การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกากของเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรร่วมกับตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง

น.ส.ปิยะวดี ศรีวิชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

BIOGAS PRODUCTION FROM CO - DIGESTION OF WASTE FROM MODIFIED TAPIOCA S
TARCH PRODUCTION WITH SHIRMP POND SEDIMENT

Miss Piyavadee Srivichai

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Science
Inter-Department of Environmental Science
GRADUATE SCHOOL
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกากของเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรร่วมกับตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง
โดย	น.ส.ปิยะวดี ศรีวิชัย
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

.... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนูญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พฤกษาสิทธิ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ชินพงศ์ วังใน)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปิยะวดี ศรีวิชัย : การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกากของเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรร่วมกับตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง. (BIOGAS PRODUCTION FROM CO - DIGESTION OF WASTE FROM MODIFIED TAPIOCA STARCH PRODUCTION WITH SHIRMP POND SEDIMENT) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการหมักร่วมระหว่างกากตะกอนแป้ง (Starch sludge, SS) กับตะกอนสลัดจ์ (Activated biosludge, ABS) จากระบบบำบัดน้ำเสียแอกติเวเต็ดสลัดจ์ของโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และตะกอนเลน (Shrimp pond sediment, SPS) จากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล ด้วยระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ซึ่งได้ทำการทดลองเบื้องต้นด้วยวิธีบีเอ็มพีโดยออกแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง และมีการใช้หลักการพื้นผิวตอบสนองของโปรแกรม Design Expert (Trial version 10) เพื่อเลือกอัตราส่วนการหมักร่วมที่เหมาะสม พบว่าที่อัตราส่วน (SS:SPS และ SS:ABS) เท่ากับ 1:0 และ 1:1 มีความเหมาะสมเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูง และระบบมีความเสถียรภาพ โดยอัตราส่วนดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการเดินระบบหมักกรดด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทซ์ โดยศึกษาผลของของแข็งระเหยเริ่มต้น (TVS) ซึ่งพบว่า TVS เริ่มต้นร้อยละ 2 อัตราส่วนการหมักร่วม 1:1 ของ SS:SPS และ SS:ABS มีความเหมาะสม เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยสูงเท่ากับ 319 และ 353 กรัมอะซิติก/กิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าถังหมักกรดมีเสถียรภาพมากกว่าการหมัก SS เพียงอย่างเดียว และน้ำหมักกรดที่ผลิตได้จากถัง CSTR ถูกนำไปใช้เพื่อศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้น (OLR) ที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังหมักก๊าซโดยใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น (ABR) โดยพบว่าเมื่อเพิ่ม OLR ของทั้งสองชุดการหมักร่วม จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และคุณภาพของน้ำที่ปล่อยออกแย่ลง และพบว่าที่ OLR 0.2 Kg COD/m^3.day มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด เท่ากับ 404 และ 367 L/Kg TVS_{added} สำหรับการหมักร่วมของ SS:SPS และ SS:ABS ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีร้อยละมีเทนสูงเท่ากับ 69.30 และ 72.06 ตามลำดับ

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต ....
ปีการศึกษา	2562	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....

5887830020 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Modified tapioca starch, Starch sludge, Activated biosludge, Shrimp pond sediment

Piyavadee Srivichai :
BIOGAS PRODUCTION FROM CO - DIGESTION OF WASTE FROM MODIFIED TAPIOCA STARCH PRODUCTION WITH SHIRMP POND SEDIMENT
. Advisor: Prof. ORATHAI CHAVALPARIT

The aim of this research was to study the anaerobic co-digestion (AcoD) of starch sludge (SS) from a modified tapioca starch plant with activated biosludge (ABS) and marine shrimp pond sediment (SPS) using two-stage anaerobic digestion. The Biochemical Methane Potential (BMP) method designed by Central Composite Design (CCD) was initially used to experiment. The Response Surface Methodology (RSM) was applied to select the optimum AcoD ratio. The results indicated that the AcoD ratios of SS:SPS and SS:ABS at 1:0 and 1:1 were appropriate because of their high biogas yields and more system stability, respectively. These ratios were taken to test in acidogenic phase using a continuous stirred tank reactor (CSTR). At the initial TVS 2% of the AcoD ratios 1:1 of SS:SPS and SS:ABS were optimum. Since they could achieve the high volatile fatty acid yield of 319 and 353 g acetic/Kg TVS_{added}, respectively. And their system stability was higher than in the single SS digestion. The acid solution obtained from CSTR was applied to study the effects of initial OLR on the biogas production using the anaerobic baffled reactor (ABR). The results in both AcoD showed that an increase in the OLR leads to a decrease in the biogas yield and the quality of effluent. At the OLR 0.2 Kg COD/m^3.day of the both co-digestion of SS:SPS and SS:ABS achieved the highest biogas yield of 404 and 367 L/Kg TVS_{added}, respectively. Their biogas produced contained the high methane contents of 69.30 and 72.06%, respectively.

Field of Study:	Environmental Science	Student's Signature ....
Academic Year:	2019	Advisor's Signature ....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน โดยผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือและอนุเคราะห์ ดังนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ที่ค่อยให้คำแนะนำปรึกษา และช่วยเหลือในทุกอย่างตลอดระยะเวลาการศึกษาวิจัยจนทำให้งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วย

ขอขอบคุณ สานักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสานักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สาหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยสำหรับความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนการศึกษา และวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรรศนีย์ พฤกษาสิทธิ์ (ประธานกรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ (กรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ (กรรมการ) และดร.ชินพงศ์ วังใน (กรรมการภายนอก) สำหรับความกรุณาที่เสียสละเวลาในการคำแนะนำ และชี้แนะในประเด็นต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยเพื่อให้งานวิจัยมีความถูกต้องและสมบรูณ์มากยิ่งขึ้น

ขอบคุณ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้โอกาสที่สำคัญในการศึกษาต่อระดับปริญญาเอก ตลอดจนคณาจารย์ที่ช่วยอบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ให้แก่ผู้วิจัย

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ สำหรับการเคียงข้างฟันฝ่าอุปสรรคมาด้วยกันจนถึงวันที่เราสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว สำหรับกำลังใจที่สำคัญ และค่อยเป็นแรงผลักดันที่สนับสนุนให้วิทยานิพนธ์สำเร็จเรียบร้อยเป็นไปได้ด้วยดี

ปิยะวดี ศรีวิชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาของปัญหาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 ขอบเขตการศึกษา 3

1.4 สมมติฐาน 3

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 แป้งมันสำปะหลัง 5

2.2 โรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรบริษัทอินกรีดิออน จำกัด 9

2.3 ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล 15

2.4 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ 16

2.5 การประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) 30

2.6 การหมักร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Co-digestion) 31

2.7 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) 32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.8 เทคนิคการนำเสนอข้อมูลแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) 33

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 46

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย 47

3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของวัสดุหมักและหัวเชื้อจุลินทรีย์ 50

3.3 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมโดยใช้วิธี BMP 54

3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจาการหมักร่วมโดยใช้ระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน 57

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียและการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของจุลินทรีย์ภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR 60

3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง 61

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล 64

3.8 วิธีวิเคราะห์ 65

บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง 67

4.1 ลักษณะสมบัติของกากตะกอนเศษแป้ง ตะกอนสลัดจ์ และตะกอนเลน 68

4.2 ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการหมักร่วมของกากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์ และตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยวิธี BMP 72

4.3 ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทช์ 96

4.4 ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น 110

4.5 การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียและการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของจุลินทรีย์ภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR 133

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 145

5.1 สรุปผลการวิจัย 145

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ข้อเสนอแนะ 147

บรรณานุกรม....... 157

ประวัติผู้เขียน....... 173

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังดิบเทียบกับแป้งข้าวโพด 5

ตารางที่ 2.2 ปริมาณน้ำเสียจากแต่ละแหล่งกำเนิดของโรงงาน 10

ตารางที่ 2.3 ปริมาณและลักษณะน้ำเสียที่เข้าและปล่อยออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย 11

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของถังหมักไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว และสองขั้นตอน 23

ตารางที่ 2.5 สารอาหารที่จำเป็นในกระบวนการหมักย่อยสร้างก๊าซชีวภาพ 28

ตารางที่ 2.6 สารเคมีที่มีผลยับยั้ง และมีความเป็นพิษต่อการหมักย่อย 29

ตารางที่ 2.7 แสดงจำนวนตำแหน่งการทดลอง CCD ตามจำนวนตัวแปรอิสระ 33

ตารางที่ 2.8 ความเหมาะสมของวัสดุหมักแต่ละชนิดในการหมักก๊าซชีวภาพ 45

ตารางที่ 3.1 รหัสและค่าตัวแปรจริงของวัสดุหมักแต่ละชนิด 54

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปร และรหัสตัวแปรในแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วม 55

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและค่าที่ใช้ในการทดลอง BMP 61

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและค่าที่ใช้ในการทดลองผลิตกรดอินทรีย์ระเหยจากถังหมักกรด CSTR 62

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรและค่าที่ใช้ในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากถังหมักก๊าซ ABR 63

ตารางที่ 3.6 วิธีวิเคราะห์ในการทดลอง BMP CSTR และ ABR 65

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของกากตะกอนแป้งและตะกอนสลัดจ์ 69

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของตะกอนเลน 70

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติของหัวเชื้อที่ใช้ในการหมัก 71

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและลักษณะสมบัติของการทดลอง BMP ที่ใช้ความเข้มข้นของ SS และ SPS ต่างกัน 73

ตารางที่ 4.5 ความเหมาะสมของสมการแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการทำนายการหมักร่วมระหว่าง SS:SPS 77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.6 ANOVA ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ SPS ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 79

ตารางที่ 4.7 ความพึงพอใจ (Desirability) ที่อัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS ต่างๆ 81

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและลักษณะสมบัติของการทดลอง BMP ที่ใช้ความเข้มข้นของ SS และ ABS ต่างกัน 86

ตารางที่ 4.9 ความเหมาะสมของสมการแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการทำนายการหมักร่วมระหว่าง SS:ABS 89

ตารางที่ 4.10 ANOVA ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ ABS และประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 90

ตารางที่ 4.11 ความพึงพอใจ (Desirability) ที่อัตราส่วนของ SS:ABS ต่างๆ 92

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยเทียบต่อน้ำหนักวัสดุหมัก 97

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 98

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหยของการหมักร่วม SS:SPS 101

ตารางที่ 4.15 ลักษณะของน้ำหมักกรดที่ได้จากการหมักร่วม SS:SPS 102

ตารางที่ 4.16 ลักษณะของกากตะกอนที่เหลือจากถัง CSTR 103

ตารางที่ 4.17 ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยต่อน้ำหนักวัสดุหมัก 105

ตารางที่ 4.18 องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหยในแต่ละอัตราส่วนการหมัก 107

ตารางที่ 4.19 ลักษณะของน้ำหมักกรดที่ได้จากการหมักร่วม SS:ABS 108

ตารางที่ 4.20 ลักษณะกากตะกอนที่เหลือจากถัง CSTR 109

ตารางที่ 4.21 น้ำหมักกรดจากการจากการหมักร่วม SS:SPS, SS:ABS และการหมัก SS เพียงอย่างเดียว 110

ตารางที่ 4.22 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนจากตะกอนสลัดจ์ และหมักร่วมกับวัสดุอื่นๆ 116

ตารางที่ 4.23 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถัง ABR 118

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.24 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการศึกษาที่เกี่ยวข้อง........120

ตารางที่ 4.25 อัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพด่างของน้ำทิ้งจากถัง ABR ที่ OLR ต่างๆ......122

ตารางที่ 4.26 ลักษณะน้ำทิ้งจากถัง CSTR และ ABR จากการหมักร่วม SS และ SPS ที่อัตราส่วน 1:1 129

ตารางที่ 4.27 คุณภาพน้ำที่ปล่อยออกจากถัง CSTR และ ABR จากการหมักร่วม SS และ ABS ...131

ตารางที่ 4.28 ศักยภาพในการใช้ SS SPS และ ABS เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานกรณีศึกษา..132

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูป 9

รูปที่ 2.2 แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปร บริษัทอินกรีดิออน จำกัด 12

รูปที่ 2.3 การทำงานของระบบเอสบีอาร์ 14

รูปที่ 2.4 กระบวนการหมักย่อยของสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ 18

รูปที่ 2.5 ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบช้า (Low-rate anaerobic digester) (Marmara University, 2016) 20

รูปที่ 2.6 บ่อหมักไร้ออกซิเจนแบบเร็ว (High-rate anaerobic digester) 21

รูปที่ 2.7 ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน 22

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการศึกษาปัจจัยเรื่องของอุณหภูมิที่มีต่อระยะเวลาการหมัก 25

รูปที่ 2.9 ขวด BMP 31

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างรูปแสดงปัจจัย แกน และจุดศูนย์กลางของ CCD ของตัวแปร 2 ปัจจัย 33

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างแสดงการนำเสนอข้อมูลแบบพื้นที่ผิวตอบสนองแบบต่างๆ ของ 2 ตัวแปร แสดงตำแหน่งที่ให้ค่าสูงสุดที่จุดต่างๆ (a) สูงสุดตรงกลาง (b) สูงสุดเป็นเนินตรงกลาง (c) สูงสุดที่ขอบของพื้นที่การทดลองด้านหนึ่ง (d) สูงสุดที่มุมทั้งสี่ด้าน (e) สูงสุดที่ขอบของพื้นที่การทดลองทั้งสองด้าน.34

รูปที่ 3.1 ผังการไหลของการศึกษาวิจัย 46

รูปที่ 3.2 การเติมสารในขวด BMP 47

รูปที่ 3.3 ชุดทดลอง BMP 47

รูปที่ 3.4 ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digester) 48

รูปที่ 3.5 ถัง CSTR 48

รูปที่ 3.6 ถัง ABR 48

รูปที่ 3.7 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter) 49

รูปที่ 3.8 กากตะกอนแป้ง 50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.9 ตะกอนสลัดจ์ 51

รูปที่ 3.10 จุดเก็บตัวอย่างกากตะกอนแป้งและตะกอนสลัดจ์ 52

รูปที่ 3.11 ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล 53

รูปที่ 3.12 การตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ 56

รูปที่ 3.13 ภาพตัดขวางของถัง ABR 59

รูปที่ 4.1 การกระจายแบบแจกแจงปกติของส่วนตกค้างของข้อมูล 75

รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ 75

รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของส่วนตกค้างกับอันดับการทดลอง 76

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงจากการทดลอง BMP และค่าที่ได้จากการทำนายของสมการ Reduced quadratic 79

รูปที่ 4.5 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ SPS ต่อ 80

รูปที่ 4.6 ค่า pH ของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS 82

รูปที่ 4.7 อัตราส่วน VFA/ALK ของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS 83

รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS.. 84

รูปที่ 4.9 การกระจายแบบแจกแจงปกติของส่วนตกค้างของข้อมูล 87

รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของส่วนตัวค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ 87

รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของส่วนตัวค้างกับอันดับการทดลอง 88

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงจากการทดลอง BMP และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Reduced quadratic 91

รูปที่ 4.13 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ ABS ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 91

รูปที่ 4.14 ค่า pH ของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS 93

รูปที่ 4.15 อัตราส่วน VFA/ALK ของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS 94

รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมของ SS และ ABS 95

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายของการหมักร่วม SS:SPS 96

รูปที่ 4.18 อุณหภูมิภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:SPS 99

รูปที่ 4.19 ค่า pH ภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:SPS 100

รูปที่ 4.20 อัตราส่วน VFA/ALK ภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:SPS 100

รูปที่ 4.21 กากตะกอนที่เหลือจากถังหมักกรด CSTR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS 103

รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายของการหมักร่วม SS:ABS 104

รูปที่ 4.23 อุณหภูมิภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:ABS 105

รูปที่ 4.24 ค่า pH ภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:ABS 106

รูปที่ 4.25 อัตราส่วน VFA/ALK ภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:ABS 107

รูปที่ 4.26 กากตะกอนที่เหลือจากถังหมักกรดจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS 109

รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละ OLR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS 112

รูปที่ 4.28 ร้อยละมีเทนของแต่ละ OLR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS 113

รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนของแต่ละ OLR 113

รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละ OLR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS 114

รูปที่ 4.31 ร้อยละมีเทนที่ของแต่ละ OLR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS 115

รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และมีเทนของแต่ละ OLR 116

รูปที่ 4.33 ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย สภาพด่าง และอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพด่างของถัง ABR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS ที่ OLR ต่างๆ 123

รูปที่ 4.34 ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย สภาพด่าง และอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพด่างของถัง ABR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS ที่ OLR ต่างๆ 123

รูปที่ 4.35 ค่า pH ของน้ำทิ้งจากถัง ABR ของการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS ที่ OLR ต่างๆ .. 124

รูปที่ 4.36 ค่า pH ของน้ำทิ้งจากถัง ABR ของการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS ที่ OLR ต่างๆ .. 125

รูปที่ 4.37 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถัง ABR ของการหมักร่วม 126

รูปที่ 4.38 ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งกจากถัง ABR ของการหมักร่วม 126

รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของถัง ABR ของการหมักร่วม 128

รูปที่ 4.40 ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากถัง ABR ของการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS ที่ OLR ต่างๆ. 128

รูปที่ 4.41 ภาพรวมการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS........ 129

รูปที่ 4.42 ภาพรวมการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS 130

รูปที่ 4.43 ลักษณะน้ำเสียภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS133

รูปที่ 4.44 ลักษณะน้ำเสียภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS 134

รูปที่ 4.45 ปริมาณแบคทีเรียและอาร์เคียจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS........ 136

รูปที่ 4.46 ประเภทและปริมาณของอาร์เคียจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS 137

รูปที่ 4.47 กลไกการย่อยสลายของการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS........ 138

รูปที่ 4.48 ปริมาณแบคทีเรียและอาร์เคียจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS 140

รูปที่ 4.49 ประเภทและปริมาณของอาร์เคียจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS........ 140

รูปที่ 4.50 กลไกการย่อยสลายของการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS 142

รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบจำนวนอาร์เคียระหว่างสองการหมักร่วม SS:SPS และ SS:ABS 143

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหาและความสำคัญ

ประเทศไทยจัดเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยมีกำลังการผลิตมากกว่าปีละ 3 ล้านตัน มีเทคโนโลยีการผลิตแป้งมันที่สูงเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ และได้มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีไปสู่ประเทศเพื่อนบ้าน แป้งมันสำปะหลัง จึงถือได้ว่าเป็น "แป้งไทย" ที่มีคุณภาพสูงและราคาถูกที่สุด โดยในปีพ.ศ. 2549 ประเทศไทยมีโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง 58 โรงงาน เป็นโรงงานขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิตมากกว่า 200 ตันต่อวัน จำนวน 2 โรงงาน ที่เหลือเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตต่ำกว่า 200 ตันต่อวัน (สุวลักษณ์ อัศวสันติ และ อรรณพ นพรัตน์ และรัชนีพร อ้ายตั้ง, 2549) ผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลังส่วนใหญ่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ซึ่งแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความต้องการใช้เพิ่มขึ้นทั้งตลาดในประเทศและต่างประเทศ ในปีพ.ศ.2554 ร้อยละ 70 ของปริมาณการผลิตแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทั้งหมดเป็นการผลิตเพื่อส่งออก ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 30 ผลิตเพื่อใช้ภายในประเทศ โดยมีโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรจำนวน 30 โรงงาน ทั้งที่เป็นโรงงานที่ตั้งรวมอยู่กับโรงงานแป้งมันสำปะหลังดิบและเป็นโรงงานที่ตั้งแยกออกมา มีกำลังการผลิตรวมประมาณ 1.5 ล้านตันต่อปี ผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่สำคัญของประเทศไทย อาทิเช่น กลุ่มบริษัทสยามควอลิตี้สตาร์ช กลุ่มบริษัทเนชั่นแนลสตาร์ช แอนด์ เคมิเคิล (ไทยแลนด์) จำกัด มหาชน (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็นบริษัทอินกรีดิออน จำกัด) และกลุ่มผู้ผลิตอิสระอื่น ๆ โดยผู้ผลิตเหล่านี้จะคิดค้นเทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังให้มีคุณสมบัติเฉพาะ อาทิ ความเหนียว การละลายในน้ำเย็น การทนความร้อนและทนกรด เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องมากมาย โดยใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร กระดาษ สิ่งทอ กาว เป็นต้น เพื่อเพิ่มมูลค่าและตอบสนองความต้องการของตลาดทั้งในประเทศและตลาดส่งออกให้มากยิ่งขึ้น (สถาบันอาหารอุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิเพื่อสถาบันอาหาร, 2554)

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตสูงประมาณ 25 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของแป้ง และมีปริมาณน้ำเสียเกิดขึ้นสูงด้วยเช่นกัน ซึ่งโรงงานที่ตั้งอยู่ในเขตเมืองนิยมบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดทางชีวภาพแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge) โดยในการเดินระบบจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรต่างๆ อาทิเช่น ไฟฟ้าในการเดินระบบ การเติมอากาศ และการเติม

สารเคมีเพื่อเพิ่มธาตุอาหารที่จำเป็นให้น้ำเสียเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย มีตะกอนสลัดจ์เกิดขึ้นเป็นปริมาณมากจากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ โรงงานต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าใช้จ่ายในการเดินระบบบำบัดน้ำเสีย ในการจ้างบริษัทกำจัดกากตะกอนสลัดจ์ (Natchari Chuchat และ Wanwisa Skolpap, 2015; Vlyssides, 2004) นอกจากนี้ยังพบว่ามีของเสียอีกชนิดหนึ่งจากกระบวนการผลิตคือ กากตะกอนแป้งดัดแปรจากการล้างถังปฏิกริยา ซึ่งจะถูกขายให้กับพ่อค้าในพื้นที่นำไปใช้ในการผลิตอาหารสัตว์บางส่วน แต่ยังมีกากตะกอนแป้งดัดแปรเหลือจากการขายทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำไปกำจัดเช่นกัน โดยทั้งตะกอนสลัดจ์และกากตะกอนแป้งดัดแปรจัดได้ว่าเป็นกากของเสียที่มีสารอินทรีย์สูงและมีปริมาณมาก จึงมีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งการหมักร่วมระหว่างกากตะกอนแป้งและตะกอนสลัดจ์น่าจะช่วยปรับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนให้เหมาะสมกว่าการหมักวัสดุเพียงอย่างเดียว และจากการสำรวจพบว่าในพื้นที่อำเภอแกลงที่โรงงานที่ศึกษาตั้งอยู่มีอัตราการเกิดตะกอนเลนนากุ้งสูงถึงปีละ 620 ล้านลูกบาศก์เมตร ตะกอนเลนถูกกำจัดโดยการสูบทิ้งลงแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งเป็นการจัดการที่ไม่เหมาะสมส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์และสิ่งแวดล้อม (Anh และคณะ, 2010) จากปริมาณตะกอนเลนที่เกิดขึ้นจำนวนมากและมีความเป็นไปได้ใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนเมื่อหมักร่วมกับกากตะกอนแป้ง ตะกอนเลนจึงมีความเหมาะสมนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้

อีกทั้งพบว่าโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีความต้องการพลังงานทดแทนเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซื้อไฟฟ้า ดังนั้นการนำของเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานมาหมักก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจนำมาใช้ในการจัดการและลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากของเสียโดยวิธีการจัดการแบบเดิม งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการหมักร่วมระหว่างกากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์ และตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล โดยหาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละขั้นตอนของระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทช์เป็นถังหมักกรด และถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นเป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และฟาร์มกุ้งต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อหาอัตราส่วนของวัสดุหมักร่วมระหว่างกากตะกอนแป้งกับตะกอนสลัดจ์ และกากตะกอนแป้งกับตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดโดยวิธีบีเอ็มพี

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นของวัสดุหมักร่วมในข้อ 1.2.1 ที่มีผลต่อการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยโดยการหมักในถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทช์

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นของน้ำหมักกรดจากวัสดุหมักร่วมในข้อ 1.2.1 ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นการไหล

1.2.4 เพื่อศึกษาปฏิกิริยาการผลิตก๊าซมีเทนในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นการไหล

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 กากตะกอนแป้งและตะกอนสลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นของเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ของบริษัท อินกรีดิออน จำกัด ที่ตั้งอยู่ในจังหวัดระยอง ส่วนตะกอนเลนนำมาจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล ซึ่งเป็นบ่อดินตั้งอยู่ในพื้นที่อำเภอแกลง จังหวัดระยอง

1.3.2 ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักร่วม ได้แก่ 1) กากตะกอนแป้งกับตะกอนสลัดจ์และ 2) กากตะกอนแป้งกับตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล โดยการทดลองด้วยวิธี Biochemical methane potential (BMP) ออกแบบการทดลองแบบ Central composite design (CCD) แต่ละอัตราส่วนทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยมีการเปรียบเทียบกับการหมักก๊าซชีวภาพจากวัสดุเพียงชนิดเดียว

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยโดยปรับเปลี่ยนอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 6 และ 12 กิโลกรัมของของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์เป็นถังหมักกรด โดยเลือกอัตราส่วนของการหมักร่วมระหว่างกากตะกอนแป้งกับตะกอนสลัดจ์ และกากตะกอนแป้งกับตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดจากการทดลอง BMP มาใช้

1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยปรับเปลี่ยนอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นระหว่าง 0.2-1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นซึ่งใช้เป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3.5 ศึกษาคุณสมบัติของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นการไหลซึ่งใช้เป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ

1.4 สมมติฐาน

1.4.1 การหมักร่วมกากตะกอนแป้งกับตะกอนสลัดจ์ และกากตะกอนแป้งกับตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการหมักวัสดุเพียงชนิดเดียว

1.4.2 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์สูงขึ้น

1.4.3 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นสูงขึ้น

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอัตราส่วนที่เหมาะสมการหมักร่วมกากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์และตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล รวมถึงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่เหมาะสมกับถังหมักกรดและถังหมักก๊าซชีวภาพ นำไปใช้ในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และฟาร์มกุ้งต่อไป

1.5.2 ทราบแนวทางและความเหมาะสมในการจัดการของเสียทั้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (กากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์) และฟาร์มกุ้ง (ตะกอนเลน) โดยนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้งมันสำปะหลัง

2.1.1 ประเภทแป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ (สุรพล ผลเพิ่ม, 2554)

1) แป้งมันสำปะหลังดิบ (Native Starch) คือ แป้งที่เกิดจากการแปรรูปหัวมันสำปะหลังขั้นต้นโดยไม่มีการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงร่วมในการผลิต เช่น การนำหัวมันมาบดให้เป็นแป้ง ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังดิบ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังดิบเทียบกับแป้งข้าวโพด

องค์ประกอบ	แป้งมันสำปะหลัง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	แป้งข้าวโพด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
ขี้เถ้า	0.02	0.16
ไขมัน	0.06	0.43
ไฟเบอร์	0.27	0.01
โปรตีน	0.03	0.08
แป้ง	99.62	99.32

ที่มา : Demiate และคณะ (2001)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) แป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified Starch) คือ แป้งที่ได้จากการนำแป้งดิบไปผ่านกระบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางโมเลกุลเพื่อให้มีคุณสมบัติเฉพาะ เช่น คุณสมบัติทางด้านความเหนียว สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แป้งมันสำปะหลังแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้แป้งมันสำปะหลังดิบเพราะมีราคาสูงกว่าแป้งดิบกว่าเท่าตัว โดยแป้งมันสำปะหลังดัดแปรแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

(1) แป้งดัดแปรโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งโดยใช้สารเคมี (Chemicals modified starches) การจัดแบ่งกลุ่มของแป้งดัดแปรโครงสร้างโมเลกุลภายเม็ดแป้งโดยใช้สารเคมีแบ่งออกเป็น

กลุ่มที่ 1) แป้งประเภทต่อเติม (Derivertization)

แป้งกลุ่มนี้เป็นแป้งที่สารเคมีเข้าไปจับกับในโมเลกุลแป้งทั้งในรูปโมเลกุลเดี่ยวหรือมากกว่าซึ่งทำให้โมเลกุลแป้งมีขนาดใหญ่ขึ้นได้แก่

1.1) Etherification reaction type

1.1.1) Hydroxyethylated Starches

1.1.2) Hydroxypropylated Starches

1.1.3) Cyanoethyl starch

1.2) Carboxymethyl starch หรือ แป้งประจุลบ

1.3) Cationic Starches หรือ แป้งประจุบวก

1.3.1) Tertiary aminoalkyl starch ether

1.3.2) Quaternary ammonium starch ether

1.4) Esterification reaction type

1.4.1) Starch acetate

1.4.2) Succinate and Substitues Succinated Starches

1.4.3) Starch phosphate monoester

1.5) Cross linking type reaction

1.5.1) Di-starch adipate

1.5.2) Di-starch phosphate

1.5.3) Di-starch glyceral

กลุ่มที่ 2) แป้งประเภทตัด-แตก (Converted starch) แป้งกลุ่มนี้เป็นการทำให้ขนาดของโมเลกุลแป้งเล็กลงทั้งโดยการตัดระหว่างหน่วยกลูโคส หรือทำให้หน่วยกลูโคสแตกได้แก่

2.1) Acid Conversion หรือ Acid Modified Starch

2.2) Oxidized Hypochlorite - Modified Starch

2.3) Pyroconversion หรือ Pyrodextrins

2.4) Enzyme conversion starch

จากหลักการและเทคโนโลยีในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโมเลกุลของเม็ดแป้งในกลุ่มหลักๆ เหล่านี้สามารถที่จะนำเข้ามารวมกัน เกิดเป็นแป้งมันสำปะหลังดัดแปรชนิดใหม่ ๆ ขึ้นมา ซึ่งมีคุณสมบัติในการใช้งานกว้างขึ้น ซึ่งก็คือ กลุ่ม

กลุ่มที่ 3) Combination Starches

3.1) Hydroxypropylated with Cross-Linked Starches

3.2) Hydroxypropylated with Oxidized Starches

3.3) Cross-Linked with Oxidized Starches

3.4) Acid Converted with Hydroxypropylated Starches

3.5) Oxidized with Acetylated Starches

(2) แป้งดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งโดยวิธีทางกายภาพ (Physicals modified starch)

ในการดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งโดยวิธีทางกายภาพเป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยไม่ได้ใช้สารเคมีเป็นตัวหลักที่ทำให้โครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงแต่ใช้พลังงานความร้อนหรือพลังงานจลหรือทั้งสองอย่างประกอบกันซึ่งเมื่อโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งได้ถูกเปลี่ยนแปลงไปคุณสมบัติของแป้งก็เปลี่ยนไปเช่นกันแป้งในกลุ่มนี้ได้แก่

2.1) Pregelatinized starch

2.2) Granular cold water soluble starch

2.3) Annealing starch

2.4) Heat treatment starch

2.5) Mechanical milling starch

(3) แป้งดัดแปรโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งหรือ และโครงสร้างภายนอกโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological modified starch)

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางชีวภาพและพันธุวิศวกรรมได้มีการพัฒนาขึ้นมามากมายและนี้เป็นปัจจัยหลักที่จะทำให้เกิดการพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้แป้งที่มีคุณสมบัติที่ตรงตามความต้องการในการใช้งานโดยอาศัยใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพและในปัจจุบันนี้เราก็ได้ใช้ผลผลิตจากเทคโนโลยีชีวภาพอยู่หลายชนิด เช่น High amylase starch (Hylon V, VII) และ Waxy starch (High Amylopectin เช่น Waxy corn) การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ amylase และ amylopectin ในแป้งจะทำให้คุณสมบัติของแป้งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.2 ขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

วิธีการแปรรูปแปงมันสำปะหลังดิบเปนแปงมันสำปะหลังแปรรูปมีหลักๆ 3 วิธี แสดงดังรูปที่ 2.1 คือ

1) Degradation การทำให้แป้งดิบมีความเหนียวลดลง แบ่งเป็น 3 วิธี

1.1 Dextrinization การเอาแป้งไปคั่วในถังที่มีอุณหภูมิสูงพร้อมกับพ่นกรดบางชนิดลงไป เพื่อให้แป้งมีความหนืดขณะให้ความรอนต่ำกวาแปงดิบ เจลที่ไดจะมีลักษณะใสและแข็งเร็งกว่าแป้งดิบ

1.2 Oxidation มักเตรียมโดยใช้ alkaline hypochlorite ในสารแขวนลอยแป้ง ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้โมเลกุล แป้งเปลี่ยนแปลงไปโดยมีการเติมหมู่คาร์บอกซิล และคาร์บอนิลเข้าไปทำให้แป้งที่ได้ เกิดการคืนตัวน้อย หรือไม่เกิดการคืนตัวเลย ในขณะเดียวกันโมเลกุลจะถูกตัดด้วยทำให้แป้ง มีความหนืดลดลง แป้งออกซิไดซ์ละลายได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศา

เซลเซียส ซึ่งบ่งชี้ว่าพันธะภายในเม็ดแป้งมีความแข็งแรงลดลงมาก แป้งออกซิไดซ์มีการคืนตัวต่ำและให้สารละลายแป้งที่ใส และเมื่อนำไปเคลือบจะได้ฟิล์มที่โปร่งแสง มีการใช้แป้งออกซิไดซ์ในการเคลือบกระดาษที่มีคุณภาพสูง นอกจากนี้แป้งออกซิไดซ์ยังมีคุณสมบัติเป็น polyelectrolyte เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลจำนวนมาก ดังนั้นจึงอาจใช้เพื่อช่วยในการกระจายตัวของสารได้

1.3 Acid treated เตรียมโดยใช้กรดอนินทรีย์เจือจางทำปฏิกิริยากับแป้งในน้ำอุ่น ซึ่งจะทำให้พันธะบางส่วนในเม็ดแป้ง ถูกทำลาย ทำให้ได้แป้งที่มีคุณสมบัติดังนี้

- มีความหนืดลดลงทำให้สามารถใช้แป้งในความเข้มข้นที่สูงขึ้นประมาณ 5 เท่าของแป้งที่ไม่ดัดแปร
- มีความหนืดของแป้งสุกต่ำและเกิด breakdown ได้ง่าย
- น้ำแป้งที่ความเข้มข้นสูงพบว่าแป้งจะเกิดการคืนตัวสูงมากและเริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเนื่องจากการจับตัวกันของโมเลกุลแป้งสายตรงที่มีขนาดเล็ก ที่อยู่ใกล้ชิดกันมากเนื่องจากแป้งมีความเข้มข้นสูง

2) Pregelatinization การพรีเจลาติไนซ์เป็นแป้งดัดแปรแบบง่ายๆ ทำโดยการให้ความร้อนกับแป้งที่แขวนลอยในน้ำ จากนั้นทำให้แห้งโดยอาจใช้ Spray-dryer หรือ heated roll แป้งพรีเจลาติไนซ์เป็นแป้ง ที่สะดวกสำหรับผู้ใช้ที่ไม่มีอุปกรณ์ในการเตรียมแป้งสุก ตัวอย่างการใช้เช่น ใช้เป็น bodying agent ในการขุดเจาะน้ำมัน ใช้เป็น sizing agent ในสิ่งทอและใช้เป็น binder เป็นต้น แป้งพรีเจลาติไนซ์จะมีความหนืดและ adhesiveness ต่ำกว่าแป้งสุกที่เตรียมใหม่ๆ

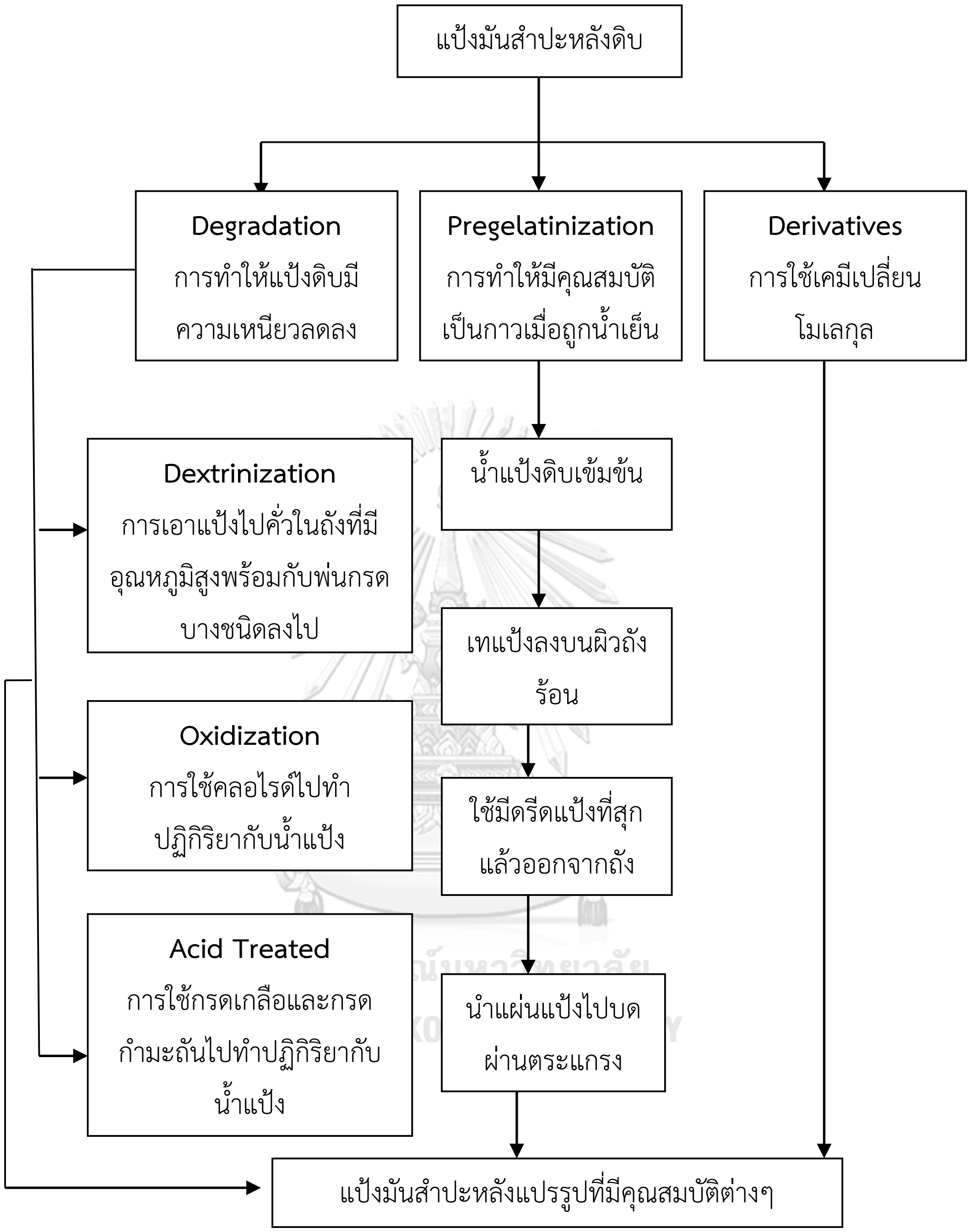
3) Derivatives การดัดแปรโดยทำให้เกิดอนุพันธ เรียกวา อนุพันธของแปง (starch derivatives) แบงชนิดของปฏิกฐิยาการดัดแปรออกเปน 3 ชนิด คือ

3.1 อีเทอรริฟเคชั่น (etherification) เกิดการแทนที่ในโมเลกุลเดี่ยวของแปงดวยแขนอีเทอร (R = $-CH_3$)

3.2 เอสเทอรริฟเคชั่น (estherification) เกิดการแทนที่โมเลกุลเดี่ยวของแปงดวยแขนเอสเทอร(R = $-COCH_3$)

3.3 ครอสลิงกิง (cross inking) การแทนที่โมเลกุลในหมูฟงกชันมากกวาหนึ่งหมูทั้งแป้งอีเทอร (starch ether) และแปงเอสเทอร (starch ester) จัดเปนแปงสเตบิไลซ (stabilized starch) ไดจากการทำปฏิกิริยาระหวางเม็ดแปงกับสารทำปฏิกิริยาในสภาวะเบส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูป
(สมภพ มานะรังสรรค์, 2543)

2.2 โรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรบริษัทอินกรีดิออน จำกัด

2.2.1 กระบวนการผลิตและแหล่งกำเนิดน้ำเสียของบริษัทอินกรีดิออน จำกัด

บริษัทอินกรีดิออน จำกัด มีกำลังการผลิตแป้งมันสำปะหลังดัดแปรสูงถึง 400 ตันต่อวัน โดยกระบวนการผลิตทางโรงงานมีดังนี้

1) การตรวจรับวัตถุดิบ ซึ่งทางโรงงานจะรับซื้อแป้งหมาดจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังดิบในพื้นที่ประมาณวันละ 400 ตัน มาผ่านกระบวนการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นตามที่กำหนด

2) การทำปฏิกิริยา โดยทำการนำแป้งหมาดที่ผ่านการตรวจเรียบร้อยมาทำการเทลงภายในถังปฏิกิริยา (Reactor tank) โดยมีการเติมน้ำ และสารเคมีต่างๆ ตามแต่ชนิดของแป้ง เมื่อได้น้ำแป้งตามสเปคที่ต้องการ จากนั้นน้ำแป้งจะถูกสูบจากถังพักมายังเครื่องสลัดแห้ง ซึ่งจะเหวี่ยงแยกน้ำออกจากน้ำแป้งทำให้ได้แป้งหมาดที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 35-40

3) การอบแห้ง แป้งหมาดจะถูกเป่าด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียส จากถังอบขึ้นไปบนปล่องอบแห้ง แล้วตกลงมาเข้าสู่ไซโคลนความร้อนทำให้ความชื้นหายไปบางส่วน

4) การร่อนแป้ง แป้งที่ผ่านเครื่องอบแห้งมานั้น จะถูกนำมาผ่านเครื่องร่อนแป้ง เพื่อคัดขนาดเม็ดแป้ง ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ

5) การบรรจุแป้ง แป้งที่ผลิตได้จะถูกนำมาบรรจุใส่ถุงขนาด 25 50 500 หรือ 1,000 กิโลกรัม แล้วแต่คำสั่งของลูกค้า

จากกระบวนการผลิตข้างต้น พบว่าโรงงานมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตเฉลี่ย 10 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของแป้ง และมีปริมาณน้ำเสียสูงเฉลี่ยวันละ 3,000-4,000 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากการล้างกระบวนการผลิตและขั้นตอนการทำความสะอาดถังปฏิกิริยาคิดเป็นร้อยละ 91.81 แสดงดังตารางที่ 2.2 เป็นข้อมูลจากรายงานชนิดและปริมาณสารมลพิษที่ระบายออกจากโรงงานระหว่างวันที่ 1 กรกฎาคม-31 ธันวาคม พ.ศ 2558

ตารางที่ 2.2 ปริมาณน้ำเสียจากแต่ละแหล่งกำเนิดของโรงงาน

แหล่งกำเนิดน้ำเสีย	ปริมาณที่เกิดขึ้นเฉลี่ย (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)	ปริมาณที่เกิดขึ้นสูงสุด (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)
น้ำเสียจากการล้างกระบวนการผลิต และการล้างถังปฏิกิริยา	2,636 (91.81%)	3,889 (88.33%)
ล้างพื้น	205 (7.14%)	414 (9.40%)
หม้อน้ำ	20 (0.70%)	60 (1.36%)
สำนักงาน โรงอาหาร	10 (0.35%)	40 (0.91%)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

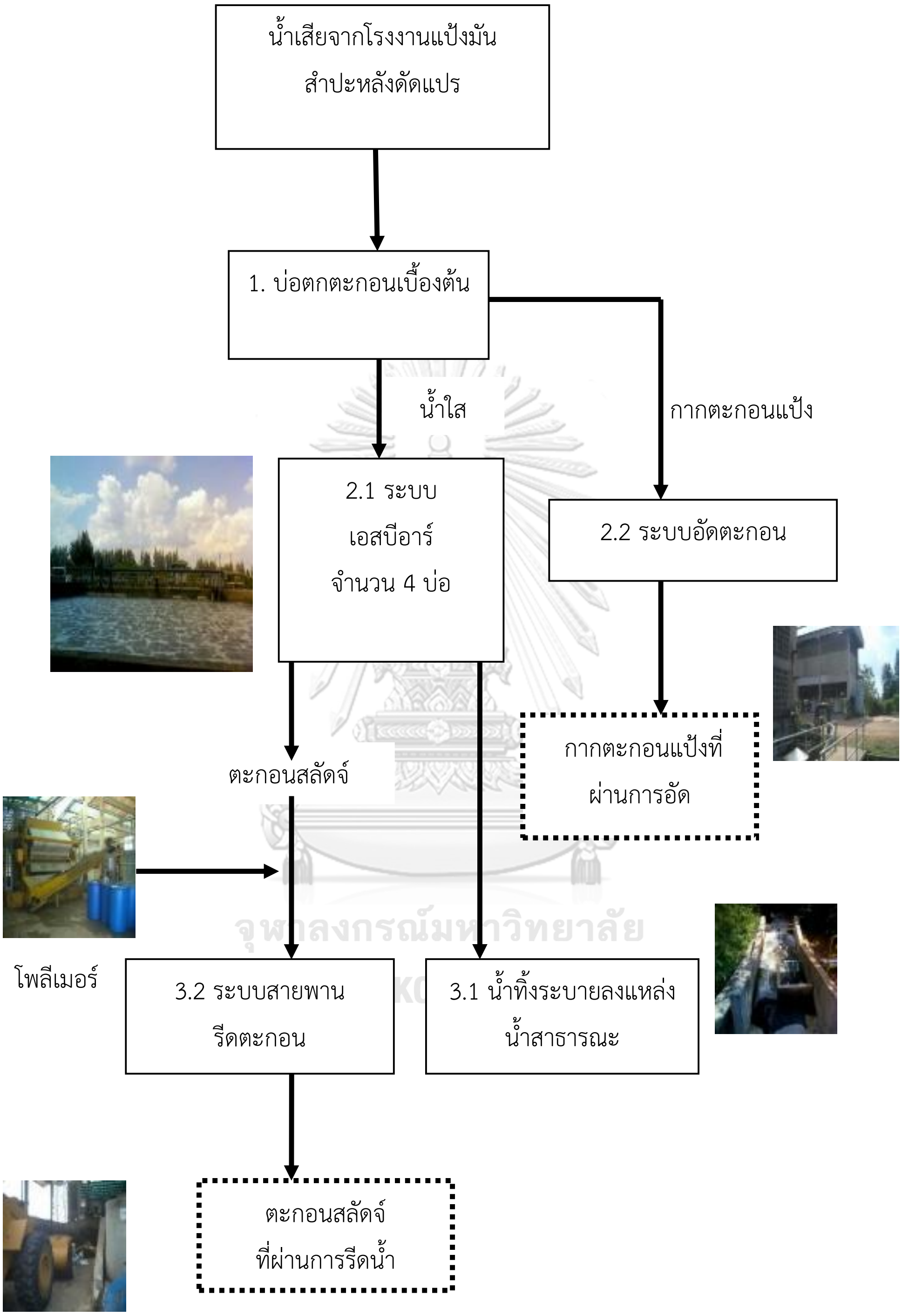
ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานเริ่มจากน้ำเสียจากกระบวนการต่างๆ ไหลลงรางรวบรวมน้ำเสียเข้าสู่บ่อตกตะกอนเบื้องต้น ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นส่วนของกากตะกอนแป้งที่หลุดมาจาก

กระบวนการผลิตมากับน้ำเสีย ซึ่งจะถูกดูดส่งไปเข้าเครื่องอัดตะกอนด้วยสายพาน (Filter Press) และบรรจุใส่ถุงจั้มโบ้ขนาด 1 ตัน โดยมีผู้รับเหมาซื้อไปใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ต่อไป ซึ่งในส่วนของน้ำใสจะถูกส่งเข้าระบบเอสบีอาร์ซึ่งประกอบด้วย 4 บ่อขนาดใหญ่เวียนใช้ในการบำบัดน้ำเสียตามหลักการบำบัดน้ำเสียของระบบเอสบีอาร์ที่ประกอบด้วย 5 ช่วง คือช่วงเติมน้ำเสีย (Fill) 2) ช่วงทำปฏิกิริยา (React) 3) ช่วงตกตะกอน (Settle) 4) ช่วงระบายน้ำทิ้ง (Draw) 5) ช่วงพักระบบ (Idle) และมีการเติมยูเรียเพื่อเพิ่มไนโตรเจนให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่อบำบัดเรียบร้อยแล้วน้ำใสส่วนบนจะผ่านการตรวจวิเคราะห์คุณภาพให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งและถูกระบายลงคลองสาธารณะ ในส่วนของตะกอนส่วนล่างจากบ่อบำบัดน้ำเสียระบบเอสบีอาร์ จะถูกส่งเข้าระบบผ้าใบกรองตะกอน (Belt Press Filter) โดยมีการเติมสารโพลีเมอร์ให้กับน้ำตะกอนเพื่อทำให้ตะกอนจับตัวกันและสามารถกรองได้ด้วยผ้าใบ ตะกอนสลัดจ์จากระบบเอสบีอาร์จะถูกเก็บไว้ในโกดังเก็บและมีผู้รับกำจัดเข้ามาขนเพื่อไปกำจัดทุกวัน ดังนั้นของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรประกอบด้วย 2 ชนิดหลักๆ คือ กากตะกอนแป้ง และตะกอนสลัดจ์ โดยแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งปริมาณและลักษณสมบัติของน้ำเสียที่เข้าและปล่อยออกจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณและลักษณะน้ำเสียที่เข้าและปล่อยออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย

พารามิเตอร์	น้ำเสียเข้าระบบ	น้ำเสียออกจากระบบ
ปริมาณ (ลูกบาศก์เมตร/วัน)	2,636	2,109
pH	5.52	7.07
ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	5,798	49
บีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	1,780	3.87
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)	3,340	12
ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)	13,252	2,343
ปริมาณไนโตรเจน (มิลลิกรัม/ลิตร)	52	5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.2 แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปร บริษัทอินกรีดิออน จำกัด

2.2.3 หลักการทำงานของระบบเอสบีอาร์ของโรงงาน

ระบบเอสบีอาร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบแอกทิเวเต็ดจ์สลัดจ์ (Activated Sludge) ที่มีการทำงานแบบแบทช์ (Batch) เริ่มมีการใช้งานระบบเอสบีอาร์ในช่วงต้น ค.ศ.1960 ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และสารอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในน้ำเสีย ระบบเอสบีอาร์ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อให้สามารถควบคุมง่ายและเหมาะสำหรับใช้ในการบำบัดทั้งน้ำเสียจากชุมชนและอุตสาหกรรม (Environmental Protection Agency, 1999)

หลักการทำงานของระบบ คือ อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในถังเติมอากาศของระบบเป็นตัวย่อยสลายสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในน้ำเสียให้หมด เพื่อให้สามารถระบายทิ้งได้โดยไม่ก่อให้น้ำในคูคลองเน่าเสีย สิ่งสกปรกในน้ำเสียที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ส่วนใหญ่เป็นพวกสารอินทรีย์ทั้งในรูปที่ละลายน้ำได้และในรูปของคอลลอยด์ ผลผลิตสุดท้ายที่ได้ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ เซลล์จุลินทรีย์ตัวใหม่ และพลังงาน ดังนี้

น้ำเสีย (สารอินทรีย์) + จุลินทรีย์ + ออกซิเจน

↓

คาร์บอนไดออกไซด์ + น้ำ + จุลินทรีย์ + พลังงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เซลล์จุลินทรีย์โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ 70-90 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์อีก 10-30 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น สารอินทรีย์ซึ่งเป็นสิ่งสกปรกในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนมาเป็นเซลล์ของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา โปรโตซัว และโรติเฟอร์ เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์มีน้ำหนักมากกว่าจึงสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายด้วยถังตกตะกอน (Jafrudeen และ Ahsan, 2012)

ระบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor) มีลักษณะสำคัญคือ เป็นระบบแอกทิเวเต็ดจ์สลัดจ์ประเภทเติมเข้า-ถ่ายออก (Fill and Draw Activated Sludge) โดยมีขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียแตกต่างจากระบบตะกอนเร่งแบบอื่นๆ คือ การเติมอากาศ (Aeration) และการตกตะกอน (Sedimentation) จะดำเนินการเป็นไปตามลำดับภายในถังปฏิกิริยาเดียวกัน โดยแผนผังแสดงระบบเอสบีอาร์แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ 1 รอบการทำงาน (Cycle) ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ตามลำดับดังนี้

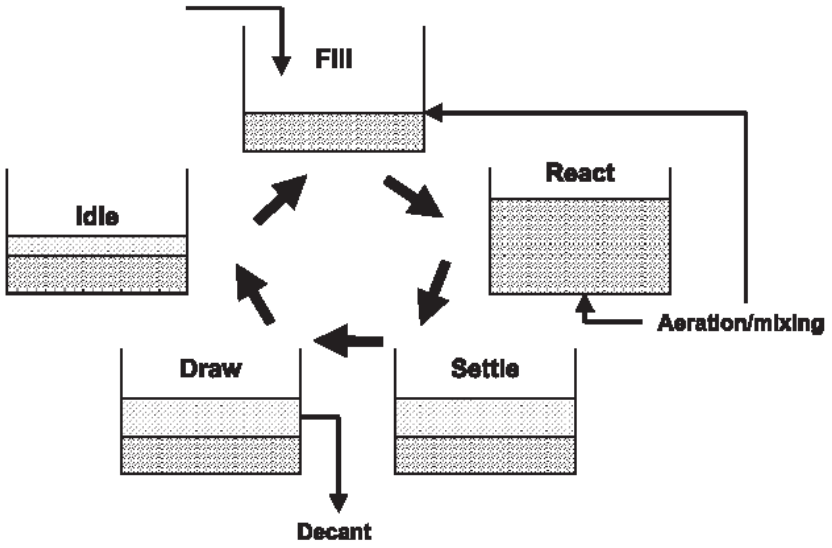
1) ช่วงเติมน้ำเสีย (Fill) นำน้ำเสียเข้าระบบ

2) ช่วงทำปฏิกิริยา (React) เป็นการลดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

3) ช่วงตกตะกอน (Settle) ทำให้ตะกอนสลัดจ์ตกลงก้นถังปฏิกิริยา

4) ช่วงระบายน้ำทิ้ง (Draw) ระบายน้ำที่ผ่านการบำบัด

5) ช่วงพักระบบ (Idle) เพื่อซ่อมแซมหรือรอรับน้ำเสียใหม่



รูปที่ 2.3 การทำงานของระบบเอสบีอาร์

(Toprak, 2016)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.4 การจัดการกากของเสียของโรงงาน

1) การจัดการกากตะกอนแป้ง

กากตะกอนแป้งที่ออกมาจากเครื่องอัดตะกอนจะถูกบรรจุใส่ถุงจั้มโบ้ขนาด 1,000 กิโลกรัม และตั้งเรียงไว้บริเวณด้านล่างของอาคารเพื่อรอการขน โดยในรอบหนึ่งปีจะมีเกิดขึ้นประมาณ 1,460 ตัน/ปี ซึ่งโรงงานได้ทำการขายให้กับผู้รับซื้อในพื้นที่เพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบผลิตอาหารสัตว์และทำมันเส้น

โดยตะกอนแป้งที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นตะกอนแป้งจากการผลิตแป้งอาหาร National frijex ซึ่งเป็นชนิดที่โรงงานนิยมผลิตมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 10 ของกำลังการผลิตประมาณ 146,000 ตันต่อปี ซึ่งจะมีกากตะกอนจากแป้งชนิดนี้เกิดขึ้นประมาณปีละ 1,460 ตัน (คิดอัตราการสูญเสียแป้งที่ 1%)

2) กากจัดการตะกอนสลัดจ์

ตะกอนสลัดจ์ที่ผ่านการเติมโพลีเมอร์และผ่านสายพานรีดตะกอนจะถูกสายพานลำเลียงไปเก็บไว้ในโกดัง เพื่อรอผู้รับกำจัดเข้ามาขนไป โดยในรอบหนึ่งปีจะมีเกิดขึ้นประมาณ 4,679 ตัน/ปี ซึ่งจะมีการฉีดสารอีเอ็มเพื่อลดกลิ่นที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว โดยทางโรงงานได้ส่งกำจัดโดยเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด ซึ่งนำไปเป็นวัตถุดิบผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ด ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพหรือสารปรับปรุงดิน

2.3 ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล

2.3.1 พื้นที่เลี้ยงกุ้งทะเลในเขตอำเภอแกลง

ข้อมูลจากรายงานประจำปี 2559 ข้อมูลเดือนสิงหาคม ของสำนักงานประมงจังหวัดระยอง อำเภอแกลงมีพื้นที่เลี้ยงกุ้งทะเลประมาณ 7,760 ไร่ จำนวนเกษตรกร 392 ราย คิดเป็นร้อยละ 95.95 ของพื้นที่เลี้ยงกุ้งทะเลทั้งหมดของจังหวัดระยอง ซึ่งมีพื้นที่ทั้งหมด 7,994 ไร่ (สำนักงานประมงจังหวัดระยอง, 2559)

2.3.2 ขั้นตอนการเลี้ยงกุ้งทะเล

1) เตรียมบ่อดิน เน้นการให้ผิวพื้นบ่อสะอาด ถ้าพื้นเป็นดินทราย ต้องให้ใต้พื้นทรายหมดก๊าซไข่เน่าด้วย ต้องกำจัดพาหะออกจากบ่อเลี้ยงให้หมดอย่างชัดเจน เพื่อลดความเสี่ยงโรคไวรัส และควรคำนึงถึงบ่อพักน้ำด้วย เพื่อมั่นใจว่าปลอดสัตว์พาหะจริง ซึ่งโดยปกติการเลี้ยงกุ้งทะเลจะใช้ระยะเวลาประมาณ 70-90 วัน ในการเลี้ยง 1 รอบ ซึ่งจะต้องมีการสูบน้ำออกเพื่อล้างบ่อมีการฉีดน้ำและสูบตะกอนเลนออกจากบ่อจนหมดทุกครั้งเพื่อเลี้ยงในรอบต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) การเตรียมน้ำเข้าบ่อพัก การเลี้ยงต้องมีการทำสีน้ำ ซึ่งปกติสีน้ำหรือปริมาณแพลงก์ตอนจะมีความสัมพันธ์กับ pH และปริมาณออกซิเจน ถ้าไม่ทำสีน้ำควรเน้นใช้สีน้ำเทียมพรางแสงบ้างและให้กุ้งกินตะกอนอาหารสำเร็จเป็นหลัก

3) การสั่งและใช้ลูกพันธุ์กุ้ง ใช้แหล่งพันธุ์ที่มั่นใจในคุณภาพ สั่งลูกกุ้งล่วงหน้านานพอจากฟาร์ม พร้อมแจ้งความเค็มและคุณภาพน้ำ ก่อนรับลูกกุ้งอย่างน้อย 4 วัน ควรปรับความเค็มที่ฟาร์มเพาะให้เรียบร้อยก่อนวันส่งลูกกุ้ง

4) การจัดการด้านอาหารเป็นเรื่องที่หลากหลายมาก เพราะกุ้งทะเลมีคุณสมบัติเฉพาะคือกินอาหารได้หลากหลายทั้งพืช สัตว์ ตะกอนสารอินทรีย์ และมีนิสัยกินไม่หยุดโดยไม่ต้องฝึก แต่ในการศึกษานี้กุ้งทะเลถูกเลี้ยงโดยอาหารสำเร็จรูปตามช่วงอายุอย่างเดียว

2.3.3 ปริมาณและการจัดการตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล

ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลเกิดจากขั้นตอนการล้างทำความสะอาดบ่อ ภายหลังจากจับกุ้งเรียบร้อยแล้ว เพื่อเตรียมบ่อในการเลี้ยงรอบต่อไป โดยทั่วไปจะใช้น้ำฉีดล้างและสูบทิ้งลงบริเวณบ่อข้างๆ ที่ไม่ใช้งานหรือแหล่งน้ำสาธารณะ ความลึกของขี้เลนในบ่อโดยประมาณ 20 ถึง 30 เซนติเมตร ที่ต้องทำการสูบทิ้ง ดังนั้นถ้ามีพื้นที่เลี้ยงกุ้งทะเลในอำเภอแกลง 7,760 ไร่ หรือประมาณ 12,416,000 ตารางเมตร จะมีตะกอนเลนที่ต้องสูบต่อหนึ่งรอบการเลี้ยงโดยประมาณ 3.104 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยในรอบ 1 ปี จะทำการเลี้ยงประมาณ 2 รอบต่อบ่อ ดั้งนั้นอัตราการเกิดตะกอนเลนนากุ้งประมาณ 6.20 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ในพื้นที่อำเภอแกลงที่ต้องทำการสูบทิ้ง ซึ่งมีงานวิจัยของที่ศึกษาผลกระทบจากการเลี้ยงกุ้งทะเลในประเทศเวียดนาม พบว่าตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งมีปริมาณสารอินทรีย์และธาตุอาหารมาก ถ้ามีการจัดการที่ไม่ดีจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์และสิ่งแวดล้อม (Pham และคณะ, 2010)

2.4 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ

ปัจจุบันแหล่งวัตถุดิบสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพที่มีศักยภาพของประเทศไทยนั้นมาจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรและการแปรรูปจำนวน 7 ประเภทได้แก่ (1) อุตสาหกรรมแป้ง (2) อุตสาหกรรมสุราและเบียร์ (3) อุตสาหกรรมอาหาร (4) อุตสาหกรรมปาล์ม (5) อุตสาหกรรมกระดาษ (6) อุตสาหกรรมยาง และ (7) อุตสาหกรรมเอทานอล ซึ่งมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 943.7 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี สามารถนำมาทดแทนน้ำมันเตาได้ 486 ล้านลิตร มีมูลค่าการประหยัดพลังงานเทียบเท่าน้ำมันเตาได้กว่า 3,900 ล้านบาทต่อปี และจากฟาร์มปศุสัตว์ทั้งฟาร์มสุกร ฟาร์มโคและฟาร์มสัตว์อื่นๆ มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพประมาณ 1,260.4 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี รวมสามารถผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่า 2,000 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในอุตสาหกรรมของประเทศไทยนั้น อุตสาหกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังส่วนใหญ่จะประสบความสำเร็จ โดยระยะเวลาคืนทุนจะอยู่ภายใน 1-2 ปี ขณะเดียวกันกับราคาพลังงานที่ใช้ในการอบแป้งเพิ่มสูงขึ้น กลิ่นของน้ำเสียที่รบกวนชุมชน รวมไปถึงความหลากหลายของเทคโนโลยี ส่งผลให้โรงงานแป้งมันสำปะหลังเกือบทั้งหมดหันมาติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทย (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2547)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.1 ก๊าซชีวภาพและกลไกการเกิด

ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนตามธรรมชาติ โดยแบคทีเรียไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) ทำให้เกิดผลผลิตของก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพจะอยู่ในรูปของก๊าซผสมประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิดส่วนใหญ่ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

- ก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง Ahmmad และ Haque กล่าวว่าเปอร์เซ็นต์ของมีเทนมากว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซชีวภาพจะสามารถเผาไหม้ได้ดี และมีความเหมาะสมสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกเผื่อผลิตพลังงานได้ (Ahmmad และ Haque, 2014)
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์
- ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย (NH_3) ไฮโรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และไอน้ำ (H_2O)

กระบวนการทั้งหมดในการสร้างก๊าซชีวภาพเกิดจากกระบวนการหมักย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยกลุ่มแบคทีเรียชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายและเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ สามารถแบ่งเป็นสามขั้นตอน คือ การย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis) การแปรสภาพเป็นกรดอินทรีย์ (Acidification) และการเกิดก๊าซมีเทน (Methane Formation) (บริษัทพลังงานธรรมชาติ จำกัด, 2555) แสดงดังรูปที่ 2.4

1) ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายภายนอกโดยสารเร่งปฏิกิริยาเคมีที่มีขนาดเล็กที่เติมเข้าไป เช่น เซลลูเลส อะมีเลส โปรติเอส และไลเปส แบคทีเรียทำให้ห่วงโซ่ที่ซับซ้อนของสารประกอบคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมันมีขนาดเล็กลง ยกตัวอย่างเช่น โพลีซัคคาไรดส์ (Polysaccharides) เปลี่ยนเป็น โมโนซัคคาไรดส์ (Monosaccharaides) การแยกโปรตีนออกเป็นเปปไทด์และกรดอะมิโน เป็นต้น

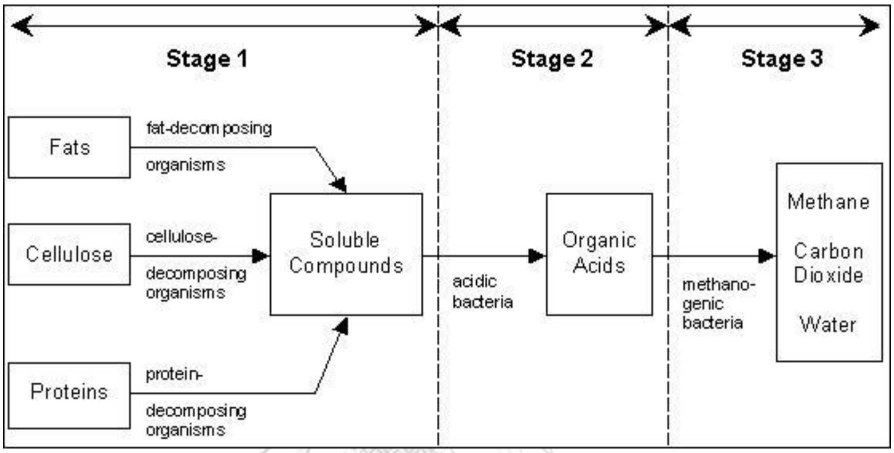
2) ขั้นตอนการแปรสภาพเป็นกรด

เป็นการทำงานของแบคทีเรียที่สร้างกรดอินทรีย์ระเหย โดยทำหน้าที่เปลี่ยนสารตัวกลางโดยแบคทีเรียของกระบวนการหมักให้เป็นกรดอะซีติค (CH_3COOH) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แบคทีเรียเหล่านี้อยู่ในสภาพไร้อากาศและสามารถเติบโตในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด

3) ขั้นตอนการเกิดก๊าซมีเทน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เป็นขั้นตอนที่แบคทีเรียทำให้เกิดก๊าซมีเทนโดยการย่อยสลายสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ตัวอย่างคือ แบคทีเรียใช้ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดอะซีติค เพื่อทำให้เกิดก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพนี้เป็นกระบวนการทางธรรมชาติที่สามารถสังเกตเห็นได้โดยทั่วไป เช่น ในโคลนตมของหนองน้ำ คลอง บึง นาข้าว กระเพาะสัตว์เคี้ยวเอื้อง ท่อระบายน้ำชุมชน บ่อพักน้ำ ฟาร์มปศุสัตว์และบ่อน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร เป็นต้น



รูปที่ 2.4 กระบวนการหมักย่อยของสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (Walker และ Ladislao, 2000)

2.4.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ

เป็นกลุ่มแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน ที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เพื่อใช้เป็นสารอาหารในการดำรงชีวิต และจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำเกิดก๊าซชีวภาพขึ้น โดยสามารถแบ่งชนิดกลุ่มแบคทีเรียตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เป็น 4 ชนิด คือ (Ali Shah และคณะ, 2014)

1) Hydrolytic Bacteria เป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เล็กลง เช่น ย่อยสลายโปรตีน เซลลูโลส ลิกนิน และไขมัน ไปเป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้าได้ เช่น กรดอะมิโน กรดไขมัน กลูโคส และกลีเซอรอล สำหรับสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของลิกนิน เช่น พืชต่างๆ จะเกิดการย่อยสลายได้ช้ากว่าสารอินทรีย์ที่ได้จากมูลสัตว์ ส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม Streptococcus และ Enterobacterium

2) Acidogenic Bacteria หรือ acid forming bacteria เป็นแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารย่อยสลายสารจำพวกน้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันให้เป็นกรดอะซิเตท ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

และก๊าซไฮโดรเจน ส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม Pseudomonas, Bacillus, Clostridium, Micrococcus และ Flavobacterium

3) Acetogenic Bacteria แบคทีเรียชนิดนี้สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และแอลกอฮอล์ได้เป็นอะซิเตท ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการสภาวะที่มีความดันย่อยของไฮโดรเจน (H_2 partial pressure) ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนที่สูงมีผลทำให้ปริมาณการเกิดกรดอะซิเตทลดลง โดยสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดโพรไพโอนิก บิวทีริก และเอทานอลเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบมีค่า pH ลดลงไม่เหมาะสมสำหรับ Acetogenic แต่แบคทีเรีย Methanogens สามารถดึงไฮโดรเจนไปใช้งานได้ ทำให้มีค่าความดันย่อยของไฮโดรเจนลดลง ส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม Syntophomonas และ Syntrophobacter

4) Methanogenic Bacteria แบคทีเรียกลุ่ม methanogenic Bacteria เป็นกลุ่มที่พบได้ที่ชั้นตะกอนของแม่น้ำลำคลอง หรือกระเพาะสัตว์เคี้ยวเอื้อง แบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ

- Hydrogenotrophic Methanogens หรือ hydrogen utilizing chemolithotrophs เป็นกลุ่มที่สามารถเปลี่ยนไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซมีเทน ดังสมการ ถือเป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่ลดความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนในระบบเพื่อให้เอื้อต่อแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$

- Acetotrophic Methanogens หรือ acetate splitting bacteria เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เปลี่ยนอะซิเตทเป็นก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.3 ประเภทถังหมักก๊าซชีวภาพ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

เทคโนโลยีสำหรับก๊าซชีวภาพในประเทศไทยเริ่มใช้กับมูลสัตว์เป็นอันดับแรก และต่อมาเริ่มขยายเข้ามาในภาคอุตสาหกรรม เทคโนโลยีสำหรับก๊าซชีวภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1) ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบช้า (Low Rate Anaerobic Digestion)

เป็นถังหมักที่ออกแบบโดยอาศัยกลุ่มแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยบ่อหมักจะควบคุมให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic Retention Time, HRT) 30-60 ต่อวัน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) 0.64-1.60 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรถังหมักต่อวัน การเดินระบบอาจจะทำการผสม การเติมน้ำเสียและการเอาตะกอนออกเป็นครั้งคราว ถังปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถจะใช้ฝาปิดที่ลอยได้หรือแบบติดกับที่แต่การใช้ฝาปิดชนิดติดกับที่จะไม่สะดวกในการเดินระบบหรือการทำงาน

ของผู้เดินระบบ ตัวอย่างของถังหมักไร้ออกซิเจนแบบช้าแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยรูปแบบของบ่ออยู่หลายประเภทด้วยกัน อาทิเช่น

- บ่อหมักช้าแบบถังลอย (Floating drum digester) หรือ Indian digester ลักษณะส่วนใหญ่จะเป็นรูปทรงกระบอก ฝังอยู่ใต้พื้นดินทำหน้าที่หมักมูลสัตว์และของเหลวให้เกิดก๊าซชีวภาพ สำหรับส่วนบนเป็นฝาครอบเก็บก๊าซทำด้วยโลหะหรือไฟเบอร์กลาส ลอยขึ้นลงตามปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น

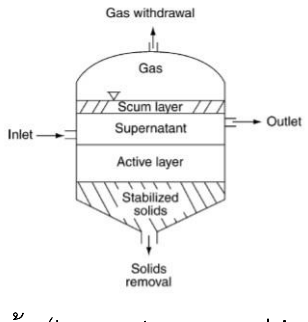
- บ่อหมักช้าแบบโดมคงที่ (Fixed dome digester) มีลักษณะเป็นทรงกลมฝังอยู่ใต้ดิน ส่วนที่เก็บก๊าซมีลักษณะเป็นโดม ซึ่งข้อดีของระบบนี้คือประหยัดพื้นที่บริเวณฟาร์มเนื่องจากถังหมักอยู่ใต้ผิวดิน จึงทำให้สามารถระบายน้ำมูลสุกรจากโรงเรือนไปสู่บ่อหมักโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง อุณหภูมิในบ่อหมักค่อนข้างคงที่ทำให้การหมักของมูลสัตว์เป็นไปอย่างต่อเนื่อง สำหรับข้อเสียของระบบนี้คือในบริเวณที่ระดับน้ำใต้ดินสูงการทำงานและการสร้างบ่อหมักจะค่อนข้างลำบาก และในบริเวณส่วนโค้งของถังหมักจะต้องใช้เทคนิคและความชำนาญสูง

- บ่อหมักช้าแบบราง (Plug Flow digester) มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูฝังในดิน ส่วนที่ใช้เก็บแก๊สจะใช้ผ้าพลาสติกที่เรียกว่า red-mud-plastic คลุมส่วนบนของบ่อหมักไว้ ข้อดีของบ่อแบบนี้ คือเนื่องจากลักษณะของบ่อเป็นแนว จึงทำ ให้ระยะเวลาในการหมักของเสียมากขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นมีมากขึ้นด้วย

- บ่อแบบ Covered Lagoon รูปแบบของระบบนี้ได้นำรูปแบบถุงยางเก็บก๊าซของบ่อแบบ Plug Flow มาสร้างครอบไปบนบ่อรวบรวมมูลสัตว์ที่มีอยู่แล้ว ซึ่งอาจเป็นบ่อคอนกรีตหรือดินขุดก็ได้ในกรณีที่เป็น

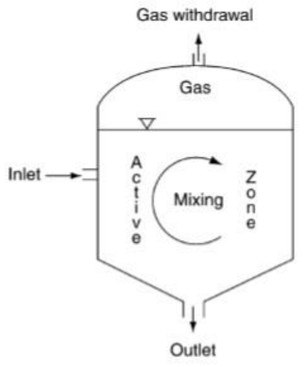
- บ่อดินขุด อาจปูแผ่นยางที่ใช้ปูสระเก็บน้ำมาปูทับเพื่อมิให้เกิดการรั่วซึมของของเสียลงใต้ดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.5 ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบช้า (Low-rate anaerobic digester) (Marmara University, 2016)

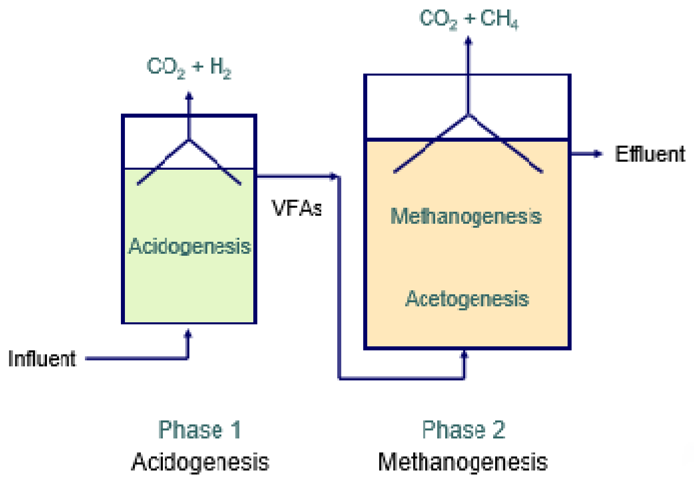
2) ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบเร็ว (High Rate Anaerobic Digestion) เป็นถังที่เหมาะสำหรับใช้บำบัดน้ำเสียประเภทที่มีปริมาณสารอินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้บ่อหมักแบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายค่อนข้างเร็ว ระยะเวลาเก็บกักประมาณ 0.5-3 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงถึงร้อยละ 80-90 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.4-20 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน การเดินระบบจะทำการผสมเติมน้ำเสียและการทิ้งสลัดจ์อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปถังปฏิกิริยาชนิดนี้มักจะใช้ฝาปิดแบบติดกับที่ ซึ่งจากประสิทธิภาพของถังหมักจึงทำให้ถังหมักมีขนาดเล็กแต่สามารถรับปริมาตรของเสียได้มากกว่าแสดงดังรูปที่ 2.6 ส่วนใหญ่จะไม่นิยมนำมาใช้กับมูลสัตว์เนื่องจากตะกอนจากมูลสัตว์จะสร้างปัญหาแก่ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบเร็วเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง และนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้ทดแทนสารเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายการบำบัดให้ต่ำลงและสามารถช่วยลดการใช้สารเชื้อเพลิงอีกด้วย เนื่องด้วยเทคโนโลยีผลิตก๊าซชีวภาพต้องประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนบำบัดต่อเนื่อง เพื่อให้น้ำเสียที่บำบัดแล้วเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง



รูปที่ 2.6 บ่อหมักไร้ออกซิเจนแบบเร็ว (High-rate anaerobic digester)
(Marmara University, 2016)

3) ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digester) เป็นถังหมักที่มีอัตราการย่อยสูง ประกอบด้วยถัง 2 ชุด ที่มีการแยกตะกอนแสดงดังรูปที่ 2.7 ตามลักษณะการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อความสะดวกในการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมกับแบคทีเรียแต่ละชนิด จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกอนส่วนเกินของแบคทีเรียแต่ละชนิดนั้นเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยมีการแบ่งออกเป็น 2 ถัง ได้แก่ ถังหมักกรดและถังหมักก๊าซชีวภาพ ถังหมักกรดสร้างขึ้นตามหลักการที่ว่าแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรดมีการเจริญเติบโตเร็วกว่าแบคทีเรียใน

กลุ่มสร้างมีแทน ดังนั้นทำให้รูปแบบของถังหมักกรดซึ่งเป็นถังแรกจะมีขนาดเล็กกว่าถังที่สองซึ่งเป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ ที่แบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทนทำงานอยู่ และแบคทีเรียในถังหมักกรดจะช่วยย่อยตะกอนสลัดจ์ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงและมีตะกอนแขวนลอยต่ำที่เหมาะสม ต่อการย่อยของแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนต่อไป จากลักษณะพิเศษของระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่มีการแยกเชื้อแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากขึ้น และส่งผลให้ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นด้วย และลดเวลาในการกักเก็บและย่อยน้อยลงกว่าถังหมักไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียวซึ่งร่วมถังหมักกรดและถังหมักก๊าซไว้ในถังเดียว ซึ่งการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของถังหมักไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน แสดงดังตารางที่ 2.4 (พัชรินทร์ ราโช และบุญชัย วิจิตรเสถียร, 2555)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.7 ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

(Marmara University, 2016)

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของถังหมักไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว และสองขั้นตอน

ประเภทถังหมัก	ข้อดี	ข้อเสีย
ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว	- การเดินระบบไม่ยุ่งยาก - มีการกวนอย่างสมบรูณ์ภายในระบบ	- เกิดการ Short-circuit ขึ้นในระบบบำบัด หากปริมาณตะกอนที่เข้าระบบมากเกินไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบลดลง - คุณภาพน้ำออกมีค่าสูง เมื่อเทียบกับระบบ Two-stage - ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับระบบอื่น - ใช้เวลาในการกักเก็บและย่อยนานกว่าระบบอื่น
ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน	มีการแยกเชื้อแบคทีเรียสร้างกรด และแบคทีเรียสร้างมีเทน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากขึ้น และสงผลให้ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นด้วย ลดเวลาในการกักเก็บและย่อยน้อยลง	มีความยุ่งยากในการเดินระบบเนื่องจากต้องมีการควบคุม pH ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

โดยระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทช์เป็นถังหมักกรด และใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นเป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ เนื่องจากลักษณะเด่นของของถังแต่ละประเภทอ้างอิงจาก Handbook of environmental engineers (Lawrence และคณะ, 2010) ดังนี้

<u>ถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทช์</u>

- อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากันทั้งถังทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดและการย่อยของเสียค่อนข้างดีสม่ำเสมอ เชื้อจุลินทรีย์กระจายตัวสัมผัสของเสียอย่างทั่วถึง
- เหมาะกับวัสดุหมักที่มีปริมาณของแข็งมาก
- มีตะกอนเกิดขึ้น อาจต้องมีการกำจัดหรือเวียนตะกอน
- คุณภาพของน้ำที่บำบัดด้วยระบบนี้ยังไม่ดีเท่าที่ควร อาจต้องมีระบบอื่นรองรับในการบำบัดต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น</u>

- ออกแบบและก่อสร้างง่าย
- ประหยัดพลังงานจากการใช้ไฟฟ้าของใบกวนในการกวนผสม
- การใช้งานได้ยาวนานไม่มีปัญหาเรื่องของระยะเวลากักเก็บตะกอน การเวียนตะกอนกลับ
- สามารถปรับตัวรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่มีความผันแปรได้ค่อนข้างดี
- สามารถใช้เป็นถังหมักกรด และหมักก๊าซในถังเดียวกันได้ตามระยะทางการไหล

2.4.4 ปัจจัยและสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้ (วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2558)

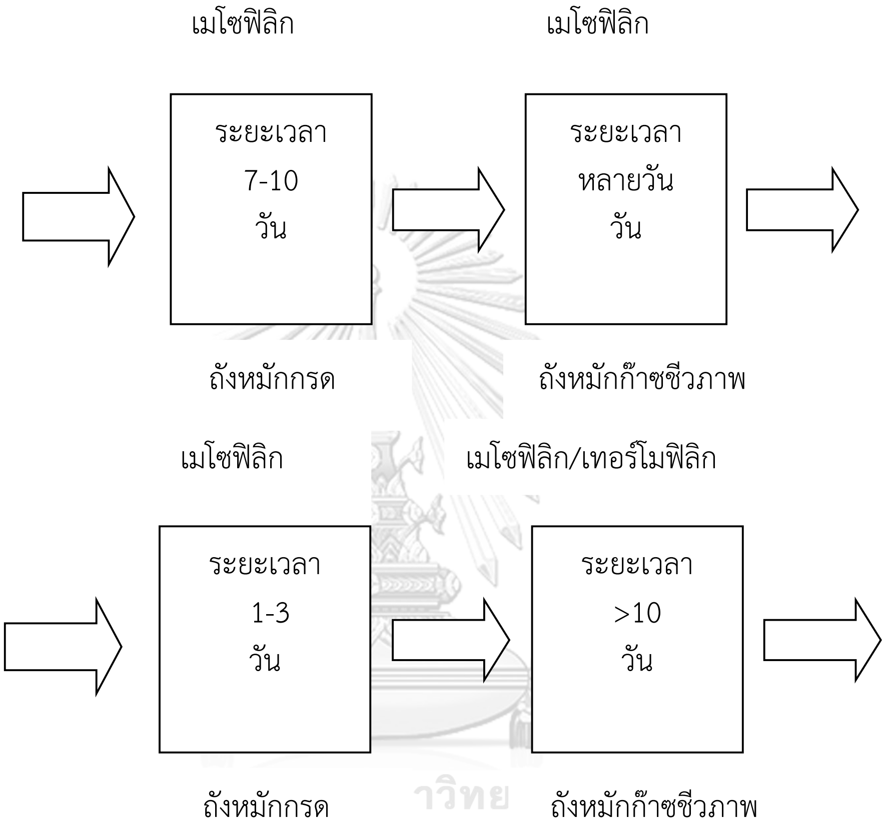
1) อุณหภูมิในการเดินระบบ เมทาโนเจน ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่ต่ำมากหรือสูงมากได้ ถ้าหากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส แบคทีเรียจะหยุดทำงาน อุณหภูมิในการเดินระบบแบ่งเป็นสองระดับตามสปีชีส์ของเมทาโนเจน ได้แก่เมโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic)

- อุณหภูมิที่เหมาะที่เมโซฟิลิก ทำงานได้ดีคือประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส แต่ที่เหมาะสมที่สุดคือ ช่วง 37-41 องศาเซลเซียส โดยในช่วงอุณหภูมิระดับนี้แบคทีเรียส่วนใหญ่ในถังหมักจะเป็นเมโซฟิลิก สำหรับประเทศไทยอุณหภูมิน้ำเสียปกติเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิน้ำเสียภายในถังจะสูงกว่าปกติประมาณ 3-5 องศาเซลเซียส คืออยู่ที่ประมาณ 28-35 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะแก่การเจริญเติบโตของแบคทีเรียมีโซฟีลิกซึ่งโตได้ดีในช่วง 20-45 องศาเซลเซียส และมีการศึกษาของ Arikan (2015) และคณะที่ทำการหมักมูลวัวที่อุณหภูมิ 22±2, และ 28±2 องศาเซลเซียสสามารถผลิตก๊าซมีเทนคิดได้เป็น 70 และ 87 % ของที่อุณหภูมิ 35±2 องศาเซลเซียส ดังนั้นการทดลองที่อุณหภูมิห้องในประเทศไทยถึงไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพมากนัก
- เทอร์โมฟิลิก ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด คือ ช่วง 50-52 องศาเซลเซียส แต่ก็สามารถทำงานในอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปถึง 70 องศาเซลเซียส

แบคทีเรียเมโซฟิลิกนั้นมีจำนวนสปีชีส์มากกว่าเทอร์โมฟิลิก นอกจากนี้ยังสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าเทอร์โมฟิลิกอีกด้วย ทำให้ระบบหมักก๊าซชีวภาพที่ใช้เมโซฟิลิกเสถียรกว่า แต่ขณะเดียวกันอุณหภูมิซึ่งสูงกว่าในระบบที่ใช้เทอร์โมฟิลิกก็เป็นการช่วยเร่ง

ปฏิกิริยาส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซสูงกว่า ข้อเสียอีกข้อของระบบเทอร์โมฟิลิกคือ การที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกมาเพิ่มความร้อนให้ระบบ ทำให้อาจได้พลังงานสุทธิที่ต่ำกว่า

ตัวอย่างการศึกษาปัจจัยเรื่องของอุณหภูมิที่มีต่อระยะเวลาการหมัก ของระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการศึกษาปัจจัยเรื่องของอุณหภูมิที่มีต่อระยะเวลาการหมัก ของระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน (The Eco Ambassador, 2016)

2) ค่า pH เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพคือระหว่าง 7.0-7.2 ค่า pH ในถังหมักขึ้นอยู่กับช่วงของการหมักด้วย เพราะในช่วงแรกแบคทีเรียที่สร้างกรดจะสร้างกรดเป็นจำนวนมากและทำให้ค่า pH ลดลง ซึ่งถ้าหาก pH ลดลงต่ำกว่า 5 ก็จะหยุดกระบวนการย่อยและหมักทั้งหมด หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนนั้นอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลง pH มาก และจะไม่เจริญเติบโตหาก pH ต่ำกว่า 6.5 ในช่วงท้ายของกระบวนการ ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมากขึ้นตามการย่อยสลายไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า pH เพิ่มโดยอาจเกิน 8 จนกระทั่งระบบผลิตเริ่มมีความเสถียร pH จะอยู่ระหว่าง 6.8-8

3) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของขยะอินทรีย์ที่สามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพคือตั้งแต่ 8-30 แต่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพคือประมาณ 23 ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมาก ไนโตรเจนจะถูกเมทาโนเจนนำไปใช้เพื่อเสริมโปรตีนให้ตัวเองและจะหมดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ได้ก๊าซน้อย แต่ถ้าหาก C/N Ratio ต่ำมากๆ ก็จะทำให้ไนโตรเจนมีมากและไปเกาะกันเป็นแอมโมเนีย แอมโมเนียจะไปเพิ่มค่า pH ซึ่งถ้าหากค่า pH สูงถึง 8.5 ก็จะเริ่มเป็นพิษกับแบคทีเรียทำให้จำนวนเมทาโนเจนลดลง นอกจากนี้หาก C/N ratio อยู่นอกเหนือจากช่วง 8-30 จะทำให้มีสัดส่วนปริมาณก๊าซที่ได้เป็นก๊าซอื่นๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น อย่างไรก็ตามสามารถนำวัตถุดิบที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมาผสมกับวัตถุดิบที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำได้ เพื่อให้ได้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ต้องการ

4) อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูบเข้าสู่ระบบ (Organic loading) คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่เราเติมใส่ถังหมักในแต่ละวัน ซึ่งถ้าหากว่าปริมาณที่เราเติมนั้นมากเกินไป ก็จะส่งผลให้ค่า pH ลดลงมากเกินไป เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการคือ แอซิโดเจเนซิส กรดจะถูกผลิตขึ้นมา จนทำให้ระบบล้มเหลวเนื่องจากเมทาโนเจนตายหมด ซึ่งหากสิ่งนี้เกิดขึ้นจริงก็จะต้องเริ่มต้นระบบใหม่หมด แต่ถ้าหากปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อยก๊าซที่ผลิตได้ก็จะน้อยตามไปด้วยเท่ากับว่าไม่ได้เดินระบบเต็มตามกำลังการผลิต ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่เกินไปโดยไม่จำเป็น เช่นงานของ Azadeh และ Jalal (2011) ทำการทดลองย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนของเศษผักผลไม้ของถังกวนผสมแบบสมบูรณ์ ขนาด 70 ลิตร โดยทดลองที่อัตราการสูบสารอินทรีย์เข้าเท่ากับ 1.4, 2, 2.75 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยพบว่าที่ 1.4 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความเหมาะสม สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.25 ลูกบาศก์เมตร มีเทนต่อกิโลกรัมของเศษไม้ ขณะที่ Poliafico (2007) กล่าวว่า อัตราการสูบสารอินทรีย์เข้าเท่ากับ ที่นิยมโดยทั่วไปคือ 0.5-3 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

5) ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมัก (Retention time) ระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมักขึ้นอยู่กับปริมาณ และประเภทของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป รวมถึงรูปแบบของระบบถังหมัก หากระยะเวลาในการกักเก็บสั้นเกินไปก็จะไม่พอสำหรับแบคทีเรียที่จะผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้แบคทีเรียยังจะถูกถ่ายออกจากระบบเร็วเกินไปส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียลดลงไป ทำให้แบคทีเรียที่เหลืออยู่ทำการย่อยไม่ทันและอาจทำให้ค่า pH ในถังหมักลดลงขึ้นได้ในขณะเดียวกัน การที่ระยะเวลากักเก็บนานเกินไปจะทำให้เกิดตะกอนของสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายแล้วสะสมอยู่ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่โดยไม่จำเป็น ระยะเวลาในการกักเก็บส่วนใหญ่จะประมาณ 14 - 60 วัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ ค่าปริมาณของแข็ง อุณหภูมิ ขนาดและประเภทของถังย่อย และปริมาณสารอินทรีย์ที่เติม ระยะเวลาในการกักเก็บนั้นเป็นตัวบ่งชี้

ว่าแบคทีเรียจะมีชีวิตได้นานเท่าไหร่โดยไม่มีการเติมอาหาร เนื่องจากระยะเวลาการกักเก็บนั้นหมายถึง ระยะเวลาที่แบคทีเรียต้องการเพื่อย่อยอาหารให้หมด ดังนั้นเมื่อไหร่ก็ตามที่แบคทีเรียยังย่อยอาหารไม่หมดก็หมายความว่า แบคทีเรียจะยังไม่ตายจากการขาดอาหาร

6) ปริมาณของแข็ง (Total Solid Content, TSC) ของสารอินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพแบ่งเป็นสองระดับคือ

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

ถังหมักที่ออกแบบสำหรับเติมสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งสูงจะต้องใช้พลังงานมากกว่าในการสูบน้ำตะกอน (Slurry) แต่เนื่องจากในระบบ High solid ความเข้มข้นของน้ำในถังหมักสูงกว่า พื้นที่ที่ใช้ก็จะน้อยกว่าในทางกลับกัน ถังหมัก Low solid สามารถใช้เครื่องสูบน้ำทั่วไปที่ใช้พลังงานน้อยกว่าสูบน้ำตะกอน แต่ก็ต้องใช้พื้นที่มากกว่าเนื่องจากปริมาตรต่อสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปสูงขึ้น แต่กระนั้นการที่น้ำตะกอนมีความใสกว่าก็ทำให้การหมุนเวียนและกระจายตัวของของแบคทีเรียและสารอินทรีย์ดีขึ้นและการที่แบคทีเรียสามารถสัมผัสสารอินทรีย์อย่างทั่วถึงก็ช่วยให้การย่อยและการผลิตก๊าซเร็วขึ้น

7) การกวนผสม (Mixing) เป็นการกวนผสมของตะกอน น้ำ และสารอินทรีย์ เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนเพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดก๊าซเร็วขึ้นและมากขึ้น นอกจากนี้ยังป้องกันการตกตะกอนและตะกอนลอย (Scum) ซึ่งตะกอนอาจจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวจากถัง

8) สารอาหาร สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อการเจริญเติบโต นอกเหนือไปจากคาร์บอนและไฮโดรดเจนแล้ว ยังมีไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม แคลเซียม นอกจากนี้ก็มีธาตุที่จำเป็นในปริมาณน้อยมากๆ อาทิเช่น เหล็ก แมงกานีส ลิบดินัม สังกะสี โคบอลต์ ซิลิเนียม ทังเสตน และนิเกิล เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 2.5 แต่ขยะอินทรีย์โดยทั่วไปจะมีธาตุอาหารเหล่านี้ในระดับที่สมดุลพอเพียง ดังนั้นในการหมักจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารใดๆ ลงไป

ตารางที่ 2.5 สารอาหารที่จำเป็นในกระบวนการหมักย่อยสร้างก๊าซชีวภาพ

สารอาหารที่จำเป็น	ระดับที่เหมาะสม (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)
Barium (Ba)	0.05
Iron (Fe)	0.2
Calcium (Ca)	0.03
Cobalt (Co)	0.005
Magnesium (Mg)	0.02
Molybdenum (Mo)	0.005
Nickel (Ni)	0.01

ที่มา : (Jorgensen, 2009)

9) สารยับยั้งและสารพิษ (Inhibiting and Toxic Materials) เช่น กรดไขมันระเหยได้ ไฮโดรเจน หรือแอมโมเนีย รวมถึงธาตุไอออน สารพิษ โลหะหนัก สารทำความสะอาดต่างๆ เช่นสบู่ น้ำยาล้างต่างๆ และยาปฏิชีวนะ สามารถส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตและการผลิตก๊าซของแบคทีเรียได้ ธาตุไอออนในปริมาณน้อย เช่น โซเดียม โปแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟอร์ แอมโมเนียม สามารถช่วยกระตุ้นการเติบโตของแบคทีเรียได้เช่นกัน แต่ถ้าหากปริมาณนั้นมากก็จะส่งผลเป็นพิษได้ ยกตัวอย่างเช่น แอมโมเนียในปริมาณ 50-200 มิลิกรัมต่อลิตร จะเป็นผลดี ช่วยในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่เมื่อใดที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงกว่า 1,500 มิลิกรัมต่อลิตร ก็จะเริ่มส่งผลเสีย ในทางเดียวกันโลหะหนักบางประเภท เช่น ทองแดง นิเกิล โครเมียม สังกะสี ตะกั่ว และอื่นๆ ในปริมาณที่น้อยๆ ช่วยในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่เมื่อความเข้มข้นสูงก็จะเป็นพิษ รายละเอียดของสารเคมีที่มีผลยับยั้ง และมีความเป็นพิษต่อการหมักย่อยแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สารเคมีที่มีผลยับยั้ง และมีความเป็นพิษต่อการหมักย่อย

สารเคมี	ระดับที่ยับยั้งการหมัก	ระดับที่เป็นพิษต่อการหมัก
Ammonia, free, NH_3	50-100 mg N/l	100-200 mg N/l
Ammonia, total, NH^{4+}+NH_3	1,000-6,000 mg N/l	10,000 mg N/l (pH<7,5)
Chloride, Cl^-	< 8,000 mg/l	10,000 mg/l
Cyanide, CN^-	2-20 mg/l	30 mg/l
Formaldehydel	100-400 mg/l	500-1,000 mg/l
Phenol, C_5H_5OH	100-200 mg/l	
Chloroform, $CHCl_3$	>1 mg/l	>50 mg/l
	(single dose)	(continuous feed)
Hydrogen, H_2	p(H_2) ca. 10-4 atm.	
Copper, Cu^{++}	10-250 mg/l	
Chrome, Cr^{+++}	50-100 mg/l	200-400 mg/l
Nickel, Ni^{++}	100-200 mg/l	300-1,000 mg/l
Sodium, Na^+	3,000-10,000 mg/l	
Calcium, Ca^{++}	8,000 mg/l	
Magnesium, Mg^{++}	3,000 mg/l	
Zink, Zn^+	350-1,000 mg/l	
Sulphate, SO_4^{--}	500-4,000 mg/l	
Sulphide, (as sulphur)	200 mg/l	
Hydrogen sulphide, H_2S	250-1,000 mg/l	

ที่มา : (Jorgensen, 2009)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

10) อัลคาลินิตี้ (Alkalinity) หมายถึง ความสามารถในการรักษาระดับความเป็นกรด - ด่าง ค่าอัลคาลินิตี้ที่เหมาะสมต่อการหมักมีค่าประมาณ 1,000-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอร์เนต ($CaCO_3$)

11) อัตราส่วนของ หัวเชื้อต่อสารตั้งต้น (inoculums-to-substrate ratio (ISR) (โดยน้ำหนักของแข็งระเหย)) มีหลายการทดลองที่แนะนำอัตราส่วนที่เหมาะสมอาทิเช่น Owen และคณะ แนะนำเท่ากับ 1 มีความเหมาะสม (Owen และคณะ, 1979) ขณะที่ Turick และคณะ แนะนำที่เท่ากับ 2 มีความเหมาะสม เป็นต้น (Turick และคณะ, 1991) การทดลองของ Kuusik และคณะใช้ ISR ที่ 0.2-0.5 (Kuusik และคณะ,2014) เป็นต้น

2.5 การประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP)

วิธีบีเอ็มพี เป็นวิธีทางวิทยาศาสตร์ที่นิยมใช้ในการประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนเป็นอย่างมาก โดยพบว่าในปี ค.ศ.1991 มีการงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในฐานข้อมูลเว็บไซต์ของ ISI จำนวน 7 วารสาร และเพิ่มเป็น 70 วารสารในปี ค.ศ. 2007 แต่การเปรียบเทียบข้อมูลในสมัยนั้นยังทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจาก ความแตกต่างของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และสภาวะที่ใช้ในการทดลองที่ค่อนข้างมีความหลากหลายเป็นอย่างมาก อาทิเช่น อัตราส่วนของสารอาหาร น้ำที่เติม พื้นที่ว่างที่เหลือด้านบนของขวด ค่า pH และระบบการตรวจวัดที่ใช้ในวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น ได้มีความพยายามในการคิดวิธีมาตรฐาน BMP อาทิเช่นในการประชุมที่ประเทศแบลเยียมในปี ค.ศ. 2001 ได้คิดวิธี ABAI-TG แต่ก็ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจาก ความหลากหลายในการทดลองข้างต้น วิธีที่ใช้มีความแตกต่างกันซึ่งถูกปรับโดยผู้วิจัยและพบว่าวิธีการ ABAI-TG มีความผิดพลาดบ้างอย่างจึงไม่ได้รับความนิยม ดังนั้นในปัจจุบันจึงยังไม่มีการกำหนดวิธีการที่เป็นมาตรฐานชัดเจน (Angelidaki และคณะ , 2009)

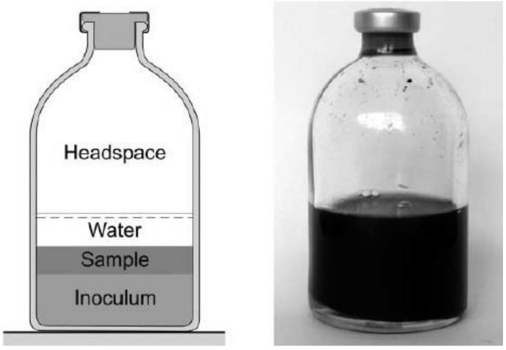
2.5.1 หลักการของวิธี BMP

วีธี BMP ใช้ในการประเมินศักยภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพหรือก๊าซมีเทน ของการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนของสารตั้งต้นที่ใส่ลงไป เป็นวิธีการที่ไม่แพง มีการทำซ้ำทำให้สามารถเปรียบเทียบได้อย่างถูกต้องถึงศักยภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพของสารตั้งต้น หรือสภาวะที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกัน ทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการออกแบบระบบการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5.2 ขั้นตอนในการทำตามวิธี BMP

เริ่มโดยขวดที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.9 จะถูกนำมาทำการไล่อากาศออกโดยก๊าซไนโตรเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปใช้ที่อัตราส่วนเท่ากับ 80:20 โดยปริมาตร และในการทำทดลองจะมีการกำหนดปริมาณสารตั้งต้น ปริมาณหัวเชื้อ และสภาวะเริ่มต้นต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง โดยปริมาตรของสารต่างๆที่เติมลงไปในขวดจะถูกกำหนด เพื่อให้เหลือพื้นที่ว่าง (Headspace) ประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด มีการซิลฝาด้านบน โดยในการทดลองจะมีตรวจวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ อาทิเช่น การแทนที่น้ำ การวัดปริมาตร การวัดด้วยเครื่องมือขั้นสูงเพื่อหาองค์ประกอบ ตามระยะเวลาที่กำหนด หรือในบ้างครั้งอาจมีการวัดพารามิเตอร์อื่นๆ ตามระยะเวลาที่กำหนดเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง BMP ต่อไป



รูปที่ 2.9 ขวด BMP
(Angelidaki และคณะ, 2009)

2.6 การหมักร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Co-digestion)

การหมักร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการที่กระตุ้นการย่อยให้มีประสิทธิภาพโดยเป็นการย่อยสารอินทรีย์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ซึ่งในอดีตจะเป็นการย่อยสารอินทรีย์ชนิดเดียว ซึ่งการหมักร่วมกับสารอื่น (co-substrate) จะช่วยปรับปรุงให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ดีขึ้น เนื่องจากสารที่เติมลงอาจช่วยในเรื่องของสารอาหารบางตัวที่ขาดไป หรือช่วยเป็นตัวกลางในการย่อย ซึ่งข้อดีและข้อเสียของการหมักร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน มีดังนี้ (Kangle และคณะ, 2012)

<u>ข้อดี</u>

- ช่วยปรับสมดุลของสารอาหารและการย่อยสลาย
- ช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่มากขึ้น
- ช่วยลดค่าธรรมเนียมในการกำจัดของเสีย
- กากที่เหลือจากการหมักสามารถใช้เป็นสารปรับปรุงดิน หรือปุ๋ยได้ใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้
- ลดระยะเวลาในการหมัก
- เป็นตัวกลางในการหมัก

<u>ข้อเสีย</u>

- ทำให้ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งสูงขึ้น
- จำเป็นต้องมีการบำบัดเบื้องต้นก่อนการหมัก
- การกวนผสมจำเป็นอย่างยิ่งในการหมักร่วม
- น้ำเสียที่เกิดขึ้นอาจต้องการการบำบัดโดยวิธีอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- กากที่เกิดจากการหมักต้องได้รับการดูแลอย่างเหมาะสมต่อไป
- ควรใส่ใจเรื่องของข้อกำหนดสุขาภิบาลต่างๆ

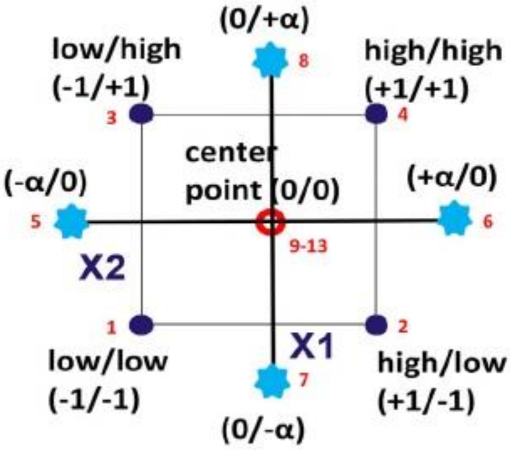
2.7 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD)

CCD เป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัย ห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แสดงดังรูปที่ 2.10 ประกอบด้วยแผนการทดลอง ดังนี้ (กัลยาณี เต็งพงศธร, 2554)

1) ตำแหน่งการทดลอง ของ 2^n Fractorial Design (ถ้า n ในที่นี้คือตัวแปรอิสระ 2 ตัว ดังนั้น 2^2 จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือ (-1,-1) (+1,-1) (+1, +1) (-1, +1)
2) ตำแหน่งการทดลอง ที่เพิ่มขึ้นมาอีก 4 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งที่เป็น แนว + α หรือ - α ในแนวแกน คือ (+ α, 0) (- α, 0) (0, + α) (0, - α)
3) ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่การทดลองอีก 1 ตำแหน่ง คือ Central Point (ตำแหน่ง 0,0)
4) เพราะฉะนั้นการทดลองแบบ CCD ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว จะมีตำแหน่งเพิ่มขึ้นจาก 2^2 Fractorial Design อีก 5 ตำแหน่ง คือ (+ α, 0) (- α, 0) (0, + α) (0, - α) และ (0, 0) ทำให้การทดลองแบบนี้ จึงสามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษาได้มากกว่า 2^2 Fractorial Design

สำหรับการทดลอง แบบ CCD นั้น สามารถกำหนดตำแหน่งของการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



Design matrix

Run	X1	X2
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1,41421	0
6	1,41421	0
7	0	-1,41421
8	0	1,41421
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างรูปแสดงปัจจัย แกน และจุดศูนย์กลางของ CCD ของตัวแปร 2 ปัจจัย (Fjodorova และ Novic, 2015)

ตารางที่ 2.7 แสดงจำนวนตำแหน่งการทดลอง CCD ตามจำนวนตัวแปรอิสระ

จำนวนตัวแปรอิสระ (X_i) = n	2	3	4	5
จำนวนตำแหน่งการทดลองทั้งหมดใน CCD	9	15	25	43
ระดับของค่า $\alpha = 2^{n/4}$	1.4142	1.6818	2	2.3784

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

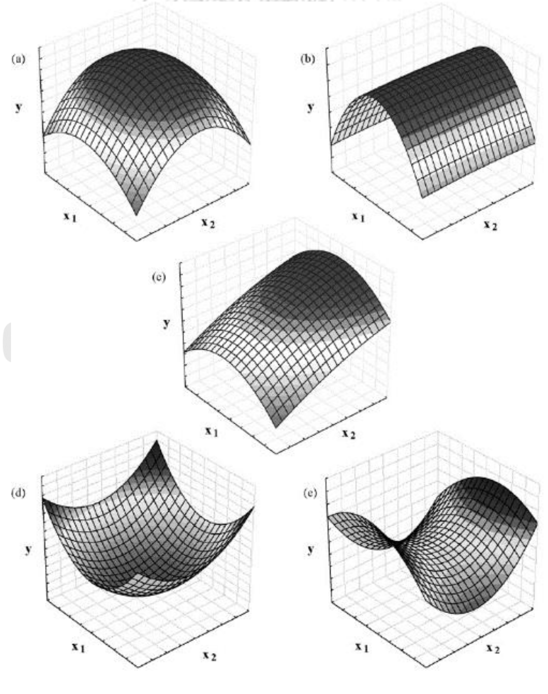
2.8 เทคนิคการนำเสนอข้อมูลแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM)

เมื่อใช้แผนการทดลองแบบ Central Composite Design, CCD และใช้เทคนิคการนำเสนอข้อมูลแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) (กัลยาณี เต็งพงศธร, 2554) ซึ่งเป็นเทคนิคการนำเสนอในรูปแบบกราฟสามมิติ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรอิสระ 2 ตัว ซึ่งอยู่ในแนวระนาบ หรือแกน X และ แกน Y) กับตัวแปรตาม ซึ่งอยู่ในแนวตั้ง แกน Z ระดับการวัดของตัวแปรต้องอยู่ในระดับ Interval หรือ Ratio scale จึงจะนำเสนอแบบ RSM ได้ มีเทคนิคการฉายภาพ แบบ Top view แล้ว โปรเจคลงมาที่พื้นระนาบ เรียกว่าการนำเสนอแบบแผนภาพคอนทัวร์ (Contour plot) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระสองตัวกับตัวแปรตาม 1 ตัวนี้

สามารถอธิบายได้โดยการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ หรือที่เรียกว่า ตัวแบบ (Model) Y= f(X1 +X2 +...+Xk) + Error

<u>ขั้นตอนการทำ RSM</u>

1) เลือกแผนการทดลองที่เหมาะสม เช่น Factorial design, CCD, Mixture Design เป็นต้น และมีจำนวนสิ่งทดลองมากพอที่จะสร้างแผนภาพคอนทัวร์ได้
2) สร้างสมการตัวแบบ หรือ Model จากวิธีวิเคราะห์ความถดถอย
3) สร้างแผนภาพ RSM plot และ Contour plot จากสมการตัวแบบที่ได้
4) ตรวจสอบจุดหรือช่วงที่เหมาะสม (Optimization) พิสูจน์สมการตัวแบบที่สร้างได้ โดยการใช้จุดที่อยู่ในบริเวณช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระเพื่อนำไปทำการทดลองอีกครั้งแล้ววัดค่าตัวแปรตาม เพื่อตรวจสอบกับตัวแปรตามที่หาได้จากสมการ ว่ามีความใกล้เคียงกันหรือไม่อย่างไร (เปรียบเทียบค่าสังเกตที่ได้จากการทำการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการตัวแบบ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสม ให้เริ่มต้น ทดลองเพื่อได้ข้อมูลมาสร้างสมการตัวแบบใหม่



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างแสดงการนำเสนอข้อมูลแบบพื้นที่ผิวตอบสนองแบบต่างๆ ของ 2 ตัวแปร แสดงตำแหน่งที่ให้ค่าสูงสุดที่จุดต่างๆ (a) สูงสุดตรงกลาง (b) สูงสุดเป็นเนินตรงกลาง (c) สูงสุดที่ขอบของพื้นที่การทดลองด้านหนึ่ง (d) สูงสุดที่มุมทั้งสี่ด้าน (e) สูงสุดที่ขอบของพื้นที่การทดลองทั้งสองด้าน (Bezerra และคณะ, 2008)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลชนิดเดียว

1) มันสำปะหลังและแป้ง

Mrafkova (2000) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยเติมแป้ง โดยน้ำเสียมีซีโอดี 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สูบเข้าถังด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่เท่ากับ 15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นเปรียบเทียบกับถังกรองไร้อากาศยูเอเอสบี ขนาด 13.05 และ 3.7 ลิตร ตามลำดับ โดยใช้หัวเชื้อจากโรงบำบัดน้ำเสียส่วนกลางมีค่า 18.2 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร ใส่ในลงในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นและยูเอเอสบีปริมาณ 7.4 และ 2.1 ลิตร พบว่าหลังจากเดินระบบเป็นเวลา 50 วัน พบว่าน้ำที่ปล่อยออกจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นมีค่าซีโอดีต่ำกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่ถังกรองไร้อากาศยูเอเอสบีมีค่าสูงกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นสูงกว่าระบบยูเอเอสบีเท่ากับร้อยละ 90 และ 80 ตามลำดับ

Olukemi และ Ugoji (2010) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักหัวมันสำปะหลังและมันเทศ ด้วยด้วยขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้หัวมันสำปะหลังและมันเทศ 100 กรัมผสมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ปั่นเป็นเวลา 30 วินาทีเพื่อเตรียมตัวอย่าง ระยะเวลาการหมัก 72 ชั่วโมง พบว่า มันสำปะหลังมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่ามันเทศ เท่ากับ 397 และ 238 มิลลิลิตรต่อวัน และค่า pH ของการหมักมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลามากขึ้น ค่า pH ของมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นจาก 5.6 เป็น 5.8 และมันเทศเพิ่มขึ้นจาก 6.6 เป็น 6.7 ที่ระยะเวลาการหมัก 12 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ และมีการนับจำนวนแบคทีเรียพบว่ามันสำปะหลัง และมันเทศมีจำนวนแบคทีเรียเฉลี่ย 5.9 และ 7.6 $\log_{10}$cfu/ml ซึ่งจำนวนแบคทีเรียจะมีปริมาณมากในช่วงแรกของการหมักอาจเนื่องจากการแบคทีเรียในกลุ่มแอโรบิคแบคทีเรีย และ แฟคคัลเททีฟแบคทีเรีย เป็นกลุ่มที่มีความสำคัญในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและแอซิโดเจเนซิส และในช่วงหลังมีจำนวนน้อยส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียในกลุ่มแอนแอโรบิคแบคทีเรียที่มีความสำคัญในปฏิกิริยาเมทาโนเจเนซิส

Tawfik และคณะ (2013) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานแป้งข้าวโพด โดยใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นขนาด 30 ลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยใช้หัวเชื้อจากถังไร้อากาศจากการหมักเศษอาหารมีค่า 40 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร ใส่ในลงในถังปริมาณ 15 ลิตร น้ำเสียมีค่าซีโอดีเฉลี่ย 20,483±6,895 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีเท่ากับ 0.64 โดยทำการศึกษาผลของภาระบรรทุกของสารอินทรีย์เริ่มต้นที่ป้อนเข้าถัง เท่ากับ 7.4 7.6 และ 22 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยจะมีระยะเวลาการหมักเท่ากับ 10 15 และ 30 วัน ตามลำดับ และสูบเข้าถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นด้วยอัตรา 15 ถึง 30 ลิตรต่อวัน พบว่าอัตรา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาระบรรทุกของสารอินทรีย์เริ่มต้นที่สูบเข้าถังมากถึง 22 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 50 42 และ 44 ตามลำดับ รวมถึงเมื่อเปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตมีเทนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่สูบเข้าถังเท่ากับ 7.4 และ 22 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ 290 และ 300 ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ

Ghimire และคณะ (2015) ทำการรวบรวมข้อมูลการจัดการกากของเสียของประเทศไทยจากข้อมูลจากจากโรงงาน Suanguan Wongse Industries Co. Ltd พบว่าการนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังมาผ่านกระบวนการย่อยแบบแอนแอโรบิค สามารถได้พลังงานในรูปของไฟฟ้า Net energy gain ออกมาเมื่อหักพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิต 660 เมกะจูลต่อตันของเศษกากของแข็ง และสามารถให้พลังงานในรูปของความร้อน Net energy gain ออกมาเมื่อหักพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการเรียบร้อยแล้วถึง 762 เมกะจูลต่อตันของเศษกากของแข็งจากอุตสาหกรรมแป้งมัน

Singh, Singh และ Verma (2018) ทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียจากครัวเรือน ซึ่งเป็นข้าวถึงร้อยละ 85 จึงมีองค์ประกอบเป็นแป้งที่สูง โดยทำการหมักด้วยถังขนาด 2.68 ลิตร อัตราส่วนของของเสียต่อน้ำที่ใช้เท่ากับ 1:1 และ 2:1 ที่สภาวะมีโซฟิลิค พบว่าระยะเวลาการหมัก 9 วัน เกิดแก๊สได้ดีในวันที่ 3 และ 4 ของการหมัก และ pH ของระบบลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 1 และ 2 ของการหมักจึงได้ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นบัฟเฟอร์ในการปรับ pH และอัตราส่วน 2:1 ผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดประมาณ 16 ลิตร

สุรีลักษณ์ รอดทอง (2557) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักหัวมันสำปะหลังที่เตรียมเป็นชิ้นหัวมันแห้ง ในถังปฏิกรณ์มีปริมาตรการหมัก 5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 29 - 31 องศาเซลเซียส โดยได้เปรียบเทียบการใช้หัวมันสำปะหลัง 2 พันธุ์ คือ ระยอง 11 และ ระยอง 5 มีแป้งร้อยละ 25.56 และ 28.72 ตามลำดับ พบว่าหัวมันสำปะหลังที่เตรียมเป็นชิ้นหัวมันแห้ง มีความชื้นร้อยละ 17.37 และ 14.18 ตามลำดับ ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 1.0 เติมยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนร้อยละ 0.04 น้ำหนักต่อปริมาตร มันสำปะหลังพันธุ์ระยอง 11 และ 5 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 626 และ 608 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมด ภายในระยะเวลาหมัก 38 และ 35 วัน ตามลำดับ และร้อยละมีเทนเท่ากับ 75.9 และ 76.0 โดยปริมาตร ตามลำดับ

ธัญพิชชา วรรธกิจ และรจพรรณ (2559) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเส้นขนมจีนหมัก กับจุลินทรีย์อีเอ็มชนิดน้ำ อีเอ็มชนิดก้อน และมูลโค โดยใช้ถังหมัก 20 ลิตร หมักแบบแบทช์ ระยะเวลาการหมัก 15 วัน ที่สภาวะมีโซฟิลิค พบว่า น้ำเสีย 10 ลิตร กับอีเอ็มน้ำ 2 ลิตร และมูลโค 3 ลิตร มีประสิทธิภาพการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด 3.31 ลิตร/วัน ปริมาณ

ก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 27.81 ลิตร มีร้อยละมีเทน 62.39 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยร้อยละ 85.77 และ 80.12 ตามลำดับ ซึ่งดีที่สุดในการทดลองนี้

จากงานวิจัยที่ทบทวนจะพบว่าส่วนใหญ่เป็นการศึกษาวิจัยในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังดิบ โดยใช้ส่วนของเปลือกหรือกากมันสำปะหลังเป็นวัสดุหมัก หรือในส่วนที่มีการทดลองเกี่ยวกับแป้งก็เป็นแป้งข้าวโพดไม่ใช่แป้งมันสำปะหลัง และจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าของเสียจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังค่อนข้างมีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพได้

2) ตะกอนเลน

Lanari และ Franci (1998) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนน้ำเสียจากการเลี้ยงปลา trout ซึ่งน้ำเสียจะผ่านการตกตะกอนด้วยคอลัมท์ และส่วนของตะกอนจะถูกส่งเข้าถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น บรรจุตัวกรองโฟมโพลียูรีเทนขนาด 35 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวเฉพาะ 1.375 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาตรตัวกรองเท่ากับ 0.291 ลูกบาศก์เมตร ถังกรองมีปริมาตร 0.424 ลูกบาศก์เมตร ทำการหมักที่อุณหภูมิ 24-25 องศาเซลเซียส โดยถังปฏิกรณ์จะใช้หัวเชื้อในการหมักจากถังหมักไร้อากาศจากครัวเรือนทำการเติม 3 ครั้ง ครั้งละ 20 ลิตรเพื่อเดินระบบเริ่มต้น โดยอัตราการสูบน้ำเสียปรับเปลี่ยนตามเปอร์เซ็นต์การให้อาหารปลา ที่ 1 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักปลา เท่ากับ 10 12 และ 17 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ ระยะเวลากักเก็บ 38 31 และ 22 วันตามลำดับ พบว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ 0.46 0.45 และ 0.40 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ ซึ่งร้อยละของมีเทนของทุกการทดลองมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 จากการทดลองพบว่าถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นมีส่วนสำคัญในการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยและของแข็งระเหยเป็นอย่างมาก

Srisetpol และคณะ (2013) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล ด้วยถังปฏิกรณ์แบบแบทซ์ขนาด 80 ลิตร โดยตะกอนเลนที่ใช้ในการหมักมีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 7.7 มีปริมาณของแข็งระเหย 22,653 มิลลิกรัมต่อลิตร มีซีโอดี และบีโอดี เท่ากับ 7,840 และ 2,334 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 9.93 ทำการทดลองเป็นเวลา 30 วัน พบว่ามีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 8.2 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ร้อยละของมีเทนเท่ากับ 44.34 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายและซีโอดีร้อยละ 89 และ 85 ตามลำดับ และค่า pH ระหว่างการหมักเท่ากับ 5.8-7.8

ประสิทธิ์ ศรีนคร และคณะ (2554) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล ที่มีวิธีการเลี้ยงแตกต่างกัน 2 แบบ คือ การเลี้ยงกุ้งทะเลแบบไม่ใช้จุลินทรีย์อีเอ็ม (Effective Microorganisms) ในขณะเลี้ยง และแบบใช้จุลินทรีย์อีเอ็มในขณะเลี้ยง ด้วยถังปฏิกรณ์แบบแบทซ์ขนาด 80 ลิตร ทำการทดลองเป็นเวลา 31 วัน พบว่าตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่ไม่มีการใช้อีเอ็มมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 25 ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดี และมีอัตราการ

เกิดก๊าซมีเทน 11 ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดีโดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายและซีโอดีที่ร้อยละ 89 และ 85 ตามลำดับ และตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีการใช้อีเอ็ม มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 0.15 ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดี และมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทน 0.17 ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดี โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายและซีโอดีที่ร้อยละ 80 และ 95 ตามลำดับ ดังนั้นจากการทดลองจึงเห็นได้ชัดว่าตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีการใช้อีเอ็มในขณะเลี้ยงทำให้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่ำกว่าเป็นอย่างมาก

3) ตะกอนสลัดจ์

David และคณะ (2005) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ 4 แห่งของอิตาลี มีขั้นตอนการบำบัดที่แตกต่างกัน แต่มีขั้นตอนบำบัดหลักๆ ที่เหมือนกัน คือ บ่อเติมอากาศ และบ่อตกตะกอน โดยตะกอนสลัดจ์ที่ใช้จะผ่านการกรองด้วยสายพาน มาหมักด้วยถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 35-37 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการหมัก 20-40 วัน อัตราการป้อนภาระบรรทุกของสารอินทรีย์ 0.7-1.0 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และเปอร์เซ็นต์ของแข็ง 2.6-3.9 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.5-0.9 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยที่ร้อยละ 13-27 โดยการศึกษานี้พบว่าตะกอนสลัดจ์ที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียที่มีระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้นจาก 8 เป็น 35 วัน จะมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงจาก 900 เป็น 500 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย

Karlsson และคณะ (2011) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของตะกอนสลัดจ์จากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและโรงงานผลิตกระดาษแบบต่างๆ อาทิเช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษลูกฟูกโดยได้ทำการทดลองในขวดเซรั่มขนาด 300 มิลลิลิตร เติมหัวเชื้อในการหมัก 20 มิลลิลิตร และเติมตะกอนสลัดจ์ 80 มิลลิลิตร โดยในการศึกษานี้มีการศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกเริ่มต้น 3.4 – 18.9 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร และอายุสลัดจ์ 5-20 วัน ที่ระยะเวลาการหมัก 20 วัน พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกเริ่มต้นเท่ากับ 6.6 กรัมของแข็งระเหยต่อลิตร อายุสลัดจ์ 7 วัน สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด 197 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย และได้มีการทดลองผลการรีดน้ำออกจากตะกอนสลัดจ์จากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โดยตะกอนสลัดจ์ที่เก็บโดยตรงที่บ่อเติมอากาศจะมีของของแข็งทั้งหมด 0.6 เปอร์เซ็นต์ ของแข็งระเหย 70 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งทั้งหมด และที่ผ่านการรีดน้ำ 2 ตัวอย่าง ตัวอย่างที่หนึ่งตะกอนสลัดจ์มีของแข็งทั้งหมด 5.6 เปอร์เซ็นต์ ของแข็งระเหย 84 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งทั้งหมด และตัวอย่างที่สองมีของแข็งทั้งหมด 12 เปอร์เซ็นต์ ของแข็งระเหย 85 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งทั้งหมด พบว่าตะกอนสลัดจ์ที่ผ่านการรีดน้ำทั้ง 2 ตัวอย่าง สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงกว่าตะกอนสลัดจ์ที่เก็บโดยตรงที่บ่อเติมอากาศ

ซึ่งผลิตได้เท่ากับ 145 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตะกอนสลัดจ์ตัวอย่างที่หนึ่งและสองสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 182 และ 188 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ

Liu และคณะ (2018) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพตะกอนสลัดจ์จากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้ขวดเซรั่มขนาด 160 มิลลิลิตร หมักแบบแบทช์ ที่สภาวะมีโซฟิลิค ทำการหมักเป็นเวลา 37 วัน พบว่ามีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนระหว่าง 183-186 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย

Wang และคณะ (2018) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพตะกอนสลัดจ์จากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานน้ำผลไม้ หมักร่วมกับเศษผลไม้ (1:1) โดยใช้ถังสะแตนเลสขนาด 0.8 ลูกบาศก์เมตร เดินระบบแบบต่อเนื่องเติมวัสดุหมัก 20 ลิตรต่อวัน ที่สภาวะมีโซฟิลิค ทำการหมักเป็นเวลา 32 วัน พบว่ามีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 635 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย

พัชรินทร์ ราโช และบุญชัย วิจิตรเสถียร (2555) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักตะกอนสลัดจ์จากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ของถังตกตะกอนขั้นที่ 2 ของโรงงานผลิตน้ำอัดลมด้วยขวดรูปชมพู่ขนาด 300 มิลลิลิตร และเครื่องเขย่า 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยตะกอนสลัดจ์มีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 6.7±0.17 มีปริมาณของแข็งระเหย 6,756±334 มิลลิกรัมต่อลิตร มีซีโอดีเท่ากับ 8,467±456 มิลลิกรัมต่อลิตร มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 15.26 โดยปริมาณตะกอนสลัดจ์ที่ใช้หมัก 200 มิลลิลิตร ทำการหมักเป็นเวลา 15 วัน มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด 167±34 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือเท่ากับ 109 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายและซีโอดีร้อยละ 35 และ 38 ตามลำดับ

จากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าตะกอนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ และตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในการหมักร่วมเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ อีกทั้งการนำตะกอนเลนมาผลิตก๊าซชีวภาพสามารถช่วยกำจัดของแข็งระเหยและซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 80 ขึ้นไป

4) วัสดุอื่น ๆ

Azadeh และ Jalal (2011) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักเศษผัก มีของแข็งทั้งหมดร้อยละ 8 - 9 และของแข็งระเหยร้อยละ 95-97 ของของแข็งทั้งหมด โดยกำหนดอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมักถูกปรับให้เท่ากับ 30 ขนาดถังหมัก 70 ลิตร ทำการกวน 15 นาที ทุก 45 นาที ที่อุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการหมัก 25 วัน โดยได้ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูบเข้าถังเท่ากับ 1.4, 2 และ 2.75 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยจะทำการสูบเข้าเท่ากับ 1 1.5 และ 2 กิโลกรัมของน้ำหนักเปียกต่อวัน ตามลำดับ และทำการเอาออกทุกวันๆละ 2.4 ลิตร พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.4

กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดคือ 250 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย การเกิดมีเทนสูงสุดร้อยละ 64 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายและซีโอดีที่ร้อยละ 88 และ 65 ตามลำดับ และจากการศึกษานี้พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูบเข้าเป็น 2 และ 2.75 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความเป็นด่างและค่า pH มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดย pH ของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์หลังจากหมักเป็นเวลา 25 วัน เท่ากับ 7.8 7.3 และ 6.8 ตามลำดับ

Bassuney และคณะ (2013) ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูบเข้าถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น ขนาดถังหมัก 30 ลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยได้ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูบเข้าถังจากน้ำเสียสังเคราะห์จากสารละลายกลูโคสเท่ากับ 1.2, 1.8 และ 2.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งน้ำเสียมีค่าซีโอดีเท่ากับ 3,600 5,400 และ 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.8 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้สูงสุดร้อยละ 98.6 ที่ระยะเวลากักเก็บ 34 วัน รองลงมาเป็นที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.0 และ 1.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 96.9 ระยะเวลากักเก็บ 26 วัน และร้อยละ 94.94 ระยะเวลากับเก็บ 34 วัน ตามลำดับ และได้ทำการทดลองในขวดเซรั่มขนาด 250 มิลลิลิตร ระยะเวลาการหมัก 5 วัน พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด รองลงมาที่ 1.8 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมีค่า The methanogenic activity เท่ากับ 460 และ 360 กรัมมีเทนซีโอดีต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยต่อวัน ตามลำดับ

Cesaro และ Belgiorno (2015) ได้ทำการทบทวนงานวิจัยต่างๆ รวบรวมการผลิตก๊าซมีเทนจากชีวมวลทางการเกษตรต่าง พบว่ามีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนระหว่าง 80-418 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย อาทิเช่น เศษต้นอ้อย (278 L ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย) ต้นทานตะวัน (231-297 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย) และต้นข้าวสาลี (130-290 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย)

Duan และคณะ (2019) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากมูลหมูด้วยถัง CSTR ขนาด 17.5 ลิตร เดินระบบแบทซ์ ด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ระหว่าง 1.13-3.03 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะมีโซฟิลิค พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.89 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ 4.38 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย และเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่ม ส่งผลให้ร้อยละมีเทนลดลง

2.9.2 การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม

Panichnumsin และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกากมันสำปะหลังกับมูลหมู ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแข็งระเหย กากมันสำปะหลังต่อมูลหมู เท่ากับ 20:80, 40:60 50:50 60:40 80:20 และ 100:0 ด้วยถังปฏิกรณ์กวนแบบสมบรูณ์มีปริมาตรการหมัก 3 ลิตร ใช้มูลวัวเป็นหัวเชื้อ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูบเข้าถังเท่ากับ 3.5 กิโลกรัมของของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เป็นเวลา 15 วัน ของระยะเวลาการหมัก 49 วัน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราส่วน 60:40 ผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดคือ 306 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย และการเกิดมีเทนร้อยละ 61 โดยพบว่าที่อัตราส่วนนี้ทำให้ระบบหมักค่อนข้างเสถียร มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 33 และอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อความเป็นด่างมีค่าน้อยกว่า 0.1 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยและซีโอดีที่ร้อยละ 61 และ 57 ตามลำดับ

Adelekan (2012) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมเปลือกมันสำปะหลังกับมูลหมู มูลสัตว์ปีก และมูลสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม อัตราส่วนเปลือกมันสำปะหลังต่อมูลสัตว์โดยน้ำหนักเท่ากับ 1:1 2:1 3:1 และ 4:1 โดยวัสดุหมักมีน้ำหนักรวม 10 กิโลกรัม เติมน้ำ 10 กิโลกรัม ทำการกวนผสมเป็นเวลา 20 นาทีให้เข้ากัน ระยะเวลาในการหมัก 30 วัน พบว่าที่อัตราส่วน 1:1 ของทุกชนิดของมูลสัตว์สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด และทุกอัตราส่วนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการหมักร่วมเปลือกมันสำปะหลังกับขี้หมู ที่อัตราส่วน 1:1 สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดเท่ากับ 35 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งทั้งหมดเมื่อเทียบกับทุกการทดลอง ขณะที่การหมักเปลือกมันสำปะหลังอย่างเดียวสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เพียง 0.6 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งทั้งหมด

Kuusik และคณะ (2014) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมตะกอนจากบ่อเลี้ยงปลากับตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตะกอนจากบ่อเลี้ยงปลาต่อตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เท่ากับ 10:90 35.6:64.4 50:50 และ 100:0 ปริมาตรการหมัก 4.5 ลิตร ใช้หัวเชื้อในการหมักจากโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพของเทศบาล อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูบเข้าถัง 1.08-1.22 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส สูบเข้าถังทุก 24 ชั่วโมง ด้วยอัตราการสูบ 225 ลิตรต่อวัน กวนผสมทุก 15 นาทีต่อชั่วโมง ซึ่งการทดลองนี้ได้ควบคุมอัตราส่วนหัวเชื้อและวัสดุหมักอยู่ระหว่าง 0.2-0.5 พบว่าที่อัตราส่วน 100:0 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด 413 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 49

Lerdrattranataywee และ Kaosol (2015) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมน้ำเสียจากโรงงานยาง 200 มิลลิลิตรกับกากตะกอนดีแคนเตอร์โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 5 กรัม ในถังหมักกวนผสมสมบรูณ์ มีปริมาตรการหมัก 5 ลิตร ใช้มูลวัวเป็นหัวเชื้อ วัสดุหมักมีค่าซีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยเท่ากับ 147,661 12,428 และ 8,118 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยได้ทำการศึกษาผลของการระยะเวลาในการกวนผสม 12 และ 24 ชั่วโมงต่อวัน ที่ระยะเวลาการหมัก 10

และ 30 วัน อุณหภูมิ 28-36 องศาเซลเซียส พบว่าผลของการกวนที่ต่างกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อการผลิตก๊าซชีวภาพที่ระยะเวลาการหมัก 10 และ 30 วัน ซึ่งพบว่าที่ระยะเวลาการหมัก 10 วัน และอัตราการกวน 12 ชั่วโมงต่อวัน สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด เท่ากับ 441 มิลลิลิตรต่อวัน การเกิดมีเทนร้อยละ 33.1 – 53.2

Pavi, Kramer, Gomes และ Miranda (2017) ศึกษาการหมักร่วมขยะเทศบาลกับเศษผลไม้ที่อัตราส่วน 1:0 1:1 1:3 และ 0:1 ในขวดแก้ว 2 ลิตร เดินระบบแบบแบทช์ ที่สภาวะมีโซฟิลิค โดยพบว่าการหมักร่วมมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนดีกว่าการหมักย่อยขยะ หรือเศษผลไม้เพียงอย่างเดียว และพบว่าอัตราส่วนการหมักร่วม 1:3 มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 397 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยร้อยละ 54.6

วรพจน์ คำจันลา และ รัชพล สันติวรากร (2555) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกากตะกอนจากบ่อพักน้ำเสียกับน้ำเสียจากกระบวนการล้างหัวมันสำปะหลังทีผ่านการสับที่อัตราส่วน 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 ด้วยถังปฏิกรณ์มีปริมาตรการหมัก 10 ลิตร มีการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์แบบไร้อากาศ 3 ลิตร ระยะเวลาในการหมัก 24 วัน พบว่าทีอัตราส่วน 1:4 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด 1.031 ลุกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของวัสดุหมัก การเกิดมีเทนร้อยละ 59.487 และได้นำอัตราส่วนที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุดมาทดลองเพื่อศึกษาการปรับค่า pH ตลอดการทดลองให้อยู่ระหว่าง 6.5-7 และไม่มีการปรับค่า pH และการกวนผสมแตกต่างกัน คือ ระยะเวลาการกวนต่อการหยุด (นาที) 15:15 15:30 15:45 โดยพบว่าการทดลองที่มีการปรับ pH สามารถผลิตได้มากกว่าแบบไม่มีการปรับ pH 4.19 เท่า และการกวน 15 นาที หยุด 15 นาที สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด 1.481 ลุกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของวัสดุหมัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.9.3 การผลิตก๊าซชีวภาพโดยระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน

Panichnumsin และคณะ (2012) ศึกษาการหมักร่วมกากมันสำปะหลังกับมูลหมูที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแข็งระเหย กากมันสำปะหลังต่อมูลหมูเท่ากับ 20:80 40:60 50:50 60:40 80:20 และ 100:0 และทำการเปรียบเทียบการหมักด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบหนึ่งขั้นตอนและสองขั้นตอน โดยถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบหนึ่งขั้นตอน มีปริมาตรการหมัก 3 ลิตร ใช้มูลวัวเป็นหัวเชื้อ ป้อนด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3.5 กิโลกรัมของของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันเป็นเวลา 15 วัน ของระยะเวลาการหมัก 49 วัน ขณะที่ถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบสองขั้นตอนประกอบด้วยถังหมักกรดมีปริมาตรการหมัก 0.5 ลิตร สูบเข้าถังด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 24.47 กิโลกรัมของของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ระยะเวลาในการหมัก 2 วัน ถังหมักก๊าซชีวภาพมีปริมาตรการหมัก 3 ลิตร สูบเข้าถังด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3.27±0.32 กิโลกรัม

ของของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ระยะเวลาในการหมัก 13 วัน ทำการกวนผสมด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ทุก 15 นาทีต่อครึ่งชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราส่วน 60:40 สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดของถังทั้งสองแบบ โดยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบสองขั้นตอนผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าแบบหนึ่งขั้นตอนเท่ากับ 370 306 ลิลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย และการเกิดก๊าซมีเทนร้อยละเท่ากับ 62 และ 57 ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 68 และ 61 และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ร้อยละ 68 และ 57 ตามลำดับ

Promphiphak และ Wongwuttanasatian (2012) ศึกษาการหมักโดยใช้กากมันสำปะหลังเปียก ทำการหมักใช้ถังหมักกรดเป็นถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ขนาด 250 ลิตร ต่ออนุกรมกับถังหมักก๊าซชีวภาพเป็นถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ ขนาด 500 ลิตร จำนวน 2 ถัง ทำการเติมกากมันสำปะหลังเปียก 140 ลิตร ผสมน้ำจนมีของเข็งทั้งหมดร้อยละ 20 เติมหัวเชื้อ 40 ลิตรเข้าสู่ถังหมักกรด น้ำเสียเริ่มต้นเข้าระบบเท่ากับ 0.417 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน pH เริ่มต้นเท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิ 35 องศาสเซลเซียส ทำการป้อนกากมันสำปะหลัง 140 ลิตรทุก 4 วัน จนครบระยะเวลาการหมัก 12 วัน พบว่าระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 140 ลิตรต่อวัน การเกิดมีเทนร้อยละ 54 จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ากากมันสำปะหลัง 1 ตัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 14,000 ลิตรต่อวัน คิดเป็นพลังงานความร้อนเท่ากับ 5,520 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร หรือเท่ากับ 23,107 กิโลจูลน์ต่อลูกบาศก์เมตร

Dieu และคณะ (2015) ศึกษาการหมักร่วมเศษข้าวจากครัวเรือนกับตะกอนจากบ่อเกรอะ ทำการเปรียบเทียบการหมักถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบหนึ่งขั้นตอนและสองขั้นตอน โดยถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบหนึ่งขั้นตอนมีปริมาตรการหมัก 3 ลิตร ทำการเติมเศษข้าว 3 กิโลกรัม และตะกอนบ่อเกรอะ 0.9 กิโลกรัม ของระยะเวลาการหมัก 20 วัน ขณะที่ถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบสองขั้นตอน ประกอบด้วยถังหมักกรดมีปริมาตรการหมัก 1 ลิตร ทำการเติมเศษข้าว 3 กิโลกรัม และตะกอนบ่อเกรอะ 0.9 กิโลกรัมเช่นกัน ระยะเวลาในการหมัก 6 วัน จากนั้นนำกากจากถังหมักกรดเติมลงถังหมักก๊าซชีวภาพปริมาณ 0.15 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งมีปริมาตรในการหมัก 3.2 ลิตร และเติมตะกอนบ่อเกรอะ 3 กิโลกรัม ระยะเวลาในการหมัก 20 วัน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส พบว่าถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบสองขั้นตอนเกิดก๊าซมีเทนสูงสุดมากกว่าแบบหนึ่งขั้นตอนที่การเกิดมีเทนร้อยละ 45.1 และ 2.8 ตามลำดับ

Paudel, Kang, Yoo และ Seo (2017) ศึกษาการหมักร่วมเศษอาหารกับน้ำเสียจากส้วมด้วยระบบหมักแบบสองขั้นตอนประกอบด้วยถังหมักกรดและถังหมักก๊าซเป็นถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ขนาด 10 และ 35 ลิตร ตามลำดับ เดินระบบด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เข้าถังหมักก๊าซเท่ากับ 1.24 และ 1.76 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่สภาวะมีโซฟิลิค พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เท่ากับ 1.24 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มี

ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ 728 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย และเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมีเทนลดลง และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลงและร้อยละมีเทนลดลง

Xu, Li, Ge, Yang และ Li (2018) ได้ทำการทบทวนงานวิจัยและแสดงให้เห็นว่าการหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้สูงกว่าการหมักแบบหนึ่งขั้นตอน อาทิเช่น การหมักย่อยของเศษอาหารจากห้องครัว เศษอาหารที่มีน้ำมัน น้ำตาลกูลโคส และเศษอาหารจากโรงอาหาร และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยดีขึ้นด้วยเช่นกัน

ปนัดดา นิลอาญา (2552) ศึกษาการหมักน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้สารด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกึ่งบริสุทธิ์ ทำการหมักใช้ถังหมักกรดเป็นถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ขนาด 0.5 ลิตร ต่ออนุกรมกับถังหมักก๊าซชีวภาพเป็นถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ขนาด 5 ลิตร อัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบ 0.5 ลิตรต่อวัน คงที่ตลอดการทดลอง โดยถังหมักกรดมีระยะเวลาการหมัก 1 วัน และถังหมักก๊าซชีวภาพมีระยะเวลาการหมัก 10 วัน ผลการวิจัยพบว่าอัตราภาระสารอินทรีย์ที่สูบเข้าถังเท่ากับ 0.46-1.50 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายร้อยละ 93.30-98.04 ซึ่งระบบมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูง โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 0.21-0.39 และ 0.19-0.25 ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ การเกิดมีเทนร้อยละ 63.32-68.58 ซึ่งผลจากการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ตั้งแต่ 0.46-1.50 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีปริมาณก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดและร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีละลายได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 98 และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 300 และ 200 ลิตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ

จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมของเสียจากกระบวนการผลิตมันสำปะหลังกับวัสดุอื่นที่ช่วยเพิ่มไนโตรเจน ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและร้อยละมีเทนดีขึ้น ร่วมถึงการใช้ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนช่วยให้ระบบการหมักมีความเสถียรและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพดีขึ้นเช่นกัน เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุหมักทั้ง 3 ชนิดในการใช้เป็นวัสดุหมักร่วมเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ รายละเอียดดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ความเหมาะสมของวัสดุหมักแต่ละชนิดในการหมักก๊าซชีวภาพ

สารชีวมวล	ความเหมาะสมใช้เป็นวัสดุในการหมักก๊าซชีวภาพ
กากตะกอนแป้ง	- มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงคิดเป็นร้อยละ 31.25 โดยน้ำหนักเปียก อีกทั้งมีปริมาณคาร์บอนสูงโดยมีค่า C/N ratio สูงถึง 242 ซึ่งเหมาะใช้เป็นแหล่งคาร์บอนสำหลับจุลินทรีย์ในการหมักก๊าซชีวภาพ - จากการสำรวจโรงงานพบว่า มีปัญหาเรื่องกลิ่นจากการตั้งทิ้งไว้เพื่อรอการขนไปกำจัดหลายวันในช่วงฤดูฝน - จากการทบทวนเอกสารพบว่าหัวมันสำปะหลังมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงถึง 626 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งทั้งหมด (สุรีลักษณ์ รอดทอง, 2557) และกากเศษมันก็สามารถนำมาผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 762 เมกะจูลต่อตัน (Ghimire และคณะ,2015) จึงคาดว่ากากตะกอนแป้งน่าจะมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วย
ตะกอนสลัดจ์	- มีปริมาณไนโตรเจนสูงโดยมีค่า C/N ratio เท่ากับ 4.27 ซึ่งอาจช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนแป้งดีขึ้นจากการหมักร่วมโดยช่วยปรับอัตราส่วน C/N ให้เหมาะสม - จากการสำรวจโรงงานพบว่า เสียค่าใช้จ่ายสูงในการกำจัด อาจก่อปัญหาถ้าผู้รับกำจัดทำไม่ถูกต้องเหมาะสม และมีค่าใช้จ่ายในการเติมโพลีเมอร์ในการขึ้นรูปตะกอนสูง - จากการทบทวนเอกสาร การนำตะกอนสลัดจ์จากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 1,060 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย (พัชรินทร์ ราโช และบุญชัย วิจิตรเสถียร, 2555)
ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล	- มีปริมาณไนโตรเจนสูงโดยมีค่า C/N ratio เท่ากับ 4.35 ซึ่งอาจช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพดีขึ้นจากการหมักร่วมจากการช่วยปรับอัตราส่วน C/N - มีค่า pH เป็นด่าง ซึ่งช่วยปรับ pH ของระบบหมักเมื่อหมักร่วมกับกากตะกอนแป้งที่มีค่าพีเอสต่ำเป็นกรด - จากการสำรวจพบว่าบริเวณโรงงานแป้งดัดแปรมีบ่อเลี้ยงกุ้ง และการนำตะกอนเลนนากุ้งมาใช้ประโยชน์จะช่วยลดปัญหาการสูบทิ้งซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำ

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของกากตะกอนแป้งร่วมกับตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย และตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล กรณีศึกษาโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ของบริษัท อินกรีดิออน จำกัด รายละเอียดดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 ผังการไหลของการศึกษาวิจัย

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาลักษณะสมบัติของวัสดุหมัก ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และของเสียจากบ่อเลี้ยงกุ้ง

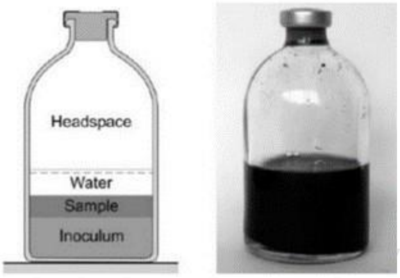
ส่วนที่ 2 ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของวัสดุหมักสองชนิด โดยใช้วิธี BMP

ส่วนที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมโดยใช้ระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทซ์เป็นถังหมักกรด และใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นเป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ

ส่วนที่ 4 ศึกษาคุณสมบัติของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นเป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ เพื่อศึกษาปฏิกิริยาการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย

(1) ชุดทดลอง BMP เป็นขวดเซรั่มสีชาขนาด 125 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรการหมัก 80 มิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3

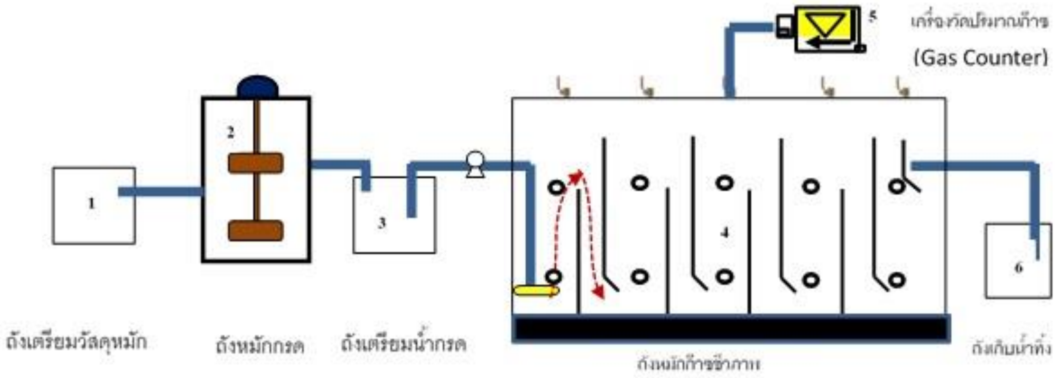


รูปที่ 3.2 การเติมสารในขวด BMP

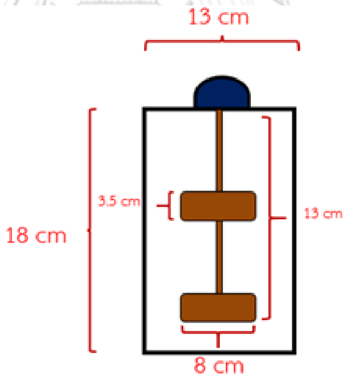
รูปที่ 3.3 ชุดทดลอง BMP

(2) ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์

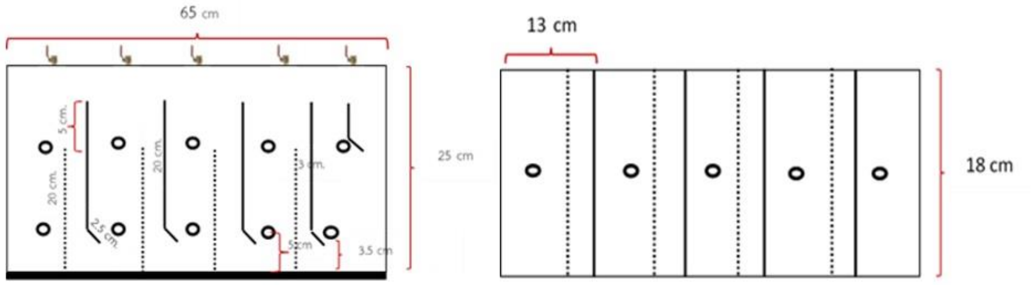
(3) กวนสมบรูณ์แบบแบทช์ (Countinuous stirrer tank reactor, CSTR) เป็นถังหมักกรดปริมาตร 6 ลิตร และใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น (Anaerobic baffled reactor, ABR) เป็นถังหมักก๊าซชีวภาพที่มีการเดินระบบอย่างต่อเนื่องปริมาตร 30 ลิตร



รูปที่ 3.4 ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digester)



รูปที่ 3.5 ถัง CSTR

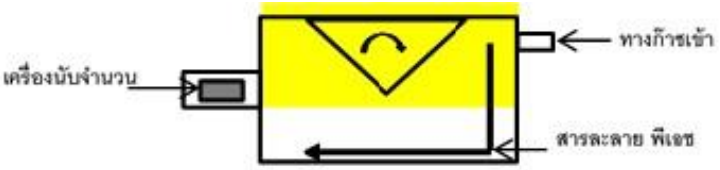


ด้านข้าง

ด้านบน

รูปที่ 3.6 ถัง ABR

(4) เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter) เป็นกล่องสี่เหลี่ยมทำจากอะคลีริคใสภายในบรรจุสารละลายควบคุมค่า pH เท่ากับ 2 เพื่อป้องการการย้อนกลับของก๊าซลงน้ำ โดยตรวจวัดจากการพลิกตัวของอุปกรณ์ เมื่อก๊าซไหลเต็มช่องเก็บ ก็จะทำการพลิกตัวโดย 1 รอบ คิดเป็นปริมาตรก๊าซโดยประมาณ 40-60 มิลลิลิตร ขึ้นกับขนาดเครื่อง (ธิภาพร ศิรินุกูลวัฒนา, 2555)



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter)

(5) ตู้อบไอร้อน (Hot air oven)
(6) เครื่องชั่งละเอียด
(7) เครื่องชั่งหยาบ
(8) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
(9) เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
(10) เตาเผา (Furnaces) อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส
(11) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
(12) ตู้ดูดความชื้น(Desiccators)
(13) เทอร์โมมิเตอร์
(14) ตู้เย็น
(15) หลอดแก้ว ขวดฝาเกลียวขนาดบรรจุ 250 และ 500 มิลลิลิตร
(16) ขวดเซรั่มสีชาขนาด 100 มิลลิลิตร
(17) ถ้วยกระเบื้อง
(18) กรวยกรอง
(19) กระดาษกรอง 0.45 ไมครอน
(20) ขวดบีโอดี
(21) อ่างต้มน้ำควบคุมความอุณหภูมิได้ (Water bath heater)
(22) ถุงเก็บตัวอย่างอากาศ (Gas sampling bag)
(23) เครื่องวิเคราะห์ชนิดและปริมาณก๊าซ (Gas Chromatography)
(24) ตู้บ่มบีโอดี
(25) หลุมบ่มซีโอดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(26) ชุดกรวยกรองพร้อมปั๊มสูญญากาศ

(27) พีเอชมิเตอร์

(28) เข็มฉีดยาขนาด 3 20 และ 50 มิลลิลิตร

(29) พาราฟิล์ม

(30) เครื่องตั้งเวลาเปิด-ปิด (Timer)

3.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของวัสดุหมักและหัวเชื้อจุลินทรีย์

3.2.1 การเก็บตัวอย่างและเตรียมสารชีวมวลที่ใช้เป็นวัสดุหมักในการทดลอง ได้แก่ กากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์ ตะกอนแลน และหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการหมัก

1) กากตะกอนแป้ง National frigex เก็บจากรางระบายน้ำเสียที่รองรับน้ำจากการล้างถังปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตก่อนไหลลงสู่บ่อตกตะกอนเบื้องต้น ซึ่งเป็นแป้งใช้เติมในอุตสาหกรรมอาหาร ตัวอย่างถูกตั้งทิ้งไว้ในตู้เย็น 1 วันให้ตกตะกอน จากนั้นเทส่วนของน้ำใสทิ้ง นำกากตะกอนแป้งที่ได้ไปใช้ทดลองต่อไป ลักษณะของกากตะกอนแป้งแสดงดังรูปที่ 3.8

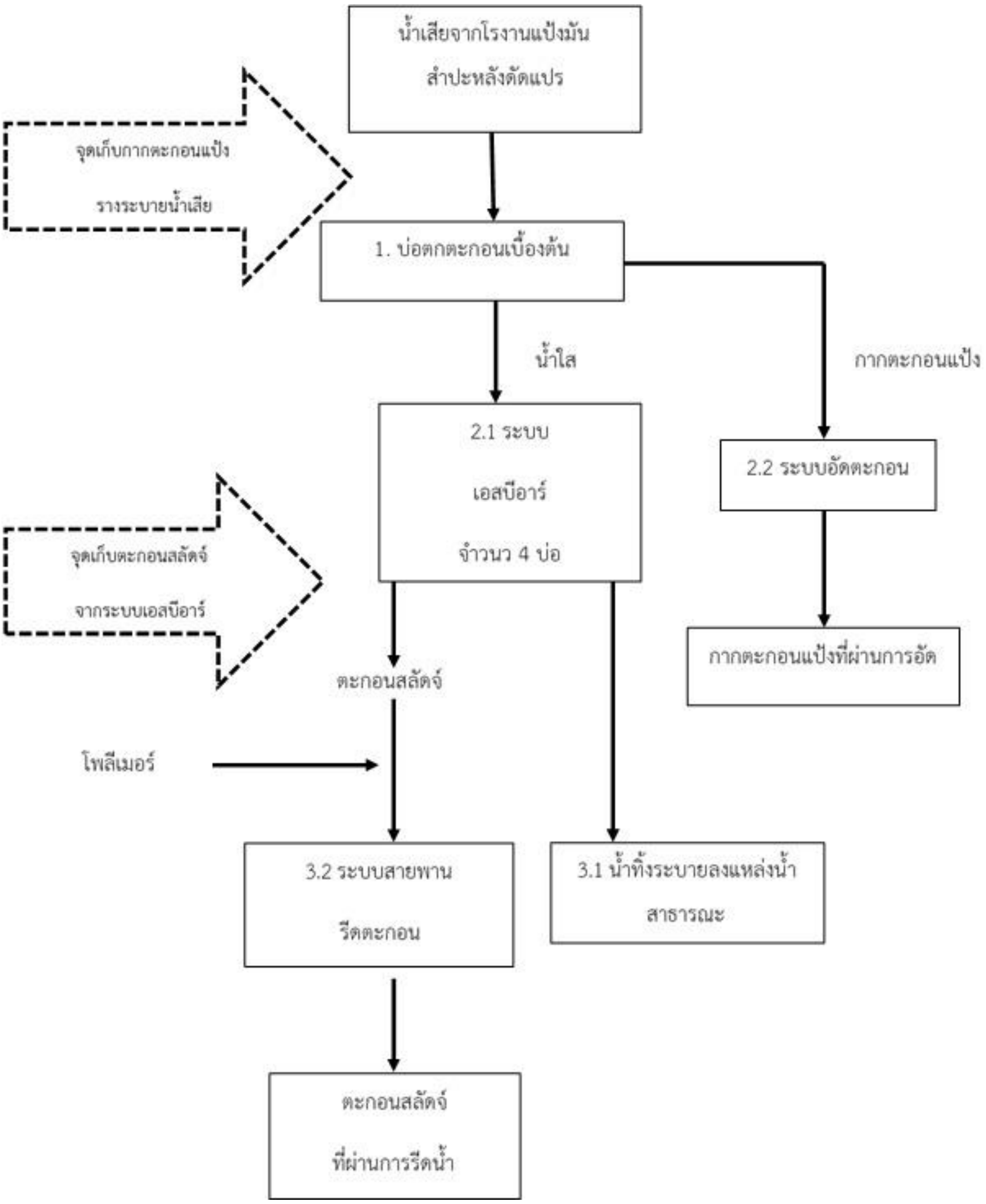
รูปที่ 3.8 กากตะกอนแป้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) ตะกอนสลัดจ์จากระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์แบบเอสบีอาร์ ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนสลัดจ์จากบ่อเติมอากาศ 4 บ่อ ภายหลังจากที่ทำการตกตะกอน และสูบน้ำใสออกเรียบร้อย โดยตีอากาศทิ้งไว้ 15 นาที จึงนำตะกอนมากรองผ่านด้วยตระแกรงขนาด 30 mesh (ขนาดรูพรุน 595 ไมครอน) เพื่อปรับความเข้มข้นของตะกอนสลัดจ์ให้มีค่าของแข็งระเหยมากกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนักเปียก เนื่องจากตะกอนสลัดจ์ที่ทำการเก็บจากระบบเอสบีอาร์โดยตรงมีค่าของแข็งระเหยเพียงร้อยละ 0.45 แต่มีร้อยละความชื้นสูงถึง 98 โดยน้ำหนักเปียก ลักษณะของตะกอนสลัดจ์ที่ผ่านการกรองแสดงดังรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 ตะกอนสลัดจ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.10 จุดเก็บตัวอย่างกากตะกอนแป้งและตะกอนสลัดจ์

3) ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล เก็บจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลที่เป็นบ่อดิน กุ้งถูกเลี้ยงด้วยอาหารเม็ด ไม่มีการเติมยาปฏิชีวนะเป็นบ่อที่ใช้เลี้ยงกุ้งมาแล้วเป็นระยะเวลาประมาณ 10 ปี ซึ่งปกติจะทำการล้างทุกครั้งหลังจากทำการเลี้ยงกุ้งเป็นระยะเวลาประมาณ 70-90 วัน เมื่อกุ้งถูกจับเรียบร้อยแล้วน้ำใสจะถูกสูบออกจะเหลือแต่ตะกอนเลนก้นบ่อ โดยทำการเก็บที่บริเวณกลางบ่อ ความลึกไม่เกิน 20 เซนติเมตร เพื่อให้ได้แต่ตะกอนเลนเนื่องจากก้นบ่อเป็นทราย ทำการเก็บใส่ถุงพลาสติกแช่น้ำแข็งขนส่งมาห้องปฏิบัติการ ลักษณะของตะกอนเลนแสดงดังรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.11 ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล

4) การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการหมัก (Inoculum) นำมาจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบีของโรงงานผลิตน้ำอัดลม บริษัทเสริมสุข จำกัด (มหาชน) จังหวัดปทุมธานี เนื่องจากระบบค่อนข้างมีความเสถียร ร้อยละของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ในก๊าซชีวภาพมากกว่าร้อยละ 50 โดยนำมาเลี้ยงด้วยน้ำเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และตะกอนเลนในภาชนะปิดสนิทที่ป้องกันอากาศเข้าได้เพื่อทำการปรับสภาพหัวเชื้อเป็นเวลา 3 เดือนโดยเติมอาหารให้ทุก 15 วันตามชนิดของวัสดุหมักที่นำไปใช้หมักร่วม และทำการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยของหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์มีค่าของแข็งระเหย (Total Volatile Solid, TVS) เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 2.5 และหัวเชื้อจุลินทรีย์ถูกวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ความชื้น และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

3.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพ และเคมีเบื้องต้น ของกากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์ และตะกอนเลน มีรายละเอียดดังนี้

- ทางกายภาพ: ความชื้น ลักษณะสี เนื้อสัมผัส กลิ่น และ pH
- ทางเคมี: ซีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด โดยตะกอนเลนและตะกอนแป้งมีการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียม คลอไรด์ ซัลเฟต ซึ่งตะกอนแป้งทำการวิเคราะห์ตามสารเคมีที่ถูก

เติมในกระบวนการผลิตคือ โซเดียมซัลเฟต และฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ อีกทั้งตะกอนเลนถูกวิเคราะห์ค่าความเค็ม

3.3 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมโดยใช้วิธี BMP

การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุหมักร่วม 3 ชนิด คือ กากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์และตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล ด้วยชุดทดลอง BMP เป็นขวดเซรั่มสีชาขนาด 125 มิลลิลิตร มีปริมาตรการหมัก 80 มิลลิลิตร โดยโปรแกรม Design Expert 10 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design, CCD) ในการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนชนิดและอัตราส่วนของวัสดุหมักร่วม การทดลองใช้วัสดุหมักร่วมชุดละ 2 ชนิด คือ ชุดที่ 1) กากตะกอนแป้งมันต่อตะกอนสลัดจ์ และ ชุดที่ 2) กากตะกอนแป้งมันต่อตะกอนเลน (ชุดการทดลองมีเพียง 2 ชุดเนื่องจากไม่ได้ทำการศึกษาการหมักร่วมกากตะกอนสลัดจ์กับตะกอนเลน เพราะอัตราส่วนของไนโตรเจนต่อคาร์บอนของการหมักร่วมมีค่าค่อนข้างต่ำกว่า 10 เพราะขาดแหล่งของคาร์บอน) ซึ่งการหมักร่วมทำการปรับเปลี่ยนค่าของแข็งระเหยของวัสดุหมักร่วมตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 2 ตามคำแนะนำของ Owen และคณะ (1979) การทดลองแต่ละชุดประกอบด้วย 13 อัตราส่วน ทำการทดลองอัตราส่วนละ 3 ซ้ำ และกำหนดค่าแอลฟา α เท่ากับ 1.414 โดยรหัสของแต่ละชุดการทดลอง ค่าตัวแปรจริงและความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปรแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 รหัสและค่าตัวแปรจริงของวัสดุหมักแต่ละชนิด

ตัวแปรจริง	**ระดับตัวแปร**	**หน่วย**	**รหัสตัวแปร**				
			-1.414	-1	0	+1	+1.414
วัสดุหมักชนิดที่ 1	X_1	%TVS	0	0	1	2	2.414
วัสดุหมักชนิดที่ 2	X_2	%TVS	0	0	1	2	2.414

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปร และรหัสตัวแปรในแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วม

ชุดทดลอง	ตัวแปร		รหัสตัวแปร		C/N ของแต่ละการทดลอง		ISR
	ร้อยละ TVS ของ X_1	ร้อยละ TVS ของ X_2	ปัจจัยที่ 1	ปัจจัยที่ 2	กากตะกอนแป้ง :ตะกอนเลน	กากตะกอนแป้ง :ตะกอนสลัดจ์	
1*	0**	1	-1.414	0	6.82	6.79	1.67
2	1	1	0	0	23.57	23.56	0.83
3	2	2	1	1	29.30	29.30	0.42
4*	2	0	1	-1	56.44	56.44	0.83
5*	0	2	-1	1	6.11	6.06	0.83
6	1	1	0	0	23.57	23.56	0.83
7	1	2.414	0	1.414	16.88	16.86	0.49
8	1	1	0	0	23.57	23.56	0.83
9 (ชุดควบคุม)	0	0	-1	-1	8.51	8.51	-
10	1	1	0	0	23.57	23.56	0.83
11	2.414	1	1.414	0	43.55	43.57	0.49
12*	1	0**	0	-1.414	35.21	35.21	1.67
13	1	1	0	0	23.57	23.56	0.83

หมายเหตุ * ชุดเปรียบเทียบ คือ ชุดการทดลองที่มีวัสดุหมักเพียงชนิดเดียว

**เนื่องจากค่าที่คำนวณได้เป็นค่าติดลบซึ่งไม่สามารถเตรียมสารได้ จึงกำหนดให้เป็นศูนย์

นำอัตราส่วนที่กำหนดได้มาทำการทดลองดังนี้

1) การทดลองเริ่มด้วยทำการเตรียมขวดทดลองโดยทำการไล่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ (80:20)

2) เตรียมวัสดุหมักตามอัตราส่วนลงขวด โดยกำหนดความเข้มข้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 2.5 ขวดเซรั่มสีชาที่ใช้ขนาด 125 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรการหมัก 80 มิลลิลิตร และกำหนดอัตราส่วนปริมาตรของตัวอย่างของสารตั้งต้นต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับ 60:40 (ปริมาตรต่อปริมาตร) ดังนั้นปริมาตรตัวอย่างวัสดุหมักเท่ากับ 48 มิลลิลิตร และหัวเชื้อเท่ากับ 32 มิลลิลิตร โดยอัตราส่วนของวัดสุหมักสองชนิดตามตารางที่ 3.2 ซึ่งมี

ชุดควบคุมคือ น้ำกลั่น และชุดเปรียบเทียบ คือ ชุดการทดลองที่มีวัสดุหมักเพียงชนิดเดียว โดยทำการปรับค่า pH ให้เริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 6.8-7.2 โดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) หลังจากเติมวัสดุหมักและหัวเชื้อเรียบร้อย ขวด BMP ถูกไล่ก๊าซออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ (80:20) อีกครั้ง จากนั้นจะทำการปิดด้วยจุกยางและล็อคด้วยฝาอะลูมิเนียมให้แน่น

3) นำขวดเซรั่มไปใส่เครื่องเขย่าด้วยอัตราเร็ว 140 รอบต่อนาที (การทดลอง BMP ส่วนใหญ่เขย่าด้วยอัตราเร็วระหว่าง 120-160 รอบต่อนาที) ซึ่งมีการหยุด 15 นาที ทุก 6 ชั่วโมง เก็บที่อุณหภูมิห้องในที่มืดและวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทุกวัน โดยใช้กระบอกฉีดยาขนาด 3 20 และ 50 มิลลิลิตรวัดปริมาตรก๊าซทั้งหมด เป็นระยะเวลา 45 วัน แสดงดังรูปที่ 3.12

4) บันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นทุกวัน และทำการวัดปริมาณของแข็งระเหยที่ลดลงเมื่อครบ 45 วัน (ระยะเวลามาจากการทดลองเบื้องต้นทำการหมักจนไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น) เพื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยของแต่ละชุดการทดลอง และมีการคำนวณหาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ในหน่วยลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยได้ที่เติมลงไป

$$\text{ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas yield)} = \frac{\text{Cumulative Biogas}}{TVS_{added}}$$

โดย

Biogas yield คือ ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่เติม)

Cumulative Biogas คือ ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่สามารถผลิตได้สะสม (ลิตร)

TVS_{Added} (Volatile Solid) คือ สารอินทรีย์ในรูปของแข็งระเหยเริ่มต้น (กิโลกรัม)

รูปที่ 3.12 การตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

5) วิเคราะห์และการแปลผลการทดลอง โดยทำการทดสอบความแปรปรวนโดยใช้สถิติ ANOVA (Analysis of variance) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่

เกิดจากการหมักร่วมของสารชีวมวล 2 ชนิด และใช้โปรแกรม Design Expert ช่วยในการทำนายสมการประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีการทดสอบความถูกต้องเหมาะสมของสมการ อาทิเช่น การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Nornal Plot) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และค่า R^2 เป็นต้น อีกทั้งใช้การนำเสนอข้อมูลแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อแสดงภาพให้ชัดเจน และทำการหาอัตราส่วนที่มีความเหมาะสม (Optimal Condition) โดยเลือกอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด และวัดค่าความพึงพอใจ (Desirability) ของอัตราส่วนที่มีค่าความพึงพอใจเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองนี้แสดงดังตารางที่ 3.3

3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมโดยใช้ระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

3.4.1 ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทซ์ที่ใช้เป็นถังหมักกรด

1) นำผลจากการทดลอง BMP มาใช้โดยเลือกชนิดและอัตราส่วนผสมที่มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในการทดลองนี้ โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่สูบเข้าถังหมักกรด ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองนี้ดังตารางที่ 3.4

2) เติมหัวเชื้อปริมาตร 2 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์ซึ่งใช้เป็นถังหมักกรด โดยกำหนดความเข้มข้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบมีค่าของแข็งระเหยเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 2.5

3) เติมวัดสุหมักตามอัตราส่วนที่ผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดจากการทดลอง BMP ปริมาตร 3 ลิตรลงในถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์ โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่สูบเข้าถังหมักกรดเท่ากับร้อยละ 1 และ 2 ของของแข็งระเหย (เท่ากับ 6 และ 12 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งชุดการทดลองมีค่า ISR เท่ากับ 0.6 และ 1.2 ตามลำดับ โดยทำการปรับค่า pH ให้ให้อยู่ในช่วง 5.5-6.5 เพื่อให้ได้กรดอะซิติคเป็นกรดอินทรีย์ระเหยตัวหลัก (Kebreab, Dijkstra, Bannink และ France, 2009) โดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) หลังการตรวจวัดทุกวัน

4) ถังปฏิกรณ์ถูกกวนผสมด้วยอัตราเร็ว 70 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที และหยุด 45 นาที สลับกันซึ่งมาจากการทดสอบเบื้องต้นเลือกระยะเวลากวนผสมให้น้อยที่สุดเพื่อประหยัดพลังงาน และเพียงพอให้วัสดุหมักกวนผสมอย่างทั่วถึงทั้งถังปฏิกรณ์ไม่มีตะกอนลอย (Scum) และการแพคตัวของตะกอนเกิดขึ้น ทำการวิเคราะห์สภาวะของการหมักภายในถังโดยวัดค่า pH อุณหภูมิ และทำการเก็บตัวอย่างน้ำหมักกรดหลังหยุดการกวนของถัง 20 นาที ทิ้งให้ตกตะกอน นำตัวอย่างไป

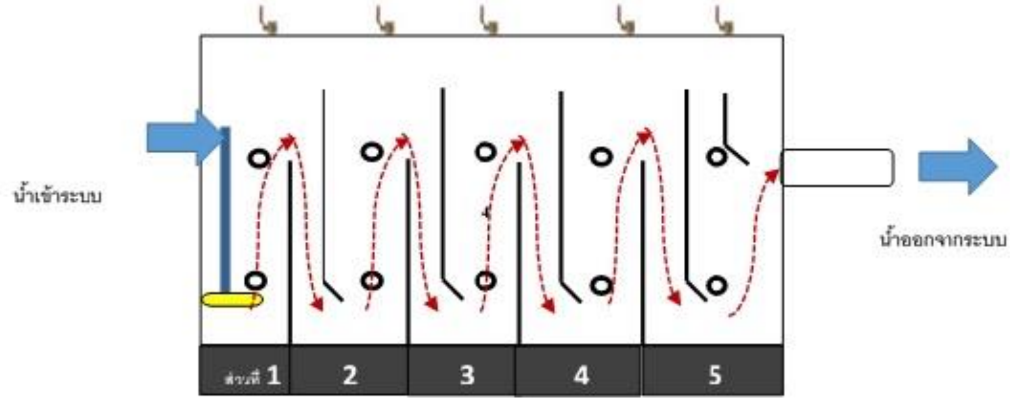
วิเคราะห์ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหย และสภาพด่างภายในถังหมักกรดทุกวัน โดยมีชุดควบคุม คือ อัตราส่วนที่ใช้วัสดุหมักเพียงชนิดเดียวเพื่อใช้ในทำการเปรียบเทียบ และมีการวิเคราะห์ประเภทของกรดอินทรีย์ระเหยโดยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟี อีกทั้งมีการวิเคราะห์ค่า pH อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และซีโอดีของน้ำกรดที่ได้จากสภาวะการหมัก และระยะเวลาการหมักที่เหมาะสม อีกทั้งมีการวิเคราะห์ปริมาณสารอาหารโพแทสเซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของกากของแข็งที่เหลือจากก้นถังหมักกรด

5) วิเคราะห์และแปรผลการทดลอง หาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่มีประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยได้สูงสุด และระยะเวลาในการหมักที่เหมาะสมที่ใช้กับถังหมักกรด โดยคำนึงถึงสภาวะการหมักที่มีเสถียรภาพร่วมด้วย

3.4.2 ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น

1) นำผลจากการทดลอง BMP และ CSTR มาใช้โดยเลือกชนิดและอัตราส่วนผสมที่ผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่เหมาะสมในการสูบเข้าถังหมักกรด และระยะเวลาในการหมักที่เหมาะสมใช้กับถังหมักกรด ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองนี้แสดงดังตารางที่ 3.5

2) ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นเป็นถังหมักก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นถังขนาด 30 ลิตรมีขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 18 x 65 x 25 เซนติเมตร^3 และทำการแบ่งออกเป็น 5 ช่องขนาดเท่าๆ กันช่องละประมาณ 6 ลิตร มีทิศทางการไหลของน้ำตามแนวตั้งแสดงดังรูปที่ 3.13 และอัตราส่วนของความกว้างของส่วนที่มีการไหลลงต่อส่วนที่มีการไหลขึ้น เท่ากับ 1:3 ตามการแนะนำของ Dama และคณะ (2002) เพื่อป้องกันการหลุดของหัวเชื้อ เริ่มการทดลองโดยจะทำการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์มีค่าของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 2.5 ถังมีปริมาตรในการเดินระบบเท่ากับ 22 ลิตร ทำการปรับสภาพเชื้อในถังโดยทำการสูบน้ำหมักกรดที่ได้จากถัง CSTR โดยใช้อัตราการสูบเข้าถังหมักก๊าซชีวภาพ 2.2 ลิตรต่อวัน ดังนั้นจะมีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic Retention time) ประมาณ 10 วัน ด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 0.1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ซีโอดีเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) เป็นระยะเวลา 2 เดือนในการปรับสภาพ ซึ่งอ้างอิงจากการศึกษาของ Phukingngam, Chavalparit, Somchai และ Ongwandee (2011) ใช้หัวเชื้อจากระบบ UASB จากโรงงานผลิตเครื่องดื่มเช่นกัน และใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตไบโอดีเซลขนาดเล็กเติมใส่ถัง ABR ปรับสภาพเป็นเวลา 2 เดือนและหลังจากนั้นเดินระบบด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ ใช้เวลาเพียง 12-15 วัน สามารถเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state: ซีโอดีและของแข็งแขวนลอยของน้ำทิ้งจากถัง ABR เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 5)



รูปที่ 3.13 ภาพตัดขวางของถัง ABR

3) ทำการสูบน้ำหมักกรดจากถัง CSTR โดยทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดีและทำการเจือจางด้วยน้ำประปาที่ตั้งทิ้งไว้ให้คลอรีนสลาย เพื่อปรับให้ได้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่สูบเข้าถังเท่ากับ 0.2, 0.6, 1.0 และ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยทำการปรับความเข้มข้นซีโอดีของน้ำหมักกรดเท่ากับ 2,000 6,000 10,000 และ 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Sasse (1998)) แนะนำว่าอัตราการภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูบเข้าถังปฏิกรณ์แบบแผ่นกั้นควรน้อยกว่า 3.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) โดยเริ่มเดินระบบจากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นจากต่ำก่อนและเพิ่มขึ้นตามลำดับ ใช้อัตราการสูบเข้าถังหมักก๊าซชีวภาพอยู่เท่ากับ 2.2 ลิตรต่อวัน มีระยะเวลาในการกักเก็บ (Retention time) สารอินทรีย์ในถังหมักคงที่เท่ากับ 20 วัน ในทุกอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ทั้งนี้เพื่อควบคุมระยะเวลาในการกักเก็บให้คงที่ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

4) ทำการเติมน้ำกรดเข้าถังวันละหนึ่งครั้ง จากนั้นทำการวิเคราะห์ ค่าpH อุณหภูมิภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน อีกทั้งทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ซีโอดี และปริมาณของแข็งระเหย ที่เข้าและออกจากถังสัปดาห์ละ 3 ครั้ง ทำการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) ซึ่งน้ำที่ปล่อยออกจากระบบมีค่าปริมาณของแข็งระเหยค่อนข้างคงที่แตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 10 จึงจะทำการเปลี่ยนอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูบเข้าถังที่สูงขึ้นต่อไป

5) เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพจากแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ด้วยถุงเก็บตัวอย่างก๊าซนำไปวิเคราะห์หาร้อยละมีเทนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตรกราฟฟี และน้ำทิ้งจากถังหมักก๊าซชีวภาพถูกนำไปวิเคราะห์ ปริมาณของแข็งระเหย ซีโอดี pH ปริมาณกรดอิทรีย์ระเหย และค่าสภาพด่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6) วิเคราะห์และแปรผลการทดลอง เพื่อหาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด และมีสภาวะการหมักก๊าซชีวภาพที่เหมาะสม

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียและการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของจุลินทรีย์ภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR

1) การเลือกอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ใช้เก็บตัวอย่าง

โดยเลือกจากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด เมื่อคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพต่อปริมาณของแข็งระเหยที่เติม ระบบมีเสถียรภาพไม่เสี่ยงต่อการล้มเหลว โดยพิจารณาจากค่า pH อัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพด่าง ซีโอดีของน้ำทิ้งจากถัง ABR รวมถึงพิจารณาร้อยละของก๊าซมีเทนว่ามีความเหมาะสมมากกว่าร้อยละ 50

2) การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR ทั้ง 5 ช่อง โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากก๊อกด้านบน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ตัวอย่างถูกนำไปวิเคราะห์ซีโอดี ความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหย และสภาพด่างของน้ำจากแต่ละช่องของถัง ABR

3) จุดเก็บตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์

ทำการเก็บตัวอย่างหัวเชื้อในทั้ง 5 ช่องของถัง ABR ดังรูปที่ 3.13 โดยทำการเก็บจากก๊อกด้านล่างปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดชีชาและแช่ตู้เย็นที่ 4 องศาเซลเชียสก่อนส่งตัวอย่าง

3) การส่งวิเคราะห์

ตัวอย่างถูงส่งไปวิเคราะห์ลำดับของลำดับเบส 16S ribosomal RNA gene (16S rRNA) ที่บริษัท Novogene จำกัด ซึ่งดีเอ็นเอผ่านขั้นตอนการสกัดด้วยวิธี CTAB/SDS ความเข้มข้นของ rRNA ถูกเตรียมเท่ากับ 1 นาโนกรัมต่อไม่โครลิตร ด้วยน้ำที่ผ่านการสเตอลิไรซ์ บน 1% agarose gel โดยทำปฏิกริยาลูกโซ่โดยใช้ไพรเมอร์ Universal primer อาทิเช่น 16S V4: 515F-806R, 18S V4: 528F-706R และ 18S V9: 1380F-1510R เป็นต้น จากนั้นผสมกับบัฟเฟอร์ 1X loading buffer (SYB green) โดยตรวจสอบผลผลิต PCR บน 2% agarose gel และแยกด้วยเครื่อง electrophoresis rRNA ความยาว 400-450 bp ถูกเลือกมาใช้ต่อ โดยทำให้บริสุทธิ์ด้วยชุดสำเร็จ Qiagen Gel Extraction Kit (Qiagen,Germany)

4) การแปรผล

ลำดับเบสที่ได้ผ่านการจัดเรียงด้วยโปรแกรม FLASH (V1.2.7, http://ccb.jhu.edu/software/FLASH/) และเทียบกับฐานข้อมูลของ Gold database (http://drive5.com/uchime/uchime_download.html) และการวิเคราะห์ว่าอยู่ในกลุ่ม OUT (Operationla Taxonomy Unit) วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Uparse software (Uparse v7.0.1001

http://drive5.com/uparse/) โดยจุลินทรีย์ในกลุ่มเดียวกันต้องมีลำดับของเบสเหมือนกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 97

3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและค่าที่ใช้ในการทดลอง BMP

	รายละเอียด	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง/ ความถี่ในการตรวจวัด**
ตัวแปรอิสระ	- อัตราส่วนกากตะกอนแป้งต่อตะกอนเลนและกากตะกอนแป้งต่อกากตะกอนสลัดจ์	- ออกแบบโดย CCD มีทั้งหมด 13 อัตราส่วน ทำอัตราส่วนละ 3 ซ้ำ ดังแสดงตารางที่ 3.2
ตัวแปรควบคุม	- ระยะเวลาในการหมัก - ค่า pH เริ่มต้น - ความเข้มข้นหัวเชื้อจุลชีพ - การกวนผสม - ปริมาตรในการหมัก - ระยะเวลาการทดลอง	- 45 วัน - 6.8-7.2 - ของแข็งแขวนลอยระเหย 2.5% - 140 รอบต่อนาที หยุด 15 นาที ทุก 6 ชั่วโมง - 80 มิลลิลิตร - 45 วัน
ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม	- อุณหภูมิ	- อุณหภูมิห้อง (25-30 องศาเซลเซียส)
ตัวแปรตาม	- ปริมาณก๊าซชีวภาพ - ปริมาณของแข็งระเหย - ค่า pH - กรดอินทรีย์ระเหย - สภาพด่าง	- ทุกวัน - ก่อนและสิ้นสุดการหมัก - ก่อนและสิ้นสุดการหมัก - สิ้นสุดการหมัก - สิ้นสุดการหมัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและค่าที่ใช้ในการทดลองผลิตกรดอินทรีย์ระเหยจากถังหมักกรด CSTR

ชนิดตัวแปร	รายละเอียด	ค่าที่ใช้ในการทดลอง/ความถี่ในการตรวจวัด
ตัวแปรอิสระ	- อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ในรูปของแข็งระเหย	- 1 และ 2%TVS (6 และ 12 กิโลกรัมของของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตร)
ตัวแปรควบคุม	- ค่า pH เริ่มต้น - ประเภทและอัตราส่วนของวัสดุหมัก 2 ชนิด - ความเข้มข้นหัวเชื้อจุลชีพ - การกวนผสม - ปริมาตรที่ใช้ในการหมัก - การเดินระบบแบบแบทช์	- 5.5-6.5 - จากการทดลอง BMP - ของแข็งแขวนลอยระเหย 2.5 % - 70 รอบต่อนาที กวน 15 นาที ทุกชั่วโมง - 5 ลิตร - 3 ลิตรต่อวันต่อครั้ง (เดินระบบแบบแบทช์)
ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม	- อุณหภูมิ	- อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	- ค่า pH - อุณหภูมิภายในถัง - กรดอินทรีย์ระเหย - สภาพด่าง - ซีโอดี - ค่า pH ของแข็งทั้งหมด และปริมาณธาตุอาหาร ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ในตะกอนสลัดจ์	- ทุกวัน - ทุกวัน - ทุกวัน - ทุกวัน - ทุกวัน - สิ้นสุดการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรและค่าที่ใช้ในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากถังหมักก๊าซ ABR

ชนิดตัวแปร	รายละเอียด	ค่าที่ใช้ในการทดลอง/ความถี่ในการตรวจวัด
ตัวแปรอิสระ	- อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี	- 0.2, 0.6, 1.0 และ 1.6 กิโลกรัมของซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน
ตัวแปรควบคุม	- ปริมาตรถังที่ใช้ในการหมัก - ความเข้มข้นหัวเชื้อจุลชีพ - อัตราการสูบเข้าถัง - การระบายน้ำทิ้ง	- 22 ลิตร - ของแข็งแขวนลอยระเหย2.5% - 2.2 ลิตร/วัน - ช่วงที่ทำการสูบน้ำกรดเข้าระบบ 1 ครั้งต่อวัน
ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม	- อุณหภูมิ	- อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	- ปริมาณก๊าซชีวภาพ - องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ - อุณหภูมิภายในถัง - ลักษณะสมบัติน้ำทิ้ง ○ pH ○ ซีโอดี ○ ของแข็งระเหย ○ กรดอินทรีย์ระเหย ○ สภาพด่าง - ประเภทของเชื้อจุลินทรีย์ใน 5 ส่วนของถัง ABR - ลักษณะสมบัติน้ำใน 5 ส่วนของถัง ABR ○ pH ○ ซีโอดี ○ กรดอินทรีย์ระเหย ○ สภาพด่าง	- ทุก 3 วัน - วัด 2 ซ้ำ เก็บด้วยถุงเก็บก๊าซ - ทุก 3 วัน - ทุก 3 วัน - ช่วงที่เข้าสู่สภาวะคงที่ของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) สถิติเชิงพรรณนา

ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลอง BMP ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของถัง CSTR และประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถัง ABR

2) สถิติเชิงวิเคราะห์

ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการทดลอง BMP ใช้ ANOVA (Analysis of variance) ในการทดสอบความแปรปรวนที่เกิดจากของตัวแปรอิสระของสองตัวแปร โดยเบื้องต้นข้อมูลมีการตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Plot) ความเสถียรของความแปรปรวน และความเป็นอิสระของข้อมูล เพื่อหาความเหมาะสมของข้อมูลก่อน และหาความเหมาะสมของสมการทำนายประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นผลจากความเข้มข้นของวัสดุหมัก 2 ชนิด โดยหาค่า R^2 (Coefficient of determination) ระหว่างข้อมูลจริงและข้อมูลที่ได้จากการทำนายของสมการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.8 วิธีวิเคราะห์

วิธีวิเคราะห์กากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์ ตะกอนเลน น้ำกรดและกากที่เหลือจากการหมัก ทำตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the examination of water and wastewater (2017) ดังแสดงตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 วิธีวิเคราะห์ในการทดลอง BMP CSTR และ ABR

พารามิเตอร์	**วิธีที่ใช้วิเคราะห์**
ลักษณะ สี กลิ่น	การสังเกต การดมกลิ่น
pH	พีเอชมิเตอร์
เปอร์เซ็นต์ความชื้น	อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส (มาตรฐาน 2540B)
ของแข็งรวม	อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส (มาตรฐาน 2540B)
ของแข็งระเหย	อบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส (มาตรฐาน 2540E)
ซีโอดี	Close reflux, Titrimetric method (มาตรฐาน 5220B)
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ของวัสดุหมัก	Total organic analyzer และ Kjeldahl method
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ของน้ำกรด	Close reflux, Titrimetric method และ Kjeldahl method
ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด	Total organic analyzer
ชนิดเชื้อจุลินทรีย์	The 16S ribosomal RNA next-generation sequencing analysis
ค่าความเค็ม	electrical conductivity test (EC)
โซเดียม	Inductively coupled plasma atomic emission Spectrometer (ICP-AES) (มาตรฐาน 6010C)
คลอไรด์	Titration, Hg-Thiocyanate (มาตรฐาน 4110D)
ซัลเฟต	Turbidimetric (มาตรฐาน 9038)
ฟอสฟอรัส	Colorimetric method (มาตรฐาน 4500E)
ไนโตรเจน	Kjeldahl Method (มาตรฐาน 4500B)
โพแทสเซียม	Atomic Absorptions (มาตรฐาน 3500B)
สภาพด่าง	Titration (มาตรฐาน 2320B)
ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย	Titration (มาตรฐาน 5560B)

ตารางที่ 3.6 วิธีวิเคราะห์ในการทดลอง BMP CSTR และ ABR (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีที่ใช้วิเคราะห์
องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหย	- Gas chromatography (GC) (Model Shimadzu GC-2014, Shimadzu Corp., Japan) - ตรวจวัดด้วย Flame ionization detection (FID) - คอลัมน์ที่ใช้ Capillary column: ULBON HR-20 เคลือบฟิล์มหนา 0.25 μm, เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.25 มิลลิเมตร ความยาว 25 เมตร - อุณหภูมิของ injector และ column เท่ากับ 190 และ 100 องศาเซลเซียส - ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซนำพาด้วยอัตราการไหล 59 มิลลิลิตรต่อนาที
ร้อยละมีเทน	- Gass Chromatography (Model Shimadzu GC-2014, Shimadzu Corp., Japan) - ตรวจวัดด้วย Thermal conductivity detector (TCD) - คอลัมน์ที่ใช้ molecular sieve packed column (MS-5A, stainless steel, เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 3 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.1 มิลลิเมตร mm ความยาว 2 เมตร (Restesk Corp., USA). - อุณหภูมิของ injector, column และ detector เท่ากับ 150 , 80, และ 200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ - ใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซนำพาด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของกากตะกอนแป้งร่วมกับตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย และตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล โดยหาอัตราส่วนของการหมักร่วมที่เหมาะสมโดยการทดลอง BMP อีกทั้งทำการศึกษาผลของภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหย และก๊าซชีวภาพ จากการใช้ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ซึ่งใช้ถังกวนสมบรูณ์แบบแบทช์เป็นถังหมักกรด และใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นเป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ โดยสามารถสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

1. ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพ และเคมีเบื้องต้นของกากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์ และตะกอนเลน

- ทางกายภาพ : ความชื้น สี เนื้อสัมผัส กลิ่น และ pH
- ทางเคมี : ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหย อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด โดยตะกอนเลนและกากตะกอนแป้งมีการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียม คลอไรด์ และซัลเฟต

2. ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของกากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์ และตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล โดยใช้อัตราส่วนของกากตะกอนแป้งมันต่อตะกอนสลัดจ์ และกากตะกอนแป้งมันต่อตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลที่ออกแบบโดยโปรแกรม Design Expert 10 ซึ่งออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) และนำเสนอข้อมูลแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) การทดลองแต่ละการหมักร่วมประกอบด้วย 13 อัตราส่วน จากการทดลองนี้ทำให้ทราบถึงอัตราส่วนของวัสดุหมัก 2 ชนิดที่มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด และผลจากการทดลองนี้ถูกนำไปใช้ในการทดลองถัดไป

3. ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทช์ที่ใช้เป็นถังหมักกรด ซึ่งจากการทดลองนี้ทำให้ทราบถึงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่เหมาะสมที่สูบเข้าถังหมักกรดให้ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุด และระยะเวลาในการหมักที่เหมาะสมที่จะใช้กับถังหมักกรดโดยพิจารณาความเสถียรภาพของระบบหมักร่วมด้วย

4. ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่สูบเข้าถังถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นซึ่งเป็นถังหมักก๊าซชีวภาพของระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

5. วิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของจุลินทรีย์ เพื่อศึกษาปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทนภายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นซึ่งใช้เป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ

4.1 ลักษณะสมบัติของกากตะกอนเศษแป้ง ตะกอนสลัดจ์ และตะกอนเลน

4.11 กากตะกอนแป้ง (Starch sludge)

กากตะกอนแป้ง (Starch sludge: SS) ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นตะกอนจากน้ำล้างถังปฏิกิริยาแล้วนำมาตั้งทิ้งให้ตกตะกอน SS ถูกวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1 โดยพบว่า SS มีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 28.07 ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจน (TN) ค่อนข้างต่ำเพียงร้อยละ 0.12 ส่งผลให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) มีค่าสูงเท่ากับ 242 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า SS สามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับเชื้อจุลินทรีย์ได้ แต่เนื่องจาก SS มีอัตราส่วน C/N สูง จึงไม่เหมาะสมต่อการกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion: AD) ซึ่งช่วงของ C/N ratio ที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 20-30 และจากการศึกษาของ Morgan และ Choct (2016) พบว่าองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังเป็นอะไมโลเพกทิน (amylopectin) สูงถึงร้อยละ 83 และโดยปกติแล้วแป้งย่อยได้ค่อนข้างง่าย (B. L. B. Pereira และ Leonel, 2014) เปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acids: VFA) ได้อย่างรวดเร็วเป็นปริมาณมากและมีการสะสมในระบบ โดยไม่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ทัน ส่งผลให้ pH ของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว (Cuzin, Farinet, Segretain และ Labat, 1992) อีกทั้ง SS มีคุณสมบัติเป็นกรดโดยค่า pH เท่ากับ 4.48±0.01 ดังนั้นการนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนโดยใช้ SS เพียงอย่างเดียวจึงไม่เหมาะสม เพราะทำให้ระบบหมักย่อยไม่มีเสถียรภาพและล้มเหลวได้ ด้วยเหตุนี้จึงควรนำ SS ไปหมักร่วม (Anaerobic co-digestion: ACD) กับวัสดุอื่น นอกจากนี้ยังมีหลายๆ งานวิจัยที่พบว่าการหมักร่วมช่วยในการปรับเสถียรภาพของระบบหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพอีกด้วย (Dai, Duan, Dong และ Dai, 2013; Heo, Park และ Kang, 2004; Lin และคณะ, 2011; Zahan, Othman และ Rajendram, 2016)

4.1.2 ตะกอนสลัดจ์จากระบบเอสบีอาร์ (Activated biosludge)

ตะกอนสลัดจ์ (Activated biosludge: ABS) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตะกอนชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge Process) แบบเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor: SBR) จากการวิเคราะห์พบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำสูงถึงร้อยละ 92.44±1.01 แต่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) เพียงร้อยละ 7.56±1.01 อีกทั้งมีคุณสมบัติค่อนข้างเป็นกลางด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค่า pH 6.50±0.03 และอัตราส่วน C/N ratio ที่ต่ำเท่ากับ 4.27 จากปริมาณน้ำที่ค่อนข้างสูง และค่าอัตราส่วน C/N ที่ต่ำของ ABS น่าจะเป็นประโยชน์ช่วยในการปรับอัตราส่วน C/N และร้อยละของ TS ของระบบการหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนให้เหมาะสมเมื่อนำมาหมักร่วมกับ SS อีกทั้งจากลักษณะของ ABS ย่อยสลายได้ค่อนข้างยากการหมักร่วมกับ SS น่าจะช่วยให้การย่อยสลายเกิดได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติของกากตะกอนแป้งและตะกอนสลัดจ์

พารามิเตอร์	กากตะกอนแป้ง	ตะกอนสลัดจ์
ความชื้น (%)	39.09±0.62	92.44±1.01
pH	4.48±0.01	6.50±0.03
TS (%โดยน้ำหนักเปียก)	61.00±0.45	7.56±1.01
TVS (%โดยน้ำหนักเปียก)	31.26±0.03	5.92±0.04
C/N ratio	242	4.27
TOC (%โดยน้ำหนักเปียก)	28.07	4.18
TN (%โดยน้ำหนักเปียก)	0.12	0.99
TVS/TS	0.51	0.78
ปริมาณคลอไรด์ (%โดยน้ำหนักเปียก)	0.31	-
ปริมาณโซเดียม (%โดยน้ำหนักเปียก)	0.46	-
ปริมาณซัลเฟต (%โดยน้ำหนักเปียก)	0.18	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.3 ตะกอนเลนบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล (Shirmp pond sediment)

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังสนใจนำตะกอนเลน (Shirmp pond sediment: SPS) จากการเลี้ยงกุ้งทะเลโดยบ่อดิน ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นปริมาณมากในพื้นที่ใกล้เคียง รอบๆ โรงงาน ใช้เป็นวัสดุหมักร่วมกับ SS เนื่องจากผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติแสดงตามตารางที่ 4.2 พบว่า SPS มีองค์ประกอบเป็นน้ำมากกว่าครึ่งที่ร้อยละ 64.36±2.24 มีคุณสมบัติเป็นด่างโดย pH เท่ากับ 7.82±0.05 และมีอัตราส่วน C/N ที่ต่ำมากเท่ากับ 4.35 จากคุณสมบัติข้างต้นของ SPS น่าจะเป็นประโยชน์ช่วยในการปรับสมดุลธาตุอาหาร และค่าความเป็นด่างน่าจะเป็นประโยชน์เมื่อนำไปหมักร่วมกับ SS ที่มีสภาพเป็นกรด ช่วยให้เสถียรภาพของระบบหมักย่อยดีขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นกว่าการรหมัก SS หรือ SPS เพียงอย่างเดียว อีกทั้งองค์ประกอบของ SPS ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบฮิวมิคที่ย่อยสลายได้ค่อนข้างยาก การหมักร่วมกับ SS ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแป้งย่อยสลายได้ง่าย ซึ่งน่าจะช่วยให้การย่อยสลาย SPS เกิดขึ้นได้ดีขึ้น แต่

อย่างไรก็ตาม SPS ที่ใช้มาจากการเลี้ยงกุ้งทะเลที่มีปริมาณคลอไรด์ และโซเดียมที่ค่อนข้างสูงเท่ากับ ร้อยละ 1.33 และ 1.10 ตามลำดับ ดั้งนั้นการนำไปใช้หมักก๊าซชีวภาพต้องคำนึงถึงความเป็นพิษ (Toxicity) ที่มีต่อระบบการหมักร่วมแบบไม่ใช้อากาศ โดยได้เปรียบเทียบกับค่าแนะนำระดับของสารเคมีที่มีผลยับยั้ง และเป็นพิษต่อการหมักย่อยแบบไม่ใช้อากาศตามตารางที่ 2.6 (Jorgensen, 2009)

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติของตะกอนเลน

พารามิเตอร์	จากการวิเคราะห์
ความชื้น (%)	64.36±2.24
pH	7.82±0.05
TS (% โดยน้ำหนักเปียก)	35.64±2.24
TVS (%โดยน้ำหนักเปียก)	5.82±0.25
ความเค็ม (EC) (เดซิซีเมนต์ต่อเมตร)	7.48
C/N ratio	4.35
TOC (%โดยน้ำหนักเปียก)	0.22
TN (%โดยน้ำหนักเปียก)	0.05
TVS/TS	0.16
ปริมาณคลอไรด์ (%โดยน้ำหนักเปียก)	1.33
ปริมาณโซเดียม (%โดยน้ำหนักเปียก)	1.10
ปริมาณซัลเฟต (%โดยน้ำหนักเปียก)	ND

หมายเหตุ ND: Non detected

4.1.4 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก (Inoculum**)**

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก (inculum) เป็นเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) มีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนกลมสีดำ (Granule) ซึ่งการวิเคราะห์เม็ดจุลินทรีย์ (ตารางที่ 4.3) พบว่า องค์ประกอบหลักเป็นน้ำสูงถึงร้อยละ 93.05±0.14 โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) เพียงร้อยละ 6.95±0.14 และพบว่าอัตราส่วน TVS/TS สูงถึง 0.97 แสดงให้เห็นว่าของเข็งรวมส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ และเม็ดจุลินทรีย์มี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อัตราส่วน C/N ต่ำเท่ากับ 8.51 โดยหัวเชื้อที่นำมาใช้จะถูกปรับสภาพให้เหมาะสมด้วยวัสดุหมักที่ต้องการศึกษาก่อนเริ่มเดินระบบหมักย่อย ซึ่งอธิบายไว้ในวิธีการศึกษาทดลองในบทที่ 3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติของหัวเชื้อที่ใช้ในการหมัก

พารามิเตอร์	จากการวิเคราะห์
ความชื้น (%)	93.05±0.14
TS (% โดยน้ำหนักเปียก)	6.95±0.14
TVS (%โดยน้ำหนักเปียก)	6.73±0.03
C/N ratio	8.51
TVS/TS	0.97

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการหมักร่วมของกากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์และตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยวิธี BMP

4.2.1 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของกากตะกอนแป้งและตะกอนเลนโดยวิธี BMP

ผลการทดลองประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมทั้งหมด 13 อัตราส่วน (ตารางที่ 4.4) เมื่อสิ้นสุดการระยะเวลาการหมัก 45 วัน สรุปได้ดังนี้

1) การหมักวัสดุเพียงชนิดเดียว

จากการทดลองใช้ SS และ SPS เป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียวโดยใช้วิธี BMP พบว่าการใช้ SPS เพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นของแข็งระเหยเริ่มต้นร้อยละ 1 และ 2 (การทดลองที่ 1 และ 5) มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำมาก เนื่องจากการทดลองดังกล่าว มีอัตราส่วน C/N ratio ต่ำมากเท่ากับ 6.82 และ 6.11 ตามลำดับ จึงไม่เหมาะสมต่อการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจน ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 20-30 (Dioha, Ikeme, Nafi'u, Soba และ Yusuf, 2013) ในขณะที่การทดลองใช้ SS เป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียวพบว่า ความเข้มข้นของ SS ร้อยละ 1 ของ TVS ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด เท่ากับ 320±15.39 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยเริ่มต้น (L/Kg TVS_{added}) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SS เป็นร้อยละ 2 ของ TVS พบว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเหลือเท่ากับ 204.4±17.43 L/Kg TVS_{added}

2) การหมักร่วม

ผลการทดลองหมักร่วมโดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ SS จากร้อยละ 0-2.4 ของ TVS แต่กำหนดความเข้มข้นของ SPS คงที่เท่ากับร้อยละ 1 ของ TVS คือ อัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS เท่ากับ 0:1, 1:1 และ 2.4:1 พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเท่ากับ 0.26±0.45, 294±7.60 และ 172±8.15 L/Kg TVS_{added} ในขณะที่ชุดทดลองที่เพิ่มความเข้มข้นของ SPS และกำหนดความเข้มข้นของ SS คงที่เท่ากับร้อยละ 1 ของ TVS ของอัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS เท่ากับ 1:0, 1:1 และ 1:2.4 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน SPS ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเล็กน้อยตามลำดับ เท่ากับ 320±15.39, 294±7.60 และ 267±23.44 L/Kg TVS_{added}

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า SS มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงถึง 320±15.39 L/Kg TVS_{added} ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 ของ TVS เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SS ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และเมื่อนำมาหมักร่วมกับ SPS พบว่าที่อัตราส่วน SS:SPS เท่ากับ 1:1 ระบบยังคงมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงเท่ากับ 294±7.60L/Kg TVS_{added} ใกล้เคียงกับ

การใช้ SS เพียงอย่างเดียว และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ SS:SPS เป็นเท่ากับ 1:2.4 พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเล็กน้อย ผลการทดลอง BMP จึงบ่งชี้ได้ดังนี้

- การใช้ SS เป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด
- การใช้ SS หมักร่วมกับ SPS ที่อัตราส่วน 1:1 มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงเช่นกัน แต่ต่ำกว่าการใช้ SS เป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียว โดยประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงร้อยละ 8.13
- การเพิ่มอัตราส่วนของ SPS มากขึ้นส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมในการทดลองต่อไปควรนำผลการศึกษาเสถียรภาพของระบบมาช่วยในการพิจารณาด้วย

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและลักษณะสมบัติของการทดลอง BMP ที่ใช้ความเข้มข้นของ SS และ SPS ต่างกัน

การทดลอง	ร้อยละของ TVS โดยน้ำหนักเปียก		อัตราส่วน C/N	ISR	อัตราส่วน F/M (g TVS/gTVS)	ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (L/Kg TVSadded)	
	SS	SPS				ค่าจริง	ค่าจากการทำนาย
1	0[a]	1	6.82	1.67	0.6	0.26±0.45	0
2	1	1	23.57	0.83	1.2	292±38.16	294.57
3	2	2	29.30	0.42	2.4	140±37.04	138.26
4	2	0	56.44	0.83	1.2	204±17.43	205.74
5	0	2	6.11	0.83	1.2	3.13±0.28	1.26
6	1	1	23.57	0.83	1.2	302±32.50	294.57
7	1	2.4142	16.88	0.49	2.0	267±23.44	270.54
8	1	1	23.57	0.83	1.2	294±33.98	294.57
9 (Control)	0	0	8.51	-	0.0	0	1.74
10	1	1	23.57	0.83	1.2	284±33.04	294.57
11	2.4142	1	43.55	0.49	2.0	172±8.15	172.00
12*	1	0[a]	35.21	1.67	0.6	320±15.39	318.60
13	1	1	23.57	0.83	1.2	302±12.70	294.57

หมายเหตุ ISR : Inoculum to substrate ratio อัตราส่วนของหัวเชื้อต่อวัสดุหมัก

F/M: Food to microorganism ratio อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3) การสร้างสมการทำนายประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

จากการออกแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central composite design: CCD) โดยโปรแกรม Design Expert (Trial version 10) เพื่อศึกษาผลของอัตราการหมักร่วมของ SS และ SPS จากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยวิธี BMP โดยนำประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (L/Kg TVS_{added}) มาใช้เป็นค่าตอบสนอง (ตารางที่ 4.4) โดยมีการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลก่อนเบื้องต้น และความเหมาะสมของแบบจำลองที่ได้ต่อไป

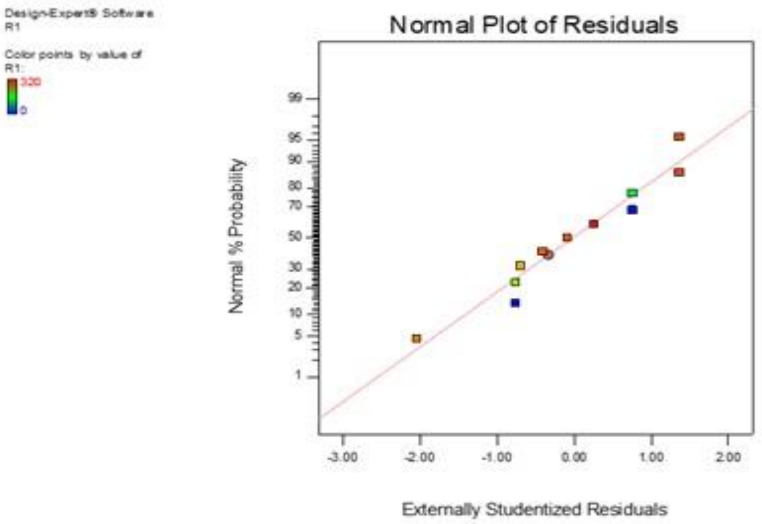
การพิจารณาความเหมาะสมของข้อมูล

โดยขั้นตอนนี้เป็นการพิจารณาความเหมาะสมของข้อมูลเบื้องต้นก่อน ว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ได้หรือไม่ ซึ่งข้อมูลต้องมีลักษณะดังนี้ (ก) การกระจายแบบปกติ (ข) มีความเสถียรของความแปรปรวน และ (ค) ข้อมูลมีความเป็นอิสระ (Larson, 2008)

(ก) การวิเคราะห์การกระจายแบบปกติ (Normal Distribution)

การวิเคราะห์การกระจายของข้อมูล พบว่าส่วนตกค้างที่ปรับแล้ว (Externally studentized residuals) มีการกระจายแบบปกติ โดยมีการกระจายตัวเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.1 การวิเคราะห์นี้มีความสำคัญ เนื่องจากถ้าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวที่ไม่ปกติ จะส่งผลให้การทดสอบ F-test ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความแปรปรวนของข้อมูล 2 กลุ่ม คือ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการทดลองจริง และการทำนายจากสมการ ที่ใช้ทดสอบความเหมาะสมของสมการมีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยการกระจายที่ไม่ปกติส่งผลต่อค่าความแปรปรวนที่คำนวณได้ไม่ถูกต้อง และส่งผลให้การทดสอบ F-test คลาดเคลื่อนด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

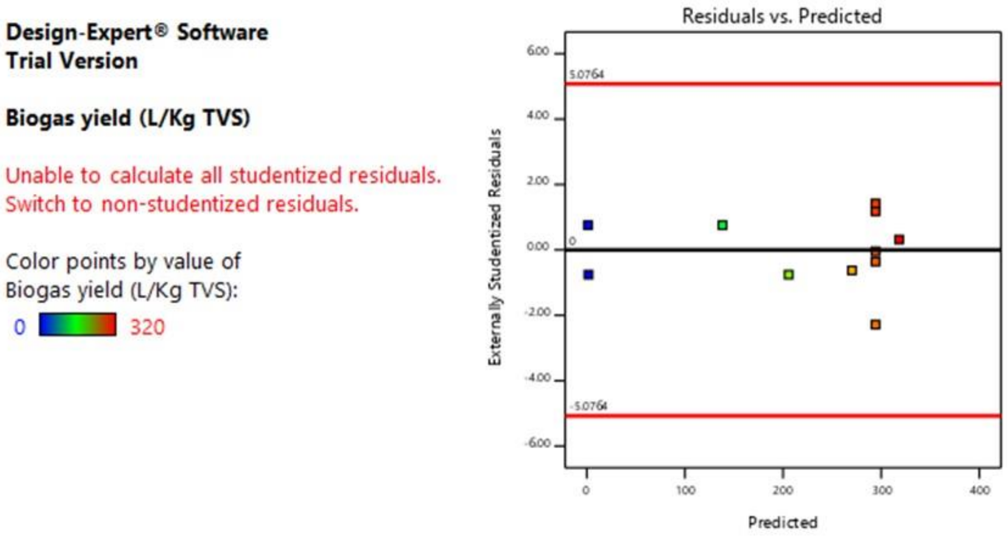


รูปที่ 4.1 การกระจายแบบแจกแจงปกติของส่วนตกค้างของข้อมูล

(ข) การวิเคราะห์ความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

กระจายตัวของส่วนตกค้างที่ปรับแล้วของแต่ละค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่าส่วนตกค้างที่ปรับแล้วมีความผันแปรทั้งในแกนบวกและลบ ดังรูปที่ 4.2 โดยส่วนตกค้างที่ปรับแล้วมีช่วงค่าใกล้เคียงกันทั้งค่าบวกและลบ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน ข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการทดลองที่มีมาตรฐาน โดยความต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและการทำนายจากสมการนั้น มาจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระบบการทดลองเท่านั้น ไม่ได้มาจากความคลาดเคลื่อนอื่นๆ ที่สามารถควบคุมได้

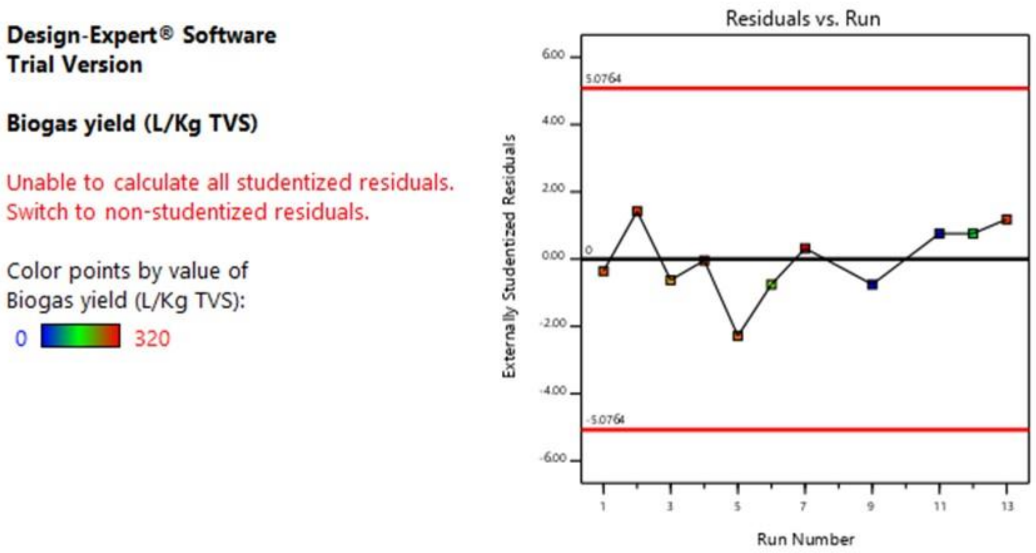
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ

(ค) การวิเคราะห์ความเป็นอิสระ (Independent)

การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่าส่วนตกค้างที่ปรับแล้วจากการทดลองมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่แน่นอน ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน ข้อมูลมีความอิสระ ดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้มาจากการสุ่ม ไม่มีความลำเอียงในการเลือกข้อมูล โดยข้อมูลทั้งสองกลุ่มไม่มีผลต่อกันมีความอิสระต่อกัน ทำให้ตัวแปรอิสระสามารถส่งผลต่อตัวแปรตามได้อย่างเต็มที่ และสามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลจาก 2 กลุ่ม คือ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลอง และการทำนายจากสมการได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของส่วนตกค้างกับอันดับการทดลอง

สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูล พบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบแจกแจงปกติ มีความเสถียรของความแปรปรวน และมีความอิสระ ข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะทำไปวิเคราะห์ ANOVA เพื่อพิจารณาเลือกสมการที่เหมาะสมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การพิจารณารูปแบบสมการที่เหมาะสมใช้ในการทำนาย

การพิจารณารูปแบบสมการที่เหมาะสมใช้ในการทำนาย พบว่า Reduced quadratic equation มีความเหมาะสมกว่ารูปแบบอื่น เนื่องจากค่า Sequential p-value เท่ากับ <0.0001 (<0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) แสดงให้เห็นวาสมการมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญตอค่าตอบสนอง ขณะที่การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit p-value) พบว่าไม่มีนัยสำคัญมีค่าเท่ากับ 0.7798 รวมถึงค่า $R^2_{adj.}$ ที่มีค่าสูง ดังนั้นสมการที่ใช้ในการทำนายตัวแปรตอบสนองได้สูงถึง 99.75%

ตารางที่ 4.5 ความเหมาะสมของสมการแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการทำนายการหมักร่วมระหว่าง SS:SPS

สมการ	พารามิเตอร์ของแต่ละสมการ			อันดับความเหมาะสม
	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	$R^2_{adj.}$	
Linear	0.254	< 0.001	8.80	-
2FI	0.795	< 0.001	0.53	-
Quadratic	0.002	< 0.001	79.29	2
Reduced Quadratic	**< 0.001**	**0.780**	**99.75**	**1**
Cubic	0.871	< 0.001	72.56	3
เกณฑ์ที่เหมาะสม	**<0.05 (Significant)**	**>0.05 (Not significant)**	**>80**	-
คำอธิบายเกณฑ์	ตัวแปรต้นต่างๆ ในสมการมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	สมการไม่ขาดความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมัน 95%	สมการสามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามได้มากกว่าร้อยละ 80	-
เอกสารอ้างอิง	(UCLA Institue for Digital Research and Education, 2020)	(The Pennsylvania State University, 2020)	(Amanda C. Kentner, Anthony J. Hannan และ Donaldson, 2019)	

หมายเหตุ อันดับความเหมาะสมจากมากไปน้อย (1-3)

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการ

จากข้างต้นพบว่าข้อมูลมีความเหมาะสม จึงได้สร้างสมการทำนายประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ SS และSPS ด้วยสมการ Reduced quadratic equation ได้ดังนี้

Reduced quadratic equation	**Biogas Yield** = 1.74 + (261.69.SS) – (0.24.SPS) – (16.75.SS.SPS) + (383.17.SS^2) – (438.58.SS^3) + (103.54.SS^4)

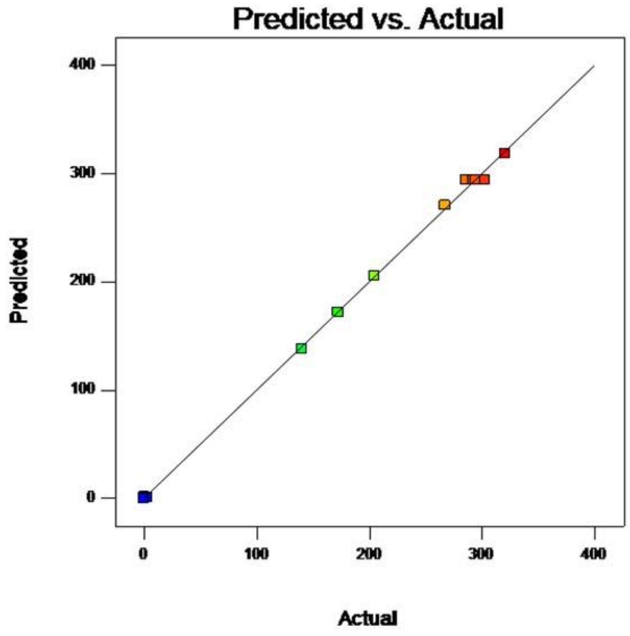
ขณะที่ Biogas yield คือ ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (L/Kg TVS_{added})
SS คือ ความเข้มข้นของกากตะกอนแป้ง (%TVS โดยน้ำหนักเปียก)
SPS คือ ความเข้มข้นของตะกอนเลน (%TVS โดยน้ำหนักเปียก)

จากการวิเคราะห์ ANOVA ของสมการ (ตารางที่ 4.6) ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert (Trial version 10) เมื่อพิจารณาค่า Sum of squares ของทั้ง 2 ปัจจัย พบว่าเมื่อเพิ่มปัจจัยความเข้มข้นของ SS ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น ขณะที่การเพิ่มความเข้มของ SPS ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาค่า p-value ของทุกตัวแปร พบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ SS และ SPS เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งปฏิสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ SS และ SPS ก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน โดยเมื่อพิจารณาภาพรวมความเหมาะสมของสมการทำนาย พบว่าสมการทำนายมีความสัมพันธ์ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) และการทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการทำนาย (Lack of Fit) พบว่าไม่มีนัยสำคัญ ($p\text{-value} > 0.05$) นอกจากนี้ค่า Coefficient of determination (R^2) ของสมการทำนายมีค่าสูงเท่ากับ 99.78 (รูปที่ 4.4) และค่าความเที่ยงตรงเพียงพอ ($Precision_{adeq}$) มีค่ามากกว่า 4 ดังนั้นสมการทำนายที่ได้จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายในสภาวะการทดลองนี้

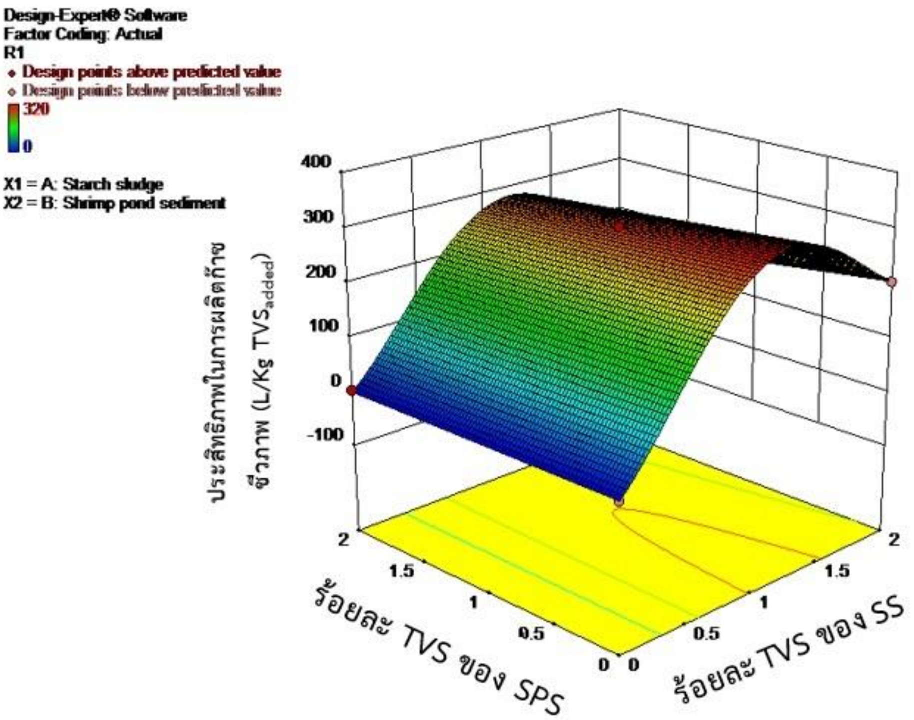
ตารางที่ 4.6 ANOVA ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ SPS ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

Parameter	Sum of Squares	df	Mean Square	F – value	P - Value	Significance
Equation	1.872E+005	6	31194.61	794.59	< 0.001	**Sig.**
SS	9625.31	1	9625.31	245.18	< 0.001	
SPS	2310.41	1	2310.41	58.85	< 0.001	
SS.SPS	1122.25	1	1122.25	28.59	0.002	
SS^2	67022.51	1	67022.51	1707.21	< 0.001	
SS^3	1194.51	1	1194.51	30.43	0.002	
SS^4	26100.00	1	26100.00	664.82	< 0.001	
Residual	235.55	6	39.26			
Lack of Fit	27.55	2	13.78	0.26	0.780	**Not Sig.**
Pure Error	208.00	4	52.00			
Correlation Total	1.874E+005	12				

Mean = 198.54; SD = 6.27; R^2 = 99.78; $R^2_{Adj.}$ = 99.75; C.V. (%) = 3.16; Precision $_{adeq}$ = 69.30



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงจากการทดลอง BMP และค่าที่ได้จากการทำนายของสมการ Reduced quadratic



รูปที่ 4.5 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ SPS ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากภาพ RSM แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ SPS ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการทำนายด้วยสมการ (รูปที่ 4.5) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SS ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น ซึ่งที่ความเข้มข้น TVS ของ SS ร้อยละ 1 มีความเหมาะสมเนื่องจากมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น TVS ของ SS มากกว่าร้อยละ 1 กลับส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ขณะที่เพิ่มความเข้มข้นของ SPS ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ SS เป็นหลัก

การวิเคราะห์ความพึงพอใจ (Desirability)

การหาอัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:SPS ที่เหมาะสมซึ่งใช้เป็นปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นค่าตอบสนอง (Response) โดยใช้การคำนวณหาค่าความพึงพอใจ (Desirability) ของโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Design Expert โดยงานวิจัยนี้สนใจที่ค่าตอบสนองสูงสุด (ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ) โดยมีค่าเท่ากับ 318.60 L biogas/Kg TVS_{added} เมื่อมีปัจจัยนำเข้าหรืออัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:SPS เท่ากับ 1:0 ซึ่งมีค่าความพึง

พอใจเท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าตอบสนองที่ได้นั้นมีระดับความพึงพอใจสูงสุด โดยพบว่าไม่มีความความเข้มข้นของ SPS เลย

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจสอดคล้องกับภาพ RSM แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ SPS ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 4.5) พบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่ความเข้มข้น SS ละ 1 ของ TVS และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SPS เป็นร้อยละ 1, 1.5 และ 2 ของ TVS ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลงเท่ากับ 294.57, 286.07 และ 277.58 L/Kg TVS_{added} และระดับความพึงพอใจลดลงตามลำดับเช่นกันเท่ากับ 0.921, 0.894 และ 0.867 ดังตารางที่ 4.7

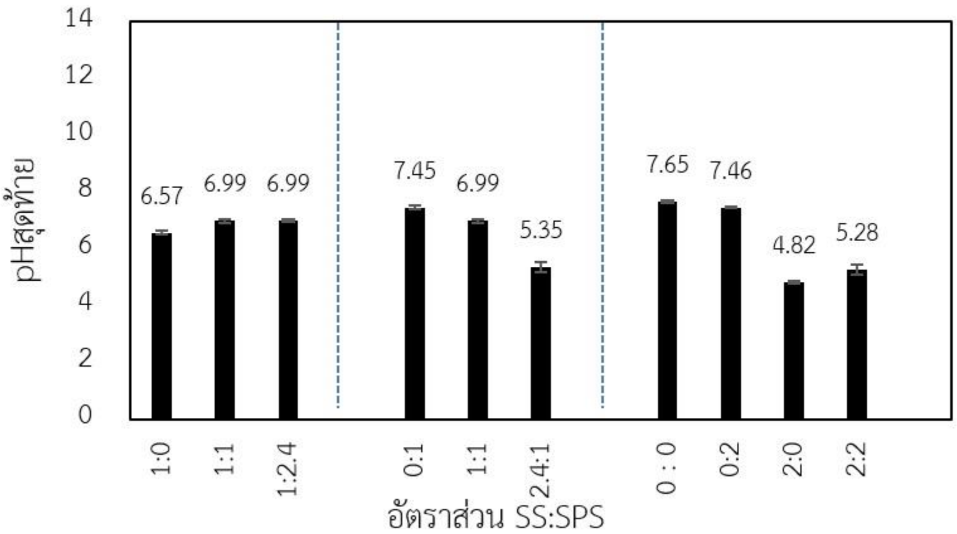
ตารางที่ 4.7 ความพึงพอใจ (Desirability) ที่อัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS ต่างๆ

อัตราส่วนของการหมักร่วม SS:SPS	ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการทำนาย (L/Kg TVS_{added})	ระดับความพึงพอใจ
1:0	318.60	1
1:1	294.57	0.921
1:1.5	286.07	0.894
1:2	277.58	0.867

4) ค่า pH และอัตราส่วน VFA/ALK จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

การเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนของการทดลอง BMP นี้ พบว่า มีค่า pH เริ่มต้นอยู่ระหว่าง 6.94-7.10 ซึ่งถูกปรับให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (ค่าแนะนำ pH ที่เหมาะสมในการเดินระบบหมักย่อยแบบไร้ออกซิเจนที่เหมาะสม pH ควรอยู่ในช่วง 6.5-7.5) โดยค่า pH เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบผลิตหมักย่อยแบบไร้ออกซิเจน ซึ่งในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตจินิค (Acidogenic bacteria) จะสร้างกรดอินทรีย์ระเหยส่งผลให้ pH ลดลง อยู่ในช่วง 5.5-6.5 ขณะที่ขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพ pH ควรจะอยู่ในช่วง 6.5-8.2 จึงจะเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกลุ่มเมทาโนเจน (Methanogenic Bacteria) ที่ทำหน้าที่สร้างก๊าซมีเทน (Taylor & Francis Group, 2016)

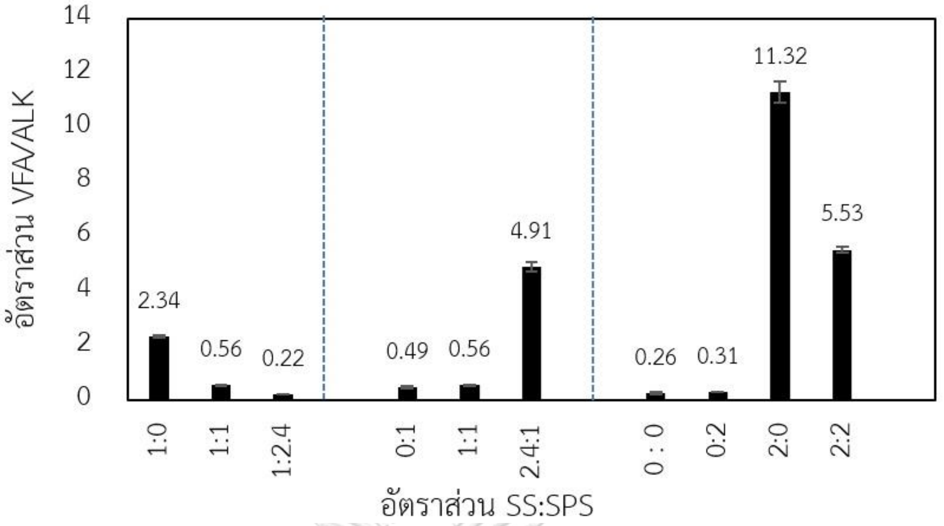
จากการทดลองหมักร่วมของ SS:SPS นี้ พบว่าค่า pH ของทุกอัตราส่วนการหมักร่วมหลังจากการหมักสิ้นสุดอยู่ในช่วง 4.82-7.65 โดยอัตราส่วนที่มีค่า pH ไม่เหมาะสมสำหรับหมักย่อยแบบไร้ออกซิเจนเป็นอัตราส่วนที่มีความเข้มข้นของ SS ตั้งแต่ร้อยละ 2 ของ TVS คือ อัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:SPS เท่ากับ 2:0, 2:2 และ 2.4:1 โดยค่า pH เท่ากับ 4.82, 5.28 และ 5.35 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่า pH ของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพด่าง (VFA/ALK) พบว่าเกือบทุกอัตราส่วนที่มีการเติม SS มีค่าเกินระดับที่เหมาะสม 0.40 (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2561) อยู่ในช่วง 0.56-11.32 ซึ่งอาจจะทำให้ระบบล้มเหลวเสียสมดุลได้ (รูปที่ 4.7) และที่น่าสนใจคือ อัตราส่วนที่มีการเติม SPS จะมีอัตราส่วน VFA/ALK น้อยกว่า 0.40 โดยอัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS เท่ากับ 1:0 1:1 และ 1:2.4 มีค่าVFA/ALK ลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SPS มีค่าเท่ากับ 2.34 0.56 และ 0.22 ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้การเติม SPS จึงช่วยในการปรับเสถียรภาพของระบบหมักร่วมโดยทำให้ค่า pH และอัตราส่วน VFA/ALK มีค่าเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในการสร้างก๊าซมีเทน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



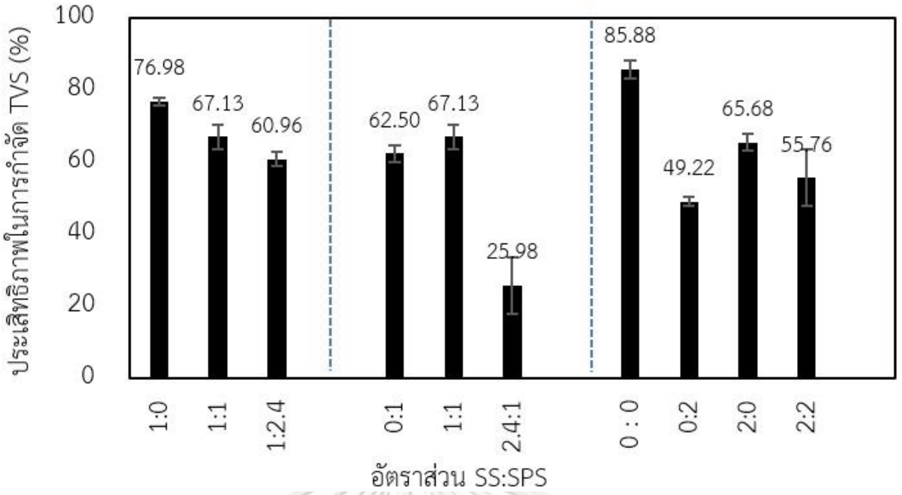
รูปที่ 4.7 อัตราส่วน VFA/ALK ของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

5) ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปของแข็งระเหยทั้งหมดจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

รูปที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดที่อัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:SPS ต่างๆ โดยการทดลอง BMP นี้ทำที่อุณหภูมิห้อง ภายในระยะเวลาการหมักย่อยทั้งหมด 45 วัน พบว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดสูงสุดร้อยละ 76.98 ที่อัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS เท่ากับ 1:0 โดยในอัตราส่วนที่ไม่มีการเติมวัสดุในการหมักร่วม (ชุดควบคุม) โดยใช้น้ำกลั่นแทนนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดที่สูงกว่าชุดทดลองที่มีการเติมวัสดุหมักร่วมเท่ากับร้อยละ 85.88 เนื่องจากการตาย และย่อยสลายของหัวเชื้อที่ใช้ในการหมักเพราะไม่มีการเติมอาหารให้แบคทีเรีย และพบว่าเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ SS คงที่เท่ากับร้อยละ 1 ของ TVS และเพิ่มความเข้มข้นของ SPS ของอัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS เท่ากับ 1:1 และ 1:2.4 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดลดลงเล็กน้อยมีค่าเท่ากับร้อยละ 67.13 และ 60.96 ตามลำดับ ในขณะที่กำหนดความเข้มข้นของ SPS คงที่เท่ากับร้อยละ 1 ของ TVS แต่เพิ่มความเข้มข้นของ SS ของอัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS เท่ากับ 0:1, 1:1 และ 2.4:1 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมด มีค่าลดลงเป็นอย่างมากเท่ากับร้อยละ 62.50, 67.13 และ 25.98 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของทั้ง SS เป็นหลัก อาจเนื่องจาก SS ที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตย่อยสลายได้ง่ายกว่า แต่ตะกอนเลนส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมตัวของมูลกุ้ง เศษอาหาร และสาหร่าย ซึ่งจะถูก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ย่อยให้อยู่ในรูปของตะกอนรีดิวซ์ อาทิเช่น กรดฮิวมิค หรือไพรรูวิค ที่เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนย่อยสลายค่อนข้างยาก (Hargreaves, 1995)



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS

4.2.2 ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการหมักร่วมของกากตะกอนแป้งและตะกอนสลัดจ์โดยวิธี BMP

ผลการทดลองประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมทั้งหมด 13 อัตราส่วน (ตารางที่ 4.8) สรุปได้ดังนี้

1) การหมักวัสดุเพียงชนิดเดียว

จากผลการทดลองใช้ SS และ ABS เป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียวโดยใช้วิธี BMP พบว่าการใช้ตะกอนสลัดจ์เพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นของแข็งระเหยเริ่มต้นร้อยละ 1 และ 2 (ชุดการทดลองที่ 1 และ 5) มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างต่ำและใกล้เคียงกัน เนื่องจากอัตราส่วนการหมักร่วมดังกล่าว มีอัตราส่วน C/N ratio ต่ำมากเท่ากับ 6.79 และ 6.06 ตามลำดับ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจน แต่ผลการทดลองใช้ SS เป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียว ที่ความเข้มข้นของ SS ร้อยละ 1 ของ TVS มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ 332±3.57 L/Kg TVS_{added} อาจเนื่องจากอัตราส่วนการหมักร่วมมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 35 ใกล้เคียงค่าแนะนำ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SS เป็นร้อยละ 2 ของ TVS มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเหลือเท่ากับ 190±13.08 L/Kg TVS_{added}

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) การหมักร่วม

จากการทดลองหมักร่วมโดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ SS ระหว่างร้อยละ 0-2.4 ของ TVS พบว่าเมื่อกำหนดความเข้มข้นของ ABS คงที่เท่ากับร้อยละ 1 ของ TVS ของอัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS เท่ากับ 0:1, 1:1 และ 2.4:1 มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 80±0.42, 209±25.55 และ 117±3.23 L/Kg TVS_{added} ตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วนการหมักร่วมที่เพิ่มความเข้มข้นของ ABS และกำหนดให้ความเข้มข้นของ SS คงที่เท่ากับร้อยละ 1 ของ TVS ของอัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS เท่ากับ 1:0, 1:1 และ 1:2.4 มีค่าเท่ากับ 332±3.57, 209±25.55 และ 150±5.56 L/Kg TVS_{added} ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ ABS ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง

ผลการทดลองข้างต้นพบว่า อัตราส่วนการหมักร่วม 1:0 ที่ใช้ SS อย่างเดียวมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ 332±3.57 L/Kg TVS_{added} เมื่อนำมาหมักร่วมโดยเพิ่มความเข้มข้นของ ABS ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ผลการทดลอง BMP สรุปได้ดังนี้

- การใช้ SS เป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด
- การใช้ SS หมักร่วมกับ ABS ที่อัตราส่วน 1:1 มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงต่ำกว่าการใช้ SS เป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียวเป็นอย่างมาก โดยประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงถึงร้อยละ 37.05
- การเพิ่มความเข้มข้นของ ABS ในการหมักร่วมส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างต่อเนื่อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมในการทดลองต่อไป จึงควรพิจารณาเสถียรภาพของระบบหมักย่อยร่วมด้วย

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและลักษณะสมบัติของการทดลอง BMP ที่ใช้ความเข้มข้นของ SS และ ABS ต่างกัน

ชุดการทดลอง	ร้อยละของ TVS โดยน้ำหนักเปียก		อัตราส่วน C/N	ISR	อัตราส่วน F/M	ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (L/Kg TVSadded)	
	SS	ABS				ค่าจริง	ค่าจากการทำนาย
1	0[a]	1	6.79	1.67	0.6	80±0.42	80.00
2	1	1	23.56	0.83	1.2	246±14.46	210.42
3	2	2	29.30	0.42	2.4	194±8.42	193.92
4	2	0	56.44	0.83	1.2	190±13.08	189.88
5	0	2	6.06	0.83	1.2	81±16.62	81.00
6	1	1	23.56	0.83	1.2	222±7.97	210.42
7	1	2.4142	16.86	0.49	2.0	150±5.56	119.43
8	1	1	23.56	0.83	1.2	181±25.54	210.42
9 (Control)	0	0	8.51	-	0.0	0	0
10	1	1	23.56	0.83	1.2	198±12.17	210.42
11	2.4142	1	43.57	0.49	2.0	117±3.23	116.80
12*	1	0[a]	35.21	1.67	0.6	332±3.57	301.41
13	1	1	23.56	0.83	1.2	196.±4.34	210.42

3) การสร้างสมการทำนายประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

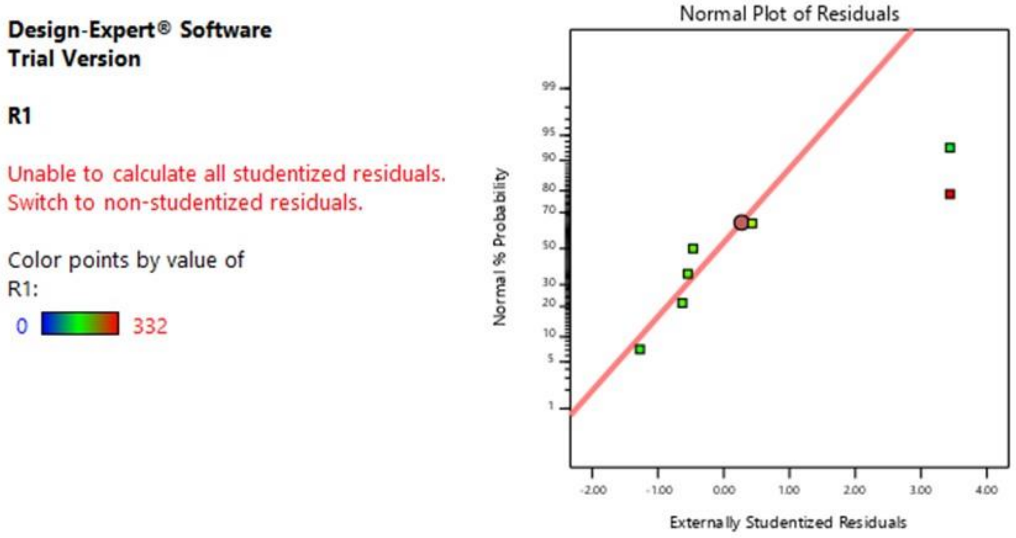
จากการออกแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central composite design: CCD) โดยโปรแกรม Design Expert (Trial version 10) เพื่อศึกษาผลของอัตราการหมักร่วมของ SS และ ABS โดยวิธี BMP โดยใช้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (L/Kg TVS_{added}) เป็นค่าตอบสนอง (ตารางที่ 4.8) โดยมีการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลก่อนเบื้องต้น และความเหมาะสมของสมการต่อไป

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูล

โดยขั้นตอนนี้เป็นการพิจารณาความเหมาะสมของข้อมูลเบื้องต้นก่อน ว่าสามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ได้หรือไม่ ซึ่งข้อมูลต้องมีลักษณะดังนี้ (ก) การกระจายแบบปกติ (ข) มีความเสถียรของความแปรปรวน และ (ค) ข้อมูลมีความเป็นอิสระ

1) **การวิเคราะห์การกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal plot)**

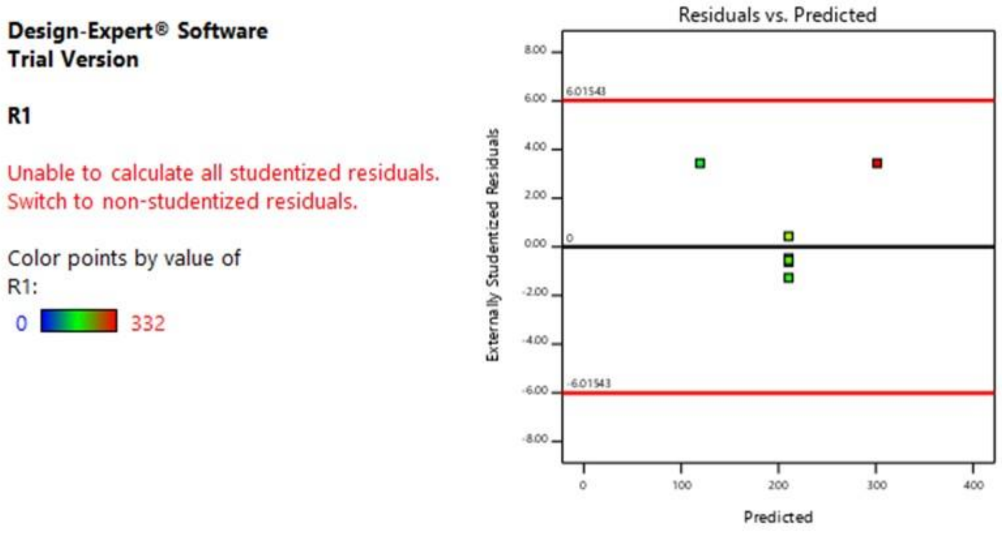
การวิเคราะห์การกระจายแบบแจกแจงปกติ พบว่าส่วนตกค้างของข้อมูล (Residuals) มีการกระจายแบบปกติ และข้อมูลส่วนใหญ่มีการกระจายตัวเป็นเส้นตรง มีเพียงสองค่าที่มีการกระจายตัวไม่ปกติ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การกระจายแบบแจกแจงปกติของส่วนตกค้างของข้อมูล

2) **การวิเคราะห์ความเสถียรของความแปรปรวน**

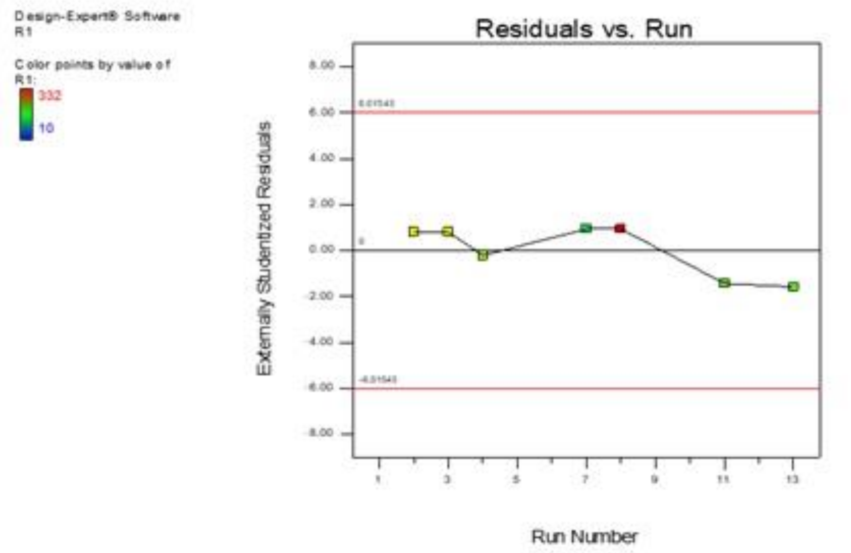
การวิเคราะห์กระจายตัวของส่วนตกค้างในแต่ละค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวทั้งในแกนบวกและลบมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของส่วนตัวค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ

3) **การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูล**

การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่าส่วนตกค้างของแต่ละอันดับการทดลองมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่แน่นอน ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน แสดงให้เห็นถึงข้อมูลมีความอิสระ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของส่วนตัวค้างกับอันดับการทดลอง

สรุปผลการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลข้างต้น พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ มีความเสถียรของความแปรปรวน และมีความอิสระ ข้อมูลจึงมีความเหมาะสมที่จะทำไปทำนายด้วยสมการและวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการต่อไป

CHULALONGKORN UNIVERSITY

การพิจารณารูปแบบสมการที่เหมาะสมใช้ในการทำนาย

การพิจารณารูปแบบสมการที่เหมาะสมใช้ในการทำนาย พบว่า Reduced quadratic equation มีความเหมาะสมกว่ารูปแบบอื่น เนื่องจากค่า Sequential p-value เท่ากับ 0.0041 (<0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) แสดงให้เห็นวาสมการมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญตอค่าตอบสนอง ขณะที่การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit p-value) พบว่ามีนัยสำคัญมีค่าเท่ากับ 0.0263 ซึ่งมีโอกาสเพียง 2.63% ที่สมการจะไม่มีความเหมาะสมในการใช้ทำนาย แต่อย่างไรก็ตามค่า $R^2_{adj.}$ มีค่าสูง สมการใช้ในการทำนายได้สูงถึง 89.47% (ตารางที่ 4.9)

ตารางที่ 4.9 ความเหมาะสมของสมการแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการทำนายการหมักร่วมระหว่าง SS:ABS

สมการ	พารามิเตอร์ของแต่ละสมการ			ระดับความเหมาะสม
	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	$R^2_{adj.}$	
Linear	0.246	0.001	9.33	-
2FI	0.645	0.001	1.73	-
Quadratic	0.086	0.002	37.43	2
Reduced Quadratic	**0.004**	**0.026**	**89.47**	**1**
Cubic	0.025	0.007	80.12	3
เกณฑ์ที่เหมาะสม	**<0.05 (Significant)**	**>0.05 (Not significant)**	**>80**	-
คำอธิบายเกณฑ์	ตัวแปรต้นต่างๆ ในสมการมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	สมการไม่ขาดความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	สมการสามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามได้มากกว่าร้อยละ 80	-
เอกสารอ้างอิง	(UCLA Institue for Digital Research and Education, 2020)	(The Pennsylvania State University, 2020)	(Amanda C. Kentner และคณะ, 2019)	

CHULALONGKORN UNIVERSITY

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการ

เมื่อพบว่าข้อมูลมีความเหมาะสม จึงได้สร้างสมการทำนายประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ SS และ ABS ด้วยสมการ Reduced quadratic equation ได้ดังนี้

Reduced quadratic equation

$$\textbf{Biogas Yield} = (252.78.SS) + (40.5.ABS) - (190.44.SS.ABS) + (199.30.SS^2) + (85.60.SS^2ABS) - (215.53.SS^3) + (38.21.SS^4)$$

ขณะที่ Biogas yield คือ ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (L/Kg TVS $_{added}$)

SS คือ ความเข้มข้นของกากตะกอนแป้ง (%TVS โดยน้ำหนักเปียก)

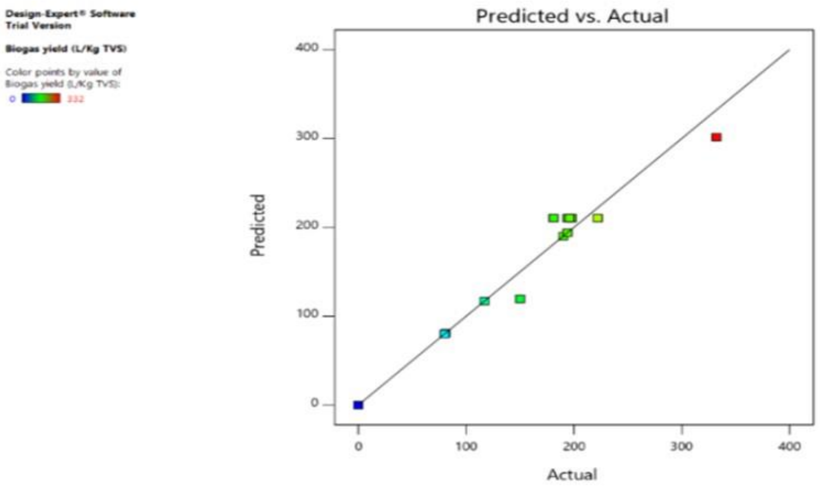
ABS คือ ความเข้มข้นของตะกอนสลัดจ์จากระบบตะกอนเร่ง (%TVS โดยน้ำหนักเปียก)

จากการวิเคราะห์ ANOVA ของสมการ (ตารางที่ 4.10) ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert (Trial version 10) เมื่อพิจารณาค่า Sum of squares ของทั้ง 2 ปัจจัย พบว่าเมื่อเพิ่มปัจจัยความเข้มข้นของ SS ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น ขณะที่การเพิ่มความเข้มของ ABS ช่วยให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาค่า p-value ของเกือบทุกตัวแปรพบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมันร้อยละ 95 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ SS และ ABS เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ SS และ ABS พบว่าไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างไม่มีนัยสำคัญ (ค่า p-value > 0.05) โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.2055 ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพรวมความเหมาะสมของสมการทำนาย พบว่าสมการทำนายมีความสัมพันธ์ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ (p-value < 0.05) แต่การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการทำนาย (Lack of Fit) พบว่ามีนัยสำคัญโดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.026 (p-value < 0.05) ดังนั้นสมการอาจขาดความเหมาะสมในการทำนายบางสภาวะการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า Coefficient of determination (R^2) ของสัมการทำนายเท่ากับ 95.61 ซึ่งค่อนข้างสูง (รูปที่ 4.12) และค่าความเที่ยงตรงเพียงพอ ($Precision_{adeq}$) มีค่ามากกว่า 4 ดังนั้นสมการทำนายที่ได้จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายในสภาวะการทดลองนี้

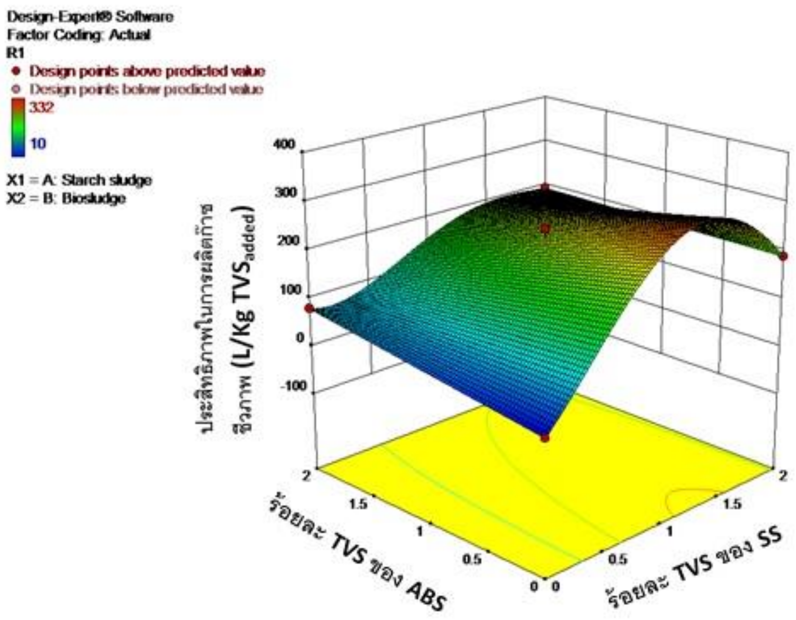
ตารางที่ 4.10 ANOVA ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ ABS และประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

Parameter	Sum of Squares	df	Mean Square	F - alue	P - Value	Significance
Equation	76276.59	7	10896.66	15.56	0.004	**Sig.**
SS	15327.75	1	15327.75	21.89	0.005	
ABS	16562.00	1	16562.00	23.65	0.005	
SS.ABS	1482.25	1	1482.25	2.12	0.206	
SS^2	12118.03	1	12118.03	17.30	0.009	
SS^2ABS	14653.60	1	14653.60	20.92	0.006	
SS^3	7854.69	1	7854.69	11.22	0.020	
SS^4	3555.59	1	3555.59	5.08	0.074	
Residual	3501.71	5	700.34			
Lack of Fit	2616.91	1	2616.91	11.83	0.026	**Sig.**
Pure Error	884.80	4	221.20			
Correlation Total	79778.31	12				

Mean = 164.23; SD = 26.46; R^2 = 95.61; $R^2_{Adj.}$ = 89.47; C.V. (%) = 16.11; $Precision_{adeq}$ = 14.52



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงจากการทดลอง BMP และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Reduced quadratic



รูปที่ 4.13 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ ABS ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากภาพ RSM แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ ABS ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการทำนายด้วยสมการ (รูปที่ 4.13) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้น

ของ SS ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้น TVS ของ SS ร้อยละ 1.33 มีความเหมาะสมมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น TVS ของ SS มากขึ้นต่อไปกลับส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ขณะที่เพิ่มความเข้มข้นของ ABS ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ SS เป็นหลัก และการเพิ่มความเข้มข้น ABS ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพียงเล็กน้อย

การวิเคราะห์ความพึงพอใจ (Desirability)

การหาอัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:ABS ที่เหมาะสมซึ่งเป็นปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นค่าตอบสนอง (Response) โดยใช้การคำนวณหาค่าความพึงพอใจ (Desirability) โดยงานวิจัยนี้สนใจที่ค่าตอบสนองสูงสุดเท่ากับ 301.27 L/Kg TVS_{added} เมื่อมีปัจจัยนำเข้าหรืออัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:ABS เท่ากับ 1.33:0 ซึ่งมีค่าความพึงพอใจสูงสุดเท่ากับ 1 โดยพบว่าไม่มีความเข้มข้นของตะกอนชีวภาพ และได้ทำการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:ABS เท่ากับ 1:0 พบว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเหลือเท่ากับ 274.78 L/Kg TVS_{added} และความพึงพอใจเท่ากับ 0.912

เมื่อวิเคราะห์ความพึงพอใจมีความสอดคล้องกับภาพ RSM ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ SS และ ABS ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 4.13) พบว่า เมื่อกำหนดความเข้มข้นของ SS คงที่ร้อยละ 1 ของ TVS และเพิ่มความเข้มข้นของ ABS เป็นร้อยละ 0, 1, 1.5 และ 2 ของ TVS ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลงเท่ากับ 274.78, 210.43, 178.25 และ 146.08 L/Kg TVS_{added} ตามลำดับ ระดับความพึงพอใจเท่ากับ 0.912, 0.698, 0.592 และ 0.485 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.11

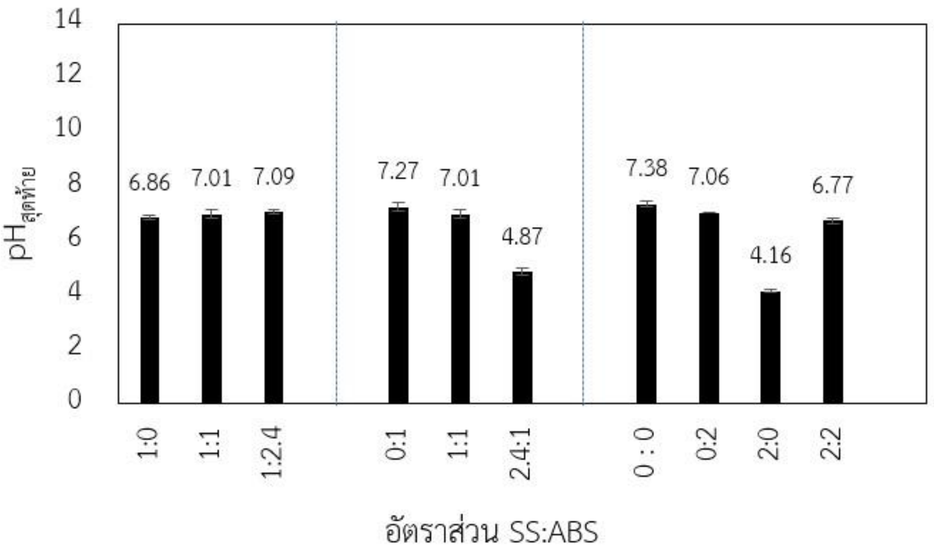
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.11 ความพึงพอใจ (Desirability) ที่อัตราส่วนของ SS:ABS ต่างๆ

อัตราส่วนของการหมักร่วม SS:ABS	ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการทำนาย (L/Kg TVS_{added})	ค่าความพึงพอใจ
1.33:0	301.27	1
1:0	274.78	0.912
1:1	210.43	0.698
1:1.5	178.25	0.592
1:2	146.08	0.485

4) ค่า pH และอัตราส่วน VFA/ALK จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

การเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนของการทดลอง BMP นี้ พบว่ามีค่า pH เริ่มต้นอยู่ระหว่าง 6.94-7.15 ซึ่งปรับให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งหลังจากการหมักสิ้นสุด มีค่า pH อยู่ในช่วง 4.16-7.38 (รูปที่ 4.14) โดยอัตราส่วนที่มีค่า pH ไม่เหมาะสมสำหรับหมักย่อยแบบไร้ออกซิเจน (ช่วงที่เหมาะสม 6.5-7.5) เป็นอัตราส่วนที่มีร้อยละ TVS ของ SS มีค่ามากกว่า 2 คือ อัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:ABS เท่ากับ 2:0 และ 2.4:1 โดยค่า pH เท่ากับ 4.16 และ 4.87 ตามลำดับ อาจเนื่องมาจาก SS สามารถย่อยสลายได้ง่าย ทำให้มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยส่งผลให้ค่า pH ของระบบหมักย่อยลดลงอย่างรวดเร็ว (Cuzin และคณะ, 1992)



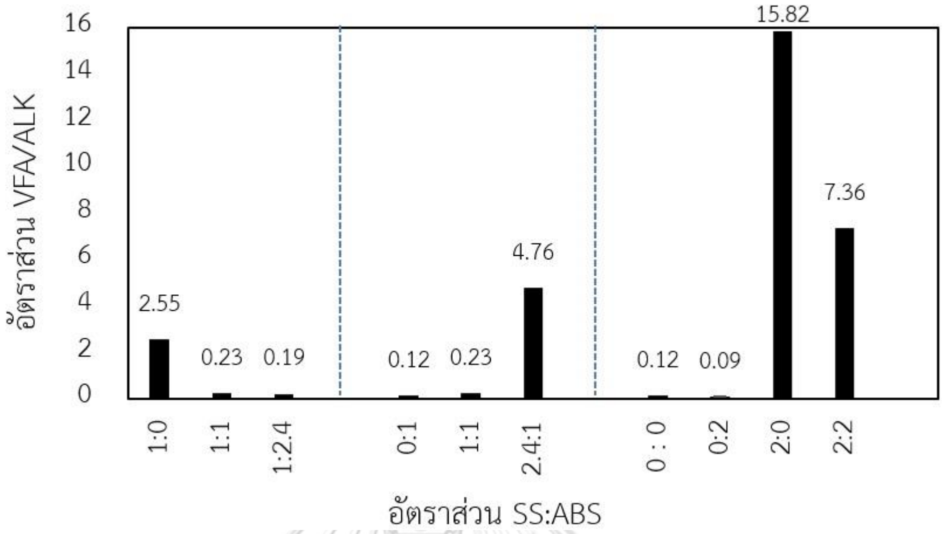
รูปที่ 4.14 ค่า pH ของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน VFA/ALK (รูปที่ 4.15) พบว่าเกือบทุกอัตราส่วนการหมักร่วมที่มีการเติม SS มีค่าเกินระดับที่เหมาะสม 0.40 ซึ่งอาจจะส่งผลให้ระบบเสียสมดุล และล้มเหลวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนการหมักร่วมที่มีการเติม SS ตั้งแต่ร้อยละ 2 ของ TVS ที่อัตราส่วนการหมักร่วมเท่ากับ 2.4:1, 2:2 และ 2:0 มีค่าอัตราส่วน VFA/ALK สูงมีค่าเท่ากับ 4.76, 7.36 และ 15.82 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่า pH ที่ลดลงเช่นกัน ด้วยเหตุนี้การเติม SS ในระบบหมักร่วมจึงไม่ควรมากกว่าร้อยละ 2 ของ TVS อีกทั้งพบว่าการหมักย่อยโดยใช้ SS เพียงอย่างเดียวระบบมีความไม่เสถียรสูงกว่าระบบการหมักย่อยที่เติม ABS เพื่อหมักร่วมเป็นอย่างมาก

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนการหมักร่วมที่เพิ่มความเข้มข้นของ ABS และกำหนดให้ความเข้มข้นของ SS คงที่เท่ากับร้อยละ 1 ของ TVS ของอัตราส่วนการหมักร่วม SS:ABS เท่ากับ 1:0, 1:1 และ 1:2.4 พบว่าอัตราส่วน VFA/ALK มีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เท่ากับ 2.55, 0.23 และ 0.19 ดังนั้น

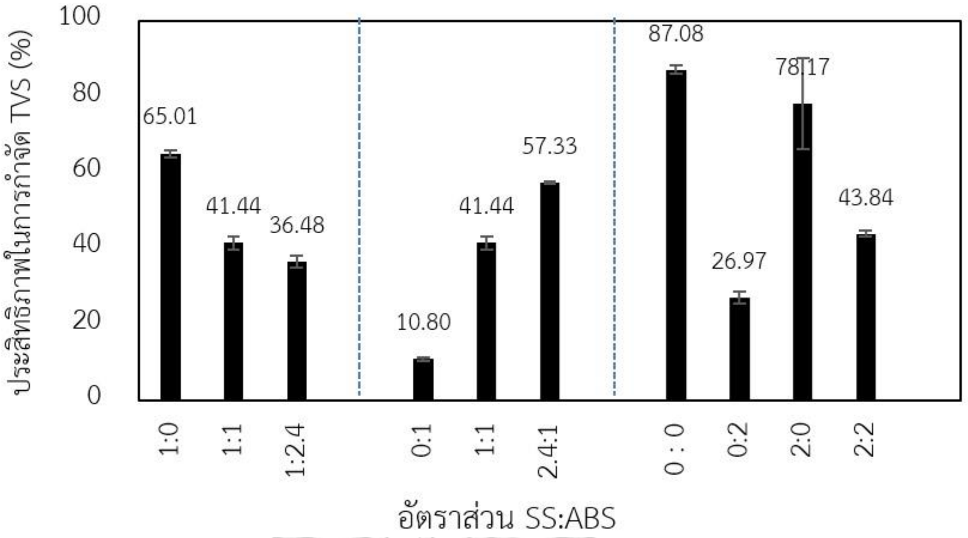
การเติม ABS จึงจะช่วยในการปรับเสถียรภาพของระบบหมักร่วมโดยทำให้อัตราส่วน VFA/ALK มีค่าเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในการสร้างก๊าซมีเทน



รูปที่ 4.15 อัตราส่วน VFA/ALK ของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

4) ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปของแข็งระเหยทั้งหมดจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

รูปที่ 4.16 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดที่อัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:ABS ต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 78.17 ที่อัตราส่วนการหมักร่วม SS:ABS เท่ากับ 2:0 โดยเมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นของ SS คงที่ร้อยละ 1 ของ TVS แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ ABS ของอัตราส่วนการหมักร่วม SS:ABS เท่ากับ 1:0, 1:1 และ 1:2.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมด มีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 65.01, 41.44 และ 36.48 ตามลำดับ ซึ่งต่างจากเมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นของ ABS คงที่ แต่เพิ่มความเข้มข้นของ SS ของอัตราส่วนการหมักร่วม SS:ABS เท่ากับ 0:1, 1:1 และ 2.4:1 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเท่ากับร้อยละ 10.80, 41.44 และ 57.33 ตามลำดับ จึงเห็นได้ชัดว่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ SS เพิ่ม แต่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของ ABS เพิ่ม เนื่องมาจาก SS ประกอบด้วยแป้งซึ่งย่อยค่อนข้างง่าย แต่ตะกอน ABS ประกอบด้วยแบคทีเรียมากถึงร้อยละ 95 และส่วนที่เหลือร้อยละ 5 เป็นจุลินทรีย์กลุ่มโรติเฟอร์ และโปรตัวซัวต่างๆ (Tomasik, 2017) ซึ่งจากโครงสร้างของเซลล์แบคทีเรียทำให้ย่อยสลายได้ค่อนข้างยากกว่า



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยของแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมของ SS และ ABS

จากผลการทดลอง BMP โดยภาพรวมแล้ว จึงพบว่าอัตราส่วนการหมัก SS เพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:0 ของทั้งสองการทดลอง BMP เป็นอัตราส่วนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด เนื่องจากองค์ประกอบเป็นแป้งที่ย่อยสลายได้โดยง่าย แต่เมื่อพิจารณาเรื่องของความเสถียรภาพของระบบจากค่า pH และ VFA/ALK กลับพบว่าอัตราส่วนที่มีแต่การเติม SS เพียงอย่างเดียว ระบบหมักย่อยมีค่า pH ค่อนข้างต่ำและอัตราส่วน VFA/ALK ค่อนข้างสูง ซึ่งเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบ ในขณะที่การหมักร่วมของ SS:SPS และ SS:ABS ที่อัตราส่วน 1:1 ช่วยปรับอัตราส่วนของ C/N อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (ค่าแนะนำ 20-30) ที่เท่ากับ 24 จึงพบว่าระบบหมักร่วมมีเสถียรภาพที่ดี เหมาะสำหรับการเติบโตของเมทาโนเจนในสร้างก๊าซมีเทน และประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ SS เป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียว และการหมักร่วมดังกล่าวยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพดีกว่าการหมัก SPS หรือ ABS เพียงอย่างเดียว ซึ่งแทบไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น เนื่องจากมีอัตราส่วนของ C/N ที่ต่ำเท่ากับ 7 ด้วยเหตุนี้ อัตราส่วนในการหมักร่วม 1:0 และ 1:1 ของการหมักร่วมของ SS:SPS และ SS:ABS จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองในระบบหมักร่วมแบบสองขั้นตอนของการทดลองต่อไป เนื่องจากการหมักแป้งเพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพสูง ส่วนการหมักร่วมมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกับการหมัก SS เพียงอย่างเดียวแต่ระบบหมักย่อยมีเสถียรภาพค่อนข้างดี

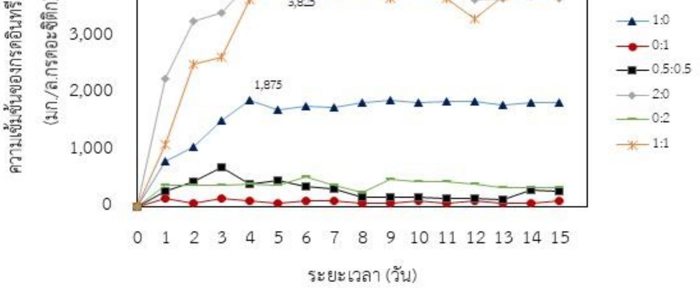
4.3 ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทช์

จากผลการศึกษาอัตราส่วนของวัสดุหมักร่วมที่เหมาะสมโดยวิธี BMP ได้คัดเลือกการหมักร่วม SS:SPS และ SS:ABS ที่อัตราส่วน 1:1 มาศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยโดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ใช้วัสดุหมักชนิดเดียวของ SS SPS และ ABS ทำการทดลองหมักร่วมในถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทช์ ที่ความเข้มข้นวัสดุหมักเริ่มต้นร้อยละ 1 และ 2 ของ TVS ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

4.3.1 การหมักร่วม SS:SPS

1) ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยที่ผลิตได้

รูปที่ 4.17 แสดงความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยในแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมตลอดระยะเวลาการหมัก 15 วัน เมื่อทำการเปรียบเทียบโดยกำหนดความเข้มข้นของ TVS เริ่มต้นร้อยละ 1 และ 2 พบว่าอัตราส่วนที่ทำการหมัก SS เพียงอย่างเดียว ของอัตราส่วนการหมักเท่ากับ 2:0 มีค่าความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุด ในวันที่ 10 ของการหมัก มีค่าเท่ากับ 4,650 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร รองลงมาเป็นที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:1 มีความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุด มีค่าเท่ากับ 3,825 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซิติก ในวันที่ 5 ของการหมัก โดยเมื่อพิจารณาในวันที่ 5 ของอัตราส่วนการหมัก SS เพียงอย่างเดียวของอัตราส่วน 2:0 มีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยสูงเช่นกันเท่ากับ 4,238 มิลลิกรัมอะซิติกต่อลิตร ในขณะที่อัตราส่วนการหมักร่วมที่ไม่มีการเติม SS โดยเติม SPS เพียงอย่างเดียวของอัตราส่วน 0:2 มีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยค่อนข้างต่ำ เท่ากับ 525 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร เนื่องจาก SS ที่ย่อยค่อนข้างง่ายกว่า SPS ทำให้มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยในระบบอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการหมัก และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของ TVS เริ่มต้นร้อยละ 2 (อัตราส่วน 2:0 และ 1:1) มีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่าที่ความเข้มข้นของ TVS เริ่มต้นร้อยละ 1 (อัตราส่วน 1:0 และ 0.5:0.5) เป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายของการหมักร่วม SS:SPS

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อคำนวณประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยต่อน้ำหนักของแข็งระเหยเริ่มต้น (ตารางที่ 4.12) พบว่าที่ความเข้มข้นของ TVS เริ่มต้นร้อยละ 2 ของการหมัก SS เพียงอย่างเดียวคือที่อัตราส่วน SS:SPS เท่ากับ 2:0 มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 388 กรัมอะซิติก/กิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น (415 กรัมซีโอดี/กิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น) รองลงมาคือที่อัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS เท่ากับ 1:1 เท่ากับ 319 กรัมอะซิติก/กิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น (342 กรัมซีโอดี/กิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการหมักร่วมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ตารางที่ 4.13) พบว่ามีประสิทธิภาพค่อนข้างใกล้เคียงกับการทดลองอื่นๆ จากการหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนของ ABS, ตะกอนน้ำเสีย สาหร่าย, และการหมักร่วมของ ABS กับของเสียจากมันฝรั่งและเศษอาหาร ยกเว้นการหมักย่อยของธูปฤาษี, ABS ถูกปรับสภาพด้วยรังสีอุลตร้าโซนิค และการหมักร่วม ABS กับซากต้นข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพด้วยด่างที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าจากการทดลองนี้ เนื่องมาจากจากวัสดุในการหมักที่ต่างกัน และการปรับสภาพวัสดุหมักก่อนนำมาใช้ช่วยให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยเทียบต่อน้ำหนักวัสดุหมัก

อัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS	**ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหย ต่อน้ำหนักวัสดุหมักเริ่มต้น**	
	กรัมอะซิติก/กิโลกรัม TVS เริ่มต้น	**กรัมซีโอดี/กิโลกรัม TVS เริ่มต้น**
SS:SPS=1:0	312	334
SS:SPS=0.5:0.5	116	124
SS:SPS=0:1	25	27
SS:SPS=2:0	**388**	**415**
SS:SPS=1:1	**319**	**342**
SS:SPS=0:2	44	47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

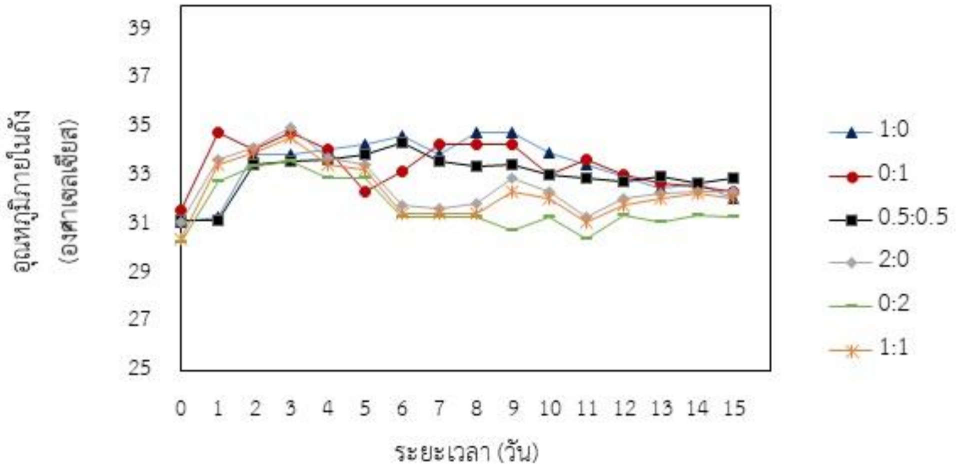
วัสดุหมัก	ถัง ปฏิกิริยา	สถาวะใน การหมัก	การเดิน ระบบ	VFA yield (กรัมซีโอดี/กิโลกรัม TVSเริ่มต้น)	อ้างอิง
ธูปฤาษี	CSTR	มีโซฟิลิค	แบบแบทซ์	438.7	(Hu, Yu และ Zheng, 2006)
ABS	CSTR	เทอร์โมฟิลิค	แบบแบทซ์	300-430	(Bolzonella, Pavan, Zanette และ Cecch, 2007)
ตะกอนน้ำเสีย	CSTR	มีโซฟิลิค	แบบแบทซ์	316	(Longo และคณะ, 2015)
สาหร่าย	CSTR	มีโซฟิลิค	แบบแบทซ์	380 ±20	(Gruhn, Frigon และ Guiot, 2016)
ABS ปรับสภาพด้วยรังสีอุลตร้าโซนิค หมักร่วมกับซากต้นข้าวโพดปรับสภาพด้วยด่าง	BMP	มีโซฟิลิค	แบบแบทซ์	583	(Zhou และคณะ, 2016)
ABS ร่วมกับของเสียจากมันฝรั่ง และเศษอาหาร	BMP	มีโซฟิลิค	แบบแบทซ์	343.54±14.63	(Ma และคณะ, 2017)
เศษอาหาร	BMP	มีโซฟิลิค	แบบแบทซ์	111±20	(Garcia, Strazzera, Frison และ Bolzonella, 2018)

หมายเหตุ ABS: กากตะกอนสลัดจ์ (Activated biosludge: ABS)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) สภาวะการทำงานของถังหมักกรด

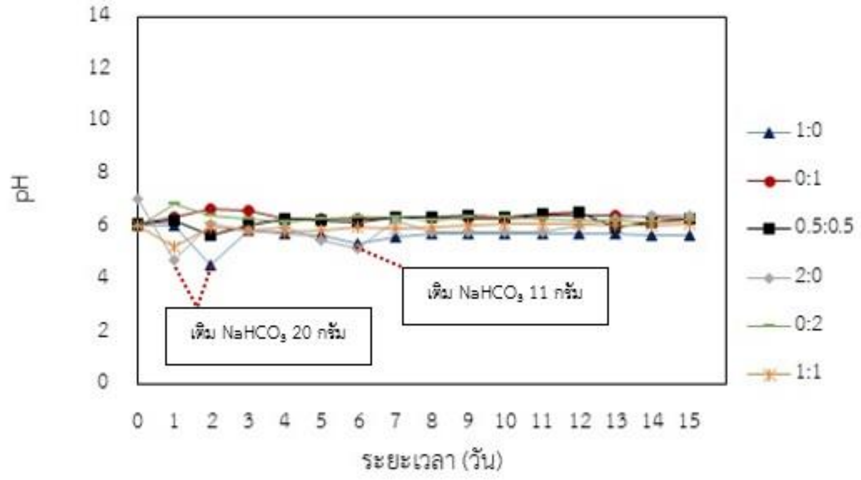
สภาวะทำงานของถังหมักกรดที่อุณหภูมิห้อง พบว่าอุณหภูมิภายในถังอยู่ระหว่าง 30-35 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในระหว่าง 5 วันแรกของการหมัก และอุณหภูมิสูงสุดในวันที่ 3 ของอัตราส่วนการหมักร่วม 2:0 ที่มีการเติม SS เพียงอย่างเดียว เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะลดลงและคงที่ (รูปที่ 4.18) ซึ่งมาจากการย่อยสลายได้ค่อนข้างง่ายและรวดเร็วของ SS ในช่วงแรก



รูปที่ 4.18 อุณหภูมิภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:SPS

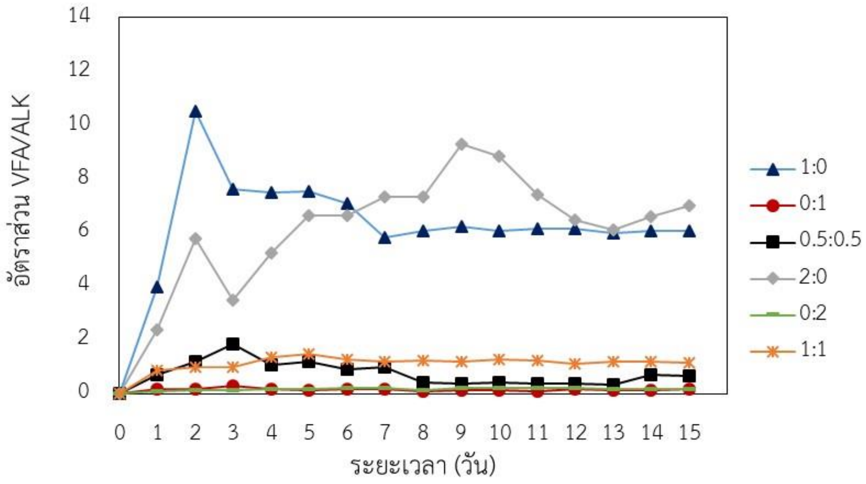
รูปที่ 4.19 แสดงค่า pH ภายในถังหมักกรด CSTR พบว่ามีการลดลงอย่างรวดเร็วของอัตราส่วนการหมักร่วมที่มีการเติมแป้งเท่ากับ 2:0 และ 1:1 ในวันที่ 1 ของการหมัก โดยมีค่า pH เท่ากับ 4.78 และ 5.24 ตามลำดับ มาจากแป้งย่อยค่อนข้างง่าย ทำให้มีการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยอย่างรวดเร็ว จึงมีการปรับ pH ภายในถังให้มีค่าประมาณ 5.5-6.5 เพื่อไม่ให้ระบบผลิตกรดล้มเหลวในชุดทดลองดังกล่าว และยังพบว่าชุดทดลองมีเติม SS เพียงอย่างเดียวของการหมักอัตราส่วนการหมักร่วม 2:0 ที่มีการลดลงของ pH อีกครั้งในวันที่ 6 ของการหมักเหลือเท่ากับ 5.18 ในขณะที่ชุดทดลองอื่นๆ มี pH ค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่าง 5.5-6.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมที่เติม SPS ช่วยปรับ pH ของถังหมักกรดไม่ให้ลดลงต่ำอีกรอบ เนื่องจาก SPS ที่ใช้นำมาจากการเลี้ยงกุ้งทะเล โดยน้ำทะเลที่นำมาเลี้ยงกุ้งมีค่า pH ระหว่าง 7.5-8.5 จะมีระบบบัฟเฟอร์ของไบคาร์บอเนตและบอร์เรต ทำให้ SPS มีระบบบัฟเฟอร์ดังกล่าวด้วย ซึ่งช่วยควบคุม pH ของระบบหมักร่วมไม่เปลี่ยนแปลงง่าย (Chester และ Jickells, 2009) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วน VFA/ALK ของระบบ (รูปที่ 4.19) ที่เห็นได้อย่างชัดเจนว่าของชุดหมักที่มีการเติม SS เพียงอย่างเดียวดังกล่าวมีอัตราส่วน VFA/ALK ค่อนข้างสูงตลอดการทดลอง แต่ในชุดทดลองที่มีการเติมวัสดุหมักร่วม SPS อัตราส่วน VFA/ALK ต่ำกว่า 2 และคงที่ตลอดการทดลอง ในขณะที่ชุดทดลองที่ไม่มีการเติมแป้ง พบว่าค่า pH ค่อนข้างคงที่ และที่น่าสังเกตคือทดลองของอัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS (0:2) กลับมีค่า pH เพิ่มขึ้นในวันที่ 2 ของการหมักเท่ากับ 6.87 ซึ่งความเป็นด่างมาจากตะกอนเลนที่เติม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมที่มีการเติม SPS ค่อนข้างมีเสถียรภาพดีกว่าการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนของ SS เพียงอย่างเดียว

เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองอื่นๆ พบว่าอัตราส่วนการหมักร่วมที่มีการเติม SPS เท่ากับ 1:1 และ 0.5:0.5 มีอัตราส่วน VFA/ALK ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Schievano และคณะ (2012) โดยใช้ถัง CSTR เป็นถังหมักกรดหมักร่วมของมูลสุกรและขยะจากตลาดสดที่สภาวะเทอร์โมฟิลิกมีอัตราส่วน VFA/ALK เท่ากับ 0.95±0.06. ขณะที่ Gnanapragasam, Arutchelvan และ Soundari (2016) พบว่าถังหมักกรด UASB ของการหมักร่วมน้ำเสียจากโรงงานย่อมผ้าและน้ำเสียจากโรงผลิตแป้งสาคู ที่สภาวะมีโซฟิลิคมีอัตราส่วน VFA/ALK อยู่ระหว่าง 1.48-1.51 และ Trisakti และคณะ (2017) พบว่าถังหมักกรด CSTR ของระบบหมักสองขั้นตอนของน้ำทิ้งจากการผลิตปาล์มน้ำมัน ที่สภาวะเทอร์โมฟิลิคมีอัตราส่วน VFA/ALK อยู่ระหว่าง 1.59-2.49



รูปที่ 4.19 ค่า pH ภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:SPS

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 อัตราส่วน VFA/ALK ภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:SPS

3) องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหย

องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหยจากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตรกราฟี (ตารางที่ 4.14) พบว่าทั้งสองอัตราส่วนการหมักร่วม 2:0 และ 1:1 มีกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบหลัก มีเท่ากับร้อยละ 92.07 และ 79.39 ตามลำดับ และส่วนที่เหลืออีกเล็กน้อยเป็น กรดไอโซบิวทิริก และกรดไอโซวาเลริก ซึ่งกรดอะซิติกเป็นตัวกลางที่จะสามารถกลายเป็นก๊าซมีเทนได้ง่าย (D. J. Lee และคณะ, 2015) ขณะที่กรดอินทรีย์ระเหยชนิดอื่นต้องผ่านการย่อยเป็นกรดอะซิติกก่อน จากร้อยละที่พบค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นว่าระบบย่อยสารอินทรีย์ได้ค่อนข้างดี และกรดอินทรีย์ระเหยที่ผลิตได้สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่พบว่าปริมาณกรดอะซิติกที่สูงเกินไปอาจรบกวนต่อกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) และทำให้ระบบมีค่า pH ลดต่ำลงมีสภาพเป็นกรด (Zhang และคณะ, 2018) โดยการศึกษาของ Holm-Nielsen และคณะ (2008) พบว่าความเข้มข้นกรดอะซิติกเท่ากับ 3,000-5,000 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่าความเข้มข้นของกรดอะซิติกสำหรับ อัตราส่วนการหมักร่วม 2:0 และ 1:1 เท่ากับ 3,818 และ 3,028 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนของเมทาโนเจน

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหยของการหมักร่วม SS:SPS

ประเภทของ กรดอินทรีย์ระเหย	**ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)**		**ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)**	
	SS:SPS =2:0	SS:SPS=1:1	SS:SPS=2:0	SS:SPS=1:1
Acetic acid	3,818	3,028	92.07	79.39
Propionic acid	-	-	-	-
Isobutylic acid	180	347	4.34	9.10
Isovaleric acid	149	439	3.59	11.51
n-Valeric acid	-	-	-	-

4) ลักษณะสมบัติของน้ำหมักกรด

ลักษณะสมบัติน้ำหมักกรดที่ผลิตได้แสดงดังตารางที่ 4.15 พบว่าน้ำหมักกรดจากการหมักร่วมทั้งสองอัตราส่วน 2:0 และ 1:1 ในวันที่ 5 ของการหมักมีค่า pH เป็นกรดที่เท่ากับ 5.51 และ 5.87 ตามลำดับ ถึงแม้น้ำหมักกรดจากการหมักแป้งเพียงอย่างเดียวของอัตราส่วน 2:0 มีค่าซีโอดี

ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่าในน้ำหมักกรดที่ได้จากอัตราส่วน 1:1 แต่มีความเป็นด่างต่ำกว่าค่อนข้างมากโดยมีความเข้มข้นเพียง 638 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต อีกทั้งยังพบว่ามีอัตราส่วน C/N ที่สูงเท่ากับ 90 ในขณะที่อัตราส่วนการหมักร่วม 1:1 มีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 63 ซึ่งในการทดลองนี้ไม่ได้มีการเติมธาตุอาหารเพื่อปรับค่าอัตราส่วน C/N เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายเรื่องของสารเคมีที่เติม โดยพบว่าอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพควรอยู่ในช่วง 20-30 (Dioha และคณะ, 2013) และจากการแนะนำของ Khanal (2008) อัตราส่วน C/N ขั้นต่ำที่เท่ากับ 50 เพียงพอสำหรับการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ค่อนข้างสูง ดังนั้นอัตราส่วนการหมักร่วมเท่ากับ 1:1 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมและค่าแนะนำดังกล่าวมากกว่าการหมัก SS เพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.15 ลักษณะของน้ำหมักกรดที่ได้จากการหมักร่วม SS:SPS

พารามิเตอร์	**อัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS**	
	2:0	**1:1**
pH	5.51	5.87
อัตราส่วน C/N	90	63
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	28,200	16,000
VFA (มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซีติก)	4,238	3,825
ALK (มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต)	638	2,550
ร้อยละของกรดอะซิติก	92.07	79.39
ปริมาณของกรดอะซิติก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3,818	3,028

5) ลักษณะของกากตะกอนที่เหลือจากการหมักร่วม SS:SPS

กากตะกอนที่เหลือจากถังหมักกรด CSTR จากการหมักร่วมที่อัตราส่วน 1:1 (รูปที่ 4.21) ถูกนำมาศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยอินทรีย์หรือวัสดุปรับปรุงดิน โดยตะกอนถูกอบที่อุณหภูมิระหว่าง 60-75 องศาเซลเซียส และทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติดังตารางที่ 4.16 ซึ่งกากตะกอนมีลักษณะแห้งเป็นแผ่นสีดำ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร 2557 พบว่ามีค่า pH อยู่ในช่วงที่สามารถเป็นปุ๋ยอินทรีย์ได้ แต่ปริมาณธาตุอาหารทุกตัวต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด ซึ่งการนำไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ต้องมีการเติมธาตุอาหารหรือผสมกับวัสดุอื่นก่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.16 ลักษณะของกากตะกอนที่เหลือจากถัง CSTR

พารามิเตอร์	**SS:SPS=1:1**	**มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์**
pH	5.94	5.5-8.5
ความชื้น	89.66±0.59	ไม่เกินร้อยละ 30
ไนโตรเจน (% โดยน้ำหนักแห้ง)	0.59	1.0
ฟอสฟอรัส (% โดยน้ำหนักแห้ง)	0.08	0.5
โพแทสเซียม (% โดยน้ำหนักแห้ง)	0.16	0.5

หมายเหตุ มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร 2557

ก่อนอบ หลังอบ

รูปที่ 4.21 กากตะกอนที่เหลือจากถังหมักกรด CSTR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

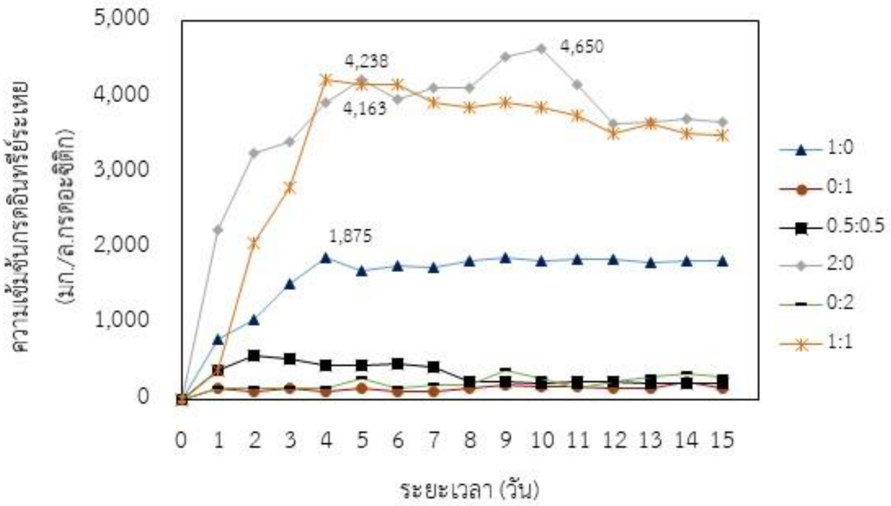
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.2 การหมักร่วม SS:ABS

1) ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยที่ผลิตได้

รูปที่ 4.22 แสดงความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยในแต่ละอัตราส่วนการหมักร่วมตลอดระยะเวลาการหมัก 15 วัน พบว่าอัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:ABS ที่อัตราส่วน 1:1 มีความเข้มข้นของกรดอินทรีร์ระเหยสูงเท่ากับ 4,163 มิลลิกรัมอะซิติกต่อลิตร หลังจากการทดลองในวันที่ 5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการหมักที่ใช้ SS:ABS ที่อัตราส่วน 2:0 ในขณะที่อัตราส่วนที่เติม ABS เพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน 0:2 และ 0:1 มีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยค่อนข้างต่ำมาก เนื่องจาก ABS มีอัตราส่วน C/N ที่ต่ำมากส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยได้ต่ำเช่นกัน อีกทั้งพบว่าการหมักร่วม SS:ABS ที่อัตราส่วน 1:1 สามารถผลิตกรดอินทรีย์ระเหยได้สูงกว่าการหมักร่วม SS:ABS

ที่อัตราส่วน 0.5:0.5 อาจเพราะคาร์บอนมาจาก SS ของอัตราส่วน 0.5:0.5 มีปริมาณน้อยกว่าไม่เพียงพอต่อการเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการหมัก SS เพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน 1:0 พบว่ามีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่าที่อัตราส่วนการหมักร่วม SS:ABS เท่ากับ 0.5:0.5 เป็นอย่างมากเช่นกัน



รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายของการหมักร่วม SS:ABS

ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยต่อน้ำหนักของแข็งระเหยเริ่มต้น ดังตารางที่ 4.17 พบว่า วันที่ 5 ของการหมักที่ความเข้มข้นของ TVS เริ่มต้นร้อยละ 2 ของการหมักแป้งเพียงอย่างเดียวของอัตราส่วน 2:0 มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 388 กรัมอะซิติก/กิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น (415 กรัมซีโอดี/กิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น) รองลงมาเป็นที่อัตราส่วนการหมักร่วม 1:1 เท่ากับ 353 กรัมอะซิติก/กิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น (378 กรัมซีโอดี/กิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการหมักร่วมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ตารางที่ 4.13) พบว่ามีประสิทธิภาพค่อนข้างใกล้เคียงกับการหมักของ ABS (Bolzonella และคณะ, 2007) และการหมักร่วมของ ABS กับของเสียจากมันฝรั่งและเศษอาหาร (Ma และคณะ, 2017) แต่ต่ำกว่า การหมักของ ABS ถูกปรับสภาพด้วยรังสีอุลตร้าโซนิค (Zhou และคณะ, 2016) เนื่องจากการปรับสภาพวัสดุหมักช่วยให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

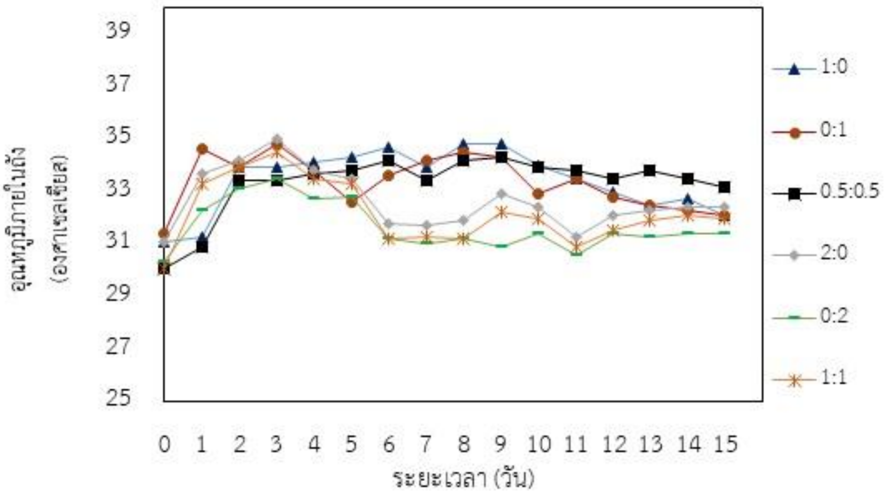
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.17 ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยต่อน้ำหนักวัสดุหมัก

อัตราส่วนการหมักร่วม SS:ABS	ประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหย เทียบต่อน้ำหนักวัสดุหมักเริ่มต้น	
	กรัมอะซิติก/กิโลกรัม TVS เริ่มต้น	กรัมซีโอดี/กิโลกรัม TVS เริ่มต้น
SS:ABS=1:0	312	334
SS:ABS=0.5:0.5	95	102
SS:ABS=0:1	38	41
SS:ABS=2:0	**388**	**415**
SS:ABS=1:1	**353**	**378**
SS:ABS=0:2	31	33

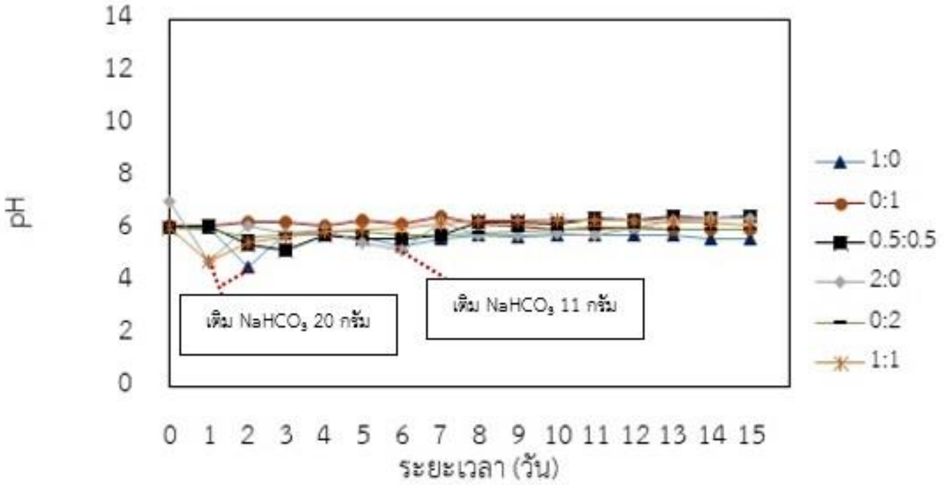
2) สภาวะการทำงานของถังหมักกรด

อุณหภูมิภายในถังหมักกรดอยู่ระหว่าง 30-35 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในระหว่าง 5 วันแรกของการหมัก และอุณหภูมิสูงสุดในวันที่ 3 ของอัตราส่วนการหมักร่วม 2:0 ที่มีการเติมตะกอนแป้งเพียงอย่างเดียว เท่ากับ 34.50 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะลดลงและคงที่ (รูปที่ 4.23)

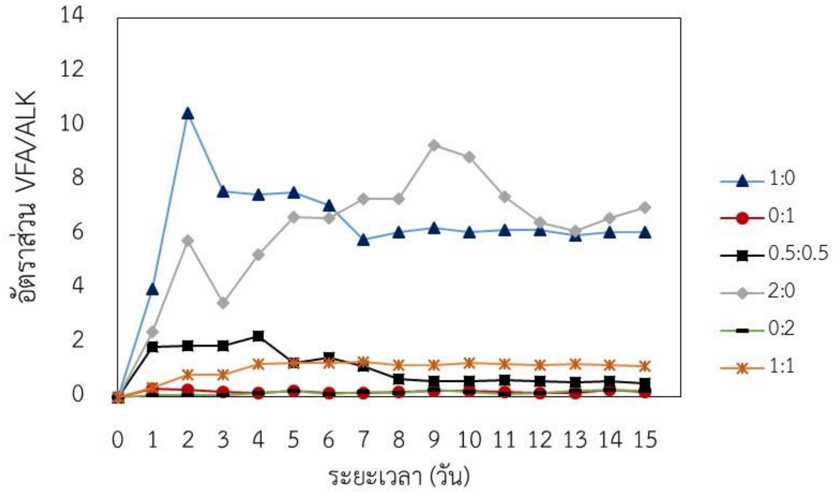


รูปที่ 4.23 อุณหภูมิภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:ABS

รูปที่ 4.24 แสดงค่า pH ภายในถังหมักกรด พบว่ามีการลดลงอย่างรวดเร็วของอัตราส่วนการหมักร่วมที่มีการเติมแป้งเท่ากับ 2:0 1:0 และ 1:1 ในช่วงแรกวันที่ 1-2 ของการหมัก โดยมีค่า pH เท่ากับ 4.78 4.56 และ 4.76 ตามลำดับ เนื่องจากแป้งที่ย่อยค่อนข้างง่าย ทำให้มีการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยอย่างรวดเร็ว และพบว่าเฉพาะอัตราส่วนที่เติม SS อย่างเดียว (1:0 และ 2:0) เท่านั้นที่ค่า pH ของระบบลดลงต่ำกว่า 5.5 อีกครั้งในวันที่ 6 รวมถึงอัตราส่วน VFA/ALK ค่อนข้างสูงและไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของการหมัก ตามรูปที่ 4.25 ในขณะที่อัตราส่วนการหมักร่วม 1:1 มีอัตราส่วน VFA/ALK ที่ต่ำกว่า 2 อาจเนื่องมาจากการย่อย ABS ซึ่งองค์ประกอบหลักเป็นโปรตีนทำให้เกิดเป็นแอมโมเนียมไอออนในระบบหมักย่อยที่มีความเป็นด่างช่วยรักษาระดับ pH ของระบบให้คงที่ไม่ลดลง และอัตราส่วน VFA/ALK ไม่สูงเกินไป ดังเช่นการศึกษาของ Lee et al. (2019) พบว่าการเติม ABS หมักร่วมกับเศษอาหารและเศษหญ้าช่วยเพิ่มบัฟเฟอร์ให้กับระบบหมักจากการเพิ่มแอมโนเนียมที่เกิดจากการย่อยของ ABS ทำให้ระดับ pH ของระบบเหมาะสมมีค่าเป็นกลาง (6.86 ± 0.12) ในขณะที่การหมักร่วมเติมเฉพาะเศษอาหารและเศษหญ้า pH มีค่าเป็นกรด (6.40 ± 0.04) ดังนั้นการใช้อัตราส่วนการหมักร่วม 1:1 ในการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยจึงมีความเหมาะสม เนื่องจากง่ายต่อการควบคุมค่า pH ของระบบให้เหมาะสมต่อการผลิตกรดอินทรีย์ระเหย (ค่า pH เหมาะสมอยู่ระหว่าง 5.5-6.5 โดยมีการเติมสามเคมีเพื่อปรับ pH เฉพาะในช่วงแรกเท่านั้น



รูปที่ 4.24 ค่า pH ภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:ABS



รูปที่ 4.25 อัตราส่วน VFA/ALK ภายในถัง CSTR ของการหมักร่วม SS:ABS

3) องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหย

ตารางที่ 4.18 แสดงองค์ประกอบกรดอินทรีย์ระเหย พบว่าทั้งสองอัตราส่วนการหมักร่วม 2:0 และ 1:1 มีองค์ประกอบหลักเป็นกรดอะซิติก ที่เท่ากับร้อยละ 92.07 และ 93.96 ตามลำดับ และส่วนที่เหลืออีกเล็กน้อยเป็น กรดไอโซบิวทิริก และกรดไอโซวาเลริก ซึ่งกรดอะซิติกเป็นตัวกลางที่สามารถกลายเป็นก๊าซมีเทนได้ง่าย (D. J. Lee และคณะ, 2015) จากร้อยละที่พบค่อนข้างสูงก็แสดงให้เห็นว่าระบบหมักย่อยสารอินทรีย์ได้ค่อนข้างดี และกรดอินทรีย์ระเหยก็สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Holm-Nielsen และคณะ (2008) พบว่าปริมาณกรดอะซิติกที่ความเข้มข้นเท่ากับ 3,000-5,000 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อลิตร มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่าระดับของกรดอะซิติกสำหรับ อัตราส่วนการหมักร่วม 2:0 และ 1:1 มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกเท่ากับ 3,818 และ 3,425 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซมีเทน

ตารางที่ 4.18 องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหยในแต่ละอัตราส่วนการหมัก

ประเภทของกรดอินทรีย์ระเหย	**ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)**		**ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)**	
	SS:ABS=2:0	SS:ABS=1:1	SS:ABS=2:0	SS:ABS=1:1
Acetic acid	3,818	3,425	92.07	93.96
Propionic acid	-	-	-	-
Isobutylic acid	180	80	4.34	2.19
Isovaleric acid	149	140	3.59	3.84
n-Valeric acid	-	-	-	-

4) ลักษณะสมบัติของน้ำหมักกรด

ลักษณะสมบัติน้ำหมักกรดที่ผลิตได้แสดงตามตารางที่ 4.19 โดยพบว่าน้ำหมักกรดจากการหมักร่วมที่อัตราส่วน SS:ABS เท่ากับ 1:1 จากวันที่ 5 ของการหมักมีค่า pH เป็นกรด เท่ากับ 5.97 ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 4,238 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบสูงถึง 3,425 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราส่วน C/N เท่ากับ 52 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าแนะนำของ Khanal (2008) อัตราส่วน C/N ขั้นต่ำที่เท่ากับ 50 ซึ่งน่าจะเพียงพอสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis) ในขณะที่การหมัก SS เพียงอย่างเดียวซึ่งมีอัตราส่วน C/N สูงเกินไป อีกทั้งมีค่า pH และความเป็นด่างที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4.19 ลักษณะของน้ำหมักกรดที่ได้จากการหมักร่วม SS:ABS

พารามิเตอร์	**อัตราส่วนการหมักร่วม SS:ABS**	
	2:0	**1:1**
pH	5.51	5.97
อัตราส่วน C/N	90	52
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	28,200	19,200
VFA (มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซีติก)	4,238	4,163
ALK (มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต)	638	3,338
ร้อยละของกรดอะซิติก (โดยน้ำหนัก)	92.07	93.96
ปริมาณของกรดอะซิติก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3,818	3,425

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5) ลักษณะกากตะกอนที่เหลือจากการหมัก

เช่นเดียวกันกากตะกอนที่เหลือจากการหมักย่อยจากก้นถังหมักกรด CSTR จากการหมักร่วมของอัตราส่วน 1:1 (รูปที่ 4.26) ถูกวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยอินทรีย์ หรือวัสดุปรับปรุงดิน แสดงตามตารางที่ 4.20 พบค่า pH อยู่ในช่วงที่สามารถเป็นปุ๋ยอินทรีย์ได้ กากตะกอนที่ผ่านการอบมีลักษณะแห้งเป็นแผ่นสีน้ำตาลมีปริมาณไนโตรเจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร 2557 ส่วนพารามิเตอร์อื่นพบว่ามีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานค่อนข้างมาก ดังนั้นกากตะกอนที่เหลือมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพิ่มธาตุอาหารไนโตรเจนให้กับดิน

ตารางที่ 4.20 ลักษณะกากตะกอนที่เหลือจากถัง CSTR

พารามิเตอร์	SS:ABS=1:1	มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์
pH	6.03	5.5-8.5
ความชื้น	84.49±0.41	ไม่เกินร้อยละ 30
ไนโตรเจน (% โดยน้ำหนักแห้ง)	1.14	1.0
ฟอสฟอรัส (% โดยน้ำหนักแห้ง)	0.03	0.5
โพแทสเซียม (% โดยน้ำหนักแห้ง)	0.19	0.5

หมายเหตุ มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร 2557

ก่อนอบ หลังอบ

รูปที่ 4.26 กากตะกอนที่เหลือจากถังหมักกรดจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

4.3.1 การเปรียบเทียบน้ำหมักกรดจากการหมักร่วม SS:SPS, SS:ABS และการหมัก SS เพียงอย่างเดียว

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหมักที่ได้จากการหมักร่วมของ SS:SPS และ SS:ABS ที่อัตราส่วน 1:1 กับน้ำหมักกรดที่ได้จากการหมัก SS เพียงอย่างเดียว พบว่าการหมัก SS เพียงมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่าจากการหมักร่วม แต่มีค่า pH และสภาพด่างค่อนข้างต่ำเท่ากับ 5.51 และ 638 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ รวมถึงมีอัตราส่วน C/N สูงกว่ามีค่าเท่ากับ 90 ซึ่งสูงค่าแนะนำเป็นอย่างมาก (Khanal (2008) แนะนำอัตราส่วน C/N เท่ากับ 50 เพียงพอสำหรับการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงในการเดินระบบ หรือ Chukwuemeka (2018) แนะนำเท่ากับ 40 (600:15) เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis)) ดังนั้นน้ำหมักกรดที่ได้จากการหมัก SS เพียงอย่างเดียวจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากมีค่า pH และสภาพด่างที่ต่ำ รวมถึงมีอัตราส่วน C/N ที่สูง อีกทั้งพบว่าน้ำหมักที่ได้จากการหมักร่วม SS:SPS และ SS:ABS มีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยและ

กรดอะซิติกสูงใกล้เคียงจากการหมัก SS เพียงอย่างเดียว ดังนั้นน้ำหมักกรดจากการหมักร่วมของ SS:SPS และ SS:ABS ที่อัตราส่วน 1:1 จึงมีความเหมาะสมสำหรักการนำไปใช้ต่อในการเดินระบบหมักก๊าซชีวภาพต่อไป เนื่องจากน้ำหมักกรดมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยที่สูงใกล้เคียงกับการหมัก SS เพียงอย่างเดียว แต่มีสภาพด่างที่สูงกว่าค่อนข้างมาก ที่เท่ากับ 2,550 และ 3,338 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์ช่วยให้เสถียรภาพของถังผลิตก๊าซชีวภาพ ABR ดีขึ้น (จากค่าแนะนำสภาพด่างที่เหมาะสมสำหรับการหมักย่อยแบบไม่ใช้อากาศเท่ากับ 1,500-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต (Schnaars, 2012)) อีกทั้งยังพบว่ามีอัตราส่วน C/N ต่ำกว่า ที่เท่ากับ 52 และ 63 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแนะนำอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน เท่ากับ 40 -50 ((Chukwuemeka, 2018); Khanal (2008))

ตารางที่ 4.21 น้ำหมักกรดจากการจากการหมักร่วม SS:SPS, SS:ABS และการหมัก SS เพียงอย่างเดียว

พารามิเตอร์	**SS**	**SS:SPS=1:1**	**SS:ABS=1:1**
pH	5.51	5.87	5.97
อัตราส่วน C/N	90	63	52
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	28,200	16,000	19,200
VFA (มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซีติก)	4,238	3,825	4,163
ALK (มิลลิกรัมต่อลิตรแคลเซียมคาร์บอเนต)	638	2,550	3,338
ร้อยละของกรดอะซิติก (โดยน้ำหนัก)	92.07	79.39	93.96
ปริมาณของกรดอะซิติก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3,818	3,028	3,425

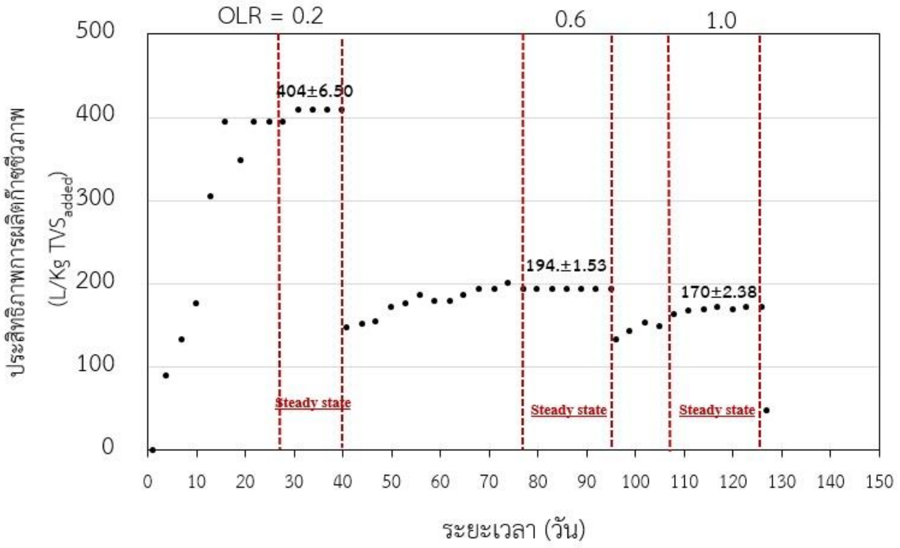
4.4 ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น

4.4.1 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

1) ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักกรดของการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS โดยเปรียบเทียบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เท่ากับ 0.2, 0.6, 1.0

และ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยทำการเดินระบบในแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จนเข้าสู่สภาวะที่ระบบมีเสถียรภาพ (Steady state) คือ น้ำที่ระบายออกจากถังหมักก๊าซ ABR มีปริมาณของแข็งระเหยแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 10 นั้น พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 404±6.50 L/Kg TVS_{added} ส่วนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.6 และ 1.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพเท่ากับ 194±1.53 และ 170±2.38 L/Kg TVS_{added} ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 0.6 และ 1.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเป็นอย่างมาก และเมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ให้สูงขึ้นเท่ากับ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าไม่มีการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นภายในถังหมักก๊าซ ABR ตามรูปที่ 4.27 อาจเนื่องมาจากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณสารประกอบฮิวมิคในระบบหมักย่อยมากขึ้นเช่นกัน โดยกรดฮิวมิคเป็นองค์ประกอบหลักของ SPS (Hargreaves, 1995) ซึ่งมีการศึกษาพบว่า กรดฮิวมิคในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ความเข้มข้นมากกว่า 10 กรัมต่อลิตรมีผลยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทน (Methnogenesis) และที่ความเข้มข้นของกรดฮิวมิคมากกว่า 20 กรัมต่อลิตรส่งผลให้เกิดการยับยั้งผลิตก๊าซมีเทนอย่างสมบรูณ์ (Yap และคณะ, 2018) รวมถึงกรดฮิวมิคที่เติมเข้าระบบ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร.วัน (Azman และคณะ, 2017) ส่งผลให้จำนวนเมทาโนเจนในกลุ่มไฮโดรจีโนโทรฟิค (Hydrogenotrophic methanogen) ลดลง และอีกทั้งยังพบว่าฮิวมิคมักสามารถย่อยสลายกลายเป็นสารประกอบฟีนอล และสารประกอบคาร์บอกซิล ซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษาพบว่าสารประกอบเหล่านั้นบ้างตัวก็ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเมทาโนเจน อาทิเช่น pyrogallol, hydroquinone, resorcinol, phenol และ benzene ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 3172, 2745, 1725, 1249 และ209 มิลลิกรัมต่อลิตรมีผลยับยั้งการผลิตมีเทนของเมทาโนเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มอะซิโตคลาสติก (Acetoclastic methanogen) (K. Kayembe, L. Basosila, P. T. Mpiana, P. C. Sikulisimwa และ K. Mbuyu, 2013) ดังนั้นการนำ SPS ไปใช้เป็นวัสดุหมักร่วมจึงควรมีการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเป็นพิษต่อเมทาโนเจน



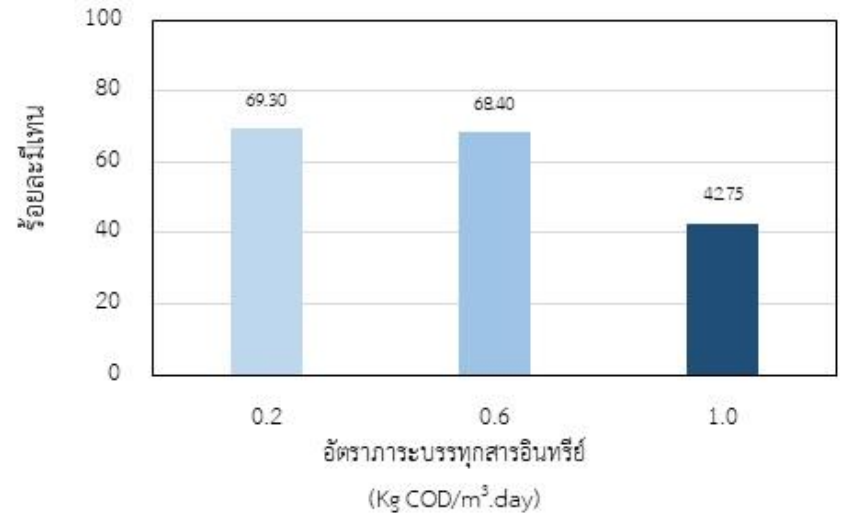
รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละ OLR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

2) ร้อยละมีเทนและประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ร้อยละมีเทนของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 69.30 ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งร้อยละมีเทนลดลงเพียงเล็กน้อยเท่ากับ 68.40 แต่เมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน กลับพบว่าร้อยละมีเทนลดลงเป็นอย่างมากเหลือพียง 42.75 ซึ่งค่อนข้างต่ำและต่ำกว่าระดับของมีเทนที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งก๊าซชีวภาพควรมีร้อยละมีเทนมากกว่า 50 (Ahmmad และ Haque, 2014) และเมื่อทำการคำนวณเป็นประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของแข็งระเหยเริ่มต้นดังรูปที่ 4.29 พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 280 L/Kg TVS_{added} รองลงมาเท่ากับ 133 และ 73 L/Kg TVS_{added} ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.6 และ 1.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ขณะที่ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าระบบไม่มีการผลิตก๊าซชีวภาพ

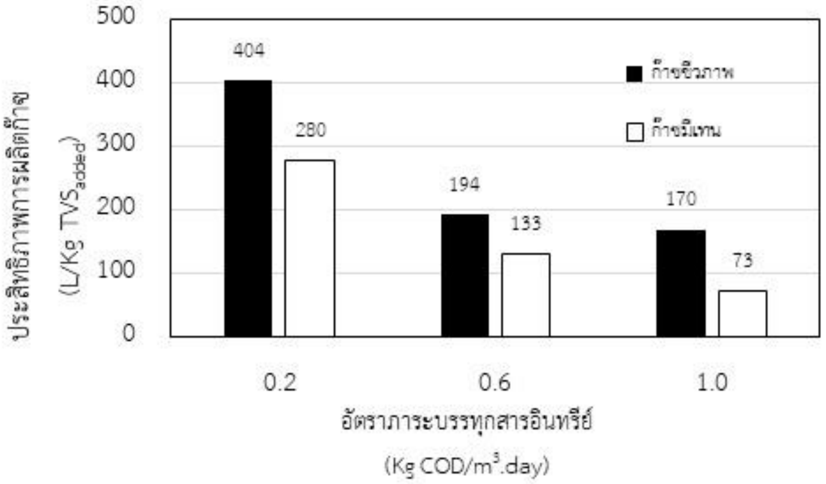
เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพกับการทดลองอื่นๆ พบว่าต่ำกว่าจากการทดลองของ Lanari และ Franci (1998) ทำการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากตะกอนน้ำเสียจากการเลี้ยงปลา trout ซึ่งน้ำเสียจะผ่านการตกตะกอนด้วยคอลัมท์ และส่วนของตะกอนจะถูกส่งเข้าถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น บรรจุตัวกรองโฟมโพลียูรีเทนขนาด 35 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวเฉพาะ 1.375 ตารางเมตรต่อลุกบาศก์เมตร ถังกรองมีปริมาตร 0.424 ลูกบาศก์เมตร ทำการหมักที่อุณหภูมิ 24-25 องศาเซลเซียส โดยถังปฏิกรณ์จะใช้หัวเชื้อในการหมักจากถังหมักไร้ออกซิเจนจากครัวเรือน

พบว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ 400-460 L/Kg TVS_{added} ตามลำดับ ซึ่งร้อยละมีเทนของทุกการทดลองมีค่ามากกว่า 80 ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับการหมักตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งเพียงอย่างเดียว พบว่าสูงกว่าเป็นอย่างมาก โดยจากการศึกษาของ Srisetpol และคณะ (2013) ใช้ถัง CSTR ขนาด 80 ลิตร หมักตะกอนเลนที่มีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 9.93 ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน พบว่ามีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพียง 8.2 L/Kg TVS_{added} และร้อยละมีเทนที่ค่อนข้างต่ำเพียง 44.34



รูปที่ 4.28 ร้อยละมีเทนของแต่ละ OLR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

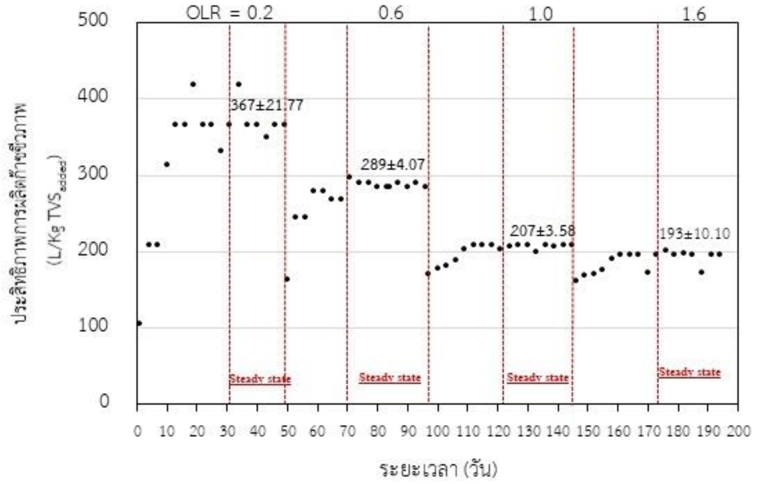


รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนของแต่ละ OLR
จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

4.4.2 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

1) ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

รูปที่ 4.30 แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด เท่ากับ 367±21.77 L/Kg TVS_{added} รองลงมาเป็นที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.6 1.0 และ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพเท่ากับ 289±4.07 207±3.58 และ 193±10.10 L/Kg TVS_{added} ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ในการเดินระบบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงตามลำดับ

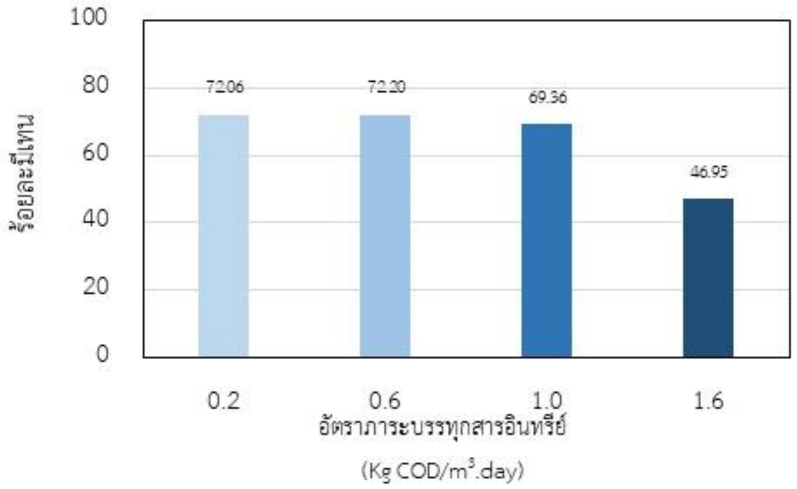


รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละ OLR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

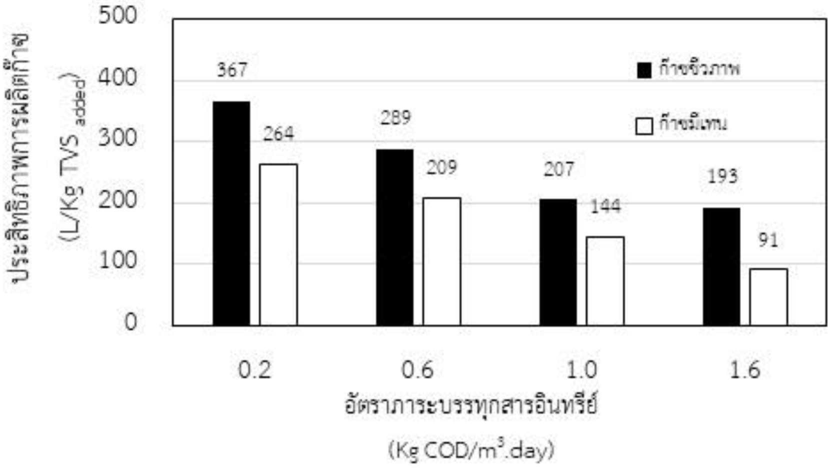
2) ร้อยละมีเทนและประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ร้อยละมีเทนของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (รูปที่ 4.31) พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 72.20 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.2 และ 1.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งร้อยละมีเทนลดลงเพียงเล็กน้อย เท่ากับ 72.06 และ 69.36 ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน กลับพบว่าร้อยละของมีเทนลดลงเป็นอย่างมาก เหลือเพียง 46.95 ซึ่งค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่าระดับของมีเทนที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยเมื่อคำนวณประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของแข็งระเหยเริ่มต้นดังรูปที่ 4.32 พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 264 L CH_4/Kg TVS_{added} รองลงมาเท่ากับ 209 144 และ 91 L CH_4/Kg TVS_{added} ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.6 1.0 และ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อ

เปรียบเทียบกับการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจาก ABS ของระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์จากรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 4.22 พบว่าการหมักร่วมระหว่าง ABS จากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์กับ SS จากการทดลองนี้ มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนดีกว่าการหมัก ABS เพียงอย่างเดียวเป็นอย่างมากซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 183-186 L CH_4/Kg TVS $_{added}$ จากการศึกษาของ Liu และคณะ (2018) และเท่ากับ 190 L CH_4/Kg TVS $_{added}$ จากการศึกษาของ Carrere และคณะ (2010) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการหมักร่วม ABS ของระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์กับเศษผลไม้ และเศษไขมันจากระบบบำบัดเบื้องต้น ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 635 L biogas /Kg TVS_{added} และ 560 L CH_4/Kg TVS_{added} ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนจากการทดลองนี้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนสูงสุดเท่ากับ 367 L biogas/KgTVS $_{added}$ และ 264 L CH_4/Kg TVS $_{added}$ จึงพบว่าประสิทธิภาพจากการทดลองนี้ค่อนข้างต่ำกว่าการหมักร่วมอื่นๆ ซึ่งควรมีการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนต่อไป อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบผลจากการทั้งสองการหมักร่วม SS:SPS และ SS:ABS กับการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากชีวมวลอื่นๆ จากการทบทวนวรรณกรรมของ Cesaro และ Belgiorno (2015) มีประสิทธิภาพระหว่าง 80-418 L CH_4/Kg TVS $_{added}$ โดยพบว่าประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนจากการทดลองนี้มีค่าใกล้เคียงกับการหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนของเศษต้นอ้อย (278 L CH_4/Kg TVS $_{added}$) ต้นทานตะวัน (231-297 L CH_4/Kg TVS $_{added}$) และต้นข้าวสาลี (130-290 L CH_4/Kg TVS $_{added}$)



รูปที่ 4.31 ร้อยละมีเทนที่ของแต่ละ OLR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS



รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และมีเทนของแต่ละ OLR
จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

ตารางที่ 4.22 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนจากตะกอนสลัดจ์ และหมักร่วมกับวัสดุอื่นๆ

วัสดุหมัก	ถังปฏิกิริยา	สถาวะในการหมัก	การเดินระบบ	ผลการทดลอง	อ้างอิง
- ABS หมักร่วมกับ SS (1:1)	- ระบบถังหมักแบบสองขั้นตอน ถัง CSTR เป็นถังหมักกรด และถัง ABR เป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ	- มีโซฟิลิค	- แบบต่อเนื่อง เติมทุกวัน ด้วย OLR 0.2 Kg COD/m^3.d	- 367 L biogas /Kg TVS_{added} (264 L CH_4 /Kg TVS_{added})	**งานวิจัยนี้**
- ABS - ABS หมักร่วมกับเศษไขมันจากระบบบัดเบื้องต้น (33.3:66.6)	- ขวดแก้ว ขนาด 500 มิลลิลิตร	- มีโซฟิลิค	- แบบแบทช์	- 190 L CH_4 /Kg TVS_{added} สำหรับ ABS อย่างเดียว - 560L CH_4/Kg TVS_{added} สำหรับการหมักร่วม	(Carrere และคณะ, 2010)
- ABS จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน	- ถัง CSTR ขนาด 5 ลิตร	- เทอร์โมฟิลิค	- แบบแบทช์ - 12.02-35.2 Kg TS/m^3	- 186-231 L biogas /Kg TVS_{added}	(Maamri และ Amrani, 2014)
- ABS จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานน้ำผลไม้หมักร่วมกับเศษผลไม้ (1:1)	- ถังสะแตนเลส ขนาด 0.8 ลบ.ม.	- มีโซฟิลิค	- แบบต่อเนื่อง - 26 l/day	- 635 L biogas /Kg TVS_{added}	(Q. Y. Wang และคณะ, 2018)
- ABS จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน	- ขวดเซรั่ม ขนาด 160 มิลลิลีตร	- มีโซฟิลิค	- แบบแบทช์	- 183-186 L CH_4 /Kg TVS_{added}	(X. Liu และคณะ, 2018)

หมายเหตุ ABS: ตะกอนสลัดจ์ (Activated biosludge), SS: กากตะกอนแป้ง (Starch sludge)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.3 การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับการศึกษาผลิตก๊าซชีวภาพจากถัง ABR และผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพระหว่างสองชุดการหมักร่วม พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ของทั้งสองชุดการหมักร่วมมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยการหมักร่วมระหว่าง SS:SPS (เท่ากับ 404±6.50 L/Kg TVS_{added}) มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าการหมักร่วมระหว่าง SS:ABS (เท่ากับ 367±21.77 L/Kg TVS_{added}) เล็กน้อย

ตารางที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบกับการทดลองอื่นๆ เกี่ยวกับผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากถัง ABR พบว่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมในการทดลองนี้เท่ากับ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Mousavi, Najafpour, Bakhshi และ Pishga (2011) ที่ผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียสังเคราะห์จากการผสมกลูโคสและฟีนอล โดยพบว่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 7 ลิตรต่อวัน ในขณะที่การศึกษาอื่นๆ พบว่าใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสูงกว่าการจากทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุหมักที่ใช้ที่มีอัตราการย่อยสลายได้แตกต่างกัน (Meisam Tabatabaei และ Hossein Ghanavati, 2018)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.23 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถัง ABR

วัสดุหมัก	ถังปฏิกิริยา	สถาวะในการหมัก	การเดินระบบ	อัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ (OLR)	ผลการทดลอง	อ้างอิง
- ตะกอนแป้งหมักร่วมกับตะกอนเลน (SS:SPS) - ตะกอนแป้งหมักร่วมกับตะกอนจากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ (SS:ABS)	Two stage AD - CSTR 5 ลิตร (Acidogenesis phase) - ABR 30 ลิตร (Methanogenesis phase)	มีโซฟีลิค	- CSTR (แบบแบทช์) - ABR (แบบต่อเนื่อง)	OLR ที่เติมเข้าถัง ABR เท่ากับ 0.2, 0.6, 1.0 และ 1.6 kg COD/m^3.day	- ที่ OLR เท่ากับ 0.2 kg COD/m^3.day มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด เท่ากับ 404 (SS:SPS), 367 (SS:ABS) L /Kg TVS_{added} และเมื่อเพิ่ม OLR ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง - น้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากระบบมีคุณภาพลดลง โดยค่า pH ลดลง และค่าซีโอดีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่ม OLR	**งานวิจัยนี้**
น้ำเสียจากโรงงานผลิตเบียร์	One stage AD - ABR 43.2 ลิตร	มีโซฟีลิค	แบบต่อเนื่อง	1.2, 2.4, 4.0 และ 5.6 kg COD/m^3.day	- ที่ OLR เท่ากับ **5.6 kg COD/m^3.day** ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด เท่ากับ 23.5 l/day - พบว่าเมื่อ OLR เพิ่ม ประสิทธิในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น แต่ซีโอดีของน้ำที่ปล่อยออกจากถังมีค่าเพิ่มขึ้น	(Hui-ting และ Yong-fenga, 2010)
ขยะจากโรงครัว	One stage AD - ABR 50 ลิตร	มีโซฟีลิค	แบบต่อเนื่อง	2-6 kg COD/m^3.day	- ที่ OLR เท่ากับ **6 kg COD/m^3.day** ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด เท่ากับ 9.1 l/day - พบว่าเมื่อ OLR เพิ่ม ปรสิทธิในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลง และร้อยละมีเทนลดลงเล็กน้อย	(Malakahmad, Noor Ezlin และ Sahrom, 2011)

ตารางที่ 4.23 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถัง ABR (ต่อ)

วัสดุหมัก	ถังปฏิกิริยา	สถาวะในการหมัก	การเดินระบบ	อัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ (OLR)	ผลการทดลอง	อ้างอิง
น้ำเสียจากการผสมกลูโคสและฟีนอล	One stage AD - ABR 28 ลิตร	มีโซฟิลิค	แบบต่อเนื่องโดยทำการเติมวันละครั้ง	0.22, 0.26, 0.34, 0.41 0.5 และ 0.85 kg COD/m^3.day	- ที่ OLR เท่ากับ **0.5 kg COD/m^3.day** ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด เท่ากับ 7 l/day - พบว่าเมื่อ OLR เพิ่ม เป็น 0.85 **kg COD/m^3.day** เกิด shock load เกิดขึ้น โดยประสิทธิภาพในกการกำจัดฟีนอลลดลองเกือบครึ่งเหลือเพียงร้อยละ 42 ซึ่งปกติสูงถึงร้อยละ 90 โดยประมาณ	(Mousavi และคณะ, 2011)
น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว	One stage AD - ABR 22 ลิตร	มีโซฟิลิค	แบบต่อเนื่องโดยทำการเติมวันละครั้ง	0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.1 และ 3.0 kg COD/m^3.day	- ที่ OLR เท่ากับ **1.5 kg COD/m^3.day** ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด เท่ากับ 12 l/day โดยร้อยละมีเทนอยู่ระหว่าง 64-74 - เมื่อ OLR เพิ่ม เป็น 3 **kg COD/m^3.day** ผลิตได้มากกว่าเล็กน้อยแต่น้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากระบบมีค่า pH เพิ่มขึ้นและค่า VFA/ALK เพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 0.6	(Phukingngam และคณะ, 2011)
น้ำเสียจากโรงงกระดาษ	One stage AD - ABR เติม PP ring	มีโซฟิลิค	แบบต่อเนื่อง	0.14-4.0 kg COD/m^3.day	- ที่ OLR เท่ากับ **1.33 kg COD/m^3.day** มีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 8.47 l CH_4 /day - พบว่าเมื่อ OLR เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเพิ่มคิดต่อปริมาตรถังเพิ่มขึ้นเช่นกัน ยกเว้นหลังจาก OLR เท่ากับ **1.33 kg COD/m^3.day** ที่ประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย และน้ำที่ปล่อยออกจากถัง ABR มีค่า COD และ VSS เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก	(Hassan, Zaman และ Dahlan, 2015)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.24 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

วัสดุหมัก	ถังปฏิกิริยา	สถาวะในการหมัก	การเดินระบบ	อัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ (OLR)	ผลการทดลอง	อ้างอิง
เศษผักและผลไม้	One stage AD - CSTR 70 ลิตร	มีโซฟิลิค	แบบต่อเนื่องโดยทำการเติมทุกวัน	1.4, 2 และ 2.75 kg VS/m^3.day	- ที่ OLR เท่ากับ **1.4 kg VS/m^3.day** ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 33 L CH_4/day - เมื่อ OLR เพิ่มขึ้นต่อไป ผลิตได้ลดลง และร้อยละมีเทนก็ลดลง โดยเท่ากับ 64, 60 และ 49.7 ตามลำดับ - น้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากระบบมีค่า pH และความเป็นด่างลดลงตามลำดับเช่นกัน	(Azadeh และ Jalal, 2011)
เศษจากข้าวโพด	Two stage AD - Leach bed reactor 50 ลิตร (Acidogenesis phase) - Anarobic Filter reactor 20 ลิตร (Methanogenesis phase)	- เทอร์โมฟิลิค (Acidogenes is phase) - มีโซฟิลิค (Methanoge nesis phase)	- แบบแบทซ์ (Acidogenes is phase) - เติมทุก 6 ชั่วโมง (Methanoge nesis phase	OLR ที่เติมเข้าถัง AFR เท่ากับ 5, 7.5, 10,12.5, 15 และ 17.5 kg COD/m^3.day	- ที่ OLR เท่ากับ **15 kg COD/m^3.day** มีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 404 mL biogas/L.day - พบว่าเมื่อ OLR เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเพิ่มคิดต่อปริมาตรถังเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ลดลง	(Chen, Robler, Zielonka, Wonneberger และ Lemmer, 2014)
75% เศษอาหารหมักร่วมกับ 25% ของซังข้าวโพด	One stage AD - CSTR	มีโซฟิลิค	- แบบต่อเนื่อง	1, 2.5,3.5 และ 4.5 gVS/l.day	- ที่ OLR เท่ากับ **4.5 kg VS/m^3.day** มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 720 L CH_4/Kg TVS - พบว่าเมื่อ OLR เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด VS ลดลง แต่ค่า pH ของระบบ และเร้อยละมีเทนเพิ่มขึ้น	(Owamah และ Izinyon, 2015)
เศษอาหาร	One stage AD - ขวดขนาด 500 มิลลิลิตร	เทอร์โมฟิลิค	แบบแบทซ์	2.5,5,7.5 และ 10 gVS/l.day	- เมื่อ OLR เพิ่ม ประสิทธิภาพค่อนข้างคงที่ ประมาณ 500 LCH_4/Kg TVS, 560 mL biogas/day - พบว่าเมื่อ OLR เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด COD และค่า VFA/ethanol เพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละมีเทนลดลง	(C. Liu และคณะ, 2017)

ตารางที่ 4.24 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการศึกษาที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

วัสดุหมัก	ถังปฏิกิริยา	สถาวะในการหมัก	การเดินระบบ	อัตราภาระบรรทุกอินทรีย์ (OLR)	ผลการทดลอง	อ้างอิง
เศษอาหารหมักร่วมกับน้ำเสียจากส้วม	Two stage AD - CSTR 10 ลิตร (Acidogenesis phase) - CSTR 35 ลิตร (Methanogenesis phase)	มีโซฟิลิค	แบบต่อเนื่อง	OLR ที่เติมเข้าถัง Methanogenesis phase เท่ากับ 1.24 และ 1.76 kg VS/m^3.day	- ที่ OLR เท่ากับ **1.24 kg VS/day** มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 728 L CH_4 /Kg VS - พบว่าเมื่อ OLR เพิ่มเท่ากับ 1.76 kg VS/day ประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนลดลง และประสิทธิภาพในการกำจัด COD ลดลงและร้อยละมีเทนลดลง	(Paudel และคณะ, 2017)
มูลสุกร	One stage AD - CSTR 17.5 ลิตร	มีโซฟิลิค	แบบแบทช์	1.13-3.03 kg VS/m^3.day	- ที่ OLR เท่ากับ **1.89 kg VS/m^3.day** มีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 4.38 ml CH_4 /g VS - โดยพบว่าเมื่อ OLR เพิ่ม ส่งผลให้ร้อยละมีเทนลดลง	(Duan และคณะ, 2019)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.4 เสถียรภาพของระบบหมักย่อยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

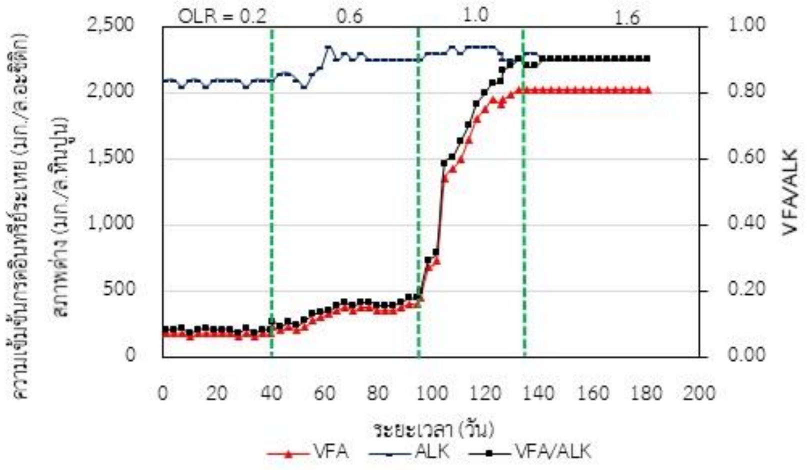
1) ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และสภาพด่าง

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยและสภาพด่างของน้ำทิ้งจากถัง ABR ในแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (รูปที่ 4.33) พบว่าการหมักร่วมระหว่าง SS:SPS น้ำทิ้งมีความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการคำนวณอัตราส่วน VFA/ALK พบว่ามีค่ามากกว่า 0.40 ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งส่งผลต่อค่า pH ลดต่ำลงได้ง่าย และระบบมีแนวโน้มที่จะมีเสถียรภาพต่ำ ในขณะที่การหมักร่วมระหว่าง SS:ABS (รูปที่ 4.34) น้ำทิ้งมีความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้นเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นน้อยกว่าการหมักร่วมระหว่าง SS:SPS ส่งผลให้อัตราส่วน VFA/ALK ไม่เกิน 0.4 (เป็นระดับแนะนำที่เหมาะสมของระบบการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน) ดังตารางที่ 4.25

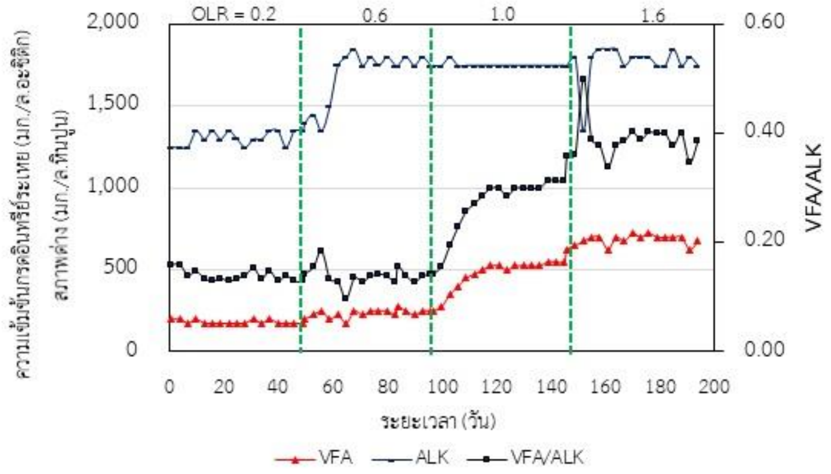
ตารางที่ 4.25 อัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพด่างของน้ำทิ้งจากถัง ABR ที่ OLR ต่างๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Kg COD/m^3.day)	**การหมักร่วม SS:SPS**			**การหมักร่วม SS:ABS**		
	VFA (mg CH_3COOH/l)	ALK (mg $CaCO_3$/l)	VFA/ALK	VFA (mg CH_3COOH/l)	ALK (mg $CaCO_3$/l)	VFA/ALK
0.2	150-175	2,050-2,100	0.07-0.09	175-200	1,250-1,350	0.13-0.15
0.6	350-400	2,250-2,300	0.16-0.18	225-275	1,750-1,800	0.13-0.16
1.0	1,500-1,950	2,300-2,3500	**0.65-0.83**	500-550	1,750	0.29-0.31
1.6	1,950-2,025	2,250-2,300	**0.87-0.90**	625-725	1,750-1,800	**0.35-0.40**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



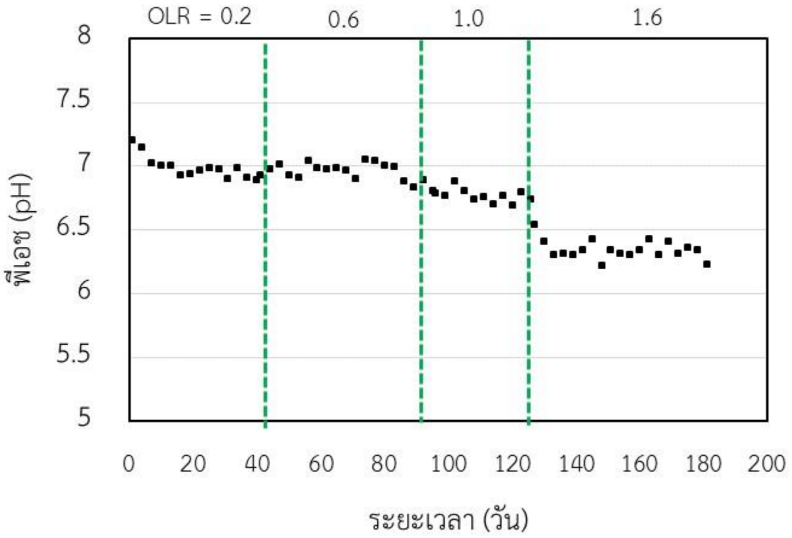
รูปที่ 4.33 ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย สภาพด่าง และอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพด่างของถัง ABR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS ที่ OLR ต่างๆ



รูปที่ 4.34 ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย สภาพด่าง และอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยต่อสภาพด่างของถัง ABR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS ที่ OLR ต่างๆ

2) ค่า pH ของระบบ

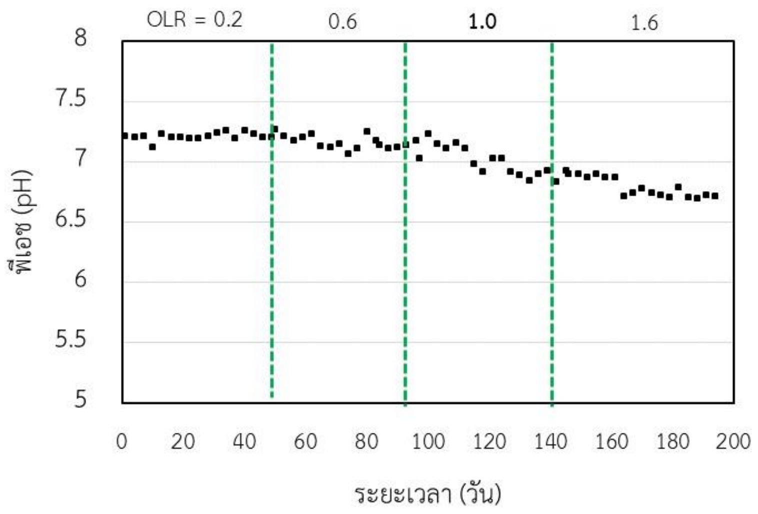
รูปที่ 4.35 แสดงค่า pH ของน้ำทิ้งจากทั้งสองระบบการหมักร่วม พบว่าการหมักร่วมระหว่าง SS:SPS ที่ตั้งแต่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน น้ำทิ้งมีค่า pH ลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสมในช่วงของการผลิตก๊าซชีวภาพควรอยู่ระหว่าง 6.7-7.5 (Esteves, Miltner และ Puchas, 2012) โดยค่า pH ที่ลดต่ำลงมาจากการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยภายในระบบ และจากผลการวิเคราะห์น้ำทิ้งพบว่ามีความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยที่ค่อนข้างสูงเช่นกัน โดยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.0 และ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เท่ากับ 1,500-1,950 และ 1,950-2,025 มิลลิกรัมต่อลิตรของกรดอะซิติกตามลำดับ (ตารางที่ 4.24) แสดงให้เห็นว่าระบบมีกรดอินทรีย์ระเหยตกค้างอยู่ในระบบที่ไม่ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนปริมาณมาก ซึ่งก็สอดคล้องกับประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบลดลงเมื่ออัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ก็พบว่าระบบหมักย่อยหยุดผลิตก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 4.35 ค่า pH ของน้ำทิ้งจากถัง ABR ของการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS ที่ OLR ต่างๆ

ขณะที่ค่า pH ของน้ำทิ้งจากการหมักร่วมระหว่าง SS:ABS พบค่า pH ลดลงอย่างช้าๆ เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.0 และ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยต่ำที่สุดเท่ากับ 6.7 ตามรูปที่ 4.36 ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยของน้ำทิ้งจากถัง ABR มีความเข้มข้นระหว่าง 625-725 มิลลิกรัมของกรดอะซิติกต่อ

ลิตร ซึ่งต่ำกว่าการหมักร่วมระหว่าง SS:SPS เป็นอย่างมาก ทำให้ระบบยังสามารถที่จะผลิตก๊าซชีวภาพได้

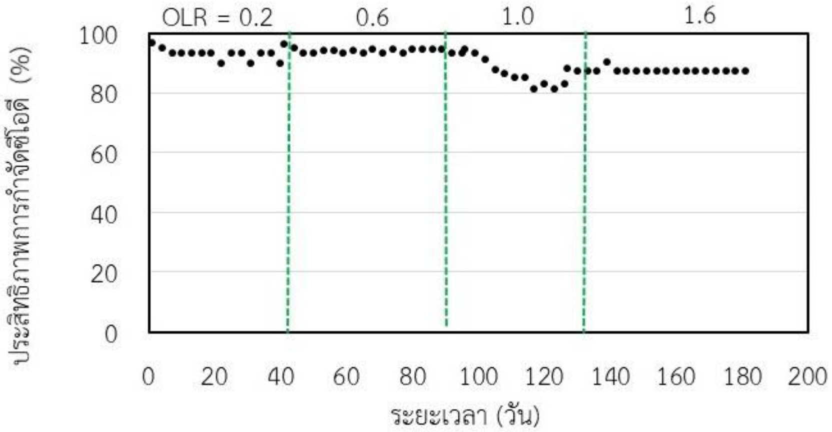


รูปที่ 4.36 ค่า pH ของน้ำทิ้งจากถัง ABR ของการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS ที่ OLR ต่างๆ

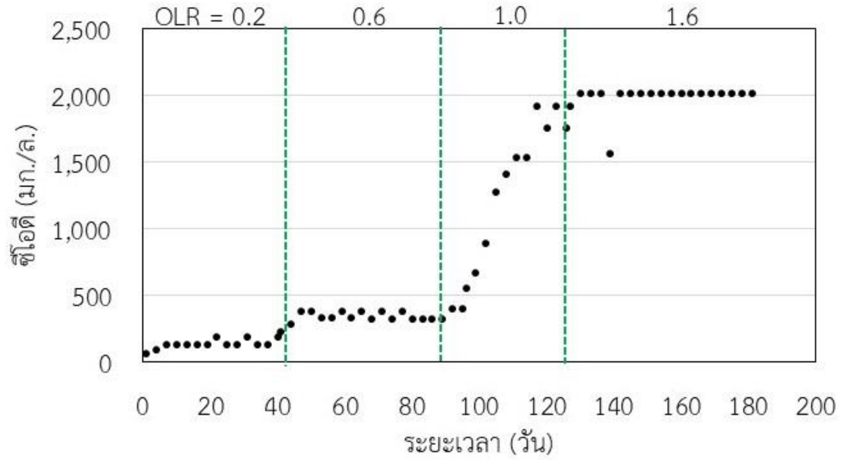
3) ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากถัง ABR

รูปที่ 4.37 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ของการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในการเดินระบบมากกว่า 0.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลง และพบว่ามีค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากถัง ABR เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน (รูปที่ 4.38) และมีซีโอดีเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 2,016 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งเมื่อค่าซีโอดีที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้เกิดจากตะกอนหัวเชื้อที่หลุดออกจากถัง ABR เนื่องจากน้ำทิ้งมีลักษณะค่อนข้างใสไม่มีตะกอนปนออกมา โดยเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) กำหนดค่าซีโอดีไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าทุกอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีค่าเกินมาตรฐาน โดยเฉพาะเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มมากกว่า 1.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในขณะที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำๆ เท่ากับ 0.2 และ 0.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นน้อยกว่า โดยค่าซีโอดีเท่ากับ 149 และ 352 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.37 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถัง ABR ของการหมักร่วม
ระหว่าง SS และ SPS ที่ OLR ต่างๆ



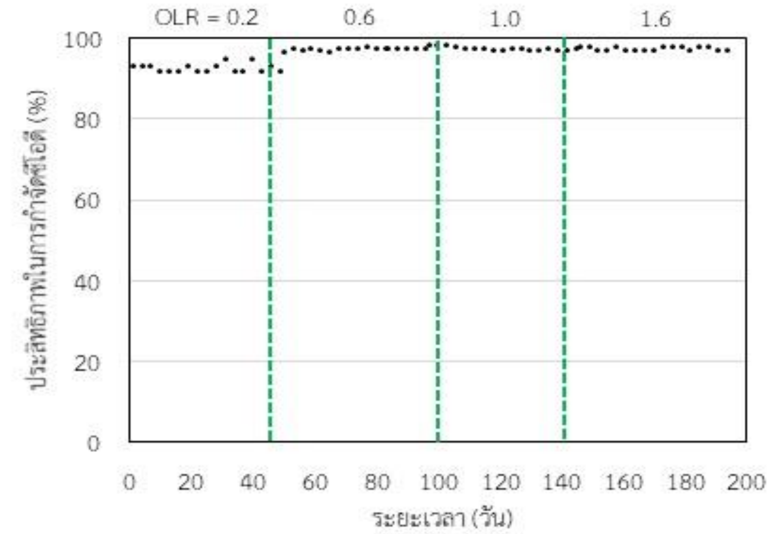
รูปที่ 4.38 ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากถัง ABR ของการหมักร่วม
ระหว่าง SS และ SPS ที่ OLR ต่างๆ

รูปที่ 4.39 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ของการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีค่อนข้างคงที่อยู่ระหว่างร้อยละ 91.67-97.08 เมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ และเมื่อพิจารณาซีโอดีของน้ำทิ้งจากถัง ABR (รูปที่ 4.40) พบว่ามีค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในการเดินระบบเพิ่มขึ้น มีค่าซีโอดีสูงสุดเท่ากับ 480 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.2 และ 0.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีค่าซีโอดีเกินมาตรฐานเพียง

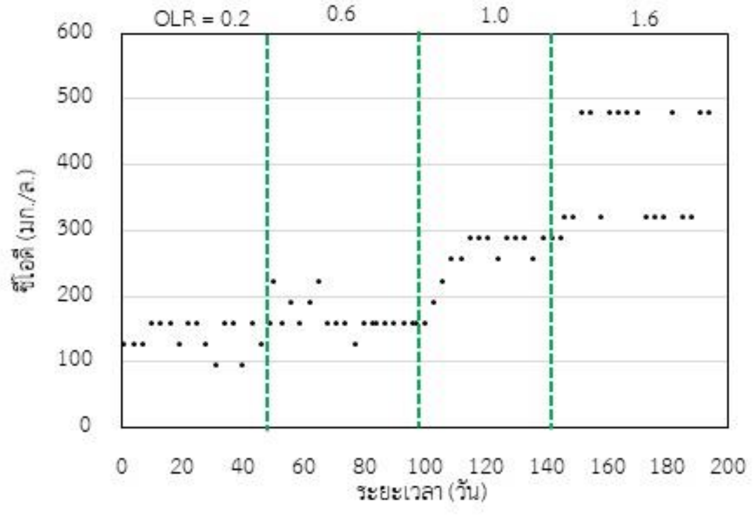
เล็กน้อย โดยค่าซีโอดีเท่ากับ 140 และ 157 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากถัง ABR ของทั้งสองการหมักร่วม พบว่าการหมักร่วมระหว่าง SS:ABS ค่อนข้างมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ดีกว่า รวมถึงคุณภาพน้ำที่ปล่อยออกที่ดีกว่าเช่นกัน โดยมีค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากถัง ABR ต่ำกว่าของการหมักร่วม SS:SPS

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบหมักร่วมแบบไม่ใช้อากาศ โดยพิจารณาจากลักษณะน้ำทิ้งจากถัง ABR พบว่าการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากกว่า 0.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นกับระบบหมักย่อย สังเกตได้จากน้ำทิ้งมีอัตราส่วน VFA/ALK เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่าพีเอชลดต่ำลง และค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่เพิ่มขึ้นสูงมีค่าเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งยังพบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเหลือเพียงแค่ 73 L CH_4/Kg TVS $_{added}$ คิดเป็นแค่เพียงร้อยละ 26 จากประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด และระบบหยุดผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน แต่ในขณะที่การหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS ยังคงสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้แต่ประสิทธิภาพลดลง ซึ่งน้ำทิ้งมีอัตราส่วน VFA/ALK เพิ่มขึ้น ค่าพีเอชลดต่ำน้อยกว่า ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เติมเข้าระบบเพิ่มขึ้น โดยระบบหมักร่วมมีเสถียรภาพดีกว่าการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS ดังนั้นปัญหาที่พบการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนของเมทาโนเจนในการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS น่าจะมาจาก SPS อย่างแน่นอน

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบสารอินทรีย์ใน SPS เป็นกรดฮิวมิค และฟูลวิคเป็นหลัก จะถูกย่อยสลายเป็นสารประกอบฟีนอลและสารประกอบคาร์บอกซิล (Li, Li และ Li, 2017; Robert G. Wetzel, 2001) ซึ่งสารตัวกลางที่เกิดจากการย่อยสามารถยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนได้เมื่อมีความเข้มเข้นสูงมากพอ อาทิเช่น pyrogallol, hydroquinone, resorcinol, phenol และ benzene ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 3,172 2,745 1,725 1,249 และ209 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีผลยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนของเมทาโนเจน (K. Kayembe และคณะ, 2013) โดยเมื่อพิจารณาลักษณะของน้ำหมักกรดที่เติมเข้าสู่ถัง ABR พบว่ามีค่าความเข้มข้นซีโอดีรวมสูงกว่าค่าซีโอดีที่มาจากกรดอินทรีย์ระเหยเป็นอย่างมาก แสดงให้เห็นว่าในน้ำหมักกรดมีสารอินทรีย์ในรูปของสารตัวกลางอื่นๆ อยู่ด้วย ในขณะที่ลักษณะน้ำทิ้งจากถัง ABR มีค่าความเข้มข้นซีโอดีรวม (รูปที่ 4.38) เท่ากับค่าซีโอดีที่มาจากกรดอินทรีย์ระเหย (รูปที่ 4.33) แสดงให้เห็นว่าซีโอดีที่เติมเข้าไปบางส่วนถูกสะสมอยู่ถังหมักกรด โดยไม่มีการผลิตก๊าซมีเทนเกิดขึ้น โดยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สารตัวกลางน่าจะถูกสะสมในถัง ABR มากพอที่จะส่งผลให้เกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนเกิดขึ้นอย่างสมบรูณ์



รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของถัง ABR ของการหมักร่วม
ระหว่าง SS และ ABS ที่ OLR ต่างๆ



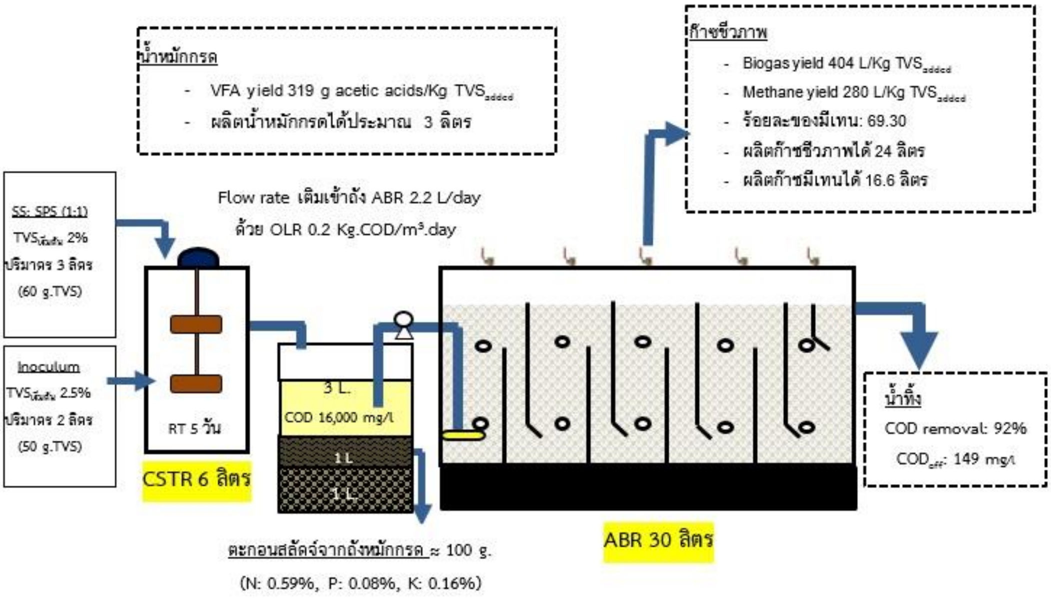
รูปที่ 4.40 ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากถัง ABR ของการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS ที่ OLR ต่างๆ

4.4.5 สรุปประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยระบบหมักร่วมไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

1) การหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

รูปที่ 4.41 แสดงภาพรวมประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS ที่อัตราส่วน 1:1 โดยเติมวัสดุหมัก 60 กรัมของของแข็งระเหยด้วยปริมาตร 3 ลิตร ลงถังหมักกรด CSTR พบว่าระยะเวลาในการหมักที่เหมาะสมคือ 5 วัน โดยมีประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหย 319 กรัมกรดอะซิติกต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น และสามารถผลิต

น้ำหมักกรดได้ประมาณ 3 ลิตร น้ำหมักกรดมีซีโอดีเท่ากับ 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำประปาให้มีค่าซีโอดีเท่ากับ 2,000 6,000 10,000 และ 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมเข้าสู่ถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR โดย peristatic pump อัตราการสูบเข้าถังเท่ากับ 2.2 ลิตรต่อครั้ง.วัน ด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.2 0.6 1.0 และ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 404 L/Kg TVS_{added} ดังนั้นวัสดุหมัก 60 กรัมของแข็งระเหย สามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพ โดยมีร้อยละมีเทนเท่ากับ 69.30 คิดเป็นปริมาตรก๊าซมีเทนประมาณ 16.63 ลิตร และน้ำทิ้งจากถัง ABR มีค่าซีโอดีของเท่ากับ 149 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 4.26) ซึ่งเกินมาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดเล็กน้อย



รูปที่ 4.41 ภาพรวมการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

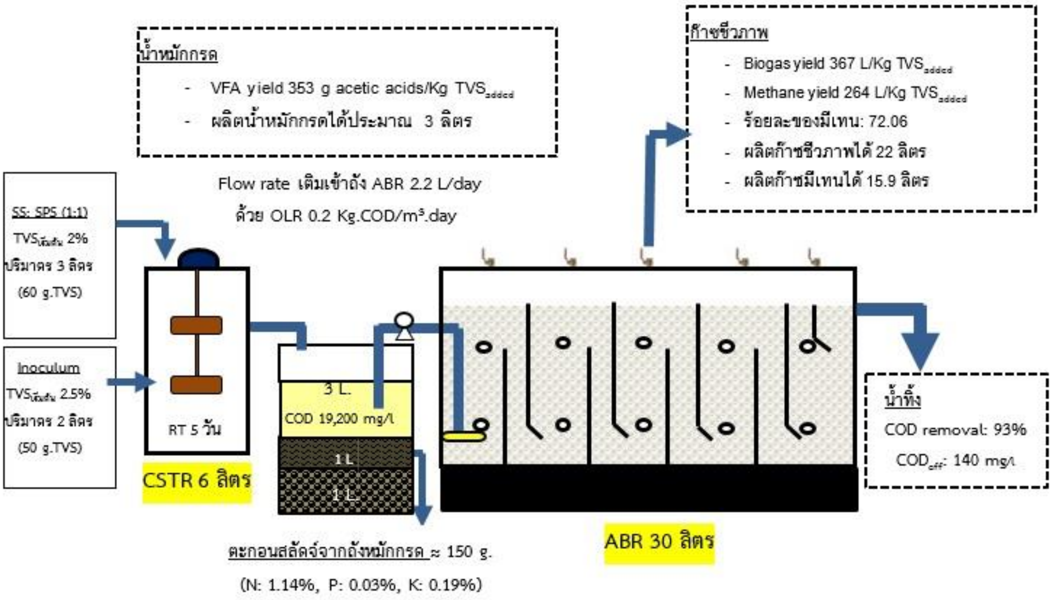
ตารางที่ 4.26 ลักษณะน้ำทิ้งจากถัง CSTR และ ABR จากการหมักร่วม SS และ SPS ที่อัตราส่วน 1:1

พารามิเตอร์	ถังหมักกรด CSTR	ถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR	มาตรฐานน้ำทิ้ง
pH	5.87	6.95	5.5-9
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	16,000	149	120
กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัมของกรดอะซิติกต่อลิตร)	3,825	167	-
สภาพด่าง (มิลลิกรัมของหินปูนต่อลิตร)	2,550	2,092	-

หมายเหตุ มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

2) การหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

รูปที่ 4.42 แสดงภาพรวมประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS ที่อัตราส่วน 1:1 โดยเติมวัสดุหมัก 60 กรัมของของแข็งระเหย ปริมาตร 3 ลิตร ลงถังหมักกรด CSTR พบว่าระยะเวลาในการหมักที่เหมาะสมคือ 5 วัน โดยมีประสิทธิภาพในการผลิตกรดอินทรีย์ระเหย 353 กรัมกรดอะซิติกต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหยเริ่มต้น และสามารถผลิตน้ำหมักกรดได้ประมาณ 3 ลิตร น้ำหมักกรดมีค่าซีโอดีเท่ากับ 19,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำประปาและเติมเข้าสู่ถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR โดย peristatic pump อัตราการสูบเข้าถังเท่ากับ 2.2 ลิตรต่อครั้ง.วัน ด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.2 0.6 1.0 และ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 367 L/Kg TVS_{added} ดังนั้นวัสดุหมัก 60 กรัมของแข็งระเหย สามารถผลิตก๊าซชีวภาพประกอบด้วยร้อยละมีเทนเท่ากับ 72.06 ซึ่งคิดเป็นปริมาตรก๊าซมีเทนประมาณ 15.9 ลิตร และน้ำทิ้งจากถัง ABR มีค่าซีโอดีของเท่ากับ 140 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 4.27) ซึ่งเกินมาตรฐานเล็กน้อยเช่นกัน



รูปที่ 4.42 ภาพรวมการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

ตารางที่ 4.27 คุณภาพน้ำที่ปล่อยออกจากถัง CSTR และ ABR จากการหมักร่วม SS และ ABS

พารามิเตอร์	ถังหมักกรด CSTR	ถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR	มาตรฐานน้ำทิ้ง
pH	5.97	7.2	5.5-9
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	19,200	140	120
กรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัมของกรดอะซิติกต่อลิตร)	4,163	180	-
สภาพด่าง (มิลลิกรัมของหินปูนต่อลิตร)	3,338	1,350	-

หมายเหตุ มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

เมื่อเปรียบเทียบการหมักร่วมของ 2 ชุดการหมักร่วมข้างต้น พบว่ามีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน และร้อยละของมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ค่อนข้างใกล้เคียง รวมถึงทั้งสองการหมักร่วมมีประสิทธิในการกำจัดซีโอดีที่สูงใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีการพิจารณาความเหมาะสม และศักยภาพในการนำไปใช้ในหัวข้อถัดไป

4.4.6 ศักยภาพในการนำการหมักร่วม SS:ABS และ SS:SPS ไปใช้ของโรงงานกรณีศึกษา

จากประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และเสถียรภาพในการเดินระบบของทั้งสองการหมักร่วม SS:SPS และ SS:ABS ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดั้งนั้นจึงได้คำนวณศักยภาพในการนำการหมักร่วมไปใช้ของโรงงานกรณีศึกษา (ตารางที่ 4.28) พบว่าผลิตก๊าซมีเทนได้เท่ากับ 255,360 และ 143,616 ลูกบาศก์เมตร/ปี ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความเหมาะสมในการนำไปใช้จริงของแต่ละการหมักร่วม พบว่า

1) การหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS เหมาะสำหรับนำไปใช้กับโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปร เนื่องจากทั้ง SS และ ABS เป็นของเสียที่เกิดภายในโรงงาน จึงสามารถรวบรวมและนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและใช้เป็นแหล่งพลังทดแทนภายในโรงงานได้อย่างยั่งยืน จากผลการศึกษานี้พบว่าหากโรงงานนำ SS และ ABS มาหมักด้วยระบบหมักสองขั้นตอนดังกล่าวจะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพและใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 359 MWh/ปี หรือผลิตเป็นพลังงานความร้อนได้ประมาณ 215 MWh/ปี (อ้างอิง ที่ 1 ลูกบาศก์เมตรของก๊าซชีวภาพที่มีร้อยละมีเทนมากกว่า 65 สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 2.5

และ 1.5 kWh, (Jorgensen, 2009) เมื่อพิจารณาจากปริมาณพลังงานที่ผลิตได้พบว่าควรนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากกว่าพลังงานความร้อน โดยโรงบำบัดน้ำเสียของโรงงานกรณีศึกษาที่มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงถึงประมาณ 3,240 MWh/ปี เป็นไฟฟ้าสำหรับตัวเติมอากาศ ปั๊มและเครื่องจักรต่างๆ ในระบบบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณร้อยละ 11 ของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดในระบบบำบัดน้ำเสีย จะสามารถลดค่าไฟฟ้าได้ปีละประมาณ 1,256,500 บาท (คำนวณจากราคาค่าไฟฟ้าที่เท่ากับ 3.5 บาท/kWh, (วิชัย, รัญชน์ และ นพดล, 2560)) อีกทั้งการนำ ABS มาผลิตก๊าซชีวภาพจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการส่งกำจัดประมาณ 2,625,000 บาท/ปีด้วย (ข้อมูลจากโรงงานกรณีศึกษา ค่ากำจัด ABS อยู่ที่ประมาณ 7,500 บาท/ตัน, ปริมาณ ABS ที่ผ่านเครื่องรีดตะกอนแล้วถูกส่งกำจัดประมาณ 350 ตัน/ปี)

2) การหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มกุ้ง เนื่องจากการขน SS ออกจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรสะดวกกว่าการขน SPS ออกจากพื้นที่ฟาร์มกุ้ง โดยทางฟาร์มสามารถขอซื้อกากตะกอนแป้ง SS ในราคาที่ถูกเพียงกิโลกรัมละ 3.50 บาท (สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย, 2563) ซึ่งถ้าโรงงานกรณีศึกษาขายหรือให้ SS กับฟาร์มกุ้งที่อยู่บริเวณใกล้ๆ โรงงานไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพสามรถผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 638 MWh/ปี กระแสไฟฟ้าสามารถนำไปใช้กับเครื่องเติมออกซิเจน หรือไฟฟ้าส่องสว่างภายในฟาร์ม หรืออาจผลิตเป็นพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 383 MWh/ปี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.28 ศักยภาพในการใช้ SS SPS และ ABS เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานกรณีศึกษา

วัสดุหมัก	ปริมาณที่เกิดขึ้น (ตัน/ปี)	เปอร์เซ็นต์ของของแข็งระเหย (%)	คำนวณเป็นปริมาณของแข็งระเหย (ตัน)	การหมักร่วม	ปริมาณของแข็งระเหยที่ใช้ในการหมักร่วมได้ (ตัน/ปี)	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (l/kg TVS_{added})	ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้[b] (ลูกบาศก์เมตร/ปี)
SS	1,460	31.26	456	SS:ABS (1:1)	272	264	**143,616**
ABS	4,679	5.82	272		272		
SS	1,460[a]	31.26	456	SS:SPS (1:1)	456	280	**255,360**
SPS	$7.4x10^6$	5.92	438,080		456		

หมายเหตุ: [a] = คำนวณจากการสูญเสียปนไปกับน้ำเสียที่ประมาณ 1% ของแป้งที่ผลิตได้

[b]= ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้คำนวณจากประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนคูณด้วยปริมาณของแข็งที่ใช้ในการหมักร่วม

4.5 การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียและการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของจุลินทรีย์ภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR

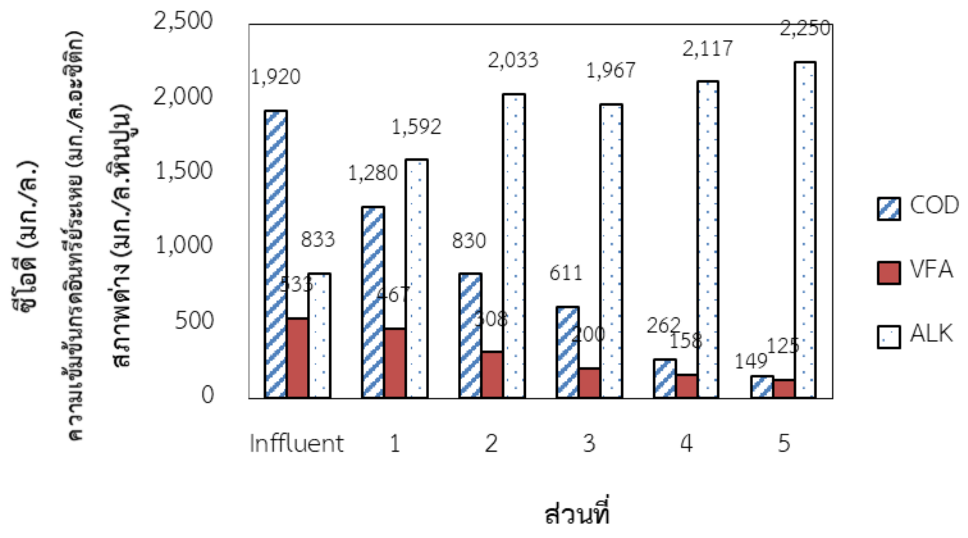
ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด ที่เท่ากับ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน หลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะที่มีเสถียรภาพ (Steady state) โดยเก็บน้ำหมักกรดที่เติมเข้าถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR และน้ำเสียจากทั้ง 5 ช่องของถังหมักก๊าซ ABR จากการเปิดก๊อกด้านบน เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียภายในถัง ABR

4.5.1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะน้ำเสียภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR

1) การหมักร่วมระหว่าง SS:SPS ที่อัตราส่วน 1:1

รูปที่ 4.43 แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะน้ำเสียภายในถัง ABR ของการหมักระหว่าง SS:SPS พบว่าค่าซีโอดีและกรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่องที่ 1-3 และค่อนข้างคงที่ในช่องที่ 4-5 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis) เกิดขึ้นในช่องที่ 1-3 ส่วนค่าความเป็นด่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่องที่ 1-2 จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น ความเป็นด่างที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากปริมาณไบคาร์บอเนต ($HCO3^-$) ที่เพิ่มขึ้นจากอะซิเตดทำปฏิกิริยากับน้ำและเกิดเป็นก๊าซมีเทน (Alexander N. Glazer และ Hiroshi Nikaido) ดังสมการ (1) จึงส่งผลให้กรดอินทรีย์ระเหยลดลงและค่าความเป็นด่างเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาเมทาโนเจนกลุ่มที่ใช้อะซิเตดพบว่า Methanosarcina เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในช่องที่ 1-2 เช่นกัน

$$CH_3COO^- + H_2O \longrightarrow CH_4 + HCO_3^- \quad (1)$$

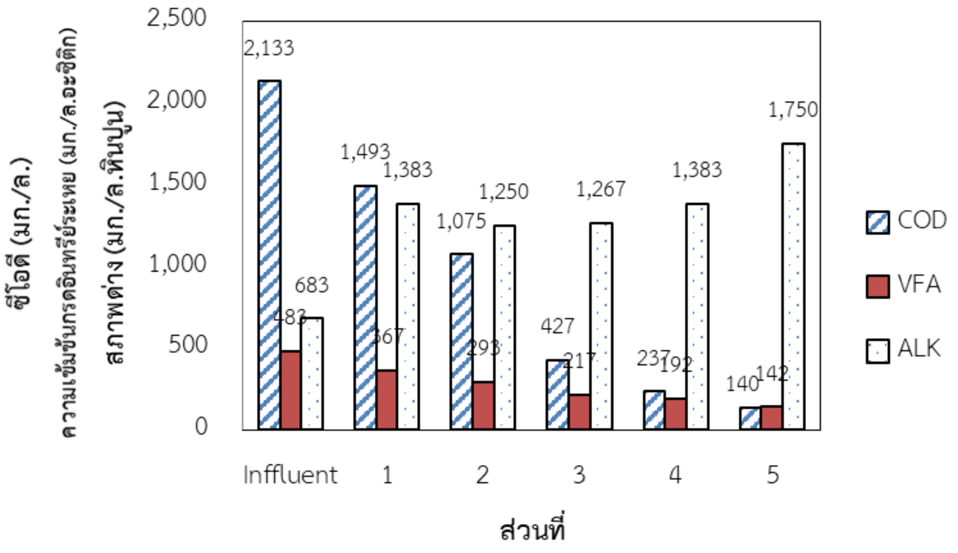


รูปที่ 4.43 ลักษณะน้ำเสียภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

2) การหมักร่วมระหว่าง SS:ABS ที่อัตราส่วน 1:1

รูปที่ 4.44 แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะน้ำเสียภายในถัง ABR ของการหมักระหว่าง SS:ABS พบว่าค่าซีโอดีและกรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลงมากต่อเนื่อง ในส่วนแรกของถังช่องที่ 1-3 แต่ในช่องที่ 4-5 ลดลงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยเป็นก๊าซมีเทนเกิดขึ้นในช่องที่ 1-3 ในขณะที่ค่าความเป็นด่างมีค่าข้างคงที่ในช่องที่ 1- 4 และกลับมีค่าเพิ่มขึ้นในช่องที่ 5 เนื่องจากความเป็นด่างมาจากการย่อยตะกอนชีวภาพ ABS มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งการย่อยสลายทำให้เกิดแอมโมเนีย และเมื่อแอมโมเนียอยู่ในน้ำทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งมีความเป็นด่าง (E. Lee และคณะ, 2019) (สมการ 2) ซึ่งไม่ได้มาจากแอซิเตตเนื่องจากความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยลดลงเพียงเล็กน้อยในช่องที่ 5

$$NH_3 + H_2O \longrightarrow NH_4^+ + OH^- \qquad (2)$$



รูปที่ 4.44 ลักษณะน้ำเสียภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR จากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

4.5.2 การเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของจุลินทรีย์ภายในถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR

ตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์ถูกเก็บจากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด ที่เท่ากับ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน หลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะที่มีเสถียรภาพ (Steady state) โดยเก็บจากทั้ง 5 ช่องของถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR จากการเปิดก๊อกด้านล่าง และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความหลากหลายของแบคทีเรีย และอาร์เคียที่พบ ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจจำแนกประเภทและปริมาณอาร์เคีย เพื่อศึกษากลไกที่ระบบหมักร่วมไร้อากาศใช้ในการผลิตก๊าซมีเทน โดยมีงานวิจัยที่พบว่าปริมาณของสารพันธุกรรม 16s rRNA ของอาร์เคียมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Webster และคณะ, 2016) เนื่องจากในการสร้าง 16s rRNA อาร์เคียต้องใช้พลังงาน ATP (Adenosine triphosphate) จากการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งตามทฤษฎีจะได้สูงสุด 0.6 ATP ต่อโมลของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (David G. Nicholls และ Stuart J. Fuguson, 2013)

1) การหมักร่วมระหว่าง SS:SPS

จุลินทรีย์ภายในถัง ABR ของการหมักระหว่าง SS:SPS ถูกวิเคราะห์ประเภทและปริมาณ (รูปที่ 4.45) พบว่ามีปริมาณแบคทีเรียมากในส่วนแรกของถัง ช่องที่ 1 และ 2 ในขณะที่ปริมาณอาร์เคียเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในช่องที่ 2 และ 3 เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในน้ำหมักกรดที่ยังไม่ถูกย่อยเป็นกรดอินทรีย์ระเหย ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นซีโอดีที่สูงกว่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยเป็นอย่างมากโดยเฉพาะในส่วนแรกของถัง (รูปที่ 4.43)

การวิเคราะห์ประเภทและปริมาณของอาร์เคียแสดงตามรูปที่ 4.46 พบว่า อาร์เคียจีนัส Methanobacterium เป็นตัวหลักในเกือบทุกช่องของถัง ABR ซึ่งเป็นอาร์เคียในกลุ่ม Hydrotrophic methanogen พบสูงสุดจำนวน 34,216 Tag คิดเป็นร้อยละ 57.39 ของจำนวนอาร์เคียทั้งหมดในช่องที่ 3 ดังนั้นปฏิกิริยาหลักในการผลิตก๊าซมีเทน น่าจะมาจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ดังสมการ 3 (D.E. Holmes และ J.A. Smith, 2016)

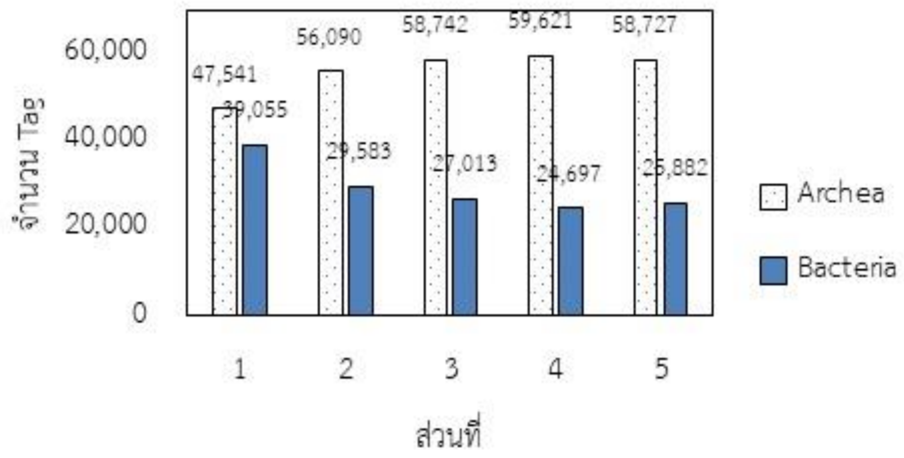
$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (3)$$

นอกจากนี้พบว่ามีการผลิตมีเทนโดยปฏิกิริยาอื่นๆ ด้วย คือ การผลิตก๊าซมีเทนจากหมู่เมทิล (Methyl group) จากอาร์เคียจีนัส Methanomassilicoccus พบมากเป็นอันดับสองในเกือบทุกช่อง จำนวน 8,841 Tag คิดเป็นร้อยละ 25.84 ของจีนัส Methanobacterium ซึ่งเป็นตัวหลักยกเว้นในช่องที่ 3 ของถัง ABR ที่พบ Methanoseata สูงเป็นอันดับสอง ซึ่งเป็นอาร์เคียใช้อะซิเตด (CH_3COO^-) ในการผลิตก๊าซมีเทน โดยเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของซีโอดีมีค่าใกล้เคียงกับกรด

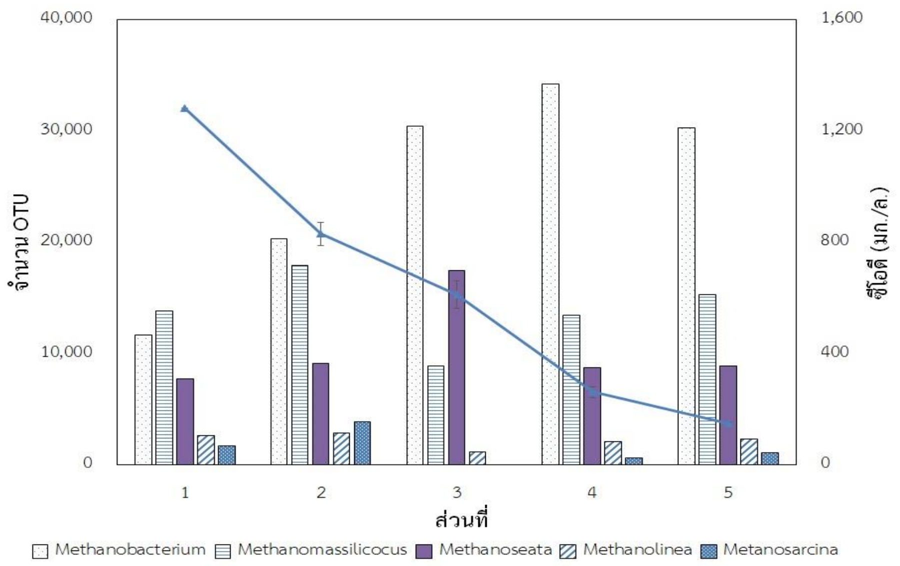
อินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acids) ในช่องที่ 3 แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปกรดอินทรีย์ระเหยที่ง่ายต่อการเปลี่ยนเป็นอะซิเตด และมีเทนต่อไปตามลำดับ (Che, 2002) ดังสมการ 4

$$\text{Volatile fatty acids} \longrightarrow CH_3COO^- + H^+ \longrightarrow CH_4 + CO_2 \quad (4)$$

เมื่อพิจารณาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในการทดลองนี้ค่อนข้างต่ำเท่ากับ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 1,920 มิลลิกรัมต่อลิตร และกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 533 มิลลิกรัมกรดอะซิติคต่อลิตร ส่งผลให้เมทาโนเจนที่พบเป็นกลุ่ม Methanobacterium และ Methanoseata เป็นกลุ่มหลักซึ่งเจริญเติบโตได้ดีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำ (Franke-Whittle, Walter, Ebner และ Insam, 2014) แต่เมทาโนเจนกลุ่ม Methanomassilicoccus และ Methanosarcina ซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง (Rajni Hatti-Kaul, Gashaw Mamo และ Bo Mattiasson, 2016) จะพบในส่วนแรกช่องที่ 1-2 ของถัง ABR มากกว่าในช่องที่ 3-5 เนื่องจากมีความเข้มข้นของซีโอดี และกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่า แสดงตามรูปที่ 4.43 ดังนั้นจากประเภทและปริมาณของอาร์เคียที่พบภายในถัง ABR ปฏิกิริยาหลักในการผลิตก๊าซมีเทนจึงมาจากการรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์โดยก๊าซไฮโดรเจน



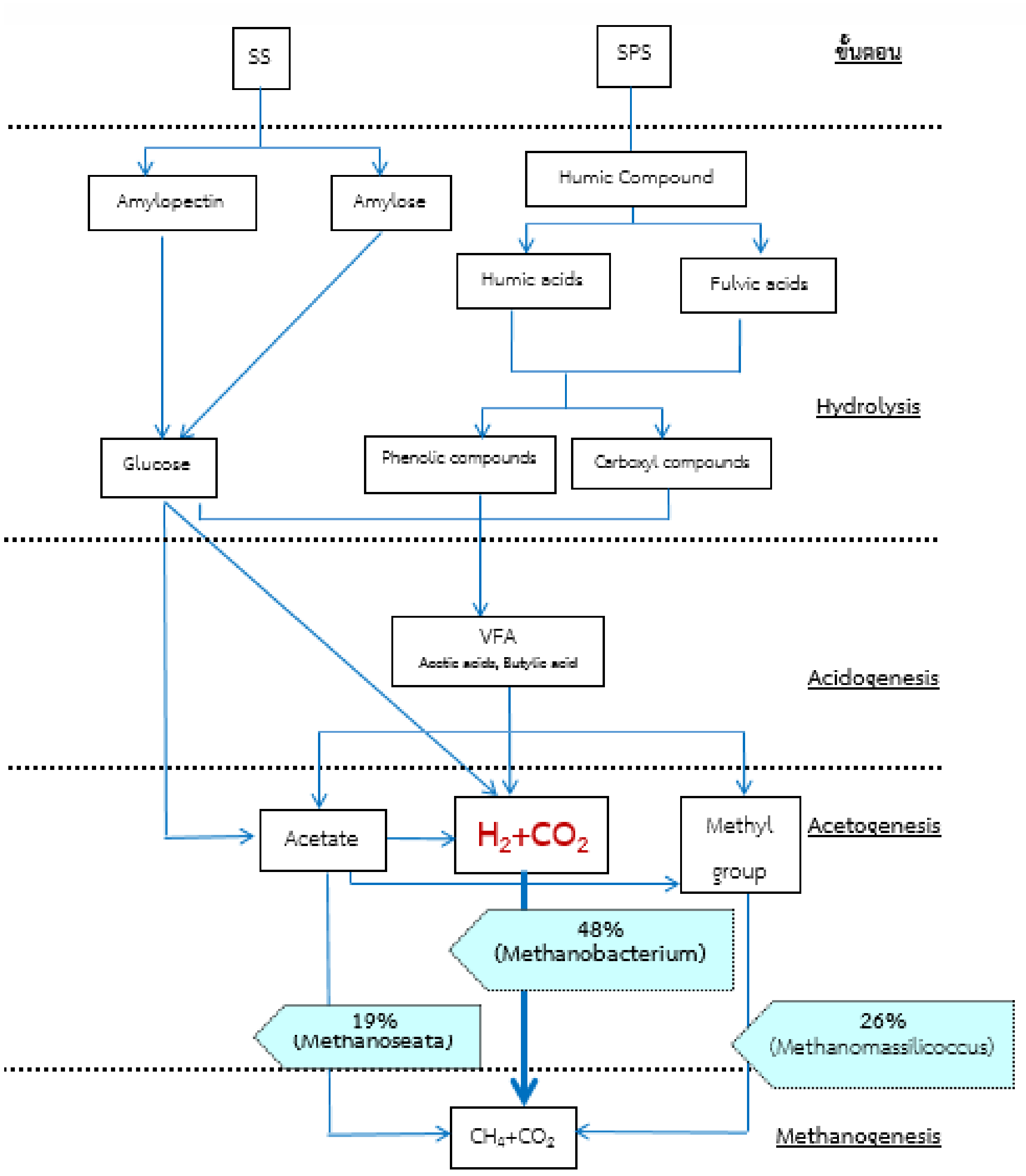
รูปที่ 4.45 ปริมาณแบคทีเรียและอาร์เคียจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS



รูปที่ 4.46 ประเภทและปริมาณของอาร์เคียจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

รูปที่ 4.47 แสดงกลไกการย่อยที่เกิดขึ้นของการหมักร่วมระหว่าง SS:SPS พบว่า SS ที่ประกอบด้วยโครงสร้างหลักเป็น อะไมโลแพกติน (Amylopectin) และอะไมโลส (Amylose) (Promthong S. และคณะ, 2006) จะถูกไฮโดรไลซิสกลายเป็นกลูโคส ในขณะที่ SPS มีโครงสร้างหลักเป็นสารประกอบฮิวมิค ที่ประกอบด้วยกรดฮิวมิค (Humic acid) และกรดฟุลวิค (Fulvic acid) (Hargreaves, 1995; Stepanov, Senko, Perminova และ Efremenko, 2019) จะถูกไฮโดรไลซิสเป็นสารประกอบฟีนอลหรือสารประกอบคาร์บอกซิลต่างๆ (E. Pereira และคณะ, 2019) ซึ่งสารตัวกลางที่เกิดจากการไฮโดรไลซิส SS และ SPS ข้างต้นนั้น ได้แก่ กูลโคส สารประกอบฟีนอล (Leven, Nyberg และ Schnurer, 2012) และสารประกอบคาร์บอกซิล (Mulat และ Horn, 2018) สามารถย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการอะซิโดรเจนนิซิส (Acidogenesis) ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่ากรดอินทรีย์ระเหยส่วนใหญ่เป็นกรดอะซิติค

โดยที่กรดอินทรีย์ระเหยจากปฏิกิริยาข้างต้น และกูลโคสจาก SS สามารถย่อยสลายต่อกลายเป็นอะซิเตด (Acetate) โดยกระบวนการอะซิโตรเจนนิซิส (Acetogenesis) และอะซิเตดสามารถถูกเปลี่ยนกลายเป็นก๊าซมีเทนโดยเมทาโนเจนกลุ่มอะซิโตคลาสติก (Acetoclastic methanogen) (Faustino Sineriz และ S. John Pirt, 1977) อีกทั้งพบว่ากลูโคส กรดอินทรีย์ระเหยและอะซิเตดนั้นก็สามารถย่อยสลายเป็นไฮโดรเจน ที่สามารถรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นก๊าซมีเทนได้ (Murali, Srinivas และ Ahring, 2017) โดยเมทาโนเจนกลุ่มกลุ่มไฮโดรจีโนโทรฟิค (Hydrogenotropic methanogen) ซึ่งน่าจะเป็นกลไกหลักของการหมักร่วมนี้ เนื่องจากอาร์เคียหลักที่พบ คือ Methanobacterium



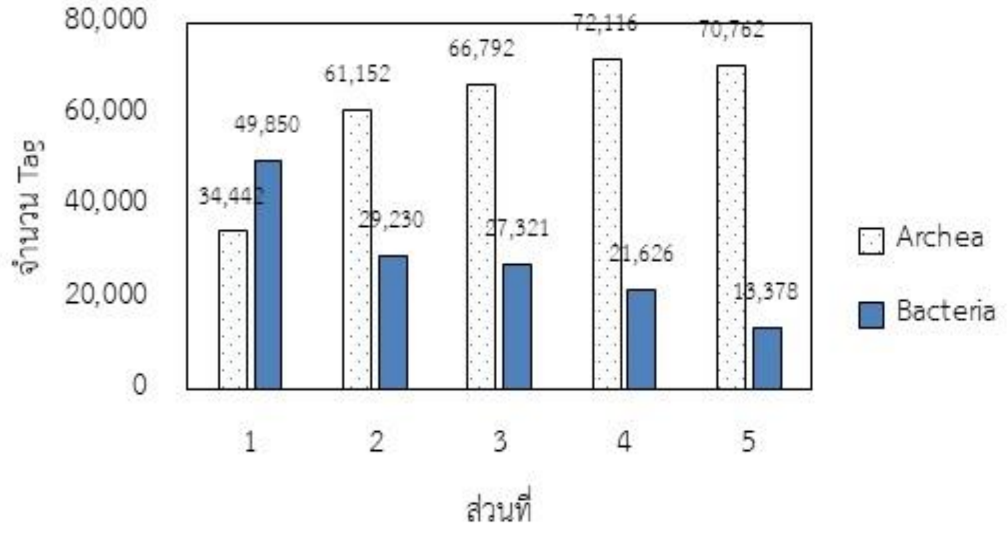
รูปที่ 4.47 กลไกการย่อยสลายของการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS

2) การหมักร่วมระหว่าง SS:ABS

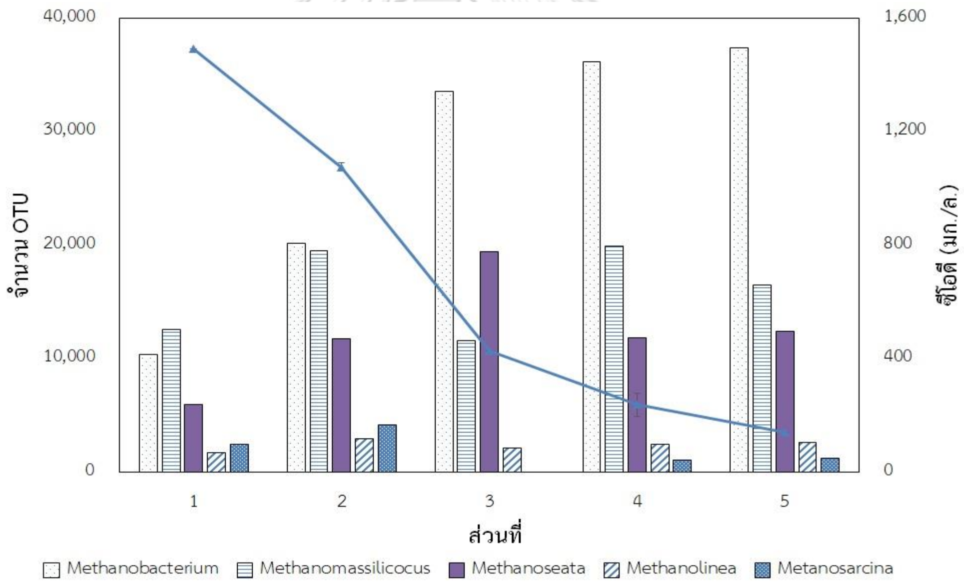
รูปที่ 4.48 แสดงปริมาณของแบคทีเรียและอาร์เคียในถัง ABR ของการหมักระหว่าง SS:ABS มีลักษณะใกล้เคียงกับการการหมักร่วมระหว่าง SS:SPS คือ มีปริมาณแบคทีเรียสูงสุดในช่องที่ 1 ของถัง ABR และมีแนวโน้มลดลงในช่องที่ 2-5 เนื่องจากแบคทีเรียทำหน้าที่ย่อยสารอินทรีย์ที่ยังเหลืออยู่ในน้ำหมักกรดขณะที่ปริมาณอาร์เคียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่องที่ 2-4 เนื่องจากสารอินทรีย์ถูกย่อยเป็นกรดอินทรีย์ระเหย ที่อาร์เคียสามารถใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนได้ ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าซีโอดีมากขึ้น ตามลำดับ (รุปที่ 4.44)

การวิเคราะห์ประเภทและปริมาณของอาร์เคียแสดงตามรูปที่ 4.49 อาร์เคีย Methanobacterium เป็นกลุ่มหลักที่พบจำนวนมากที่สุด ในช่องที่ 2-5 คิดเป็นร้อยละ 32.99, 50.19, 50.16 และ 52.82 ของจำนวนอาร์เคียทั้งหมด ตามลำดับ ดังนั้นปฏิกิริยาการผลิตมีเทนหลักจึงเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยก๊าซไฮโดรเจน (H_2) รองลงมาเป็นจีนัส Methanomassilicoccus ใช้หมู่เมทิล (Methyl group) (Nkamga, Henrissat และ Drancourt, 2017) จากสารประกอบต่างๆ และ Methanoseata (Zabranska และ Pokorna, 2018) ที่ใช้อะซิเตด (Acetate) ในการผลิตก๊าซมีเทน คิดเป็นร้อยละ 34.56-96.55 และ 32.75-58.20 ของอาร์เคีย Methanobacterium ซึ่งเป็นตัวหลัก

เมื่อพิจารณาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของการทดลองนี้ค่อนข้างต่ำเท่ากับ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เช่นกัน ที่ความเข้มข้นของซีโอดีเท่ากับ 2,133 มิลลิกรัมต่อลิตร และกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 483 มิลลิกรัมกรดอะซิติคต่อลิตร ส่งผลให้เมทาโนเจนที่พบเป็นกลุ่ม Methanobacterium และ Methanoseata เป็นกลุ่มหลักที่เจริญเติบโตได้ดีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำ (Franke-Whittle และคณะ, 2014) แต่เมทาโนเจนกลุ่ม Methanomassilicoccus และ Methanosarcina ซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง (Rajni Hatti-Kaul และคณะ, 2016) จะพบในส่วนแรกช่องที่ 1-2 ของถัง ABR มากกว่าในช่องที่ 3-5 เนื่องจากมีความเข้มข้นของซีโอดี และกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่า ตามรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.48 ปริมาณแบคทีเรียและอาร์เคียจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS



รูปที่ 4.49 ประเภทและปริมาณของอาร์เคียจากการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

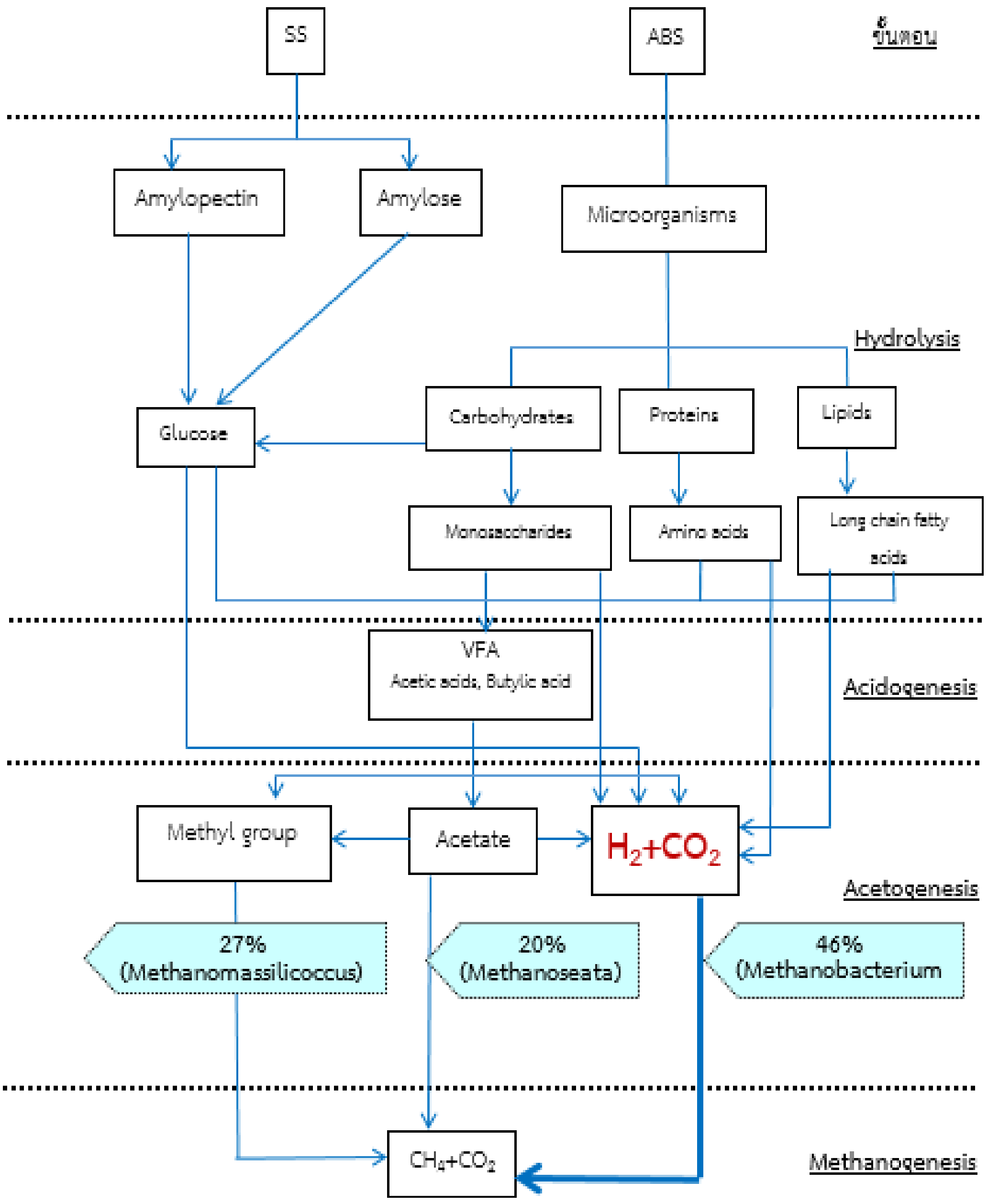
รูปที่ 4.50 แสดงกลไกการย่อยที่เกิดขึ้นของการหมักร่วมระหว่าง SS:ABS โดย SS ถูกไฮโดรไลซิสกลายเป็นกลูโคส ในขณะที่ ABS ประกอบด้วยเซลล์จุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งตามโครงสร้างของเซลล์จุลินทรีย์เป็นโปรตีน และคาร์โบไฮเดรทเป็นหลัก (Lu, 2006; T. Wang, Zhang, Dai, Chen และ Dai, 2016) โดยจะถูกไฮโดรไลซิสเป็นกรดอะมิโน และน้ำตาลโมเลกุลเดียว ตามลำดับ และหลังจากนั้นพบว่าทั้งกรดอะมิโน น้ำตาลโมเลกุลเดียว และกูลโคสจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์

ระเหยโดยกระบวนการอะซิโดรเจนนิซิส (Acidogenesis) และจากนั้นกรดอินทรีย์ระเหยก็จะถูกย่อยต่อกลายเป็นอะซิเตด (Acetate) โดยกระบวนการอะซิโตรเจนนิซิส (Acetogenesis) โดยที่อะซิเตดถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนโดยเมทาโนเจนกลุ่มอะซิโตคลาสติก (Acetoclastic methanogen) อีกทั้งพบว่าสารตัวกลาง อาทิเช่น น้ำตาลโมเลกุลเดียว (สมการ 5) (Anukam, Mohammadi, Naqvi และ Granström, 2019) กรดอะมิโน (Rajendran, Kankanala, Lundin และ Taherzadeh, 2014) กรดอินทรีย์ระเหย (Maria Kosseva และ Colin Webb, 2013) และอะซิเตด (สมการ 6) (Hattori, 2008) ก็สามารถถูกย่อยสลายทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนที่สามารถรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์กลายเป็นก๊าซมีเทน (สมการ 3) โดยเมทาโนเจนกลุ่มไฮโดรจีโนโทรฟิค (Hydrogenotrophic methanogen) ซึ่งน่าจะเป็นกลไกหลักของระบบหมักร่วมนี้ตามชนิดของอาร์เคียที่เราพบมากที่สุดคือ กลุ่ม Methanobacterium

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 4CO_2 + 4H_2 \quad (5)$$

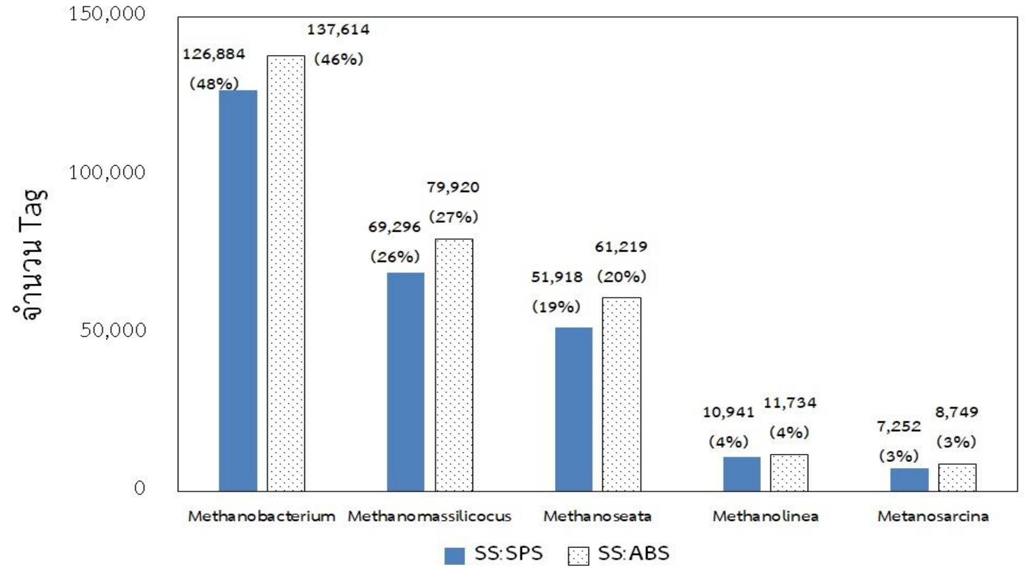
$$CH_3COO^- + 4\ H_2O \longrightarrow 2HCO_3^- + 4H_2 + H^+ \quad (6)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.50 กลไกการย่อยสลายของการหมักร่วมระหว่าง SS และ ABS

3) เปรียบเทียบประเภทและจำนวนอาร์เคียระหว่างสองการหมักร่วม SS:SPS และ SS:ABS แสดงตามรูปที่ 4.51 พบว่าอาร์เคียหลักที่พบเป็นกลุ่ม Methanobacterium เหมือนกัน รวมถึงประเภทและสัดส่วนของอาร์เคียใน 5 อันดับแรกที่พบมาก มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่ในการหมักร่วม SS:ABS มีจำนวน Tag ของอาร์เคียแต่ละกลุ่มมากกว่าการหมักร่วม SS:SPS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการหมักร่วม SS:ABS อาร์เคียกลุ่มหลักเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนได้ดีกว่า



รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบจำนวนอาร์เคียระหว่างสองการหมักร่วม SS:SPS และ SS:ABS

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

งานวิจัยนี้พบว่าทั้งสองการหมักร่วม SS:SPS และ SS:ABS มีอาร์เคียในกลุ่ม Methanobacterium เป็นตัวหลักในถัง ABR ซึ่งเป็นเมทาโนเจนกลุ่มไฮโดรจีโนโทรฟิค (Hydrogenotrophic methanogen) ที่ผลิตก๊าซมีเทนจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ด้วยก๊าซไฮโดรเจน (H_2) มากกว่าที่จะพบกลุ่มอะซิโตคลาสติก (Acetoclastic methanogen) ที่ผลิตก๊าซมีเทนจากอะซิเตต ทั้งๆที่ถังหมักก๊าซชีวภาพ ABR ถูกเติมด้วยน้ำหมักกรดที่มีกรดอะซิติคเป็นองค์ประกอบหลัก

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่พบอาร์เคีย Methanobacterium เป็นตัวหลัก ส่วนใหญ่จะเป็นการหมักย่อยแบบไม่ใช้อากาศแบบหนึ่งขั้นตอนโดยถังยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) ของน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล (Le Tho Bach, Zafar Iqbal Bhatti และ Kenji Furukawa, 2002) และการหมักย่อยน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำ (William P. Kovacik และคณะ, 2010) โดยการหมักย่อยแบบไม่ใช้อากาศแบบสองขั้นตอนที่พบอาร์เคีย Methanobacterium เป็นกลุ่มหลักในการผลิตก๊าซมีเทน เป็นการศึกษาหมักเศษหญ้า (Hong Wang และคณะ, 2010) โดย

ถังลีชเบด (Leach bed) และนำน้ำชะที่ได้ไปเติมถังหมักก๊าซชีวภาพยูเอเอสบี ซึ่งมีการหมุนเวียนน้ำจากถังยูเอเอสบีไปที่ถังลีชเบดทุกวัน ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติของน้ำชะจากถังลิชเบด พบว่ามีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยไม่สูงมากระหว่าง น้อยกว่า 1,000 – 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่มีความเข้มข้นของซีโอดีละลายน้ำ (Soluble COD) สูงระหว่าง 2,000 – 37,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งลักษณะน้ำชะจากถังลิชเบดที่มีสารอินทรีย์ในรูปสารตัวกลางอื่นๆ ปริมาณมากที่ไม่ใช่กรดอินทรีย์ระเหย จึงส่งผลให้อาร์เคียตัวหลักที่พบเป็นเมทาโนเจนกลุ่มไฮโดรจีโนโทรฟิคที่ผลิตมีเทนจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แทนที่จะเป็นเมทาโนเจนกลุ่มอะซิโตคลาสติก ในขณะที่ลักษณะของน้ำกรดจากงานวิจัยนี้ก็พบเช่นกันคือ มีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยประมาณ 500 – 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่มีความเข้มข้นของซีโอดีรวมเท่ากับ 2,000 – 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และด้วยลักษณะน้ำหมักกรดดังกล่าว ส่งผลให้พบว่าเมทาโนเจนกลุ่มไฮโดรจีโนโทรฟิคเป็นกลุ่มหลัก มากกว่าที่จะพบเมทาโนเจนกลุ่มอะซิโตคลาสติกที่ผลิตก๊าซมีเทนจากอะซิเตด อีกทั้งยังพบว่ามีจำนวนของแบคที่ทำหน้าที่ในการย่อยสารอินทรีย์มากในส่วนที่ 1 ของถัง ABR ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารอินทรีย์ในรูปตัวกลางอื่นๆ ที่พบมาในน้ำหมักกรด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการหมักร่วมระหว่างกากตะกอนแป้ง กับตะกอนสลัดจ์จากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์และตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล โดยหาอัตราส่วนการหมักร่วมที่เหมาะสม จากการทดลองด้วยวิธี BMP โดยออกแบบการทดลองแบบ CCD และใช้ RSM ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งนำอัตราส่วนที่เหมาะสมไปใช้ในการเดินระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ที่ประกอบด้วย CSTR เป็นถังหมักกรด และใช้ถัง ABR เป็นถังหมักก๊าซชีวภาพ โดยทำการศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกเริ่มต้นที่เหมาะสมกับถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการหมักร่วมของกากตะกอนแป้ง ตะกอนสลัดจ์ และตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยวิธี BMP

การหาอัตราส่วนการหมักร่วมที่เหมาะสมซึ่งเป็นปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นค่าตอบสนอง (Response) โดยใช้การคำนวณหาค่าความพึงพอใจ (Desirability) พบว่ามีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 324.36 L biogas/Kg TVS_{added} เมื่ออัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:SPS เท่ากับ 1:0 และมีค่าความพึงพอใจเท่ากับ 0.993 ขณะที่อัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:ABS มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 301.27 L biogas/Kg TVS_{added} ที่อัตราส่วนการหมักร่วมเท่ากับ 1.33:0 และมีค่าความพึงพอใจเท่ากับ 1 ซึ่งสอดคล้องกับแผนภาพ RSM ที่แสดงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ SS เป็นหลักเช่นกัน และเมื่อพิจารณาสภาวะในการหมักย่อยพบว่าที่อัตราส่วนการหมักร่วม 1:1 ของ SS:SPS และ SS:ABS ระบบหมักย่อยมีความเสถียรดีขึ้น โดยค่า pH อยู่ในช่วงที่แหมาะสม (6.5-7.5) และอัตราส่วนของ VFA/ALK มีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนที่ใช้ SS เป็นวัสดุหมักเพียงอย่างเดียวโดยประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้สูงเช่นกัน ที่เท่ากับ 294.57 และ 210.43 L biogas/Kg TVS_{added} ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนการหมักร่วมที่ 1:0 และ 1:1 (SS:SPS, SS:ABS) ถูกเลือกนำไปใช้ในการทดลองในระบบหมักย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนต่อไป

2) ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์แบบแบทช์ที่ใช้เป็นถังหมักกรด

เมื่อใช้ความเข้มข้นของ TVS เริ่มต้นร้อยละ 2 ในการหมักกรดมีประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่าที่ความเข้มข้นของ TVS เริ่มต้นร้อยละ 1 เป็นอย่างมาก โดยอัตราส่วนที่ทำการหมักกากตะกอนแป้ง (SS) เพียงอย่างเดียว ที่อัตราส่วนเท่ากับ 2:0 มีประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุด ในวันที่ 5 ของการหมัก เท่ากับ 388 มิลลิกรัมอะซิติก/กรัม $\text{TVS}_{\text{เริ่มต้น}}$ (415 มิลลิกรัมซีโอดี/กรัม $\text{TVS}_{\text{เริ่มต้น}}$) รองลงมาเป็นที่อัตราส่วนการหมักร่วม 1:1 (SS:ABS) และ 1:1 (SS:SPS) มีประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 353 และ 319 มิลลิกรัมอะซิติก/กรัม $\text{TVS}_{\text{เริ่มต้น}}$ (378 และ 342 มิลลิกรัมซีโอดี/กรัม $\text{TVS}_{\text{เริ่มต้น}}$) ตามลำดับ และพบว่ากรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นจากการหมักซึ่งถือเป็นตัวกลางที่สามารถผลิตเป็นก๊าซมีเทนได้ง่าย และเมื่อพิจารณาสภาวะการย่อยของระบบหมักกรดพบว่าอัตราส่วน VFA/ALK ของระบบที่มีการเติม SS เพียงอย่างเดียวมีอัตราส่วน VFA/ALK ค่อนข้างสูงและไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของการหมัก ขณะที่ในชุดทดลองที่มีการเติมวัสดุหมักร่วม SPS กับ ABS (1:1) จะมีอัตราส่วน VFA/ALK ต่ำกว่า 2 และค่อนข้างคงที่หลังจากวันที่ 5 ของการหมัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบหมักกรดของอัตราส่วนการหมักร่วมของ SS:SPS และ SS:ABS ที่อัตราส่วน 1:1 มีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับการหมักที่ใช้ SS เพียงอย่างเดียว น้ำหมักกรดที่ได้จากอัตราส่วนดังกล่าวจึงถูกนำไปใช้ในการศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เติมเข้าสู่ถังหมักก๊าซ ABR ต่อไป

3) ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูบเข้าถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น ซึ่งใช้เป็นถังหมักก๊าซชีวภาพของระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

น้ำหมักกรดจากถังหมักกรด CSTR ถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เท่ากับ 0.2, 0.6, 1.0 และ 1.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยทำการเจือจาง และเดินระบบจนระบบเข้าสู่สภาวะที่มีเสถียรภาพ (Steady state) พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เท่ากับ 0.2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ของทั้งสองการทดลองหมักร่วมมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 404±6.50 และ 367±21.77 L biogas/Kg $\text{TVS}_{\text{added}}$ สำหรับการหมักร่วมของ SS:SPS และ SS:ABS ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในการเดินระบบ พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างต่อเนื่อง ระบบมีเสถียรภาพลดลง และคุณภาพน้ำทิ้งจากถัง ABR มีคุณภาพลดลงโดยค่าซีโอดีเพิ่มขึ้น และค่า pH ลดต่ำลง อีกทั้งก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีร้อยละมีเทนต่ำกว่าร้อยละ 50

เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองการหมักร่วมนี้ พบว่ามีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน ความสามารถในการกำจัดซีโอดี และเสถียรภาพของระบบค่อนข้างใกล้เคียงกัน และได้ทำการประเมินความเหมาะสมในการนำไปใช้จริงพบว่าการหมักร่วมระหว่าง SS และ SPS เหมาะสำหรับการนำไปใช้ผลิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก๊าซชีวภาพในฟาร์มกุ้ง และการหมักร่วม SS กับ ABS เหมาะสำหรับโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการส่ง ABS ไปกำจัดได้เป็นอย่างมาก

4) การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายของจุลินทรีย์ภายในถังหมักก๊าซ ABR

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำภายในถัง ABR ของการหมักระหว่าง SS:SPS และ SS:ABS พบว่า ค่าซีโอดี และความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มลดลง ภายในส่วนแรกของถัง แสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis) ที่ทำการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยเป็นก๊าซมีเทน ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่องที่ 1-3 ผลการวิเคราะห์ประเภทและปริมาณของอาร์เคีย พบว่าเมทาโนเจนตัวหลัก คือ Methanobacterium รองลงมาเป็น Methanomassilicoccus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในส่วนแรกของถังเช่นกัน ซึ่งเป็นอาร์เคียในกลุ่ม Hydrogenotropic methanogens และ Methylotrophic methanogens ตามลำดับ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่ากรดอินทรีย์ระเหยจะถูกย่อยเป็นก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งสามารถรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นกลไกหลักในการผลิตก๊าซมีเทน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) จากการทดลอง BMP การหมักร่วมระหว่างกากตะกอนแป้งกับตะกอนเลน และกากตะกอนแป้งกับตะกอนสลัดจ์จากระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์พบว่าการหมักร่วมช่วยให้ระบบย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีเสถียรภาพดีขึ้น โดยตะกอนส่วนเกินและตะกอนเลนช่วยรักษาให้ pH ของระบบไม่เปลี่ยนแปลงง่ายได้ดีกว่าการหมักย่อยของตะกอนแป้งเพียงอย่างเดียว ซึ่งเสี่ยงต่อการที่ระบบจะล้มเหลวได้ง่ายกว่า

2) อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ใช้กับถังหมักกรด CSTR และถังหมักก๊าซ ABR เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยและก๊าซชีวภาพควรเลือกให้เหมาะสม และจากการทดลองนี้ พบว่าถังหมักก๊าซมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างสูง รวมไปถึงระบบมีเสถียรภาพที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมของวัสดุดังกล่าวที่ใช้มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ควรมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบให้สูงขึ้น เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

3) ควรมีการทดลองเพิ่มโดยทำปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการหมักร่วม SS:SPS และ SS:ABS ให้มีความแตกต่างมากขึ้น เช่น 1:0.5 และ 1:0.25 เป็นต้น ในการเดินระบบย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

4) ควรทดลองใช้วัสดุหมักร่วมอื่นๆ เช่น ตะกอนสลัดจ์จากระบบเอสบีอาร์หมักร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5) ควรมีการศึกษาชนิดและจำนวนของเมทาโนเจนที่พบในหัวเชื้อที่นำมาใช้ก่อนและหลังจากทำการปรับสภาพด้วยน้ำหมักกรดจากวัสดุหมักร่วมที่ใช้ เพื่อใช้เปรียบเทียบให้ทราบถึงประเภทและจำนวนเมทาโนเจนที่พบภายในถังหมักก๊าซ ABR เหมือนหรือแตกต่างจากหัวเชื้อที่นำมาใช้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงประเภทและจำนวนของเมทาโนเจนเป็นผลมาจากน้ำหมักกรดที่เราเติมเข้าระบบหรือไม่ รวมถึงควรมีการวิเคราะห์ประเภทของสารอินทรีย์อื่นๆ ที่พบในน้ำหมักกรดเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์ที่พบกับชนิดหรือจำนวนของเมทาโนเจนที่พบในถัง ABR

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. การคำนวณและการตรวจวัดและวิเคราะห์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.1 การคำนวณในการเตรียมวัสดุหมักจากเปอร์เซ็นต์ของแข็งระเหย ซึ่งคำนวณได้จากสมการ:

$$TVS_1W_1 = TVS_2W_2$$

โดย TVS_1 = ปริมาณของแข็งระเหยของวัสดุหมักแต่ละชนิด (%โดยน้ำหนักเปียก)

W_1 = น้ำหนักของวัสดุหมักแต่ละชนิด (กรัม)

TVS_2 = ปริมาณของแข็งระเหยของวัสดุหมักร่วม (%โดยน้ำหนักเปียก)

W_2 = น้ำหนักของวัสดุหมักร่วม (กรัม)

1.2 การคำนวณประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหย ซึ่งคำนวณได้จากสมการ:

$$\text{VFAs yield (mg } CH_3COOH/\text{g } TVS_{added}) = \frac{VFAs}{TVS_{added}}$$

โดย VFAs = น้ำหนักของกรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมกรดอะซิติก)

TVS_{added} = น้ำหนักของของแข็งระเหยของวัสดุหมักที่เติม (กรัม)

1.3 การคำนวนปริมาณกรดไขมันระเหยในรูปของซีโอดี ซึ่งคำนวณได้จากสมการ:

$$\text{VFAs-COD (mg COD)} = \text{VFAs} \times 1.07$$

โดย VFAs = น้ำหนักของกรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมกรดอะซิติก)

VFAs-COD (mg COD) = น้ำหนักของกรดไขมันระเหยในรูปของซีโอดี (กรัม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4 การคำนวณประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหย ซึ่งคำนวณได้จากสมการ:

$$\text{Biogas yield (l/kg } TVS_{added}) = \frac{B \times DF \times AV}{TVS_{added} \times FV}$$

โดย B = ปริมาณก๊าซชีวภาพที่สามารถผลิตได้ (ลิตร)

TVS_{added} = น้ำหนักของของแข็งระเหยของวัสดุหมักที่เติม (กรัม)

DF = แฟกเตอร์การเจือจาง (ปริมาตรหลังจากเจือจาง/ปริมาตรที่นำมาเจือจาง)

FV = ปริมาตรของน้ำกรดที่เติมลงถังหมักก๊าซ ABR (ลิตร)

AV = น้ำกรดที่ได้จากถังหมักกรด CSTR

1.5 การคำนวณอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบต่อปริมาตรถังในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งโดยทั่วไปนิยมวัดในรูปของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในรูปของของแข็งระเหย หรือ ซีโอดี ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$OLR = \frac{Q \times VS}{V \times 1,000}$$

โดย OLR = อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในรูปของของแข็งระเหย หรือซีโอดี (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร/วัน)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย (ลูกบาศก์เมตร/วัน)

VS = สารอินทรีย์ในรูปของของแข็งระเหย หรือซีโอดีของน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)

V = ปริมาตรถัง (ลูกบาศก์เมตร)

1.6 การวิเคราะห์หาค่าความเป็นด่างทั้งหมด และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายโดยการไตรเตรท เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสภาพความเป็นกรดและด่างของน้ำเสียในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร $CaCO_3$ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2535)

- การวิเคราะห์ความเป็นด่างทั้งหมด โดยดูดตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองมา 50 - 200 มล. ใส่ในบีกเกอร์ 300 มล. วัด pH ของน้ำตัวอย่างแล้วไตเตรทตัวอย่างน้ำจนถึง pH 4.0 ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 0.05 นอร์มัล จดปริมาตรสารละลายกรดที่ใช้ = A
- ไตเตรทตัวอย่างน้ำต่อไปจน pH อยู่ระหว่าง 3.3 - 3.5 ไม่ต้องจดปริมาตรที่ใช้หลังจากนั้นต้มตัวอย่างน้ำจนเดือดประมาณ 2-3 นาที
- ไตเตรทกลับเพื่อปรับ pH ให้ถึง 4.0 ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 นอร์มัล แล้วไตเตรทต่อจาก pH 4 ถึง 7 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงหลังนี้คือ B
- ระหว่างการไตเตรทซึ่งต้องใช้ magnetic bar คนตลอด 60 รอบต่อนาที ตลอดเวลา โดยการคำนวณหาค่าการความเป็นด่างทั้งหมด และความเป็นกรดของน้ำเสีย ดังนี้

จาก $$\text{Akalinity} = \frac{AXNX50X1000}{\text{ปริมาตรน้ำที่ใช้}}$$

จาก $$\text{Volatile Fatty Acid} = \frac{BXNX50X1000}{\text{ปริมาตรน้ำที่ใช้}}$$

โดย A คือ ปริมาตรสารละลายซัลฟูริกที่ใช้ในการไตเตรตจนถึงจุดยุติที่ pH = 4 (มิลลิลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

B คือ ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรตจนถึงจุดยุติที่ pH = 7 (มิลลิลิตร)

N คือ นอร์มัลลิตี้ของสารละลายกรดซัลฟูริก และสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล

ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ อย่างน้อย 10 มิลลิลิตร

1.7 ดัชนีความหลากหลายของชนิด Shannon Wiener Index of diversity ตามวิธีการของ โดยใช้สูตรดังนี้

$$H = -\sum_{i=1}^{n} Pi\ (\ln Pi)$$

โดย H = ค่าดัชนีความหลากชนิด Shannon-Wiener Index Diversity

Pi = เป็นสัดส่วนระหว่างจำนวนของชนิดพันธุ์นั้นๆ ต่อจำนวนของทุกชนิดรวมกัน (เมื่อ i= 1, 2, 3,... n)

n = จำนวนชนิดพันธุ์ที่ปรากฎทั้งหมด

2. การวัด pH ของตะกอนเลนในน้ำ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

เตรียมอัตราสวนตะกอนเลนต่อน้ำ เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ชั่งตะกอนเลน 20 กรัม ใสในบีกเกอรพลาสติก. เติมฏ้ากลั่น 20 มล. คนใหเขากันดวยแทงแกวเปน ระยะ ๆ ใหบอยครั้งในระยะ 30 นาทีแรก หลังจากนั้นตั้งทิ้งไวอีก 30 นาที จึงวัด pH ของดินในสวน ที่เปนน้ำใสดวย pH meter หรือใชชอนตวงตักดินและตวงฏ้าแทนการชั่งดิน เพื่อวัด pH 1:1 โดยปริมาตร

3. ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ.2557

ตารางที่ ก-4 มาตรฐานมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ตามประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ.2557 (กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2557)

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐาน	หน่วย
ขนาดของปุ๋ย	ไม่เกิน 12.5x12.5	มิลลิเมตร
ปริมาณความชื้นและสิ่งที่ระเหยได้	ไม่เกิน 30	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
ปริมาณหิน และกรวด	ขนาดใหญ่กว่า 5 มิลลิเมตร ไม่เกิน 5	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
พลาสติก แก้ว วัสดุมีคม และโลหะอื่น	ต้องไม่มี	
ปริมาณอินทรียวัตถุ	ไม่น้อยกว่า 30	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH)	5.5 – 8.5	
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	ไม่เกิน 20 : 1	
ค่าการนำไฟฟ้า (EC : Electrical Conductivity)	ไม่เกิน 6	เดซิซีเมน/เมตร
ปริมาณธาตุอาหารหลัก	- ไนโตรเจน (total N) ไม่น้อยกว่า 1.0 - ฟอสฟอรัส (total P_2O_5) ไม่น้อยกว่า 0.5 - โพแทสเซียม (total K_2O) ไม่น้อยกว่า 0.5	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก
การย่อยสลายที่สมบูรณ์	มากกว่า 80	เปอร์เซ็นต์
สารหนู (Arsenic)	ไม่เกิน 50	มิลลิกรัม/กิโลกรัม
แคดเมียม (Cadmium)	ไม่เกิน 5	มิลลิกรัม/กิโลกรัม
โครเมียม (Chromium)ทองแดง (Copper)	ไม่เกิน 300	มิลลิกรัม/กิโลกรัม
ตะกั่ว (Lead)	ไม่เกิน 500	มิลลิกรัม/กิโลกรัม
ปรอท (Mercury)	ไม่เกิน 500	มิลลิกรัม/กิโลกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4. ผลการทดลอง BMP

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของสารละลายในแต่ละการทดลอง BMP ที่ใช้ความเข้มข้นของ SS และ SPS ต่างกัน

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้น (%TVS โดยน้ำหนักเปียก)		pH		อัตราส่วน VFA/ALK $_{\text{สุดท้าย}}$	TVS (%โดยน้ำหนักเปียก)		TVS removal efficiency (%)
	SS	SPS	เริ่มต้น	สุดท้าย		เริ่มต้น	สุดท้าย	
1	0*	1	6.96	7.45	0.49	1.6	0.48	62.50±2.27
2	1	1	7.05	6.93	0.64	2.2	0.52	70.64±9.24
3	2	2	6.98	5.28	5.53	3.4	1.20	55.76±7.92
4	2	0	6.94	4.82	11.32	2.2	0.60	65.68±2.44
5	0	2	7.10	7.46	0.31	2.2	0.89	49.22±1.32
6	1	1	7.07	6.97	0.47	2.2	0.45	74.36±1.80
7	1	2.4142	6.97	6.99	0.22	3.05	0.95	60.96±1.96
8	1	1	7.10	6.95	1.03	2.2	0.44	75.23±3.55
9 (ชุดควบคุม)	0	0	6.94	7.65	0.26	1	0.11	85.88±2.38
10	1	1	6.94	7.03	0.29	2.2	0.68	61.61±0.52
11	2.4142	1	6.96	5.35	4.91	3.05	1.81	25.98±9.11
12	1	0*	7.04	6.57	2.34	1.6	0.29	76.98±1.15
13	1	1	6.94	7.09	0.38	2.2	0.62	64.72±6.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติของสารละลายในแต่ละการทดลอง BMP ที่ใช้ความเข้มข้นของ SS และ ABS ต่างกัน

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้น (%TVS โดยน้ำหนักเปียก)		pH		อัตราส่วน VFA/ALK สุดท้าย	TVS (%โดยน้ำหนักเปียก)		TVS removal efficiency (%)
	SS	ABS	เริ่มต้น	สุดท้าย		เริ่มต้น	สุดท้าย	
1	0*	1	7.15	7.27	0.12	1.6	1.14	10.80±0.54
2	1	1	7.09	7.05	0.21	2.2	1.03	41.73±0.49
3	2	2	7.11	6.77	7.36	3.4	1.53	43.84±0.81
4	2	0	7.01	4.16	15.82	2.2	0.38	78.17±11.86
5	0	2	6.99	7.06	0.09	2.2	1.29	26.97±1.66
6	1	1	7.05	7.21	0.18	2.2	1.40	43.97±4.44
7	1	2.4142	7.14	7.09	0.19	3.05	2.01	36.48±1.66
8	1	1	7.05	6.95	0.23	2.2	0.98	44.49±0.62
9 (ชุดควบคุม)	0	0	7.02	7.38	0.12	1	0.10	87.08±1.07
10	1	1	6.99	6.77	0.21	2.2	1.27	41.58±0.40
11	2.4142	1	6.94	4.87	4.76	3.05	1.04	57.33±0.27
12	1	0*	6.95	6.86	2.55	1.6	0.45	65.01±0.93
13	1	1	7.15	7.06	0.29	2.2	1.14	35.41±0.34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Adelekan, B. A. (2012). Cassava as a potent energy crop for the production of ethanol and methane in tropical countries. *International Journal of Thermal and Environmental Engineering 4*(1), 25 - 32.

Ahmmad, R. M., & Haque, S. (2014). Providing electricity by digester types on biogas productions from municipal solid waste in Dhaka city, Bangladesh. *International Journal of Energy, Information and Communications, 5*(3), 13-22. doi:10.14257/ijeic.2014.5.3.02

Alexander N. Glazer, & Hiroshi Nikaido. *Microbial Biotechnology: Fundamentals of Applied Microbiology* (2 ed.).

Ali Shah, F., Mahmood, Q., Maroof Shah, M., Pervez, A., & Ahmad Asad, S. (2014). Microbial ecology of anaerobic digesters: the key players of anaerobiosis. *ScientificWorldJournal, 2014*, 183752. doi:10.1155/2014/183752

Amanda C. Kentner, Anthony J. Hannan, & Donaldson, S. T. (2019). *Environmental Enrichment: Enhancing Neural Plasticity, Resilience, and Repair*: Frontier.

American Public Health Association. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater In (23 ed.): American Public Health Association (APHA), Washington, DC, USA.

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., . . . van Lie, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Sci Technol, 59*(5), 927-934. doi:10.2166/wst.2009.040

Anh, P. T., Carolien, K., Bush, S. R., & Mol., A. P. J. (2010). Water pollution by intensive brackish shrimp farming in south-east Vietnam: Causes and options for control. *Agricultural Water Management, 97*(6), 872-882. doi:10.1016/j.agwat.2010.01.018

Anukam, A., Mohammadi, A., Naqvi, M., & Granström, K. (2019). A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency. *Processes, 7*(8). doi:10.3390/pr7080504

Arikan, O. A., Mulbry, W., & Lansing, S. (2015). Effect of temperature on methane production from field-scale anaerobic digesters treating dairy manure. *Waste Manag, 43*, 108-113. doi:10.1016/j.wasman.2015.06.005

Azadeh, B., & Jalal, S. (2011). *Effect of organic loading rate (OLR) on production of methane from anaerobic digestion of vegetables waste*. Paper presented at the World Renewable Energy Congression 2011, Sweden.

Azman, S., Khadem, A. F., Plugge, C. M., Stams, A. J., Bec, S., & Zeeman, G. (2017). Effect of humic acid on anaerobic digestion of cellulose and xylan in completely stirred tank reactors: inhibitory effect, mitigation of the inhibition and the dynamics of the microbial communities. *Appl Microbiol Biotechnol, 101*(2), 889-901. doi:10.1007/s00253-016-8010-x

Bassuney, D. M., Ibrahim, W. A., & Moustafa, M. A. (2013). Performance of anaerobic baffled reactor (ABR) during start - up period. *international Journal of Chemical, Environmental & Biological Science, 1*(4), 571 - 575.

Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escaleira, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta, 76*(5), 965-977. doi:10.1016/j.talanta.2008.05.019

Bolzonella, D., Pavan, P., Battistoni, P., & Cecchi, F. (2005). Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. *Process Biochemistry, 40*(3-4), 1453-1460. doi:10.1016/j.procbio.2004.06.036

Bolzonella, D., Pavan, P., Zanette, M., & Cecch, F. (2007). Two-phase anaerobic digestion of waste activated sludge: Effect of an extreme thermophilic prefermentation. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 46*(21), 6650-6655.

Carrere, H., Rafrafi, Y., Battimelli, A., Torrijos, M., Delgenes, J.-P., & Ruysschaert, G. (2010). Methane potential of waste activated sludge and fatty residues: Impact of co-digestion and alkaline pretreatments *The Open Environmental Engineering Journal, 3*, 71-76.

Cesaro, A., & Belgiorno, V. (2015). Combined Biogas and Bioethanol Production: Opportunities and Challenges for Industrial Application. *Energies, 8*(8), 8121-8144. doi:10.3390/en8088121

Che, G. (2002). New advances in aatalytic systems for conversion of CH_4 and CO_2. *Journal of Natural Gas Chemistry, 11*, 109-116.

Chen, Y., Robler, B., Zielonka, S., Wonneberger, A.-M., & Lemmer, A. (2014). Effects of organic loading rate on the performance of a pressurized anaerobic filter in two-phase anaerobic digestion. *Energies, 7*(2), 736-750. doi:10.3390/en7020736

Chester, R., & Jickells, T. D. (2009). *Marine geochemistry*: John Wiley and Sons Ltd.,.

Chukwuemeka, A. J. (2018). *Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants: A Practical Handbook*: Taylor & Francis Group.

Cuzin, N., Farinet, J. L., Segretain, C., & Labat, M. (1992). Methanogenic Fermentation of Cassava Peel Using a Pilot Plug Flow Digester. *Bioresource Technology, 41*, 259 - 264.

D.E. Holmes, & J.A. Smith. (2016). *Advances in Applied Microbiology* (Sima Sariaslani Ed. Vol. 97): Zoe Krue.

Dai, X., Duan, N., Dong, B., & Dai, L. (2013). High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: stability and performance. *Waste Manag, 33*(2), 308-316. doi:10.1016/j.wasman.2012.10.018

Dama, P., Bell, J., Foxon, K. M., Brouckaert, C. J., Huang, T., Buckley, C. A., . . . Stuckey, D. (2002). Pilot-scale study of an anaerobic baffled reactor for the treatment of domestic wastewater. *Water Science and Technology, 46*(9), 263 - 270.

David G. Nicholls, & Stuart J. Fuguson. (2013). *Bioenergetics4*: Elsevier.

Demiate, I. M., Oetterer, M., & Wosiacki, G. (2001). Characterization of chestnut (*Castanea sativa*, Mill) starch for Industrial Utilization. *Brazilian archives of biology and technology, 44*(1), 69 - 78.

Dieu, T. T. M., Van, N. B., & Truc, T. T. T. (2015). Biogas recovery from anaerobic digestion of starch food refuse what would be proper condition? *International Journal of Innovation science. Engineer & Technology, 2*(1), 519 - 527.

Dioha, I. J., Ikeme, C. H., Nafi'u, T., Soba, N. I., & Yusuf, M. B. S. (2013). Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production. *International Research Journal of Natural Sciences, 1*(3), 1 - 10.

Duan, N., Zhang, D., Lin, C., Zhang, Y., Zhao, L., Liu, H., & Liu, Z. (2019). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of pig manure: Methane

production, mass flow, reactor scale and heating scenarios. *J Environ Manage, 231*, 646-652. doi:10.1016/j.jenvman.2018.10.062

Environmental Protection Agency. (1999). *Wastwater Technology Fact Sheet Sequencing Batch Reactors*. Washington, D.C.

Esteves, S., Miltner, M., & Puchas, K. (2012). *Monitoring review and guide for the optimisation of anaerobic digestion and biomethane plants*. Retrieved from

Faustino Sineriz, & S. John Pirt. (1977). Methane Production from Glucose by a Mixed Culture of Bacteria in the Chemostat : the Role of Citrobacter. *Journal of General Microbiology, 101*, 57-64.

Fjodorova, N., & Novic, M. (2015). Searching for optimal setting conditions in technological processes using parametric estimation models and neural network mapping approach: a tutorial. *Anal Chim Acta, 891*, 90-100. doi:10.1016/j.aca.2015.06.020

Franke-Whittle, I. H., Walter, A., Ebner, C., & Insam, H. (2014). Investigation into the effect of high concentrations of volatile fatty acids in anaerobic digestion on methanogenic communities. *Waste Manag, 34*(11), 2080-2089. doi:10.1016/j.wasman.2014.07.020

Garcia, N. H., Strazzera, G., Frison, N., & Bolzonella, D. (2018). Volatile fatty acids production from household food waste. *Chemical Engineering Transactio, 64*, 103-108. doi:10.3303/CET1864018

Ghimire, A., Sen, R., & Annachhatre, A. P. (2015). Biosolid management options in cassava starch industries of Thailand: Present practice and future possibilities. *Procedia Chemistry, 14*, 66-75. doi:10.1016/j.proche.2015.03.011

Gnanapragasam, G., Arutchelvan, V., & Soundari, L. (2016). Effect of temperature on biodegradation of textile dyeing effluent using pilot scale UASB Reactor. *International Journal of Environmental & Agriculture Research, 2*(7), 158-162.

Gruhn, M., Frigon, J. C., & Guiot, S. R. (2016). Acidogenic fermentation of Scenedesmus sp.-AMDD: Comparison of volatile fatty acids yields between mesophilic and thermophilic conditions. *Bioresource Technology, 200*, 624-630. doi:10.1016/j.biortech.2015.10.087

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Hargreaves, J. A. (1995). *Nitrogen biogeochemistry of aquaculture pond sediments.* (Doctor of Philosophy), Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College,

Hassan, S. R., Zaman, N. Q., & Dahlan, I. (2015). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion: Case study on recycled paper mill effluent using Modified Anaerobic Hybrid Baffled (MAHB) reactor. *KSCE Journal of Civil Engineering, 19*(5), 1271-1276. doi:10.1007/s12205-015-0746-9

Hattori, S. (2008). Syntrophic acetate-oxidizing microbes in methanogenic environments. *Microbes Environ, 23*(2), 118-127. doi:10.1264/jsme2.23.118

Heo, N. H., Park, S. C., & Kang, H. (2004). Effects of Mixture Ratio and Hydraulic Retention Time on Single-Stage Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Waste Activated Sludge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A, 39*(7), 1739-1756. doi:10.1081/ese-120037874

Holm-Nielsen, J. B., Lomborg, C. J., Oleskowicz-Popiel, P., & Esbensen, K. H. (2008). On-line near infrared monitoring of glycerol-boosted anaerobic digestion processes: evaluation of process analytical technologies. *Biotechnology Bioengineering, 99*(2), 302-313. doi:10.1002/bit.21571

Hong Wang, Mikko Vuorela, Anna-Leena Ker¨anen, Tuija M. Lehtinen, Anssi Lensu, Annimari Lehtom¨aki, & Jukka Rintala. (2010). Developmentofmicrobialpopulationsintheanaerobichydrolysis ofgrasssilageformethaneproduction. *FEMS Microbiol Ecol, 72*, 496-506.

Hu, Z. H., Yu, H. Q., & Zheng, J. C. (2006). Application of response surface methodology for optimization of acidogenesis of cattail by rumen cultures. *Bioresource Technology, 97*(16), 2103-2109. doi:10.1016/j.biortech.2005.09.025

Hui-ting, L., & Yong-fenga, L. (2010). *Performance of a hybrid anaerobic baffled reactor (HABR) treating brewery wastewater*. Paper presented at the IEEE 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Wuhan, China

Jafrudeen, & Naved, A. (2012). Stydy of widely used treatment technologies for hospital wastewater and their comparative analysis. *International Journal of Advances in Engineering & Technology, November*.

Jorgensen, P. J. (2009). *Biogas – green energy* (2 ed.). Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University 2009

K. Kayembe, L. Basosila, P. T. Mpiana, P. C. Sikulisimwa, & K. Mbuyu. (2013). Inhibitory Effects of Phenolic Monomers on Methanogenesis in Anaerobic Digestion. *British Microbiology Research Journal, 3*(1), 32-41.

Kangle, K. M., Kore, S. V., Kore, V. S., & Kulkarni, G. S. (2012). Recent Trends in Anaerobic Codigestion: A Review. *Universal Journal of Environmental Research and Technology, 2*(4), 210 - 219.

Karlsson, A., Truong, X. B., Gustavsson, J., Svensson, B. H., Nilsson, F., & Ejlertsson, J. (2011). Anaerobic treatment of activated sludge from Swedish pulp and paper mills--biogas production potential and limitations. *Environ Technol, 32*(13-14), 1559-1571. doi:10.1080/09593330.2010.543932

Kebreab, E., Dijkstra, J., Bannink, A., & France, J. (2009). Recent advances in modeling nutrient utilization in ruminants. *J Anim Sci, 87*(14 Suppl), E111-122. doi:10.2527/jas.2008-1313

Khanal, S. K. (2008). *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*. Singapore: Wiley-Blackwell., John Wiley & Sons, Ltd.

Kuusik, A., Pachel, K., Kuusik, A., & Loigu, E. (2014). Anaerobic co-digestion of sewage sludge with fish farming waste. doi:10.3846/enviro.2014.084

Lanari, D., & Franci, C. (1998). Biogas production from solid wastes removed from fish fram effluents. *Aquatic Living Resource, 11*(4), 289 - 295.

Larson, M. G. (2008). Analysis of variance. *Circulation, 117*(1), 115-121. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.107.654335

Le Tho Bach, Zafar Iqbal Bhatti, & Kenji Furukawa. (2002). Anaerobic treatment of sugary wastewater by the UASB process. *Japanese Journal of Water Treatment Biology, 38*(1), 11-20.

Lee, D. J., Lee, S. Y., Bae, J. S., Kang, J. G., Kim, K. H., Rhee, S. S., . . . Seo, D. C. (2015). Effect of volatile fatty acid concentration on anaerobic degradation rate from field anaerobic aigestion facilities treating food waste leachate in South Korea. *Journal of Chemistry, 2015*, 1-9. doi:10.1155/2015/640717

Lee, E., Bittencourt, P., Casimir, L., Jimenez, E., Wang, M., Zhang, Q., & Ergas, S. J. (2019). Biogas production from high solids anaerobic co-digestion of food waste, yard waste and waste activated sludge. *Waste Manag, 95*, 432-439. doi:10.1016/j.wasman.2019.06.033

Lerdrattranataywee, W., & Kaosol, T. (2015). Effect of Mixing Time on Anaerobic Co-digestion of Palm Oil Mill Waste and Block Rubber Wastewater. *Energy Procedia, 79*, 327-334. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.499

Leven, L., Nyberg, K., & Schnurer, A. (2012). Conversion of phenols during anaerobic digestion of organic solid waste--a review of important microorganisms and impact of temperature. *J Environ Manage, 95 Suppl*, S99-103. doi:10.1016/j.jenvman.2010.10.021

Li, H., Li, Y., & Li, C. (2017). Evolution of Humic Substances during Anaerobic Sludge Digestion. *Environmental Engineering and Management Journal, 16*(7), 1577-1582. doi:10.30638/eemj.2017.171

Lin, J., Zuo, J., Gan, L., Li, P., Liu, F., Wang, K., . . . Gan, H. (2011). Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China. *Journal of Environmental Sciences, 23*(8), 1403-1408. doi:10.1016/s1001-0742(10)60572-4

Liu, C., Wang, W., Anwar, N., Ma, Z., Liu, G., & Zhang, R. (2017). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of food waste under mesophilic and thermophilic conditions. *Energy fuel, 31*, 2976-2984.

Liu, X., Xu, Q., Wang, D., Zhao, J., Wu, Y., Liu, Y., . . . Yang, Q. (2018). Improved methane production from waste activated sludge by combining free ammonia with heat pretreatment: Performance, mechanisms and applications. *Bioresour Technol, 268*, 230-236. doi:10.1016/j.biortech.2018.07.109

Longo, S., Katsou, E., Malamis, S., Frison, N., Renzi, D., & Fatone, F. (2015). Recovery of volatile fatty acids from fermentation of sewage sludge in municipal wastewater treatment plants. *Bioresource Technology, 175*, 436-444. doi:10.1016/j.biortech.2014.09.107

Lu, J. (2006). Optimization of Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Using Thermophilic Anaerobic Pre-Treatment. from BioScience and Technology, BioCentrum-DTU Technical University of Denmark

Ma, H., Liu, H., Zhang, L., Yang, M., Fu, B., & Liu, H. (2017). Novel insight into the relationship between organic substrate composition and volatile fatty acids distribution in acidogenic co-fermentation. *Biotechnology Biofuels, 10*, 137-152. doi:10.1186/s13068-017-0821-1

Maamri, S., & Amrani, M. (2014). Biogas Production from Waste Activated Sludge Using Cattle Dung Inoculums: Effect of Total Solid Contents and Kinetics Study. *Energy Procedia, 50*, 352-359. doi:10.1016/j.egypro.2014.06.042

Malakahmad, A., Noor Ezlin, Z. B., & Sahrom, M. Z. (2011). Study on performance of a modified anaerobic baffled reactor to treat high strength wastewater. *Journal o f Applied Sciences, 11*(8), 1449-1452.

Maria Kosseva, & Colin Webb. (2013). *Food Industry Wastes: Assessment and Recuperation of Commodities*.

Marmara University. (2016). <Chapter7.pdf>. Retrieved 26 August 2016 http://mebig.marmara.edu.tr/Enve424/Chapter7.pdf

Meisam Tabatabaei, & Hossein Ghanavati. (2018). *Biogas: Fundamentals, Process, and Operation*: Springer.

Morgan, N. K., & Choct, M. (2016). Cassava: Nutrient composition and nutritive value in poultry diets. *Animal Nutrition, 2*(4), 253-261. doi:10.1016/j.aninu.2016.08.010

Mousavi, N., Najafpour, G. D., Bakhshi, Z., & Pishga, R. (2011). Performance Of Anaerobic Baffled Reactor For Biodegradation Of Phenol. *Iranica Journal of Energy & Environment*. doi:10.5829/idosi.ijee.2011.02.03.1519

Mrafkova, L., Hutoan, M., & Drtil, M. (2000). Behaviour of anaerobic baffled reactor treating nonacidied wastewater. *Chemical paper, 54*, 448 - 455.

Mulat, D. G., & Horn, S. J. (2018). Chapter 14. Biogas Production from Lignin via Anaerobic Digestion. In *Lignin Valorization* (pp. 391-412).

Murali, N., Srinivas, K., & Ahring, B. K. (2017). Biochemical Production and Separation of Carboxylic Acids for Biorefinery Applications. *Fermentation, 3*(2). doi:10.3390/fermentation3020022

Natchari Chuchat, & Wanwisa Skolpap. (2015). Biogas production from poultry slaughter house and food processing wastes by wicrowave thermal pretreatment. *Chiang Mai Journal of Science, 42*(2), 456-468.

Nkamga, V. D., Henrissat, B., & Drancourt, M. (2017). Archaea: Essential inhabitants of the human digestive microbiota. *Human Microbiome Journal, 3*, 1-8. doi:10.1016/j.humic.2016.11.005

Olukemi, A. B., & Ugoji, E. O. (2010). Production of biogas from starchy wastes. *Journal of Scientifirc Resource Development, 12*, 34 - 45.

Owamah, H. I., & Izinyon, O. C. (2015). The effect of organic loading rates (OLRs) on the performances of food wastes and maize husks anaerobic co-digestion in continuous mode. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 11*, 71-76. doi:10.1016/j.seta.2015.06.002

Owen, W. F., Stuckey, D. C., Healy, L. B., Jr., Young, L. Y., & McCarty, P. L. (1979). Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research, 13*, 485-492.

Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B., & Chaiprasert, P. (2010). Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. *biomass and bioenergy, 34*(8), 1117-1124. doi:10.1016/j.biombioe.2010.02.018

Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, P., & Chaiprasert, B. (2012). Enhanced biomethanation in co-digestion of cassava pulp and pig manure using a two-phase anaerobic system. *Journal of Sustainable Energy & Environment, 3*, 73 - 79.

Paudel, S., Kang, Y., Yoo, Y. S., & Seo, G. T. (2017). Effect of volumetric organic loading rate (OLR) on H2 and CH4 production by two-stage anaerobic co-digestion of food waste and brown water. *Waste Manag, 61*, 484-493. doi:10.1016/j.wasman.2016.12.013

Pavi, S., Kramer, L. E., Gomes, L. P., & Miranda, L. A. S. (2017). Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. *Bioresour Technol, 228*, 362-367. doi:10.1016/j.biortech.2017.01.003

Pereira, B. L. B., & Leonel, M. (2014). Resistant starch in cassava products. *Food Science and Technology (Campinas), 34*(2), 298-302. doi:10.1590/fst.2014.0039

Pereira, E., Napp, A. P., Allebrandt, S., Barbosa, R., Reuwsaat, J., Lopes, W., . . . Vainstein, M. H. (2019). Biodegradation of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in seawater by autochthonous microorganisms. *International Biodeterioration & Biodegradation, 145*. doi:10.1016/j.ibiod.2019.104789

Phukingngam, D., Chavalparit, O., Somchai, D., & Ongwandee, M. (2011). Anaerobic baffled reactor treatment of biodiesel-processing wastewater with high strength of methanol and glycerol: reactor performance and biogas production. *Chemical Papers, 65*(5). doi:10.2478/s11696-011-0061-y

Poliafico, M. (2007). *Anaerobic digestion: decision support software.* (Master degree), Cork institute of technology, Cork, Ireland,

Promphiphak, P., & Wongwuttanasatian, T. (2012). Biogas production from cassava waste cake in a two-stage anaerobic digestion system. *Advanced Materials Research, 512-515*, 351-355. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.512-515.351

Promthong S., Kanto U., Tirawattanawanich C., Tongyai S., Isariyodom S., & Markvichitr K. (2006). *Comparison of nutrient compositions and carbohydrate fractions of corn, cassava chip and cassava pellet ingredients: Animals*. Paper presented at the 44th Kasetsart University Annual Conference, Thailand.

Rajendran, K., Kankanala, H. R., Lundin, M., & Taherzadeh, M. J. (2014). A novel process simulation model (PSM) for anaerobic digestion using Aspen Plus. *Bioresour Technol, 168*, 7-13. doi:10.1016/j.biortech.2014.01.051

Rajni Hatti-Kaul, Gashaw Mamo, & Bo Mattiasson. (2016). *Anaerobes in Biotechnology*. Switzerland.

Robert G. Wetzel. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*: Academic Press.

Sasse, L. (1998). *Decentralised wastewater treatment in developing countries* (Bremen overseas research and development association Ed.).

Schievano, A., Tenca, A., Scaglia, B., Merlino, G., Rizzi, A., Daffonchio, D., . . . Adani, F. (2012). Two-stage vs single-stage thermophilic anaerobic digestion: comparison of energy production and biodegradation efficiencies. *Environmental Science Technology, 46*(15), 8502-8510. doi:10.1021/es301376n

Schnaars, K. (2012). What every operator should know about anaerobic digestion. from Water Environment Federation

Singh, H. N., Singh, T. S., & Verma, T. N. (2018). Experimental study of biogas production using starch-rich food waste at pilot scale. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 376*. doi:10.1088/1757-899x/376/1/012024

Srisertpol, J., Srinakorn, P., Kheawnak, A., Chamniprasart., K., & Srikaew, A. (2013). Estimation of biogas production from shrimp pond sediment using the artificial intelligence. *Applied Mechanics and Materials, 260* 695-700.

Stepanov, N., Senko, O., Perminova, I., & Efremenko, E. (2019). A New Approach to Assess the Effect of Various Humic Compounds on the Metabolic Activity of Cells Participating in Methanogenesis. *Sustainability, 11*(11). doi:10.3390/su11113158

Taylor & Francis Group, L. (2016). *Environmental Sustainability Using Green Technologies*. In V. Sivasubramanian (Ed.).

The Eco Ambassador. (2016). Staged Anaerobic Digestion. Retrieved 1 มิถุนายน 2559, from The Eco Ambassador http://www.theecoambassador.com/StagedAnaerobicDigestion.html

The Pennsylvania State University. (2020). 2.11 - The Lack of Fit F-test. from Department of Statistics https://online.stat.psu.edu/stat501/lesson/2/2.11

Tomasik, B. (2017). Microorganisms created by wastewater-treatment systems. https://reducing-suffering.org/microorganisms-wastewater-treatment/#Microorganism_composition

Toprak. (2016). Sequence batch reactor. Retrieved 1 June 2016 http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana07/epa02.html

Trisakti, B., Irvan, Adipasah, H., Taslim, & Turmuzi, M. (2017). Effect of Agitation on Acidogenesis Stage of Two-Stage Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent

(POME) into Biogas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 180*. doi:10.1088/1757-899x/180/1/012127

Turick, C. E., Peck, M. W., Chynoweth, D. P., Jerger, D. E., White, E. H., Zsufla, L., & Kenney, W. A. (1991). Methane fermentation of woody biomass. *Bioresource Technology, 37*, 141 - 147.

UCLA Institue for Digital Research and Education. (2020). Regression Analysis | SPSS Annotated Output. https://stats.idre.ucla.edu/spss/output/regression-analysis/

Vlyssides, A. (2004). Thermal-alkaline solubilization of waste activated sludge as a pre-treatment stage for anaerobic digestion. *Bioresource Technology, 91*(2), 201-206. doi:10.1016/s0960-8524(03)00176-7

Walker, A., & Ladislao, B. A. (2000). Energy from waste and wood. Retrieved 15 June 2016, from University of Edinburgh, http://energyfromwasteandwood.weebly.com/uploads/3/1/0/1/3101108/363361_orig.gif?281

Wang, L. K., Ivanov, V., Tay, J. H., & Hung, Y. T. (2010). *Handbook of envirnmental engineer*. In Vol. 10. *Environmental Biotechnology*. Retrieved from http://www.springer.com/gp/book/9781588291660

Wang, Q. Y., Tian, J., Kato, M. T., Rong, Y. J., He, Y. L., & Ji, F. (2018). Anaerobic co-digestion of wastes from fruit processing and activated sludge reactor in juice production industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 186*. doi:10.1088/1755-1315/186/3/012042

Wang, T., Zhang, D., Dai, L., Chen, Y., & Dai, X. (2016). Effects of Metal Nanoparticles on Methane Production from Waste-Activated Sludge and Microorganism Community Shift in Anaerobic Granular Sludge. *Sci Rep, 6*, 25857. doi:10.1038/srep25857

Webster, T. M., Smith, A. L., Reddy, R. R., Pinto, A. J., Hayes, K. F., & Raskin, L. (2016). Anaerobic microbial community response to methanogenic inhibitors 2-bromoethanesulfonate and propynoic acid. *Microbiologyopen, 5*(4), 537-550. doi:10.1002/mbo3.349

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

William P. Kovacik, Johannes C. M. Scholten, David Culley, Robert Hickey, Weiwen Zhang, & Fred J. Brockman. (2010). Microbial dynamics in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) bioreactor granules in response to short-term changes in substrate feed. *Microbiology, 156*, 2418–2427.

Xu, F., Li, Y., Ge, X., Yang, L., & Li, Y. (2018). Anaerobic digestion of food waste - Challenges and opportunities. *Bioresour Technol, 247*, 1047-1058. doi:10.1016/j.biortech.2017.09.020

Yap, S. D., Astals, S., Lu, Y., Peces, M., Jensen, P. D., Batstone, D. J., & Tait, S. (2018). Humic acid inhibition of hydrolysis and methanogenesis with different anaerobic inocula. *Waste Manag, 80*, 130-136. doi:10.1016/j.wasman.2018.09.001

Zabranska, J., & Pokorna, D. (2018). Bioconversion of carbon dioxide to methane using hydrogen and hydrogenotrophic methanogens. *Biotechnol Adv, 36*(3), 707-720. doi:10.1016/j.biotechadv.2017.12.003

Zahan, Z., Othman, M. Z., & Rajendram, W. (2016). Anaerobic Codigestion of Municipal Wastewater Treatment Plant Sludge with Food Waste: A Case Study. *Biomed Res Int, 2016*, 8462928. doi:10.1155/2016/8462928

Zhang, W., Dai, K., Xia, X. Y., Wang, H. J., Chen, Y., Lu, Y. Z., . . . Zeng, R. J. (2018). Free acetic acid as the key factor for the inhibition of hydrogenotrophic methanogenesis in mesophilic mixed culture fermentation. *Bioresource Technology, 264*, 17-23. doi:10.1016/j.biortech.2018.05.049

Zhou, A., Zhang, J., Wen, K., Liu, Z., Wang, G., Liu, W., . . . Yue, X. (2016). What could the entire cornstover contribute to the enhancement of waste activated sludge acidification? Performance assessment and microbial community analysis. *Biotechnol Biofuels, 9*, 241. doi:10.1186/s13068-016-0659-y

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ *5* พลังงานก๊าซชีวภาพ (1 ed.).

กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2557). ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ.2557.

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ก. (2561). คู่มือวิชาการระบบบำบัดฎ้าเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่มที่ *2*.

กัลยาณี เต็งพงศธร. (2554). เอกสารประกอบการสอนวิชาการวางแผนการทดลองทางอุตสาหกรรมเกษตร.

ธัญพิชชา บุญบาง วรรธกิจ เกษสงคราม และรจพรรณ นิรญัศลิป์. (2559). การผลิตก๊าซชีวภาพจากฏ้าเสียจากกระบวนการผลิตเส้นขนมจีนโดยการบ้าบัดฏ้าเสียจากจุลินทรีย์ (อีเอ็ม) Paper presented at the การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 12th Conference On Energy Network of Thailand (E-NETT) ณ โรงแรมวังจันทน์ ริเวอร์วิว จังหวัดพิษณุโลก.

ธิภาพร ศิรินุกูลวัฒนา. (2555). การบำบัดน้ำเสียซีโอดีต่ำด้วยระบบแอนแอโรบิกฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้เม็ดยางเป็นวัสดุตัวกลางโดยไม่มีการหมุนเวียนน้ำภายใน. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บริษัทพลังงานธรรมชาติ จำกัด. (2555). ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับก๊าซธรรมชาติ. Retrieved 16 พฤศจิกายน 2558, from บริษัทพลังธรรมชาติจำกัด http://www.np-biogas.com/th_what_biogas.htm

ปนัดดา นิลอาญา. (2552). การบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Master degree), ChulalonnKorn University,

ประสิทธิ์ ศรีนคร และคณะ. (2554). การบำบัดตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน. วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม *7*(1), 10 - 21.

พัชรินทร์ ราโช และบุญชัย วิจิตรเสถียร. (2555). การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อบ าบัดตะกอนส่วนเกินจาก ระบบตะกอนเร่งด้วยกระบวนการหมุนเวียนค่าความเป็นด่าง. Retrieved from

วรพจน์ คำจันลา และรัชพล สันติวรากร. (2555). การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนบ่อพักน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมัน Paper presented at the การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ.

วิกีพีเดียสารานุกรมเสรี. (2558). In (30 ธันวาคม 2558 ed.).

วิชัย, ส., รัญชน์, อ., & นพดล, ค. (2560). การศึกษาการเปรียบเทียบระบบจำหน่ายไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อลดความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมด. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ *54,* สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์.

สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. (2547). คู่มือการจัดทำ การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์. In.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สถาบันอาหารอุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิเพื่อสถาบันอาหาร. (2554). Thailand Food Industry Profiles: อุตสาหกรรมมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์เกี่ยวเนื่อง. Retrieved 16 พฤศจิกายน 2558 http://fic.nfi.or.th

สมภพ มานะรังสรรค์. (2543). โครงการศึกษาวิจัยแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมการเกษตรแบบครบวงจร นำเสนอโดย สำนักบริการธุรกิจและที่ปรึกษา สถาบันทรัพย์สินทางปัญญาแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกับ ศูนย์บริการวิชาการเศรษฐศาสตร์ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. สถาบันทรัพย์สินทางปัญญาแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สำนักบริการธุรกิจและที่ปรึกษา; มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. ศูนย์บริการวิชาการเศรษฐศาสตร์.

สมาคมโรงงานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไทย. (2563). ราคามันสำปะหลัง วันที่ 10 เมษายน 2563. http://thaitapioca.org/

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2535). คู่มือการวิเคราะห์น้ำเสีย. กรุงเทพ: จุฬาลงกรณ์มหวิทยาลัย.

สำนักงานประมงจังหวัดระยอง. (2559). รายงานฟาร์มเลี้ยงระดับภาคตะวันออก จังหวัดระยอง. Retrieved from http://www4.fisheries.go.th/local/index.php/main/site/fpo-rayong

สุรีลักษณ์ รอดทอง. (2557). มีเทนจากกากหัวมันและสำปะหลังเพื่อใช้เป็นพลังงาน. Retrieved from https://tarr.arda.or.th/preview/item/50755?keyword=สุรีลักษณ์%20รอดทอง

สุวลักษณ์ อัศวสันติ, & อรรณพ นพรัตน์ และรัชนีพร อ้ายตั้ง. (2549). การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปเม็ดสาคูโดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบถังหมุดชนิดไม่ต่อเนื่อง. Retrieved 16 พฤศจิกายน 2558 http://www.kmutt.ac.th/rippc/batchdr.htm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Piyavadee Srivichai
วัน เดือน ปี เกิด	30 October 1980
สถานที่เกิด	Autaradit
วุฒิการศึกษา	Master of Science Programme in Environmental Sanitation (M.Sc., Environmental Sanitation), Department of Environmental Health Sciences, Faculty of Public Health Mahidol University 420/1 Rajchavithee Road. Rajthevee, Bangkok 10400, Thailand
ที่อยู่ปัจจุบัน	21/2 Soi.14 Jassadabodin Road, Tha-it, Muang, Autaradit, 53000
ผลงานตีพิมพ์	1. Piyavadee Srivichai and Orathai Chavalparit (2019). Optimization of biogas production in co-digestion of waste activated sludge modified tapioca (Conference Proceeding). The 9th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE 2019) Tokyo, Japan, 20-22 November 2019. 1160-1166. 2. Piyavadee Srivichai and Orathai Chavalparit (2020). Optimization of biogas production in co-digestion of waste activated sludge modified tapioca. International Journal of GEOMATE. 18 (67). 148-155.doi: https://doi.org/10.21660/2020.67.9356 3.Piyavadee Srivichai and Orathai Chavalparit (2020). Co-digestion of modified tapioca starch sludge and shrimp pond sediment as a method to improve system stability and biogas production. ScienceAsia. 46. 119-127. doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.2020.017

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University