0.944	0.801	0.872	31.85	1.066	0.971	1.019	20.40
9	0.730	0.803	0.766	40.14	1.053	0.950	1.001	21.76
11	0.725	0.682	0.704	45.01	1.011	0.965	0.988	22.78
13	0.548	0.843	0.695	45.68	1.151	0.614	0.883	31.05
15	0.578	0.740	0.659	48.52	0.866	0.723	0.794	37.96
วันที่	ชุดการทดลองน้ำเสีย				ชุดการทดลองเปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 3%)			
	ปริมาณของแข็งระเหยได้ (%)			ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ (%)	ปริมาณของแข็งระเหยได้ (%)			ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	1.280	1.280	1.280	0.00	1.280	1.280	1.280	0.00
1	1.068	1.089	1.079	15.74	1.123	1.118	1.121	12.45
3	1.101	1.109	1.105	13.66	1.152	1.048	1.100	14.06
5	1.076	1.054	1.065	16.80	1.049	0.964	1.006	21.37
7	0.874	1.041	0.958	25.16	0.908	0.910	0.909	29.00
9	1.038	0.842	0.940	26.55	0.947	0.857	0.902	29.55
11	0.905	0.887	0.896	30.00	0.824	0.915	0.870	32.06
13	0.831	0.676	0.754	41.12	0.898	0.810	0.854	33.28
15	0.685	0.744	0.714	44.19	0.716	0.863	0.790	38.32

ตารางที่ ค-13 ปริมาณของแข็งระเหยได้ (%) และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ (%) ของชุดการทดลองที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันกับกากมัน (1:3)				ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง เปลือกมันกับน้ำเสี้ยว (1:3)			
	ปริมาณของแข็งระเหยได้ (%)			ประสิทธิภาพการ กำจัดของแข็ง ระเหยได้ (%)	ปริมาณของแข็งระเหยได้ (%)			ประสิทธิภาพการ กำจัดของแข็ง ระเหยได้ (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	1.280	1.280	1.280	0.00	1.280	1.280	1.280	0.00
1	1.031	1.076	1.054	17.69	1.167	1.145	1.156	9.70
3	1.003	1.022	1.013	20.89	1.084	1.095	1.089	14.89
5	1.152	0.824	0.988	22.84	1.123	1.029	1.076	15.96
7	0.747	0.994	0.870	32.02	0.951	0.867	0.909	28.99
9	0.736	0.732	0.734	42.65	0.936	0.788	0.862	32.68
11	0.697	0.640	0.668	47.78	0.824	0.809	0.816	36.23
13	0.601	0.664	0.632	50.61	0.813	0.757	0.785	38.67
15	0.522	0.415	0.468	63.43	0.769	0.631	0.700	45.34
วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่าง กากมันกับน้ำเสี้ยว (1:3)							
	ปริมาณของแข็งระเหยได้ (%)			ประสิทธิภาพการ กำจัดของแข็ง ระเหยได้ (%)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย					
0	1.280	1.280	1.280	0.00				
1	1.071	1.245	1.158	9.53				
3	1.107	1.004	1.055	17.54				
5	0.991	0.995	0.993	22.41				
7	0.970	0.946	0.958	25.13				
9	0.897	0.996	0.946	26.07				
11	0.915	0.945	0.930	27.31				
13	0.856	0.666	0.761	40.55				
15	0.630	0.631	0.631	50.74				

ตารางที่ ค-14 ค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

วันที่	ค่าพีเอช (pH)					
	ชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลัง			ชุดการทดลองกากมันสำปะหลัง		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	8.208	8.179	8.194	8.121	7.955	8.038
1	6.499	6.589	6.544	6.372	6.279	6.326
3	6.373	6.301	6.337	6.072	6.145	6.109
5	6.348	6.425	6.387	6.190	6.142	6.166
7	6.371	6.403	6.387	6.284	6.136	6.210
9	6.419	6.446	6.433	6.337	6.309	6.323
11	6.484	6.421	6.453	6.428	6.349	6.389
13	6.530	6.456	6.493	6.375	6.346	6.361
15	6.514	6.512	6.513	6.430	6.386	6.408
วันที่	ชุดการทดลองน้ำเสีย			ชุดการทดลองเปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 3%)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
	0	7.914	8.019	7.967	7.945	7.921
1	6.566	6.582	6.574	6.450	6.601	6.526
3	6.811	6.760	6.786	6.754	6.739	6.747
5	6.777	6.801	6.789	6.679	6.697	6.688
7	6.793	6.758	6.776	6.703	6.757	6.730
9	6.764	6.784	6.774	6.646	6.642	6.644
11	6.808	6.763	6.786	6.651	6.656	6.654
13	6.827	6.839	6.833	6.768	6.711	6.740
15	6.850	6.868	6.859	6.759	6.838	6.799
วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมัน (1:3)			ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับน้ำเสีย (1:3)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
	0	8.114	8.077	8.096	8.054	8.063
1	6.110	6.175	6.143	6.727	6.728	6.728
3	6.101	6.082	6.092	6.671	6.695	6.683
5	6.247	6.175	6.211	6.779	6.830	6.805
7	6.232	6.237	6.235	6.820	6.841	6.831
9	6.231	6.274	6.253	6.842	6.810	6.826
11	6.247	6.269	6.258	6.815	6.840	6.828
13	6.274	6.255	6.265	6.851	6.864	6.858
15	6.272	6.397	6.335	6.824	6.870	6.847

ตารางที่ ค-14 ค่าพีเอชของชุดการทดลองที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

วันที่	ชุดการทดลองหมักรวมระหว่างกากมันกับน้ำเสีย (1:3)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	8.149	8.093	8.121
1	6.638	6.613	6.626
3	6.869	6.629	6.749
5	6.737	6.709	6.723
7	6.721	6.721	6.721
9	6.737	6.752	6.745
11	6.770	6.754	6.762
13	6.754	6.802	6.778
15	6.819	6.801	6.810

ตารางที่ ค-15 ปริมาณกรดไขมันระเหย ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่างของชุดการทดลองที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

วันที่	ชุดการทดลองเปลือกมันสำปะหลัง						
	VFA (mg CH ₃ COOH/L)			ALK (mg CaCO ₃ /L)			VFA/ALK
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
1	75.00	75.00	75.00	700.00	700.00	700.00	0.107
3	50.00	50.00	50.00	600.00	575.00	587.50	0.085
5	25.00	25.00	25.00	525.00	525.00	525.00	0.048
7	25.00	25.00	25.00	550.00	525.00	537.50	0.047
9	25.00	25.00	25.00	525.00	525.00	525.00	0.048
11	25.00	25.00	25.00	600.00	575.00	587.50	0.043
13	50.00	50.00	50.00	625.00	625.00	625.00	0.080
15	50.00	50.00	50.00	675.00	675.00	675.00	0.074
วันที่	ชุดการทดลองกากมันสำปะหลัง						
	VFA (mg CH ₃ COOH/L)			ALK (mg CaCO ₃ /L)			VFA/ALK
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
1	100.00	100.00	100.00	550.00	550.00	550.00	0.182
3	50.00	50.00	50.00	500.00	500.00	500.00	0.100
5	25.00	25.00	25.00	525.00	550.00	537.50	0.047
7	25.00	25.00	25.00	675.00	675.00	675.00	0.037
9	25.00	25.00	25.00	725.00	725.00	725.00	0.034
11	50.00	50.00	50.00	725.00	700.00	712.50	0.070
13	50.00	50.00	50.00	675.00	650.00	662.50	0.075
15	25.00	25.00	25.00	775.00	775.00	775.00	0.032

ตารางที่ ค-15 ปริมาณกรดไขมันระเหย ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่างของชุดการทดลองที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

วันที่	ชุดการทดลองน้ำเสีย						
	VFA (mg CH ₃ COOH/L)			ALK (mg CaCO ₃ /L)			VFA/ALK
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
1	1,150.00	1,200.00	1,175.00	1,675.00	1,675.00	1,675.00	0.701
3	75.00	75.00	75.00	2,075.00	2,075.00	2,075.00	0.036
5	100.00	100.00	100.00	1,500.00	1,500.00	1,500.00	0.067
7	75.00	100.00	87.50	1,800.00	1,800.00	1,800.00	0.049
9	75.00	75.00	75.00	1,650.00	1,650.00	1,650.00	0.045
11	75.00	75.00	75.00	1,800.00	1,800.00	1,800.00	0.042
13	100.00	100.00	100.00	2,025.00	2,000.00	2,012.50	0.050
15	75.00	75.00	75.00	2,000.00	1,950.00	1,975.00	0.038
วันที่	ชุดการทดลองเปลือกมันปรับสภาพ (NaOH 3%)						
	VFA (mg CH ₃ COOH/L)			ALK (mg CaCO ₃ /L)			VFA/ALK
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
1	725.00	700.00	712.50	925.00	950.00	937.50	0.760
3	475.00	475.00	475.00	1,275.00	1,250.00	1,262.50	0.376
5	475.00	475.00	475.00	1,025.00	1,000.00	1,012.50	0.469
7	475.00	500.00	487.50	1,175.00	1,125.00	1,150.00	0.424
9	450.00	450.00	450.00	1,075.00	1,050.00	1,062.50	0.424
11	475.00	450.00	462.50	1,100.00	1,100.00	1,100.00	0.420
13	400.00	400.00	400.00	1,250.00	1,275.00	1,262.50	0.317
15	500.00	525.00	512.50	1,500.00	1,500.00	1,500.00	0.342
วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมัน (1:3)						
	VFA (mg CH ₃ COOH/L)			ALK (mg CaCO ₃ /L)			VFA/ALK
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
1	275.00	275.00	275.00	425.00	450.00	437.50	0.629
3	75.00	75.00	75.00	500.00	500.00	500.00	0.150
5	75.00	75.00	75.00	575.00	575.00	575.00	0.130
7	75.00	75.00	75.00	525.00	525.00	525.00	0.143
9	50.00	50.00	50.00	575.00	575.00	575.00	0.087
11	50.00	50.00	50.00	550.00	550.00	550.00	0.091
13	75.00	50.00	62.50	550.00	550.00	550.00	0.114
15	50.00	50.00	50.00	550.00	550.00	550.00	0.091

ตารางที่ ค-15 ปริมาณกรดไขมันระเหย ค่าความเป็นด่าง และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่างของชุดการทดลองที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับน้ำเสีย (1:3)						
	VFA (mg CH ₃ COOH/L)			ALK (mg CaCO ₃ /L)			VFA/ALK
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
1	475.00	550.00	512.50	1,750.00	1,725.00	1,737.50	0.295
3	150.00	150.00	150.00	1,800.00	1,775.00	1,787.50	0.084
5	150.00	150.00	150.00	1,850.00	1,850.00	1,850.00	0.081
7	150.00	150.00	150.00	1,925.00	1,925.00	1,925.00	0.078
9	100.00	100.00	100.00	1,850.00	1,850.00	1,850.00	0.054
11	100.00	75.00	87.50	1,900.00	1,875.00	1,887.50	0.046
13	75.00	100.00	87.50	1,800.00	1,800.00	1,800.00	0.049
15	100.00	75.00	87.50	1,750.00	1,750.00	1,750.00	0.050
วันที่	ชุดการทดลองหมักร่วมระหว่างกากมันกับน้ำเสีย (1:3)						
	VFA (mg CH ₃ COOH/L)			ALK (mg CaCO ₃ /L)			VFA/ALK
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
1	875.00	900.00	887.50	1,550.00	1,575.00	1,562.50	0.568
3	175.00	150.00	162.50	1,575.00	1,525.00	1,550.00	0.105
5	275.00	225.00	250.00	1,675.00	1,700.00	1,687.50	0.148
7	175.00	175.00	175.00	1,725.00	1,625.00	1,675.00	0.105
9	100.00	100.00	100.00	1,950.00	1,750.00	1,850.00	0.054
11	100.00	75.00	87.50	1,675.00	1,650.00	1,662.50	0.053
13	100.00	100.00	100.00	1,600.00	1,600.00	1,600.00	0.063
15	100.00	75.00	87.50	1,650.00	1,625.00	1,637.50	0.053



ใบรายงานผล

ชื่อตัวอย่าง (ตามที่ผู้นำส่งระบุ): กากตะกอนจากการหมักก๊าซชีวภาพ

เลขที่ขอรับบริการ : 215/60

วันที่รับตัวอย่าง : 19 เมษายน 2560

ผู้ขอรับบริการ : คุณยุวดี มาทอง ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

วิธีตรวจสอบ/วิเคราะห์ : N : ย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด H_2SO_4 วัดปริมาณไนโตรเจน โดย Kjeldahl methodP : ย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด H_2SO_4 วัดปริมาณด้วย Colorimetric methodK : ย่อยสลายตัวอย่างด้วย H_2SO_4 วัดปริมาณด้วย Atomic Emission Spectrophotometer

ผลการตรวจสอบ/วิเคราะห์:

ตัวอย่าง (ตามที่ผู้นำส่งระบุ)	N (mg/kg by wet weight)	P (mg/kg by wet weight)	K (mg/kg by wet weight)
ตัวอย่าง 1	3,858	437	269
ตัวอย่าง 2	4,367	382	272
ตัวอย่าง 3	4,645	356	289

(ดร.บุษรา สินบัวทอง)

นักวิทยาศาสตร์/ผู้วิเคราะห์

๙๙ / ๙๕ / ๒๕๖๐

(นางศิริวัลย์ สร้อยกล่อม)

นักวิจัยชำนาญการพิเศษ/ผู้วิเคราะห์

๙๙ / ๒๕๖ / ๒๕๖๐

(นางศิริวัลย์ สร้อยกล่อม)

ผู้จัดการห้องปฏิบัติการเคมีและสิ่งแวดล้อม

๙๙ / ๙๕ / ๒๕๖๐



ผลการตรวจสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่าง/รายการที่ได้ระบุไว้เท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปโฆษณาหรือการคัดถ่ายสำเนา หรือการนำผลบางส่วนไปเผยแพร่ต่อสาธารณะ ต้องได้รับการอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ห้องปฏิบัติการเคมีและสิ่งแวดล้อม ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
โทรศัพท์ 02-942-8740 โทรสาร 02-942-8748

ภาพที่ ค-1 ใบรายงานผลการวิเคราะห์ปริมาณ N, P และ K ของกากตะกอน
จากกระบวนการหมักร่วม

หมายเหตุ:

ตัวอย่างที่ 1 คือ กากตะกอนจากการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับกากมันสำปะหลัง อัตราส่วน 1:3

ตัวอย่างที่ 2 คือ กากตะกอนจากการหมักร่วมระหว่างเปลือกมันกับน้ำเสีย อัตราส่วน 1:3

ตัวอย่างที่ 3 คือ กากตะกอนจากการหมักร่วมระหว่างกากมันกับน้ำเสีย อัตราส่วน 1:3

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวยุวดี มาทอง เกิดเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จ การชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนปราจิณราษฎรอำรุง จ.ปราจีนบุรี ในปีการศึกษา 2553 สำเร็จ การศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2558

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในการประชุมเชิงวิชาการระดับชาติ

ยุวดี มาทอง, ดาวัลย์ วิวรรณเดชะ และ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์. "การใช้ประโยชน์เปลือก มันสำปะหลังในการผลิตก๊าซชีวภาพ" เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่ง ประเทศไทย ครั้งที่ 13, โรงแรม ดิเอ็มเพลส เชียงใหม่. วันที่ 31 พฤษภาคม - 2 มิถุนายน 2560.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY