รายงานการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องโดยใช้เทคโนโลยีการหมักร่วม

Enhanced Efficiency of Biogas Production Process from Cannery Seafood Wastewater by Using the Co-digestion Technology

เกียรติศักดิ์ พันธ์พงศ์ และคณะ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก ทุนงบประมาณแผ่นดิน (วช.)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ชื่องานวิจัย การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องโดยใช้เทคโนโลยีการหมักร่วม
ผู้วิจัย เกียรติศักดิ์ พันธ์พงศ์
คณะ วิทยาลัยนวัตกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ปี 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และพัฒนาการใช้เทคโนโลยีการหมักร่วม (Co-digestion technology) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง โดยการใช้กากน้ำตาล (Molasses) และของเสียกลีเซอรอล (Glycerol waste) เป็นสารหมักร่วม (Co-substrate) ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุดในการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลให้ผลได้มีเทนและผลิตมีเทนสูงสุดที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (v/v) มีค่าเท่ากับ 334 ml CH_4/g COD และ 17 m^3 CH_4/m^3 Wastewater และการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลให้ผลได้มีเทนสูงสุดที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 5 (v/v) มีค่าเท่ากับ 339 ml CH_4/g COD และ43 m^3 CH_4/m^3 Wastewater โดยมีความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 55-70 ซึ่งที่อัตราส่วนดังกล่าวเป็นการหมักร่วมแบบส่งเสริมกัน (Synergism) หลังจากนั้นทำการศึกษาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตมีเทนในระบบต่อเนื่องโดยการเปรียบเทียบชนิดของถังปฏิกรณ์ระหว่าง CSTR และ PFR ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 30 วันของถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR สามารถให้ผลได้มีเทนและอัตราการผลิตมีเทนสูงสุดในการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (v/v) มีค่าเท่ากับ 120 ml CH_4/g COD และ 225 ml CH_4/L/d และการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอล ที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (v/v) ให้ผลได้มีเทนและอัตราการผลิตมีเทนสูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 200 ml CH_4/g COD และ 425 ml CH_4/L/d ตามลำดับ โดยมีความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 55-65 จากผลการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ลดลง อัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลได้มีเทนลดลง ประชากรจุลินทรีย์ในการผลิตมีเทนจากการหมักร่วมแบบต่อเนื่องด้วยเทคนิค DGGE ของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (v/v) ในทุกระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ พบแบคทีเรียกลุ่ม *Desulfurivibrio* sp. และ *Christensenella* sp. เป็นกลุ่มเด่น สำหรับโครงสร้างประชากรอาร์เคียกลุ่มเด่น คือ *Methanothrix* sp. และ *Methanosaeta* sp. ในขณะที่การหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (v/v) ในทุกระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ พบแบคทีเรียกลุ่ม *Desulfurivibrio* sp. และ

Alteromonas sp. เป็นกลุ่มเด่น สำหรับโครงสร้างประชากรอาร์เคียกลุ่มเด่น คือ *Methanothrix* sp. และ *Methanosaeta* sp. หลังจากนั้นการเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ขนาด 200 ลิตร เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับระบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 30 วัน มีผลได้มีเทนและอัตราการผลิตมีเทนสูงสุดเท่ากับ 164.38 mlCH_4/gCOD และ 580 ml CH_4/L/day (0.58 L CH_4/L/day) ที่ร้อยละความเข้มข้นของก๊าซมีเทน 63.05

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

Research Title Enhanced Efficiency of Biogas Production Process from Cannery Seafood Wastewater by Using the Co-digestion Technology
Researcher Kiattisak Panpong
Faculty College of Innovation and Management, Songkhla Rajabhat University
Year 2018

Abstract

The objectives of this research were to determine the methane production potential and to develop using co-digestion technology for increased methane production of cannery seafood wastewater (CSW). Using molasses (ML) and glycerol waste (GW) was the co-substrates. The results showed that, the optimal ratio in anaerobic co-digestion between CSW and ML was 99:1 (v/v), which had methane yield and maximum methane production as 334 ml CH_4/g COD and 17 m^3 CH_4/m^3 Wastewater. Additionally, 99:5 (v/v) was the optimal ratio of anaerobic co-digestion between CSW and GW, which generated had methane yield and maximum methane production as 339 ml CH_4/g COD and 43 m^3 CH_4/m^3 Wastewater. The composition of methane was in the range of 55-70%. At this ratio, the co-digestion process was synergism. After that, hydraulic retention time (HRT) was studied in continuous process in the laboratory by comparison between CSTR and PFR reactors. The results showed that, at HRT 30 days of CSTR reactor could produce maximum methane yield and methane production as 110 ml CH_4/g COD and 225 ml CH_4/L/d for anaerobic co-digestion of CSW and ML (99:1 (v/v) ratio). In the anaerobic co-digestion between CSW and GW (99:5 (v/v) ratio) generated maximum methane yield and methane production as 162 ml CH_4/g COD และ 425 ml CH_4/L/d. Both two ratio had the composition of methane in the range 55-65%. The results of this study showed that when HRT reduced, feeding enhanced resulting to methane production reduced. Microbial community structure in continuous methane production of anaerobic co-digestion of CSW with ML at a ratio of 95 : 1 (v/v) by Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (PCR-DGGE) were dominated by bacteria consisting of *Desulfurivibrio* sp. and *Christensenella* sp. Archaea community was dominated by *Methanothrix* sp. and *Methanoseata* sp. While anaerobic co-digestion of CSW with GW at a ratio of 99 : 5 (v/v) were dominated by

bacteria consisting of *Desulfurivibrio* sp. and *Alteromonas* sp. Archaea community was dominated by *Methanothrix* sp. and *Methanoseata* sp. Finally, CSTR reactor was scale-up size was 200 L for operation in continuous system. The objective of scale-up CSTR reactor was comparison the results with CSTR reactor in labolatory scale. The results showed that, at HRT 30 days had maximum methane yield and methane production as 164.38 mlCH_4/ gCOD and 580 ml CH_4/L/day (0.58 L CH_4/L/day) at 63.05% of methane component.

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีทุกคน ทั้งด้านข้อเสนอแนะทางวิชาการ แรงงาน หรืออำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือสถานที่วิจัย สุดท้ายขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาและมหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง ที่ได้สนับสนุนสถานที่ทำวิจัยและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยทำให้โครงการวิจัยนี้สามารถดำเนินการแล้วเสร็จ และขอขอบคุณสยามอินเตอร์เนชั่นแนลฟู้ด จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย

คณะผู้วิจัยกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

(ลงชื่อ) .....

(ดร.เกียรติศักดิ์ พันธ์พงศ์)

สังกัด วิทยาลัยนวัตกรรมและการจัดการ

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

วันที่..8.. เดือน.. สิงหาคม.. พ.ศ...2561....

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	**ก**
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	**ค**
กิตติกรรมประกาศ	**จ**
สารบัญ	**ฉ**
สารบัญตาราง	**ซ**
สารบัญรูปภาพ	**ญ**
บทที่ 1 บทนำ	
ภูมิหลัง	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
สมมุติฐานของงานวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 น้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเล	5
2.2 ปฏิกริยาพื้นฐานสำหรับการย่อยแบบไร้อากาศ	6
2.3 การหมักร่วม	12
2.4 สารหมักร่วม	13
2.5 ศักยภาพในการผลิตมีเทน	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำทิ้งและสารหมักร่วม	20
3.2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำทิ้งและสารหมักร่วมที่ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น	20
3.3 การศึกษาในแบบจำลองแบบต่อเนื่องระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม	21
3.4 การศึกษาโครงสร้างของกลุ่มประชากรของจุลินทรีย์ภายในตะกอนจุลินทรีย์ (Microbial community analysis) จากถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ระดับห้องปฏิบัติการ	21

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การศึกษาการนำเทคโนโลยีการหมักร่วมไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม 23

3.6 วิธีวิเคราะห์และเก็บตัวอย่าง 23

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำทิ้งและสารหมักร่วม 24

4.2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำทิ้งและสารหมักร่วมที่ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น 26

4.3 การศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR และ PFR โดยใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม 36

4.4 การศึกษาโครงสร้างของกลุ่มประชากรของจุลินทรีย์ภายในตะกอนจุลินทรีย์ (Microbial community analysis) จากถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ระดับห้องปฏิบัติการ 49

4.5 การศึกษาการนำเทคโนโลยีการหมักร่วมไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR ขนาด 200 ลิตร 59

4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ 63

บทที่ 5 สรุปผล ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล 65

5.2 ข้อเสนอแนะ 66

เอกสารอ้างอิง **67**

ภาคผนวก **71**

ประวัติผู้วิจัย **82**

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง	6
2.2	Fermentative bacteria สกุลหลักในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (AD)	8
2.3	ข้อดีและข้อจำกัดเทคโนโลยีการหมักร่วม	13
2.4	องค์ประกอบทางเคมีของกากน้ำตาล (Molasses: ML) และของเสียกลีเซอรอล (Glycerol Waste: GW)	14
2.5	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการหมักร่วมแบบไร้อากาศ (Anaerobic co-digestion)	16
3.1	อัตราส่วนของน้ำทิ้งต่อสารหมักร่วมที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กากน้ำตาล ของเสียกลีเซอรอล และกล้าเชื้อ	23
4.1	องค์ประกอบของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องของเสียกลีเซอรอล กากน้ำตาล และกล้าเชื้อ	26
4.2	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ต่อผลได้มีเทนของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กากน้ำตาล และของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน	31
4.3	อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR) ในระบบแต่ละระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT)	61

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญภาพ

รูปภาพ		หน้า
2.1	จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในวิถีแมทาบอลิซึมของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ	6
2.2	กระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศ	7
2.3	กระบวนการผลิตไบโอดีเซล	15
2.4	ชุดวิเคราะห์ BMP	15
4.1	ปริมาณมีเทนสะสม (A) และผลได้มีเทนจากการหมักร่วมน้าทิ งโรงงานแปรรูปอาหาร ทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาล (B)	28
4.2	ผลผลิตมีเทนจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาล (A) และความเข้มข้นของมีเทน (B)	29
4.3	ปริมาณมีเทนสะสมจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องโดยการหมักร่วมกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1; T-MP (Total Methane Production), CSW-MP (Canned Seafood Wastewater Methane Production), ML-MP (Molasses (1 %) Methane Production, Syn-MP (Synergistic Methane Production)	30
4.4	ปริมาณมีเทนสะสม (A) และผลได้มีเทน (B) จากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับของเสียกลีเซอรอล (GW)	33
4.5	ผลผลิตมีเทน (A) และความเข้มข้นของมีเทน (B) จากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอล	34
4.6	ปริมาณมีเทนสะสมจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง โดยการหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล ที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5; T-MP (Total Methane Production), CSW-MP (Canned Seafood Wastewater Methane Production), GW-MP (Glycerol Waste (5%) Methane Production, Syn-MP (Synergistic Methane Production	35
4.7	อัตราการผลิตมีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR	38
4.8	ผลได้มีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปภาพ **หน้า**

4.9 ร้อยละความเข้มข้นของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR 39

4.10 พีเอชสุดท้ายของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR 41

4.11 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR 42

4.12 อัตราการผลิตมีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ PFR 45

4.13 ผลได้มีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ PFR 45

4.14 ร้อยละความเข้มข้นของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ PFR 46

4.15 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสีย กลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ PFR (R1 : 99%CSW + 1%ML) 47

4.16 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ PFR (R2 : 95%CSW + 5%ML) 47

4.17 พีเอชสุดท้ายของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในถังปฏิกรณ์แบบ PFR 48

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปภาพ **หน้า**

4.18 โครงสร้างประชากรแบคทีเรียจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ 53

4.19 โครงสร้างประชากรแบคทีเรียจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ 54

4.20 โครงสร้างประชากรแบคทีเรียจากการหมักน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องที่อัตราส่วนร้อยละ100 (Control) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ 55

4.21 โครงสร้างประชากรอาร์เคียจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วน ร้อยละ 99 : 1 (R1) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ 56

4.22 โครงสร้างประชากรอาร์เคียจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ 57

4.23 โครงสร้างประชากรอาร์เคียจากการหมักน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องที่อัตราส่วนร้อยละ 100 (Control) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ 58

4.24 ก๊าซมีเทนรายวันของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95%CSW+5%GW ในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์แตกต่างกัน 59

4.25 อัตราการผลิตมีเทนรายวันของไฮโดรเจนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95%CSW+5%GW ในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์แตกต่างกัน 60

4.26 ร้อยละมีเทนรายวันของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95%CSW+5%GW ในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์แตกต่างกัน 60

4.27 ผลได้มีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95%CSW+5%GW ในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์แตกต่างกัน 62

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปภาพ **หน้า**

4.28 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายของไฮโดรเจน และมีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลในถังปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน 62

4.29 พีเอชสุดท้ายของการหมักร่วมมีเทนแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลในถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน 63

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ปจจุบันไดเกิดสภาวะวิกฤตการณผันผวนดานพลังงานโดยเฉพาะราคาน้ำมันในตลาดโลกซึ่งมีแนวโน้มสูงมาโดยตลอด สาเหตุหลักมาจากการการบริโภคน้ำมันของทั้งโลกที่ผ านมาเพิ่มสูงขึ้นอย่างตอเนื่อง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการขยายตัวของเศรษฐกิจโลกสำหรับประเทศไทยความตองการใชพลังงานได้ขยายตัวเพิ่มสูงขึ้นตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจเชนกัน แต่พบว่ามีแหลงพลังงานที่ค่อนข่างจำกัดรวมทั้งสัดสวนการใช้พลังงานภายในประเทศในปจจุบันยังไมเหมาะสมจึงยังต่องพึ่งพิงการนำเข่าน้ำมันดิบจากตางประเทศจึงยากที่ประเทศไทยจะหลีกเลี่ยงผลกระทบจากภาวะความผันผวนของราคาน้ำมันที่มีแนวโน้มนับวันจะสูงขึ้นโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นจากปญหาดังกลาว ขางต่นทำใหประเทศตางๆ ที่ไมมีแหลงน้ำมันเปนของตนเองรวมทั้งประเทศไทยต่องเสาะแสวงหาน้ำมันเชื้อเพลิงและแหล งพลังงานทดแทนจากทรัพยากรที่มีอยูภายในประเทศที่เป็นพลังงานสะอาด และมีความยั่งยืน ทั้งนี้เพื่อทดแทนการนำเข่าและเพื่อความมั่นคงทางพลังงานของประเทศแหลงพลังงานอื่นๆที่มีความนาสนใจมีมากโดยเฉพาะอยางยิ่งพลังงานทดแทนที่ได้จากการบำบัดของเสียอินทรีย์ซึ่งสามารถเปลี่ยนของเสียซึ่งเป็นปญหาสิ่งแวดล้อมให้กลายเป็นสินทรัพย์ได้ วิธีการดังกล่าวคือการใช้วิธีการบำบัดทางชีวภาพซึ่งเป็นการบำบัดของเสียและยังได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้อีกด้วย ปจจุบันก๊าซชีวภาพเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่กำลังได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ โดยส่วนใหญ่ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจากการหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ เช่น น้ำทิ้งและกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงกากของเสียจากชุมชน ด้วยวิธีการทางชีวภาพ (Biological Treatment) ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Condition) ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) (Shafiei, et al., 2013) องค์ประกอบส่วนใหญ่ของ "ก๊าซชีวภาพ" ประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณร้อยละ 60-65 โดยปริมาตร ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 34-39 และก๊าซอื่น ๆ ประมาณร้อยละ 1 เช่น ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ดังนั้นก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อให้ความร้อนและผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในอนาคตอันใกล้ (Ward, et al., 2008). นอกจากได้พลังงานแล้วการย่อยสลายแบบไร้อากาศยังมีข้อดี คือ กำจัดสารอินทรีย์ได้สูง ใช้พลังงานน้อย ตะกอนส่วนเกินเกิดขึ้นน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการย่อยสลายแบบใช้อากาศ (Chowdhury et al., 2010; Serrano et al., 2013)การใช้พลังงานของประเทศไทยได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี 1980 เนื่องจากการเติบโตทางเศรษฐกิจทำให้มีการขยายตัวของอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุทำให้อัตราความต้องการใช้พลังงานของประเทศเพิ่มขึ้น ปัจจุบันประเทศไทยนำเข้าน้ำมันดิบเป็นจำนวนมากแต่ยังไม่เพียงต่อความต้องการใช้ภายในประเทศต้องมีการนำเข้าปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี ปัจจุบันการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ของ

ประเทศไทย เช่น ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหินและไฟฟ้า เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 ในขณะที่การใช้พลังงานทดแทนรวม เช่น ไม้ ถ่าน แกลบและก๊าซชีวภาพ มีปริมาณเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.3 (Jaruwongwittaya & Chen, 2010) โดยเฉพาะก๊าซชีวภาพซึ่งกำลังได้รับความสนใจจากทั่วโลกเนื่องจากสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายประเภทมีศักยภาพให้พลังงานสูงและเปลี่ยนเป็นพลังงานอื่นได้ง่ายการปรับปรุงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ให้เป็นพลังงานที่สะอาดและมีคุณภาพสูงขึ้นนั้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจเพราะสามารถพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานที่ยังยืนของประเทศในอนาคตได้

โรงงานรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่สร้างรายได้หลักให้กับประเทศไทยในฐานะของผู้ส่งออก ซึ่งโรงงานส่วนใหญ่ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทางภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศไทย เนื่องจากบริเวณดังกล่าวใกล้กับแหล่งวัตถุดิบ ในกระบวนการผลิตอาหารทะเลบรรจุกระป๋องต้องใช้น้ำในปริมาณมากจึงส่งผลให้มีปริมาณน้ำทิ้งออกจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมากเช่นกัน Palenzuela-Rollon (1999) รายงานว่าในกระบวนการผลิตปลาซาดีนและปลาทูน่าบรรจุกระป๋องมีน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเกิดขึ้นประมาณ 14-20 ลบ.ม.ต่อตันของวัตถุดิบ ซึ่งคุณลักษณะของน้ำทิ้งประกอบด้วยค่าบีโอดี 100–3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอดี 1,000–18,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและไนโตรเจน 80–1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Chowdhury et al., 2010) โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานประเภทนี้จะใช้ระบบตะกอนเร่ง บ่อเติมอากาศ บ่อปรับเสถียร เป็นต้น แต่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศยังได้รับความนิยมน้อยเนื่องจากปัญหาของปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนและความเข้มข้นของเกลือโซเดียมในน้ำทิ้งสูงซึ่งสารดังกล่าวส่งผลต่อการยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศหรือจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องจะมีปริมาณของโปรตีนและไขมันสูงซึ่งมีแนวโน้มจะถูกย่อยสลายกลายเป็นแอมโมเนียไนโตรเจนได้อย่างรวดเร็วและเป็นจำนวนมากในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งสารดังกล่าวมีผลโดยตรงในการยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการบำบัดน้ำทิ้งลดลง (Batstone et al., 2002; Chen et al., 2008) โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียในช่วง 1.7-14 กรัมต่อลิตร มีศักยภาพในการยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนร้อยละ 50 (Chen et al., 2008; Zeshan & Karthikeyan, 2012) นอกจากนี้ความเค็มยังเป็นหนึ่งในปัญหาของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนจะถูกยับยั้งเมื่อความเข้มข้นของเกลือโซเดียมเกิน 10 กรัมต่อลิตร(Chowdhury et al., 2010) ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณน้อยไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนก่อสร้างระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ทำให้โรงงานแปรรูปอาหารทะเลส่วนใหญ่จึงไม่นิยมใช้ระบบนี้ อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวจะถูกแก้ไขโดยการใช้เทคโนโลยีการหมักร่วม (Co-digestion technology) คือการนำน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องหมักร่วมกับสารอินทรีย์ประเภทอื่นที่เป็นแหล่งคาร์บอนภายนอก (External carbon source) ซึ่งข้อดีของเทคโนโลยีการหมักร่วม คือ เพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งในรูปของซีโอดีและบีโอดี เจือจางสารพิษที่มีผลต่อของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนในน้ำทิ้ง ส่งผลให้ผลผลิตมีเทน (Methane yield) สูงขึ้น(Kangle et al., 2012; Hosseini Koupaie et al., 2014) ดังนั้นขั้นตอนการคัดเลือกสารหมักร่วม (Co-substrate) มีความจำเป็นมากต่อประสิทธิภาพของกระบวนการหมักร่วม เนื่องจากการเลือกใช้สารหมักร่วมที่เหมาะสมในปริมาณที่พอเหมาะจะทำให้

กระบวนการหมักร่วมเป็นแบบส่งเสริมกัน (positive synergisms) ส่งผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเทคโนโลยีการหมักร่วมมาพัฒนาและใช้กับน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาความเป็นไปได้และพัฒนาการใช้เทคโนโลยีการหมักร่วม (Co-digestion technology) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง โดยการใช้กากน้ำตาล (Molasses) และของเสียกลีเซอรอล (Glycerol waste) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เป็นสารหมักร่วม (Co-substrate) โดยแบ่งย่อยวัตถุประสงค์หลักออกเป็นข้อๆได้ดังนี้

1. เพื่อคัดเลือกสารหมักร่วมที่ดีที่สุดที่ทำให้กระบวนการหมักร่วมเป็นแบบส่งเสริมกัน (positive synergisms) ในการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง

2. เพื่อศึกษาถึงอัตราส่วนของการหมักร่วมและระยะเวลาการหมักที่เหมาะสมระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องและสารหมักร่วม

3. เพื่อคัดเลือกชนิดและรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่มีความเหมาะสมกับการหมักร่วมมากที่สุด

4. เพื่อศึกษาถึงประชากรหรือกลุ่มของจุลินทรีย์ที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์

5. เพื่อศึกษาการนำเทคโนโลยีการหมักร่วมไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการและระดับถังปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร และศึกษาไคเนติกเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการขยายขนาด

สมมติฐานของการวิจัย

การใช้เทคโนโลยีการหมักร่วม(Co-digestion technology) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง โดยการใช้กากน้ำตาล (Molasses) และของเสียกลีเซอรอล (Glycerol waste) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เป็นสารหมักร่วม (Co-substrate)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงชนิดของสารหมักร่วมที่ดีที่สุดที่ทำให้กระบวนการหมักร่วมเป็นแบบส่งเสริมกัน (Positive synergisms) ทำให้การผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นได้มากที่สุด

2. ทราบถึงอัตราส่วนและระยะเวลาการหมักที่เหมาะสมระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องและสารหมักร่วม ที่ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น

3. ทราบถึงชนิดและรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่มีความเหมาะสมกับการหมักร่วมมากที่สุด

4. ทราบถึงลักษณะประชากรหรือกลุ่มของจุลินทรีย์ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการดำเนินระบบ

5. สามารถนำผลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการมาเป็นข้อมูลและพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรมหรือใช้เป็นต้นแบบในการก่อสร้างระบบใหม่สำหรับโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องต่อไป

ขอบเขตของการวิจัย

1. สำรวจข้อมูลเบื้องต้น โดยคำนึงถึงปริมาณ หาได้ง่าย เป็นของเสียที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจต่ำ ซึ่งของเสียที่ใช้ในการศึกษาสำหรับใช้เป็นวัสดุหมักร่วม คือ กากน้ำตาลและของเสียกลีเซอรอล ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ย่อยได้ง่าย และการเก็บรักษาทำได้ง่ายไม่ยุ่งยาก

2. นำของเสียทั้ง 2 ประเภท มาทำการทดลองหาศักยภาพในการผลิตมีเทน (Biochemical Methane Potential: BMP) เพื่อหาชนิดของของเสียและอัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องต่อของเสียที่มีศักยภาพที่ดีที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพ

3. เลือกอัตราส่วนของน้ำทิ้งต่อของเสียที่เหมาะสมที่สุด เพื่อทำการทดลองในแบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR และ PFR โดยใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

4. ขยายผลการทดลองในถังปฏิกรณ์ ที่คัดเลือกจากข้อ 3 ขนาด 200 ลิตร โดยศึกษากับอัตราส่วนที่เหมาะสม ในกระบวนการหมักร่วม เพื่อดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพในการดำเนินระบบในระยะยาว เพื่อเป็นข้อมูลและพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรมหรือใช้เป็นต้นแบบในการก่อสร้างระบบใหม่สำหรับโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องต่อไป

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเล

จากปัญหาของปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนความเข้มข้นของเกลือโซเดียมในน้ำทิ้งสูงและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งในรูปของซีโอดีและบีโอดีต่ำ คือ ข้อจำกัดของการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าวเพื่อให้ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากขึ้นจนมีความเป็นไปได้และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนก่อสร้างระบบต่อไปในอนาคต ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแสดงในตารางที่ 2.1 โดยวิธีการแก้ปัญหา คือ การใช้เทคโนโลยีการหมักร่วม (Co-digestion technology) เข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการนำน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องหมักร่วมกับกากกน้ำตาลและของเสียกลีเซอรอล ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนภายนอก เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion process) ซึ่งเหตุผลสำคัญในการใช้เทคโนโลยีการหมักร่วม คือ เพิ่มแหล่งคาร์บอนภายนอก (External carbon source) เพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งในรูปของซีโอดีและบีโอดี เจือจางสารพิษในระบบและปรับปรุงให้ผลผลิตมีเทน (Methane yield) สูงขึ้น ถ้ากระบวนการหมักร่วมเป็นแบบส่งเสริมกัน (positive synergisms) (Kangle et al., 2012; Hosseini Koupaie et al., 2014) นอกจากนี้เทคโนโลยีการหมักร่วม ยังช่วยปรับปรุงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ในระบบให้มีความสมดุล เนื่องจากค่าอัตราส่วน C/N มีความสำคัญต่อเสถียรภาพของกระบวนเพราะว่าเป็นตัวกำหนดคุณภาพของจุลินทรีย์ภายในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ถ้าอัตราส่วน C/N สูงเกินไปไนโตรเจนจะถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว หากมีไนโตรเจนไม่เพียงพอ อัตราการเกิดเซลล์จุลินทรีย์จะลดลง ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้น้อยลง แต่ถ้าหากอัตราส่วน C/N ต่ำเกินไปจะทำให้ไนโตรเจนมากเกินความจำเป็น จุลินทรีย์จะย่อยสลายไนโตรเจนส่วนเกิน ก่อให้เกิดแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งอาจจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของระบบได้ โดยอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมและช่วยเพิ่มผลผลิตมีเทน (Methane yield) ให้สูงขึ้น คือ 25-32 (Angelidaki & Ellegaard, 2003)

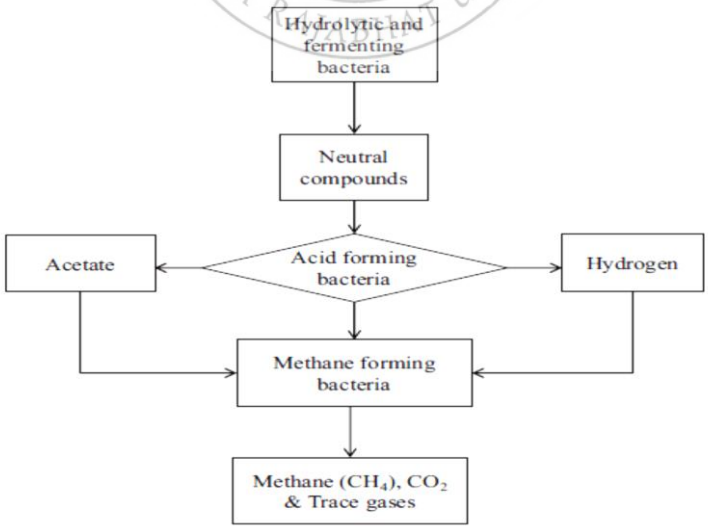
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (Canned Seafood Wastewater: CSW)

องค์ประกอบ	**CSW**
pH	6.30
COD(mg/L)	10,400
VFA(mg/L)	2,230
TN(mg/L)	870
TP(mg/L)	53.6
TS(g/L)	9.37
VS(g/L)	7.76
Protein(g/L)	7.43
Carbohydrate(g/L)	7.91
Lipids(g/L)	0.13
Glucose (mg/l)	-
C/N ratio	11

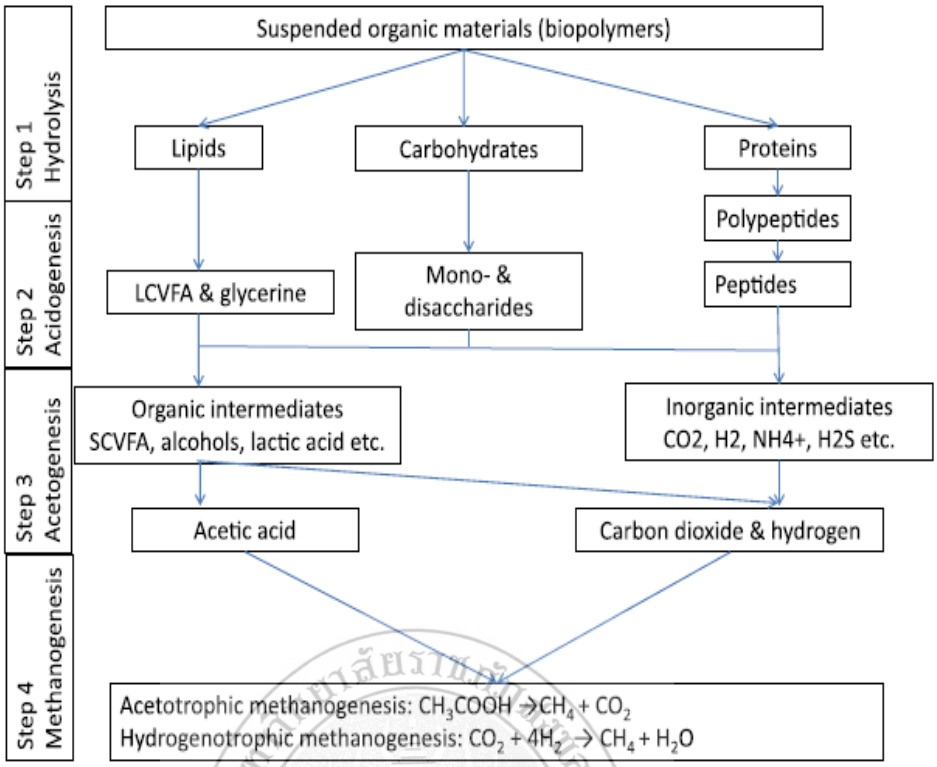
ที่มา : Panpong et al., 2014

2.2 ปฏิกิริยาพื้นฐานสำหรับการย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion: AD)

การย่อยสลายแบบไร้อากาศ (AD) เป็นกระบวนที่มีการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ที่สามารถจำแนกได้ตามวิถีแมทาบอลิซึม (รูปที่ 2.1) ปฏิกิริยาที่สำคัญของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนของการย่อยสลายและการเปลี่ยนแปลงชีวมวลเป็นก๊าซมีเทน คือ hydrolysis acidogenesis acetogenesis และ methanation (Okudoh et al., 2014) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2.1 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในวิถีแมทาบอลิซึมของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ
ที่มา : (Amigun, 2008)



รูปที่ 2.2 กระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศ
ที่มา: Okudoh et al., 2014

2.2.1 ขั้นตอนของการย่อยสลายและการเปลี่ยนแปลงชีวมวลเป็นก๊าซมีเทน

(a) กระบวนการย่อย (Hydrolysis) เป็นขั้นแรกของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีโมเลกุลใหญ่ ให้สามารถละลายน้ำได้ง่าย โดยจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ออกมานอกเซลล์จุลินทรีย์ภายนอกเซลล์ (Extracellular enzymes) เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เป็น น้ำตาล กรดไขมันสายยาว และกรดอะมิโน

(b) ขั้นที่สองเป็นขั้นตอนเอซิโดจีนิก (Acidogenic) หรือขั้นตอนการหมัก (Fermentation) โดยสารประกอบที่ผ่านการย่อยจากกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) จะถูกแบคทีเรียกลุ่มการหมัก (Fermentative Bacteria) ย่อยสลายเป็นกรดไขมันสายสั้นๆ (VFAs) (คาร์บอน C1-C5 เช่น กรดบิวทีริก กรดโพรพิโอนิก อะซิเตท และกรดอะซิติก) แอลกอฮอล์ ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์

(c) ขั้นที่สามเป็นขั้นตอนอะซิโตจินิก (Acetogenesis) แบคทีเรียกลุ่มอะซิโตจินิ (Acetogenic bacteria) จะเปลี่ยนสารที่ได้จากกระบวนการหมัก (Fermentation) ไปเป็น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเนื่องจากเป็นการลดการสะสมกรดไขมันระเหยง่าย ซึ่งการสะสมกรดไขมันระเหยง่ายในปริมาณสูงสามารถยับยั้งการสร้างมีเทนได้

(d) ขั้นสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ คือ กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) จะใช้ อะซิเตท

คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเพื่อผลิตเป็นมีเทน ขั้นตอนการสร้างมีเทนเป็นจุดสำคัญของหลายการศึกษา เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนมีความไวต่อการยับยั้งโดยสารตัวกลางที่เป็นกรด (Li et al., 2011)

2.2.2 ชุมชนจุลินทรีย์ (Microbial communities)

จุลินทรีย์ที่ทำงานในกระบวนการการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (AD) สามารถแบ่งกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 4 กลุ่ม คือ ไฮโดรไลติก (Hydrolytic) เฟอเมนเตทีฟ (Fermentative) อะซีโตจีนิก (Acetogenic) และเมทาโนจีนิก (Methanogenic) ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โดยไฮโดรไลติกแบคทีเรีย (Hydrolytic Bacteria) จะย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารตั้งต้นที่มีขนาดเล็กโดยทั่วไปสารอินทรีย์ที่สามารถละลายได้ในถังปฏิกรณ์สามารถเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้ผ่านกระบวนการหมัก และในที่สุดจะเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการ เมทาโนจีเนซิส (Methanogenesis) ดังนั้นกระบวนการย่อยสลายจึงมีความสำคัญในการกำหนดอัตราประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงของปฏิกริยาแบบไร้อากาศ

เฟอเมนเตทีฟแบคทีเรีย (Fermentative Bacteria) มีหน้าที่ในการใช้สารละลายที่สร้างขึ้นจากกระบวนการไฮโดรไลซิส และผลิตสารตัวกลางอย่างเช่น VFAs คาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และแอลกอฮอล์ บางส่วนของวิถีที่เกิดขึ้นในระบบ AD พร้อมทั้งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการแสดงดังตารางที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมัก อะซิเตต และคาร์บอนไดออกไซด์ส่งเสริมให้เกิดการผลิตมีเทนมากที่สุด (Li et al., 2011)

ตารางที่ 2.2 fermentative bacteria สกุลหลักในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (AD)

วิถีการหมัก	สกุล	ผลิตภัณฑ์หลัก
การหมักอะซิเตต	*Acetobacterium, Clostridium, Sporomusa*	อะซิเตต คาร์บอนไดออกไซด์
การหมักแอลกอฮอล์	*Saccharomyces*	เอทานอล คาร์บอนไดออกไซด์
การหมักบิวทาเรต	*Butyribacterium, Clostridium*	บิวทาเรต บิวทานอล ไฮโซโพรพานอล เอทานอล คาร์บอนไดออกไซด์
การหมักแลกเตต	*Lactobacillus, Streptococcus*	กรดแลกติก คาร์บอนไดออกไซด์
การหมักโพรพิโอเนต	*Clostridium*	โพรไพโอเนต อะซิเตต คาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: Li et al., 2011

อะซีโตจีนิก แบคทีเรีย (Acetogenic Bacteria) หรืออะซิโตเจน (Acetogens) แตกต่างจากอะซิเตตฟอร์มิงแบคทีเรีย (Acetate-Forming) เนื่องจากสามารถเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นอะซิเตตได้ผ่านวิถี Wood-Ljungdahl แบคทีเรียกลุ่มอะซิโตจีนิก เช่น *Acetobacterium* และ *Sporomusa* นอกจากนี้ยังมีกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ใช่อะซิโตจีนิก เช่น *Clostridium*, *Ruminococcus* และ *Eubacterium* การผสมผสานของอะซิเตตซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญของเมทาโนเจนทำให้ระบบ AD เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม อะซีโตจีนิกซึ่งเป็นผู้ผลิตไฮโดรเจนไม่สามารถอยู่รอดได้ในสภาวะที่มีความดันไฮโดรเจนสูง ดังนั้นจึงเป็นความสัมพันธ์แบบซิมไบโอซิส (Symbiotic) ระหว่างอะซีโตจีนิกที่ผลิตไฮโดรเจนและเมทาโนเจนจะนำไฮโดรเจนไปใช้ (Li et al., 2011) (ตารางที่ 2)

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

(a) อุณหภูมิในการเดินระบบ (operating temperature)

เมทาโนเจน ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่ต่ำมากหรือสูงมากได้ ถ้าหากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส แบคทีเรียจะหยุดทำงาน อุณหภูมิในการเดินระบบแบ่งเป็นสองระดับตามสปีชีส์ของเมทาโนเจนได้แก่มีโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) อุณหภูมิที่เหมาะที่มีโซฟิลิกเมทาโนเจน ทำงานได้ดีคือประมาณ 20 องศาเซลเซียส ถึง 45 องศาเซลเซียส แต่ที่เหมาะสมที่สุดคือ ช่วง 37 องศาเซลเซียส ถึง 41 องศาเซลเซียส โดยในช่วงอุณหภูมิระดับนี้แบคทีเรียส่วนใหญ่ในถังหมักจะเป็นมีโซฟิลิก เทอร์โมฟิลิกเมทาโนเจน ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือประมาณ 50 องศาเซลเซียส ถึง 52 องศาเซลเซียส แต่ก็สามารถทำงานในอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปถึง 70 องศาเซลเซียส แบคทีเรียมีโซฟิลิกนั้นมีจำนวนสปีชีส์มากกว่าแบคทีเรียเทอร์โมฟิลิก นอกจากนี้ยังสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าแบคทีเรียเทอร์โมฟิลิกอีกด้วย ทำให้ระบบหมักก๊าซชีวภาพที่ใช้แบคทีเรียมีโซฟิลิกเสถียรกว่า แต่ขณะเดียวกันอุณหภูมิซึ่งสูงกว่าในระบบที่ใช้เทอร์โมฟิลิกก็เป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซสูงกว่า ข้อเสียอีกข้อของระบบเทอร์โมฟิลิก คือการที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกมาเพิ่มความร้อนให้ระบบ ทำให้อาจได้พลังงานสุทธิที่ต่ำกว่า

(b) ความเป็นกรด-ด่าง (pH Value)

ค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ระหว่าง 7.0 ถึง 7.2 ค่า pH ในถังหมักขึ้นอยู่กับช่วงของการหมักด้วย เพราะในช่วงแรกแบคทีเรียที่สร้างกรดจะสร้างกรดเป็นจำนวนมากและทำให้ค่า pH ลดลง ซึ่งถ้าหาก pH ลดลงต่ำกว่า 5 ก็จะหยุดกระบวนการย่อยและหมักทั้งหมดหรืออีกนัยหนึ่งก็คือแบคทีเรียตาย เมทาโนเจน นั้นอ่อนไหวต่อความเป็นกรดด่างมาก และจะไม่เจริญเติบโตหาก pH ต่ำกว่า 6.5 ความเข้มข้นของ NH_4 จะมากขึ้นตามการย่อยสลายไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า pH เพิ่มโดยอาจเกิน 8 จนกระทั่งระบบผลิตเริ่มมีความเสถียร pH จะอยู่ระหว่าง 6.8 ถึง 8 (Esposito *et al.,* 2012)

(c) อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) เป็นอัตราส่วนของธาตุหลัก 2 ชนิด คือ ธาตุคาร์บอน (ในรูปของคาร์โบไฮเดรต) และธาตุไนโตรเจน (ในรูปของโปรตีน ไนเตรทและแอมโมเนีย เป็นต้น) ธาตุทั้งสองเป็นธาตุอาหารหลักของแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ต้องการอากาศโดยที่คาร์บอนใช้สำหรับสร้างพลังงานและไนโตรเจนสำหรับสร้างโครงสร้างของเซลล์ ตามปกติแบคทีเรียพวกนี้ใช้คาร์บอนได้เร็วกว่าไนโตรเจนถึง 25–30 เท่า ดังนั้นอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนจึงเป็นปัจจัยที่จำเป็นในการผลิตก๊าซชีวภาพ อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมเท่ากับ 25–30 : 1 หากอัตราส่วน C/N สูงเกินไป ไนโตรเจนจะถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว หากมีไนโตรเจนไม่เพียงพอ อัตราการเกิดเซลล์จุลินทรีย์จะลดลง ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิต

ได้น้อยลง แต่หากอัตราส่วน C/N ต่ำเกินไปจะทำให้ไนโตรเจนมากเกินความจำเป็น จุลินทรีย์จะย่อยสลายไนโตรเจนส่วนเกิน ก่อให้เกิดแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งอาจจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของระบบ (ไพเชษฐ์ ธรรมภาณ, 2541)

อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของขยะอินทรีย์ที่สามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ตั้งแต่ 8 ถึง 30 แต่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพคือประมาณ 23 ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน สูงมาก ไนโตรเจนจะถูก เมทาโนเจน นำไปใช้เพื่อเสริมโปรตีนให้ตัวเองและจะหมดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ได้ก๊าซน้อย แต่ถ้าหาก C/N Ratio ต่ำมากๆ ก็จะทำให้ไนโตรเจนมีมากและไปรวมกันเป็นแอมโมเนีย แอมโมเนียจะไปเพิ่มค่า pH ซึ่งถ้าหากค่า pH สูงถึง 8.5 ก็จะเริ่มเป็นพิษกับแบคทีเรีย ทำให้จำนวนเมทาโนเจนลดลง นอกจากนี้หาก C/N ratio อยู่นอกเหนือจากช่วง 8 ถึง 30 จะทำให้มีสัดส่วนปริมาณก๊าซที่ได้เป็นก๊าซอื่นๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

(d) ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (Loading)

ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่เราเติมใส่ถังหมักในแต่ละวัน ซึ่งถ้าหากว่าปริมาณที่เราเติมนั้นมากเกินไป ก็จะส่งผลให้ค่า pH ลดลงมากเกินไป (เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการคือ acidogenesis กรดจะถูกผลิตขึ้นมา) จนทำให้ระบบล้มเหลวเนื่องจากเมทาโนเจนตายหมด ซึ่งหากสิ่งนี้เกิดขึ้นก็จะต้องเริ่มต้นระบบใหม่หมด แต่ถ้าหากปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อยก๊าซที่ผลิตได้ก็จะน้อยตามไปด้วย เท่ากับว่าไม่ได้เดินระบบเต็มตามกำลังการผลิต ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่เกินไปโดยไม่จำเป็น

ในระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป มักจะออกแบบให้สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงสุดเท่าที่ประสิทธิภาพของระบบจะทำได้ แต่ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ หากให้ระบบมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุดแล้ว จะทำให้ระบบมีอัตราผลิตก๊าซมีเทนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกรดไขมันระเหยง่ายจะถูกสร้างและสะสมไว้ระบบในมากเกินไป ในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์และการสร้างกรดระเหยง่ายของแบคทีเรียชนิดที่ไม่สร้างมีเทน ทำให้ pH ของน้ำเสียในถังหมักลดต่ำลง ซึ่งทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน ประกอบกับแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะมีอัตราการเจริญช้ากว่าแบคทีเรียที่สร้างกรด ถึง 4 เท่า ทำให้ไม่สามารถเจริญและใช้กรดระเหยง่ายเพื่อผลิตมีเทนได้ทัน ส่งผลให้เกิดการสะสมของกรดไขมันดังกล่าวขึ้น อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของระบบที่เหมาะสมของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ โดยทั่วไปควรอยู่ในช่วงประมาณ 1.5 กิโลกรัมบีโอดี/ลูกบาศก์เมตร/วัน และหากคิดภาระสารอินทรีย์ในรูปของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด จะอยู่ในช่วง 0.64-1.12 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด/ลูกบาศก์เมตร/วัน

(e) ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมัก (Retention time)

ระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมักขึ้นอยู่กับปริมาณ และประเภทของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป รวมถึงรูปแบบของระบบต่อถังหมัก หากระยะเวลาในการกักเก็บสั้นไปก็จะไม่พอสำหรับแบคทีเรียที่จะผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้แบคทีเรียยังจะถูกถ่ายออกจากระบบเร็วเกินไปส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียลดลงไป ทำให้แบคทีเรียที่เหลืออยู่ทำการย่อยไม่ทัน

และอาจทำให้ค่า pH ในถังหมักลดลงขึ้น ขณะเดียวกันการที่ระยะเวลากักเก็บนานเกินไปจะทำให้เกิดตะกอนของสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายแล้วสะสมอยู่ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่โดยไม่จำเป็น ระยะเวลาในการกักเก็บส่วนใหญ่จะประมาณ 14 ถึง 60 วัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ ค่าปริมาณของแข็ง อุณหภูมิ ขนาด ประเภทของdigester และปริมาณสารอินทรีย์ที่เติม ระยะเวลาในการกักเก็บนั้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าแบคทีเรียจะมีชีวิตได้นานเท่าไรโดยไม่มีการเติมอาหาร เนื่องจากระยะเวลาการกักเก็บนั้นหมายถึงระยะเวลาที่แบคทีเรียต้องการเพื่อย่อยอาหารให้หมด ดังนั้นเมื่อไรก็ตามที่แบคทีเรียยังย่อยอาหารไม่หมดก็หมายความว่าแบคทีเรียจะยังไม่ตายจากการขาดอาหาร

(f) ปริมาณของแข็ง (Total Solid Content, TSC)

Solid content ของสารอินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพแบ่งเป็นสองระดับคือ High solid (ปริมาณของแข็งสูง) TSC สูงกว่าร้อยละ 20 และ Low solid (ปริมาณของแข็งต่ำ) TSC ต่ำกว่าร้อยละ 15 ถังหมักที่ออกแบบสำหรับเติมสารอินทรีย์ high solid จะต้องใช้พลังงานมากกว่าในการสูบน้ำตะกอน (slurry) เนื่องจากในระบบ high solid ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังหมักสูงกว่า ส่งผลให้น้ำตะกอนในระบบมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นด้วย ในทางกลับกันถังหมัก Low solid สามารถใช้เครื่องสูบน้ำทั่วไปที่ใช้พลังงานน้อยกว่าสูบน้ำตะกอนได้ เนื่องจากน้ำตะกอนในระบบมีความหนืดน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการที่น้ำตะกอนมีความใสกว่าก็ทำให้การหมุนเวียนและกระจายตัวของแบคทีเรียและสารอินทรีย์ดีขึ้นและการที่แบคทีเรียสามารถสัมผัสสารอินทรีย์อย่างทั่วถึงก็ช่วยให้การย่อยและการผลิตก๊าซเร็วขึ้น

(g) การกวนผสม (Mixing)

การกวนผสมตะกอน น้ำ และ สารอินทรีย์ เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนเพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดก๊าซเร็วขึ้นและมากขึ้น นอกจากนี้ยังป้องกันการตกตะกอนและตะกอนลอย (Scum) ซึ่งตะกอนอาจจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวจากถัง (Angelidaki et al., 2009) (1) การกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical mixing) ได้แก่ ใบพัด (Impeller) ซึ่งใบพัดที่เลือกใช้จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ เช่น ใบพัดแบบ turbine อย่างไรก็ตาม ในการกวนผสมเป็นเนื้อเดียวกันจะต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูง หากถังมีขนาดใหญ่มากจะต้องใช้พลังงานมากขึ้น เพื่อให้เกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (2) การกวนผสมโดยใช้วิธีการสูบน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ให้เกิดการหมุนเวียน (Mixing by recirculation of wastewater) เป็นวิธีการที่ใช้พลังงานไม่สูง และประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก โดยการตั้งเครื่องสูบน้ำภายในถังปฏิกิริยาออกทางด้านล่างของถังปฏิกิริยา และป้อนกลับเข้าทางด้านบนของถังปฏิกิริยา ทาให้เกิดการหมุนเวียนและการกวนผสมของน้ำเสียภายในถังปฏิกิริยา และ (3) การกวนผสมโดยนำก๊าซที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียในถังปฏิกิริยามาใช้ในการกวนผสม (Mixing by production gas) อาศัยก๊าซเป็นตัวช่วยให้เกิดการกวนผสมโดยดึงก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาบางส่วน กลับเข้าสู่ถังปฏิกิริยา ทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยา

(h) สารอาหาร (nutrients)

สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อการเจริญเติบโต นอกเหนือไปจากคาร์บอนและไฮโดรเจนแล้ว ยังมีไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม แคลเซียม นอกจากนี้ก็มีธาตุที่จำเป็นในปริมาณน้อย เช่น เหล็ก แมงกานีส โมลิบดินัม สังกะสี โคบอลต์ ซิลิเนียม ทังสเตน และนิเกิล เป็นต้น โดยมีอัตราส่วนอาหารเสริมของน้ำเสียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่เหมาะสมในรูปแบบของ ซีโอดี: ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 100:1.1: 0.2 หากอาหารเสริมไม่เพียงพอจะมีผลให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียไม่สมบูรณ์ แต่ขยะอินทรีย์โดยทั่วไปจะมีธาตุอาหารเหล่านี้ในระดับที่สมดุลพอเพียง เพราะฉะนั้นในการหมักจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารใดๆ

(i) สารยับยั้งและสารพิษ (Imhibiting and Toxic Materials)

กรดไขมันระเหยได้ ไฮโดรเจน หรือแอมโมเนีย รวมถึงธาตุไอออน สารพิษ โลหะหนัก สารทำความสะอาดต่างๆ เช่น สบู่ น้ำยาล้างต่างๆ และยาปฏิชีวนะ สามารถส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตและการผลิตก๊าซของแบคทีเรียได้ ธาตุไอออนในปริมาณน้อย (เช่น โซเดียม โปแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟอร์ แอมโมเนียม) สามารถช่วยกระตุ้นการเติบโตของแบคทีเรียเช่นกัน แต่ถ้าหากปริมาณนั้นมากก็จะส่งผลเป็นพิษได้ เช่น แอมโมเนียในปริมาณ 50 ถึง 200 มิลิกรัมต่อลิตรจะเป็นผลดี ช่วยในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่เมื่อใดที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงกว่า 1,500 มิลิกรัมต่อลิตรก็จะเริ่มส่งผลเสีย ในทางเดียวกันโลหะหนักบางประเภท (ทองแดง นิเกิล โครเมียม สังกะสี ตะกั่ว และอื่นๆ) ในปริมาณที่น้อยๆ ช่วยในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่เมื่อความเข้มข้นสูงก็จะเป็นพิษ

(j) อัลคาลินิตี้ (Alkalinity)

ค่าอัลคาลินิตี้ หมายถึง ความสามารถในการรักษาระดับความเป็นด่าง ค่าอัลคาลินิตี้ที่เหมาะสมต่อการหมักมีค่าประมาณ 1,000 ถึง 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอร์เนต ($CaCO_3$) (Metcalf and Eddy, 1991) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ เมื่อน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียหรือถังปฏิกรณ์ สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ ซึ่งจะมีผลทำให้กรด-ด่างในน้ำเสียลดลง หากค่าความเป็นด่างของน้ำเสียอยู่ในระดับต่ำ ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) หรือแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทน (Methane Producing bacteria)

2.3 การหมักร่วม (Co-digestion)

การหมักร่วม หมายถึง การย่อยสลายของของเสียอินทรีย์ตั้งแต่สองหรือสามชนิดในเวลาเดียวกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion process) (Kangle et al., 2012). ซึ่งสารที่นำมาเติมในกระบวนการเรียกว่าสารหมักร่วม (Co-substrate) เช่น มูลสัตว์ กลีเซอรอล กากน้ำตาล เศษชีวมวลทางการเกษตร เป็นต้น ถ้ากระบวนการหมักร่วมเป็นแบบส่งเสริมกัน (positive synergisms) จะช่วยปรับปรุงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ในระบบให้มีความสมดุล ทำให้ผลผลิตมีเทน (Methane yield) สูงขึ้น เนื่องจากค่าอัตราส่วน C/N มีความสำคัญต่อเสถียรภาพของกระบวน เพราะว่าเป็นตัวกำหนดคุณภาพของจุลินทรีย์ภายในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ถ้าอัตราส่วน C/N สูงเกินไป ไนโตรเจนจะถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว หากมีไนโตรเจนไม่เพียงพอ อัตราการเกิดเซลล์จุลินทรีย์จะลดลง ปริมาณ

ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้น้อยลง แต่ถ้าหากอัตราส่วน C/N ต่ำเกินไปจะทำให้ไนโตรเจนมากเกินความจำเป็น จุลินทรีย์จะย่อยสลายไนโตรเจนส่วนเกิน ก่อให้เกิดแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งอาจจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของระบบได้ (Kangle et al., 2012; Hosseini et al., 2014) Santibáñez et al. (2011) รายงานว่า กระบวนการหมักร่วมช่วยให้ผลผลิตมีเทนเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 50-200 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการทดลองและสารหมักร่วม อีกทั้งในปัจจุบันความต้องการพลังงานของโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานมีความสำคัญ ซึ่งการใช้กลยุทธ์การหมักร่วมเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้มากที่สุดในปัจจุบันสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวช่วยเพิ่มผลผลิตมีเทนได้ ซึ่งกระบวนการหมักร่วมมีข้อดีและข้อจำกัด ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อจำกัดเทคโนโลยีการหมักร่วม

Advantages	Limitations
- ปรับปรุงปริมาณสารอาหารในระบบให้สมดุล	- เพิ่มความเข้มข้นของค่าซีโอดีในน้ำทิ้ง
- เจือจางสารพิษในระบบ	- ต้องทำการกระบวนปรับสภาพสำหรับสารหมักร่วมบางชนิด
- เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในระบบ	- ต้องมีระบบกวนผสม (Mixing)
- ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ	- มีต้นทุนเพิ่มขึ้นในเรื่องการขนส่งสารหมักร่วม
- ลดกลิ่น	

Source: (Braun, 2002; Astals et al., 2011)

2.4 สารหมักร่วม (Co-substrates)

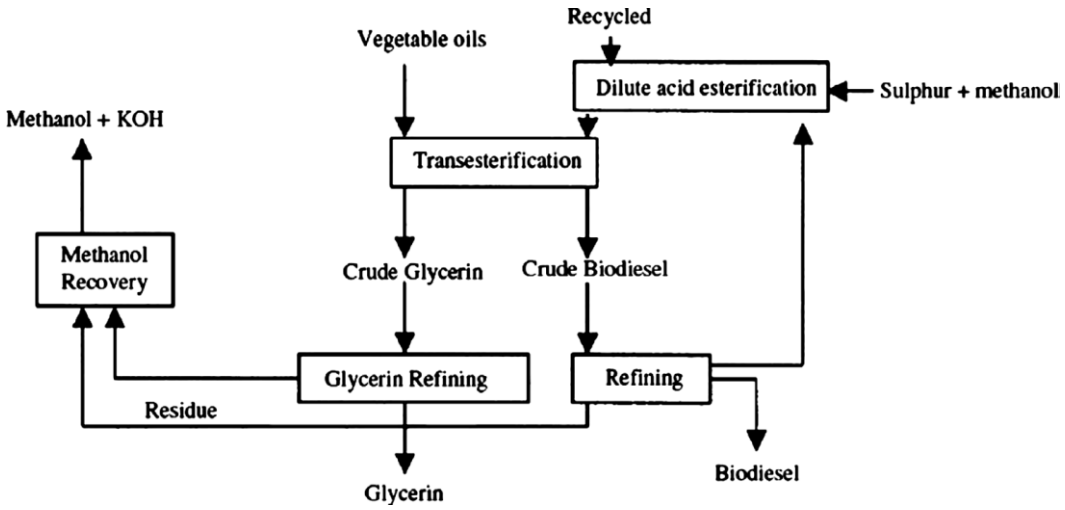
2.4.1 กากน้ำตาล (Molasses) เป็นของเสียที่ได้จากการกระบวนการผลิตน้ำตาลที่ใช้อ้อยเป็นวัตถุดิบ (ดังตารางที่ 2.4)ซึ่งมีลักษณะเป็น ของเหลวสีดำเหนียวข้นและไม่สามารถตกผลึกน้ำตาลได้อีกซึ่งทุกๆ 100 ตัน ในการผลิตน้ำตาลจากอ้อยจะให้กากน้ำตาลประมาณ 3-5 ตัน (Pérez, 1997) กากน้ำตาลมีข้อดี คือ มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสารหมักร่วมในกระบวนการหมักร่วมแบบไร้อากาศ อีกทั้งยังสามารถเก็บรักษาได้เป็นเวลานานโดยไม่มีการย่อยสลายและปนเปื้อนที่อุณหภูมิต่ำ (+2^{0}C)(Sarker & Moller, 2014)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของกากน้ำตาล (Molasses: ML) และของเสียกลีเซอรอล (Glycerol Waste: GW)

องค์ประกอบ	**ML**	**GW**
pH	3.45	8.80
COD(mg/L)	128,000	1,760,000
VFA(mg/L)	25,400	6,650
TN(mg/L)	935	1,670
TP(mg/L)	1,300	71,500
TS(g/L)	89.70	969
VS(g/L)	86.20	910
Protein(g/L)	35	1.28
Carbohydrate(g/L)	0.286	845
Lipids(g/L)	2.84	63.76
Glucose (mg/l)	11,414	-
C/N ratio	123	949

ที่มา : อมรรัตน์ บุญมี, 2549, Sarker & Moller, 2013, Lee et al., 2014

2.4.2 ของเสียกลีเซอรอล (Glycerol waste) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (ดังรูป 2.3) โดยของเสียกลีเซอรอลที่ได้จากระบวนการผลิตคิดเป็นร้อยละ 10 ของวัตถุดิบ (Yazdani & Gonzalez, 2007) ในปี 2011 ทั้งโลกมีปริมาณของของเสียกลีเซอรอลประมาณ 3,000,000 ตัน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเป็น 4,600,000 ตัน ในปี 2020 โดยขึ้นกับการขยายการผลิตของการผลิตไบโอดีเซล(Viana et al., 2012) จากปริมาณที่มากทำให้อุปทาน (Supply) ของเสียกลีเซอรอลมีปริมาณเกินความต้องการใช้ (Demand) จึงเป็นของเสียที่เหลือและมีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่ำ (Siles et al.,, 2009) ทำให้ของเสียกลีเซอรอลมีความน่าสนใจที่จะไปใช้ในกระบวนการหมักร่วม เนื่องจากมีค่าซีโอดีสูง (ดังตารางที่ 2.4) ราคาถูก สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้นานโดยไม่เน่าเสียและย่อยสลายได้ง่ายภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Jingxing et al., 2008; Ma et al.,2008; Hutnan et al., 2009) นอกจากนี้ข้อดีของการใช้ของเสียกลีเซอรอลเป็นสารหมักร่วมในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ คือ ช่วยเพิ่มอัตราส่วน C/N และช่วยเจือจางสารพิษในระบบได้ เนื่องจากของเสียกลีเซอรอลมีปริมาณคาร์บอนสูง (Fountoulakis & Manios,2009) Santibanez et al. (2011) รายงานว่าการใช้เสียกลีเซอรอลเป็นสารหมักร่วมทำให้การผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 50-200 โดยองค์ประกอบทางเคมีของของเสียกลีเซอรอล

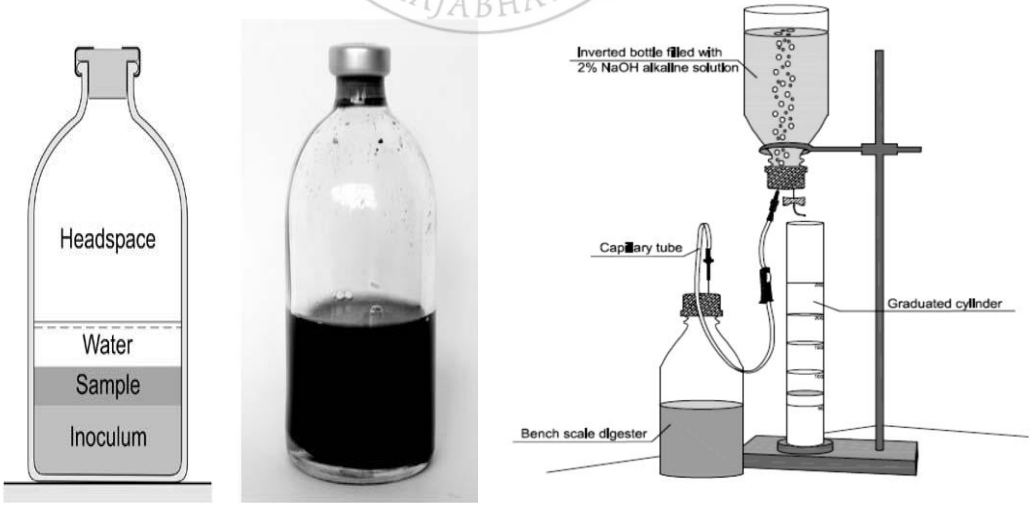


รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

อีกทั้งในปัจจุบันความต้องการพลังงานของโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานมีความสำคัญ โดยการใช้เทคโนโลยีการหมักร่วมเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความน่าสนใจ มีความเหมาะสมและเป็นเทคโนโลยีที่เป็นไปได้มากที่สุดในปัจจุบันสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวช่วยเพิ่มผลผลิตมีเทนได้

2.5 ศักยภาพในการผลิตมีเทน (Biochemical Methane Potential: BMP)

การวิเคราะห์ BMP สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้ในรูปแบบของปริมาณก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดที่ผลิตได้ต่อกรัมของกรดไขมันระเหยง่าย ซึ่งการวิเคราะห์ BMP จะทำในถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ภายใต้สภาวะการทดลองแบบไร้อากาศ (Esposito et al., 2012) ซึ่งชุดวิเคราะห์ BMP แสดงดังรูปที่ 2.4 สมการที่ใช้ในการคำนาณค่า BMP แสดงดังสมการที่ 1 และ 2



รูปที่ 2.4 ชุดวิเคราะห์ BMP

ที่มา : ดัดแปลงจาก (Angelidaki & Sanders, 2004; Esposito et al., 2012; Zhang et al., 2014)

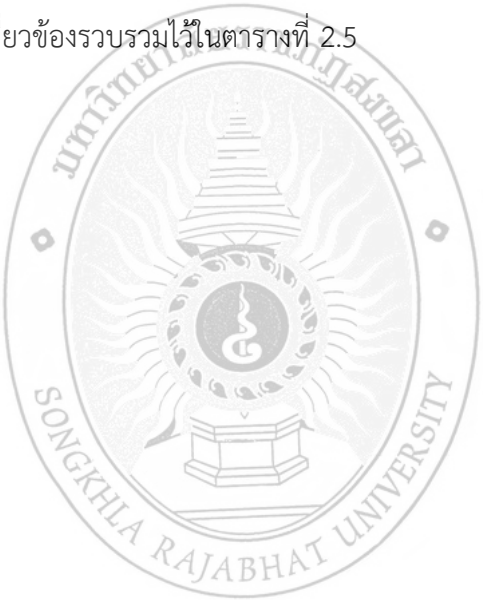
$$BMP(\frac{mlCH_4}{gVS}) = \frac{mlCH_4 produced}{\frac{gVS(substrate)}{L} xL(substrate;in,bottle)} \quad (1)$$

$$BMP(\frac{mlCH_4}{gCOD}) = \frac{mlCH_4 produced}{\frac{gCOD(substrate)}{L} xL(substrate;in,bottle)} \quad (2)$$

นอกจากนี้การวิเคราะห์ BMP สามารถอธิบายในรูป LCH_4/kg-waste, LCH_4/L-waste, mass volatile solids added $(LCH_4/kg\text{-}VS)_{added}$ or COD added $(LCH_4/kg\text{-}COD)_{added}$ (Angelidaki & Sanders, 2004).

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.5



ตารางที่ 2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการหมักร่วมแบบไร้อากาศ (Anaerobic co-digestion)

Co-digestion process	Mixture ratio	C/N ratio	Methane/Biogas yield	Reactor	OLR	Results and comment	Reference
Sisal pulp(SP) + Fish waste(FW)	37:67% on weight basis (w/w)	16	620 mLCH_4/g VS-added	Batch	-	An increase of about 59 and 94% in the methane yield compared to that obtained for the digestion of pure SP and FW.	Mshandete et al., 2004
Potato processing wastewater + Crude glycerol	Adding 2 mL glycerol per liter of raw wastewater	-	740 mL Biogas/mL glycerol	UASB	11.7 g COD/L. d	Glycerol was a feasible and economically interesting co-substrate to enhance the anaerobic treatment of industrial wastewaters.	Ma et al., 2008
Pig manure(PM)+ Glycerol waste	80:20% on weight basis (w/w)	23.4	212 ml CH_4/g COD-added	Batch	-	This mixture produced about 125% more methane than when PM was mono-digested.	Astals et al. 2011
Cow manure+ Molasses	95:5 % on weight basis (w/w)	-	300 mLCH_4/g VS-added	CSTR	4.5 gVS/(L-reactor.d	co-digestion with manure can be a good strategy	Fang et al., 2011
Pig manure(PM) + Glycerol	96:4 % on weight basis (w/w)	12.5 (PM 100% =3.1)	740 mL biogas/g VS-added	CSTR	1.90 g VS/L. d	An increase of about 400% in biogas production was obtained under mesophilic conditions.	Astals et al., 2012
Pig manure(PM) + Biodiesel waste(BW)	95:5 % on weight basis (w/w)	-	900 mL Biogas/L-reactor. d	CSTR	1–1.5 g COD/L. d	COD removal efficiency of 85%.	Regueiro et al., 2012

ตารางที่ 2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการหมักร่วมแบบไร้อากาศ (Anaerobic co-digestion) (ต่อ)

Co-digestion process	Mixture ratio	C/N ratio	Methane/Biogas yield	Reactor	OLR	Results and comment	Reference
Glycerol waste + Pig manure(PM)	80:20% on COD basis	20	320 ml CH_4/g COD-removed	UASB	1.6 g COD/L. d	The methane content was 54% on average.	Nuchdang & Phalakornkule, 2012
Fish waste(FW)+Bread waste (BW)	20:80% on TS basis	-	458 mLCH_4/g VS-added	Batch	-	-	Kafle et al., 2013
Pig manure(PM) + Glycerol (Thermophilic condition 55°C)	97:3 % on weight basis (w/w)	-	470 mL Biogas/g VS-added (mono-digestion of pig manure as 170 mL Biogas/g VS-added)	CSTR	2.4-2.7 g COD/L. d	The specific biogas production of the co-digester was 180% higher than the one obtained by the reference digester, which was only fed with pig manure.	Astals et al., 2013
Glycerol waste+ Orange peel waste	1:1 on COD basis	-	330 mLCH_4/g VS-added	CSTR	1.91 kg VS/m^3 .d	-	Martin et al., 2013
Fish waste(FW)+Brewery grain waste (BGW)	40:60% on TS basis	-	414 mLCH_4/g VS-added	Batch	-	-	Kafle et al., 2013
canned seafood wastewater (CSW) + glycerol waste (GW)	99:1%(v/v)	26	577 mLCH4/g VS-added	UASB	2 g COD/L. d	-Methane yield increased by 108% when compared with digested CSW alone	Panpong et al., 2014
canned seafood wastewater (CSW) + glycerol waste (GW) +*Wolffiaarrhiza*	94: 1: 5%(v/v)	27	789 mLCH4/g VS-added	UASB	4 g COD/L. d	-Methane yield increased by 184% when compared with digested CSW alone	Panpong et al., 2014

ตารางที่ 2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการหมักร่วมแบบไร้อากาศ (Anaerobic co-digestion) (ต่อ)

Co-digestion process	Mixture ratio	C/N ratio	Methane/Biogas yield	Reactor	OLR	Results and comment	Reference
Sewage sludge + crude glycerol	97:3% (v/v) (studied between 0,2,3 and 4%(v/v) of crude glycerol)	-	800 mL Biogas/g TVS-removed	CSTR	1.0 - 1.7 kg COD/m^3 .d	-The addition of 3% glycerol at HRT of 12.3 d resulted in the higher amount of biogas production, while the effluent quality remained good. However when 4% glycerol added, the system failed due to overloading.	Athanasoulia et al., 2014
Molasses wastewater + Sewage sludge	7:3 based on volume	-	270 ml CH_4/g COD-removed	Two-Stage (CSTR+UASB)	13.7 g COD/L. d	- Methane content in the biogas ranged from 74.4 to 82.8. - High COD removal efficiencies of 97 at HRT 84 hr.	Lee et al., 2014
Activated sludge + molasses	90: 10 %(v/v)	-	275 mLCH_4/g VS-added	CSTR	2.5 g COD/L. d	-Co-digestion of molasses with A-sludge also resulted in a high methane production. - Volumetric methane production rates up to 1.01 L/ L.d	Vrieze et al., 2015

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำทิ้งและสารหมักร่วม

ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องและสารหมักร่วม (กากน้ำตาลและของเสียกลีเซอรอล) เริ่มต้นและหลังเติมสารหมักร่วม โดยอัตราส่วนของสารหมักร่วมที่ใช้ในการทดลอง คือ 0-5 เปอร์เซ็นต์ (v/v) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการเติมสารหมักร่วม ซึ่งในการทดลองนี้น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (Canned Seafood Wastewater : CSW) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บจ. สยามอินเตอร์เนชั่นแนลฟู้ด จำกัด 88 หมู่ 10 ตำบล นาทับ อำเภอ จะนะ สงขลา กากน้ำตาล (Molasses : ML) ได้จัดซื้อจากร้านสมศรีการเกษตร อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง ในส่วนของเสียกลีเซอรอล (Glycerol Waste : GW) จากโรงผลิตไบโอดีเซลของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และกล้าเชื้อผลิตมีเทน (Inoculum) ได้รับความอนุเคราะห์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ บริษัท ห้องเย็นโชติวัฒน์หาดใหญ่ จำกัด (มหาชน) 4/2 หมู่ 3 ถนนสายเอเซีย 43 ตำบลนาหม่อม อำเภอนาหม่อม จังหวัด สงขลา

3.2. การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำทิ้งและสารหมักร่วม ที่ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น

นำของเสียที่ใช้เป็นสารหมักร่วม (Co-substrate) ทั้ง 2 ประเภท คือ กากน้ำตาล (Molasses: ML) และของเสียกลีเซอรอล (Glycerol Waste: GW) มาทำการทดลองหาศักยภาพในการผลิตมีเทน (Biochemical Methane Potential: BMP)เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (Canned Seafood Wastewater: CSW) และสารหมักร่วม ที่ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นโดยทำการหมักแบบกะใน serum bottle ขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งใช้น้ำทิ้งและสารหมักร่วมเป็นสารอาหารให้กับจุลินทรีย์ ทำการปรับ pH ให้เหมาะสม พ่นก๊าซไนโตรเจนแล้วปิดด้วยจุกยางและฝาอะลูมิเนียมก่อนนำอาหารไปอบฆ่าเชื้อ จากนั้นก็นำมาเติมเชื้อเริ่มต้นร้อยละ 80 (v/v) หมักในสภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิห้อง เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองเป็นจุลินทรีย์ชนิดเม็ด (Granular Sludge) จากระบบบำบัดน้ำทิ้งของบริษัทห้องเย็นโชติวัฒน์หาดใหญ่ จำกัด (มหาชน) ตั้งอยู่ที่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบ UASB ในอุตสาหกรรมอาหารทะเลเช่นกันโดยอัตราส่วนของน้ำทิ้งต่อสารหมักร่วมที่ใช้ศึกษามีดังตารางที่ 3.1 ศึกษาผลของสารอินทรีย์ในระบบแบบกะโดยแปรผันค่าสารอินทรีย์ในช่วงร้อยละ 2-10

VS เปรียบเทียบผลผลิตมีเทนโดยการวัดปริมาตรการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำและวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (O-Thong et al., 2012)

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของน้ำทิ้งต่อสารหมักร่วมที่ใช้ในการทดลอง

กากน้ำตาล(Molasses: ML)	ของเสียกลีเซอรอล (Glycerol Waste: GW)
- 100% (v/v) CSW	
- 100% (v/v) Inoculum	
- CSW + 1% (v/v) ML	- CSW + 1% (v/v) GW
- CSW + 2% (v/v) ML	- CSW + 2% (v/v) GW
- CSW + 3% (v/v) ML	- CSW + 3% (v/v) GW
- CSW + 4% (v/v) ML	- CSW + 4% (v/v) GW
- CSW + 5% (v/v) ML	- CSW + 5% (v/v) GW

3.3 การศึกษาในแบบจำลองแบบต่อเนื่องระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR และ PFR โดยใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

ทำการคัดเลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุดระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องและสารหมักร่วมทั้ง 2 ประเภท ในการทดลองแบบกะที่ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด (ข้อ 3.2) มาดำเนินการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR และ PFR ขนาด 5 ลิตร ดำเนินระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก 35, 30, 25 และ 20 วัน โดยในระหว่างการหมักมีการหมุนเวียนวัตถุดิบเพื่อให้วัตถุดิบหมักมีการผสมได้ดี เก็บตัวอย่างของเหลวเพื่อวิเคราะห์ค่าพีเอช และกรดไขมันระเหยได้ และทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันด้วย Gas Counter และเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพทุกวันเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี (O-Thong, Boe and Angelidaki. 2012: 649) เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าต่างๆ ได้แก่ พีเอช กรดไขมันระเหยได้ และคำนวณผลผลิตก๊าซมีเทน และประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์

3.4 การศึกษาโครงสร้างของกลุ่มประชากรของจุลินทรีย์ภายในตะกอนจุลินทรีย์ (Microbial community analysis) จากถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ระดับห้องปฏิบัติการ

การศึกษาโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์ในตะกอนจุลินทรีย์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยเทคนิค Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE) นำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ประเภท มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนใสทิ้ง แล้วเก็บตะกอนเซลล์ไว้จากนั้นเติม TENS buffer 500 ไมโครลิตรและเติม 50 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร Lysozyme ปริมาณ 40 ไมโครลิตร เขย่าเบาๆให้เข้ากัน นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมงแล้วนำไปบ่มที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที และบ่มต่อที่ 60 องศาเซลเซียสอีก 4 นาทีโดยบ่มสลับไปสลับมาระหว่างอุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และ60 องศาเซลเซียสจำนวน 3 รอบ (เพื่อให้ดีเอ็นเอคลายเกลียวได้ดีขึ้น) จากนั้นเติม 10% SDS

200 ไมโครลิตรและ 20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรเอนไซม์ Proteinase K 50ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปบ่มที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมงเติม Phenol/Chloroform/Isoamyl alcohol 600 ไมโครลิตรผสมให้เข้ากันแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 10,000 rpm นาน 5-10 นาทีจากนั้น เทส่วนใสใส่หลอดใหม่และทำให้ตกตะกอนด้วย 3 โมลาร์โซเดียมอะซีเตท 100 ไมโครลิตรและ Absolute Ethanol 1ไมโครลิตรนำไปบ่มที่ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงนำไปปั่นเหวี่ยงที่ ความเร็ว 12,000 rpm 10 นาที และล้างด้วย 70% เอทานอล 1 ไมโครลิตรแล้วปั่นเหวี่ยงอีกครั้งทำ ตะกอนให้แห้ง 1.5 ชั่วโมง แล้วละลายตะกอนใน TE buffer 30 ไมโครลิตรเก็บไว้ที่ -20 องศา เซลเซียส สำหรับใช้เป็น PCR Template (Ausubel, et al. 1995) การเพิ่มปริมาณ 16SrDNA โดย วิธี PCR (Polymerase Chain Reaction) นำตัวอย่างดีเอ็นเอที่สกัดได้ปริมาณ 2 มิลลิลิตรไปปั่น เหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ละลายตะกอนเซลล์ด้วย Milli Q water ที่ฆ่าเชื้อ แล้ว 50 ไมโครลิตร สำหรับการทำ PCR ครั้งแรก reaction mixture ประกอบด้วย Taq PCR Master Mix Kit (ประกอบด้วย QIAGEN PCR Buffer, Deoxynucleotide Triphosphate) 25 มิลลิลิตร, RNase free water 16 มิลลิลิตร, 10X CoralLoaad Concentrate 5 มิลลิลิตร Universal primer 1492r (5 - GGT TAC CTT GTT ACG ACT T-3) และ 27f (5 -AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG -3)(10 พิกโคโมล) 2 มิลลิลิตรและDNA extract 2 มิลลิลิตร โปรแกรม PCR แรก ประกอบด้วย Pre denaturation ที่ 95 องศาเซลเซียส 5 นาทีสำหรับ Denaturation ที่ 95 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 วินาที Annealing ที่ 52 มิลลิลิตรเป็นเวลา 40 วินาที Elongation ที่ 72 มิลลิลิตรเป็น เวลา 90 วินาทีรวมทั้งหมด 25 cycles และ Post-elongation ที่ 72 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นตรวจสอบ PCR product ใน ร้อยละ 1.5 Agarore gel และนำ PCR product ดังกล่าว ไปใช้ในการทำ PCR ครั้งที่สองโดยใช้ Primer 518 (5 - GTA TTA CCG CGG G CTG CTG-3) และ 357f (5 - CTC CTA CGG GAG GCA GCA G–3) (ที่มี 40 bpGC clamp จบที่ 5 ; Muyzer et al., 1993) โดยโปรแกรม PCR ประกอบด้วยอุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 นาทีอุณหภูมิ55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0.75 นาที และ 72 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1นาทีรวม10 cycles ตามด้วย ขั้นสุดท้ายที่ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้น PCR Products ไปวิเคราะห์บนร้อย ละ 1.5 Agarose gel ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วย DGGE ต่อไป (Kongjan et al., 2011)

เทคนิค Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE) ใช้ PCR products ครั้งที่ สองวิเคราะห์บน 8% (v/v) Polyacrylamide Gels Denaturant Gradient ที่ร้อยละ40-70, electrophoresis ที่ 70 โวลต์นาน 16 ชั่วโมงใน 0.5x TAE buffer ที่ 60 องศาเซลเซียสย้อมสี DGGE gels ด้วยSYBR Green นาน 15 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gel Doc รุ่น XR 1708170 (Bio-Rad Laboratories, UK) ตัดแถบแบนดีเอ็นเอเด่นจากเจล DGGE และทำให้บริสุทธิ์ E.Z.N.A. Cycle Pure Kit (Omega Bio-tek, USA) นำไปเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอด้วยวิธี PCR ดังวิธีข้างต้น(ใช้ primer อะไร) แล้วส่งไปวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ ผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับลำดับเบสของ

จุลินทรีย์อ้างอิงโดยใช้โปรแกรม SeqMatch ในฐานข้อมูล Ribosomal Database Project (http://rdp.cme.msu.edu/) และ NCBI web interface (http://www.ncbi.nlm.nih.gov)

3.5 การศึกษาการนำเทคโนโลยีการหมักร่วมไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร

ขยายผลการทดลองในถังปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร เพื่อยืนยันผลการทดลองก่อนที่จะทำการทดลองในระดับอุตสาหกรรมต่อไป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพในการดำเนินระบบในระยะยาว รวมถึงศึกษาถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และใช้เป็นต้นแบบในการก่อสร้างระบบใหม่สำหรับโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องต่อไปในอนาคต และเพื่อให้โรงงานประเภทนี้สามารถพึ่งพาตนเองและมีความมั่นคงทางด้านพลังงานได้ในระยะยาว

3.6 วิธีวิเคราะห์และเก็บตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องไว้ที่อุณหภูมิ 4°C ในส่วนของกากน้ำตาล ของเสียกลีเซอรอล และกล้าเชื้อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างแต่ละชนิดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กากน้ำตาล ของเสียกลีเซอรอล และกล้าเชื้อ

องค์ประกอบ	วิธีการ	อ้างอิง
ความเป็นกรด-ด่าง	Electrometric Method	APHA (2012 : 4-91)
ของแข็งทั้งหมด	Total Solids Dried at 103-105°C	APHA (2012 : 2-64)
ของแข็งระเหยทั้งหมด	Volatile Solid Ignited at 550°C	APHA (2012 : 2-67)
ขี้เถ้า	Dry Ashing	APHA (2012 : 3-11)
ซีโอดี	Closed Reflux, Colorimetric Method	APHA (2012 : 5-20)
ไขมัน	Direct Extraction Methods	APHA (2012 : 5-42)
ไนโตรเจน	Kjeldahl Method	APHA (2012 : 4-132)
คาร์โบไฮเดรต	Anthrone Method	Morris (1948 : 254-255)
น้ำตาลรีดิวซ์	Dinitrosalicylic acid Method (DNS)	Miller, Blum and Glennon (1959:426)
กรดไขมันระเหยง่าย	GC-FID	Wang, Fingas and Sergy (1995:2623)
ความเป็นด่าง	Titration Method	(Mc Ghee. 1968:6-162)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำทิ้งและสารหมักร่วม

ของเสียกลีเซอรอลมีค่าพีเอชสูงอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง มีค่าเท่ากับ 8.72±0.01 รองลงมาคือน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องอยู่ในช่วงเป็นกลาง มีค่าเท่ากับ7.36±0.02 ส่วนกากน้ำตาลมีค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกรด มีค่าเท่ากับ 4.95±0.01 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid : TS) พบว่า กากน้ำตาลมีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูงสุด เท่ากับ 914.50±2.17 g/L รองลงมาคือ ของเสียกลีเซอรอลมีปริมาณเท่ากับ 279.53±3.34 g/L และน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องมีปริมาณต่ำสุดเท่ากับ 2.48±0.60 g/L ปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solid : VS) พบว่า กากน้ำตาลมีปริมาณสูงสุด เท่ากับ 671.97±4.96.g/Lรองลงมาคือ ของเสียกลีเซอรอลมีปริมาณเท่ากับ 254.96±2.94 g/L และน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องมีปริมาณต่ำสุดเท่ากับ 1.23±0.58 ปริมาณขี้เถ้า (Ash) พบว่า กากน้ำตาลมีปริมาณสูงสุดร้อยละ 24.25±2.79 รองลงมาคือ ของเสียกลีเซอรอลมีปริมาณร้อยละ 2.57±0.40 g/L และทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องมีปริมาณต่ำสุดร้อยละ 1.24±0.02 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) มีค่าสูงสุดในของเสียกลีเซอรอล เท่ากับ 1,525±7.07 g/L รองลงมาคือ กากน้ำตาลมีค่าเท่ากับ 1,210±2.83 g/L และทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องต่ำสุดเท่ากับ 6.80±0.71 g/L ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ (Volatile Fatty Acids : VFA) มีปริมาณสูงสุดในกากน้ำตาลเท่ากับ 9,470.62±0.01 mg/L รองลงมาคือ ของเสียกลีเซอรอลมีค่าเท่ากับ 2,080±0.07 mg/L และทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1,216±0.02 mg/L ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) พบว่า กากน้ำตาลมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,355.56±5.23 g/L รองลงมาคือ ของเสียกลีเซอรอลและน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง มีค่าเท่ากับ 22.47±0.22 และ 0.0019±0.02 g/L ตามลำดับ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing Sugar) มีค่าสูงสุดในกากน้ำตาลเท่ากับ 267.92±0.01 g/L รองลงมาคือ ของเสียกลีเซอรอลและน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง มีค่าเท่ากับ 7.99±1.94 และ 3.41±0.96 g/L ตามลำดับ ปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกันสูงสุดคือ น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง มีค่าเท่ากับ 3.56±0.11 g/L รองลงมาคือ กากน้ำตาลและของเสียกลีเซอรอล มีค่าเท่ากับ 1.75±0.81 และ 1.65±0.71 g/L ตามลำดับ ปริมาณไขมัน (Lipids) พบว่า ของเสียกลีเซอรอลมีค่าสูงสุดเท่ากับ 87.39±2.82 g/L รองลงมาคือ

กากน้ำตาลและน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง มีค่าเท่ากับ 46.78±2.79 และ 11.90±0.97 g/L ตามลำดับ ปริมาณไฮโดรเจน (Hydrogen) พบมากสุดในของเสียกลีเซอรอล มีปริมาณร้อยละ 10.65±0.01 รองลงมาคือ น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง มีปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 8.71±0.01 และน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องมีปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 5.83±0.01 ปริมาณออกซิเจน (Oxygen) พบมากสุดในน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง มีปริมาณร้อยละ 37.75±0.04 รองลงมาคือ กากน้ำตาลมีปริมาณร้อยละ 37.55±0.22 และของเสียกลีเซอรอลมีปริมาณออกซิเจนร้อยละ 17.06±0.27 ปริมาณคาร์บอน (Carbon) พบมากที่สุดในของเสียกลีเซอรอล มีปริมาณร้อยละ 72.03±0.27 รองลงมาคือ กากน้ำตาลมาปริมาณคาร์บอนร้อยละ 55.15±0.04 และน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง มีปริมาณคาร์บอนต่ำสุดมีค่าร้อยละ 49.06±0.54 ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) พบมากสุดในน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง ที่ร้อยละ 4.48±0.02 รองลงมาคือ กากน้ำตาลและกลีเซอรอล มีปริมาณร้อยละ 1.46±0.03 และ 0.26±0.05 เมื่อนำค่าคาร์บอน และค่าไนโตรเจนมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N.ratio) ของของเสียทั้ง 3 ชนิด พบว่า มีค่าสูงสุดในของเสียกลีเซอรอล เท่ากับ 277.04 รองลงมาคือ กากน้ำตาลมีค่าเท่ากับ 37.77 และน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำสุด เท่ากับ 10.95 ดังตารางที่ 4.1

ซึ่งองค์ประกอบทางเคมี และทางกายภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นศักยภาพของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กาน้ำตาลและของเสียกลีเซอรอลในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในมีเทนด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่สำคัญได้แก่ ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) และปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) โดยน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องมีปริมาณซีโอดีต่ำ และของเสียกลีเซอรอลมีปริมาณซีโอดีสูงเมื่อนำมาหมักร่วมจะช่วยในการปรับสมดุลของสารอินทรีย์ในระบบ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการราย งานของ (Kangle, et al. 2012: 210-219) โดยกล่าวถึงองค์ประกอบหลักที่มีความเหมาะสมในกระบวนการหมักร่วมโดยเป็นแบบส่งเสริมกัน (Positive Synergisms) ช่วยปรับปรุงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ในระบบให้มีความสมดุล ทำให้ผลผลิตมีเทน (Methane Yield) สูงขึ้น เนื่องจากค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของกระบวนเพราะเป็นตัวกำหนดสุขภาพของจุลินทรีย์ภายในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง ของเสียกลีเซอรอล กากน้ำตาล และกล้าเชื้อ

พารามิเตอร์	ค่าการวิเคราะห์			
	น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง	ของเสียกลีเซอรอล	กากน้ำตาล	กล้าเชื้อ
pH	7.36±0.02	8.72±0.01	4.95±0.01	7.21±0.02
TS (g/L)	2.48±0.60	279.53±3.34	914.50±2.17	77.45±1.41
VS (g/L)	1.23±0.58	254.96±2.94	671.97±4.96	67.06±0.04
Ash (g/L)	1.24±0.02	2.57±0.40	24.25±2.79	7.39±1.56
COD (g/L)	6.80±0.71	1,525±1.07	1,210±2.83	ND
VFA (mg/L)	1,216±0.02	2,080±0.07	9,470±0.01	71.40±1.06
Carbohydrate (mg/L)	0.0019±0.02	22.47±0.22	1355±5.23	11.32±1.11
Reducing Sugar (g/L)	3.41±0.96	7.99±1.94	267.92±0.01	9.98±8.56
Protein (g/L)	3.56±0.11	1.65±0.71	1.75±0.81	16.87±0.91
Lipids (g/L)	11.90±0.97	87.39±2.82	46.78±2.79	1.33±0.97
Hydrogen (%)	8.71±0.09	10.65±0.01	5.83±0.02	ND
Oxygen (%)	37.75±0.04	17.06±0.27	37.55±0.22	ND
Carbon (%)	49.06±0.54	72.03±0.27	55.15±0.04	ND
Nitrogen (%)	4.48±0.02	0.26±0.05	1.46±0.03	ND
C/N ratio	10.95	277.04	37.77	ND

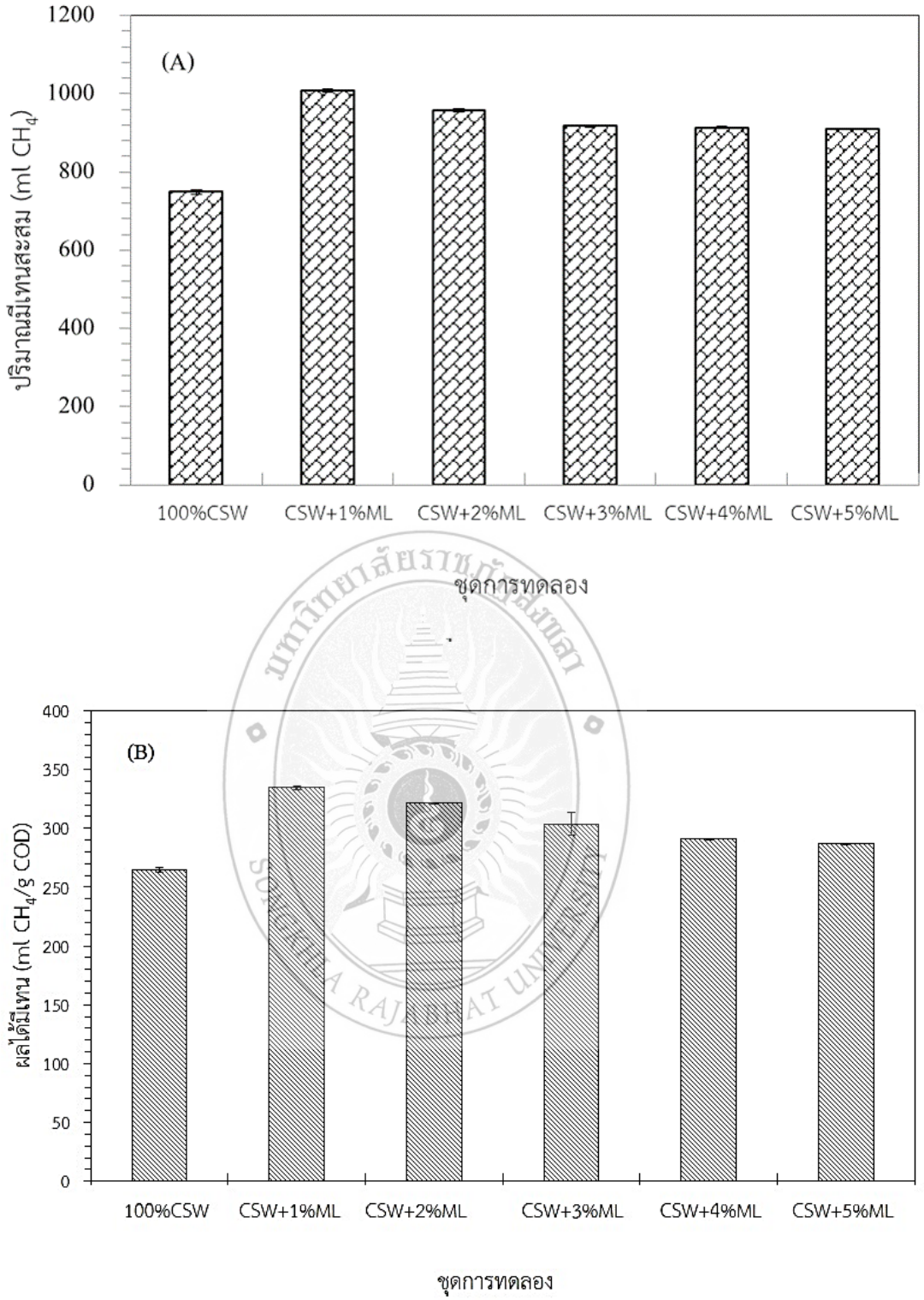
*ND = Not Determined.

4.2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างน้ำทิ้งและสารหมักร่วม ที่ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น

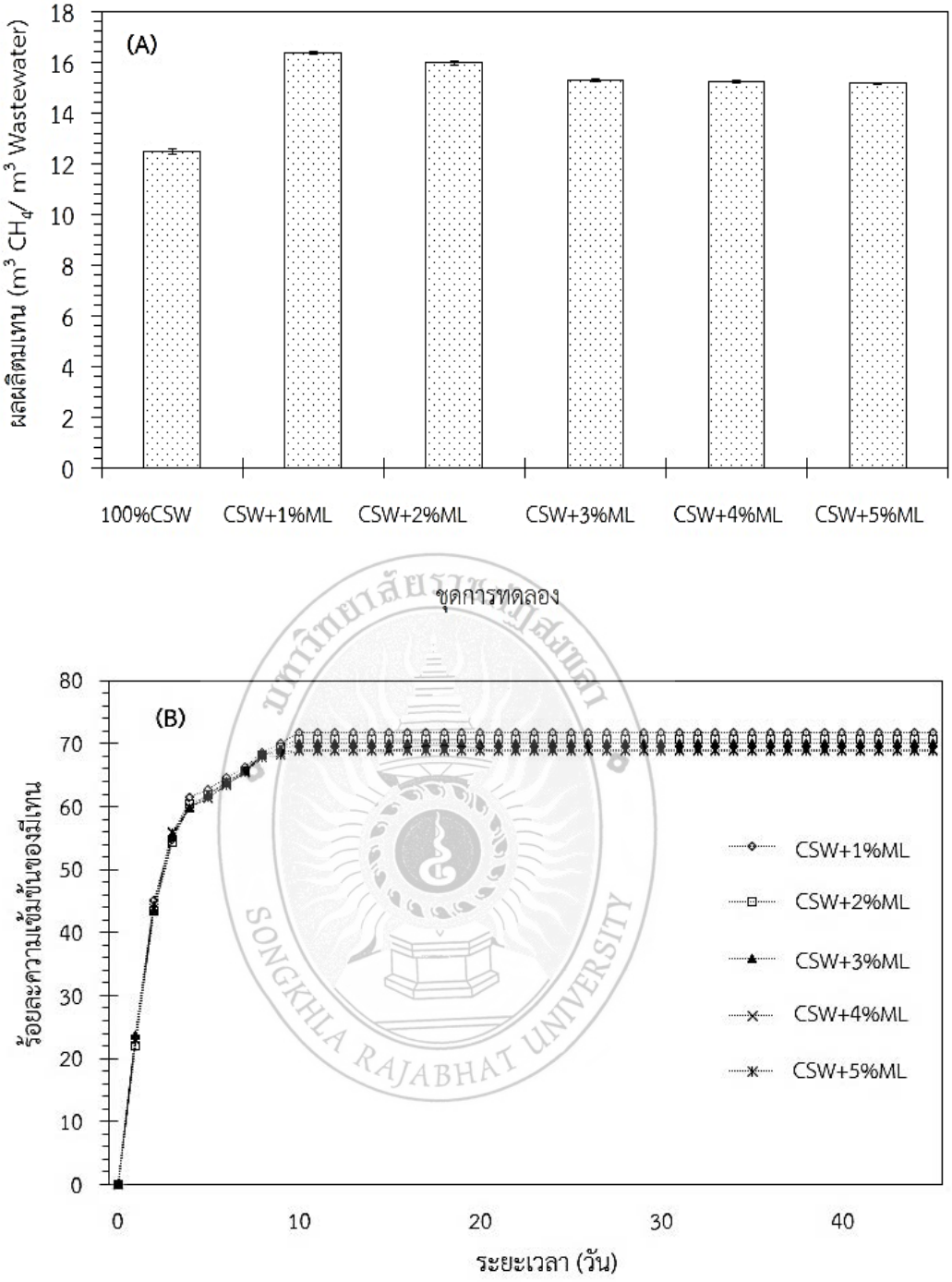
4.2.1 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาล โดยใช้กลยุทธ์การหมักร่วมในการผลิตมีเทน

การศึกษาอัตราส่วนในการหมักร่วมแบบไร้อากาศต่อประสิทธิภาพการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1, 98 : 2, 97 : 3, 96 : 4 และ 95 : 5 ดังตารางที่ 4.2 โดยให้มีปริมาณของแข็งระเหยได้ไม่เกินร้อยละ 2 ทำการหมักที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 45 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่ร้อยละ 99 : 1 มีศักยภาพในการผลิตมีเทนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยมีปริมาณมีเทนสะสมสูงสุดถึง 1008 ml CH_4 รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่อัตราส่วน

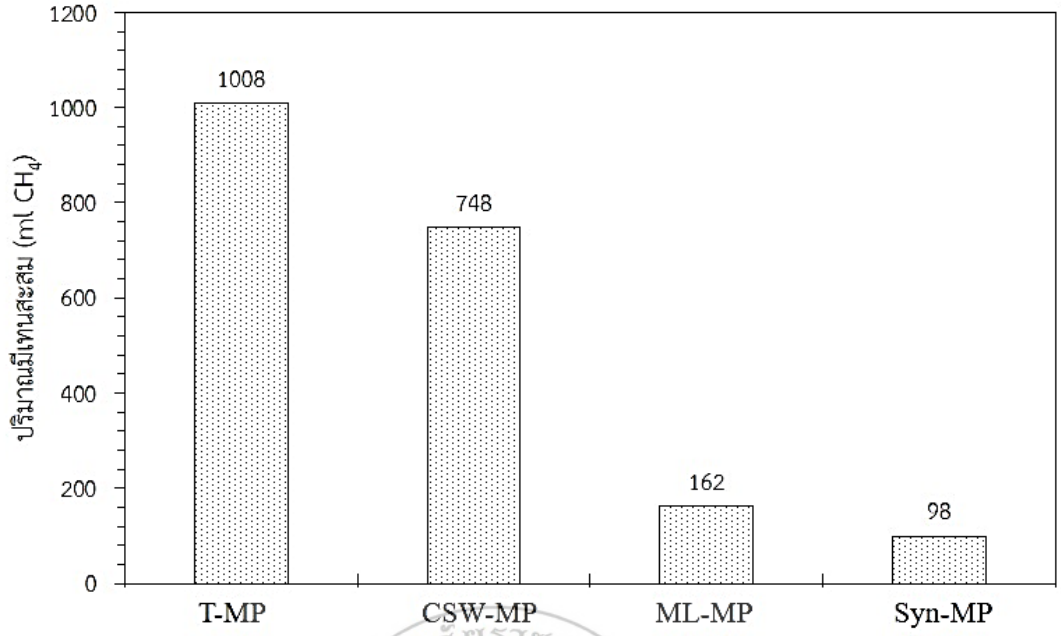
ของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลร้อยละ 98 : 2 มีปริมาณมีเทนสะสมเท่ากับ 958 ml CH_4 และต่ำสุดจะเป็นชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลร้อยละ 97 : 3, 96 : 4 และ 95 : 5 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) มีค่าเท่ากับ 918, 914 และ 910 ml CH_4 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1(A) สอดคล้องกับปริมาณผลได้มีเทน พบว่า ชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่ร้อยละ 99 : 1 มีปริมาณมีเทนสะสมสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) มีค่าเท่ากับ 334 ml CH_4/g COD รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลร้อยละ 98 : 2, 97 : 3, 96 : 4 และ 95 : 5 มีปริมาณผลได้มีเทนเท่ากับ 321, 303, 291 และ 287 ml CH_4/g COD ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1(B) สอดคล้องกับปริมาณผลผลิตมีเทน พบว่า ชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่ร้อยละ 99 : 1 มีศักยภาพในการผลิตมีเทนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยมีปริมาณผลผลิตมีเทนสูงสุดถึง 16.38 m^3 CH_4/m^3 Wastewater รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลร้อยละ 98 : 2 มีปริมาณมีเทนสะสมเท่ากับ 15.96 m^3 CH_4/m^3 Wastewater และต่ำสุดจะเป็นชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลร้อยละ 97 : 3, 96 : 4 และ 95 : 5 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) มีปริมาณผลผลิตมีเทนเท่ากับ 15.30, 15.23 และ 15.16 m^3 CH_4/m^3 Wastewater ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 (A) ในแต่ละชุดการทดลองนี้ พบว่า มีปริมาณความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 60-70 ดังรูปที่ 4.2(B) จากการศึกษาการเสริมกันของการผลิตมีเทน (Synergistic Methane Production) พบว่า การหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 มีผลในการเพิ่มศักยภาพการผลิตมีเทนได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นที่หมักร่วมกับกากน้ำตาล โดยที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 สามารถเพิ่มปริมาณมีเทนได้ 98 ml CH_4 ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีปริมาณมีเทนสะสมเท่ากับ 1008 ml CH_4 และผลได้มีเทนเท่ากับ 334 ml CH_4/g COD (รูปที่ 4.1) มีการย่อยสลายสูงถึงร้อยละ 96.23 และมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมซึ่งมีค่าเท่ากับ 25.10 ดังตารางที่ 4.2 เมื่อเทียบกับปริมาณผลได้มีเทนสูงสุดของร้อยละ 100 ของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง มีค่าเท่ากับ 265 ml CH_4/g COD การย่อยสลายร้อยละ 75.58 ในขณะที่ปริมาณผลได้มีเทนสูงสุดของร้อยละ 1 ของกากน้ำตาล มีค่าเท่ากับ 334 ml CH_4/g COD การย่อยสลายร้อยละ 95.43 ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับการหมักน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องเพียงอย่างเดียว ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มร้อยละ 1 ของกากน้ำตาล เข้าไปผสมกับน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องสามารถเพิ่มการผลิตมีเทนได้



รูปที่ 4.1 ปริมาณมีเทนสะสม (A) และผลได้มีเทนจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหาร ทะเล บรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาล (B)



รูปที่ 4.2 ผลผลิตมีเทนจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาล (A) และความเข้มข้นของมีเทน (B)



รูปที่ 4.3 ปริมาณมีเทนสะสมจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง โดยการหมักร่วมกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1; T-MP (Total Methane Production), CSW-MP (Canned Seafood Wastewater Methane Production), ML-MP (Molasses (1 %) Methane Production, Syn-MP (Synergistic Methane Production)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

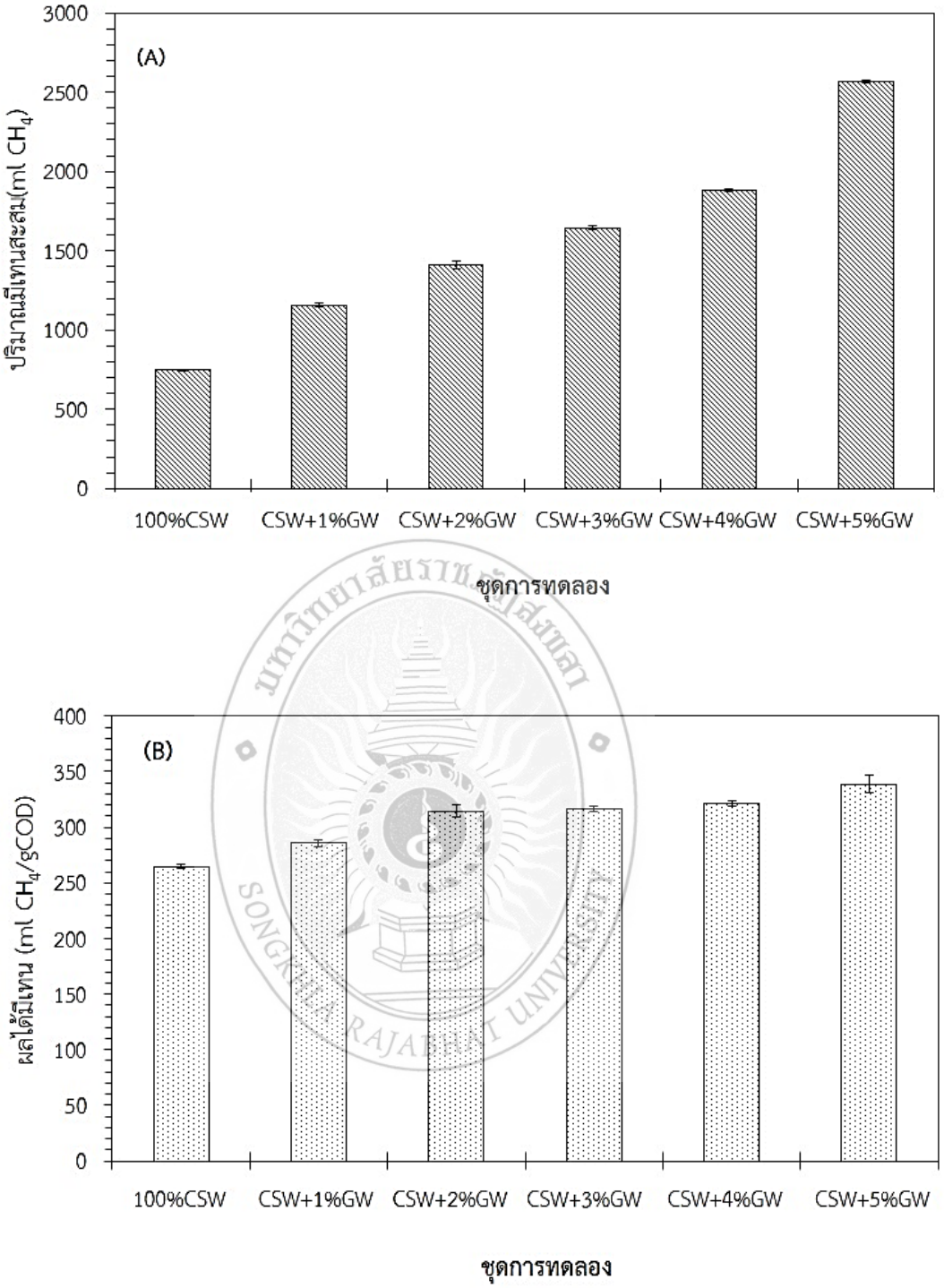
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ต่อผลได้มีเทนของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กากน้ำตาล และของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน

ชุดการทดลอง	C/N ratio	ร้อยละการย่อยสลาย	ผลได้มีเทน (ml CH_4/g COD)	ผลผลิตมีเทน (m^3 CH_4/m^3 Wastewater)
100%CSW	53.19	75.58	264.70	12.00
1%ML	68.49	95.43	519.45	6.29
5%GW	100	62.00	276.57	31.74
CSW+1%ML	25.10	96.23	334.06	16.38
CSW+2%ML	25.20	92.32	321.14	16.18
CSW+3%ML	25.30	87.12	303.32	15.62
CSW+4%ML	25.40	83.47	290.79	15.23
CSW+5%ML	25.50	81.87	286.56	15.16
CSW+1%GW	25.40	82.63	289.19	19.34
CSW+2%GW	25.78	93.43	287.05	24.44
CSW+3%GW	26.18	90.29	270.09	27.43
CSW+4%GW	25.60	89.43	261.95	30.54
CSW+5%GW	27.02	90.57	341.99	44.46

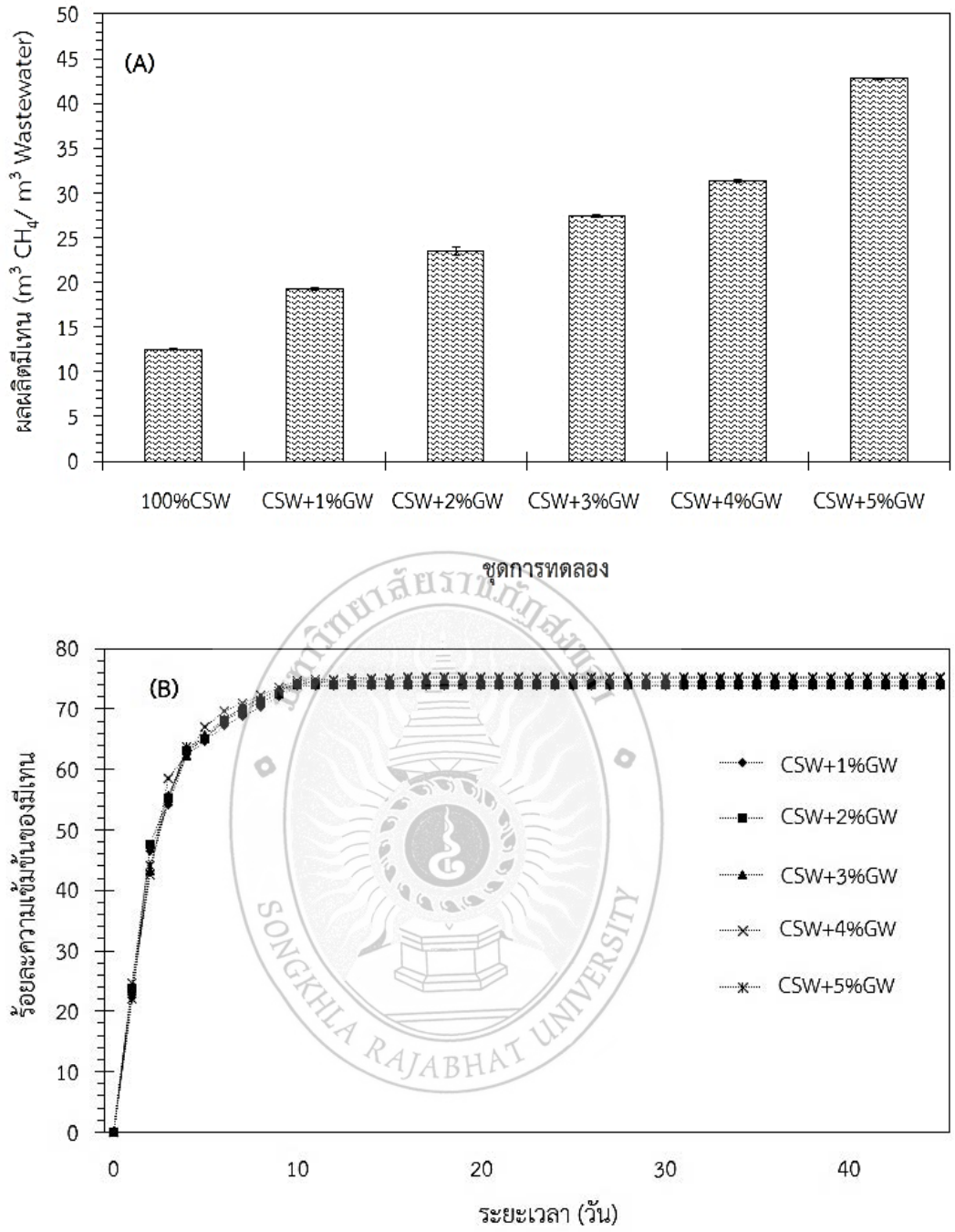
4.2.2 ผลการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอล โดยใช้กลยุทธ์การหมักร่วมในการผลิตมีเทน

ในส่วนของการศึกษาอัตราส่วนในการหมักร่วมแบบไร้อากาศต่อประสิทธิภาพการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1, 98 : 2, 97 : 3, 96 : 4 และ 95 : 5 ดังตารางที่ 4.2 โดยให้มีปริมาณของแข็งระเหยได้ไม่เกินร้อยละ 2 ทำการหมักที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 45 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่ร้อยละ 95 : 5 มีศักยภาพในการผลิตมีเทนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยมีปริมาณมีเทนสะสมสูงสุดถึง 2568 ml CH_4 รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลร้อยละ 96 : 4, 97 : 3, 96 : 2 และ 95 : 1 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) มีปริมาณมีเทนสะสมเท่ากับ 1882, 1646, 1412 และ 1158 ml CH_4 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4(A) สอดคล้องกับปริมาณผลได้มีเทน พบว่า ชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุ

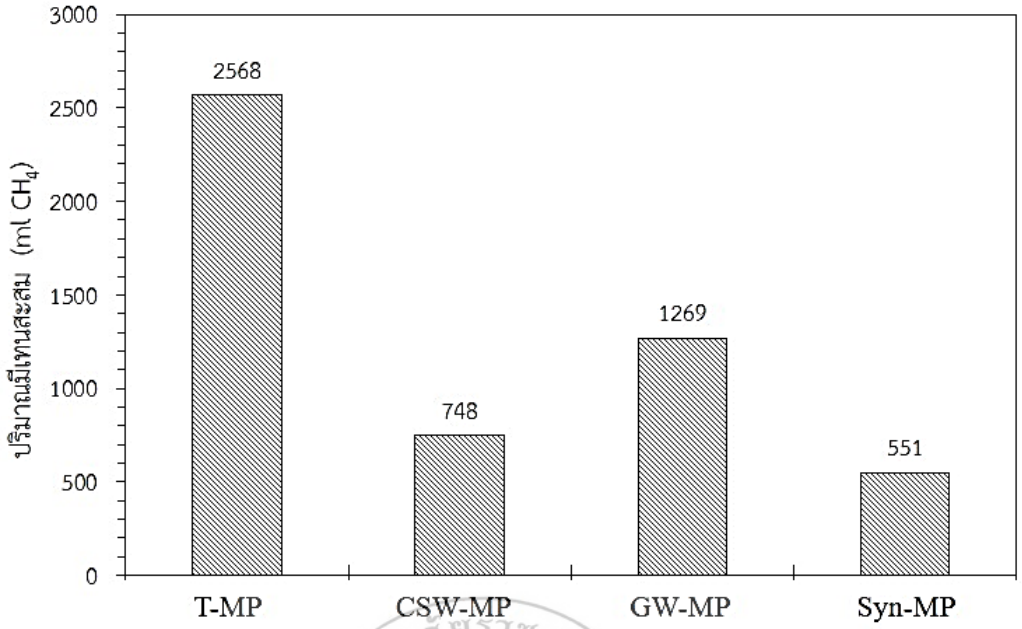
กระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่ร้อยละ 99 : 5 มีปริมาณผลได้มีเทนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) มีค่าเท่ากับ 339 ml CH_4/g COD รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลร้อยละ 98 : 4, 95 : 3, 97 : 2 และ 96 : 1 มีปริมาณผลได้มีเทนเท่ากับ 321, 316, 315 และ 286 ml CH_4/g COD ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4(B) และเช่นเดียวกับปริมาณผลผลิตมีเทน พบว่า ชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่ร้อยละ 95 : 5 มีศักยภาพในการผลิตมีเทนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยมีปริมาณผลผลิตมีเทนสูงสุดถึง 43 m^3 CH_4/m^3 Wastewater รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลร้อยละ 96 : 4, 97 : 3, 98 : 2 และ 99 : 1 มีปริมาณมีเทนสะสมเท่ากับ 31, 27, 24 และ 19 m^3 CH_4/m^3 Wastewater ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังรูปที่ 4.5(A) ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองนี้ พบว่า มีปริมาณความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 60-75 ดังรูปที่ 4.5(B) จากการศึกษาการเสริมกันของการผลิตมีเทน (Synergistic Methane Production) พบว่า การหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 มีผลในการเพิ่มศักยภาพการผลิตมีเทนได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นที่หมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล โดยที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 สามารถเพิ่มปริมาณมีเทนได้ 551 ml CH_4 ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งมีปริมาณมีเทนสะสมเท่ากับ 2568 ml CH_4 และผลได้มีเทนเท่ากับ 339 ml CH_4/g COD (รูปที่ 4.4) มีการย่อยสลายสูงถึงร้อยละ 94.05 และมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมซึ่งมีค่าเท่ากับ 27.02 ดังตารางที่ 4.2 เมื่อเทียบกับปริมาณผลได้มีเทนสูงสุดของร้อยละ 100 ของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง มีค่าเท่ากับ 265 ml CH_4/g COD การย่อยสลายร้อยละ 75.58 ในขณะที่ปริมาณผลได้มีเทน 62.00 ผลผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 27 เมื่อเทียบกับการหมักน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องเพียงอย่างเดียว ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มร้อยละ 5 ของของเสียกลีเซอรอล เข้าไปผสมกับน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องสามารถเพิ่มการผลิตมีเทนได้



รูปที่ 4.4 ปริมาณมีเทนสะสม (A) และผลได้มีเทน (B) จากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับของเสียกลีเซอรอล (GW)



รูปที่ 4.5 ผลผลิตมีเทน (A) และความเข้มข้นของมีเทน (B) จากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอล



รูปที่ 4.6 ปริมาณมีเทนสะสมจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง โดยการหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล ที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5; T-MP (Total Methane Production), CSW-MP (Canned Seafood Wastewater Methane Production), GW-MP (Glycerol Waste (5%) Methane Production, Syn-MP (Synergistic Methane Production)

การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลและของเสียกลีเซอรอล โดยใช้กลยุทธ์การหมักร่วมในการผลิตมีเทน โดยใช้สารหมักร่วมที่ร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 พบว่า เมื่อหมักร่วมกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99:1 และการหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95:5 ให้ปริมาณผลได้มีเทนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องเพียงอย่างเดียวถึงร้อยละ 27 ทั้งสองอัตราส่วน โดยจากการศึกษาการใช้ของเสียกลีเซอรอลเป็นสารหมักร่วมกับน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลที่ความเข้มข้นของสารหมักร่วมร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 พบว่าในอัตราส่วนร้อยละ 1 : 99 (v/v) ให้ผลได้มีเทน 577 ml CH_4/g VS ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 108 เมื่อเทียบกับการหมักน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลเพียงอย่างเดียว (Panpong, et al., 2014) และเช่นเดียวกับการศึกษาการใช้กากน้ำตาลเป็นสารหมักร่วมกับตะกอนน้ำเสีย พบว่า ในอัตราส่วน 7:3 ให้ผลได้มีเทน 270 ml CH_4/g COD ซึ่งปริมาณมีเทนในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 74.4 เป็น 82.8 (Lee, et al., 2014)

การย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยการหมักร่วมวัตถุดิบหลายชนิด สามารถเพื่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการหมักวัตถุดิบเพียงอย่างเดียว เช่น การเพิ่มผลผิตให้สูงขึ้น ช่วยในการผสมวัตถุดิบกับกล้าเชื้อให้เข้ากัน ทำให้จุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับสารตั้งต้นได้สูงขึ้น (O-Thong, Boe and Angelidaki, 2012 : 649) อีกทั้งจะช่วยปรับปรุงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) ในระบบให้มีความสมดุล ทำให้ผลผลิตมีเทน (Methane Yield) สูงขึ้น

เนื่องจากค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของกระบวนเพราะว่าเป็นตัวกำหนดสุขภาพของจุลินทรีย์ภายในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงเกินไป ไนโตรเจนจะถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว หากมีไนโตรเจนไม่เพียงพอ อัตราการเกิดเซลล์จุลินทรีย์จะลดลง ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้น้อยลง แต่ถ้าหากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำเกินไปจะทำให้ไนโตรเจนมากเกินความจำเป็น จุลินทรีย์จะย่อยสลายไนโตรเจนส่วนเกินก่อให้เกิดแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งอาจจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของระบบได้ (Kangle, et al., 2012; Koupaie, et al., 2014)

จากผลการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลและของเสียกลีเซอรอล โดยใช้กลยุทธ์การหมักร่วมในการผลิตมีเทน พบว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุดระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาล คือ 99 : 1 ให้ผลได้มีเทนและผลผลิตมีเทนเท่ากับ 334 ml CH_4/g COD และ 16.38 m^3 CH_4/m^3 Wastewater ตามลำดับ ในส่วนการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลอัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 95 : 5 โดยให้ผลได้มีเทนและผลผลิตมีเทนเท่ากับ 339 ml CH_4/g COD และ 43 m^3 CH_4/m^3 Wastewater ซึ่งผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นแสดงว่าการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลและของเสียกลีเซอรอลสามารถเพิ่มผลผลิตมีเทนได้

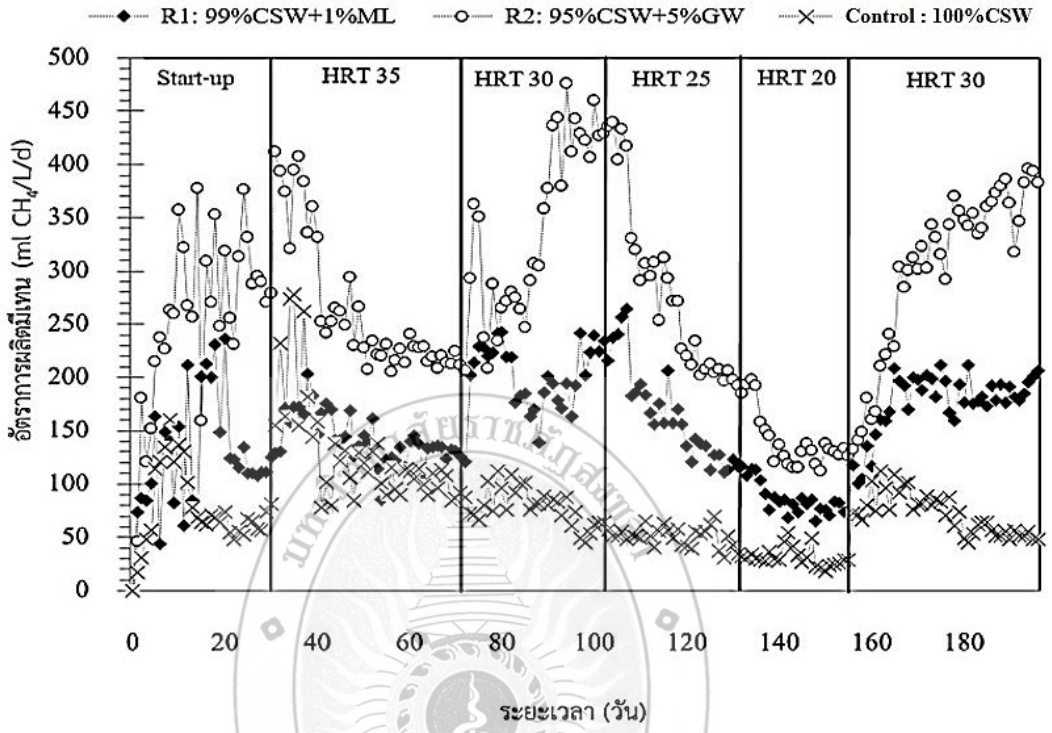
4.3 การศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่องระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR และ PFR โดยใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

4.3.1 การเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR

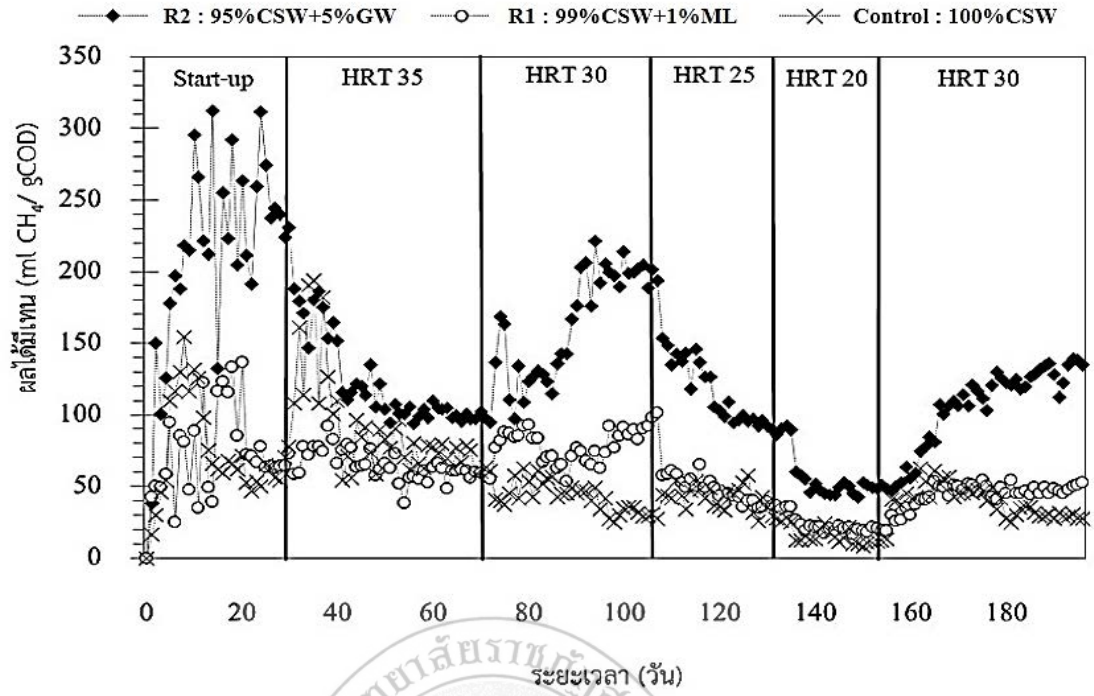
จากการศึกษาการผลิตมีเทนจากการหมักร่วมในแบบต่อเนื่องถ้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ขนาด 5 ลิตร ของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง(CSW) กับกากน้ำตาล (ML) ที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) และ และมีชุดควบคุมเป็นร้อยละ 100 ของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (Control) จากการทดลองระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน ผลการศึกษา พบว่า อัตราการผลิตมีเทนสูงสุดของชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R1) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 425 ml CH_4/L/d รองลงมาคือ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35, 25 และ 20 วัน มีอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 220, 205 และ 120 ml CH_4/L/d ตามลำดับ และจากการทดลองซ้ำที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 395 ml CH_4/L/d ซึ่งสอดคล้องกับชุดการทดลองน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) มีอัตราการผลิตมีเทนสูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 225 ml CH_4/L/d รองลงมาคือ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35, 25 และ 20 วัน มีอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 135, 125 และ 75 ml CH_4/L/d ตามลำดับ และจากการทดลองซ้ำที่ระยะเวลากัก

เก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 185 ml CH_4/L/d แต่แตกต่างจากชุดการทดลองที่ร้อยละ 100 ของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง พบว่า อัตราการผลิตมีเทนสูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35 วัน มีค่าเท่ากับ 85 ml CH_4/L/d รองลงมาคือ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30, 25 และ 20 วัน มีอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 50, 35 และ 20 ml CH_4/L/d ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 สอดคล้องกับผลได้มีเทนในระบบต่อเนื่องทั้ง 3 ชุดการทดลอง พบว่า ผลได้มีเทนสูงสุดของชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 200 ml CH_4/g COD ซึ่งคิดจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ (Organic Loading Rate : OLR) เท่ากับ 2.62 g COD/L/d รองลงมาคือ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35, 25 และ 20 วัน มีผลได้มีเทนเท่ากับ 99, 60 และ 30 ml CH_4/g COD ตามลำดับ ซึ่งคิดจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ (Organic Loading Rate : OLR) เท่ากับ 2.21, 3.17 และ 3.93 g COD/L/d ตามลำดับ และจากการทดลองซ้ำที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีผลได้มีเทนเท่ากับ 97 ml CH_4/g COD ในส่วนของชุดการทดลองน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) มีผลได้มีเทนสูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 120 ml CH_4/g COD ซึ่งคิดจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ (Organic Loading Rate : OLR) เท่ากับ 2.15 g COD/L/d รองลงมาคือ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35, 25 และ 20 วัน มีผลได้มีเทนเท่ากับ 99, 60 และ 30 ml CH_4/g COD ตามลำดับ ซึ่งคิดจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ (Organic Loading Rate : OLR) เท่ากับ 2.21, 3.17 และ 3.93 g COD/L/d ตามลำดับ และจากการทดลองซ้ำที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีผลได้มีเทนเท่ากับ 97 ml CH_4/g COD แตกต่างจากชุดการทดลองที่ร้อยละ 100 ของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (Control) พบว่า มีผลได้มีเทนสูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35 วัน มีค่าเท่ากับ 55 ml CH_4/g COD ซึ่งคิดจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ (Organic Loading Rate : OLR) เท่ากับ 1.44 g COD/L/d รองลงมาคือ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30, 25 และ 20 วัน มีผลได้มีเทนเท่ากับ 35, 25 และ 8 ml CH_4/g COD ซึ่งคิดจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ (Organic Loading Rate : OLR) เท่ากับ 1.79, 1.95 และ 2.28 g COD/L/d ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 เมื่อศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในระบบผลิตมีเทนแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน พบว่า ความเข้มข้นของมีเทนของชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) อยู่ในช่วงร้อยละ 60-70 โดยความเข้มข้นของมีเทนสูงสุดอยู่ที่ระยะกักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 67-70 ต่ำสุดอยู่ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30-40 และจากการทดลองซ้ำที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 60-63 สอดคล้องกับชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) มีความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 50-68 โดยความเข้มข้นของมีเทนสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลากักเก็บ

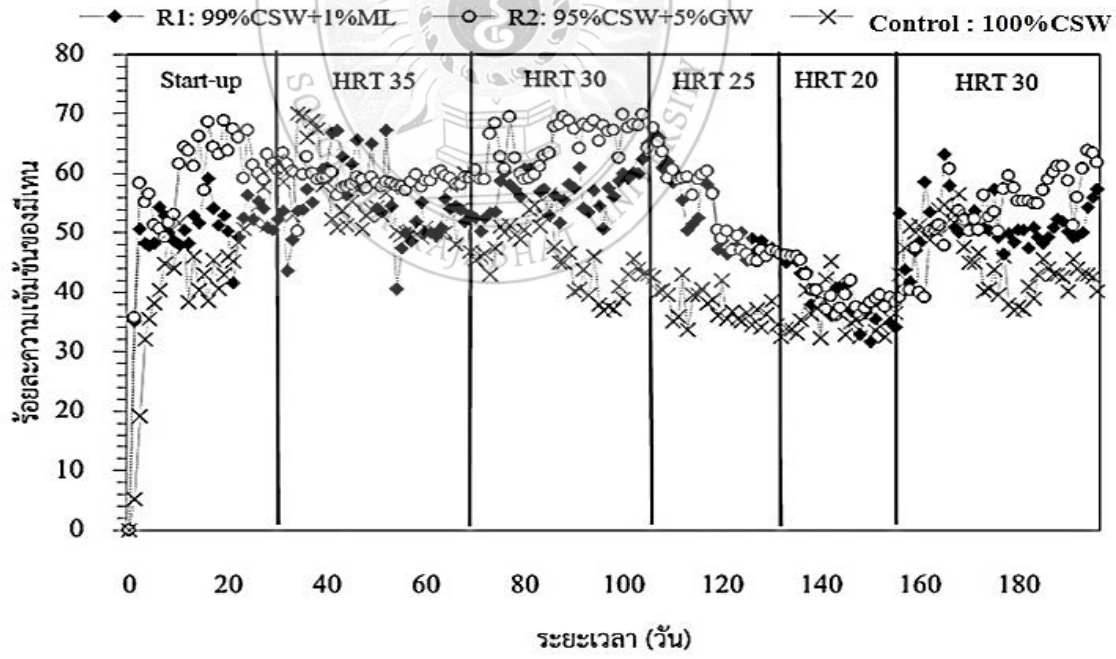
สารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 62-65 ต่ำสุดอยู่ที่ระยะกักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30-40 และจากการทดลองซ้ำที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 50-54 และชุดการทดลองที่ร้อยละ 100 ของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง มีความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 30-50 ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 อัตราการผลิตมีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในปฏิกรณ์แบบ CSTR



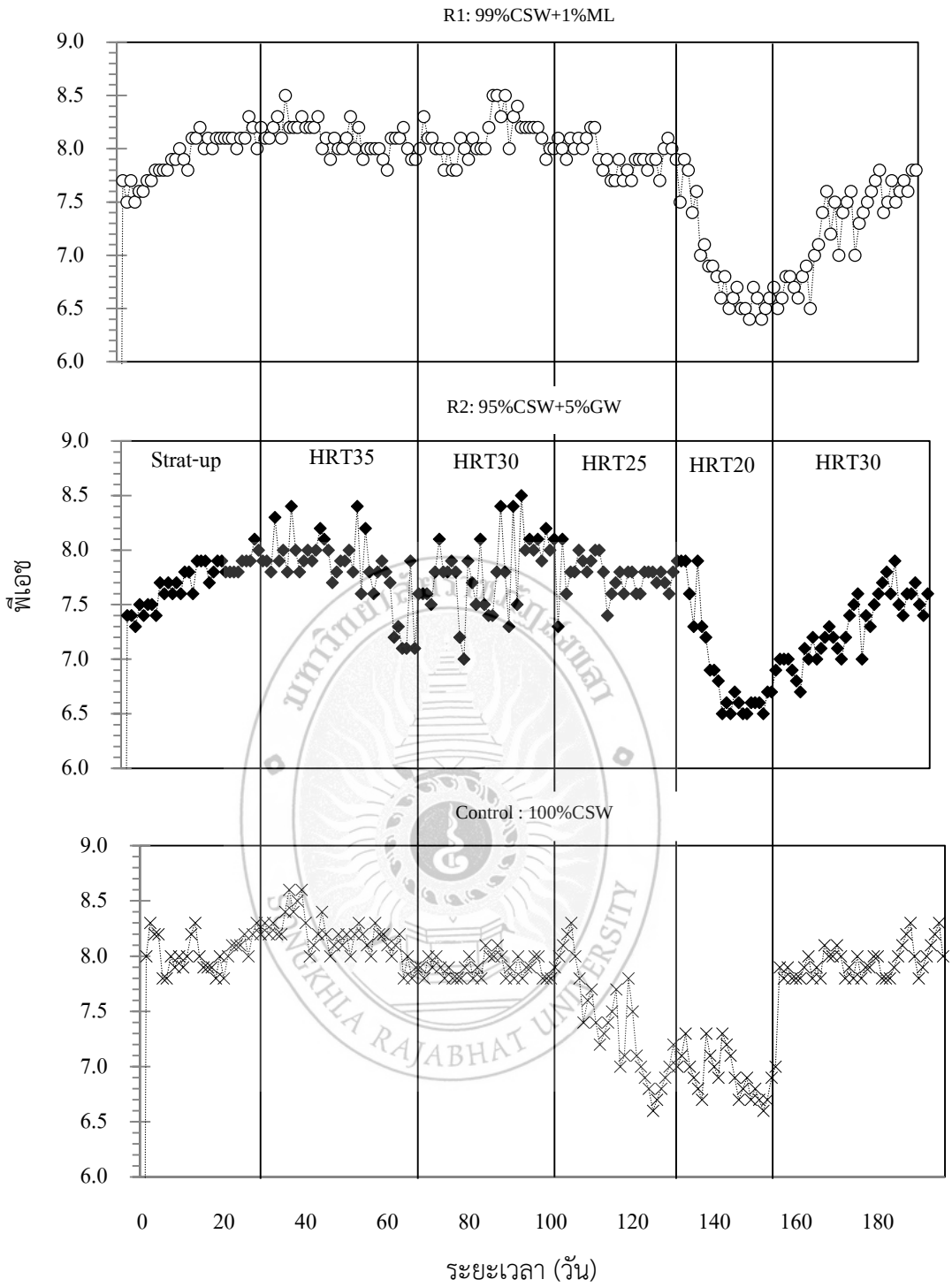
รูปที่ 4.8 ผลได้มีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในปฏิกรณ์แบบ CSTR



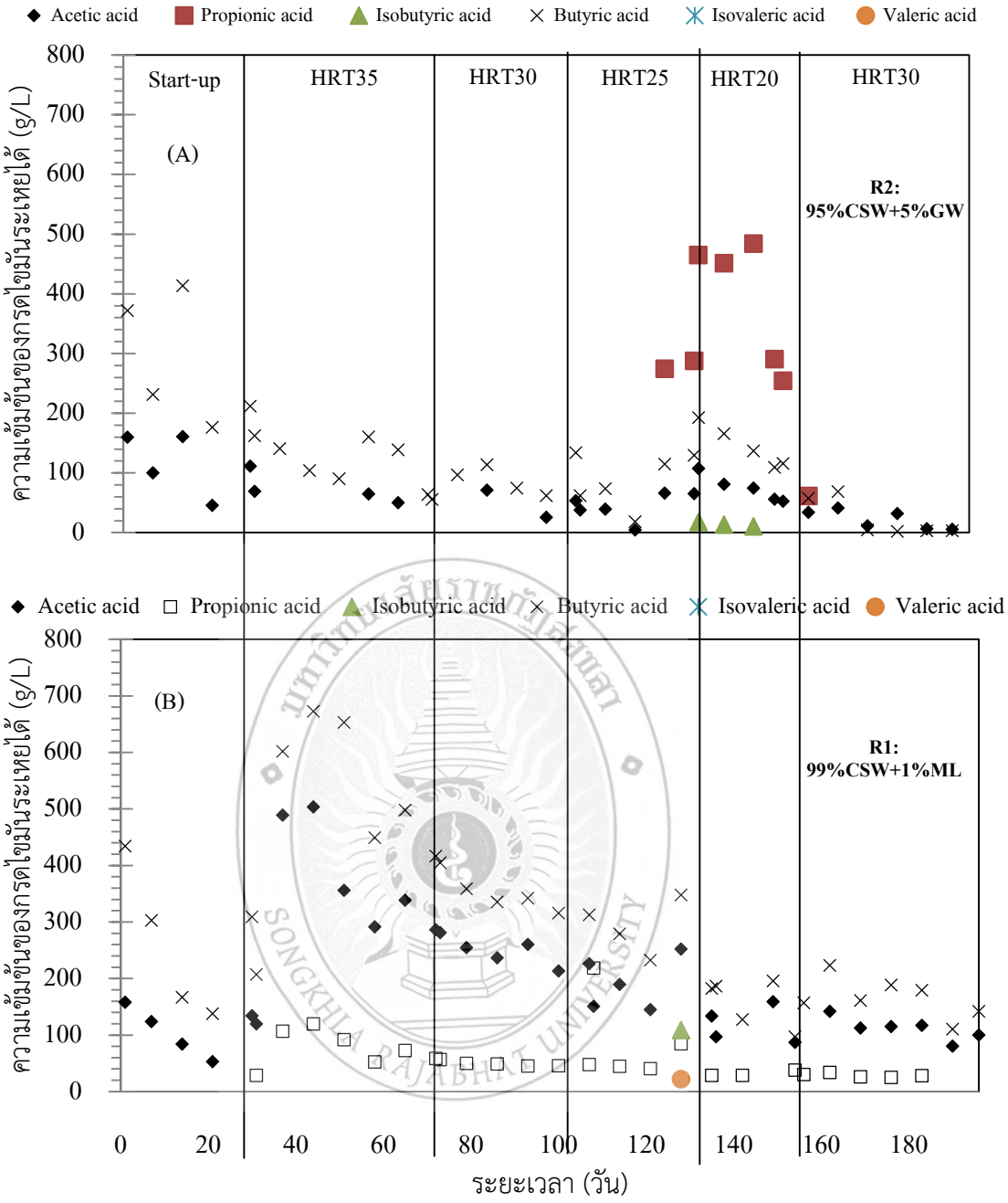
รูปที่ 4.9 ร้อยละความเข้มข้นของมีเทน ในการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในปฏิกรณ์แบบ CSTR

ผลการศึกษาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์โดยการควบคุมพีเอชของถังปฏิกรณ์ผลิตมีเทนให้มีค่าเท่ากับ 7.0-7.5 ตลอดการทดลอง น้ำเสียก่อนเข้าระบบจะต้องมีการปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) จากการทดลองพบว่า ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบผลิตมีเทนหลังการเก็บตัวอย่างในแต่ละวันมีการเปลี่ยนแปลงไปจากพีเอชเริ่มต้น โดยชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) มีค่าพีเอชสุดท้ายอยู่ในช่วง 7.5-8.5 แต่ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน จะมีค่าพีเอชที่ลดลงเหลือเพียง 6.0-6.5 เมื่อมีการทดลองซ้ำในระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน เนื่องจากเป็นระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ดีที่สุด พบว่า ค่าพีเอชสุดท้ายของระบบเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 7.5-8.0 สอดคล้องกับชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) มีค่าพีเอชสุดท้ายอยู่ในช่วง 7.0-8.0 แต่ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน จะมีค่าพีเอชที่ลดลงเหลือเพียง 6.2-6.5 เมื่อมีการทดลองซ้ำในระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน เนื่องจากเป็นระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ดีที่สุด พบว่า ค่าพีเอชสุดท้ายของระบบเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 7.3-7.5 และเช่นเดียวกับชุดการทดลองร้อยละ 100 ของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (Control) มีค่าพีเอชสุดท้ายอยู่ในช่วง 7.5-8.0 แต่ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน จะมีค่าพีเอชที่ลดลงเหลือเพียง 6.3-6.4 ดังรูปที่ 4.10

ในส่วนของผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยได้ พบว่า น้ำเสียสุดท้ายที่ออกจากระบบผลิตมีเทนแบบต่อเนื่องในชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) พบว่า มีปริมาณกรดไขมันระเหยได้อยู่ในช่วง 30-400 g/L ส่วนใหญ่เป็นกรดอะซิติก บิวทีริก และโพพิโอนิก แต่ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35 วัน จะมีปริมาณกรดไขมันระเหยได้สูงขึ้นอยู่ในช่วง 300-500 g/L และในชุดการทดลองของ น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) มีปริมาณกรดไขมันระเหยได้อยู่ในช่วง 20-200 g/L ส่วนใหญ่เป็นกรดอะซิติก และบิวทีริก แต่เมื่อระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน ปริมาณกรดไขมันระเหยได้สูงขึ้นอยู่ในช่วง 200-500 g/L โดยจะพบเป็นกรดโพพิโอนิก และไอโซบิวทีริก ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 พีเอชสุดท้ายของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในปฏิกรณ์แบบ CSTR



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยได้ของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในปฏิกรณ์แบบ CSTR

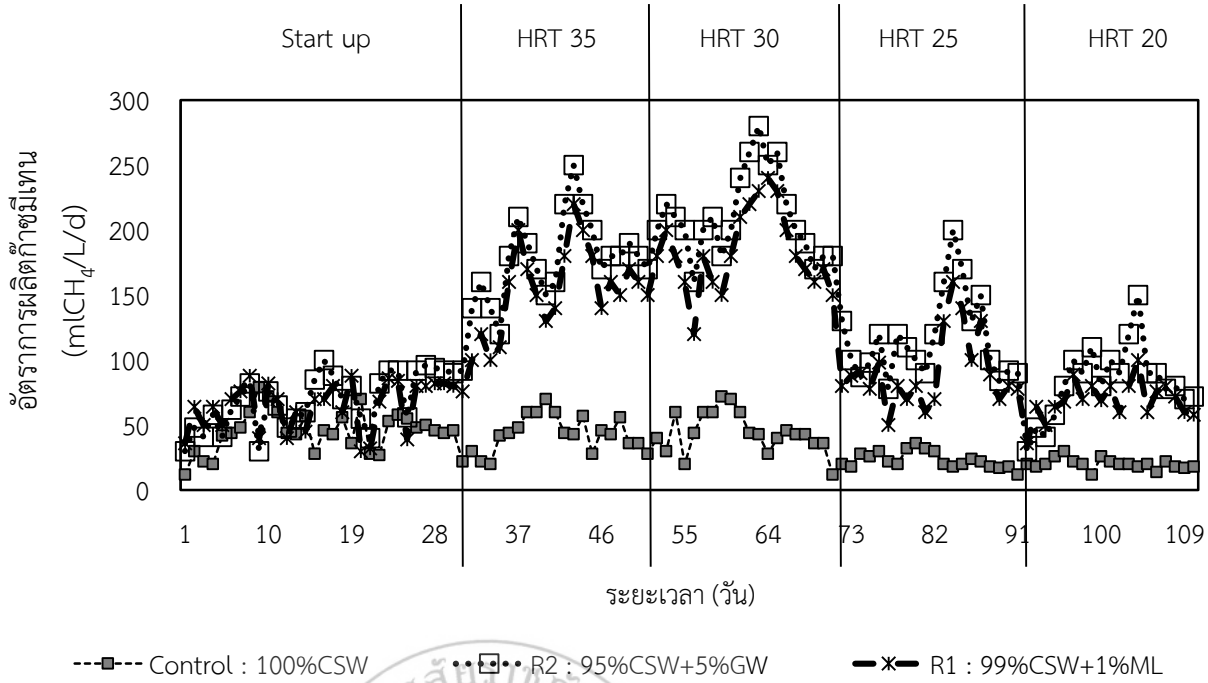
การผลิตมีเทนจากการหมักร่วมในแบบต่อเนื่อง ของน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 และการหมักร่วมน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 ซึ่งใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยศึกษาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน พบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มี

อัตราการมีเทนสูงสุดทั้งการหมักรวมของเสียกลีเซอรอลและกากน้ำตาลซึ่งมีค่าเท่ากับ 425 และ 395 ml CH_4/L/d ซึ่งสอดคล้องกับศักยภาพการผลิตมีเทน พบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีผลได้มีเทนสูงสุดทั้งการหมักรวมของเสียกลีเซอรอลและกากน้ำตาลซึ่งมีค่าเท่ากับ 162 และ 110 ml CH_4/g COD ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราการผลิตมีเทนได้เมื่อเทียบกับการหมักเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องเพียงอย่างเดียว จากการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ลดลง อัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลได้มีเทนลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ นุชแดง และ ผลากรกุล (Nuchdang and Phalakornkule., 2012) ทำการศึกษาการย่อยสลายแบบไร้อากาศของมูลสุกรกับของเสียกลีเซอรอล พบว่า ผลได้มีเทนสูงสุดจากการย่อยสลายมูลสุกรกับของเสียกลีเซอรอลอยู่ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 1.6 g COD/L/d มีค่าเท่ากับ 320 ml CH_4/g COD ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ลดลง ทำให้ผลผลิตมีเทนลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ ลี และคณะ (Lee, et al., 2014) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมกากน้ำตาลกับกากตะกอนน้ำเสียแบบต่อเนื่อง พบว่า เมื่อลดระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ทำให้ผลิตมีเทนลดลง เนื่องจากการสะสมกรดไขมันระเหยได้ทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง ในส่วนของผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยได้ พบว่า เมื่อระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ลดลง อัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยได้ ซึ่งจะเห็นได้จากน้ำเสียสุดท้ายที่ออกจากระบบผลิตมีเทนแบบต่อเนื่องในชุดการทดลองการหมักร่วมน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 มีปริมาณกรดไขมันระเหยได้อยู่ในช่วง 20-200 mg/L ส่วนใหญ่เป็นกรดอะซิติก และบิวทีริก แต่เมื่อระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน ปริมาณกรดไขมันระเหยได้สูงขึ้นอยู่ในช่วง 200-500 mg/L โดยจะพบเป็นกรดโพรพิโอนิก และไอโซบิวทีริก และในชุดการทดลองการหมักร่วมน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 พบว่า มีปริมาณกรดไขมันระเหยได้อยู่ในช่วง 30-400 mg/L ส่วนใหญ่เป็นกรดอะซิติก บิวทีริก และโพพิโอนิก แต่ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35 วัน จะมีปริมาณกรดไขมันระเหยได้สูงขึ้นอยู่ในช่วง 300-500 mg/L สอดคล้องกับผลการทดลองค่าพีเอช พบว่าเมื่อกรดไขมันเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบไร้อากาศอยู่ในช่วง 6.8-7.4 (Khanal, 2008) จากการศึกษาของ วาง และ เมง (Wang and Meng, 2000) รายงานว่ากรดไขมันระเหยได้มีความสำคัญต่อการผลิตมีเทน โดยความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยได้มีผลต่อประสิทธิภาพการหมัก ผลผลิตมีเทนและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียผลิตมีเทน ที่ความเข้มข้นของกรดโพรพิโอนิกมากกว่า 800 mg/L จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียผลิตมีเทน และทำให้ผลผลิตมีเทนลดลง ซึ่งความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยได้ที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบไร้อากาศต้องมีค่าไม่เกิน 2,000 mg/L

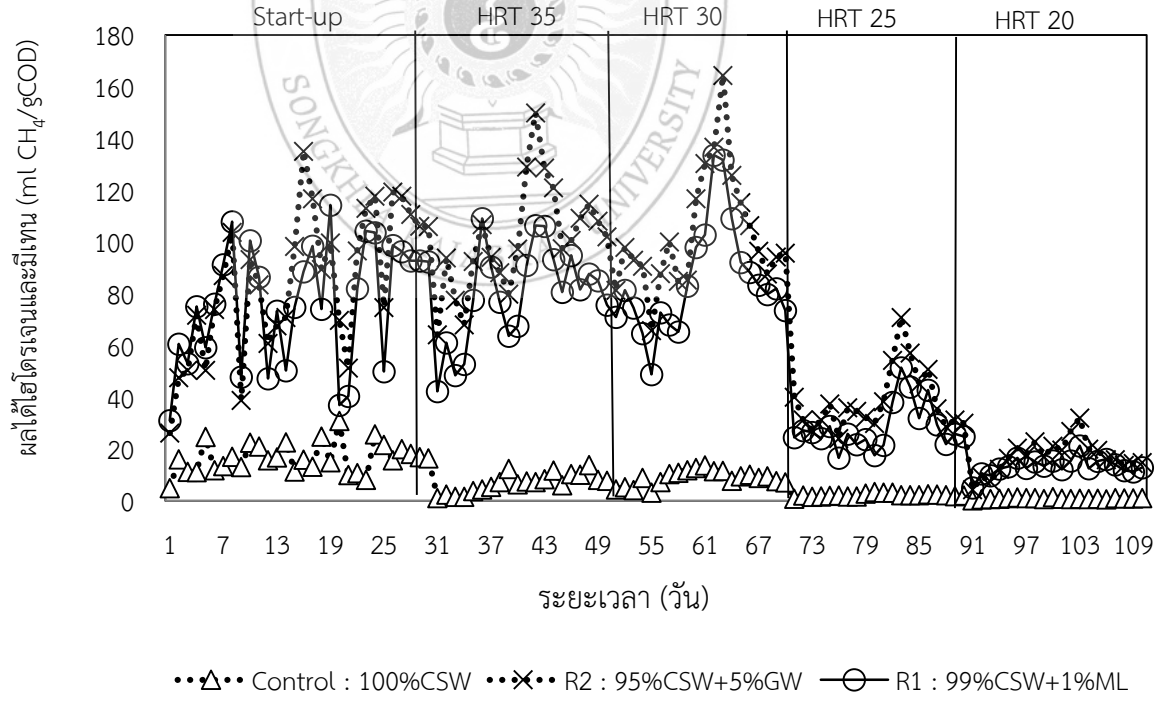
4.3.2 การเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ PFR

จากการศึกษาการผลิตมีเทนจากการหมักร่วมในแบบต่อเนื่องถ้วยถังปฏิกรณ์แบบ PFR ขนาด 5 ลิตร ของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง(CSW) กับกากน้ำตาล (ML) ที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) และ และมีชุดควบคุมเป็นร้อยละ 100 ของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (Control) จากการทดลองระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน ผลการศึกษา พบว่า อัตราการผลิตมีเทนสูงสุดของชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 285 ml CH_4/L/d รองลงมาคือ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35, 25 และ 20 วัน มีอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 250, 200 และ 150 ml CH_4/L/d ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับชุดการทดลองน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) มีอัตราการผลิตมีเทนสูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 230 ml CH_4/L/d รองลงมาคือ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35, 25 และ 20 วัน มีอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 200, 180 และ 100 ml CH_4/L/d ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.12)

สอดคล้องกับผลได้มีเทนในระบบต่อเนื่อง พบว่า ผลได้มีเทนสูงสุดของชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 160 ml CH_4/g COD ซึ่งคิดจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ (Organic Loading Rate : OLR) เท่ากับ 2.62 g COD/L/d รองลงมาคือ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35, 25 และ 20 วัน มีผลได้มีเทนเท่ากับ 145, 75 และ 35 ml CH_4/g COD ตามลำดับ ซึ่งคิดจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ (Organic Loading Rate : OLR) เท่ากับ 2.21, 3.17 และ 3.93 g COD/L/d ตามลำดับ ในส่วนของชุดการทดลองน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) มีผลได้มีเทนสูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 110 ml CH_4/g COD ซึ่งคิดจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ (Organic Loading Rate : OLR) เท่ากับ 2.15 g COD/L/d รองลงมาคือ ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35, 25 และ 20 วัน มีผลได้มีเทนเท่ากับ 100, 40 และ 20 ml CH_4/g COD ตามลำดับ ซึ่งคิดจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้กับระบบ (Organic Loading Rate : OLR) เท่ากับ 2.21, 3.17 และ 3.93 g COD/L/d ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.13)

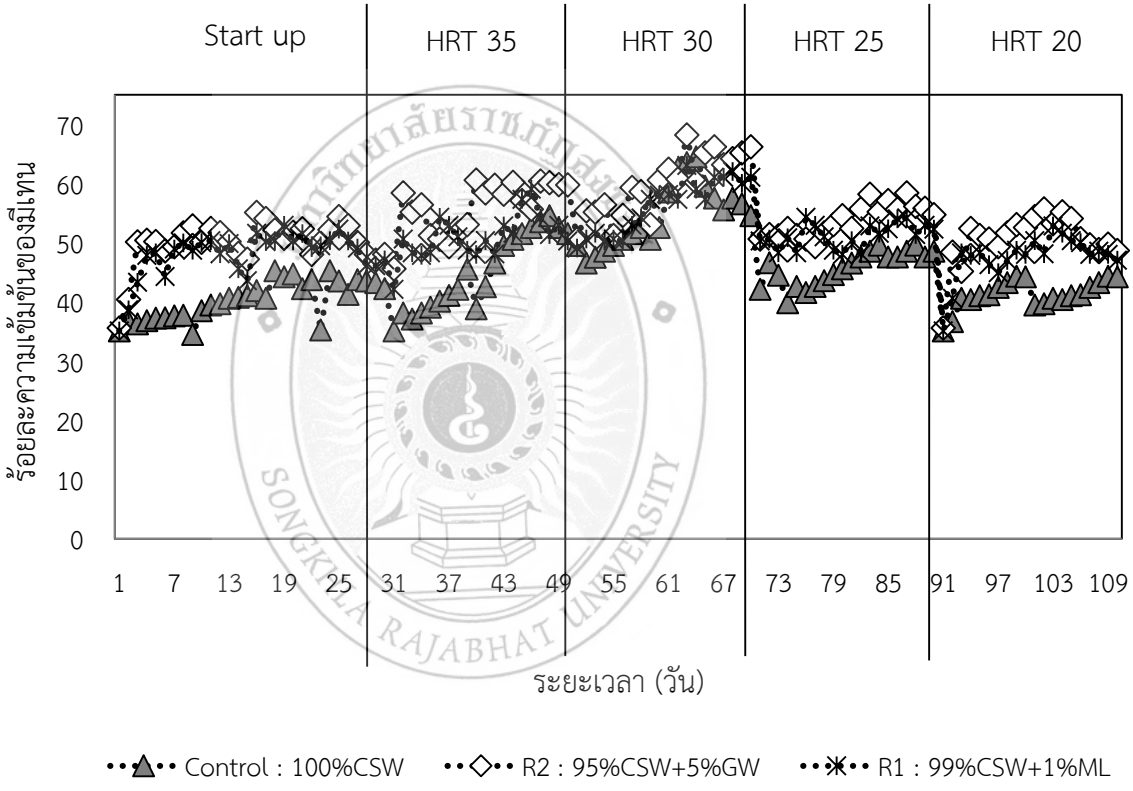


รูปที่ 4.12 อัตราการผลิตมีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในปฏิกรณ์แบบ PFR

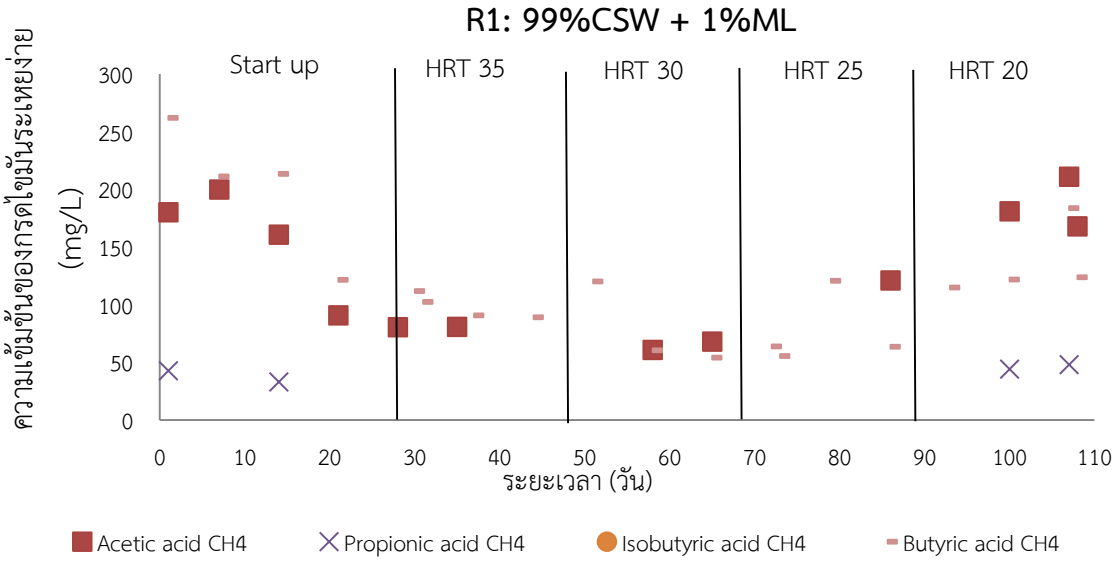


รูปที่ 4.13 ผลได้มีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในปฏิกรณ์แบบ PFR

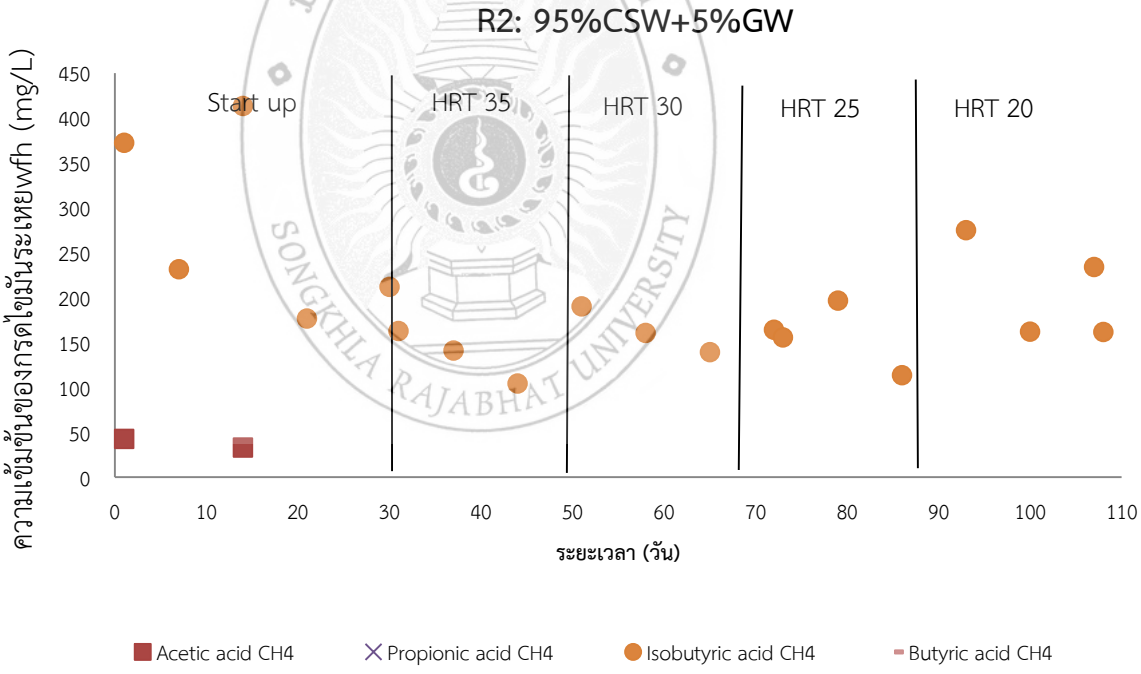
เมื่อศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในระบบผลิตมีเทนแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน พบว่า ความเข้มข้นของมีเทนของชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) อยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 โดยความเข้มข้นของมีเทนสูงสุดอยู่ที่ระยะกักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 60-65 ต่ำสุดอยู่ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 40-50 สอดคล้องกับชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) มีความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 50-60 เช่นกัน โดยความเข้มข้นของมีเทนสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 58-60 ต่ำสุดอยู่ที่ระยะกักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 38-40 ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ร้อยละความเข้มข้นของมีเทน ในการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในปฏิกรณ์แบบ PFR



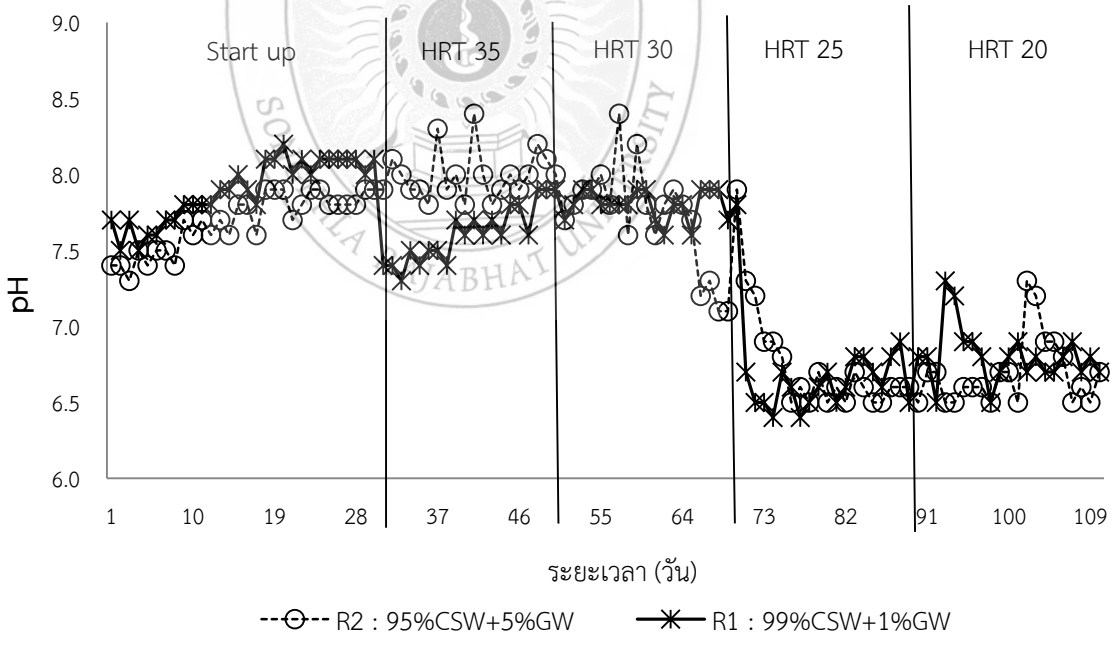
รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายของไฮโดรเจน และมีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและกากน้ำตาล ในถังปฏิกรณ์ชนิด PFR ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายของไฮโดรเจน และมีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลในถังปฏิกรณ์ชนิด PFR ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน

ในส่วนของผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยได้ พบว่า น้ำเสียสุดท้ายที่ออกจากระบบผลิตมีเทนแบบต่อเนื่องในชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) พบว่า มีปริมาณกรดไขมันระเหยได้อยู่ในช่วง 30-260 g/L ส่วนใหญ่เป็นกรดอะซิติก บิวทีริก และโพพิโอนิก และในชุดการทดลองของ น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) มีปริมาณกรดไขมันระเหยได้อยู่ในช่วง 30-400 g/L ส่วนใหญ่เป็นกรดอะซิติก และไอโซบิวทีริก รูปที่ 4.15 และ 4.16

ผลการศึกษาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์โดยการควบคุมพีเอชของถังปฏิกรณ์ผลิตมีเทนให้มีค่าเท่ากับ 7.0-7.5 ตลอดการทดลอง น้ำเสียก่อนเข้าระบบจะต้องมีการปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) จากการทดลองพบว่า ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบผลิตมีเทนหลังการเก็บตัวอย่างในแต่ละวันมีการเปลี่ยนแปลงไปจากพีเอชเริ่มต้น โดยชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง กับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) มีค่าพีเอชสุดท้ายอยู่ในช่วง 7.5-8.0 แต่ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน จะมีค่าพีเอชที่ลดลงเหลือเพียง 6.5-6.8 สอดคล้องกับชุดการทดลองของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) มีค่าพีเอชสุดท้ายอยู่ในช่วง 7.0-8.0 แต่ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน จะมีค่าพีเอชที่ลดลงเหลือเพียง 6.2-6.8 ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 พีเอชสุดท้ายของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง (CSW) กับกากน้ำตาล (ML) และของเสียกลีเซอรอล (GW) ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่แตกต่างกัน ในปฏิกรณ์แบบ PFR

จากผลการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลและของเสียกลีเซอรอล โดยใช้กลยุทธ์การหมักร่วมในการผลิตมีเทน เปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์แบบ CSTR และ PFR พบว่า ในถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR กระบวนการหมักร่วมระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาล (99 : 1) ให้ผลได้มีเทนและผลผลิตมีเทนเท่ากับ 120 ml CH_4/g COD และ 5.89 m^3 CH_4/m^3 Wastewater ในส่วนการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอล (95 : 5) โดยให้ผลได้มีเทนและผลผลิตมีเทนเท่ากับ 200 ml CH_4/g COD และ 25.37 m^3 CH_4/m^3 Wastewater ส่วนในถังปฏิกรณ์ชนิด PFR กระบวนการหมักร่วมระหว่างน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาล (99 : 1) ให้ผลได้มีเทนและผลผลิตมีเทนเท่ากับ 110 ml CH_4/g COD และ 5.39 m^3 CH_4/m^3 Wastewater ในส่วนการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอล (95 : 5) โดยให้ผลได้มีเทนและผลผลิตมีเทนเท่ากับ 160 ml CH_4/g COD และ 20.29 m^3 CH_4/m^3 Wastewater จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR ให้ผลผลิตมีเทนดีกว่าถังปฏิกรณ์ชนิด PFR เนื่องจากปฏิกรณ์ชนิด CSTR เป็นระบบกวนผสมแบบสมบูรณ์ (complete mixing) ทำให้จุลินทรีย์สามารถกินอาหารในระบบได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลต่อศักยภาพการผลิตมีเทนได้ จึงนำการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95 : 5 ไปทำเดินระบบในถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR ขนาด 200 ลิตร ต่อไป

4.4 การศึกษาโครงสร้างของกลุ่มประชากรของจุลินทรีย์ภายในตะกอนจุลินทรีย์ (Microbial community analysis) จากถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ระดับห้องปฏิบัติการ

จากการศึกษาโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค PCR-DGGE โดยใช้ตะกอนในระบบผลิตมีเทนแบบต่อเนื่อง โดยมีทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง คือ ชุดการทดลองที่ใช้น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วน 99 : 1 (R1), ชุดการทดลองที่ใช้น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95 : 5 (R2), และชุดการทดลองที่ใช้น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องร้อยละ 100 (Control) ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองมีตัวอย่างดังนี้ คือ เริ่มต้นระบบ (Start-up), ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 35 วัน (HRT 35), ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน (HRT 30), ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 25 วัน (HRT 25), ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 20 วัน (HRT 20) และการทดลองซ้ำที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน (Re-HRT 30)

ผลการศึกษาโครงสร้างประชากรแบคทีเรียในชุดการทดลองการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) ในตัวอย่างการเริ่มต้นระบบ พบประชากรแบคทีเรีย 16 จีนัส ประกอบด้วย *Desulfurivibrio* sp., *Enhydrobacter* sp., *Alloprevotella* sp., *Acholeplasma* sp., *Alteromonas* sp., *Anaerovorax* sp., *Fusobacterium* sp., *Clostridium* sp., *Alcaligenes* sp., *Lachnoanaerobaculum* sp., *Shewanella* sp., *Christensenella* sp., *Ciceribacter* sp., *Persephonella* sp.,

Desulfotomaculum sp., *Nitrosomonas* sp., *Anaerobaculum* sp., *Coprococcus* sp., *Blautia* sp., *Intestinibacter* sp., *Candidatus Carsonella* sp. และ *Candidantus Pelagibacter* sp. ดังรูปที่ 4.18 โดยที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน เป็นระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตมีเทนของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 พบประชากรแบคทีเรียกลุ่มเด่น 3 จีนัส ประกอบด้วย *Desulfurivibrio* sp., *Alteromonas* sp. และ *Clostridium* sp. ซึ่ง *Desulfurivibrio* sp. เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในขั้นตอน Acetogenesis เป็นแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนหลายอะตอม (คาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม) และเอทานอลให้เป็นอะซิเตท ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ *Clostridium* sp. เป็นแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ได้ทั้งในขั้นไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยได้อื่นๆ (Acetogenesis) แบคทีเรียอะซิโตจีนิก (แบคทีเรียสร้างอะซิเตต) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนในการสร้างมีเทน การผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้น ต้องการสารตั้งต้นเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทามีน (Methylamine) และในส่วนของแบคทีเรียกลุ่ม *Alteromonas* sp. เป็นตัวที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ไปเป็นอะซิเตทเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตมีเทนต่อไป

ชุดการทดลองการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) ของตัวอย่างในการเริ่มต้นระบบ พบประชากรแบคทีเรียกลุ่มเด่น 16 จีนัส ประกอบด้วย *Desulfurivibrio* sp., *Alloprevotella* sp., *Acholeplasma* sp., *Alteromonas* sp., *Fusobacterium* sp., *Clostridium* sp., *Alcaligenes* sp., *Shewanella* sp., *Christensenella* sp., *Ciceribacter* sp., *Persephonella* sp., *Nitrosomonas* sp., *Anaerobaculum* sp., *Coprococcus* sp., *Intestinibacter* sp. และ *Candidatus Pelagibacter* sp. โดยระยะกักเก็บสารอินทรีย์ 30 เป็นระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตมีเทนของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 และพบประชากรแบคทีเรียกลุ่มเด่น 5 จีนัส ประกอบด้วย *Desulfurivibrio* sp., *Fusobacterium* sp., *Clostridium* sp., *Christensenella* sp. และ *Anaerobaculum* sp. ดังรูปที่ 4.19 ซึ่ง *Desulfurivibrio* sp. เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในขั้นตอน Acetogenesis เป็นแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนหลายอะตอม (คาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม) และเอทานอลให้เป็นอะซิเตท ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ *Clostridium* sp. เป็นแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ได้ทั้งในขั้นไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยได้อื่นๆ (Acetogenesis) และในส่วนของ *Christensenella* sp. เป็นแบคทีเรียสร้างกรดในขั้นตอนเอซิโดจีเนซีส (Acidogenesis) หรือขั้นตอนการหมัก (Fermentation) ดูดซึมเข้าภายในเซลล์ เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยได้เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทิริก กรดโพรพิโอนิก เป็นต้น

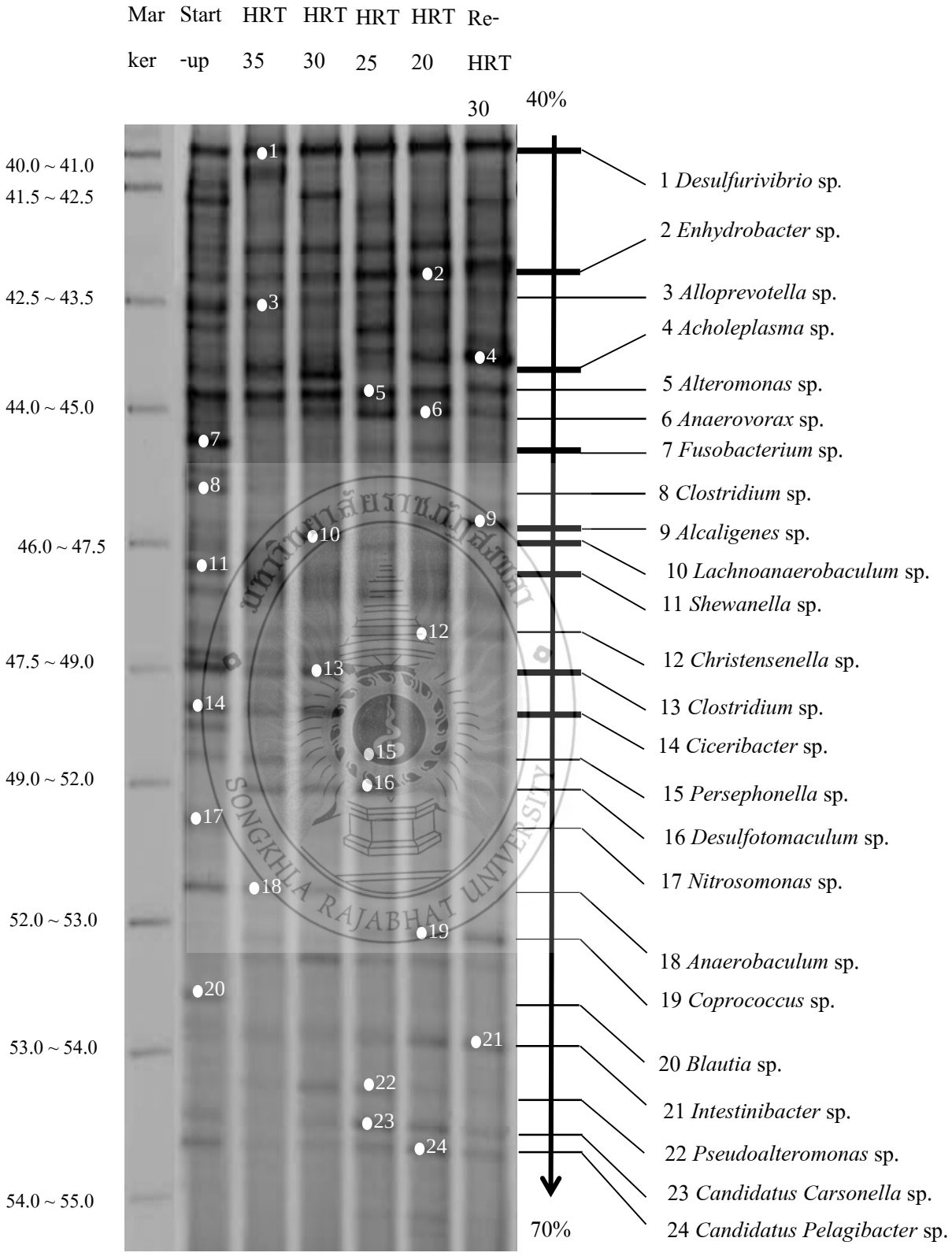
ผลการศึกษาโครงสร้างประชากรแบคทีเรียในชุดควบคุมที่ใช้น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องร้อยละ 100 (Control) พบประชากรแบคทีเรีย 21 จีนัส ประกอบด้วย *Desulfurivibrio* sp., *Alloprevotella* sp., *Acholeplasma* sp., *Alteromonas* sp., *Anaerovorax* sp., *Fusobacterium* sp., *Clostridium* sp., *Alcaligenes* sp., *Lachnoanaerobaculum* sp., *Shewanella* sp., *Christensenella* sp., *Ciceribacter* sp., *Persephonella* sp., *Nitrosomonas* sp., *Anaerobaculum* sp., *Coprococcus* sp., *Intestinibacter* sp. และ *Candidatus Pelagibacter* sp. ดังรูปที่ 4.20 โดยที่ระยะกักเก็บสารอินทรีย์ 35 วันเป็นระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมของการผลิตมีเทนของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องร้อยละ 100 พบประชากรแบคทีเรียกลุ่มเด่น 4 จีนัส ประกอบด้วย *Desulfurivibrio* sp., *Acholeplasma* sp., *Alcaligenes* sp. และ *Christensenella* sp. ซึ่ง *Desulfurivibrio* sp. เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในขั้นตอน Acetogenesis เป็นแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนหลายอะตอม (คาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม) และเอทานอลให้เป็นอะซิเตท ก๊าซไฮโดรเจน ส่วน *Christensenella* sp. เป็นแบคทีเรียสร้างกรดในขั้นตอนเอซิโดจีเนซีส (Acidogenesis) หรือขั้นตอนการหมัก (Fermentation) ดูดซึมเข้าภายในเซลล์ เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยได้เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทิริก กรดโพรพิโอนิก *Acholeplasma* sp. เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ใช้กลูโคส ซูโครส และกาเล็กโทส เป็นแหล่งคาร์บอนโดยจากการศึกษาพบยีนของเอนไซม์ที่ย่อยสลายแป้ง น้ำตาล อะมิโนและน้ำตาลอื่นๆ และ *Alcaligenes* sp. เป็นแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดอะซิติก โพพิโอนิก และบิวทีริก นั่นเอง

จากผลการศึกษาโครงสร้างประชากรแบคทีเรียจากกระบวนการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลและของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) และ 95 : 5 (R2) ตามลำดับ และมีชุดควบคุมเป็นน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องร้อยละ 100 พบว่า ชุดการทดลองของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอล มีประชากรแบคทีเรียกลุ่มเด่น 5 จีนัส ประกอบด้วย *Desulfurivibrio* sp., *Fusobacterium* sp., *Clostridium* sp., *Christensenella* sp. และ *Anaerobaculum* sp. ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ดีที่สุดที่คือ 30 วัน สอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างประชากรแบคทีเรียในระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ดีที่สุดที่ 30 วันของชุดการทดลองของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาล มีประชากรแบคทีเรียกลุ่มเด่น เด่น 3 จีนัส ประกอบด้วย *Desulfurivibrio* sp., *Alteromonas* sp. และ *Clostridium* sp. ซึ่งพบว่าทั้ง 2 ชุดการทดลองจะพบแบคทีเรียที่เหมือนกัน 2 กลุ่ม คือ *Desulfurivibrio* sp. และ*Clostridium* sp.

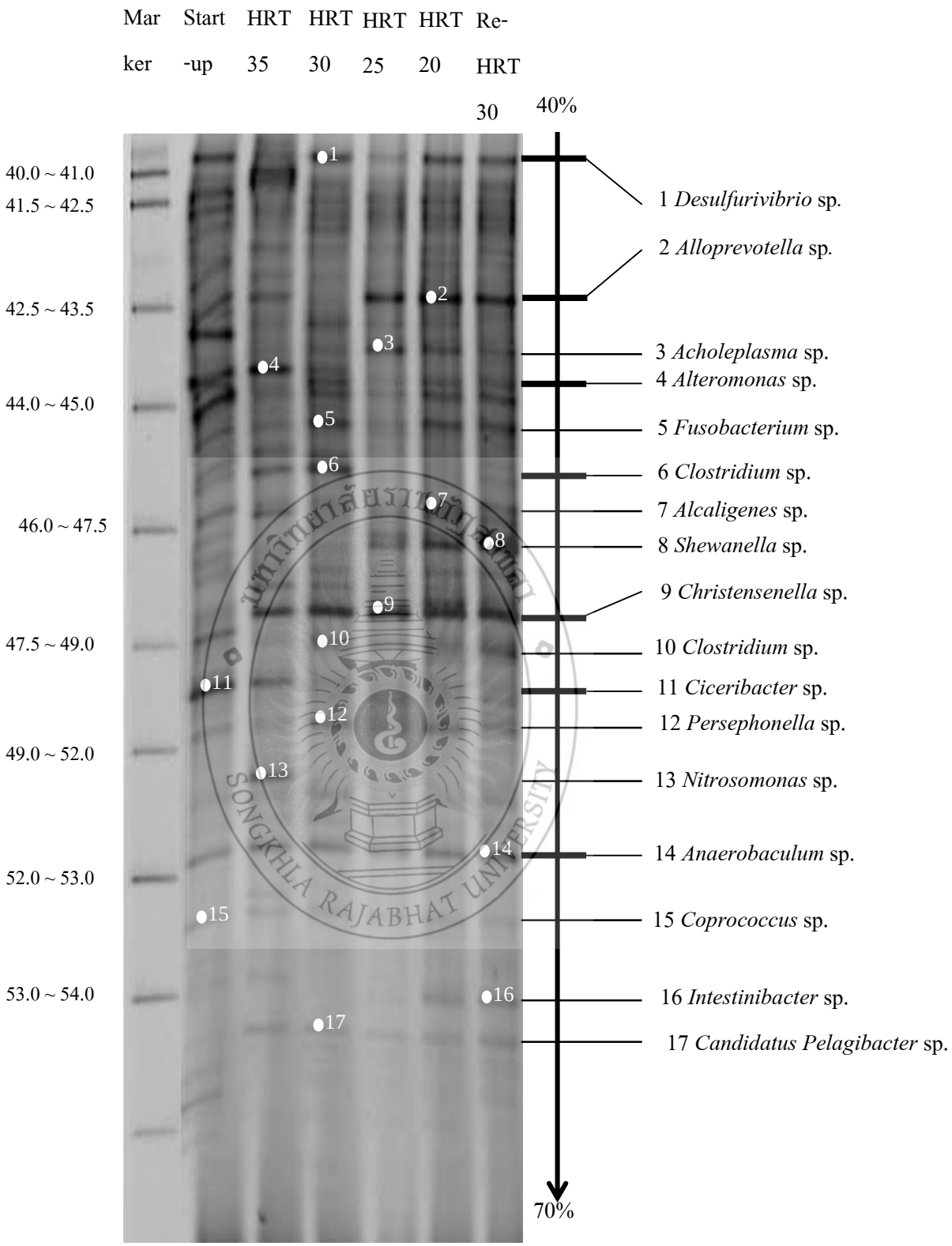
สำหรับการศึกษาโครงสร้างประชากรอาร์เคีย พบว่า ในชุดการทดลองการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วน 99 : 1 (R1) พบประชากรอาร์เคียกลุ่มเด่น 3 จีนัส ในทุกระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ คือ *Methanosaetaceae* sp., *Methanothrix* sp. และ *Methanoseata* sp. แต่ที่ HRT 25, 20 และ Re-HRT 30 พบประชากร

อาร์เคียที่ต่างกันคือ *Methanosarcinar* sp., และ *Methanoculleus* sp. ดังรูปที่ 4.21 ในส่วนของในชุดการทดลองการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95 : 5 (R2) พบประชากรอาร์เคียกลุ่มเด่น 3 จีนัส ในทุกระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ คือ *Methanosaetaceae* sp., *Methanothrix* sp. และ *Methanoseata* sp. แต่ที่ HRT 30, 25, 20 และ Re-HRT 30 พบประชากรอาร์เคียที่ต่างกันคือ *Methanosphaera* sp. และที่ HRT 25, 20 และ Re-HRT 30 พบประชากรอาร์เคียที่ต่างกันคือ *Methanococcus aeolicus* sp. ดังรูปที่ 4.22 และเช่นเดียวกับชุดการทดลองการควบคุมที่น้ำกาส่าร้อยละ100 พบประชากรอาร์เคียกลุ่มเด่น 3 จีนัส ในทุกระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ คือ *Methanosaetaceae* sp., *Methanothrix* sp., และ *Methanoseata* sp. แต่ที่ HRT 20 พบประชากรอาร์เคียที่ต่างกันคือ *Methanosarcinar* sp. ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งอาร์เคียในกลุ่ม *Methanothrix* sp. สร้างมีเทนจากหมู่เมทธิลในโมเลกุลอะซิเตท โดยพบเกิดมีเทนจากกลุ่มนี้มากว่าร้อยละ 70

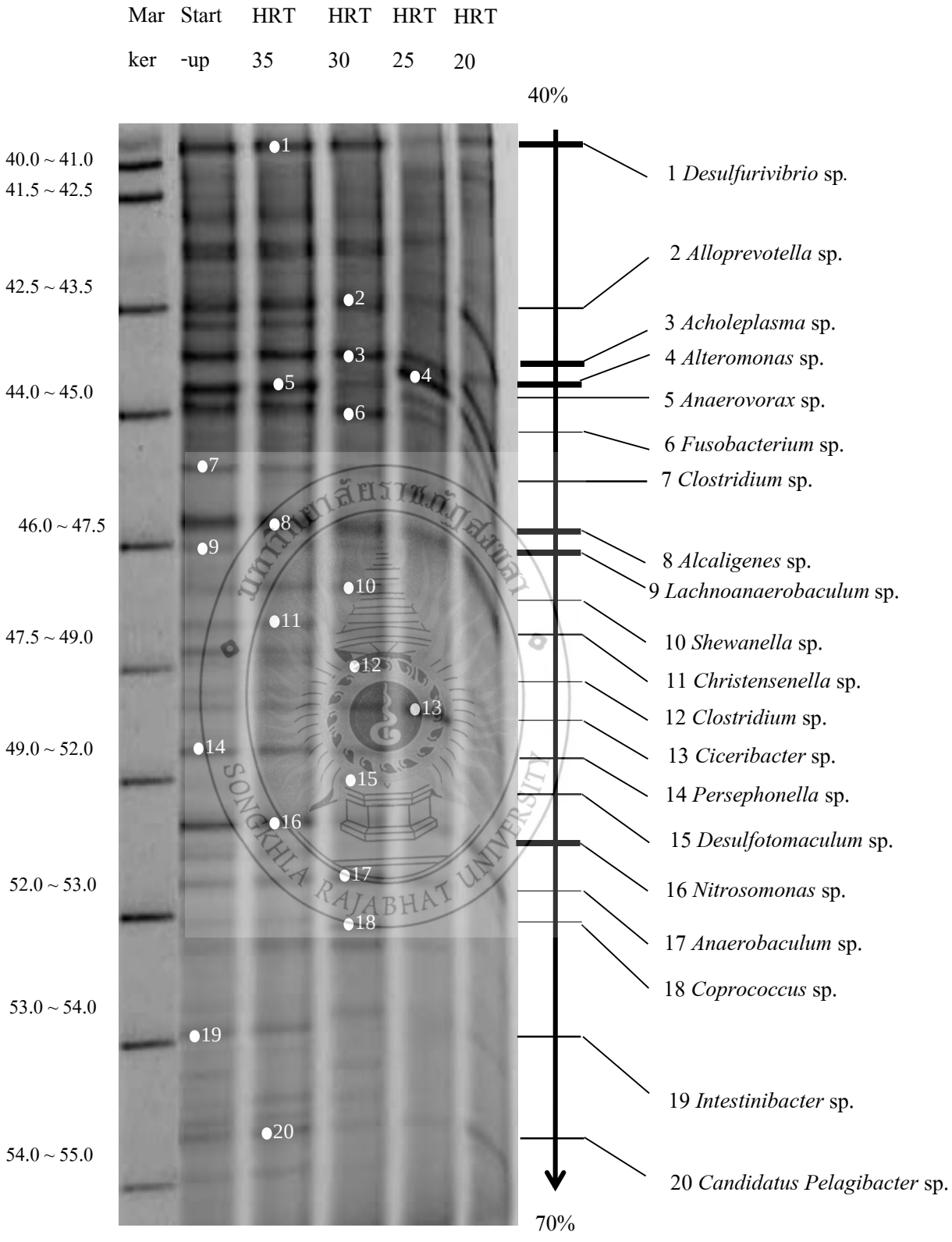
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY



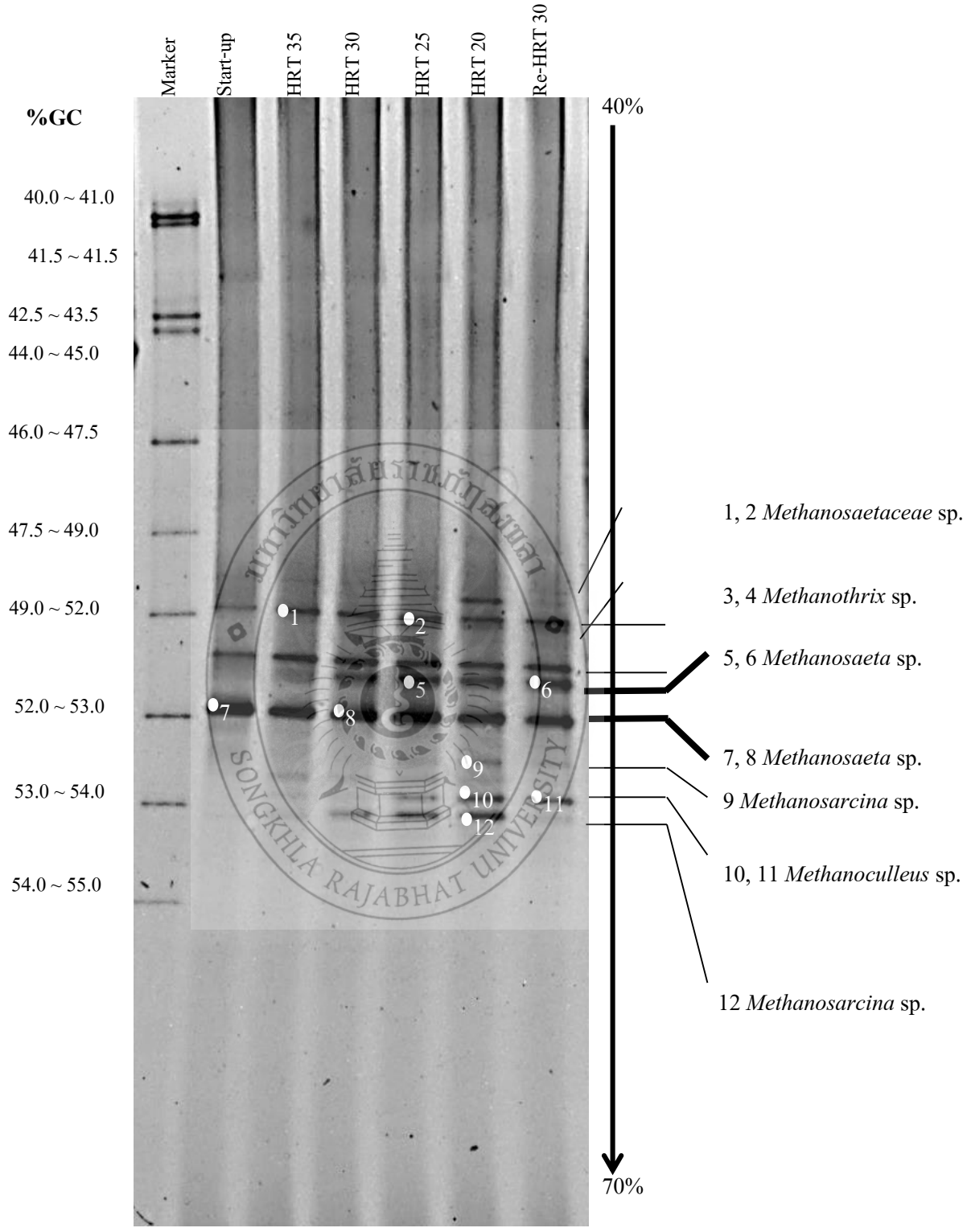
รูปที่ 4.18 โครงสร้างประชากรแบคทีเรียจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 (R1) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ



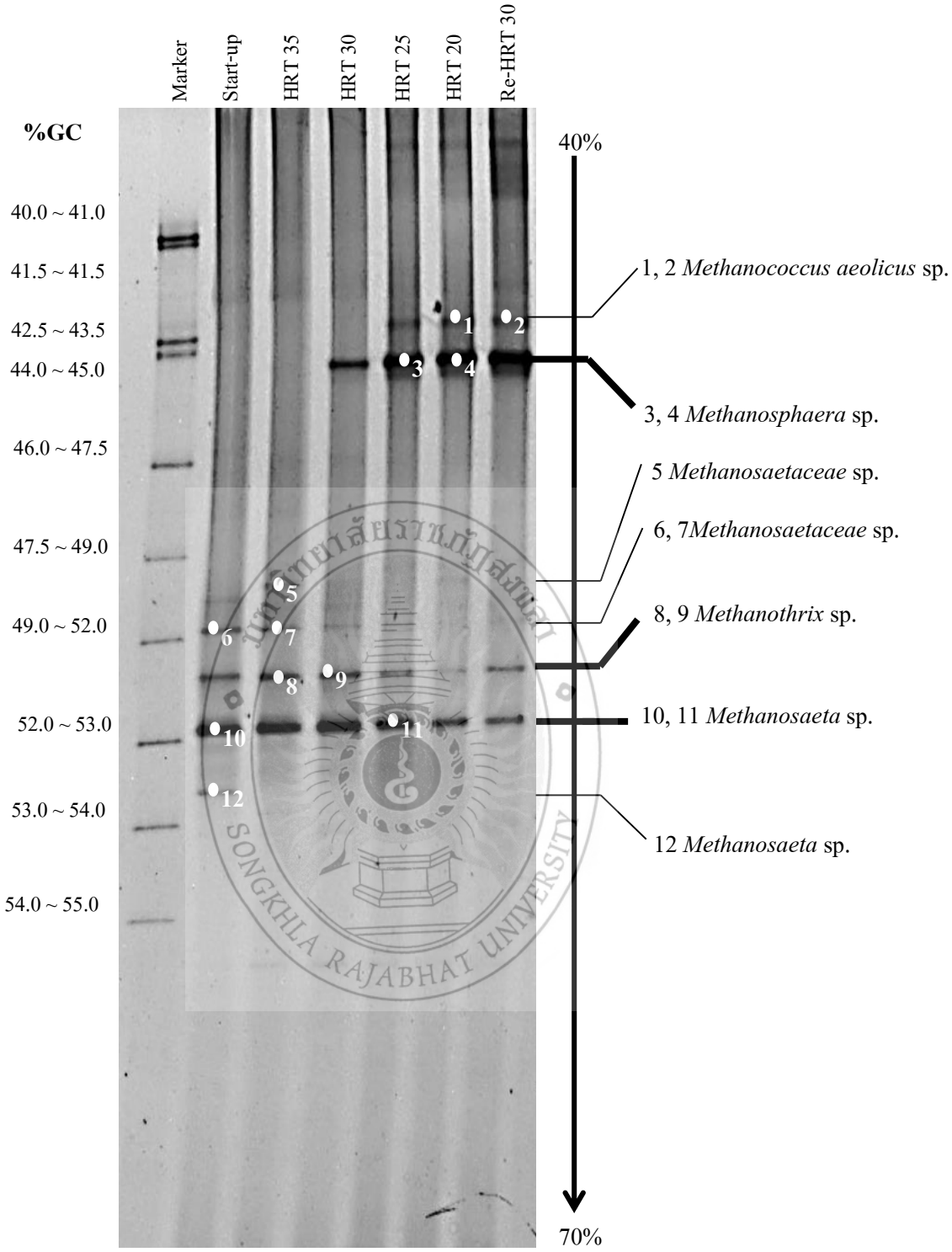
รูปที่ 4.19 โครงสร้างประชากรแบคทีเรียจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ



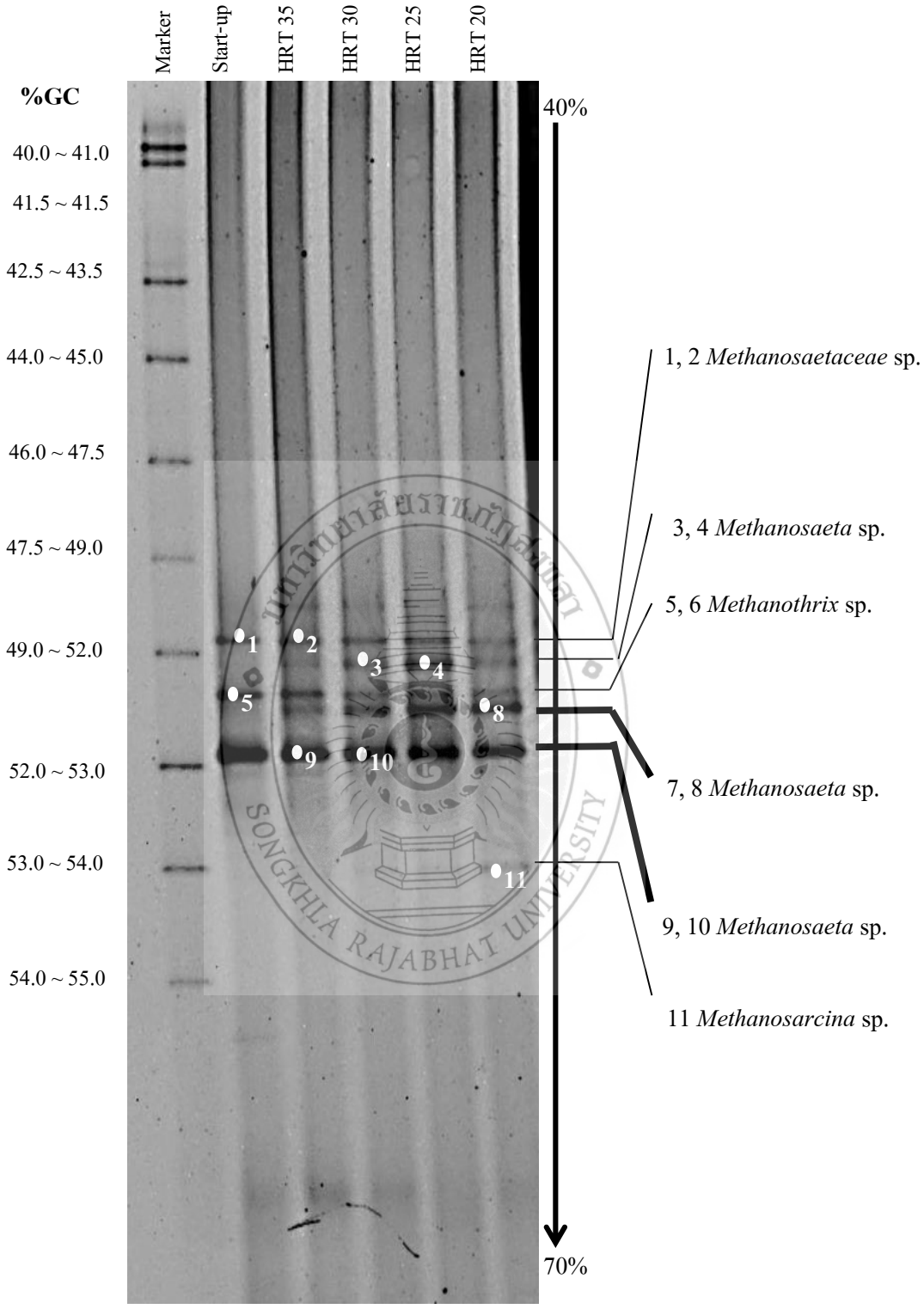
รูปที่ 4.20 โครงสร้างประชากรแบคทีเรียจากการหมักน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง ที่อัตราส่วนร้อยละ100 (Control) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ



รูปที่ 4.21 โครงสร้างประชากรอาร์เคียจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วน ร้อยละ 99 : 1 (R1) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ



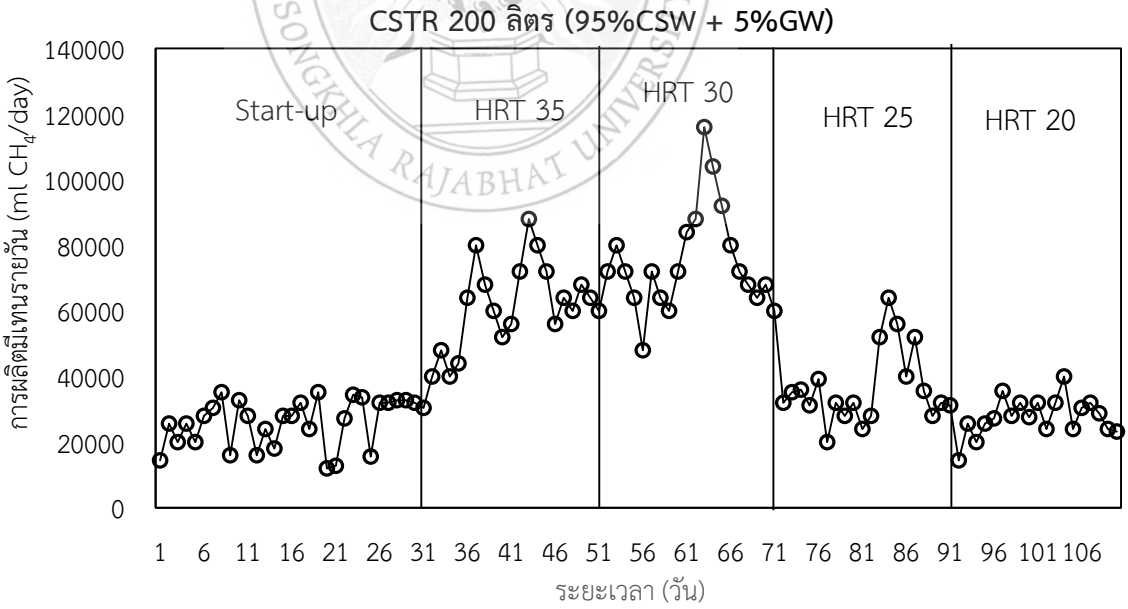
รูปที่ 4.22 โครงสร้างประชากรอาร์เคียจากการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 (R2) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ



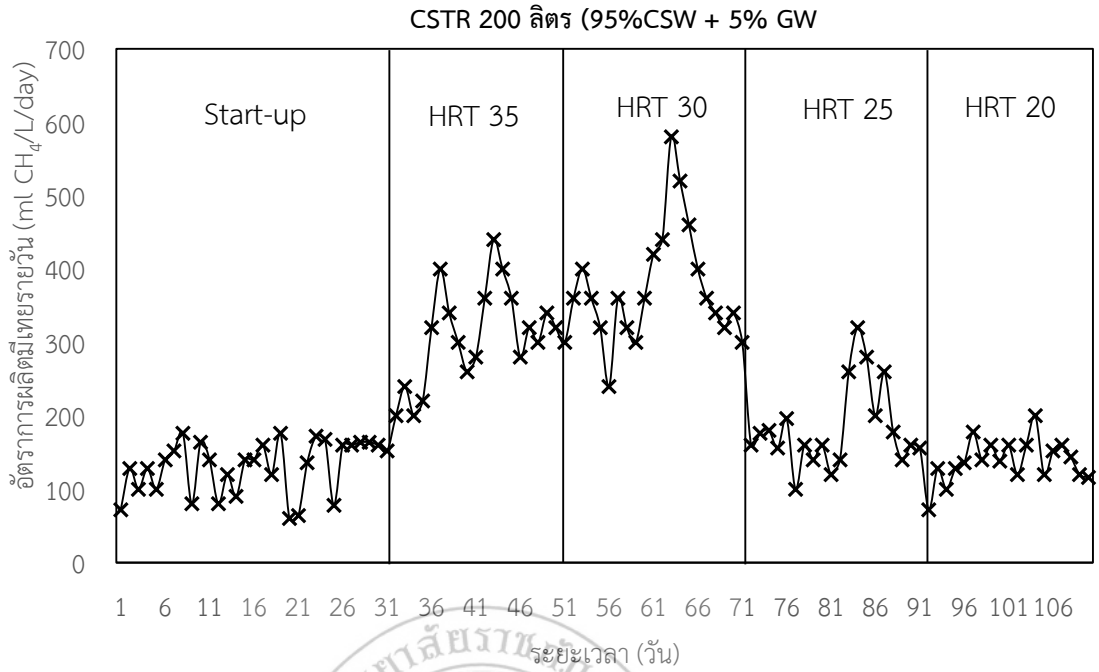
รูปที่ 4.23 โครงสร้างประชากรอาร์เคียจากการหมักน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องที่อัตราส่วนร้อยละ 100 (Control) แบบต่อเนื่องที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ต่างๆ

4.5 การศึกษาการนำเทคโนโลยีการหมักร่วมไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR ขนาด 200 ลิตร

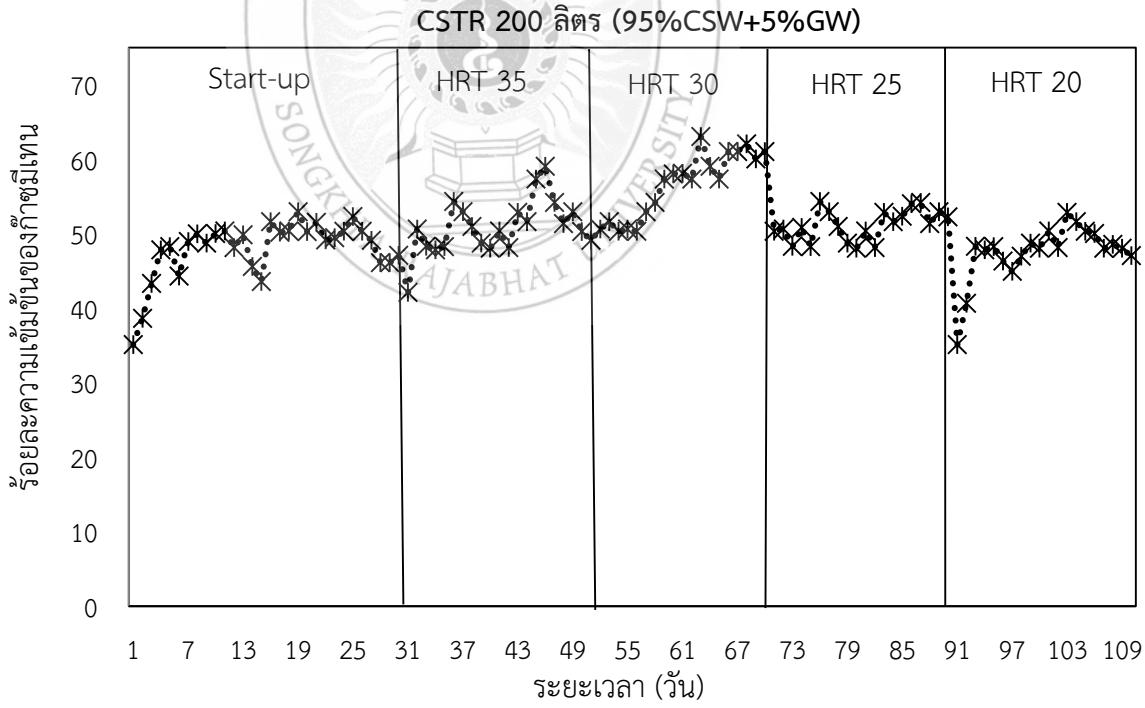
เลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุดที่ให้ผลผลิตมีเทนสูงสุด จากการทดลองในระบบต่อเนื่อง (Continuous) ระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งก็คือ ชุดการทดลองที่ใช้น้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95 : 5 (R2) มาเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ขนาด 200 ลิตร เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับระบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ โดยทำการเดินระบบ (Operation) ที่ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ดังนี้ 35, 30, 25 และ 20 วัน ตามลำดับ เช่นเดียวกับระบบต่อเนื่องในระดับห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 30 วัน มีผลผลิตมีเทนรายวันและอัตราการผลิตมีเทนสูงสุด เท่ากับ 116,000 ml CH_4/day (116 L CH_4/day) และ 580 ml CH_4/L/day (0.58 L CH_4/L/day) ที่ร้อยละความเข้มข้นของก๊าซมีเทน 63.05 (รูปที่ 4.24, 4.25 และ 4.26) รองลงมา ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 35 วัน มีผลผลิตมีเทนรายวันและอัตราการผลิตมีเทนสูงสุด เท่ากับ 880,000 ml CH_4/day (88 L CH_4/day) และ 440 ml CH_4/L/day (0.44 L CH_4/L/day) ที่ร้อยละความเข้มข้นของก๊าซมีเทน 59.06, ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 25 วัน มีผลผลิตมีเทนรายวันและอัตราการผลิตมีเทนสูงสุด เท่ากับ 64,000 ml CH_4/day (64 L CH_4/day) และ 320 ml CH_4/L/day (0.32 L CH_4/L/day) ที่ร้อยละความเข้มข้นของก๊าซมีเทน 54.20 และที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 20 วัน มีผลผลิตมีเทนรายวันและอัตราการผลิตมีเทนสูงสุด เท่ากับ 40,000 ml CH_4/day (40 L CH_4/day) และ 200 ml CH_4/L/day (0.20 L CH_4/L/day) ที่ร้อยละความเข้มข้นของก๊าซมีเทน 52.87 ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 ก๊าซมีเทนรายวันของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95%CSW+5%GW ในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์แตกต่างกัน



รูปที่ 4.25 อัตราการผลิตมีเทนรายวันของไฮโดรเจนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95%CSW+5%GW ในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์แตกต่างกัน



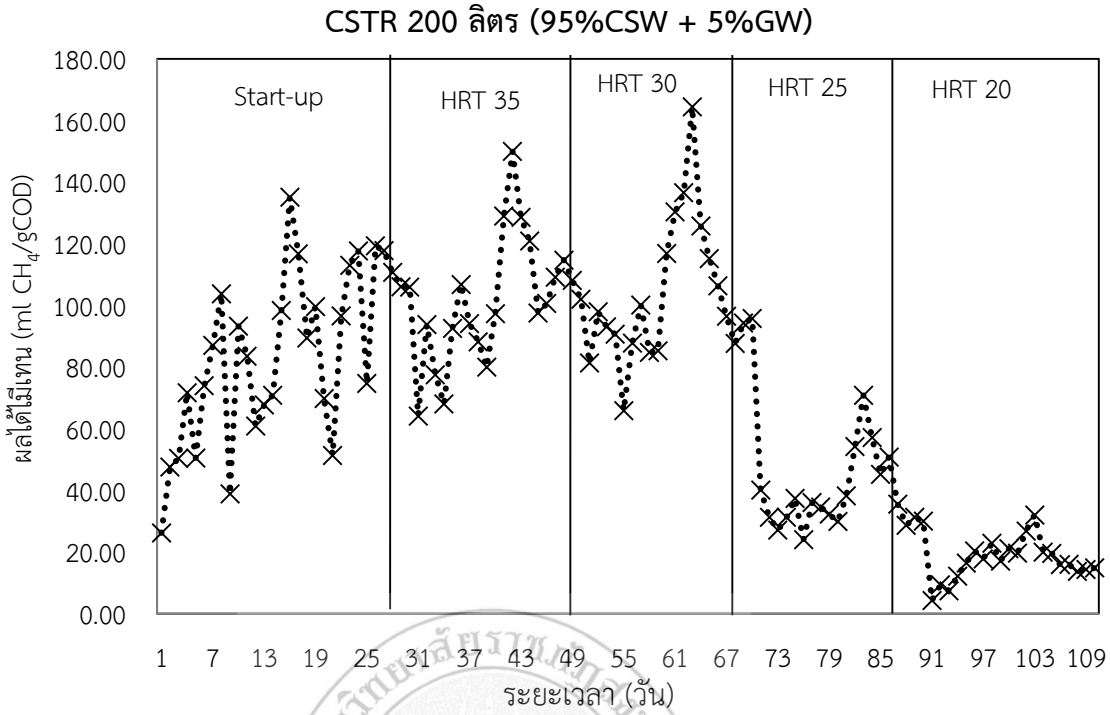
รูปที่ 4.26 ร้อยละมีเทนรายวันของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95%CSW+5%GW ในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์แตกต่างกัน

จากการศึกษาผลได้มีเทนรายวันจากการหมักร่วมแบบต่อเนื่องของน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิด CSTR ขนาด 200 ลิตร พบว่าในวันที่ 63 มีผลได้มีเทนรายวันสูงสุด ที่ระยะกักเก็บสารอินทรีย์ที่ 30 วัน ซึ่งมีผลได้ของมีเทนรายวันสูงสุด เท่ากับ 164.38 ml/CH_4 gCOD (ดังรูปที่ 4.27) ซึ่งคิดจากอัตราการการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ (Organic loading rate: OLR) เท่ากับ 12.45 g COD/L-day แสดงดังในตารางที่ 4.3 รองลงมา คือ ที่ระยะกักเก็บสารอินทรีย์ที่ 35 วัน, 25 และ 20 วัน ซึ่งมีผลได้มีเทนรายวันสูงสุด มีค่าเท่ากับ 149.88 ml/CH_4 gCOD, 70.87 ml/CH_4 gCOD และ 32.07 ml/CH_4 g COD ตามลำดับ ซึ่งคิดจากอัตราการการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ (Organic loading rate: OLR) เท่ากับ 9.96, 16.44 และ 24.90 g COD/L-day ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลได้มีเทนในระบบต่อเนื่องระดับห้องปฏิบัติการ โดยที่ระยะกักเก็บสารอินทรีย์ที่ 30 วัน (ดีที่สุด) มีผลได้มีเทนเท่ากับ 162 ml CH_4/g COD ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์ CSTR 200 ลิตร ที่ระยะกักเก็บสารอินทรีย์ที่ 30 วัน มีผลได้มีเทนเท่ากับ 164.38 ml CH_4/g COD แสดงให้เห็นว่าผลการทดลองสอดคล้องกัน การขยายขนาดถังปฏิกรณ์ให้ใหญ่ขึ้นช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนให้สูงขึ้น

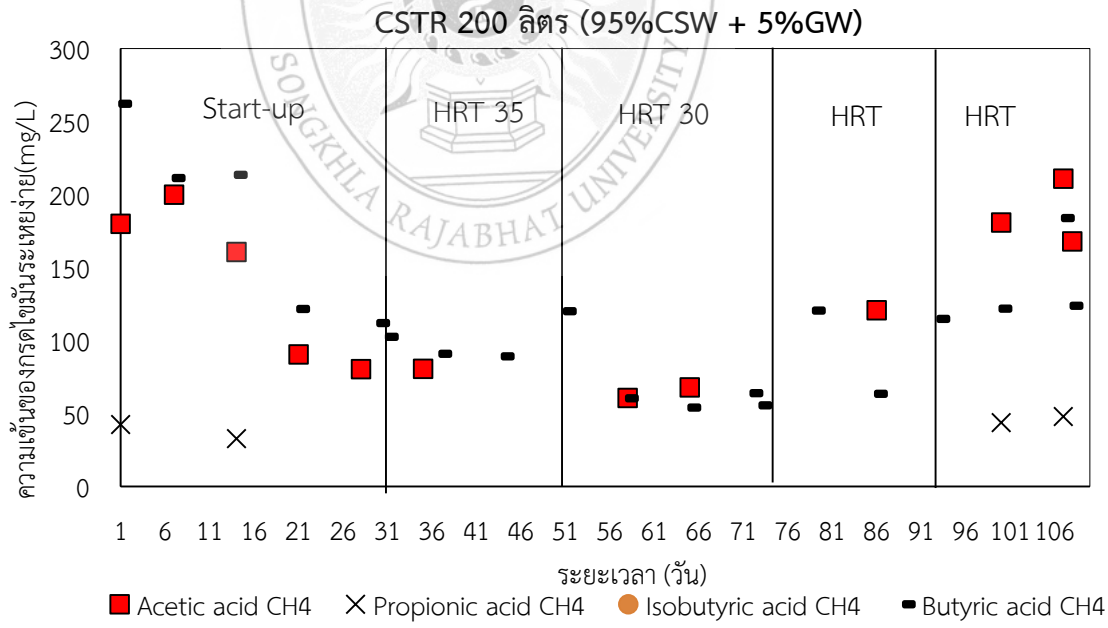
ผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย พบว่า องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid) เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน (ผลิตมีเทนสูงสุด) กรดไขมันระเหยง่ายในระบบประกอบด้วย Acetic, butyric เป็นองค์ประกอบหลัก มีค่าอยู่ในช่วง 50-130 mg/l (รูปที่ 4.28) แสดงว่าจุลินทร์ชนิดสร้างมีเทนสามารถใช้กรดไขมันระเหยง่ายในการผลิตมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ไม่มีการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบ ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของค่า pH ในระบบนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับค่า pH ในระบบที่ ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 7.6-7.9 (รูปที่ 4.29) แสดงว่าค่า pH ในระบบเป็นกลาง มีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน

ตารางที่ 4.3 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR) ในระบบแต่ละระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT)

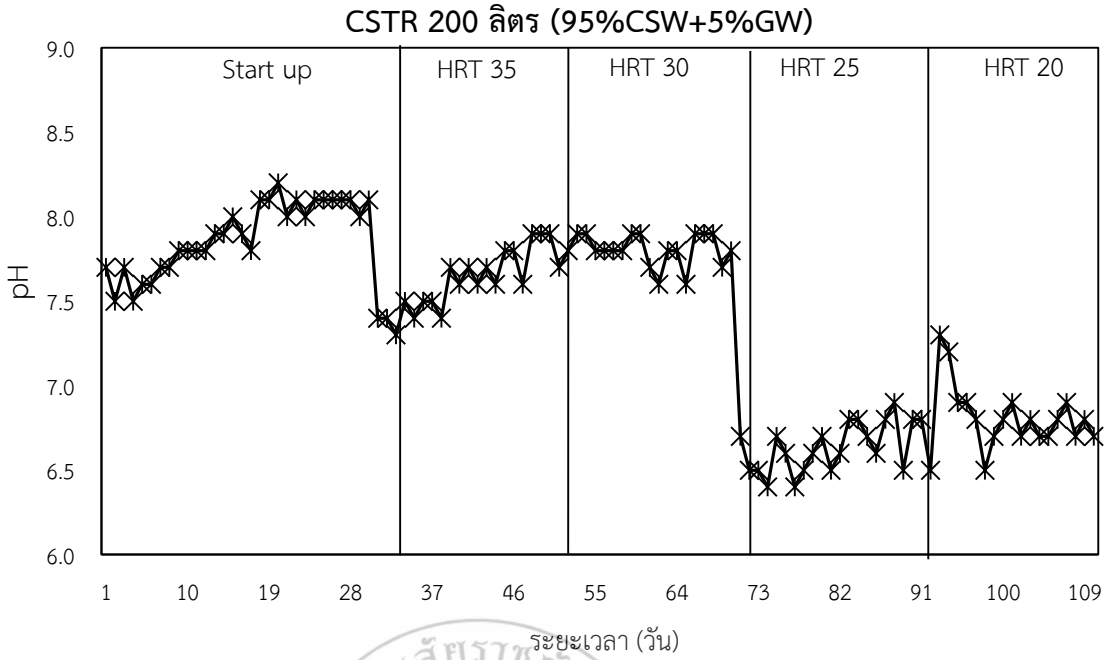
ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT, days)	**OLR (g COD/L-day)**
Start-up	1.24
HRT 35	9.96
HRT 30	12.45
HRT 25	16.44
HRT 20	24.90



รูปที่ 4.27 ผลได้มีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 95%CSW+5%GW ในถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์แตกต่างกัน



รูปที่ 4.28 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายของไฮโดรเจน และมีเทนของการหมักร่วมแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลในถังปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.29 พีเอชสุดท้ายของการหมักร่วมมีเทนแบบต่อเนื่องจากน้ำทิ้งโรงงานอาหารทะเลและของเสียกลีเซอรอลในถังปฏิกรณ์ชนิด CSTR ขนาด 200 ลิตร ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน

4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ระบบบำบัดที่ใช้ทดลองมีปริมาตรใช้งาน 200 ลิตร (CSTR)
มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ 20.29 m^3/m^3 wastewater ที่ระยะเวลาการเก็บกัก 30 วัน (1 เดือน)

สมมติ: โรงงานมีระบบบำบัดน้ำเสีย 1,600 m^3 สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้

= 20.29 m^3/m^3 wastewater x 1,600 m^3

= 32,464 m^3/month

เมื่อนำมาใช้เป็นก๊าซหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas, LPG)

ก๊าซมีเทน 1 m^3 = 0.46 kg LPG

ถ้าก๊าซมีเทน 32,464 m^3 = (0.46 kg LPG x 32,464 m^3)/ 1 m^3

= 14,933.44 kg LPG/ month

(สำนักงานนโยบายและพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2555)

ราคา LPG = 363 baht/15 kg

(สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน วันที่ 4 กรกฎาคม 2561)

= 24.20 baht/kg

คิดเป็นราคา LPG ที่ประหยัดได้เพิ่มขึ้น

= (14,933.44 kg LPG/month)x (24.20 baht/kg)

= 361,389.25 baht/month

= 361,389.25x 12 baht/year

= 4,336,670 baht/year

บทที่ 5

สรุปผล ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาความเป็นไปได้และพัฒนาการใช้เทคโนโลยีการหมักร่วม(Co-digestion technology) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋อง โดยการใช้กากน้ำตาล (Molasses) และของเสียกลีเซอรอล (Glycerol waste) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เป็นสารหมักร่วม (Co-substrate) ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 อัตราส่วนที่ดีที่สุดในการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลให้ผลได้มีเทนและผลิตมีเทนสูงสุดที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 มีค่าเท่ากับ 334 ml CH_4/g COD และ 17 m^3 CH_4/m^3 Wastewater ตามลำดับ การหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับเสียกลีเซอรอลให้ผลได้มีเทนสูงสุดที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 5 มีค่าเท่ากับ 339 ml CH_4/g COD และ43 m^3 CH_4/m^3 Wastewater โดยมีความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 55-70 ซึ่งการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลกับของเสียกลีเซอรอลและการหมักร่วมกับกากน้ำตาลให้ผลได้มีเทนและผลผลิตมีเทนไม่มีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

5.1.2 การวิเคราะห์การเสริมกันของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลให้ผลได้มีเทนสูงสุดคืออัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 มีปริมาณมีเทนสะสมเพิ่มขึ้น 98 ml CH_4 ในขณะที่การหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 ให้ปริมาณมีเทนสะสมเพิ่มขึ้น 551 ml CH_4

5.1.3 กระบวนการหมักร่วมสามารถปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจาก 53.19 ของน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องร้อยละ 100 เป็น 27.02 และ 25.09 ของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 และการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 ตามลำดับ ซึ่งสามารถทำให้ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (20-30)

5.1.4 การศึกษาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตมีเทนในระบบต่อเนื่อง ผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 30 วัน สามารถให้ผลได้มีเทนและอัตราการผลิตมีเทนสูงสุดในการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 มีค่าเท่ากับ 110 ml CH_4/g COD และ 225 ml CH_4/L/d ตามลำดับ สำหรับการหมัก

ร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอล ที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 ให้ผลได้มีเทนและอัตราการผลิตมีเทนสูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 30 วัน มีค่าเท่ากับ 162 ml CH_4/g COD และ 425 ml CH_4/L/d ตามลำดับ โดยมีความเข้มข้นของมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 55-65 จากผลการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ลดลง อัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลได้มีเทนลดลง เนื่องจากการสะสมของกรดไขมันระเหยได้ทำให้ค่า pH ของระบบลดลงและมีผลโดยตรงต่อจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน ซึ่งจากผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยได้ของน้ำเสียที่ออกจากระบบของระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 25 และ 20 วัน พบการสะสมของกรดโพพิโอนิกและบิวทีริกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 150 และ 130 g/L ตามลำดับ

5.1.5 โครงสร้างประชากรจุลินทรีย์ในการผลิตมีเทนจากการหมักร่วมแบบต่อเนื่องด้วยเทคนิค DGGE ของการหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับของเสียกลีเซอรอล ที่อัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 ในทุกระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ พบแบคทีเรียกลุ่ม *Desulfurivibrio* sp. และ *Christensenella* sp. เป็นกลุ่มเด่น สำหรับโครงสร้างประชากรอาร์เคียกลุ่มเด่น คือ *Methanothrix* sp. และ *Methanosaeta* sp. ในขณะที่การหมักร่วมน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปอาหารทะเลบรรจุกระป๋องกับกากน้ำตาลที่อัตราส่วนร้อยละ 99 : 1 ในทุกระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ พบแบคทีเรียกลุ่ม *Desulfurivibrio* sp. และ *Alteromonas* sp. เป็นกลุ่มเด่น สำหรับโครงสร้างประชากรอาร์เคียกลุ่มเด่น คือ *Methanothrix* sp. และ *Methanosaeta* sp.

5.1.6 การเดินระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ขนาด 200 ลิตร เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับระบบต่อเนื่องในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 30 วัน มีผลผลิตมีเทนรายวันและอัตราการผลิตมีเทนสูงสุด เท่ากับ 116,000 ml CH_4/day (116 L CH_4/day) และ 580 ml CH_4/L/day (0.58 L CH_4/L/day) ที่ร้อยละความเข้มข้นของก๊าซมีเทน 63.05 และมีผลได้ของมีเทนรายวันสูงสุด เท่ากับ 164.38 ml/CH_4 gCOD

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาพัฒนาการนำของเสียอื่นๆ มาเป็นสารหมักร่วม เพื่อการเพิ่มผลิตมีเทนและลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น

5.2.2 ควรพัฒนาต่อยอดสู่การใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

อมรรัตน์บุญมี. (2549). การบำบัดน้ำเสียโรงกลั่นเอทานอลจากกากน้ำตาลด้วยระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรงเทพมหานคร.

Angelidaki, I. & Ellegaard, L. (2003). Co-digestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants, status and future trends. *Applied Biochemistry and Biotechnology, 109*, 95-105.

Astals, S., Ariso, M., Galí, A., & Mata-Alvarez, J. (2011). Co-digestion of pig manure and glycerine: Experimental and modelling study. *Journal of Environmental Management, 92*, 1091-1096.

Astals, S., Nolla-Ardèvol, V., & Mata-Alvarez, J. (2012). Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate. *Bioresource Technology, 110*(0), 63-70.

Astals, S., Nolla-Ardèvol, V., & Mata-Alvarez, J. (2013). Thermophilic co-digestion of pig manure and crude glycerol: Process performance and digestate stability. *Journal of Biotechnology, 166*, 97– 104.

Athanasoulia, E., Melidis, P., & Aivasidis, A. (2014). Co-digestion of sewage sludge and crude glycerol from biodiesel production. *Renewable Energy, 62*, 73-78.

Ausubel, F. M., Brent, R., Kingston, R. E., Moore, D.D., Seidman, J. G., Smith, J. A., & Struhl, (1995) . Current protocols in molecular biology, vol. 1, cap. 2 Preparation and analysis of DNA Phenol extraction and ethanol precipitation of DNA, Ed by John Wiley & Sons, Inc., p.2.1.1. – 2.1.3.

Batstone D, Keller J, Angelidaki I, Kalyuzhny S, Pavlostathis S, Rozzi A, Sanders W, Siegrist H, Vavilin V. Anaerobic digestion model no. 1 (ADM1), IWA publishing, London, UK; 2002.

Chen, Y., Cheng, J.J. and Creamer, K.S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*,*99*(10): 4044-4064.

Chowdhury, P., Viraraghavan, T. & Srinivasan, A. (2010) Biological treatment processes for fish processing wastewater: A review. *Bioresource Technology*, *10*, 439–449.

Fang, C., Boe, K., & Angelidaki, I. (2011). Anaerobic co-digestion of desugared molasses with cow manure; focusing on sodium and potassium inhibition. *Bioresource Technology*, 102, 1005–1011.

Fountoulakis, M. S., & Manios, T. (2009). Enhanced methane and hydrogen production from municipal solid waste and agro-industrial by-products co-digested with crude glycerol. *Bioresource Technology, 100*, 3043-3047.

Hosseini Koupaie, E., Barrantes Leiva, M., Eskicioglu, C., & Dutil, C. (2014). Mesophilic batch anaerobic co-digestion of fruit-juice industrial waste and municipal waste sludge: Process and cost-benefit analysis. *Bioresource Technology*, *152*, 66–73.

Hutnan, M., Kolesarova, N., Bodok, I., Spalkova, V., & Lazor, M. (2009). Possibilities of anaerobic treatment of crude glycerol from biodiesel production. *36th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering*, *156*, 1-13.

Jaruwongwittaya, T., & Chen, G. (2010). A review: Renewable energy with absorption chillers in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*, 1437–1444.

Jingxing, M., Mariane V.W., Marta, C., & Willy, V. (2008). Improvement of the anaerobic treatment of potato processing wastewater in a UASB reactor by co-digestion with glycerol. *Biotechnology Letter*, *30*, 861–867.

Kafle, G. K., Kim, S. H., & Sung K. I. (2013). Ensiling of fish industry waste for biogas production: A lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics. *Bioresource Technology, 127*, 326–336.

Kangle, K. M., Kore, S. V., Kore, V. S., & Kulkarni, G. S. (2012). Recent trends in anaerobic co-digestion: a review. *Universal Journal of Environmental Research and Technology, 2*(4), 210-219.

Khanal, S. K. (2008). Anaerobic Reactor Configurations for Bioenergy Production," In Wiley- Blackwell, Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications. New York : John Wiley and Sons.

Kongjan, O-Thong & Angelidaki. (2011) . Biohydrogen production from desugared molasses (DM) usingthermophilic mixed cultures immobilized on heat treated anaerobic sludge granules.*International journal of hydrogen energy*, *36*, 14261-14269.

Koupaie, E. H., Leiva, M. B., Eskicioglu, C. and Dutil, C. (2014). Mesophilic Batch Anaerobic Co-digestion of Fruit-juice Industrial Waste and Municipal Waste Sludge: Process and Cost-benefit Analysis. Bioresource Technology, *152*(1), 66 - 73.

Lee, J.Y., Yun, J., Kim, T.G., Wee, D., & Cho., K.S. (2014). Two-stage biogas production by co-digesting molasses wastewater and sewage sludge. *Bioprocess Biosyst Eng*, 37, 2401–2413.

Lens, P. N. L. (2004). *Resource recovery and reuse in organic solid waste management*. London: IWA Publishing.

Nuchdang, S., & Phalakornkule, C. (2012). Anaerobic digestion of glycerol and co-digestion of glycerol and pig manure. *Journal of Environmental Management, 101*(0), 164-172.

Ma, J., Wambeke, M. V., Carballa, M., & Verstraete W. (2008). Improvement of the anaerobic digestion of potato processing wastewater in a UASB reactor by co-digestion with glycerol. *Biotechnology Letters, 30*(5), 861-867.

Martin, M. A., Fernandez, R., Serrano, A., & Siles, J. A. (2013). Semi-continuous anaerobic co-digestion of orange peel waste and residual glycerol derived from biodiesel manufacturing. Waste Management*, 33*, 1633–1639.

Mshandete, A., Kivaisi, A., Rubindamayugi, M., & Mattiasson, B. (2004). Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes. *Bioresource Technology, 95*, 19–24.

Palenzuela-Rollon, A., (1999). Anaerobic digestion of fish processing wastewater with special emphasis on hydrolysis of suspended solids. London:Taylor and Francis.

Panpong**, K**., Srisuwan, G., O-Thong, S. & Kongjan, P. (2014). Anaerobic co-digestion of canned seafood wastewater with glycerol waste for enhanced biogas production**.** *Energy Procedia*, 52, 328-336.

Panpong, K., Srisuwan, G., O-Thong, S. & Kongjan, P. (2014). Enhanced biogas production from canned seafood wastewater by co-digestion with glycerol waste and *wolffia arrhiza*. *Energy Procedia*, 52, 337-351.

Pérez, R. (1997). Feeding pigs in the tropics. FAO Animal Production and Health Paper – 132.

Kaewyasri, S. (2009). Utilization of molasses, molasses distillery slop and vegetable wastes for producing liquid organic fertilizer by anaerobic fermentation. Master's Thesis, Mahidol University, Bangkok.

Regueiro, L., Carballa, M., Álvarez, J. A., & Lema, J. M. (2012). Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates. *Bioresource Technology***,** *123*(0), 507-513.

Santibáñez, C., Varnero, M. T., & Bustamante, M. (2011). Residual glycerol from biodiesel manufacturing, waste or potential source of bioenergy: A review. *Chilean journal of agricultural research, 71*(3), 469-475.

Sarker, S., & Moller, H.B. (2014). Regulating feeding and increasing methane yield from co-digestion of C_5 molasses and cattle manure. *Energy Conversion and Management*, 84, 7–12.

Serrano, A., Siles, J. A., Chica, A. F., & Martín, M. A. (2013). Agri-food waste valorization through anaerobic co-digestion: fish and strawberry residues. *Journal of Cleaner Production*, 54, 125-132.

Shafiei, M., Kabir, M. M., Zilouei, H., Horvath, I. H., & Karimi, K. (2013). Techno-economical study of biogas production improved by steam explosion pretreatment. *Bioresource Technology, 148*, 53–60.

Siles López, J. Á., Martín Santos M. d. l. Á., Chica Pérez A. F., & Martín A. (2009). Anaerobic digestion of glycerol derived from biodiesel manufacturing. *Bioresource Technology, 100*(23), 5609-5615.

Viana, M. M., Freitasb, A. V., Leitaoc, R. C., Pintoc, G. A. S., & Santaellad, S. T. (2012). Anaerobic digestion of crude glycerol: a review. *Environmental Technology Reviews, 1*(1), 81–92.

Vrieze, J.D., Plovie, K., Verstraete, W., & Boon, N. (2015). Co-digestion of molasses or kitchen waste with high-rate activated sludge results in a diverse microbial community with stable methane production. Journal of *Environmental Management*, 152, 75-82.

Wang, J. & Meng, L. (2000). Effects of Volatile Fatty Acid Concentrations on Methane Yield and Methanogenic Bacteria. Biomass and Bioenergy, 33(5), 848 - 853.

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology, 99*, 7928-7940.

Yazdani, S. S., & Gonzalez, R. (2007). Anaerobic fermentation of glycerol: A path to economic viability for the biofuels industry. *Current Opinion in Biotechnology, 18*, 213-219.

Zeshan, O.P. and Karthikeyan. (2012). Effect of C/N ratio and ammonia-N accumulation in a pilot-scale thermophilic dry anaerobic digester. Bioresource Technology, 113(0): 294-302.

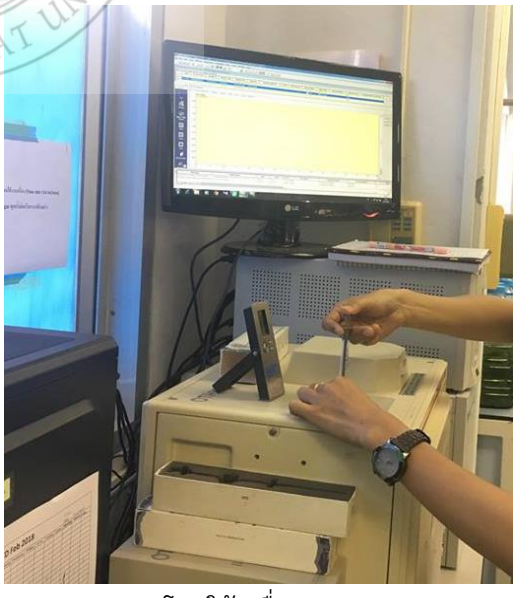
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ภาคผนวก

ระบบแบบต่อเนื่องระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale)

การผลิตก๊าซมีเทนในเครื่องปฏิกรณ์ชนิด CSTR

เก็บตัวอย่างวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ



วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ (CH_4, CO_2, และ N_2) โดยใช้เครื่อง GC-TCD

วัด pH ก่อนเข้าสูระบบ และหลังออกจากระบบ

วิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายในระบบหมัก ด้วยเครื่อง GC-FID

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

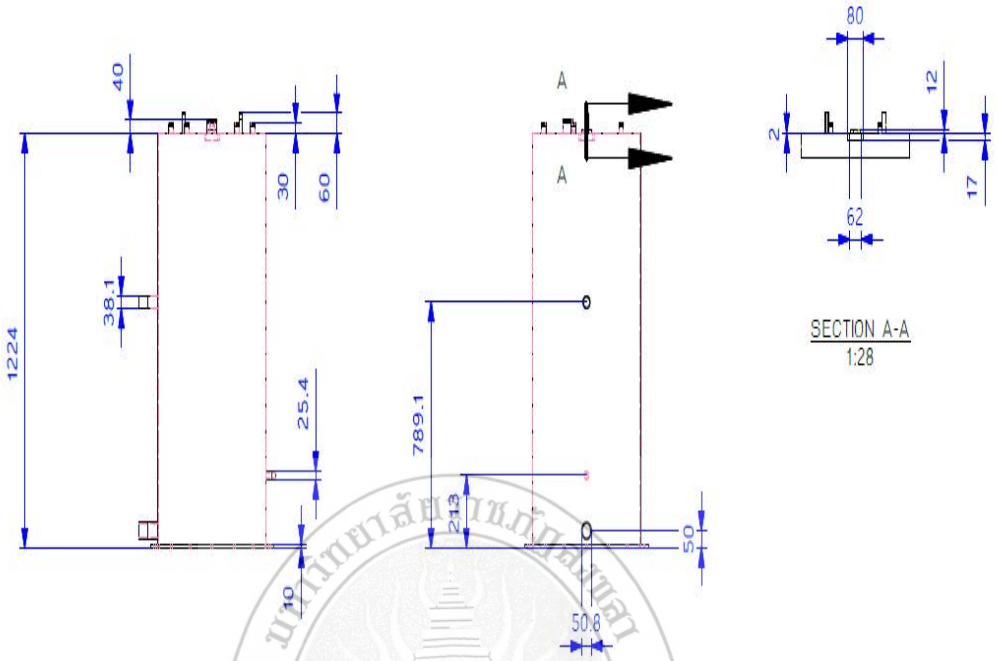
ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องแบบ CSTR ขนาด 200 ลิตร

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

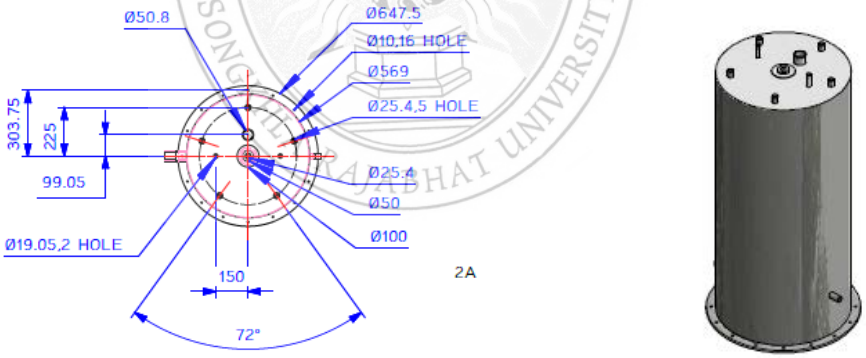
การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องเพื่อบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรม ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย มีขั้นตอนหลักอยู่ 3 ขั้นตอนคือ 1) สูบน้ำเสียขึ้นจากบ่อน้ำเสียเข้าถังโดยมอเตอร์ปั๊มน้ำ 1 HP 2) การกวน โดยใช้มอเตอร์เกียร์ขนาด 2 HP อัตราทดรอบ 1:40 ความเร็วการกวน 36.25 รอบต่อนาที ขับเพลาใบกวน เพื่อทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดก๊าซเร็วขึ้นและมากขึ้น 3) การนับจำนวนก๊าซที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องเพื่อบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรม นับโดย มิเตอร์นับก๊าซ จากขั้นตอนดังกล่าว นำมาเป็นขั้นตอนออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องเพื่อบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนี้

1. ถัง มีการออกแบบโดยใช้สแตนเลส เกรด 304 เพื่อป้องกันการเกิดสนิม ตัวถังมีความจุ 310 ลิตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 569 มิลลิเมตร สูง 1,224 มิลลิเมตร ท่อน้ำเข้าขนาด 25.4 มิลลิเมตร โดยใช้มอเตอร์ปั๊มน้ำ ขนาด 1 HP สูบน้ำเข้า 200 ลิตร ท่อน้ำล้นออกขนาด 38.1 มิลลิเมตร น้ำจะล้นต่อเมื่อน้ำในถังมากกว่า 200 ลิตร เพื่อเว้นช่องว่างในถังไว้ 106.7 ลิตรเพื่อให้เก็บก๊าซก่อนจะปล่อยก๊าซออก ท่อเก็บตัวอย่างตะกอนขนาด 50.8 มิลลิเมตร และท่อเก็บก๊าซขนาด 19.05

มิลลิเมตร 1 ท่อ ท่อใส่อุปกรณ์เสริมขนาด 50.8 มิลลิเมตร 1 ท่อ และ 25.4 มิลลิเมตร 5 ท่อ ดังรูปที่ ผ.1 และ ผ.2

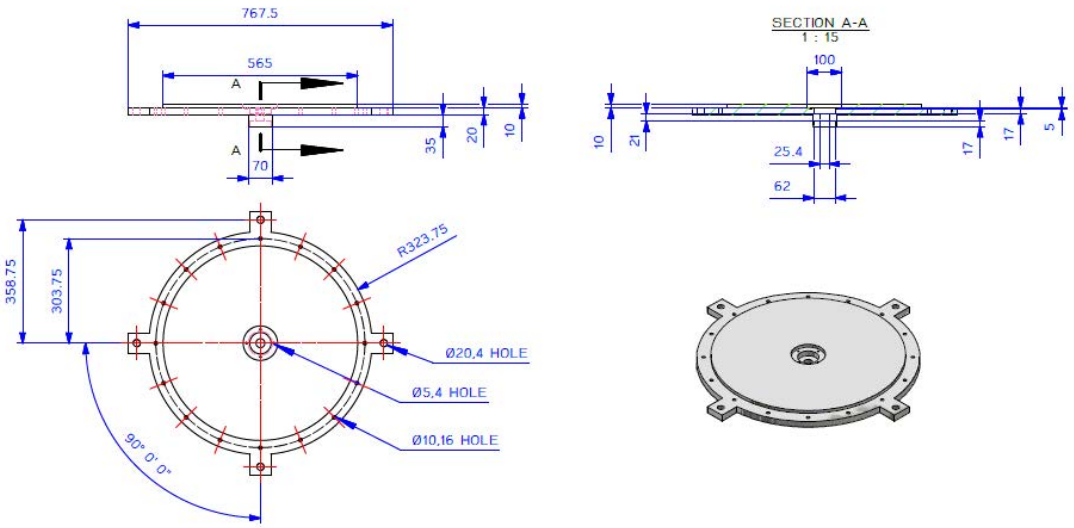


รูปที่ ผ.1 ตัวถัง



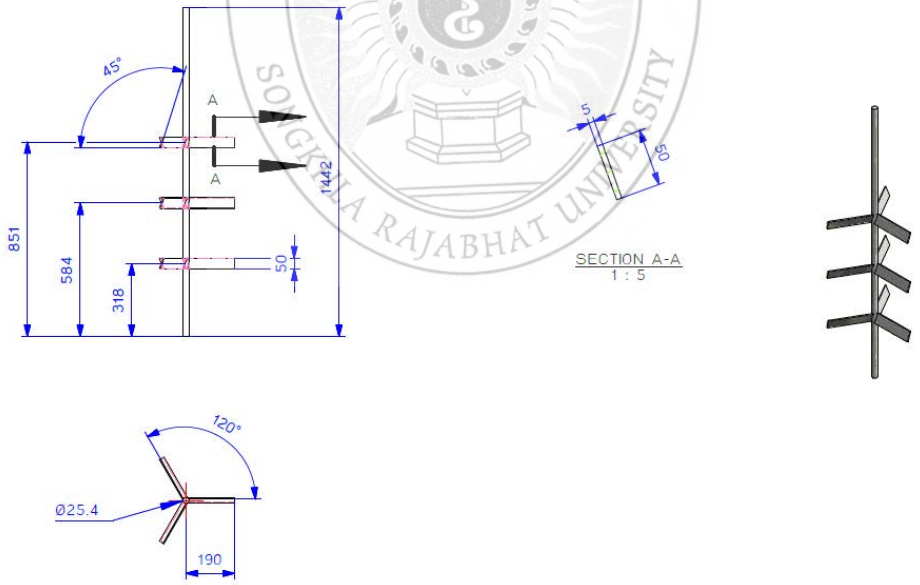
รูปที่ ผ.2 ท่อด้านบนถัง

2. ฝาถัง การออกแบบโดยใช้สแตนเลส เกรด 304 มีเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกขนาด 647.5 มิลลิเมตร วงใน เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 565 มิลลิเมตร และมีซีลยาง เพื่อป้องกันน้ำไม่ให้รั่วไหล มีเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอกขนาด 647.5 มิลลิเมตร วงใน เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 565 มิลลิเมตร ดังรูปที่ ผ.3



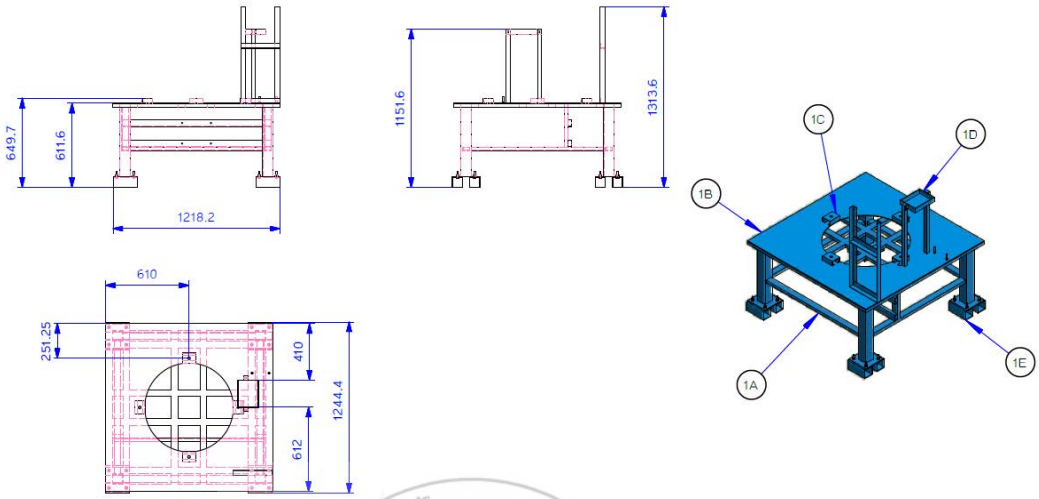
รูปที่ ผ.3 ฝาถัง

3. ใบกวน การออกแบบโดยใช้สแตนเลส เกรด 304 ความยาวของแกน 1,552 มิลลิเมตร ใบกวน มี 3 ชุด ชุดละ 3 ใบ ใบกวนมีขนาด กว้าง 50 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ยาว 190 มิลลิเมตร เอียง 45 องศา เพื่อลดแรงต้านเมื่อสัมผัสกับน้ำ เพลาของใบกวนจะถูกขับให้หมุนโดยมอเตอร์ขนาด 2 HP อัตราทด 1:40 ความเร็วรอบการกวน 36.25 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 3 ผ.4



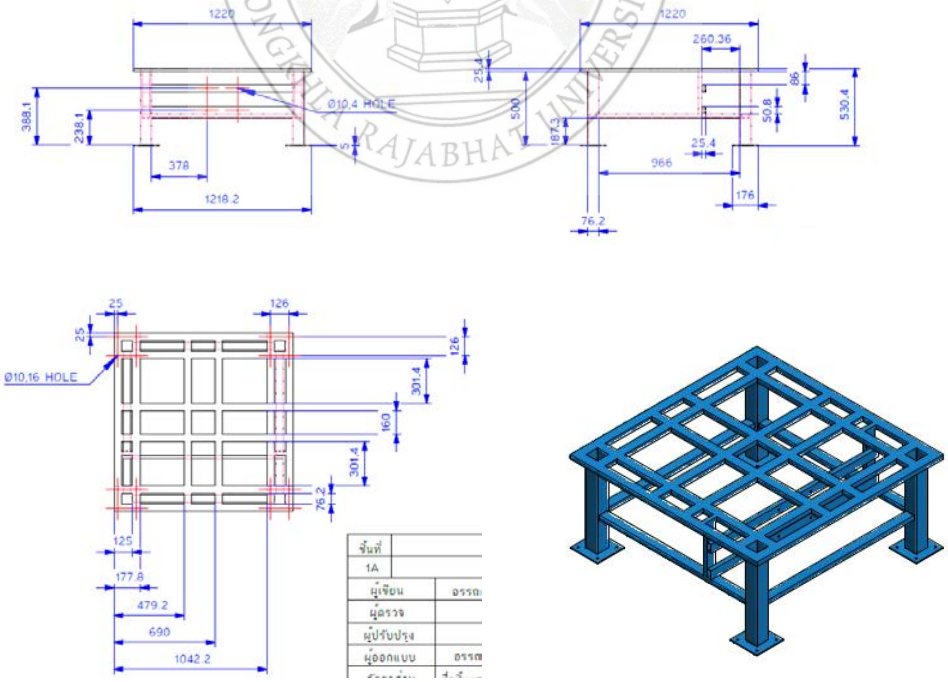
รูปที่ ผ.4 ใบกวน

4. ชุดฐานรับน้ำหนัก ประกอบไปด้วย โครงสร้างหลัก แผ่นเรียบหน้าฐาน เหล็กตัวซีรองรับถัง ชุดรองรับมิเตอร์นับก๊าซ ฐานรองรับชุดโครงสร้าง ดังรูปที่ ผ.5



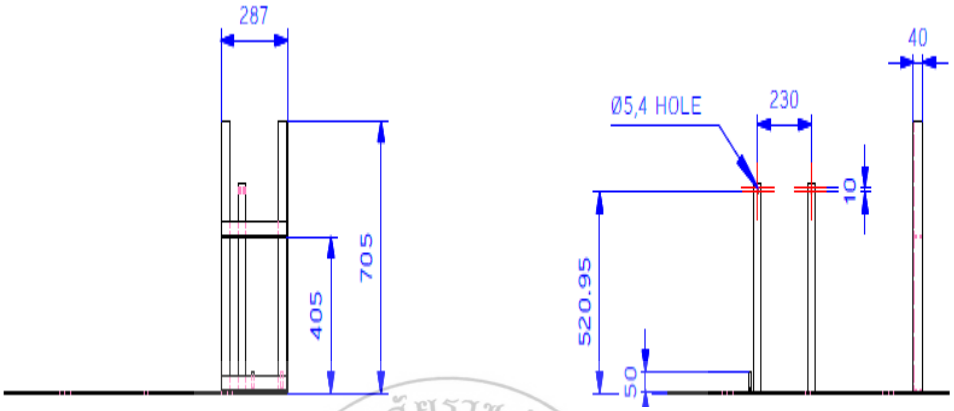
รูปที่ ผ.5 ชุดฐานรับน้ำหนัก

5. โครงสร้างหลัก ออกแบบให้มีความแข็งแรงเพื่อรับน้ำหนักของน้ำในถัง โดยใช้เหล็กกล่องดำ ขนาด กว้าง 50.8 มิลลิเมตร สูง 25.4 มิลลิเมตร หนา 1.8 มิลลิเมตร ออกแบบเป็นโครงถักเพื่อกระจายแรงไปยังเสาทั้ง 4 เสา เสารับน้ำหนักของฐาน ใช้เหล็กกล่องขนาด กว้าง 76.2 มิลลิเมตร สูง 76.2 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ ผ.6

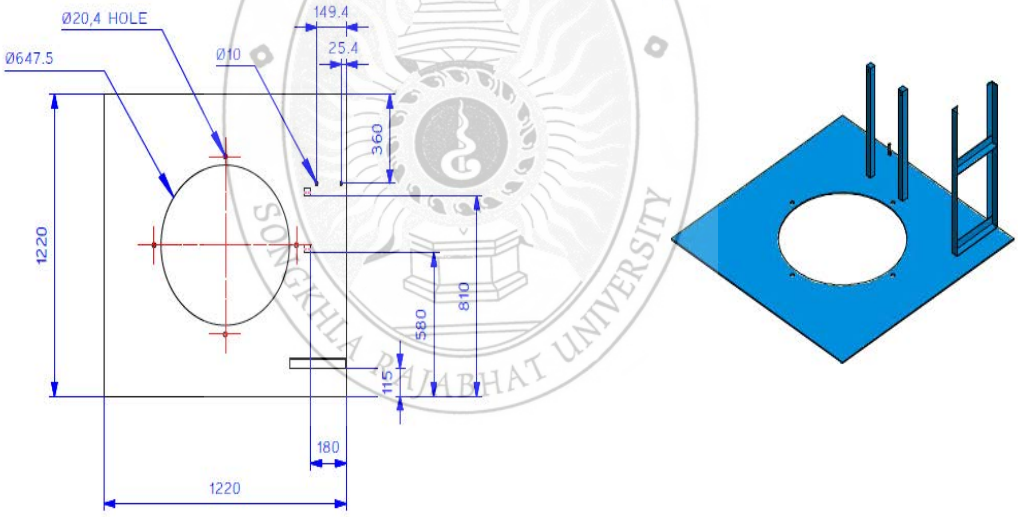


รปที่ ผ.6 โครงสร้างหลัก

6. แผ่นเรียบหน้าฐาน ใช้เหล็กแผ่นดำ ขนาด กว้าง 1,220 มิลลิเมตร ยาว 1,220 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร โดยมีรู 4 รู ขนาด 20 มิลลิเมตร ไว้สำหรับใส่น็อตเพื่อยึดฝาถังกับฐาน ดังรูปที่ ผ.7 และ ผ.8

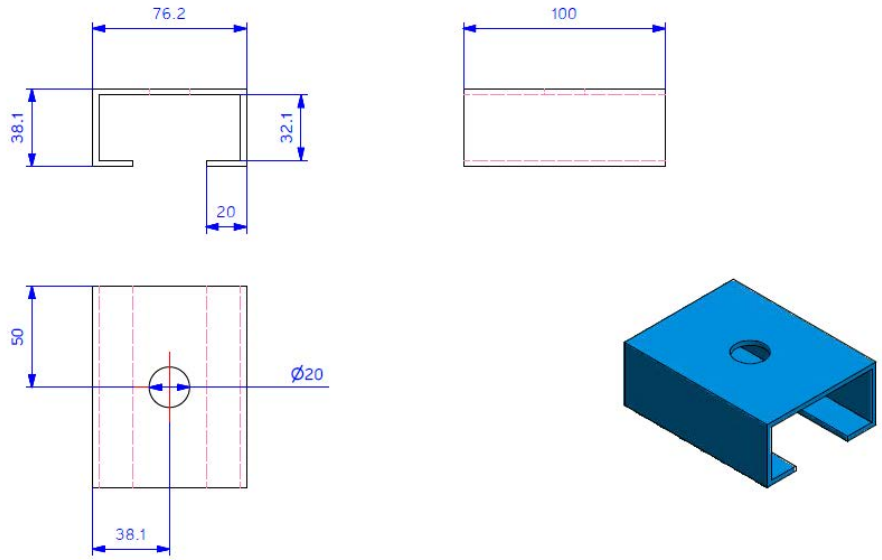


รูปที่ ผ.7 แผ่นเรียบหน้าฐาน



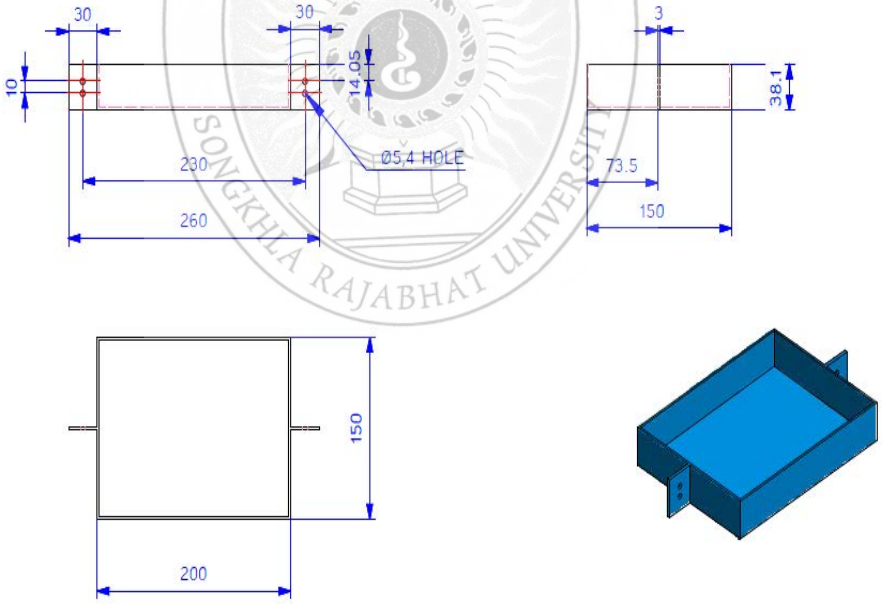
รูปที่ ผ.8 แผ่นเรียบหน้าฐาน

7. เหล็กตัวซีรองรับถัง ซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นเรียบหน้าฐานกับฝาถัง เพื่อยกตัวฝาถังให้สูงขึ้น ออกแบบโดยใช้เหล็กตัวซีขนาด กว้าง 50.8 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร สูง 25.4 มิลลิเมตร และมีรูขนาด 20 มิลลิเมตร ดังรูปที่ ผ.9



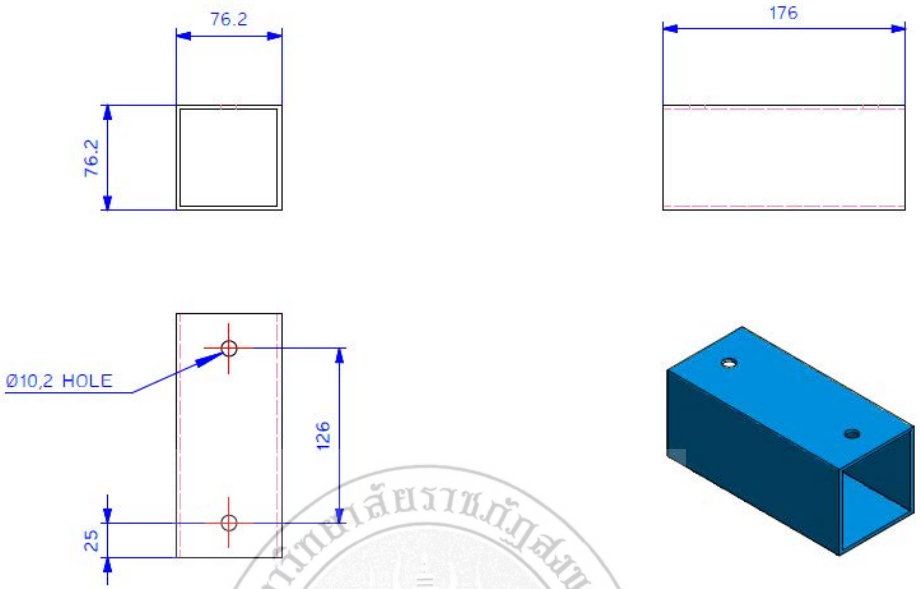
รูปที่ ผ.9 เหล็กตัวซีรองรับถัง

8. ชุดรองรับมิเตอร์นับก๊าซ มีขนาด กว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร สูง 38.1 มิลลิเมตร เพื่อรองรับชุดมิเตอร์นับก๊าซ ดังรูปที่ ผ.10



รูปที่ ผ.10 ชุดรองรับมิเตอร์นับก๊าซ

9. ฐานรองรับชุดโครงสร้าง ออกแบบโดยใช้เหล็กกล่อง ขนาด กว้าง 76.2 มิลลิเมตร ยาว 176 มิลลิเมตร สูง 76.2 มิลลิเมตร มีรูขนาด 10 มิลลิเมตร 2 รู เพื่อยึดกับพื้นฐานเสา ดังรูปที่ ผ.11



รูปที่ ผ.11 ฐานรองรับชุดโครงสร้าง

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

ประวัติผู้วิจัย

(1) ดร.เกียรติศักดิ์ พันธ์พงศ์

1. ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายเกียรติศักดิ์พันธ์พงศ์ (Mr. Kiattisak Panpong)

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน: 5 9103 99001 40 1

ที่อยู่ 16 หมู่ที่ 2 ตำบลทุ่งนุ้ย อำเภอควนกาหลง จังหวัดสตูล 91130

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์

3.หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

วิทยาลัยนวัตกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา 160 ถนนกาญจนวนิช ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

โทรศัพท์มือถือ: 083-6554305

E-mail: panpong1@hotmail.com

4. ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2557	**M.E-Ph.D.** (วิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ **Thesis title**: Improvement of Biogas Production Process from Agro-Industrial Wastewater by Co-digestion Strategies
พ.ศ.2546	**B.S** (เทคโนโลยีชีวภาพ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย **Project title**: Hydrogen Production from Canned Seafood Wastewater by Using Photo Bacteria Synthesis

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Technology fermentation, Anaerobic digestion, Wastewater treatment process and design, Alternative and renewable energy

(2) อาจารย์ชัยยุทธ มีงาม

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)	นายชัยยุทธ มีงาม
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)	Mr. Chaiyoot Meengam
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน	1-9099- 00044 -23-1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน	พนักงานมหาวิทยาลัย (อาจารย์) เงินเดือน 27,500 บาท เวลาที่ใช้ทำวิจัย (48 ชั่วโมง ต่อ 1 สัปดาห์)

4. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก

โปรแกรมวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อ. เมือง จ. สงขลา 90000 E-mails: Chaiyoot_thailand@hotmail.co.th

โทรศัพท์/โทรสาร: 0-7433-6933

5. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	วุฒิปริญญา	สาขาวิชาสถาบัน
2555	โท	วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2552	ตรี	วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ Materials Processing, Welding Technology

(3) ผศ.ดร.สมพงศ์ โอทอง

1. ชื่อ-สกุล ภาษาไทย	นายสมพงศ์ โอทอง
ภาษาอังกฤษ	Mr. Sompong O-Thong
2. หมายเลขประจำตัวประชาชน	3 8013 00957 791
3. ที่อยู่	132 หมู่ที่ 13 ต.ปลายพระยา อ.ปลายพระยา จ.กระบี่
4. หมายเลขโทรศัพท์	074-693992 ต่อ 2261 (ที่ทำงาน) 0877950406 (มือถือ)
5. E-mail	sompong.o@gmail.com
6. ตำแหน่งปัจจุบัน	อาจารย์ประจำภาควิชาชีววิทยา (พนักงานมหาวิทยาลัย)
7. สังกัด	ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ หมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร 074-693992
8. ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2550	ปร. ด. (เทคโนโลยีชีวภาพ) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ชื่อวิทยานิพนธ์	Optimization and microbial community analysis for production of biohydrogen from palm oil mill effluent by thermophilic fermentative process
พ.ศ. 2546	วท. ม. (เทคโนโลยีชีวภาพ) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ชื่อวิทยานิพนธ์	Study on microbial consortiums from commercial and natural microbial inocula for treating shrimp farming wastewater by using molecular biological techniques
พ.ศ. 2544	วท. บ. (ชีววิทยา) มหาวิทยาลัยทักษิณ เกียรตินิยมอันดับสอง
ชื่อโครงงานวิจัย	Ammonia removal from saline wastewater by nitrifying bacteria in sequencing batch reactor.

10. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา):

เทคโนโลยีชีวภาพ กระบวนการหมักเทคโนโลยีชีวภาพพลังงาน ผลิตพลังงานทดแทนจากมวลชีวภาพด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เทคโนโลยีชีวภาพสิ่งแวดล้อม กระบวนการและระบบบำบัดน้ำเสีย การศึกษาแบคทีเรียชอบร้อน เทคนิคทางด้านอณูวิทยาทางด้านสิ่งแวดล้อม