



การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบร่วมกับ  
น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง  
Biogas Production from Decanter Cake of Palm Oil Mill with Wastewater  
from Frozen Seafood Industry

นฤมล เชาะกระโทก  
Narumon Sohgratok

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering  
Prince of Songkla University

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง
ผู้เขียน	นางสาวนฤมล เชาวะกระโทก
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธनिया เกาศล)

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณภา ชูฤทธิ์)

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธनिया เกาศล)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน  
เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ \_\_\_\_\_

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธनिया เกาศล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ \_\_\_\_\_

(นางสาวนฤมล เชาวะระโทก)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ \_\_\_\_\_

(นางสาวนฤมล เชาวะระโทก)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง
ผู้เขียน	นางสาวนฤมล เชาวะกระโทก
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2555

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการทดลองพบว่า การหมักร่วมมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักด้วยน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง 180 ml กับตะกอนดีแคนเตอร์ 10 g ที่อุณหภูมิ  $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$  เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการหมักแบบไร้ออกซิเจน ซึ่งให้ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด  $0.351 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{removal}}$  และประสิทธิภาพการบำบัด TCOD, SCOD, TS และ VS เท่ากับ 76.2, 83.6, 43.2 และ 56.8% ตามลำดับ ส่วนการหมักแบบไร้ออกซิเจนเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่ระยะเวลาการกักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ระยะเวลาการกักเก็บและระยะเวลาการกวนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์คือ ระยะเวลาการกักเก็บ 20 วัน ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้  $2.88 \text{ V/d}$  องค์ประกอบของก๊าซมีเทน 64.6% ผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด  $1.86 \text{ V/d}$  และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ  $0.292 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{added}}$  ซึ่งสูงกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ที่ระยะเวลาการกวน 12 ชั่วโมง ประมาณ 1.4 เท่า และสูงกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว ที่ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง ประมาณ 3.7 เท่า

จากการประเมินทางด้านพลังงานสามารถสรุปได้ว่า การหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งอย่างเดียวสามารถเปลี่ยนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้  $48 \times 10^6 \text{ MJ/year}$  ในขณะที่การหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์สามารถเปลี่ยนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้  $19 \times 10^6 \text{ MJ/year}$  ซึ่งสามารถเพิ่มศักยภาพในการเปลี่ยนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้ถึง 26 เท่า

<b>Thesis Title</b>	Biogas Production from Decanter Cake of Palm Oil Mill with Wastewater from Frozen Seafood Industry
<b>Author</b>	Miss Narumon Sohgratok
<b>Major Program</b>	Environmental Engineering
<b>Academic Year</b>	2012

### ABSTRACT

This research aims to study the biogas production from the frozen seafood wastewater co-digestion with the decanter cake of palm oil mill industry using anaerobic digestion. The objective of this research is to study the biochemical methane potential of co-digestion between the frozen seafood wastewater and the decanter cake at various ratios in the biogas production. The experimental results show that the co-digestion provides higher biogas production rate, higher methane production and higher methane yield than that of the frozen seafood wastewater digestion alone. The co-digestion between the frozen seafood wastewater 180 ml and the decanter cake 10 g at temperature  $35\pm 1^\circ\text{C}$  is the best ratio in the anaerobic digestion. This ratio provides the maximum methane yield at  $0.351 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{removal}}$  and the removal efficiency of TCOD, SCOD, TS and VS is 76.2, 83.6, 43.2 and 56.8%, respectively. In the part of the anaerobic digestion is operated in continuous with CSTR reactor at HRT of 10, 20 and 30 days. The experimental results can be concluded that the optimum HRT and mixing time in biogas production of the frozen seafood wastewater co-digestion with the decanter cake of palm oil mill industry is at HRT of 20 used 24 hours of mixing time. This set produces 2.88 l/d biogas, with 64.6% of methane content, and the maximum methane production of 1.86 l/d and the methane yield  $0.292 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{added}}$ . This value is 1.4 times higher than that of the co-digestion between the frozen seafood wastewater with the decanter cake at 12 hours of mixing time. The value is also 3.7 times higher than that of the anaerobic digestion of the frozen seafood wastewater alone at 24 hours of mixing time.

The energy assessment can be concluded that the anaerobic digestion of the frozen seafood wastewater alone can change biogas to thermal energy of  $48\times 10^6 \text{ MJ/year}$ . The co-digestion between the frozen seafood wastewater and the decanter cake can change biogas to thermal energy of  $19\times 10^9 \text{ MJ/year}$ . Thus, the later can increase change the biogas production to thermal energy potential 26 times.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและ รองศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ไชยประพัทธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและ คำแนะนำในการทำวิจัย ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ดูแล และให้กำลังใจเป็นอย่างดี ทำให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ ประธาน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณ ชูฤทธิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไข วิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผน พลังงานที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณโรสนา กาชอ และคุณอมรรัตน์ ธานีรัตน์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำการทดลอง และการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ คุณสุพิศ นนทะสร เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านงานเอกสารต่างๆ

ขอขอบคุณ บริษัทไทยอินโด ปาล์มมอยล์ แฟคทอรี จำกัด และโรงงานแปรรูป อาหารทะเลแช่แข็งที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปเก็บตัวอย่างและให้ข้อมูลในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณพ่อบุญมา-คุณแม่ปราณี และนายมานะศักดิ์ เชาวะกระโทก สำหรับ ความช่วยเหลือในส่วนระบบทดลอง ทุนการศึกษาและกำลังใจที่มีให้เสมอ รวมทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

นฤมล เชาวะกระโทก

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(13)
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 บทตรวจเอกสาร	2
1.2.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	2
1.2.2 ข้อดีข้อเสียของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	10
1.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	11
1.2.4 ก๊าซชีวภาพ	20
1.2.5 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ	21
1.2.6 ระบบถังหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	23
1.2.7 การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน	24
1.2.8 วัสดุที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ	25
1.2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
1.3 วัตถุประสงค์	38
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	38
2. วิธีการวิจัย	39
2.1 วิธีการดำเนินการ	39
2.1.1 วัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง	39
2.1.2 ระบบที่ใช้ในการทดลอง	41
2.1.3 การทดสอบระบบถังปฏิกรณ์	47
2.1.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้หมัก	47
2.1.5 ชุดการทดลอง	49
2.1.6 การเริ่มต้นระบบ (Start up)	52
2.1.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	52
2.1.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	52
2.1.9 การคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน	55
2.1.10 การวิเคราะห์ข้อมูล	55



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	56
3.1 คุณสมบัติของวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง	56
3.1.1 ตะกอนดีแคแเตอร์	56
3.1.2 คุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง	57
3.1.3 คุณสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง	58
3.1.4 คุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งผสมกับตะกอนดีแคแเตอร์	58
3.2 ผลการทดลอง	59
3.2.1 การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคแเตอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ	59
3.2.2 เปรียบเทียบผลการทดลองหมักแบบไร้ออกซิเจนด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว กวนผสม 24 ชั่วโมง และการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งกับตะกอนดีแคแเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง	69
3.3 สรุปผลการทดลองระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ของการหมักตะกอนดีแคแเตอร์ร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง	83
3.4 การประเมินทางด้านค่าพลังงานที่ได้จากการใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวกับใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคแเตอร์	85
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	88
4.1 บทสรุป	88
4.2 ข้อเสนอแนะ	89
บรรณานุกรม	90
ภาคผนวก	102
ประวัติผู้เขียน	143

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ความเข้มข้นในการกระตุ้นและยับยั้งของไอออนประจุบวกของโลหะเบา	17
1.2 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน	18
1.3 ระดับความเป็นพิษของโลหะหนักในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	19
1.4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	21
1.5 แสดงการเปรียบเทียบก๊าซชีวภาพกับเชื้อเพลิงต่างๆ	22
1.6 คุณลักษณะของตะกอนดีแคนเตอร์	27
1.7 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง	32
2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้หมัก	48
2.2 วัสดุผสมและอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน	51
2.3 วัสดุผสมและอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว และการหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง	51
2.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งผสมกับตะกอนดีแคนเตอร์ก่อนและหลังการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน	53
2.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสียเข้าและออกจากระบบในการทดลองหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวและการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง	54
3.1 คุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งและตะกอนจุลินทรีย์	57
3.2 คุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งผสมกับตะกอนดีแคนเตอร์	58
3.3 ผลการวิเคราะห์ค่า Alkalinity, VFA และ VFA/Alkalinity ก่อนและหลังทำการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน	64
3.4 ค่า Alkalinity, VFA, VFA/Alkalinity, NH <sub>3</sub> -N และ TKN ช่วงสภาวะคงที่ของระยะเวลาที่เก็บ 10, 20 และ 30 วัน โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง	76
3.5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ระหว่างการหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวและใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง	82

### รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
<b>ตารางภาคผนวกที่</b>	
ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน	110
ข.2 องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน	117
ข.3 ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว กวนผสม 24 ชั่วโมง	118
ข.4 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว กวนผสม 24 ชั่วโมง	119
ข.5 ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง	122
ข.6 ผลการวิเคราะห์ค่า TS และ VS ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง	123
ข.7 ผลการวิเคราะห์ค่า Alkalinity และ VFA ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง	125
ข.8 ผลการวิเคราะห์ค่า $\text{NH}_3\text{-N}$ และ TKN ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง	126
ข.9 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง	127
ข.10 ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง	132
ข.11 ผลการวิเคราะห์ค่า TS และ VS ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง	133
ข.12 ผลการวิเคราะห์ค่า Alkalinity และ VFA ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง	135

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.13 ผลการวิเคราะห์ค่า $\text{NH}_3\text{-N}$ และ TKN ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง	136
ข.14 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ การเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง	137

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	8
1.2 การทำงานของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซมีเทน	9
1.3 การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในรูป COD เป็นก๊าซมีเทนด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไร้ออกซิเจน	10
1.4 ผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลายสารอินทรีย์	12
1.5 ผลของพีเอชต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ	13
1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชความเข้มข้นของ $\text{HCO}_3^-$ และความเข้มข้นของ $\text{CO}_2$	13
1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) และก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ )	18
1.8 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน	21
1.9 ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)	23
1.10 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มในจังหวัดกระบี่	28
1.11 ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม	29
1.12 กระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่เยือกแข็ง	30
1.13 กระบวนการผลิตของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา	31
1.14 ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง	34
1.15 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา	35
2.1 น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา	40
2.2 ตะกอนดีแคนเตอร์จากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มในจังหวัดกระบี่	40
2.3 เชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา	41
2.4 แบบจำลองระบบหมักแบบ Batch และวิธีการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ	42
2.5 แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) ในห้องปฏิบัติการ	43
2.6 ขนาดของถังปฏิกรณ์	44
2.7 ขนาดของชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ	44
2.8 ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor)	45
2.9 หลอดแก้วรูปตัวยู (U-tube glass) ใช้เก็บก๊าซชีวภาพ	45
2.10 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter)	46
2.11 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)	52
3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TCOD และ SCOD ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน	61
3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TS และ VS ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน	62
3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่อัตราส่วนต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน	66
3.4 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่อัตราส่วนต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน	67

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด $COD_{settle}$ ช่วงสภาวะคงที่ของระยะเวลา กักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง หมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง	72
3.6 เปรียบเทียบค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนช่วงสภาวะคงที่ของระยะเวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว และใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง	84

## บทที่ 1

### บทนำ

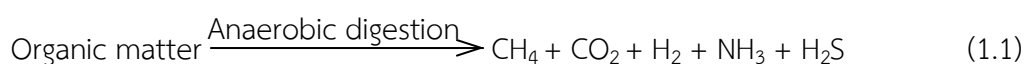
#### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทมีปริมาณค่อนข้างมาก หากไม่มีการนำมาพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมเพิ่มขึ้น อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งจัดเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่สำคัญของพื้นที่ภาคใต้และเป็นอุตสาหกรรมส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งพบว่ากระบวนการผลิตของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งมีปริมาณการใช้น้ำสูงและก่อให้เกิดน้ำเสียเป็นจำนวนมาก ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งมีสารอินทรีย์จำพวกไนโตรเจนปริมาณสูง เมื่อผ่านการบำบัดแล้วยังคงมีสารอินทรีย์จำพวกไนโตรเจนและฟอสฟอรัสปริมาณสูงในน้ำทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำได้ เช่น ปัญหายูโทรฟิเคชัน ปัญหาการเน่าเหม็น ปัญหาความเป็นพิษของแอมโมเนียและไนไตรต์ต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำทำให้ไม่สามารถนำน้ำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาข้อมูลพบว่าน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนของโรงงาน ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยและไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ทำให้ต้องดำเนินการเผาทิ้ง เนื่องจากน้ำเสียมีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีต่ำ ดังนั้นหากต้องการให้มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มากและสามารถนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ จึงจำเป็นต้องนำวัสดุหมักชนิดอื่นที่มีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีสูงมาทำการหมักร่วม ในส่วนของปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย โดยในกระบวนการผลิตก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก วัตถุดิบที่เป็นทะเลลายปาล์มสด 100% จะก่อให้เกิดทะเลลายปาล์มเปล่า 24% เส้นใยปาล์ม 14% กะลาผลปาล์ม 6% ตะกอนดีแคนเตอร์ 4.2% (Chavalparit *et al.*, 2006 อ้างถึงใน Singh *et al.*, 2011) และน้ำทิ้งประมาณ 0.8 m<sup>3</sup>/ton ของทะเลลายปาล์มสด (Schuchardt *et al.*, 2002) โดยตะกอนดีแคนเตอร์ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมีอยู่จำนวนมาก ส่วนใหญ่ทางโรงงานนำไปกำจัดโดยวิธีการเก็บขนไปเททิ้งในสวนปาล์มน้ำมันของโรงงาน (Paepatung *et al.*, 2009) ซึ่งวิธีการนี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและไม่สร้างมูลค่าเพิ่ม ส่วนน้อยมีการขายเพื่อนำไปเป็นอาหารสัตว์และทำปุ๋ยหมัก แต่วิธีการดังกล่าวไม่สามารถกำจัดตะกอนดีแคนเตอร์ที่มีอยู่ปริมาณมากได้หมด ซึ่งตะกอนดีแคนเตอร์มีสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ในปริมาณสูง (เพ็ญศิริ ประชาภิตตกุล, 2551) ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะนำตะกอนดีแคนเตอร์มากำจัดด้วยวิธีการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนสูงเพื่อทำให้อุณหภูมิของวัฏจักรหมักร่วมช่วยส่งเสริมให้เกิดการเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ก๊าซมีเทนเป็นผลผลิตจากกระบวนการนี้และใช้เป็นพลังงานทดแทน ถือว่าเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งที่ดีและมีความยั่งยืน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ควรศึกษาและส่งเสริมให้มีการใช้วัตถุดิบที่มีอยู่ในประเทศให้คุ้มค่าและเกิดประโยชน์มากที่สุด โดยแนวโน้มที่ได้จากการศึกษานำไปประยุกต์ใช้ในการใช้เป็นพลังงานทางเลือกในรูปของพลังงานทดแทนสำหรับอนาคตต่อไป

## 1.2 บทตรวจเอกสาร

### 1.2.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion)

การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนเป็นกระบวนการทางชีววิทยาของจุลินทรีย์หลายชนิดในสภาพปราศจากออกซิเจนซึ่งมีหน้าที่ในการทำงานแตกต่างกัน (Sterling *et al.*, 2001) เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และก๊าซอื่นๆ (สมการที่ 1.1) เพราะของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ไม่สามารถใช้สารอินทรีย์ที่ซับซ้อนเหล่านี้เพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้ จึงต้องมีจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่สร้างมีเทน (Non-methanogenic bacteria) มาย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้ให้กลายเป็นสารที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถนำไปใช้ได้ก่อน โดยสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้วจะมีมวลลดลงและมีสภาพคงตัวมากขึ้น โดยในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมีจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กลุ่ม ที่ทำงานร่วมกันคือ จุลินทรีย์ที่ไม่สร้างมีเทน (Non-methanogenic bacteria) และจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน (Methanogenic bacteria)



หลักการของระบบนี้คือ จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ในวัสดุหมักที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงเพื่อให้สามารถผ่านเข้าสู่เซลล์ได้ เมื่อสารอินทรีย์อยู่ในเซลล์แล้วจะถูกออกซิไดซ์หลายครั้งจนในที่สุดกลายเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (รูปที่ 1.1) สามารถแบ่งขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ

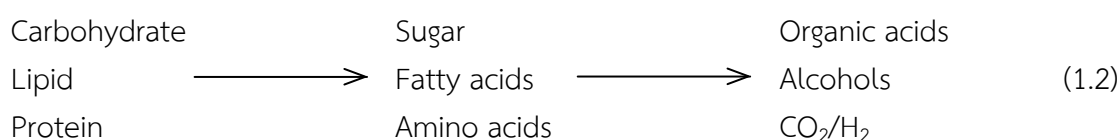
ขั้นที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ขั้นตอนนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากระบวนการแตกสลายโพลีเมอร์ (Polymer break-down) สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีขนาดโมเลกุลใหญ่ (Polymer) ทั้งที่สามารถละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส แป้ง โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ถูกทำให้ละลายน้ำโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Obligate anaerobic bacteria) และกลุ่มที่ดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative anaerobic bacteria) จุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่มนี้สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าพีเอช 4.0-6.5 ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง สามารถเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า ได้ภายในเวลา 24 ชั่วโมง จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ได้แก่ Fermentative bacteria และ Acetogenic bacteria ซึ่งจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในขั้นตอนนี้คือ Fermentative bacteria จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะผลิตเอนไซม์แล้วปล่อยออกมานอกเซลล์ (Extracellular enzyme) เช่น Proteolytic enzyme Cellulolytic enzyme และ Lipolytic enzyme เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้ได้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเป็นสารโมเลกุลเดี่ยว (Monomer) ที่ละลายน้ำได้หรือสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงที่จุลินทรีย์สามารถนำเข้าไปในเซลล์ได้ เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมันและกลีเซอรอล (สมการที่ 1.2) ในขั้นตอนนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ซับซ้อนเป็นสารอินทรีย์อย่างง่ายเท่านั้น ยังไม่มีการลดสารอินทรีย์แต่อย่างใด



### ขั้นที่ 2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

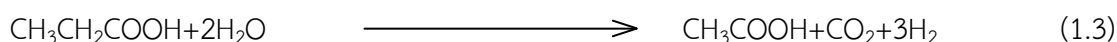
สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างของโมเลกุลไม่ซับซ้อนในขั้นตอนแรกและละลายน้ำได้ดีที่สร้างขึ้นโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Obligate anaerobic bacteria) และกลุ่มที่ดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative anaerobic bacteria) โดยกระบวนการหมัก (Fermentation) เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรด (Acidogenic bacteria) จะเปลี่ยนกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมันและกลีเซอรอลให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดฟอร์มิก (Formic acid) กรดบิวทีริก (Butyric acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดไอโซบิวทีริก (Isobutyric acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) และกรดไอโซวาเลอริก (Isovaleric acid) เป็นต้น (Banerjee *et al.*, 1998) (สมการที่ 1.2) นอกจากนี้ยังได้แอลกอฮอล์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย โดยชนิดของจุลินทรีย์พวกสร้างกรดนั้นจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นและสภาพแวดล้อมของปฏิกิริยาด้วย



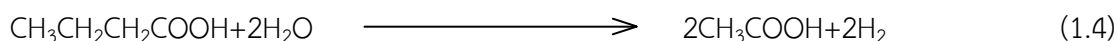
### ขั้นที่ 3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

กรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) จะถูกเปลี่ยนโดยจุลินทรีย์กลุ่ม Acetogenic bacteria หรือ Acetogen ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มย่อยคือ

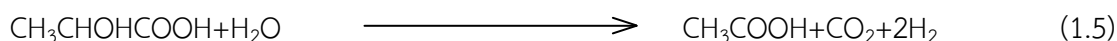
- Hydrogen producing acetogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมและเอทานอลให้เป็นอะซิเตท ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Macleod *et al.*, 1990) และยังมีหน้าที่ที่สำคัญในฐานะเป็นตัวเชื่อมระหว่างจุลินทรีย์ที่สร้างกรดและจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน พบว่าก๊าซไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นนั้นมีบทบาทสำคัญในการควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ โดยถ้ามีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในปริมาณมากจะทำให้ไฮโดรเจนไอออน (H<sup>+</sup>) เพิ่มมากขึ้น ค่าพีเอชในระบบมีความเป็นกรดจนกระทั่งมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ แต่ถ้าในระบบมีกลุ่ม Methanogenic bacteria อยู่ด้วยก๊าซไฮโดรเจนจะถูกใช้รีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน จึงทำให้ในระบบมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนไม่สูงมากจนถึงระดับที่เป็นพิษได้ ตัวอย่างของปฏิกิริยาการเกิดอะซิเตท ดังสมการที่ 1.3-1.6



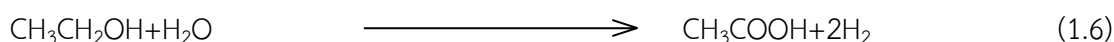
(Propionic acid)



(Butyric acid)



(Lactic acid)



(Ethanol)

โดยจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) ให้กลายเป็นกรดอะซิติกในขั้นตอนสุดท้ายดังสมการที่ 1.3-1.6 ซึ่งเรียกรวมกันว่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย รวมทั้งยังเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการย่อยสลายด้วย โดยเป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน ในขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย แต่หากไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีปริมาณที่สูงเกินไปจะยับยั้งกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนได้ จุลินทรีย์กลุ่มนี้อาจเรียกว่าจุลินทรีย์สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen forming bacteria) เนื่องจากจุลินทรีย์ที่สร้างไฮโดรเจนสามารถสร้างกรดอินทรีย์ได้ แต่ชนิดที่สร้างกรดได้อาจไม่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้ จึงถือว่าจุลินทรีย์ที่สร้างไฮโดรเจนเป็นชนิดหนึ่งของจุลินทรีย์ที่สร้างกรด จุลินทรีย์ทั้งสองชนิดอาจรวมเรียกได้ว่าเป็นจุลินทรีย์ที่ไม่สร้างมีเทน (Non-methanogenic bacteria) ทั้งนี้อัตราการย่อยสลายโมเลกุลของปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรดและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบและสภาพแวดล้อมของระบบด้วย

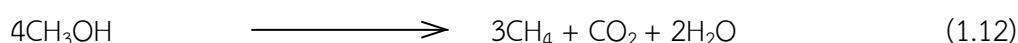
- Homoacetogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น ฟอร์เมท ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ออกมาเป็นอะซิเตท แต่ถ้าใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม เช่น น้ำตาลกลูโคส แลคเตท และไพรูเวท จะได้ออกมาทั้งอะซิเตทและบิวทิเรท ดังสมการที่ 1.7 และ 1.8



#### ขั้นที่ 4 กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรดคือ อะซิเตท ฟอร์เมท ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกใช้เพื่อสร้างก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic bacteria) จุลินทรีย์กลุ่มนี้จัดเป็นกลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างแท้จริง (Strictly anaerobic bacteria) เนื่องจากออกซิเจนจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มนี้ และสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอชที่เป็นกลางประมาณ 6.8-7.2 (Rajeshwari *et al.*, 2000 อ้างถึงใน Budiyono *et al.*, 2010) อัตรา

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะช้ากว่าจุลินทรีย์กลุ่มอื่นในขั้นตอนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน การแบ่งเซลล์จะเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าต้องใช้เวลา 3-5 วัน มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่า เช่น ไม่อาจทนต่อออกซิเจนแม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อยหรือไม่อาจเจริญเติบโตได้ดีเมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น และมีข้อจำกัดคือสามารถใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเพียงไม่กี่ชนิด เช่น อะซิเตท และสารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอมเท่านั้น เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ฟอर्मेट เมทานอล และเมทิลามีน ดังสมการที่ 1.9-1.14



นอกจากนี้สามารถแบ่ง Methanogenic bacteria ออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่  $\text{CO}_2$  reducing methanogenic bacteria ( $\text{H}_2$  oxidizing methanogenic bacteria) และ Acetoclastic methanogenic bacteria โดยอาศัยหลักการใช้สารอาหารที่แตกต่างกัน (Mahendra *et al.*, 1991 และ John *et al.*, 1994)

(1) Acetoclastic methanogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจากหมู่เมทิลในโมเลกุลอะซิเตท ดังสมการที่ 1.15 โดยพบว่าก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นประมาณ 72% มาจากการใช้อะซิเตทของจุลินทรีย์กลุ่มนี้



(2) Hydrogen-utilizing methane bacteria หรือ  $\text{H}_2$  oxidizing methanogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือได้คาร์บอนมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และได้พลังงานจำนวนมากจากก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ 1.16 โดยพบว่าประมาณ 28% ของก๊าซมีเทนในระบบเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้



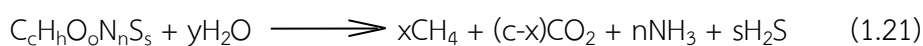
สำหรับสารอินทรีย์กลุ่มนี้สามารถใช้ฟอर्मेटได้เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากฟอर्मेटสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการที่ 1.17



โดยการทำงานของ Acetoclastic bacteria ย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแล้ว จะเปลี่ยนให้เป็นก๊าซต่างๆ ซึ่งก๊าซที่สำคัญคือก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 1.18 และส่วนที่เหลือเกิดจากปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนโดยการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดไฮโดรเจนยูทิลไลซิ่งมีเทน (Hydrogen-utilizing methane bacteria) โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายในขั้นตอนการสร้างกรดจะละลายอยู่ในน้ำ และทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ในระบบ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของแอมโมเนียจากการย่อยสลายโปรตีนเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งเป็นแหล่งไฮดรอกไซด์ไอออนที่สำคัญ ดังสมการที่ 1.19 การทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบจะเกิดการคาร์บอนิก และจะทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนโดยจุลินทรีย์ชนิดไฮโดรเจนยูทิลไลซิ่งมีเทนเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 1.20

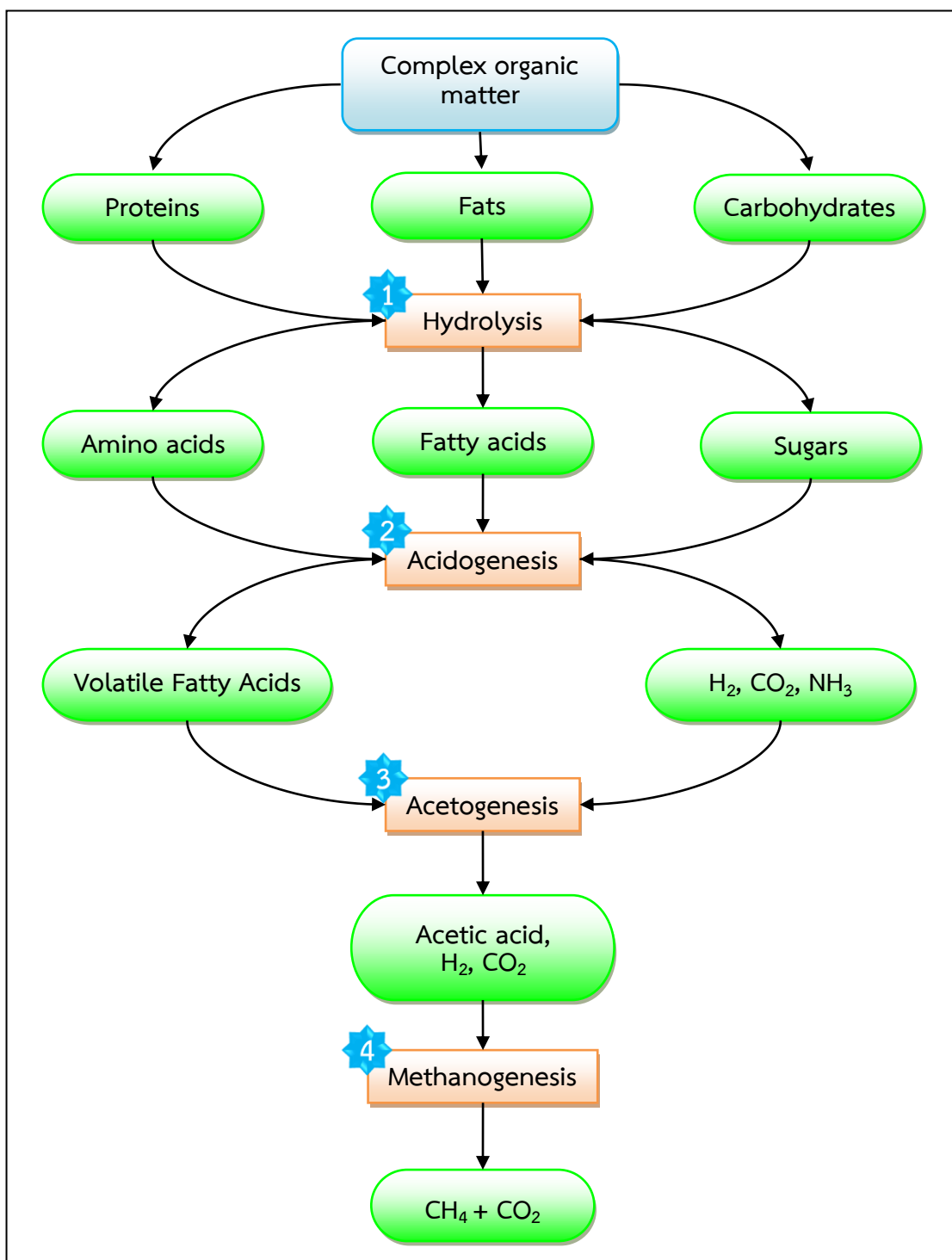


ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนี้ไม่ละลายน้ำจึงสามารถที่จะเก็บแล้วนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงที่เป็นประโยชน์ได้ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจะออกไปในรูปของก๊าซและบางส่วนละลายน้ำแล้วทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบเกิดเป็นไบคาร์บอเนตไอออน ( $\text{HCO}_3^-$ ) ผลจากการหมุนเวียนคาร์บอนไดออกไซด์นี้ทำให้เกิดมีผลต่อองค์ประกอบต่างๆ ในระบบ เช่น ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารอาหาร เป็นต้น ซึ่งจุลินทรีย์พวกที่สร้างกรดจะทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช อุณหภูมิ และมีอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วกว่ากลุ่มที่สร้างมีเทนมาก ความแตกต่างของอัตราการเจริญเติบโตและความไวต่อปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนเป็นตัวหลักในการควบคุมปฏิกิริยาทั้งหมดในระบบเรียกว่า Rate-limiting step ของกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจน เมื่อสิ้นสุดการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ อีกเล็กน้อย เช่น ไนโตรเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารอาหารจะถูกทำให้คงตัวอย่างสมบูรณ์ สมการทั่วไปของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อคำนวณปริมาณสารในระบบดังสมการที่ 1.21

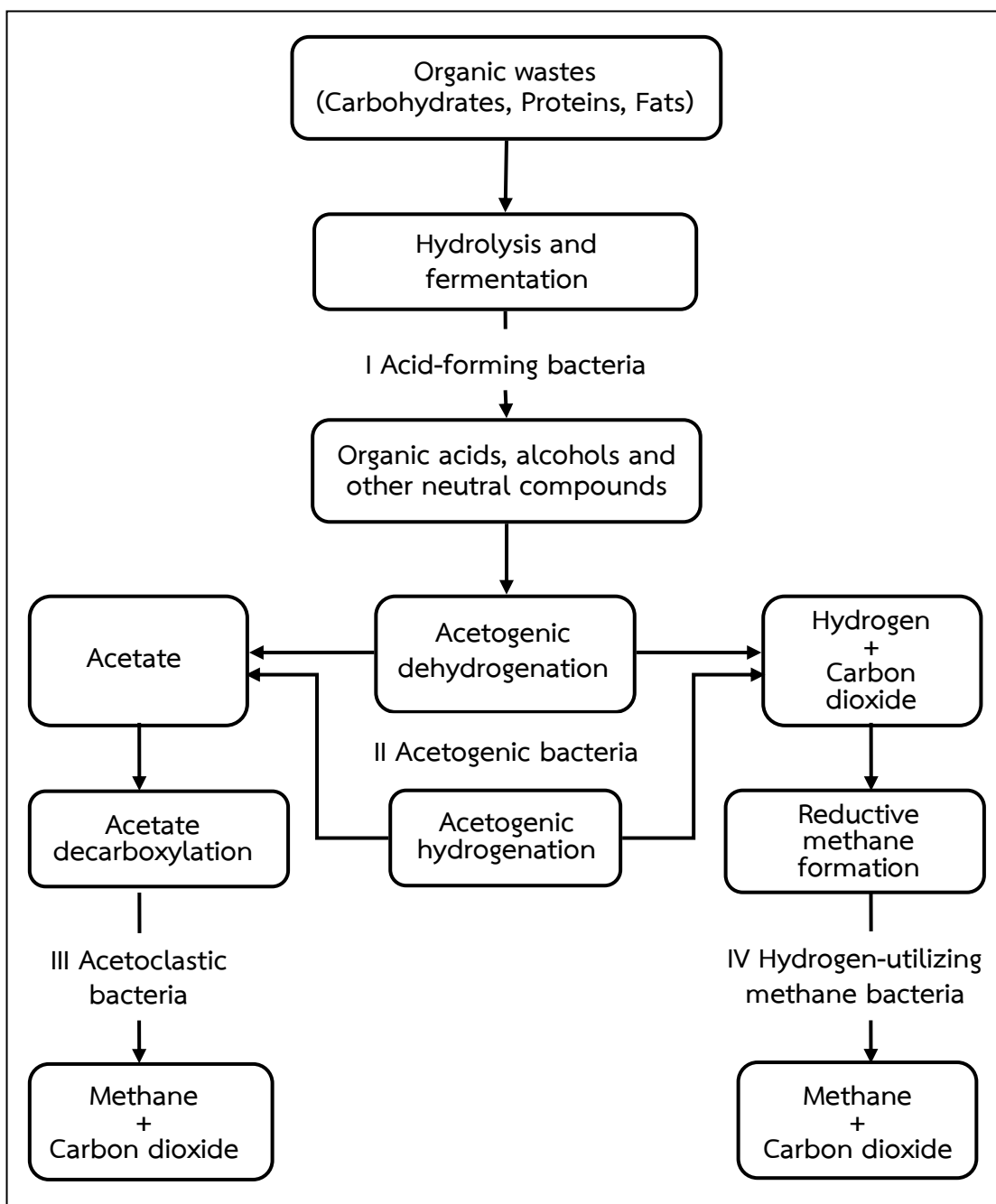


เมื่อ	$c =$ จำนวนอะตอมของคาร์บอน (C)	$h =$ จำนวนอะตอมของไฮโดรเจน (H)
	$o =$ จำนวนอะตอมของออกซิเจน (O)	$n =$ จำนวนอะตอมของไนโตรเจน (N)
	$s =$ จำนวนอะตอมของซัลเฟอร์ (S)	$x = 1/8(4c + h - 2o - 3n - 2s)$
	$y = 1/4(4c - h - 2o + 3n + 3s)$	

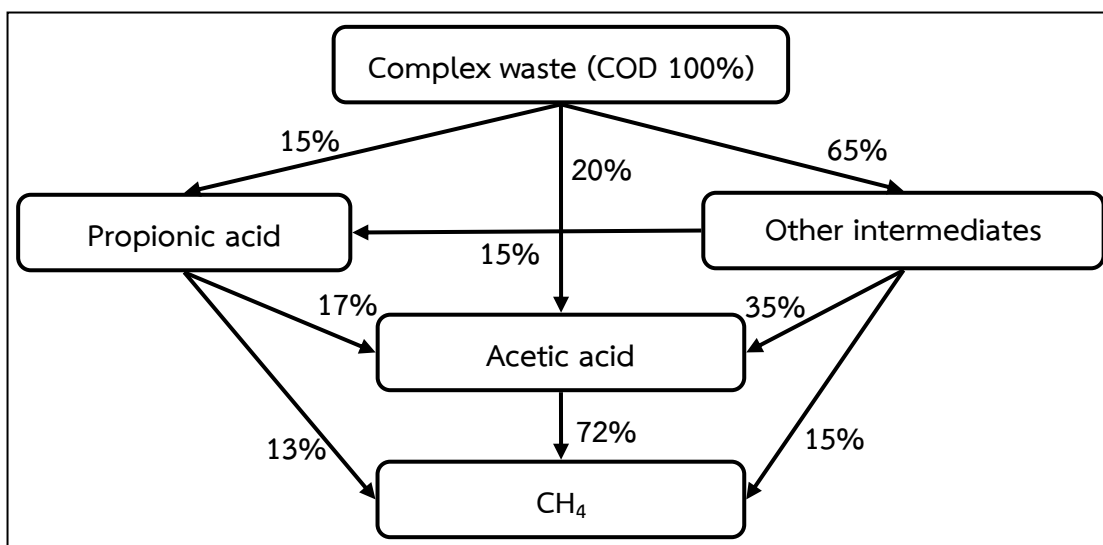
อัตราการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปเป็นก๊าซมีเทนจะเป็นตัวจำกัดการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะทำให้ค่าพีเอชลดลงและระบบอาจล้นเหลวได้ แต่การกวนผสมก็เป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งของการช่วยรักษาความสมดุลในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่างๆ ไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งจุลินทรีย์สร้างไฮโดรเจนและจุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถอยู่ได้ในสภาพไร้ออกซิเจนเท่านั้น ขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไร้ออกซิเจนแสดงในรูปที่ 1.2 และจากการศึกษาของ McCarty (1964) พบว่าการสร้างก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนแรกเกิดจากจุลินทรีย์ที่เรียกว่า Acetoclastic bacteria จะเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทนซึ่งเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 72 ของก๊าซมีเทนที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ และส่วนที่ 2 เกิดจาก Hydrogen-utilizing methane bacteria จะเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทนซึ่งเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 28 โดยร้อยละ 13 เกิดจากกรดโพธิโอไนคและร้อยละ 15 เกิดจากกรดอินทรีย์ระเหยง่ายอื่นๆ (รูปที่ 1.3)



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน



รูปที่ 1.2 การทำงานของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซมีเทน  
ที่มา: Brown and Tata (1985) อ้างถึงใน Polprasert (1989)



รูปที่ 1.3 การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในรูป COD เป็นก๊าซมีเทนด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไร้ออกซิเจน

ที่มา: McCarty (1964) อ้างถึงใน Reynolds and Richard (1995)

### 1.2.2 ข้อดีข้อเสียของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (เกรียงศักดิ์ อุทมนสินโรจน์, 2543 และ Rao *et al.*, 2000)

#### - ข้อดี

- 1) มีสลัดจ์ที่ต้องนำไปบำบัดและกำจัดน้อย
- 2) เกิดก๊าซมีเทนหรือก๊าซหุงต้มใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ดี
- 4) สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากๆ
- 5) ตะกอนสลัดจ์ระบบไร้ออกซิเจนสามารถเลี้ยงเก็บไว้ใช้ได้หลายๆ เดือน
- 6) ตะกอนอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์สามารถใช้เป็นปุ๋ยหมักหรือวัสดุ

ปรับปรุงดินที่มีคุณภาพ

- 7) สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหากำจัดของเสียต่างๆ ได้

- 8) สามารถลดปรากฏการณ์เรือนกระจกจากก๊าซที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศ

โดยการเปลี่ยนให้เป็นพลังงานนำมาใช้

#### - ข้อเสีย

- 1) ต้องควบคุมค่าพีเอชในระบบให้ดี
- 2) ใช้เวลาในการเริ่มเดินระบบค่อนข้างนาน
- 3) หลังจากน้ำเสียผ่านระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนแล้ว ควรมีการบำบัดสุดท้ายด้วย

ระบบอื่น

- 4) คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดนี้โดยส่วนมากจะไม่ได้มาตรฐานน้ำทิ้ง ( $BOD_5 \leq$

20 mg/l)

- 5) มีกลิ่นเหม็นและมีสีดำเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



### 1.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

เนื่องจากในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ประกอบด้วย จุลินทรีย์ 2 กลุ่ม ที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่สร้างมีเทนและจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน ซึ่งหากเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในจุลินทรีย์กลุ่มใดกลุ่มหนึ่งย่อมมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงาน ทั้งระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมเพื่อให้จุลินทรีย์เหล่านี้อยู่ด้วยกันได้ ในการควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต้องทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้อยู่ในสภาวะสมดุลกัน ซึ่งการเกิดเสถียรภาพในการทำงานของระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ (Tchobanoglous and Burton, 1991 และ Grady *et al.*, 1999)

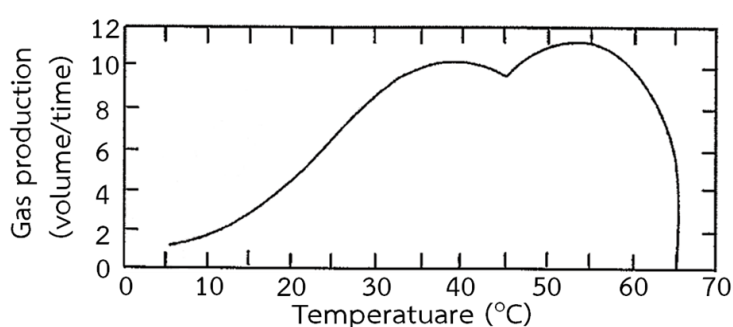
#### 1) อัตราส่วน C/N

อัตราส่วน C/N มีความสำคัญต่อการย่อยสลายทางชีวภาพมาก เพราะคาร์บอนและไนโตรเจนจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ อัตราส่วนของ C/N ที่เหมาะสมในการย่อยสลายในสภาพไร้ออกซิเจนคือ 20-30 (Yen and Brune., 2007 อ้างถึงใน Jia *et al.*, 2011) ถ้าอัตราส่วน C/N สูงเกินไป ไนโตรเจนจะถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว ผลคืออัตราการเกิดเซลล์จุลินทรีย์ลดลงทำให้ก๊าซที่ผลิตได้ลดน้อยลง แต่ถ้าอัตราส่วน C/N ต่ำเกินไป ไนโตรเจนที่มากเกินไปของความจำเป็นของจุลินทรีย์จะเปลี่ยนมาสะสมอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งจะเป็นตัวบั่นยั้งการทำงานของระบบได้เนื่องจากเกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ แต่การมีแอมโมเนียไนโตรเจนในระดับที่เหมาะสมก็เป็นสิ่งจำเป็นเพราะสามารถลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้จากการที่แอมโมเนียมีไอออนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเกิดเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตควบคุมสมดุลของค่าพีเอชและสร้างกำลังบัฟเฟอร์ให้กับระบบ (Shanmugam and Horan, 2009 และ จิรวัดน์ ชาลีวรรณ, 2546) ซึ่งไนเตรทจะสามารถเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียไอออนได้ในระบบย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนขึ้นอยู่กับค่าพีเอชภายในระบบ ถ้าค่าพีเอชไม่เกิน 7.2 แอมโมเนียไนโตรเจนจะอยู่ในรูปแอมโมเนียไอออน แต่ถ้าค่าพีเอชสูงกว่า 7.2 แอมโมเนียไนโตรเจนจะอยู่ในรูปก๊าซแอมโมเนีย ในการปรับสภาพให้วัสดุดิบที่ใช้ในการย่อยสลายมีค่าอัตราส่วน C/N อยู่ในช่วงที่เหมาะสมทำได้โดยการผสมระหว่างวัสดุหมักที่มีอัตราส่วน C/N สูงกับวัสดุหมักที่มีอัตราส่วน C/N ต่ำหรือการเติมไนโตรเจนโดยตรงให้กับวัสดุหมักที่มีอัตราส่วน C/N สูงโดยนิยมเติมปุ๋ยยูเรียเพราะจุลินทรีย์หลายชนิดสามารถเปลี่ยนยูเรียไปเป็นแอมโมเนียได้

#### 2) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลโดยตรงต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน อุณหภูมิที่เหมาะสมมีอยู่ 2 ช่วงคือ อุณหภูมิระหว่าง 30-40°C (Mesophilic temperature) จุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า Mesophilic bacteria และอุณหภูมิระหว่าง 50-60°C (Thermophilic temperature) จุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า Thermophilic bacteria (Kim *et al.*, 2002) จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนจะหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิต่ำหรือสูงเกินไป โดยทั่วไปอัตราการผลิตก๊าซมีเทนและอัตราการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิ 28-42°C อัตราการผลิตก๊าซมีเทนและอัตราการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปถึง 50°C ระบบจะปรับตัวได้ดีขึ้นอัตราการ

ผลิตภัณฑ์มีเทนและอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิ 55°C และลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งจนถึงอุณหภูมิ 65°C (รูปที่ 1.4) ในช่วง Thermophilic temperature อัตราเร็วของปฏิกิริยาและประสิทธิภาพของระบบจะมากกว่าในช่วง Mesophilic temperature (Ahn and Forster, 2002) ทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์สั้นลง และลดปริมาณถังหมักลง (Pagilla *et al.*, 2000 และ Zupancic and Ros, 2003) แต่ระบบการหมักที่อุณหภูมิสูงมีข้อเสียคือ Thermophilic bacteria จะทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่า Mesophilic bacteria การควบคุมระบบจึงมีความเสี่ยงสูงต่อการล้มเหลวของระบบ และยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของระบบอีกด้วย

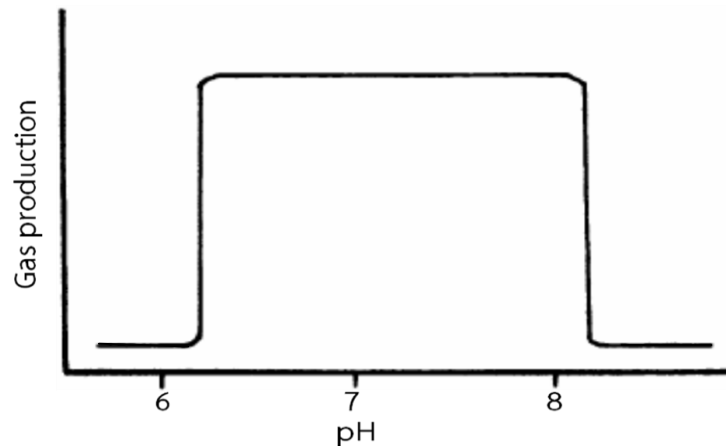


รูปที่ 1.4 ผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลายสารอินทรีย์  
ที่มา: Price and Cheremisinoff (1981) อ้างถึงใน Polprasert (1989)

### 3) พีเอช (pH)

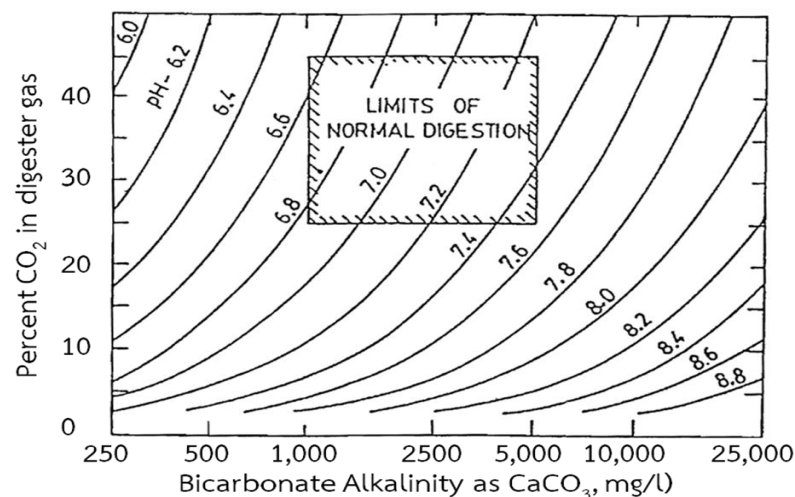
ค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน เนื่องจากจุลินทรีย์สร้างกรดและจุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถทำงานร่วมกันได้ดีจะต้องรักษาค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 6.8-7.2 ถ้าค่าพีเอชสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง (รูปที่ 1.5) และถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 6.6 หรือสูงกว่า 7.6 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะที่สภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (McCarty, 1964) เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มนี้ใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายไม่ทน ทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเกิดการสะสมเพิ่มมากขึ้น ค่าพีเอชจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าต่ำกว่า 6.5 จะทำให้ Methanogenic bacteria หยุดการเจริญเติบโต ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการเติมสารเคมีพวกต่างๆ ลงไป เช่น ปูนขาว (CaO) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) โซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) เป็นต้น หรืออาจจะลดปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบลง ในการใช้ต่างแกหรือคาร์บอเนตปรับสภาพจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำเกิดสมดุลชั่วคราว เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศถูกดึงเข้าไปทดแทนคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ เพื่อสร้างต่างไบคาร์บอเนตทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น แต่เมื่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาแทนที่จะทำให้จุดสมดุลเคลื่อนไปจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำสมดุลกับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ สิ่งที่ใช้งบชี้สภาวะภายในระบบหมักไร้ออกซิเจนได้อย่างหนึ่งคือ ค่าพีเอชแต่มีปัญหาเนื่องจากเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงช้า ในขณะที่กรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มมากขึ้นแต่ค่าพีเอชกลับเปลี่ยนแปลงเพียง

เล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากผลของบัฟเฟอร์ของความเป็นต่างภายในระบบ ดังนั้นการใช้ค่าพีเอชสำหรับการแก้ไขสภาวะภายในระบบอาจจะไม่ทันการ เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าพีเอชก็ยังเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมระบบเพราะสามารถหาค่าได้ง่ายและรวดเร็ว



รูปที่ 1.5 ผลของพีเอชต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

ที่มา: Gray (1989)



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชความเข้มข้นของ  $\text{HCO}_3^-$  และความเข้มข้นของ  $\text{CO}_2$

ที่มา: McCarty (1964) อ้างถึงใน Reynolds and Richard (1995)

#### 4) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA)

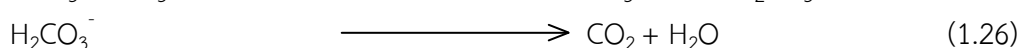
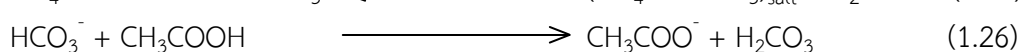
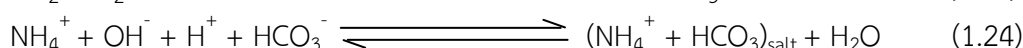
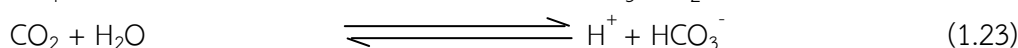
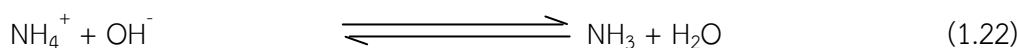
กรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเป็นค่าของกรดอินทรีย์โมเลกุลสั้นที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิกและกรดบิวทิริก ซึ่งจะถูก

จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน โดยปกติกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบควรมีความเข้มข้นของกรดอะซิติกประมาณ 50-500 mg/l (Halbert, 1981) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะมีส่วนสำคัญต่อค่าพีเอช คือ เมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูงขึ้นค่าพีเอชจะต่ำลงเกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ระดับของกรดอะซิติกที่มีค่าเกิน 800 mg/l หรืออัตราส่วนของกรดไพรโอไนคต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดการล้มเหลวได้ (Marchaim and Krause, 1993) แต่ถ้าในระบบมีบัฟเฟอร์ที่ดีการล้มเหลวของระบบจะไม่เกิดขึ้น การแก้ไขความเป็นพิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทำได้โดยลดอัตราการป้อนสารอินทรีย์ลง การเติมสารปรับสภาพ และเพิ่มระยะเวลาในการกักเก็บ

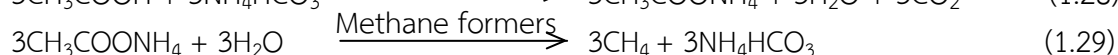
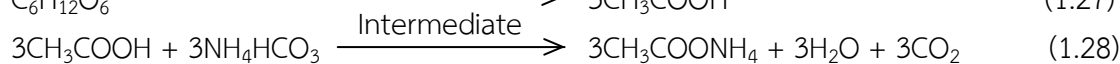
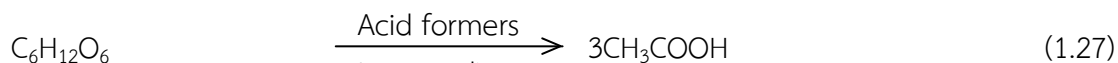
### 5) สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

ค่า Alkalinity ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนนั้นมีความสำคัญต่อการหมักวัสดุที่มีความเป็นกรดสูง เพราะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมค่าพีเอชของระบบไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากหลังจากมีการเติมวัสดุหมัก ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตดังสมการที่ 1.22-1.24 ค่า Alkalinity เป็นค่าบ่งบอกถึงความเป็นบัฟเฟอร์ที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่อความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตก็จะถูกทำลายไป การทำลายความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์เป็นสาเหตุทำให้ค่าพีเอชลดลง โดยทั่วไปแล้วระบบหมักในสภาวะไร้ออกซิเจนควรมีค่า Alkalinity ประมาณ 1,000-5,000 ml/l as CaCO<sub>3</sub> (Osman and Delia, 2005) สภาพความเป็นด่างของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ถูกควบคุมด้วยระบบกรด-ด่าง โดยความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์จะสูงเฉพาะที่ค่าพีเอชของระบบใกล้เคียงค่า pKa ของระบบกรด-ด่างนั้น ดังนั้นในช่วงค่าพีเอช 6.8-7.2 ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการทำงานของระบบในสภาวะไร้ออกซิเจน มีเพียงระบบไบคาร์บอเนต ซัลไฟด์และฟอสเฟตที่สำคัญ โดยปกติระบบไบคาร์บอเนตเท่านั้นที่เป็นส่วนสำคัญในการควบคุมค่า Alkalinity ของระบบ

ค่า Alkalinity ทั้งหมดจะมีความสำคัญน้อยกว่าค่า Alkalinity ในรูปของไบคาร์บอเนต เนื่องจากค่า Alkalinity ในรูปของไบคาร์บอเนตทำหน้าที่ควบคุมความเป็นกรดในระบบ การเปลี่ยนแปลงของค่า Alkalinity ทั้งหมดจึงน้อยกว่าค่า Alkalinity ในรูปไบคาร์บอเนต เมื่อมีความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น ค่า Alkalinity ในรูปไบคาร์บอเนตจะทำปฏิกิริยากับกรดดังสมการที่ 1.25 และ 1.26



ถ้ากระบวนการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นไปอย่างสมดุลแล้ว แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตจะเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชซึ่งจะลดสภาพความเป็นกรดที่เกิดจากกรดอินทรีย์ระเหยง่ายดังสมการที่ 1.27-1.29



จากสมการดังกล่าว ถ้าน้ำเสียมีปริมาณไนโตรเจนเพียงพอและเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์แล้วจะได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ที่ทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากกระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ และจะได้แอมโมเนียมอะซิเตต ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) ซึ่งถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตกลับคืนมา แต่ถ้าปริมาณของไบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแล้วจะทำให้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าพีเอชในระบบลดลงจนกระทั่งจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนไม่สามารถย่อยสลายแอมโมเนียมอะซิเตตได้ และพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชยังขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนอีกด้วย

วิธีการควบคุมค่าพีเอชโดยอาศัยสภาพต่างเพื่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมกับการทำงานของกระบวนการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนซึ่งสามารถบอกให้ทราบว่าจะขาดสภาพความเป็นด่างที่จะควบคุมค่าพีเอช (สมการที่ 1.30)

$$\text{BA} = \text{TA} - (0.85)(0.833)\text{TVA} \quad (1.30)$$

เมื่อ	BA	=	สภาพด่างไบคาร์บอเนต (mg/l as $\text{CaCO}_3$ )
	TA	=	สภาพด่างทั้งหมด (mg/l as $\text{CaCO}_3$ )
	TVA	=	กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (mg/l as $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
	0.85	=	กรดอินทรีย์ระเหยง่ายมี $\text{CH}_3\text{COOH}$ 85% เมื่อใช้วิธีไตเตรตถึงค่าพีเอช 4
	0.833	=	(น้ำหนักสมมูลของ $\text{CaCO}_3$ )/(น้ำหนักสมมูลของ $\text{CH}_3\text{COOH}$ )

การพิจารณาว่าค่า Alkalinity ในรูปไบคาร์บอเนตมีกำลังบัฟเฟอร์สูงเพียงพอที่จะรองรับการเปลี่ยนแปลงของพีเอชในระบบ นอกจากจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของค่า Alkalinity ในรูปไบคาร์บอเนตแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนตด้วย (TVA/BA) ถ้าอัตราส่วนนี้น้อยกว่า 0.4 ระบบจะมีกำลังบัฟเฟอร์สูงเพียงพอแก่การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบ แต่ถ้าอัตราส่วนนี้มากกว่า 0.8 แสดงถึงความไม่เสถียรของระบบและจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในระบบ (สุภกิจ ดีโสภ, 2545)

การปรับสภาพความเป็นต่างทำได้ 3 วิธี คือ

(1) การเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว โซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งผลของการเติมสารเคมีต่างชนิดกันให้ผลไม่เหมือนกัน เช่น ปูนขาวหรือโซดาไฟสามารถดึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศมาทำปฏิกิริยาด้วยแต่สารบางอย่าง เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนตสามารถเพิ่มบัฟเฟอร์ให้กับน้ำได้โดยไม่ทำให้ระดับคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลง หรือแม้แต่สารเคมีชนิดเดียวกันเมื่อเติมในถังปฏิกรณ์ที่มีสภาพภายในถังแตกต่างกันก็อาจให้ผลที่ต่างกัน เช่น เมื่อเติมปูนขาวหรือโซดาไฟในถังปฏิกรณ์ที่มีสภาพภายในถังเป็นกรด ไอออนของแคลเซียมจะจับกับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนต แต่เมื่อภายในถังปฏิกรณ์เกิดสภาพต่างแล้วไอออนของแคลเซียมจะจับกับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการตกตะกอนเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ความเป็นต่างลดลง แต่มีข้อดีคือสามารถแก้ปัญหาฝ้าไขมันที่ลอยอยู่ที่ผิวของถังปฏิกรณ์ได้ดีจึงเหมาะกับการปรับสภาพความเป็นต่างของระบบที่ใช้วัสดุหมักที่มีไขมันสูง เช่น กากกาแพ เป็นต้น

(2) การใช้วัสดุหมักร่วมกับวัสดุหมักอื่นที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูง นอกจากช่วยเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์จากการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียไนโตรเจนแล้วยังช่วยกำจัดวัสดุหมักชนิดอื่นด้วย

(3) การนำส่วนที่เป็นสารละลายจากตะกอนที่ออกจากระบบกลับมาใช้อีกนอกจากเป็นการเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์โดยธรรมชาติแล้วยังเป็นการนำความร้อน จุลินทรีย์และธาตุอาหารรองกลับเข้าสู่ระบบอีกด้วย

## 6) สารอาหาร (Nutrient)

สารอาหารแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ สารอาหารหลัก (Macronutrient) ได้แก่ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) และสารอาหารรอง (Micronutrient) ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) และนิกเกิล (Ni) ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จุลินทรีย์ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 (McCarty, 1964) โดยใช้คาร์บอนในการสังเคราะห์พลังงาน ไนโตรเจนในการสังเคราะห์โปรตีนและฟอสฟอรัสในการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก ดังนั้นในการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมจึงต้องเติมสารอาหารให้เพียงพอแก่ความต้องการ เพราะของเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป เช่น ขยะของเสียจำพวกเศษอาหาร ผักผลไม้ มีสารอาหารเหล่านี้ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ แต่ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางอย่างไม่มี จึงจำเป็นต้องเติมสารอาหารเหล่านี้เพิ่ม นอกจากนี้สารอาหารรองนั้นจุลินทรีย์มีความต้องการน้อยมาก และในธรรมชาติก็มีเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์อยู่แล้ว

## 7) สารพิษ (Toxic substance)

สารบางอย่างถ้ามีความเข้มข้นสูงเกินไปจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้ ซึ่งระดับความเป็นพิษขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารพิษ เช่น ไอออนประจุบวกของโลหะเบา (Light metal cation) ได้แก่ โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือการเติมสารเคมีเพื่อปรับค่าพีเอชในระบบมีผลเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งความเป็นพิษของไอออนเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปริมาณของไอออนประจุบวกของโลหะเบาด้วยว่ามีปริมาณมากน้อยเพียงใด ดังแสดงตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ความเข้มข้นในการกระตุ้นและยับยั้งของไอออนประจุบวกของโลหะเบา

ไอออนประจุบวก	ความเข้มข้น (mg/l)		
	กระตุ้น	เริ่มยับยั้ง	ยับยั้งอย่างรุนแรง
โซเดียม ( $\text{Na}^+$ )	100-200	3,500-5,500	8,000
โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ )	200-400	2,500-4,500	12,000
แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ )	100-200	2,500-4,500	8,000
แมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ )	75-150	1,000-1,500	3,000

ที่มา: McCarty (1964) และ Izrail and Mathai (2006)

ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาแต่ละชนิดรุนแรงไม่เท่ากัน ไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 จะมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์น้อยกว่าไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 ซึ่งพิษของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  จะมากกว่าพิษของ  $\text{Na}^+$  และ  $\text{K}^+$  ถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีวาเลนซ์สูงขึ้น ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาสามารถลดลงได้ถ้ามีไอออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งอยู่ด้วย โดยจะทำให้ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาชนิดแรกลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Antagonism แต่ในทางตรงกันข้ามไอออนประจุบวกของโลหะเบาบางชนิดจะไปเพิ่มพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งเมื่อมีอยู่ร่วมกัน และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Synergism

#### 8) ก๊าซบางชนิด

(1) แอมโมเนีย (Ammonia) เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์จำพวกโปรตีนที่ประกอบด้วยไนโตรเจนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) หรือก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) โดยทั้งสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปเปลี่ยนมาได้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ดังสมการที่ 1.31



ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 7.2 จะมี  $\text{NH}_4^+$  มากกว่า แต่ถ้าค่าพีเอชสูงกว่า 7.2 จะมี  $\text{NH}_3$  มากกว่า ซึ่งจะยับยั้งการทำงานและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์มากกว่า  $\text{NH}_4^+$  แอมโมเนียเมื่ออยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3$  จะเป็นพิษก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 mg/l (Sterling *et al.*, 2001) แต่ในรูปของ  $\text{NH}_4^+$  จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นสูงเท่ากับ 7,000-9,000 mg/l

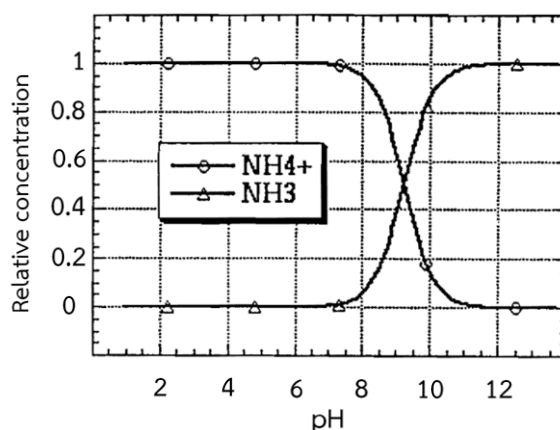
ตารางที่ 1.2 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

แอมโมเนียไนโตรเจน (mg/L)	ผลต่อระบบ
50-200	ปริมาณพอเหมาะ
200-1,000	ยังไม่เกิดผลเสีย
1,500-3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อพีเอชสูง
> 3,000	เป็นพิษโดยตรง

ที่มา : McCarty (1964)

Sterling *et al.* (2001) ศึกษาการย่อยสลายมูลวัวนมภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนพบว่า แอมโมเนียไนโตรเจนมีผลต่อการสร้างก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และการลดลงของของแข็งระเหยในถังหมัก โดยแอมโมเนียไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยมีผลทำให้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีแอมโมเนียไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้นจะมีผลยับยั้งการสร้างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน การผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดจะลดลงไป 50% ของอัตราการผลิตเดิม

Sung and Liu (2003) รายงานว่า แอมโมเนียในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนความเข้มข้น 4.92 และ 5.77 g/L มีผลทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลง 39 และ 64% ตามลำดับ แต่ถ้ามีการปรับสภาพจุลินทรีย์พวก Acetoclastic methanogen ด้วยแอมโมเนียไนโตรเจนความเข้มข้นสูง จะทำให้สามารถทนต่อปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นและช่วงค่าพีเอชที่กว้างขึ้น ความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนที่สามารถยับยั้งได้ 100% เกิดในช่วง 8-13 g/L ขึ้นอยู่กับการปรับสภาพและค่าพีเอชของระบบ



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) และก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ )

ที่มา: สุรพล สายพานิช (2540)

(2) ซัลไฟด์ (Sulfide) เกิดขึ้นในระบบไร้ออกซิเจนจากซัลเฟต (Sulfate) ที่มีอยู่ในของเสียที่เข้าสู่ระบบ หรือเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์จำพวกโปรตีนที่มีซัลเฟอร์ ซึ่งซัลไฟด์ที่ละลายน้ำเท่านั้นและมีความเข้มข้นสูงกว่า 200 mg/L ที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ (Sastry and Vickineswaty, 1995) โลหะหนักทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์สร้างผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำขึ้น ดังนั้นการเติม



โลหะบางชนิด เช่น เหล็ก สามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ละลายน้ำได้ ซัลไฟด์จะถูกแยกออกมาอยู่ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ดังนั้นความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายน้ำขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของของเหลวและส่วนประกอบของก๊าซ

### 9) โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม โคบอล โครเมียม และนิกเกิล เป็นต้น ซึ่งไอออนของโลหะหนักเหล่านี้เป็นพิษต่อจุลินทรีย์และพิษของโลหะหนักก็ขึ้นอยู่กับว่าเกลือของโลหะหนักนั้นจะละลายน้ำได้มากน้อยเพียงใด และพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในของเสียนั้น (ตารางที่ 1.3) เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์รวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอน ถ้าของเสียมีปริมาณซัลไฟด์ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ ก็จะต้องเติมเกลือซัลไฟด์หรือเกลือซัลเฟตลงไป เกลือทั้งสองชนิดจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนทำให้สามารถลดพิษของโลหะหนักลงได้

Wong and Cheung (1995) ศึกษาผลของปริมาณโลหะหนักต่อการย่อยสลายตะกอนของเสียภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน พบว่ามีโลหะหนักพวก Cr, Cu, Ni และ Zn ในปริมาณสูง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าระดับความเป็นพิษของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด เรียงลำดับจากมากไปน้อยได้คือ  $Cr > Ni > Cu > Zn$

ตารางที่ 1.3 ระดับความเป็นพิษของโลหะหนักในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/l)		
	ยับยั้ง	เป็นพิษ	หยุดทำงาน
Cr (III)	130	260	<200
Cr (VI)	110	420	<180
Cu	40	70	<50
Ni	10	30	>30
Cd	-	>20	>10
Pb	340	>340	>250
Zn	400	600	<1,700

ที่มา: Hayes and Theis (1978)

### 10) อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการกำหนดความสามารถของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน การปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้มีค่าแตกต่างกัน ทำได้โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลผ่านถังหมัก หรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไป ซึ่งการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารอินทรีย์มีผลกระทบต่อระยะเวลาที่เก็บด้วย

### 11) ระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic Retention Time, HRT)

เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน อัตราเร็วของการย่อยสลายเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่กักเก็บสารอินทรีย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นจะลดลงจนกระทั่งถึงระดับหนึ่งที่จุลินทรีย์ถูกล้างออกจากระบบ (Wash out) ในอัตราที่เร็วกว่าจุลินทรีย์เพิ่มจำนวนขึ้น (Yilmazer and Yenigun, 1999) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ระบบล้มเหลวได้ สามารถแก้ไขปัญหาล้างออกจากระบบได้โดยการเพิ่มระยะเวลาที่กักเก็บให้นานขึ้น (Wen *et al.*, 1999) นอกจากนี้ระยะเวลาที่กักเก็บจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก กล่าวคือระยะเวลาที่กักเก็บเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมักสามารถคำนวณได้โดยการหารปริมาณถังหมักด้วยปริมาณของเสียที่เติมลงในถังหมักต่อหน่วยเวลาของระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบ (Solid Retention Time, SRT) หมายถึงมวลของของแข็งภายในระบบหารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวัน ในถังหมักแบบธรรมดาที่ไม่มีการหมุนเวียนตะกอนระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบจะเท่ากับระยะเวลาที่กักเก็บน้ำเสีย (SRT=HRT) แต่ในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอนจะมีระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบมากกว่าระยะเวลาที่กักเก็บน้ำเสีย (SRT>HRT)

$$HRT = SRT = \text{volume/flow rate} = V/Q \quad (1.34)$$

### 12) การกวน (Mixing)

การกวนเป็นสิ่งสำคัญในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยมีหลักการคือ ทำให้สารอินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอยเพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอาหารกับจุลินทรีย์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วย และป้องกันการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่างๆ ของถังหมัก และทำให้ของเหลวภายในถังหมักมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีในการกวนของเหลวในถังหมักมีหลายวิธี เช่น ใช้เครื่องกวนสูบอัดก๊าซไปทางด้านก้นของถังหมัก หมุนเวียนตะกอนด้วยปั๊ม และใช้การสูบผ่านท่อน้ำ เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป การที่จะเลือกใช้วิธีไหนต้องคำนึงถึงปัจจัยในหลายๆ ด้านประกอบกัน Salminen and Rintala (2002) ศึกษาผลของระยะเวลาที่กักเก็บและอัตราการป้อนสารอินทรีย์ของระบบย่อยสลายของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ปีกภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมี HRT เท่ากับ 50-100 วัน และ OLR เท่ากับ 0.8 kg VS/m<sup>3</sup>.d แต่ถ้า HRT ลดลง และ OLR เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันสายยาว และ VFA ในถังหมัก ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ก็จะลดลง

#### 1.2.4 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่ได้มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนโดยมีจุลินทรีย์หลายชนิดทำหน้าที่ย่อยสลาย ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังอาจจะมีก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ปนอยู่บ้างเล็กน้อย แต่ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการหมักจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นกับวัตถุดิบที่ใช้และสภาวะของกระบวนการหมักด้วย

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแสดงในตารางที่ 1.4 และก๊าซชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้นั้นจะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบมากกว่า 45% (Dieter and Angelika, 2008)

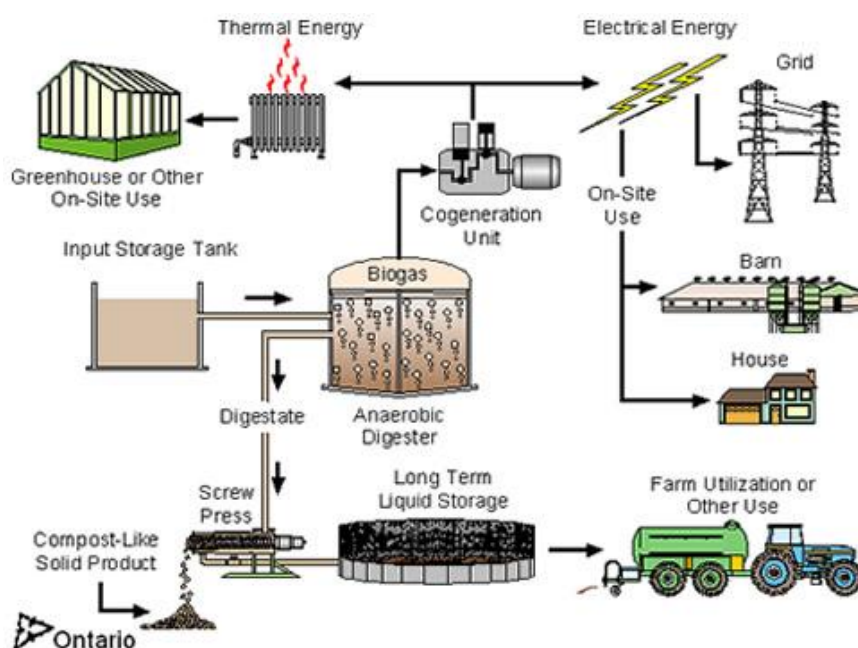
ตารางที่ 1.4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	%
ก๊าซมีเทน (CH <sub>4</sub> )	50-75
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	25-45
ก๊าซไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	<1
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S)	<1

ที่มา: Teodorita *et al.* (2008)

### 1.2.5 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (Biogas utilization)

ปัจจุบันสารอินทรีย์ที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแล้วให้ก๊าซชีวภาพคือ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม โรงงานแปรงมันสำปะหลัง โรงงานเบียร์ และโรงงานผลไม้กระป๋อง เป็นต้น รวมทั้งน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โดยน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมีค่า COD ลดลงมากกว่า 80% และได้ก๊าซชีวภาพ 0.3–0.5 m<sup>3</sup>/kg COD<sub>removal</sub> ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสียแต่ละประเภท ก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบบำบัดส่วนใหญ่จะอิ่มตัวด้วยไอน้ำ ในเบื้องต้นก่อนการนำไปใช้ประโยชน์ต้องทำการแยกไอน้ำออกด้วยเครื่องควบแน่น โดยก๊าซชีวภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางเช่นเดียวกับก๊าซธรรมชาติ



รูปที่ 1.8 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน

ที่มา: <http://www.greatlakesbiogas.com/site/works>

ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้แทนพลังงานในรูปแบบต่างๆ ได้จากการเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ (ตารางที่ 1.5)

ตารางที่ 1.5 แสดงการเปรียบเทียบก๊าซชีวภาพกับเชื้อเพลิงต่างๆ

ก๊าซชีวภาพ 1.0 m <sup>3</sup> เทียบเท่า	
ก๊าซหุงต้ม (LPG)	0.46 kg
น้ำมันดีเซล	0.60 l
น้ำมันเตา	0.55 l
ไฟฟ้า	1.20 kW/h

ที่มา: เครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย (2550)

ดังนั้น การผลิตก๊าซชีวภาพจึงเกิดประโยชน์ในหลายด้านคือ

- ด้านพลังงาน

- 1) ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อน ทดแทนการใช้น้ำมันเตา
- 2) ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า
- 3) ใช้ในรูปของพลังงานร่วม โดยใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและให้ความร้อนกับ

กระบวนการผลิตร่วมกัน

- ด้านเศรษฐกิจ

- 1) สามารถลดต้นทุนการผลิต
- 2) มีรายได้จากการขายไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer, VSPP)

- 3) มีรายได้จากการขายคาร์บอนเครดิต

- ด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการของเสีย

- 1) ลดการตัดไม้ทำลายป่า
- 2) ลดเขม่าจากการใช้ฟืนในการหุงต้ม
- 3) เป็นเทคโนโลยีการบำบัดของเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- 4) สามารถแก้ปัญหากลิ่นเหม็น สัตว์พาหะนำโรคที่เกิดจากการกำจัดของเสียที่ไม่ถูก

หลักวิชาการ

- 5) เป็นการหมุนเวียนขยะมูลฝอยอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ในรูปของสารปรับสภาพดิน

- 6) ลดการใช้พื้นที่ในการกำจัดของเสีย

- 7) สามารถหมักร่วมกับของเสียอินทรีย์ประเภทอื่น (Co-digestion) เช่น เศษวัสดุ

เหลือใช้ทางการเกษตร มูลสัตว์ต่างๆ และของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

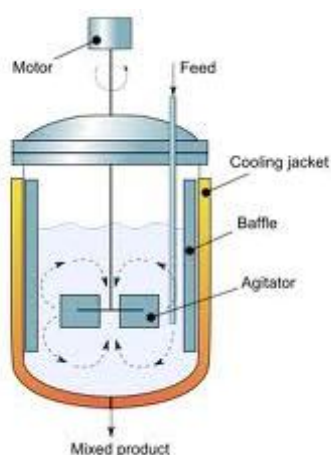
- ด้านอื่นๆ

- 1) น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบนำไปใช้เป็นปุ๋ยน้ำ
- 2) นำกากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายไปใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ

## 1.2.6 ระบบถังหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

### 1) ระบบกวนผสมแบบสมบูรณ (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)

เป็นระบบถังหมักแบบอัตราสูง (High rate digester) ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบจุลินทรีย์แขวนลอย (Anaerobic suspended growth process) และเป็นพื้นฐานในการพัฒนาสู่ระบบบำบัดไร้ออกซิเจนแบบอื่นๆ (รูปที่ 1.9) นับได้ว่าเป็นกระบวนการที่เก่าแก่ที่สุด ซึ่งช่วงแรกถูกใช้สำหรับการปรับเสถียรตะกอน (Sludge stabilization) เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนจนกระทั่งปัจจุบัน ยังมีการใช้งานโดยกระบวนการนี้อยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมบางแห่งซึ่งบำบัดแบบไร้ออกซิเจน (Metcalf and Eddy, 2004)



รูปที่ 1.9 ถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)

ที่มา : [http://en.wikipedia.org/wiki/Continuous\\_stirred-tank\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_stirred-tank_reactor)

### 2) ลักษณะและการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม

ถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม มีลักษณะหลายรูปแบบ เช่น ถังกลม ถังสี่เหลี่ยมจัตุรัส และถังสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นต้น ซึ่งรูปทรงของถังกวนผสมต้องสัมพันธ์ต่อการกวนผสม เพราะการกวนผสมเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการนี้มากและสมมติว่าของเหลวที่รวมกันอยู่ในถังได้รับการกวนผสมอย่างสมบูรณ์คือผสมเป็นเนื้อเดียวกัน มีการกวนผสมอย่างต่อเนื่องและทั่วทั้งถัง ทำให้ปฏิกิริยากำจัดสารอินทรีย์เกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากจุลินทรีย์เกิดการสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้ทั่วถึง แต่น้ำที่ไหลออกมามีปริมาณตะกอนอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงจึงต้องมีการแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกก่อน น้ำเสียจะถูกป้อนเข้าถังปฏิกรณ์เพื่อกวนผสมกับเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในถังและทำปฏิกิริยากันจนได้ของเหลวที่ออกจากระบบมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันกับของเหลวที่อยู่ภายในถัง ส่วนในทางปฏิบัติการกวนผสมที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อการกวนผสมนั้นเพียงพอสำหรับของเหลวที่ไม่มีความหนืดจนเกินไป (Reynolds and Richards, 1995) ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาจะถูกนำออกจากถังปฏิกรณ์ทางท่ออากาศที่ติดตั้งอยู่บนฝาถัง การกวนผสมภายในถังอาจทำได้โดยการใช้เครื่องจักรกลแบบใบพัด การใช้เครื่องสูบน้ำหมุนเวียนหรือการกวนผสมด้วยก๊าซที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเป็นก๊าซชีวภาพ

### 3) ประโยชน์ของระบบการกวนผสมแบบสมบูรณ์

- (1) ป้องกันการแยกชั้นทางความร้อน และรักษาสภาพคงที่ของอุณหภูมิตลอดทั่วทั้งถังปฏิกรณ์ โดยการรักษาสภาพทางเคมีและกายภาพให้เท่ากันทั้งหมด
- (2) ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างมวลสารและน้ำเสียเข้า
- (3) เกิดการกระจายอย่างรวดเร็วของกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์และลดผลกระทบจากสารพิษที่เข้าสู่ระบบให้น้อยที่สุด
- (4) ป้องกันการเกิดฝ้าไขและการตกตะกอนที่บวมของอนุภาคที่มีอยู่ในถังปฏิกรณ์

### 4) ข้อดีของระบบกวนผสมแบบสมบูรณ์

- (1) เหมาะกับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยในระดับสูง
- (2) เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง
- (3) สามารถรักษาความคงที่ของสารอาหาร อุณหภูมิและพีเอชให้เท่ากันทั่วทั้งถังปฏิกรณ์
- (4) ง่ายต่อการตรวจสอบ
- (5) สารพิษในน้ำเสียซึ่งมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจะถูกเจือจางให้มีผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุด
- (6) ช่วยลดการไหลลัดวงจรและการสะสมตัวของน้ำเสียที่เป็นจุดอับการกวน
- (7) ไม่เกิดการจับตัวของจุลินทรีย์

### 5) ข้อเสียของระบบกวนผสมแบบสมบูรณ์

- (1) ต้องการปริมาตรของถังปฏิกรณ์มากเพื่อรักษาระยะเวลาเก็บของแข็ง (Solids Retention Time, SRT) ให้เพียงพอ
- (2) สำหรับน้ำเสียที่มีของแข็งแขวนลอยสูงต้องคำนึงถึงอัตราการกวนให้มีความเหมาะสม
- (3) ประสิทธิภาพในการบำบัดอาจต่ำ เนื่องจากน้ำเสียที่ยังไม่ได้รับการย่อยสลายและจุลินทรีย์หลุดออกจากถังปฏิกรณ์
- (4) เสถียรภาพของถังปฏิกรณ์อาจถูกจำกัดโดยระยะเวลาเก็บของแข็งที่ต่ำ

## 1.2.7 การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP)

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของวัสดุหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน แสดงในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมซีโอดีของของเสียที่ถูกย่อยสลายไป มีขั้นตอนในการดำเนินการคือ

- 1) นำวัสดุหมักที่ต้องการทดลองใส่ในขวดหมักตามสัดส่วนที่กำหนด จากนั้นเติมเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.8-7.2 ด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ปิดฝาขวดหมักให้สนิท
- 2) นำขวดหมักที่ได้ดำเนินการทดลองตามอุณหภูมิที่กำหนด แล้วทำการเขย่าเพื่อให้เกิดการกวนผสมระหว่างจุลินทรีย์กับวัสดุหมัก

- 3) วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวัน จดบันทึกค่า จนสิ้นสุดปฏิบัติการคือ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นน้อยกว่า 5 ml จึงทำการหยุดการทดลอง
- 4) นำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี
- 5) ทำ Blank โดยการใช้ น้ำกลั่นแทนวัสดุหมักแล้วทำเหมือนข้อ 1-4 เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาทดลองอาจมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ จึงต้องนำค่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจาก Blank ไปลบกับก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากวัสดุหมัก
- 6) นำค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นไปคำนวณหาค่าศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทน

## 1.2.8 วัสดุที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ

### 1) อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว จากข้อมูลทุติยภูมิพบว่าในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยมีโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากเปลือกผลปาล์มประมาณ 80 โรงงาน ตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคใต้ 66 โรงงาน มีกำลังการผลิตรวมประมาณปีละ 10-12 ล้านตันผลปาล์มทะเลาย และมีโรงงานกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 17 โรงงาน (สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตร, 2554) สำหรับกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีหลายแบบอาจแบ่งหลักๆ เป็น 2 ประเภทคือ การผลิตแบบมาตรฐานหรือแบบใช้น้ำ ซึ่งมีทั้งระบบที่ใช้เครื่องสกัดแยกน้ำมันแบบ Decanter (รูปที่ 1.9) และแบบ Separator และการผลิตแบบไม่ใช้น้ำหรือแบบแห้งในการอบทะลายหรือผลปาล์ม เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาเอนไซม์ไลเปสของผลปาล์มที่จะเปลี่ยนน้ำมันเป็นกรดไขมันอิสระทำให้วัตถุดิบและน้ำมันที่ได้มีคุณภาพต่ำลง จากกระบวนการผลิตเหล่านี้ก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก ได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunch) เส้นใยปาล์ม (Fibre) กะลาผลปาล์ม (Shell) และตะกอนดีแคนเตอร์ (Decanter cake) ซึ่งพบ 24, 14, 6 และ 4.2% ของทะลายปาล์มสด ตามลำดับ และน้ำทิ้ง (Palm Oil Mill Effluent, POME) ซึ่งความแตกต่างของวัสดุเศษเหลือจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบ (Chavalparit *et al.*, 2006 อ้างถึงใน Singh *et al.*, 2011)

#### (1) แหล่งผลิตปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง ซึ่งเหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น จัดอยู่บริเวณใกล้เคียงกับเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของประเทศไทย บริเวณพื้นที่ที่ปลูกปาล์มน้ำมันมากที่สุดคือ จังหวัดสุราษฎร์ธานี กระบี่ ชุมพร นครศรีธรรมราช และตรัง โดยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันทั้งหมดประมาณ 3,982,623 ไร่ จังหวัดสุราษฎร์ธานีปลูกมากที่สุดจำนวน 966,180 ไร่ คิดเป็น 24.26% และรองลงมาได้แก่จังหวัดกระบี่จำนวน 954,730 ไร่ และจังหวัดชุมพร 774,200 ไร่ คิดเป็น 23.97 และ 19.44% ของพื้นที่ปลูกทั้งประเทศ ตามลำดับ และผลผลิตที่ได้จากทะลายปาล์มสดในพื้นที่ภาคใต้ประมาณ 10,247,030 ตัน (ศูนย์สถิติการเกษตร, 2555) เนื่องจากผลตอบแทนที่ได้จากการปลูกปาล์มน้ำมันดีกว่าการปลูกพืชชนิดอื่น เช่น ยางพารา และการทำนาข้าวจึงเป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรขยายพื้นที่ปลูกปาล์มเพิ่มมากขึ้น คาดว่าปริมาณความต้องการน้ำมันปาล์มทั้งภายในประเทศและตลาดโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

## (2) กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มมีหลายรูปแบบขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ เริ่มตั้งแต่การรับวัตถุดิบ การสกัด และทำให้บริสุทธิ์จนบริโภคเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ (Middlebroks, 1979) และในส่วนของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีขั้นตอนคือ นำทะลายปาล์มสดมาอบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 150°C ที่ความดันประมาณ 3 Bars ใช้เวลาประมาณ 80-90 นาที การอบผลปาล์มเพื่อช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไลโปไลซิสที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์มและทำให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดออกจากทะลายได้ง่าย ทะลายปาล์มที่ผ่านการนึ่งแล้วจะป้อนเข้าเครื่องแยกผลปาล์ม ในส่วนของทะลายจะถูกลำเลียงออกจากกระบวนการผลิตไปยังพื้นที่จัดเก็บ ส่วนผลปาล์มที่แยกได้จะถูกนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม ภายในเครื่องย่อยจะมีการกวนผลปาล์มเพื่อให้เส้นใยแยกตัวออกจากเมล็ดและให้เซลล์น้ำมันเกิดการแตกตัว การกวนจะเกิดขึ้นประมาณ 5-10 นาที ที่อุณหภูมิ 95-100°C จากนั้นจึงป้อนเข้าเครื่องหีบแบบอัดเกลียว (Screw press) น้ำมันที่ได้จะถูกแยกออกจากน้ำและเศษเส้นใยรวมทั้งสิ่งสกปรกอื่นๆ ด้วยเครื่องดีแคนเตอร์ (Decanter) น้ำเสียที่เกิดขึ้นถูกส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย ส่วนตะกอนที่เกิดขึ้นจะส่งไปยังพื้นที่จัดเก็บ น้ำมันที่ได้จะผ่านเข้าสู่เครื่องดูดสุญญากาศเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นจะลำเลียงไปเก็บในถังเก็บน้ำมันเพื่อเตรียมจำหน่ายให้โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ส่วนเมล็ดของปาล์มที่ถูกแยกออกมาจะถูกส่งไปยังเครื่องกะเทาะเมล็ดเพื่อแยกส่วนของเมล็ดในปาล์ม (Kernel) กับกะลาผลปาล์ม (Shell) เมล็ดในปาล์มที่ได้จะถูกส่งไปยังเครื่องทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 90-120°C จากนั้นจะส่งไปเก็บไว้ที่ถังเก็บเพื่อส่งจำหน่าย ส่วนกะลาผลปาล์มจะถูกแยกออกด้วยเครื่องแยกไปยังพื้นที่จัดเก็บ (รูปที่ 1.10)

### 2) ตะกอนดีแคนเตอร์ (Decanter Cake)

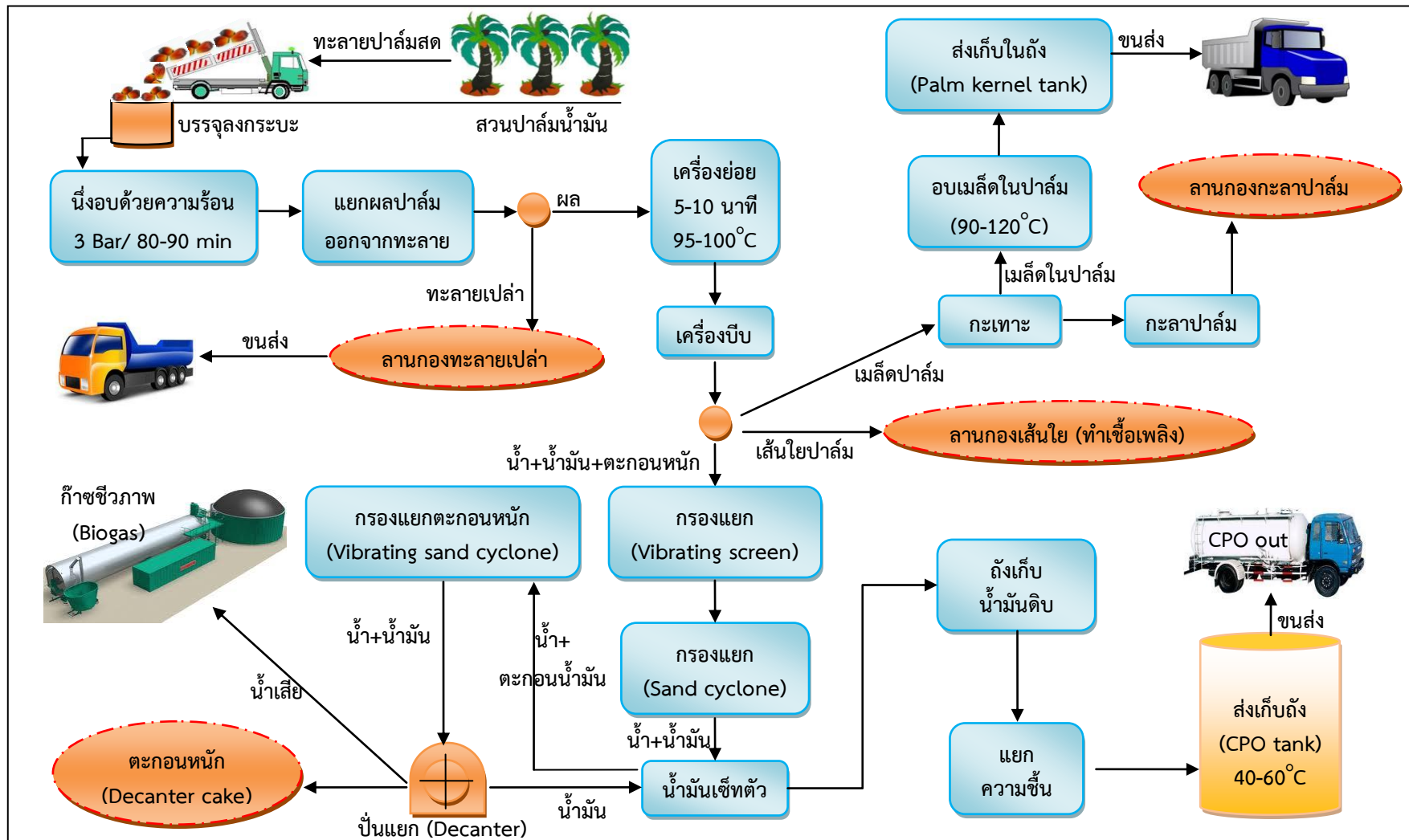
ตะกอนดีแคนเตอร์หรือเค้กเป็นวัสดุเศษเหลือจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมาจากส่วนของเนื้อผลปาล์มมีน้ำมันอยู่ 50% เมื่อสกัดน้ำมันจะเกิดตะกอนสลัดจ์ซึ่งเรียกว่า ตะกอนดีแคนเตอร์ โดยมีอินทรีย์คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) เป็นองค์ประกอบอยู่ 51.70, 2.38 และ 19% ตามลำดับ (Yahya *et al.*, 2010) ซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญของตะกอนดีแคนเตอร์แสดงดังตารางที่ 1.6



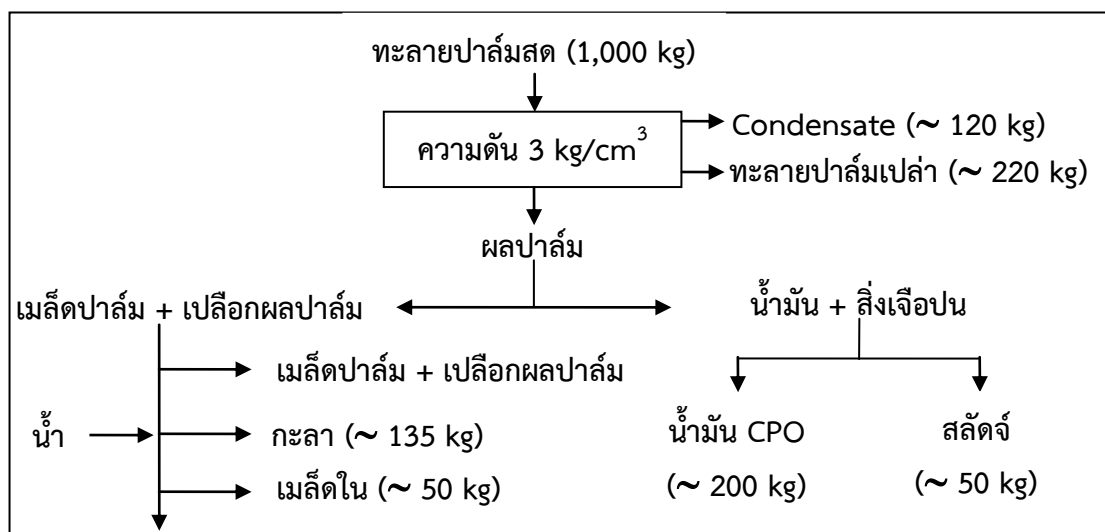
ตารางที่ 1.6 คุณลักษณะของตะกอนดีแคนเตอร์

พารามิเตอร์	หน่วย	ตะกอนดีแคนเตอร์
ความชื้น (Moisture)	%	76.70
ของแข็งระเหยได้ (VS)	% dry	83.40
ซีโอดี (COD)	g/kg dry	880
ทีโอดี (TOC)	g/kg dry	470
อินทรีย์คาร์บอน (C)	% dry	43.60
ไฮโดรเจน (H)	% dry	5.79
ไนโตรเจน (N)	% dry	2.21
ออกซิเจน (O)	% dry	31.70
ซัลเฟอร์ (S)	% dry	0.15
ทีเคเอ็น (TKN)	g/kg dry	21.50
แอมโมเนียไนโตรเจน (NH <sub>3</sub> -N)	g/kg dry	0.69
น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease)	% dry	4.62

ที่มา: Paepatung *et al.* (2009)



รูปที่ 1.10 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มในจังหวัดกระบี่



รูปที่ 1.11 ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม  
ที่มา: ธีระพงศ์ จันทรมาน (2551)

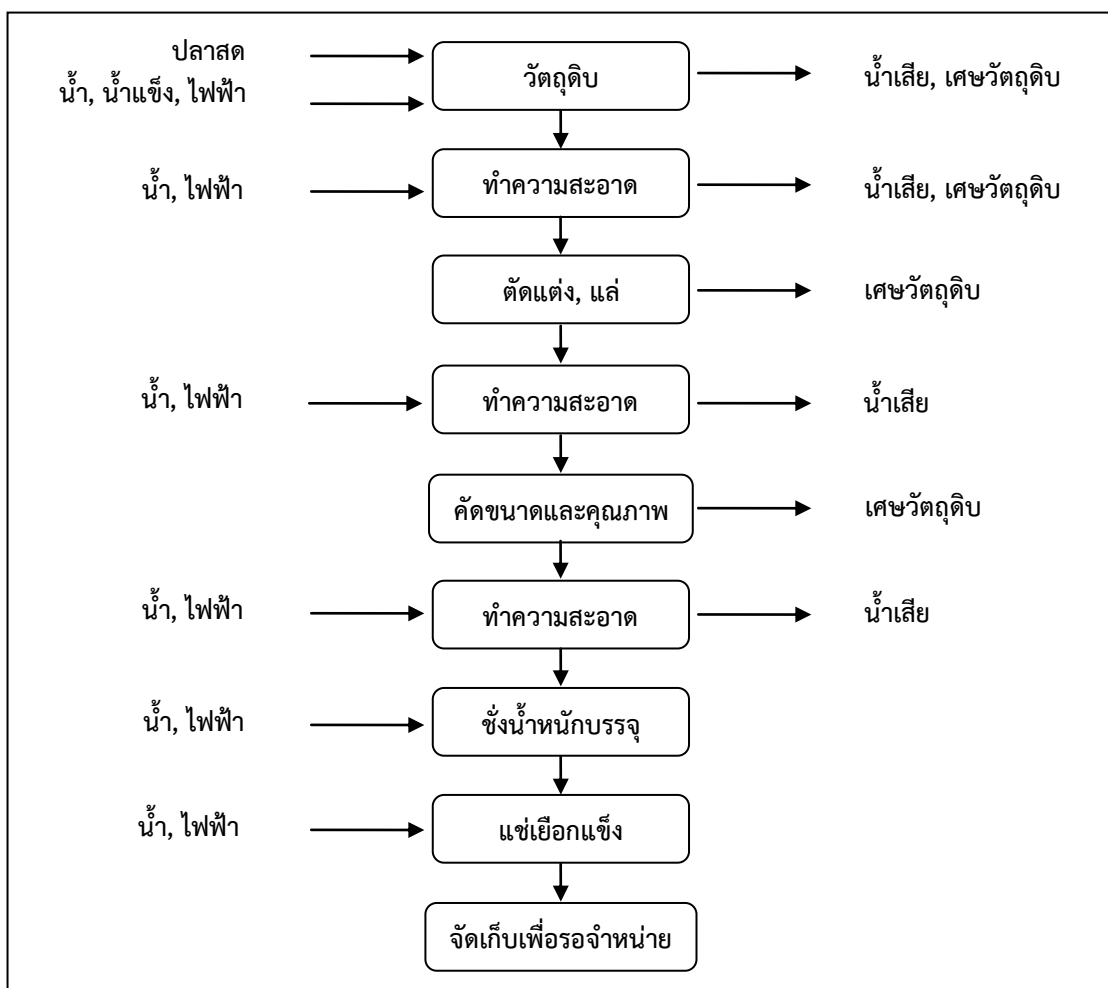
### 3) โรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง

อุตสาหกรรมอาหารทะเลและอาหารทะเลแช่แข็งเป็นอุตสาหกรรมส่งออกที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยในระดับสูงและเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งของพื้นที่ภาคใต้ ในปัจจุบันประเทศไทยได้รับการยอมรับในระดับสากลว่าเป็นประเทศที่สามารถผลิตสินค้าอาหารทะเลที่มีคุณภาพดีจึงทำให้มีสินค้าจำพวกอาหารหลายชนิดที่ประเทศไทยก้าวขึ้นเป็นผู้นำในด้านการส่งออกของโลก ผลิตภัณฑ์แปรรูปอาหารทะเลที่มีการผลิตในประเทศไทยสูงสุด ได้แก่ ปลาทูน่ากระป๋องและปลาซาดีนกระป๋อง รองลงมาเป็นผลิตภัณฑ์กุ้งสดแช่เยือกแข็ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

#### (1) กระบวนการผลิตและน้ำเสียจากกระบวนการผลิต

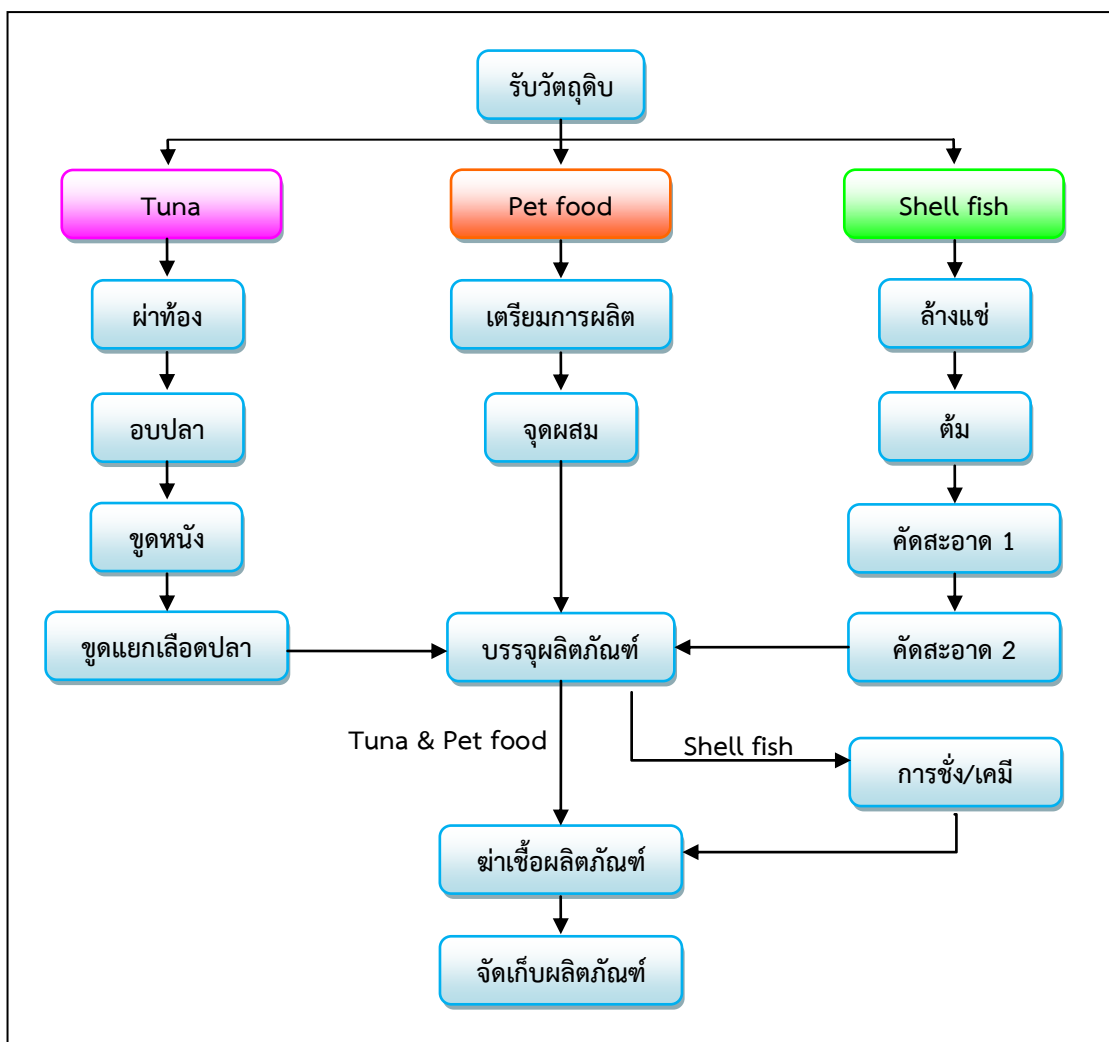
ผลิตภัณฑ์แปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งมีลักษณะโดยทั่วไปคือ วัตถุดิบจำพวกอาหารทะเลสด ได้แก่ กุ้ง ปู ปลา และปลาหมึก จะถูกเตรียมให้พร้อมสำหรับการนำไปประกอบอาหาร โดยการตัดแต่งและทำความสะอาด ผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งอาจมีการนำไปแปรรูป เช่น การชุบเกล็ดขนมปัง การบดแล้วขึ้นรูป หรือการปรุงให้สุกก่อน (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) จากกระบวนการผลิตที่แสดงในรูปที่ 1.12 จะเห็นได้ว่าการใช้น้ำล้างหลายขั้นตอนในการผลิต น้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการล้างวัตถุดิบและจากแหล่งอื่นๆ ได้แก่ การใช้เพื่ออุปโภคในสำนักงาน การชำระทำความสะอาดมือและเท้าของพนักงานปฏิบัติงาน การล้างสายการผลิตและภาชนะต่างๆ โดยน้ำเสียส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ จากการปนเปื้อนของเศษเนื้อ เลือดปลาและไขมัน ซึ่งมีผลให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณบีโอดี ของแข็งแขวนลอย น้ำมันและไขมันสูง โดยปริมาณน้ำเสียจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้และปัจจัยต่างๆ เช่น การควบคุมความสะอาดของสินค้า รูปแบบของเทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูป ลักษณะการเตรียมวัตถุดิบ เช่น การตัดหัว การแปรรูปก่อนส่งเข้ามายังโรงงาน และการใช้น้ำทำความสะอาดสายการผลิต นอกจากนี้ในการล้างวัตถุดิบหากต้องควบคุมปริมาณของเชื้อในผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับต่ำปริมาณน้ำที่ใช้ล้างจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และวิธีการผลิตของแต่ละ

โรงงานเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมาก เช่น การแล่ตัดแต่งโดยการใช้เครื่องจักรมีการใช้น้ำมากกว่าการทำงานด้วยมือ การปกปิดเปลือกกุ้งด้วยเครื่องจักรจำเป็นต้องใช้น้ำมากกว่าการปกปิดเปลือกด้วยมือ จากข้อมูลที่สำรวจของกรมโรงงานอุตสาหกรรมเป็นค่าเฉลี่ยของอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งพบว่าปริมาณการใช้น้ำเฉลี่ยประมาณ 13-40 m<sup>3</sup>/ton ของผลิตภัณฑ์ รวมถึงปริมาณน้ำของน้ำแข็งและน้ำเย็นที่ใช้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตจะถูกส่งไปบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ซึ่งอาจมีความแตกต่างกันตามความพร้อมในการลงทุน ลักษณะคุณภาพน้ำเสียและสภาพแวดล้อมของโรงงาน และจากการสำรวจของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมอาหารทะเลจำนวน 9 โรงงาน ในจังหวัดสงขลาและบริเวณใกล้เคียงของ Prasertsan *et al.* (1988) พบว่าการแปรรูปวัตถุดิบของโรงงานอาหารทะเลแช่แข็งนั้นจะเกิดเศษเหลือจากกระบวนการผลิตในสัดส่วนที่สูงจากกระบวนการผลิต ทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากประมาณ 35-600 m<sup>3</sup>/d และมีการผลิตผลิตภัณฑ์จำนวนมากเพื่อการส่งออกจึงส่งผลทำให้เกิดน้ำทิ้งจำนวนมากที่มีการปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1.12 กระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่เยือกแข็ง  
ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2548)

จากการศึกษาและเก็บข้อมูลกระบวนการผลิตของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา (รูปที่ 1.13) พบว่าในส่วนของการผลิตผลิตภัณฑ์ของโรงงานแบ่งการทำงานหลักๆ ออกเป็น 3 ฝ่ายการผลิตคือ สายการผลิตปลาทูน่า สายการผลิตผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า และสายการผลิตอาหารสัตว์ วัตถุดิบที่นำเข้าเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตเป็นจำพวกอาหารทะเล ได้แก่ ปลาทูน่า ปู กุ้ง หอยและวัตถุดิบจำพวกเนื้อสัตว์เพื่อใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ โรงงานมีวัตถุดิบเข้าประเภทปลาทูน่าประมาณ 51,000 ตันต่อปี วัตถุดิบอาหารสัตว์ประมาณ 15,000 ตันต่อปี และวัตถุดิบผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่าประมาณ 900 ตันต่อปี โดยรวมแล้วปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในโรงงานประมาณ 200-220 ตันต่อวัน ปริมาณการใช้น้ำและปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตประมาณ 2,000-2,300 m<sup>3</sup>/d น้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตส่วนใหญ่มาจากน้ำล้างวัตถุดิบ ภาชนะ และพื้นที่ใช้งานในกระบวนการผลิต



รูปที่ 1.13 กระบวนการผลิตของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา

## (2) ลักษณะน้ำเสียของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง

น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์สูง ซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนของเศษวัตถุดิบจากกระบวนการผลิตและสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบ ทำให้น้ำเสียมีค่าบีโอดี ของแข็งแขวนลอย น้ำมันและไขมันสูง ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งแสดงดังตารางที่ 1.7 พบว่ามีสารประกอบอินทรีย์โดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง หากไม่มีการบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำ วิภารัตน์ ชัยเพชร (2551) ศึกษาลักษณะน้ำเสียของโรงงานอาหารทะเลกระป๋องพบว่า มีค่าซีโอดีประมาณ (COD) 3,000-4,500 mg/l บีโอดี (BOD) 2,000-3,000 mg/l ของแข็งทั้งหมด (TS) 2,000-5,500 mg/l และทีเคเอ็น (TKN) 50-500 mg/l วีระศักดิ์ ทองลิ้มป์ (2540) ศึกษาปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของโรงงานอาหารทะเลแช่แข็งพบว่า มีปริมาณน้ำเสียเฉลี่ย 931 m<sup>3</sup>/d มีการใช้น้ำประมาณ 25-40 m<sup>3</sup>/ton ของวัตถุดิบ

จากการศึกษาและเก็บข้อมูลลักษณะน้ำเสียของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา พบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่โรงงานตรวจวัดเป็นประจำมี 5 พารามิเตอร์คือ บีโอดี (BOD) ซีโอดี (COD) น้ำมันและไขมัน (Oil & grease) พีเอช และของแข็งแขวนลอย (SS) โดยน้ำเสียที่เข้าระบบมีค่าบีโอดี ซีโอดี และพีเอชประมาณ 2,000 mg/l, 1,500 mg/l และ 6.8-7.2 ตามลำดับ เมื่อน้ำเสียผ่านการบำบัดด้วยระบบ Upflow Anaerobic Contactor (UAC) ค่าบีโอดี ซีโอดี และพีเอชเท่ากับ 150 mg/l, 200 mg/l และ 6.8-7.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1.7 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง

พารามิเตอร์	หน่วย	โรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง			
		S1	S2	S3	S4
ซีโอดี (COD)	mg/l	1,721	1,460	2,063	3,097
บีโอดี (BOD)	mg/l	1,574	1,369	1,625	2,239
ทีเคเอ็น (TKN )	mg/l	161	157	201	303
ฟอสฟอรัส (TP )	mg/l	2.82	1.79	2.08	1.92
ของแข็งแขวนลอย (SS)	mg/l	104	193	419	1,267
น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease)	mg/l	77	89.3	76.3	146.3
ค่าพีเอช (pH)	-	7.17	7.07	6.76	6.93

หมายเหตุ: S1 = บ. โชติวัฒน์ห้องเย็นหาดใหญ่ จำกัด S2 = บ. คิงพิชเซอร์โพลดิงส์ จำกัด  
S3 = บ. สยามโภชนาการ จำกัด S4 = บ. แปซิฟิกแปรรูปสัตว์น้ำ

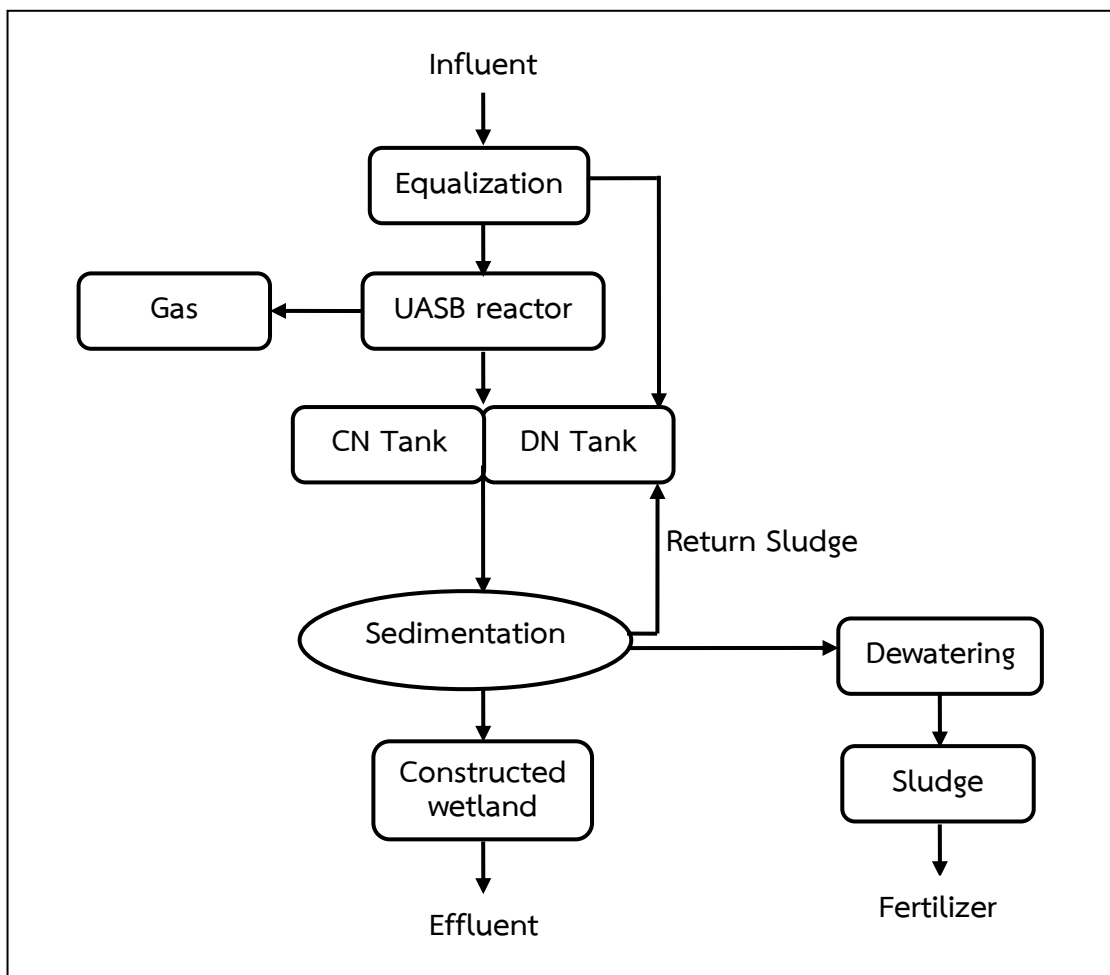
ที่มา: วีระศักดิ์ ทองลิ้มป์ (2540)

### (3) ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง

โรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งจะมีการจัดระบบบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ในการจัดการของระบบบำบัดน้ำเสีย สำหรับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่นิยมใช้ระบบบ่อบำบัด แต่น้ำเสียในสายการผลิตที่มีส่วนประกอบของปริมาณสารอินทรีย์และไนโตรเจนในระดับสูง ระบบบำบัดแบบบ่อไม่สามารถบำบัดน้ำทิ้งให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) จึงต้องอาศัยระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการบำบัด ระบบบำบัดทางชีวภาพที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ ระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ หรือระบบยูเอเอสบี เป็นต้น (นุกูลและคณะ, 2546) โดยองค์พัฒนา วรรณกลัด (2552) ได้ทำการศึกษาลักษณะระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งของบริษัทห้องเย็นโชติวัฒน์หาดใหญ่จำกัด (มหาชน) พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียประกอบด้วยบ่อปรับเสถียร ระบบยูเอเอสบี ระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ซึ่งมีบ่อกระบวนการไนตริฟิเคชันและบ่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน บ่อตกตะกอนและมีบึงประดิษฐ์เป็นระบบบำบัดสุดท้ายก่อนปล่อยน้ำทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม (รูปที่ 1.14) น้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดมาจากส่วนของกระบวนการในสายการผลิต เช่น น้ำแข็งแช่วัตถุดิบ น้ำล้างวัตถุดิบ น้ำเสียที่เกิดจากการล้างผลิตภัณฑ์ น้ำเสียจากถังต้มกุ้ง น้ำที่เกิดจากการล้างเครื่องมือการผลิต และน้ำเสียจากการล้างพื้น โดยน้ำเสียทั้งหมดจะถูกรวบรวมและไหลลงสู่บ่อปรับเสถียร (Equalization Tank, EQ) เพื่อทำการกักเก็บน้ำเสียให้มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ค่อนข้างคงที่ ในโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งที่มีการใช้น้ำแข็งในสายการผลิตน้ำเสียจะมีอุณหภูมิต่ำ บ่อปรับเสถียรจะทำหน้าที่ในการปรับอุณหภูมิของน้ำเสียให้เหมาะสมกับระบบบำบัดที่อุณหภูมิประมาณ 25°C ระบบบำบัดของโรงงานมีการแยกน้ำเสียออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเข้าสู่ระบบยูเอเอสบี อีกส่วนหนึ่งจะเข้าสู่กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification Tank, DN) ของระบบบำบัดแอกติเวเต็ดสลัดจ์ มีบ่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Complete Nitrification Tank, CN) และบ่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน และรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดยูเอเอสบี น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดนี้แล้วจะผ่านเข้าสู่บ่อตกตะกอน (Sedimentation tank) หลังจากนั้นจะไหลเข้าสู่ระบบบำบัดบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland) เป็นระบบบำบัดสุดท้ายก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำ

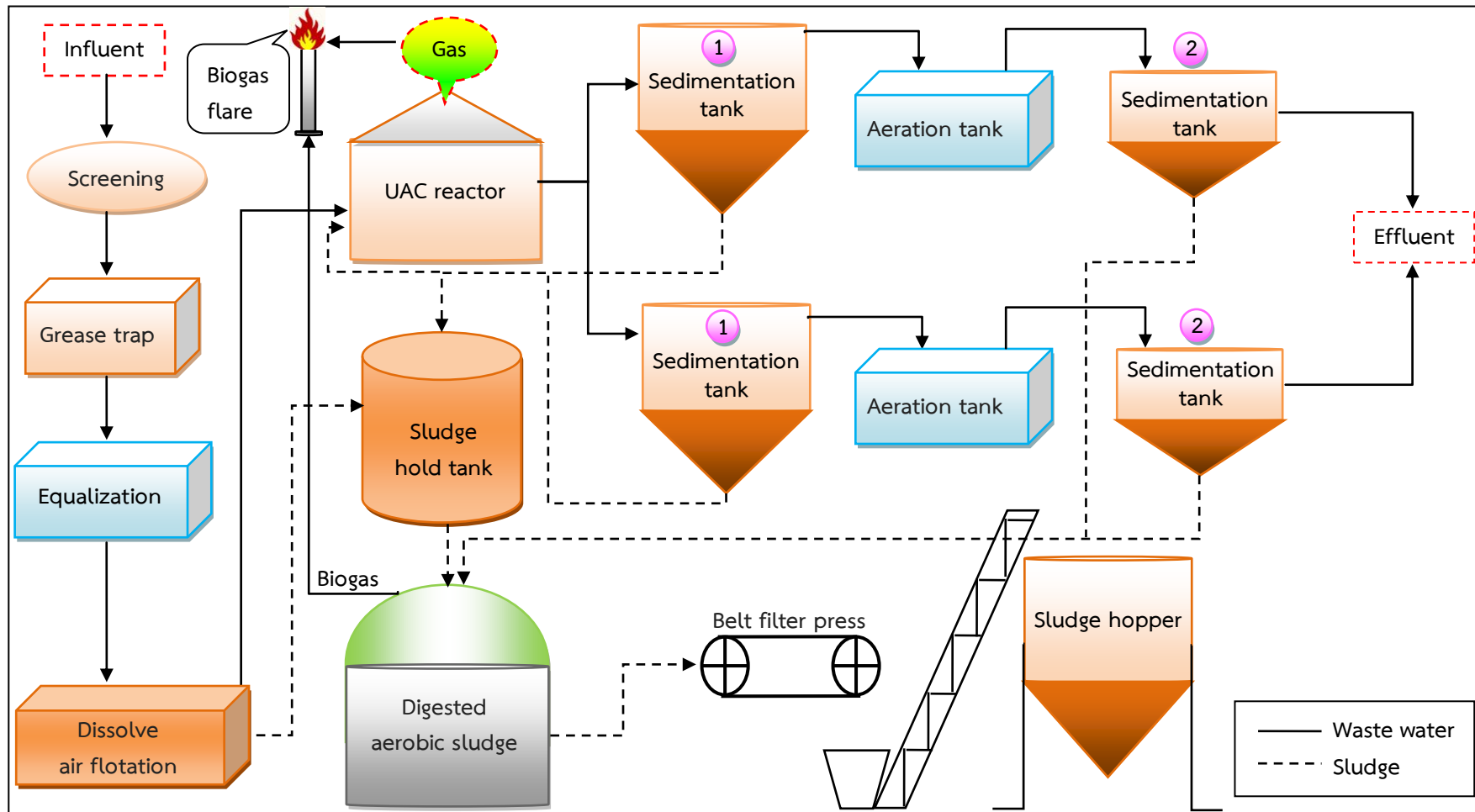
จากการศึกษาและเก็บข้อมูลระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา (รูปที่ 1.15) พบว่า มีน้ำเสียเกิดขึ้นประมาณ 2,000-3,000 m<sup>3</sup>/d ระบบบำบัดน้ำเสียประกอบด้วยบ่อดักไขมัน (Grease trap) บ่อปรับเสถียร (Equalization Tank, EQ) ระบบตะกอนลอย (Dissolve Air Flotation, DAF) ระบบหมักไร้อากาศแบบยูเอซี (Upflow Anaerobic Contact, UAC) ถังตกตะกอน (Sedimentation tank) ถังเติมอากาศ (Aeration tank) ถังพักตะกอน (Sludge hold tank) ถังย่อยตะกอน (Digested aerobic sludge) เครื่องรีดตะกอน (Belt filter press) และถังเก็บตะกอน (Sludge hopper) โดยน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดมาจากกระบวนการผลิตของโรงงาน น้ำเสียทั้งหมดจะถูกรวบรวมให้ผ่านตะแกรงดักขยะและไหลลงสู่บ่อดักไขมันเพื่อลดปริมาณไขมันที่มีในน้ำเสีย จากนั้นจะไหลลงสู่บ่อปรับเสถียรเพื่อทำการปรับสภาพน้ำเสียให้มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ อุณหภูมิและพีเอชค่อนข้างคงที่ ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบตะกอนลอยเพื่อแยกไขมันออกจากน้ำเสียและเข้าสู่ระบบหมักไร้อากาศแบบ UAC ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้คือก๊าซชีวภาพ (ประมาณ 700-1,200 m<sup>3</sup>/d) แต่ก๊าซที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยไม่สามารถ

นำไปใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานได้จึงต้องทำการเผาทิ้ง หลังจากผ่านการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนแล้วน้ำเสียจะไหลเข้าถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนสลัดจ์กับน้ำออกจากกัน ส่วนที่เป็นน้ำเสียจะไหลเข้าสู่บ่อเติมอากาศเพื่อบำบัดน้ำเสียให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งด้วยระบบแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) และไหลเข้าถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนสลัดจ์กับน้ำออกจากกันและเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานก่อนที่จะปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกสู่สิ่งแวดล้อม ในส่วนของตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบตะกอนลอยและถังตกตะกอนชุดแรกจะไหลมารวมกันที่ถังพักตะกอน จากนั้นตะกอนจากถังพักตะกอนและถังตกตะกอนชุดที่ 2 จะไหลมารวมกันที่ถังย่อยตะกอน ตะกอนที่ผ่านการย่อยแล้วจะส่งต่อไปยังเครื่องรีดตะกอนเพื่อบีบน้ำออกจากตะกอนก่อนจะนำตะกอนไปกำจัดต่อไป



รูปที่ 1.14 ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง  
ที่มา: วรินยุพา บุญยรัตพันธ์ (2551)





รูปที่ 1.15 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา

### 1.2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Beatriz *et al.* (2012) ศึกษาศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทนและลักษณะทางโครงสร้างของเซลล์ในการเติมของเสียประเภทผักเพื่อปรับปรุงการย่อยสลายของมูลสัตว์ด้วยระบบ CSRT ปริมาตรใช้งาน 5 l ที่อุณหภูมิ 37°C อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 0.4 และ 0.6 g VS/l.d ที่ระยะเวลาพักเก็บ 25 และ 15 วัน ตามลำดับ พบว่าเมื่อเติมของเสียจากผักในการหมักร่วมกับมูลสัตว์ พบว่าศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทนเท่ากับ 277 และ 285 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>added</sub> ซึ่งเพิ่มขึ้น 3 และ 4 เท่า ที่ระยะเวลากักเก็บ 25 และ 15 วัน ตามลำดับ และเมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์กลุ่มลิกโนเซลลูโลสแต่ไม่สมบูรณ์ และพบว่าการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์กลุ่ม cocci และ rods หลังจากดำเนินการหมักไปแล้ว 120 วัน

Jia *et al.* (2011) ศึกษาผลของอัตราส่วนวัสดุหมักร่วมระหว่างของเสียจากผักและผลไม้กับเศษอาหารภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนของประเทศจีน จากการศึกษาศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทน (BMP) ของผักและผลไม้และเศษอาหารโดยใช้ปริมาตรขวดหมัก 500 ml ที่อุณหภูมิ 35°C กวนผสมที่ 50 รอบต่อนาที เท่ากับ 0.30 และ 0.56 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS ส่วนความสามารถในการย่อยสลายเท่ากับ 59.3 และ 83.6% ตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองด้วยระบบ CSTR ปริมาตรใช้งาน 4 l ที่อุณหภูมิ 35°C กวนผสมที่ 120 รอบต่อนาที อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 3 kg VS/m<sup>3</sup>.d พบว่าของเสียจากผักและผลไม้มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 2.17 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.d และมีศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.42 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS ส่วนการทดลองโดยใช้เศษอาหารเกิดการล้มเหลวของระบบเนื่องจากภายในระบบมีสภาวะเป็นกรด ดังนั้นจึงได้ทำการหมักร่วมระหว่างของเสียจากผักและผลไม้กับเศษอาหารที่อัตราส่วน 2:1 และ 1:1 ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์เดียวกัน พบว่าที่อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1 มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.49 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS และประสิทธิภาพในการบำบัด VS และ SCOD เท่ากับ 74.9 และ 96.1% ตามลำดับ

Poh and Chong (2010) ได้ทำการศึกษาศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทนของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ปริมาตรใช้งาน 2 l กวนผสมที่ 100 รอบต่อนาที ที่สภาวะเทอร์โมฟิลิก ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 55°C ที่ระยะเวลากักเก็บ 6 วัน ทำการศึกษาความเข้มข้นของ MLSS ที่ระดับต่างๆ พบว่าที่ความเข้มข้นของ MLSS 14,000 mg/l มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ถึง 90% โดยองค์ประกอบของก๊าซมีเทนที่ได้ 64%

Budiyono *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษารายย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนของการเปลี่ยนของเสียอินทรีย์ให้อยู่ในรูปก๊าซชีวภาพและได้ผลิตภัณฑ์ที่เสถียรสำหรับประยุกต์ใช้กับดิน โดยไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณของ TS ต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลวัวที่ใช้เชื้อจากของเหลือของกระเพาะสัตว์ ชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการใช้ถังหมักปริมาตร 400 ml ใช้วิธีการเดินระบบแบบ Batch เติมมูลวัวสดปริมาณ 100 g ในแต่ละถังผสมกับของเหลือจากกระเพาะสัตว์ 50 ml โดยปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น และทำการทดลอง 6 ชุด ในแต่ละชุดการทดลองมี TS แตกต่างกันคือ 2.6, 4.6, 6.2, 7.4, 9.2, 12.3 และ 18.4% จากการศึกษาพบว่า ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นดีที่สุดที่ปริมาณ TS เท่ากับ 7.4 และ 9.2% โดยเกิดก๊าซชีวภาพ 184.09 และ 186.28 ml/g VS ตามลำดับ หลังจากดำเนินการทดลองระยะเวลา 90 วัน

Hamed and Ruihong (2010) ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) ของการหมักร่วมระหว่างมูลวัวกับเศษอาหาร ที่สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยระบบหมักแบบ Batch ปริมาตรขวดหมัก 500 ml ทำการเขย่าวันละครั้งก่อนวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ที่อุณหภูมิ 35°C โดยทำการทดลอง 2 อัตราส่วนคือ 32/68 และ 48/52 (%มูลวัว/%เศษอาหาร) ตามลำดับ โดยกำหนด VS ของระบบเท่ากับ 3 g VS/L จากผลการทดลองพบว่าศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 531 L/kg VS และ 311 L CH<sub>4</sub>/kg VS<sub>added</sub> ที่อัตราส่วน 48/52 มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน 58.7% และมีประสิทธิภาพในการบำบัด VS เท่ากับ 68%

Paepatung *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาศักยภาพของมีเทนจากวัสดุชีวภาพสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ วัสดุที่ใช้ได้แก่ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (แกลบ) ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม 4 ชนิด คือ กากมันสำปะหลัง เปลือกสับประรด ตะกอนดีแคเนเตอร์ และทะลายปาล์มเปล่า และวัชพืช 2 ชนิด คือ กกและผักตบชวา จากการศึกษาวัสดุที่ใช้สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมีความแตกต่างกัน โดยอัตราการเกิดก๊าซมีเทนสูงสุดเปรียบเทียบระหว่างขนาดและการย่อยสลายของวัสดุแต่ละชนิดพบว่า เปลือกสับประรด กากมันสำปะหลัง ตะกอนดีแคเนเตอร์ ทะลายปาล์มเปล่า กก ผักตบชวา และแกลบเกิดขึ้น 36.77, 36.57, 32.86, 13.48, 11.63, 11.57 และ 10.98 ml CH<sub>4</sub>/d ค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติในการย่อยสลายของวัสดุตั้งต้นที่ประกอบด้วยองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส จากการศึกษาทดลองในการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดดำเนินการโดยใช้เวลามากกว่า 90 วัน

Raposo *et al.* (2008) ศึกษาศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทน (BMP) ของตะกอนจากโรงงานสกัดน้ำมันจากดอกทานตะวัน ที่สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยระบบหมักแบบ Batch ปริมาตรขวดหมัก 250 ml กวนผสมที่ 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35°C โดยทำการทดลอง 6 ชุดการทดลอง อัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้น (ISRs) ที่ 3.0, 2.0, 1.5, 1.0, 0.8 และ 0.5 ตามลำดับ โดยกำหนด VS ของระบบเท่ากับ 15 g VS/L จากผลการทดลองพบว่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 227 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>added</sub> ที่อัตราส่วน 3.0 ความสามารถในการย่อยสลาย 86% และมีประสิทธิภาพในการบำบัด VS เท่ากับ 66%

Raposo *et al.* (2006) ศึกษาศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทน (BMP) ของซังข้าวโพด ที่สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยระบบหมักแบบ Batch ปริมาตรขวดหมัก 5 l กวนผสมที่ 40 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35°C โดยทำการทดลอง 4 ชุดการทดลอง อัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้น (ISRs) ที่ 3, 2, 1.5 และ 1 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 211 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>added</sub> ที่อัตราส่วน 1 โดยมีค่า VS ของระบบเท่ากับ 15 g VS/L และมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD เท่ากับ 78%

นิลวรรณและพฤกษ์ (2552) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ของการใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบถังกวนต่อเนื่อง (CSTR) ขนาด 1 m<sup>3</sup> ในสถานะเทอร์โมฟิลิกเพื่อบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 55°C โดยควบคุมน้ำเสียตั้งต้นให้มีสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) 2% โดยน้ำหนัก ทำการทดลองที่ระยะเวลาพักเก็บ 4 และ 6 วัน ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาพักเก็บ 4 วัน มีประสิทธิภาพการย่อยสลายได้ 84% ที่อัตราการบรรเทาทุกสารอินทรีย์ 4.8 kg/m<sup>3</sup>.d สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เฉลี่ย 1,006 V/d โดยองค์ประกอบ

ของก๊าซมีเทนที่ได้เฉลี่ย 65% และการใช้อุณหภูมิสูงมีประสิทธิภาพในการหมักย่อยสูงกว่าเมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบอื่น

Bouskova *et al.* (2005) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสภาวะมีโซฟิลิก (37°C) เป็นเทอร์โมฟิลิก (55°C) ในการบำบัดตะกอนสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบหมักแบบ CSTR ปริมาตร 2.6 l อัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 1.38 g VS/l<sub>reactor</sub>·d ที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 วัน พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสภาวะมีโซฟิลิกเป็นเทอร์โมฟิลิกทำให้ระยะเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่เร็วขึ้นจาก 70 วัน เป็น 30 วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 37 และ 55°C เท่ากับ 1,420 และ 1,740 ml/d ตามลำดับ และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 32 และ 65% ที่อุณหภูมิ 37 และ 55°C ตามลำดับ

### 1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.3.2 เพื่อศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

1.3.3 เพื่อศึกษาระยะเวลากการกวนผสมที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากการนำน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

1.4.2 ทราบถึงระยะเวลากักเก็บและการกวนผสมที่เหมาะสมต่อระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจนด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

1.4.3 ทราบถึงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเกิดก๊าซชีวภาพจากการใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

1.4.4 เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนให้เกิดประโยชน์และคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

1.4.5 เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งที่มีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ในระยะยาว

## บทที่ 2

### วิธีการวิจัย

#### 2.1 วิธีการดำเนินการ

##### 2.1.1 วัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง

##### 1) น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง

น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียที่ได้จากบ่อปรับเสถียรของระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา (รูปที่ 2.1) โดยผลิตภัณฑ์หลักของโรงงานคือ ผลิตภัณฑ์ส่งออกปลาทูน่ากระป๋อง อาหารสัตว์ และปลาทูน่าเพิ่มมูลค่า

##### 2) ตะกอนดีแคนเตอร์ (Decanter cake)

วัสดุหมักที่ใช้เป็นตะกอนจากเครื่องดีแคนเตอร์ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดแยกน้ำมันจากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มในจังหวัดกระบี่ (รูปที่ 2.2)

##### 3) เชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง

เชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา (รูปที่ 2.3) เป็นเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Upflow Anaerobic Contact (UAC)



รูปที่ 2.1 น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา



รูปที่ 2.2 ตะกอนดีแคเตอร์จากโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มในจังหวัดกระบี่

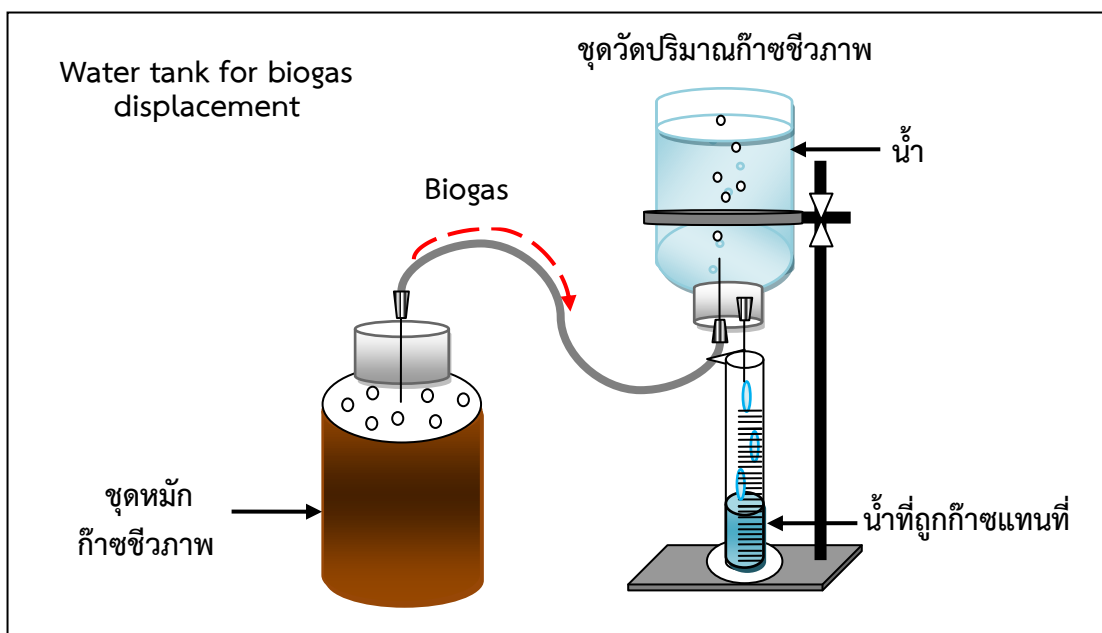


รูปที่ 2.3 เชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งในจังหวัดสงขลา

## 2.1.2 ระบบที่ใช้ในการทดลอง

### 1) การทดลองที่ 1

ในการทดลองที่ 1 เป็นการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพระหว่างวัสดุหมักรวมทั้ง 2 ชนิดคือ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งและตะกอนดีแคแเตอร์ด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจน ในการหาอัตราส่วนทำการทดลองโดยเดินระบบแบบ Batch ซึ่งประกอบด้วยชุดหมักก๊าซชีวภาพมีปริมาตร 250 ml และชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ดำเนินการทดลองใน Incubator shaker โดยควบคุมอุณหภูมิที่  $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$  และทำงานที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ตลอดการทดลอง ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกระบายออกจากขวดหมักมาแทนที่น้ำที่อยู่ในขวดเป็นการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 แบบจำลองระบบหมักแบบ Batch และวิธีการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

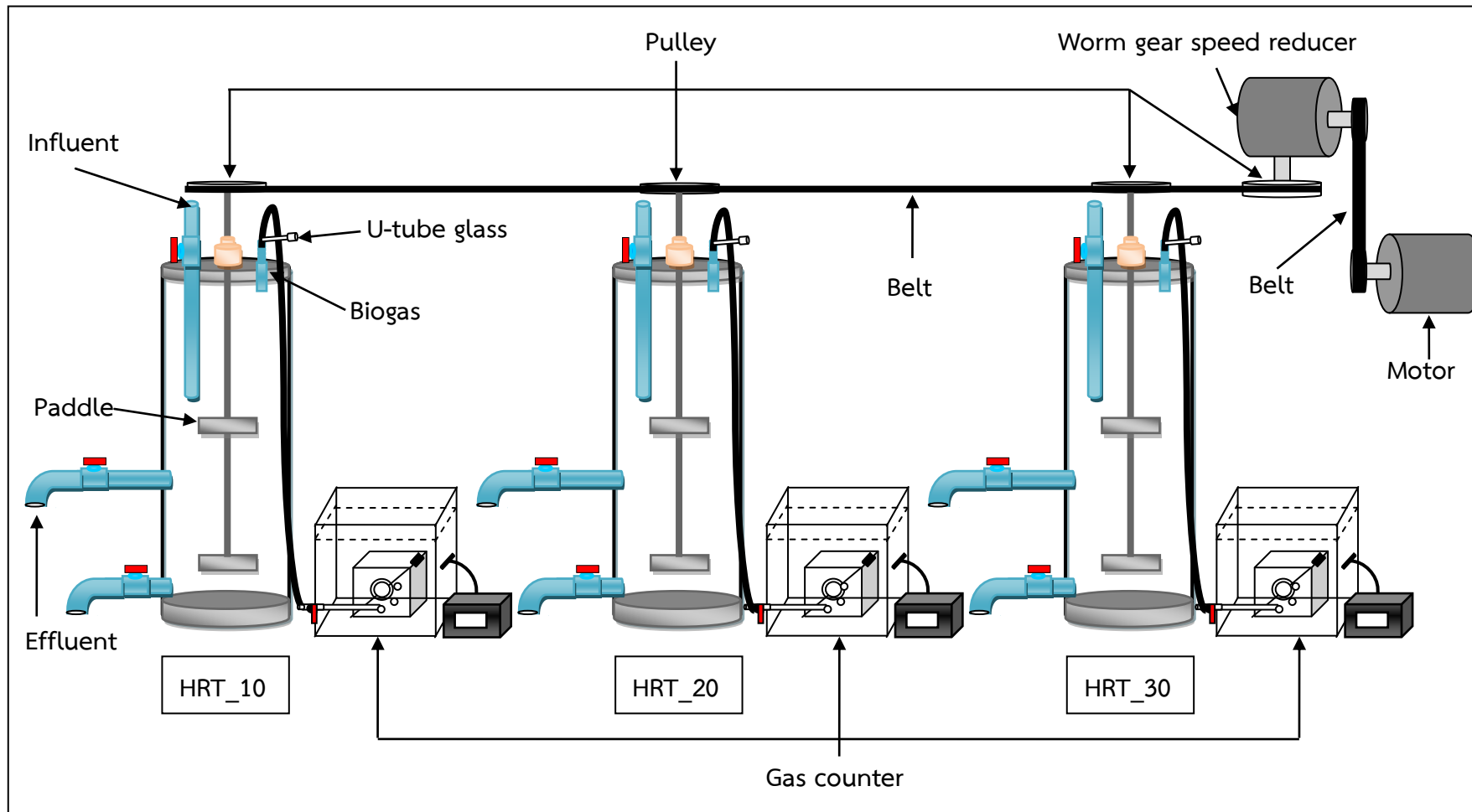
## 2) การทดลองที่ 2

ในการทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวโดยใช้แบบจำลองระดับ Lab-scale (รูปที่ 2.5-2.7) โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) (รูปที่ 2.8) และใช้ระยะเวลาในการกวนผสม 24 ชั่วโมง ส่วนประกอบของระบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

### - ถังปฏิกรณ์

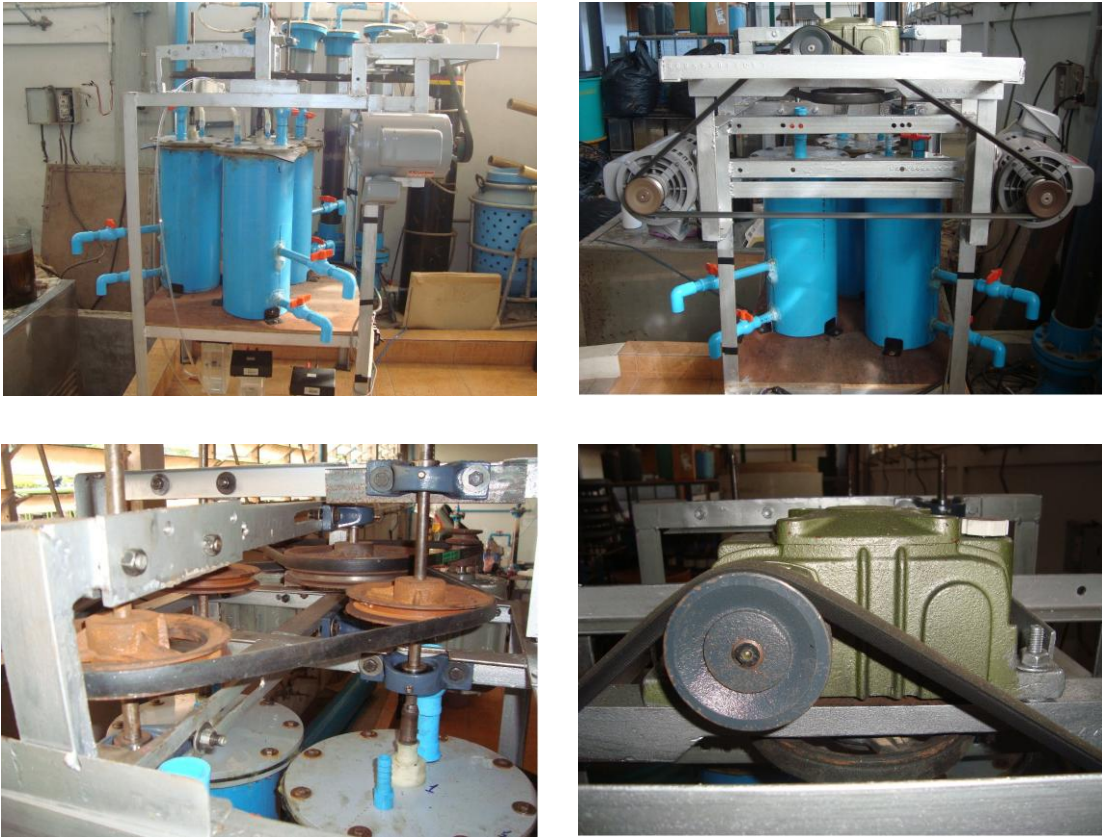
ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ทำจาก PVC จำนวน 3 ถัง ด้านบนและล่างปิดด้วยแผ่น PVC ยึดติดกับตัวถังด้วยน็อต และมีประเก็นยางเพื่อป้องกันการรั่วซึม ลักษณะของถังปฏิกรณ์เป็นทรงกระบอกสูง 50 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 17.5 cm ขนาด 12 l (ความจุปริมาตรในการทดลอง 10 l) ระยะ Free board ด้านบนเท่ากับ 8 cm ระบบถังประกอบด้วย ด้านบนมีช่องเติมตัวอย่างเข้าระบบ (Influent) โดยใช้ท่อ PVC ขนาด 3/4" มีความยาวท่อประมาณ 50 cm มีวาล์วเปิด-ปิดได้ และท่อระบายก๊าซจากถังปฏิกรณ์ไปยังชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทำจาก PVC ขนาด 1/2" ด้านข้างมีช่องเก็บตัวอย่างออกจากระบบ (Effluent) โดยใช้ท่อ PVC ขนาด 3/4" มีวาล์วเปิด-ปิดได้ ติดตั้งอุปกรณ์กวนประกอบด้วยใบพัด (ลักษณะใบกวนมีใบพัดทั้งหมด 4 ใบ) และเพลลาทำจากสแตนเลสตีลส่งกำลังด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1.5 แรงม้า จำนวน 2 ตัว ประกอบเข้ากับชุดเกียร์ทดรอบโดยปรับให้มีความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง เป็นถังปฏิกรณ์แบบอัตราสูงที่มีการกวนผสมอย่างทั่วถึงภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion, AD) เดินระบบแบบต่อเนื่อง มีหลอดแก้วรูปตัวยู (U-tube glass) (รูปที่ 2.9) เพื่อใช้เป็นจุดเก็บก๊าซแล้วนำไปทดสอบหาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกระบายออกจากถังปฏิกรณ์มาแทนที่น้ำเพื่อหาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน





รูปที่ 2.5 แบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) ในห้องปฏิบัติการ





รูปที่ 2.8 ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor)



รูปที่ 2.9 หลอดแก้วรูปตัวยู (U-tube glass) ใช้เก็บก๊าซชีวภาพ

#### - ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter)

ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซ เป็นอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบวงจรรับจำนวนรอบ (Guendouz *et al.*, 2010) โดยชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพจำนวน 3 ชุด ประกอบด้วย อุปกรณ์นับจำนวนรอบ (Electromagnetic counter) ต่อเข้ากับชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการแทนที่น้ำซึ่งมีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมทำจากอะคริลิก ขนาด 10×20×25 cm โดยรักษาระดับน้ำไว้ที่ 20 cm ตลอดการทดลองเพื่อรักษาความดันภายในถังปฏิกรณ์ให้คงที่ ภายในกล่องทรงสี่เหลี่ยมจะมีแกนหมุนและกล่องสี่เหลี่ยมเล็กขนาด 4×8×8 cm ภายในแบ่งครึ่งมีลักษณะเป็นทรง

สามเหลี่ยมเปิด 2 ส่วนเท่ากัน เป็นตัวเก็บก๊าซ (รูปที่ 2.10) เมื่อก๊าซชีวภาพถูกดันตามสายนำก๊าซเข้าไปที่ช่องปล่อยก๊าซและเข้าสู่กล่องสามเหลี่ยมด้านที่คว่ำทับช่องปล่อยก๊าซนี้จนถึงปริมาตรหนึ่งที่มีความดันก๊าซสูงจนเอาชนะน้ำหนักถ่วงได้ก็จะดันให้กล่องพลิกและกล่องสามเหลี่ยมอีกด้านจะคว่ำทับช่องปล่อยก๊าซแทน ขณะที่กล่องถูกดันเพื่อปล่อยก๊าซออกจากกล่องเก็บก๊าซนั้น แม่เหล็กที่ติดอยู่ที่ตัวกล่องเก็บก๊าซจะเคลื่อนที่ผ่านเครื่องตรวจจับสัญญาณแม่เหล็กที่ติดไว้ที่ข้างกล่องตัวนอกและส่งสัญญาณไปที่อุปกรณ์นับจำนวนรอบและบันทึกเป็น 1 รอบ และเกิดซ้ำๆ ตามปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น จากนั้นนำจำนวนรอบที่ได้มาคำนวณเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 2.10 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter)

### 3) การทดลองที่ 3

ในการทดลองที่ 3 เป็นการทดลองเพื่อหาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมในการเดินระบบด้วยน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งผสมร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแบบจำลองระดับ Lab-scale (รูปที่ 2.5-2.7) โดยการเดินทางระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) (รูปที่ 2.8) และใช้ระยะเวลาในการกวนผสม 24 ชั่วโมง

### 4) การทดลองที่ 4

ในการทดลองที่ 4 เป็นการทดลองเพื่อหาระยะเวลาการกวนที่เหมาะสมในการเดินระบบด้วยน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งผสมร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มแบบจำลองระดับ Lab-scale (รูปที่ 2.5-2.7) โดยการเดินทางระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) (รูปที่ 2.8) และใช้ระยะเวลาในการกวนผสม 12 ชั่วโมง

### 2.1.3 การทดสอบระบบถังปฏิกรณ์

ในการทดลองระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน การตรวจสอบรอยรั่วของระบบถังปฏิกรณ์เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากระบบนี้มีความจำเป็นที่ระบบจะต้องเป็นระบบปิดอย่างแท้จริง มิฉะนั้นแล้วจะทำให้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรั่วซึมออกมาตามรอยรั่วต่างๆได้ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีแรงดันไม่มากพอที่จะแทนที่น้ำในระบบวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ในการทดสอบระบบสามารถทำได้ด้วยการเติมน้ำเข้าไปในถังปฏิกรณ์ให้ระดับน้ำอยู่สูงกว่ารอยต่อต่างๆ แล้วสังเกตการรั่วซึมจากทุกด้าน ส่วนการทดสอบการรั่วซึมของก๊าซชีวภาพดำเนินการทดสอบโดยใช้น้ำยาล้างจานทาบริเวณโดยรอบของรอยต่อทุกจุด แล้วเป่าลมเข้าถังปฏิกรณ์ หากมีฟองอากาศเกิดขึ้นตรงจุดใดต้องทำการอุดรอยรั่วด้วยกาวซิลิโคนและกาวร้อน

### 2.1.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้หมัก

วัสดุหมักที่ใช้ในการทดลองดำเนินการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นก่อนทำการหมัก เพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้หมักก่อน โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสียตะกอนดีแคนเตอร์และหัวเชื้อจุลินทรีย์คือ พีเอช, TCOD, SCOD, Alkalinity, VFA, TS, VS, NH<sub>3</sub>-N และ TKN ส่วนค่า Moisture, C, N และ C/N จะวิเคราะห์เฉพาะในตะกอนดีแคนเตอร์ และค่า MLVSS จะวิเคราะห์เฉพาะในตะกอนจุลินทรีย์ (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้หมัก

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
ค่าพีเอช* (pH)	pH meter	APHA, AWWA and WEF (2005), ดัดแปลงจากคู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช (จำเป็น อ่อนทอง, 2547)***
ซีโอดีทั้งหมด** (TCOD)	Close reflux, Titrimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
ซีโอดีละลายน้ำ** (SCOD)	Close reflux, Titrimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)	Direct Titration Method	สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทยและ World Environmental Center (2535)
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA)	Direct Titration Method	สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทยและ World Environmental Center (2535)
ของแข็งทั้งหมด (TS)	อบในเตาอบ 103-105°C	APHA, AWWA and WEF (2005)
ของแข็งระเหยได้ (VS)	เผาที่อุณหภูมิ 550°C	APHA, AWWA and WEF (2005)
แอมโมเนียไนโตรเจน** (NH <sub>3</sub> -N)	Titrimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
ทีเคเอ็น** (TKN)	Macro-kjeldahl Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
ความชื้น (Moisture)	Gravimetric Method	เทคนิคการวิเคราะห์น้ำ น้ำเสียและขยะ มูลฝอย (อุดมผล พีชนิไพบูลย์, 2551)***
อินทรีย์คาร์บอน (C)	Walkley & Black Method	ดัดแปลงจากคู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช (จำเป็น อ่อนทอง, 2547)***
ไนโตรเจน (N)	Macro-kjeldahl Method	ดัดแปลงจากคู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช (จำเป็น อ่อนทอง, 2547)***
อัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจน (C/N)	การคำนวณ	-
MLVSS	Gravimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2005)

หมายเหตุ : \* ตัวอย่างตะกอนดีแคแเตอร์ผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนตะกอนดีแคแเตอร์ 5 g ต่อ  
น้ำกลั่น 25 ml ก่อนตรวจวัด

\*\* ตัวอย่างตะกอนดีแคแเตอร์ผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนตะกอนดีแคแเตอร์ 1 g ต่อ  
น้ำกลั่น 100 ml ก่อนตรวจวัด

\*\*\* วิธีการวิเคราะห์อยู่ในภาคผนวก ก

### 2.1.5 ชุดการทดลอง

การทดลองมีการนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์มคือ ตะกอนดีแคนเตอร์ มาใช้ประโยชน์โดยการหมักร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง ด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจน แบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ดังนี้

#### 1) ชุดการทดลองที่ 1

**วัตถุประสงค์** เพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

โดยทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพระหว่างวัสดุหมักร่วมทั้ง 2 ชนิดคือ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งและตะกอนดีแคนเตอร์ด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจน ในการหาอัตราส่วนทำการทดลองโดยเดินระบบแบบ Batch ซึ่งระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนประกอบด้วย ชุดหมักก๊าซชีวภาพมีปริมาตร 250 ml โดยมีวัสดุหมักร่วมคือ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งและตะกอนดีแคนเตอร์ของอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มและชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ดำเนินการทดลองใน Incubator shaker โดยควบคุมอุณหภูมิที่  $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$  และทำงานที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ตลอดการทดลอง (ดัดแปลงจาก Bishop, 2010) ทำการทดลองทั้งหมด 6 ชุด โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง ปริมาณ 180 ml หมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ปริมาณ 0, 2, 5, 8, 10 และ 20  $\text{g}_{\text{wet}}$  ที่อัตราส่วน 180W:0DC, 180W:2DC, 180W:5DC, 180W:8DC, 180W:10DC และ 180W:20DC ตามลำดับ (ตารางที่ 2.2) ปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.8-7.2 (Rajeshwari *et al.*, 2000 อ้างถึงใน Budiyono *et al.*, 2010) ด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) 5% (Roposo *et al.*, 2006) จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุผสม โดยจะบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันจนสิ้นสุดปฏิกิริยา คือ มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อยกว่า 5 ml/d (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551) จึงดำเนินการหยุดระบบและนำชุดหมักมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ อย่างละ 2 ชั่วโมง (ตารางที่ 2.4) และทำการเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซทุกๆ 7 วัน ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกระบายออกจากขวดหมักมาแทนที่น้ำที่อยู่ในขวดเป็นการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ (Budiyono *et al.*, 2010 และ Guangxue *et al.*, 2009) (รูปที่ 2.4)

#### 2) ชุดการทดลองที่ 2

**วัตถุประสงค์** เพื่อศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนโดยเติมน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว ด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

โดยในการทดลองใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 3 ถัง วัสดุหมักที่ใช้คือ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง ทำการเดินระบบที่ระยะเวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน ในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง (ตารางที่ 2.3) ทำการเดินระบบด้วยถัง

ปฏิกรณ์แบบ CSTR จากนั้นทำการป้อนวัสดุหมักเข้าระบบทุกวัน โดยทำการป้อนวัสดุหมักเข้าระบบเพียงครั้งเดียวในหนึ่งวัน ที่ระยะเวลาพักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน จะทำการป้อนวัสดุหมักเข้าระบบวันละ 1, 0.5 และ 0.33 l ตามลำดับ ดำเนินการทดลองภายใต้อุณหภูมิห้อง ทำการเก็บตัวอย่างออกจากระบบทุก 3 วัน เพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันและเก็บก๊าซชีวภาพทุก 2 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) (ตารางที่ 2.5) ดำเนินการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ทั้ง 3 ถึงปฏิกรณ์จึงเปลี่ยนเป็นชุดการทดลองที่ 3

### 3) ชุดการทดลองที่ 3

**วัตถุประสงค์** เพื่อศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนโดยเติมวัสดุหมักร่วมคือ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งและตะกอนดีแคเนเตอร์ ด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

โดยในการทดลองจะใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 3 ถัง วัสดุหมักที่ใช้คือ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งและตะกอนดีแคเนเตอร์ ทำการเดินระบบที่ระยะเวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน ในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง (ตารางที่ 2.3) ทำการเดินระบบโดยการนำอัตราส่วนผสมที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (methane yield, l CH<sub>4</sub>/g TCOD<sub>removal</sub>) สูงสุดในชุดการทดลองที่ 1 มาใช้ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง เติมวัสดุหมักร่วมในอัตราส่วนที่ต้องการโดยการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR จากนั้นทำการป้อนวัสดุหมักเข้าระบบทุกวัน โดยทำการป้อนวัสดุหมักเข้าระบบเพียงครั้งเดียวในหนึ่งวัน ที่ระยะเวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน จะทำการป้อนวัสดุหมักเข้าระบบวันละ 1, 0.5 และ 0.33 l ตามลำดับ ดำเนินการทดลองภายใต้อุณหภูมิห้อง ทำการเก็บตัวอย่างออกจากระบบทุก 3 วัน เพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันและเก็บก๊าซชีวภาพทุก 2 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) (ตารางที่ 2.5) ดำเนินการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ทั้ง 3 ถึงปฏิกรณ์จึงเปลี่ยนเป็นชุดการทดลองที่ 4

### 4) ชุดการทดลองที่ 4

**วัตถุประสงค์** เพื่อศึกษาระยะเวลาการกวนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนโดยเติมวัสดุหมักร่วมคือ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งและตะกอนดีแคเนเตอร์ ด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

โดยในการทดลองจะใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 3 ถัง วัสดุหมักที่ใช้คือ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งและตะกอนดีแคเนเตอร์ ทำการเดินระบบที่ระยะเวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน ในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาการกวน 24 และ 12 ชั่วโมง (ตารางที่ 2.3) ทำการเดินระบบด้วยการนำอัตราส่วนผสมที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดในชุดการทดลองที่ 1 มาใช้ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง เติมวัสดุหมักร่วมในอัตราส่วนที่ต้องการโดยการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR จากนั้นทำการป้อนวัสดุหมักเข้าระบบทุกวัน โดยทำการป้อนวัสดุหมักเข้า



ระบบเพียงครั้งเดียวในหนึ่งวัน ที่ระยะเวลาเก็บ 10, 20 และ 30 วัน จะทำการป้อนวัสดุหมักเข้าระบบวันละ 1, 0.5 และ 0.33 l ตามลำดับ ดำเนินการทดลองภายใต้อุณหภูมิห้อง ทำการเก็บตัวอย่างออกจากระบบทุก 3 วัน เพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันและเก็บก๊าซชีวภาพทุก 2 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) (ตารางที่ 2.5) ดำเนินการทดลองจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ทั้ง 3 ถึงปฏิบัติการจึงหยุดระบบการทดลอง

ตารางที่ 2.2 วัสดุผสมและอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

วัสดุหมัก	อัตราส่วน					
	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC
น้ำเสีย (ml)	180	180	180	180	180	180
ตะกอนดีแคเนเตอร์ (g <sub>wet</sub> )	0	2	5	8	10	20

ตารางที่ 2.3 วัสดุผสมและอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว และการหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคเนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง

การทดลอง ที่	วัสดุที่ใช้หมักในแต่ละวัน		ระยะเวลาเก็บ (วัน)	ระยะเวลาการกวน (ชั่วโมง)
	ตะกอนดีแคเนเตอร์ (g <sub>wet</sub> )	น้ำเสีย (ml)		
2	0	1,000	10	24
	0	500	20	
	0	330	30	
3	52.6	947.4	10	24
	26.3	473.7	20	
	17.4	312.6	30	
4	52.6	947.4	10	24
	26.3	473.7	20	
	17.4	312.6	30	
	52.6	947.4	10	12
	26.3	473.7	20	
	17.4	312.6	30	

### 2.1.6 การเริ่มต้นระบบ (Start up)

ทำการเดินระบบด้วยการเติมเชื้อตั้งต้นปริมาณ 30% ของปริมาตรใช้งาน (10 l) ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ ซึ่งอารียา วิรัชวรกุล (2546) อ้างถึง Hobson and Wheatly (1993) ได้แนะนำว่าควรใส่ตะกอนจุลินทรีย์ในปริมาณที่ไม่น้อยกว่า 10% ของปริมาตรการหมัก โดยในการทดลองใช้ตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 3 l ซึ่งการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ในปริมาณมากเป็นเชื้อเริ่มต้น จะทำให้การดำเนินการของระบบเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว จากนั้นทำการเติมน้ำเสียเข้าระบบวันละ 1 ครั้ง โดยจะเติมน้ำเสียเข้าระบบทีละน้อยและค่อยๆ เพิ่มปริมาณน้ำเสียเข้าระบบ เพื่อปรับสภาพให้เชื้อตะกอนจุลินทรีย์เกิดความคุ้นเคยกับน้ำเสียที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงปริมาตรใช้งานซึ่งใช้เวลาในการป้อนน้ำเสีย 8 วัน หลังจากนั้นทำการเติมน้ำเสียเข้าเท่ากับปริมาตรที่ถ่ายออกจากระบบปริมาณ 150 ml คิดเป็นระยะเวลาที่เก็บ 67 วัน ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ และจดบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน เมื่อก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่คือ มีค่าคงที่หรือใกล้เคียงกัน (อารียา วิรัชวรกุล, 2546) ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ จึงเปลี่ยนเป็นระยะเวลาที่เก็บที่ต้องการศึกษาในการทดลองที่ 2

### 2.1.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองชุดที่ 1 และส่วนที่ 2 เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองชุดที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

### 2.1.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกวัดปริมาตรโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ และทำการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) โดยทำการเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุก 2 วัน และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) รุ่น GC7890A (Agilent Technology, USA) ใช้ตัววัดสัญญาณแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD) คอลัมน์ที่ใช้คือ Packed column (Shincarbon Restek 19808) ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็น carrier gas ที่อัตราการไหล 20 ml/min อุณหภูมิของ Injection inlet Oven และ Detector เท่ากับ 100, 100 และ 200°C ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

**ตารางที่ 2.4** พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง ผสมกับตะกอนดีแคนเตอร์ก่อนและหลังการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
ค่าพีเอช (pH)	pH meter	APHA, AWWA and WEF (2005)
ซีโอดีทั้งหมด (Total Chemical Oxygen Demand, TCOD)	Close reflux, Titrimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
ซีโอดีละลายน้ำ (Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD)	Close reflux, Titrimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)	Direct Titration Method	สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทยและ World Environmental Center (2535)
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA)	Direct Titration Method	สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทยและ World Environmental Center (2535)
ของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS)	อบในเตาอบ 103-105°C	APHA, AWWA and WEF (2005)
ของแข็งระเหยได้ (Volatile Solid, VS)	เผาที่อุณหภูมิ 550°C	APHA, AWWA and WEF (2005)
แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen, NH <sub>3</sub> -N)	Titrimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)	Macro-kjeldahl Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (Compound of biogas)	Gas Chromatography (TCD detector)	APHA, AWWA and WEF (2005)

ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสียเข้าและออกจากระบบในการทดลองหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวและการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง

พารามิเตอร์	ความถี่	วิธีการวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
ค่าพีเอช (pH)	ทุกวัน	pH meter	APHA, AWWA and WEF (2005)
ซีโอดีทั้งหมด* (Total Chemical Oxygen Demand, TCOD)	3 วัน/ครั้ง	Close reflux, Titrimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
ซีโอดีผ่านการตกตะกอน** (Settleable Chemical Oxygen Demand, COD <sub>Settle</sub> )	3 วัน/ครั้ง	Close reflux, Titrimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)	3 วัน/ครั้ง	Direct Titration Method	สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทยและ World Environmental Center (2535)
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA)	3 วัน/ครั้ง	Direct Titration Method	สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทยและ World Environmental Center (2535)
ของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS)	3 วัน/ครั้ง	อบในเตาอบ 103-105°C	APHA, AWWA and WEF (2005)
ของแข็งระเหยได้ (Volatile Solid, VS)	3 วัน/ครั้ง	เผาที่อุณหภูมิ 550°C	APHA, AWWA and WEF (2005)
แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen, NH <sub>3</sub> -N)	6 วัน/ครั้ง	Titrimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)	6 วัน/ครั้ง	Macro-kjeldahl Method	APHA, AWWA and WEF (2005)
อุณหภูมิ (Temperature)	ทุกวัน	Thermometer	-
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (Biogas)	ทุกวัน	การแทนที่น้ำ	Budiyono <i>et al.</i> , 2010
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (Compound of biogas)	2 วัน/ครั้ง	GC (TCD detector)	APHA, AWWA and WEF (2005)

หมายเหตุ: \* วิเคราะห์ COD เข้าระบบ, \*\* ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ 15 นาที ก่อนวิเคราะห์ COD ออกจากระบบ

### 2.1.9 การคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

#### 1) BMP

การคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1

$$\text{Methane yield} \left[ \frac{\text{l CH}_4}{\text{g TCOD}_{\text{removal}}} \right] = \frac{\text{Cumulative methane (l)}}{\text{TCOD}_{\text{input}} - \text{TCOD}_{\text{output}} (\text{g})} \quad (2.1)$$

#### 2) CSTR

การคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.2

$$\text{Methane yield} \left[ \frac{\text{l CH}_4}{\text{g TCOD}_{\text{added}}} \right] = \frac{\text{Total biogas production (l/d)} \times \% \text{CH}_4}{\text{TCOD}_{\text{inf}} (\text{g/l}) \times Q (\text{l/d})} \quad (2.2)$$

### 2.1.10 การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 1) สถิติเชิงพรรณนา

ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

#### 2) สถิติเชิงวิเคราะห์

ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองโดยใช้ One-Way ANOVA

### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 3.1 คุณสมบัติของวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 ตะกอนดีแคนเตอร์ (Decanter cake)

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนดีแคนเตอร์ พบว่า ตะกอนดีแคนเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นสูงถึง 76.9% (wet weight) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Yahya *et al.* (2010) Paepatung *et al.* (2009) และสินิจนันท์ เสียงเสนาะ (2553) พบว่า ค่าความชื้นที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 76.4, 76.7 และ 75.0% (wet weight) โดยตะกอนดีแคนเตอร์มีสภาพค่อนข้างเป็นกรดเนื่องจากค่าพีเอชที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยเท่ากับ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของนันท์นภัส ชันธวรพินธิชัย (2552) และเพ็ญศิริ ประชาภิตตกุล (2551) พบว่า ค่าพีเอชใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 4.0-5.8 องค์ประกอบสารอินทรีย์ซึ่งอยู่ในรูปของซีโอดีทั้งหมด (TCOD) และซีโอดีละลายน้ำ (SCOD) เฉลี่ยเท่ากับ 1,090 และ 220 g/kg (dry weight) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของสินิจนันท์ เสียงเสนาะ (2553) พบว่า ค่าซีโอดีทั้งหมด (TCOD) และซีโอดีละลายน้ำ (SCOD) ที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,073 และ 330 g/kg (dry weight) จากสัดส่วนสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีละลายน้ำต่อซีโอดีทั้งหมด (SCOD/TCOD) พบว่ามีค่าประมาณ 20.2 จะเห็นได้ว่าตะกอนดีแคนเตอร์มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณมาก แต่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ค่อนข้างยากเนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำอยู่น้อย ในตะกอนดีแคนเตอร์มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) เป็นองค์ประกอบเฉลี่ย 23.1% (wet weight) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของสินิจนันท์ เสียงเสนาะ (2553) และนันท์นภัส ชันธวรพินธิชัย (2552) พบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25% (wet weight) และส่วนที่เป็นของแข็งระเหยได้ (VS) เฉลี่ย 84.8% (of TS) ปริมาณทีเคเอ็น (TKN) และแอมโมเนียไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) เป็นองค์ประกอบเฉลี่ยเท่ากับ 37.3 และ 0.5 g/kg (dry weight) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Paepatung *et al.* (2009) พบว่า ปริมาณของแข็งระเหยได้ (VS) ทีเคเอ็น (TKN) และแอมโมเนียไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) ที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 83.4% (of TS), 21.5 และ 0.6 g/kg (dry weight) ตามลำดับ ตะกอนดีแคนเตอร์มีอินทรีย์คาร์บอน (C) และไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบเฉลี่ย 44.2 และ 1.3% (dry weight) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Yahya *et al.* (2010) และ Paepatung *et al.* (2009) พบว่า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (C) ที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกันคือ 51.7 และ 43.6% (dry weight) ส่วนไนโตรเจน (N) มีค่า 2.4 และ 2.2% (dry weight) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) เฉลี่ยเท่ากับ 34.4 แสดงให้เห็นว่า วัสดุหมักที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นมียอดประกอบของไนโตรเจนต่ำ จึงทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ของตะกอนดีแคนเตอร์สูงกว่าค่าที่แนะนำเล็กน้อยและอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนคือ อัตราการเกิดเซลล์จุลินทรีย์ลดลงทำให้ก๊าซที่ผลิตได้ลดน้อยลงเนื่องจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมของระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 20-30:1 (Yen and Brune, 2007 อ้างถึงใน Jia *et al.*, 2011)

### 3.1.2 คุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง (ตารางที่ 3.1) พบว่า น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งที่ใช้ในการทดลองมีสภาพเป็นกลางเนื่องจากมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 6.5 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของวิภารัตน์ ชัยเพชร (2551) พบว่า ค่าพีเอชใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 6.2-6.5 ปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบในรูปของซีโอดีทั้งหมด (TCOD) ซีโอดีละลายน้ำ (SCOD) ของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยได้ (VS) ทีเคเอ็น (TKN) แอมโมเนียไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) และกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) เฉลี่ยเท่ากับ 1,643, 721, 1,640, 955, 147, 140, 413 และ 181 mg/l ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของวิภารัตน์ ชัยเพชร (2551) พบว่า ค่าซีโอดีทั้งหมด (TCOD) และของแข็งทั้งหมด (TS) ต่ำกว่า ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 3,000-4,500 mg/l และ 2,000-5,000 mg/l ตามลำดับ เนื่องจากน้ำเสียเกิดจากส่วนของน้ำล้างเลือดและน้ำละลายปลาในกระบวนการผลิตปลาหูน่ากระป๋อง ส่วนในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียจากบ่อปรับเสถียร ในส่วนของค่าทีเคเอ็น (TKN) สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) และกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 50-500, 500-1,000 และ 150-300 mg/l ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่า น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งมีปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างต่ำแต่มีปริมาณไนโตรเจนสูง ซึ่งในการดำเนินการของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจำเป็นต้องมีปริมาณของสารอาหารในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ ซีโอดีต่อทีเคเอ็น (TCOD:TKN) เท่ากับ 100:1.1 (Souza, 1986 และ McCarty, 1964) แต่น้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองพบว่า อัตราส่วนของซีโอดีต่อทีเคเอ็น (TCOD:TKN) เท่ากับ 100:9 แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณไนโตรเจนที่มากเกินไปเกินความต้องการของจุลินทรีย์ในระบบ อาจส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนได้เนื่องจากไนโตรเจนที่มากเกินไปจนความจำเป็นของจุลินทรีย์จะถูกเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งหากมีปริมาณสูงกว่าค่าที่เหมาะสมคือประมาณ 100 mg/l จะเกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบได้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งและตะกอนจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง	ตะกอนจุลินทรีย์
ค่าพีเอช (pH)	-	6.5	7.5
ซีโอดีทั้งหมด (TCOD)	mg/l	1,643	41,872
ซีโอดีละลายน้ำ (SCOD)	mg/l	721	614
ของแข็งทั้งหมด (TS)	mg/l	1,640	22,360
ของแข็งระเหยได้ (VS)	mg/l	955	16,475
ทีเคเอ็น (TKN)	mg/l	147	220
แอมโมเนียไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )	mg/l	140	160
สภาพด่างทั้งหมด (Alkalinity)	mg/l as $\text{CaCO}_3$	413	5,231
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA)	mg/l as $\text{CH}_3\text{COOH}$	181	1,290
MLVSS	mg/l	-	16,413

### 3.1.3 คุณสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง (ตารางที่ 3.1) พบว่า เชื้อของตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งที่ใช้ในการทดลองมีสภาพเป็นกลาง เนื่องจากมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.5 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยได้ (VS) และความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ (MLVSS) เท่ากับ 22,360, 16,475 และ 16,413 mg/l ตามลำดับ

### 3.1.4 คุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งผสมกับตะกอนดีแคนเตอร์

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุผสมใช้อัตราส่วนน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งปริมาณ 180 ml ต่อตะกอนดีแคนเตอร์ 10 g ผ่านการเติม  $\text{NaHCO}_3$  ก่อนนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ โดยผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผสมระหว่างน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งกับตะกอนดีแคนเตอร์ (ตารางที่ 3.2) พบว่า วัสดุผสมที่ใช้ในการทดลองมีสภาพเป็นกลางเนื่องจากมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 6.9 ปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบในรูปของซีโอดีทั้งหมด (TCOD) ของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยได้ (VS) ทีเคเอ็น (TKN) แอมโมเนียไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) และกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) เฉลี่ยเท่ากับ 14,127, 14,333, 10,933, 313, 70, 1,823 และ 488 mg/l ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งผสมกับตะกอนดีแคนเตอร์ทำให้วัสดุผสมที่ได้มีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นและอัตราส่วนซีโอดีต่อทีเคเอ็น (TCOD:TKN) ของวัสดุผสมเฉลี่ยเท่ากับ 100:2 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนคือ 100:1.1 (Souza, 1986 และ McCarty, 1964) แสดงให้เห็นว่าการใช้ตะกอนดีแคนเตอร์ผสมในน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งสามารถปรับอัตราส่วนของปริมาณสารอาหารให้เหมาะสมและเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ นอกจากนี้วัสดุผสมที่ได้มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยได้ (VS) และกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งผสมกับตะกอนดีแคนเตอร์

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งผสมกับตะกอนดีแคนเตอร์
ค่าพีเอช (pH)	-	6.9
ซีโอดีทั้งหมด (TCOD)	mg/l	14,127
ของแข็งทั้งหมด (TS)	mg/l	14,333
ของแข็งระเหยได้ (VS)	mg/l	10,933
ทีเคเอ็น (TKN)	mg/l	313
แอมโมเนียไนโตรเจน ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )	mg/l	70
สภาพด่างทั้งหมด (Alkalinity)	mg/l as $\text{CaCO}_3$	1,823
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA)	mg/l as $\text{CH}_3\text{COOH}$	488



### 3.2 ผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลองคือ การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาระยะเวลาที่เก็บที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว กวนผสม 24 ชั่วโมง การทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาระยะเวลาที่เก็บที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 ชั่วโมง และการทดลองที่ 4 เป็นการศึกษาระยะเวลาที่เก็บที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 12 ชั่วโมง

#### 3.2.1 การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ในการทดลองส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนระหว่างวัสดุหมักร่วมทั้ง 2 ชนิดคือ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งและตะกอนดีแคนเตอร์ด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจน ในการหาอัตราส่วนทำการทดลองโดยเดินระบบแบบ Batch ดำเนินการทดลองที่สภาวะมาตรฐาน ( $35\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) ทำการทดลองในเครื่อง Incubator shaker และทำงานที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที ทำการทดลองทั้งหมด 6 อัตราส่วนคือ 180W:0DC, 180W:2DC, 180W:5DC, 180W:8DC, 180W:10DC และ 180W:20DC ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุผสมก่อนและหลังการทดลอง ได้แก่ พีเอช, TCOD, SCOD, Alkalinity, VFA, TS, VS, TKN และ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทุกวันและเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพทุก 7 วัน ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas chromatography, GC) ซึ่งมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ผลการทดลองดังต่อไปนี้

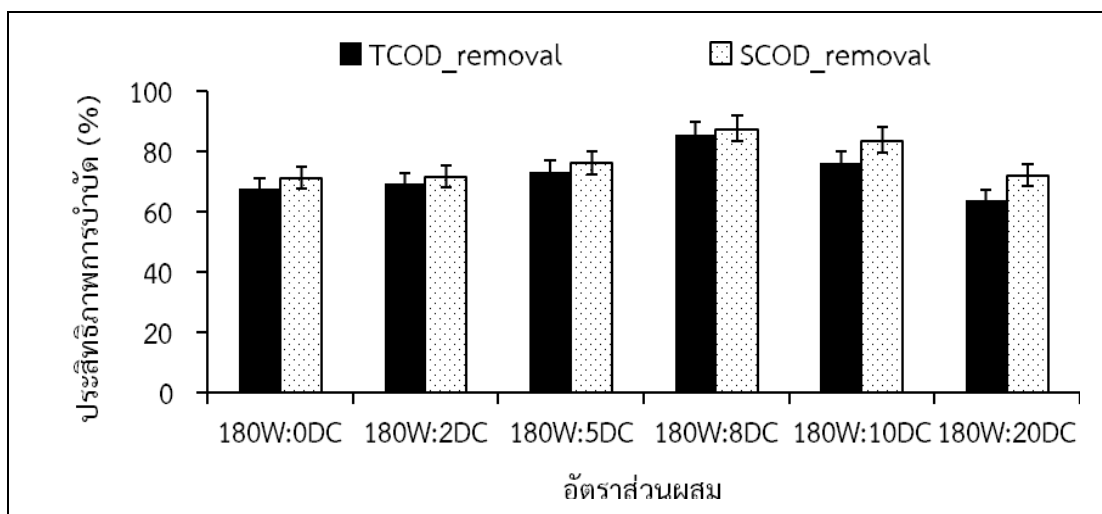
##### 1) ค่าพีเอช (pH)

จากการทดลองได้ปรับค่าพีเอชของวัสดุผสมก่อนการทดลองในทุกอัตราส่วนผสมด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ให้มีค่าอยู่ในช่วง 6.8-7.2 (Rajeshwari *et al.*, 2000 อ้างถึงใน Budiyo *et al.*, 2010) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน ถ้าค่าพีเอชสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง และถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.6 หรือสูงกว่า 7.6 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะที่สภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (McCarty, 1964) ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ลดลง ส่งผลให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเกิดการสะสมเพิ่มมากขึ้น ค่าพีเอชจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.5 จะทำให้ Methanogenic bacteria หยุดการเจริญเติบโตจากการวิเคราะห์ค่าพีเอชของวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีค่า

พีเอชลดลงเมื่อเทียบกับค่าพีเอชก่อนการทดลอง อาจเนื่องมาจากในช่วงดำเนินการทดลองจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดในระบบจะย่อยสลายสารอินทรีย์เปลี่ยนเป็น VFA เกิดขึ้นในระบบ โดยที่อัตราส่วนผสม 180W:0DC และ 180W:5DC ค่าพีเอชหลังการทดลองเท่ากับ 6.7 ซึ่งต่ำกว่าช่วงค่าที่เหมาะสม แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของอัตราส่วน VFA/Alkalinity ร่วมด้วยพบว่ามีความต่ำกว่าค่าที่แนะนำคือ 0.4-0.8 แสดงว่าในระบบหมักมีกำลังบัฟเฟอร์สูง จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน ในขณะที่อัตราส่วนผสม 180W:2DC, 180W:8DC, 180W:10DC และ 180W:20DC ค่าพีเอชหลังการทดลองเท่ากับ 6.8, 7.0, 6.9 และ 7.1 ตามลำดับ ซึ่งยังคงมีแนวโน้มอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน

## 2) การบำบัดซีโอดีทั้งหมด (Total Chemical Oxygen Demand: TCOD) และซีโอดีละลายน้ำ (Soluble Chemical Oxygen Demand: SCOD)

จากการทดลองพบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองประสิทธิภาพการบำบัด TCOD และ SCOD สูงสุด เท่ากับ 85.4 และ 87.5% ที่อัตราส่วนผสม 180W:8DC เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการหมักแบบ Batch จึงมีการเติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียวในวันแรกที่เริ่มเดินระบบและในแต่ละอัตราส่วนมีการเติมตะกอนดีแคนเตอร์ในปริมาณที่แตกต่างกันซึ่งหมายถึงการเติมปริมาณสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันด้วย โดยปริมาณสารอินทรีย์ในรูป TCOD และ SCOD จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณตะกอนดีแคนเตอร์ที่เพิ่มขึ้นและสูงกว่าอัตราส่วนที่ใช้น้ำเสียในการหมักเพียงอย่างเดียว (180W:0DC) ดังนั้นเมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการต่างๆ เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ และนำไปใช้ในการเจริญเติบโตเพื่อสร้างเซลล์ใหม่ (นันทน์ภัส ชันธวรพินธิชัย, 2552 และสมฤดี ฤทธิ์ยากุล, 2551) ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ถูกนำไปใช้อย่างต่อเนื่อง โดยจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายก่อนจึงจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยยาก (จิรวัดน์ ชาลีวรรณ, 2546 อ้างถึงในสมฤดี ฤทธิ์ยากุล, 2551) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่ในช่วงแรกของการทดลองมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วนผสม (รูปที่ 3.3) หลังจากนั้นจะมีการลดลงอย่างสม่ำเสมอในทุกอัตราส่วนผสม โดยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเริ่มช้าลง ทั้งนี้เนื่องมาจากมีปริมาณสารอินทรีย์เหลือน้อยลงและย่อยสลายยาก ในอัตราส่วนผสมที่มีการเติมตะกอนดีแคนเตอร์สูงจะมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่ำและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดลองมากขึ้น เนื่องจากในตะกอนดีแคนเตอร์มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากสูง (SCOD/TCOD ประมาณ 20.2) (นันทน์ภัส ชันธวรพินธิชัย, 2552) จึงทำให้จุลินทรีย์ในระบบต้องใช้เวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ในระบบลดลงและไม่เพียงพอต่อความต้องการในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบโดยเฉพาะชนิดสร้างมีเทนและจุลินทรีย์บางส่วนตายไป ดังนั้นจึงทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูป TCOD และ SCOD จึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนดีแคนเตอร์เป็น 10 และ 20 g ที่อัตราส่วนผสม 180W:10DC และ 180W:20DC ในส่วนของประสิทธิภาพการบำบัด TCOD ของการทดลองทุกอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกัน ( $p>0.05$ ) ส่วน SCOD ของการทดลองทุกอัตราส่วนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA



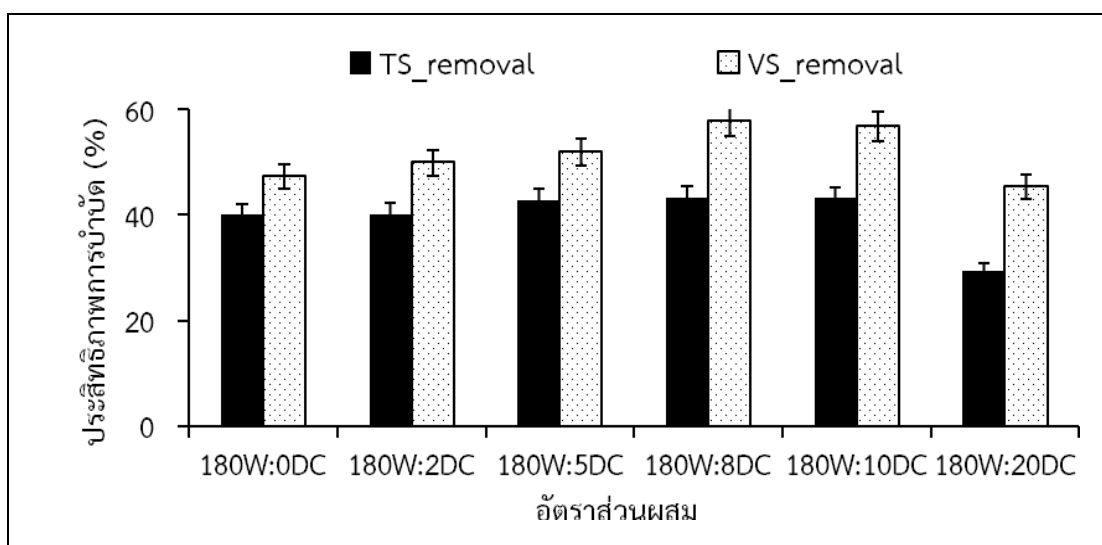
รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TCOD และ SCOD ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

### 3) การบำบัดของแข็งทั้งหมด (Total Solid: TS) และของแข็งระเหยได้ (Volatile Solid: VS)

จากการทดลองพบว่า ในแต่ละอัตราส่วนมีการเติมตะกอนดีแคแคโนเตอร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยปริมาณ TS และ VS ในระบบจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนที่มีการเติมตะกอนดีแคแคโนเตอร์เพิ่มขึ้นและสูงกว่าอัตราส่วนที่มีการใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียว (180W:0DC) ซึ่งอัตราส่วนที่มีปริมาณ TS สูง (180W:20DC) จะต้องใช้ระยะเวลาในการเกิดกระบวนการ Hydrolysis รวมทั้งองค์ประกอบของตะกอนดีแคแคโนเตอร์มีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก ดังนั้นในการทดลองอัตราส่วนที่มีการเติมตะกอนดีแคแคโนเตอร์สูงจึงต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนาน ประกอบกับความสามารถของจุลินทรีย์ในระบบจะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายก่อนจึงจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยยาก สอดคล้องกับอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนที่มีการเติมตะกอนดีแคแคโนเตอร์เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพในช่วงแรกต่ำและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดลองมากขึ้น เนื่องจากวัสดุหมักอยู่ในระบบนานขึ้นจึงทำให้เกิดกระบวนการ Hydrolysis ได้นาน และสามารถย่อยสลาย TS ได้เพิ่มขึ้น โดยในการทดลองนี้เป็นการเติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียว ดังนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณสารอินทรีย์และ TS จะลดลง เนื่องจากถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอาหารอย่างต่อเนื่องทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าลงเรื่อยๆ เมื่อปริมาณสารอินทรีย์ในระบบลดลงจึงไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ ส่งผลให้จุลินทรีย์ในระบบบางส่วนตายไปทำให้ประสิทธิภาพการบำบัด TS ในระบบลดลง เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า การหมักที่อัตราส่วนผสม 180W:8DC มีประสิทธิภาพในการบำบัด TS สูงสุดเท่ากับ 43.4%

สำหรับผลการทดลองในส่วนของประสิทธิภาพการบำบัด VS จะคล้ายกับการบำบัด TS จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนที่มีการเติมตะกอนดีแคแคโนเตอร์เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพในช่วงแรกสูงแต่สัดส่วนก๊าซมีเทนที่ได้ต่ำ เนื่องจากในช่วงแรกเกิดกระบวนการ Hydrolysis จึงทำให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดมีการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็น VFA ได้มากแต่จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนมีการเจริญเติบโตช้าจึงย่อยสลาย VFA ที่เกิดขึ้นในระบบเป็นก๊าซมีเทนได้น้อยและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดลองมากขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบสามารถปรับตัวให้

คุ้นเคยกับสภาวะภายในระบบได้และมีการสร้างเซลล์ใหม่ได้เพิ่มขึ้นทำให้การเปลี่ยน VFA เป็นก๊าซมีเทนเกิดได้ดีขึ้น การย่อยสลาย VS จึงสูงขึ้นและเริ่มลดลงเมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากเหลืออยู่ในระบบ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า การหมักที่อัตราส่วนผสม 180W:8DC มีประสิทธิภาพในการบำบัด VS สูงสุดเท่ากับ 57.8% โดยประสิทธิภาพการบำบัด TS ของการทดลองทุกอัตราส่วนมีความแตกต่างกัน ( $p < 0.05$ ) ส่วน VS ในการทดลองทุกอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TS และ VS ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

#### 4) สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) และกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid: VFA)

จากการทดลองพบว่า ค่า Alkalinity และปริมาณ VFA มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณตะกอนดีแคแเตอร์ที่เติมในระบบหมัก ในทุกอัตราส่วนผสมมีค่า Alkalinity เริ่มต้นอยู่ในช่วง 1,075-2,994 mg/l as CaCO<sub>3</sub> และหลังการทดลองพบว่า ค่า Alkalinity ในทุกอัตราส่วนอยู่ในช่วง 1,120-3,894 mg/l as CaCO<sub>3</sub> (ตารางที่ 3.3) จะเห็นได้ว่าหลังการทดลองในทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มของค่า Alkalinity เพิ่มขึ้นและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน คือ 1,000-5,000 mg/l as CaCO<sub>3</sub> (Osman and Delia, 2005) ทั้งนี้เนื่องจากในระบบมีไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นจากการย่อยสลาย VFA ของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนทำให้มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียในระบบเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดเป็นไบคาร์บอเนตไอออน (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) หรือเกิดเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>) (Raynal *et al.*, 1998 อ้างถึงในชญา นุช แสงวิเชียร, 2554) ซึ่งค่า Alkalinity เป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของระบบ ถ้าระบบมีค่า Alkalinity สูง แสดงว่าระบบมีความเป็นบัฟเฟอร์สูงสามารถรักษาค่าพีเอชของระบบให้คงตัวอยู่นานไม่เกิดความแปรปรวนของค่าพีเอชได้ง่ายจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตได้เร็วกว่าจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน ทำให้มีการสะสมของ VFA เกิดขึ้นในระบบและอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนในระบบได้ ถ้าระบบมีค่า

Alkalinity ต่ำ จะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง และหากค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนในระบบไม่สามารถทำงานได้

นอกจากนี้ยังพบว่า ทุกอัตราส่วนผสมมีค่า VFA เริ่มต้นอยู่ในช่วง 171-660 mg/l as  $\text{CH}_3\text{COOH}$  และหลังการทดลองพบว่า ค่า VFA ในทุกอัตราส่วนอยู่ในช่วง 46-610 mg/l as  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (ตารางที่ 3.2) จะเห็นได้ว่าหลังการทดลองในทุกอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มของค่า VFA ลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนสามารถเปลี่ยน VFA ที่เกิดขึ้นในระบบจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดไปเป็นก๊าซมีเทนและมีความสมดุลของจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดในระบบ ยกเว้นที่อัตราส่วนผสม 180W:20DC ซึ่งมีการเติมตะกอนดีแคแเตอร์สูงสุดในการทดลอง ค่า VFA ของวัสดุหมักรวมก่อนและหลังการทดลองสูงกว่าช่วงค่าที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนคือ 50-500 mg/l as  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (Halbert, 1981) เนื่องจากในตัววัสดุหมักรวมก่อนการทดลองมีค่า VFA สูงกว่าค่าที่เหมาะสมอยู่แล้ว ดังนั้นเมื่อเริ่มทำการทดลองจึงอาจทำให้ระบบมีค่าพีเอชลดลงและส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนได้ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในช่วงแรกมีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นสูงแต่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในช่วงแรกมีปริมาณน้อยตามไปด้วย แต่จุลินทรีย์ในระบบยังสามารถดำรงชีพอยู่ต่อไปได้ เนื่องจากอัตราส่วนของ VFA/Alkalinity ในระบบยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเดินระบบแบบไร้ออกซิเจน

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ VFA/Alkalinity ซึ่งมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบ จากผลการทดลองพบว่า ทุกอัตราส่วนผสมมีอัตราส่วนของ VFA/Alkalinity เริ่มต้นอยู่ในช่วง 0.13-0.23 และหลังการทดลองพบว่า อัตราส่วนของ VFA/Alkalinity ในทุกอัตราส่วนอยู่ในช่วง 0.04-0.08 (ตารางที่ 3.3) จากผลการทดลองพบว่า หลังการทดลองในทุกอัตราส่วนผสมมีแนวโน้มของค่า VFA/Alkalinity ลดลงและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการเดินระบบแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนจะเปลี่ยน VFA ที่เกิดขึ้นในระบบจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดไปเป็นก๊าซมีเทนทำให้มีปริมาณ VFA ในระบบลดลงและค่า Alkalinity ของระบบมีการปรับตัวเพิ่มขึ้น จึงทำให้อัตราส่วน VFA/Alkalinity ของแต่ละอัตราส่วนผสมมีค่าลดลง โดยอัตราส่วน VFA/Alkalinity ที่เหมาะสมในการเดินระบบแบบไร้ออกซิเจนอยู่ในช่วง 0.4-0.8 (สุภกิจ ศิโสภาก, 2544) แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูงเพียงพอแก่การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบ เนื่องจากอัตราส่วน VFA/Alkalinity หากมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าหากอัตราส่วน VFA/Alkalinity ที่เกิดขึ้นในระบบมีค่ามากกว่า 0.8 จะทำให้ระบบมีค่าพีเอชลดลงและอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนได้

ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ค่า Alkalinity, VFA และ VFA/Alkalinity ก่อนและหลังการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

วัสดุหมักรวม	Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )		VFA (mg/L as CH <sub>3</sub> COOH)		VFA/Alkalinity	
	input	output	input	output	input	output
180W:0DC	1,075	1,120	171	46	0.16	0.04
180W:2DC	1,425	1,631	210	69	0.15	0.04
180W:5DC	1,650	1,669	375	129	0.23	0.08
180W:8DC	2,000	2,313	260	166	0.13	0.07
180W:10DC	2,131	2,394	318	154	0.15	0.06
180W:20DC	2,994	3,894	660	610	0.22	0.14

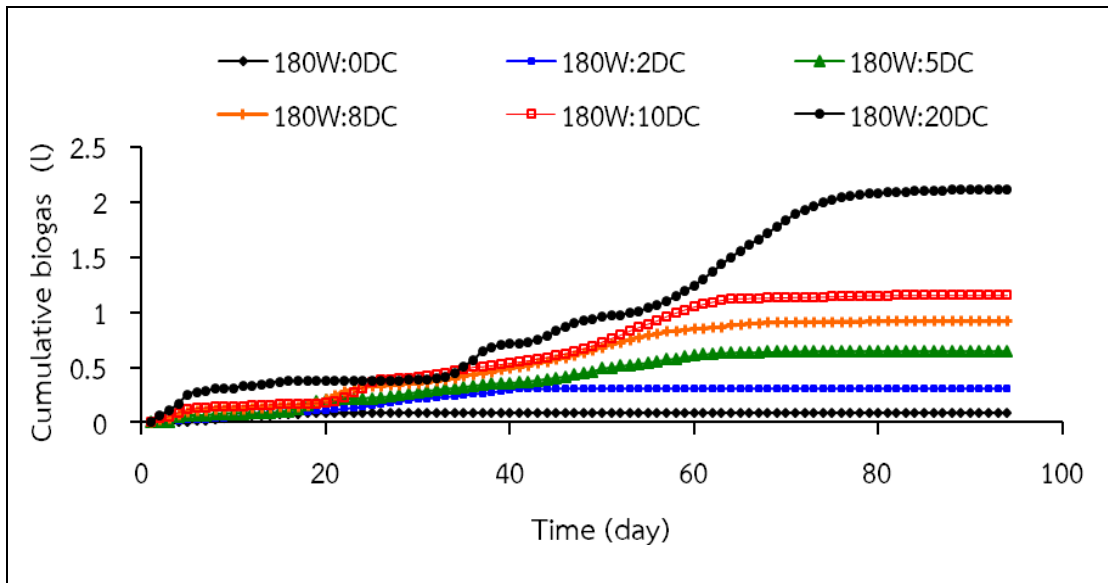
##### 5) แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen: NH<sub>3</sub>-N) และเจตาห์ลไนโตรเจน (Total Kjeldah Nitrogen: TKN)

จากการทดลองพบว่า แนวโน้มของปริมาณ NH<sub>3</sub>-N, TKN ในวัสดุผสมก่อนหมักของแต่ละส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกอนดีแคแคโนเตอร์ที่เติมในระบบหมักและสูงกว่าอัตราส่วน 180W:0DC ซึ่งใช้น้ำเสียในการหมักเพียงอย่างเดียว ในทุกอัตราส่วนมีปริมาณ NH<sub>3</sub>-N เริ่มต้นอยู่ในช่วง 113-119 mg/L และปริมาณ NH<sub>3</sub>-N หลังการทดลองของทุกอัตราส่วนอยู่ในช่วง 123-143 mg/L จะเห็นได้ว่าหลังการทดลองมีแนวโน้มของค่า NH<sub>3</sub>-N เพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วน เนื่องจากเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนแล้วเปลี่ยนไปเป็น NH<sub>3</sub>-N ภายในระบบ แต่จุลินทรีย์ในระบบมีความต้องการไนโตรเจนในปริมาณน้อยเพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ ดังนั้นไนโตรเจนที่มากเกินไปของจุลินทรีย์จะเปลี่ยนมาสะสมอยู่ในรูปของ NH<sub>3</sub>-N จึงทำให้เกิดการสะสมของ NH<sub>3</sub>-N ในระบบเพิ่มขึ้น (สมฤดี ฤทธิยากุล, 2551) จากผลการวิเคราะห์ NH<sub>3</sub>-N พบว่า ในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าสูงกว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนคือ ความเข้มข้นประมาณ 100 mg/L (Sterling *et al.*, 2001) อาจจะมีผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนในระบบได้ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการผลิตก๊าซมีเทนในช่วงแรกของการทดลองมีปริมาณก๊าซมีเทนน้อยเพราะมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำ แต่ปริมาณ NH<sub>3</sub>-N ที่มีอยู่ในระบบหมักยังไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ โดยความเข้มข้นของ NH<sub>3</sub>-N ที่เริ่มเป็นพิษต่อระบบมีค่าตั้งแต่ 1,500 mg/L (Osman and Delia, 2005) ซึ่งการมี NH<sub>3</sub>-N ในระดับที่เหมาะสมก็เป็นสิ่งจำเป็นเพราะสามารถลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้จากการที่แอมโมเนียมไอออนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเกิดเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตควบคุมสมดุลของค่าพีเอชและสร้างกำลังบัฟเฟอร์ให้กับระบบได้ (Shanmugam and Horan, 2009) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mshandete *et al.* (2004) ดำเนินการหมักเส้นใยพืชร่วมกับของเสียจากปลาด้วยระบบหมักแบบ Batch เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า มีปริมาณ NH<sub>3</sub>-N เพิ่มขึ้นในระบบหมักจากการย่อยสลายโปรตีนในของเสียจากปลา ส่งผลให้ในระบบมีกำลังบัฟเฟอร์เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของ NH<sub>3</sub>-N ในทุกอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA

ในส่วนของปริมาณ TKN พบว่า ในแต่ละอัตราส่วนผสมมีปริมาณ TKN เริ่มต้นอยู่ในช่วง 133-543 mg/l และปริมาณ TKN หลังการทดลองของทุกอัตราส่วนอยู่ในช่วง 140-550 mg/l ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า หลังการทดลองในทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มของค่า TKN เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า TKN เป็นผลรวมของ  $\text{NH}_3\text{-N}$  และสารประกอบของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในวัสดุหมัก เมื่อสารอินทรีย์มีการแตกตัวและเกิดการย่อยสลายในระบบ จึงทำให้ธาตุอาหารละลายในน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของ TKN ในทุกอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA โดยปกติ TKN เป็นสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์นำไปใช้ปริมาณน้อยในการสร้างเซลล์ใหม่และในทางทฤษฎีการบำบัด TKN ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยอาศัยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องอาศัยกระบวนการทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนร่วมด้วย (ธนาวัฒน์ ดำนวนิชกุล, 2548)

#### 6) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

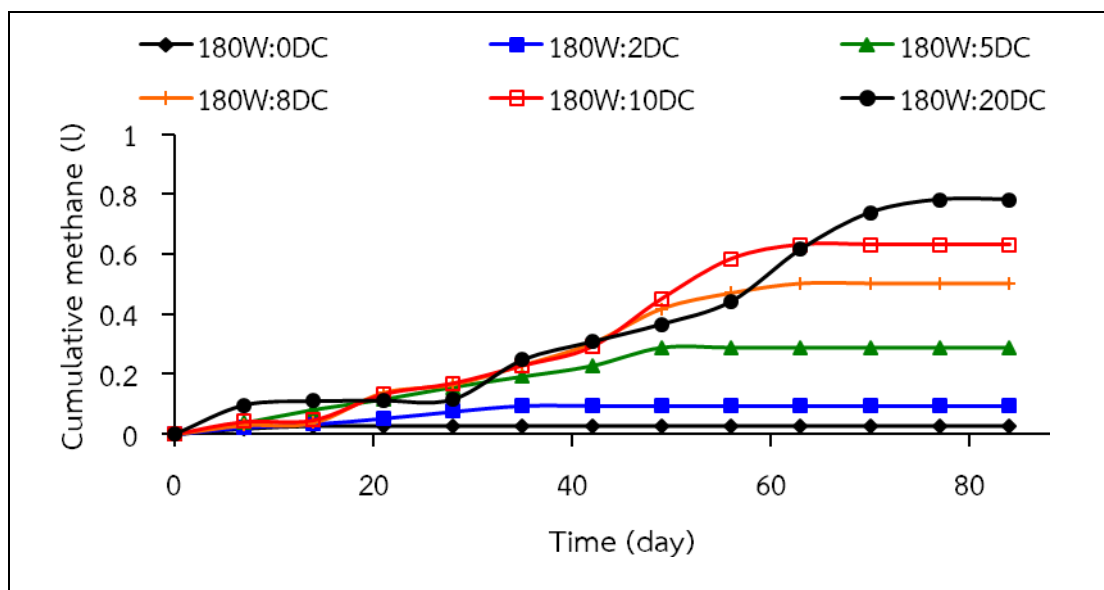
ในการหมักแบบไร้ออกซิเจนผลที่ได้คือก๊าซชีวภาพ ซึ่งจากการทดลองได้ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ จากกราฟจะเห็นได้ว่าแนวโน้มในช่วงวันที่ 0-30 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมค่อยๆ เพิ่มขึ้นในการทดลองทุกอัตราส่วนผสม ในช่วงวันที่ 31-75 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในอัตราส่วนผสมที่ 180W:5DC, 180W:8DC, 180W:10DC และ 180W:20DC ส่วนที่อัตราส่วนผสม 180W:0DC และ 180W:2DC เข้าสู่สภาวะคงที่ และปริมาณก๊าซชีวภาพเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ในทุกอัตราส่วนผสมหลังวันที่ 76 โดยที่อัตราส่วนผสม 180W:0DC, 180W:2DC, 180W:5DC, 180W:8DC, 180W:10DC และ 180W:20DC ใช้ระยะเวลาในการทดลองเท่ากับ 23, 48, 74, 82, 82 และ 93 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงแรกเพิ่มสูงขึ้นในทุกอัตราส่วนและมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากจุลินทรีย์อยู่ในช่วงปรับตัวให้คุ้นเคยกับวัสดุหมัก และทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยง่ายก่อนเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ จากนั้นจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยยากต่อไป โดยระบบหมักในอัตราส่วนชุดที่มีการเติมตะกอนดีแคนเตอร์มากขึ้นจะมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากเพิ่มขึ้นในระบบจึงต้องใช้ระยะเวลามากขึ้นในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (รูปที่ 3.3) จะเห็นได้ว่าหลังจากใช้ระยะเวลาดำเนินการทดลองนานขึ้นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเริ่มช้าลงและสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพลดลงจึงทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนน้อย เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ในระบบเหลือน้อยลงและย่อยสลายยากเพราะในการทดลองเป็นการเดินระบบแบบ Batch ซึ่งจะมีการเติมวัสดุหมักเข้าระบบเพียงครั้งเดียว เมื่อดำเนินการทดลองจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้สารอินทรีย์ที่มีในระบบค่อยๆ ลดลง โดยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากการทดลองที่อัตราส่วน 180W:20DC สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดได้ 2.12 l ในขณะที่อัตราส่วนผสม 180W:0DC, 180W:2DC, 180W:5DC, 180W:8DC และ 180W:10DC สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 0.09, 0.31, 0.65, 0.93 และ 1.16 l (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่อัตราส่วนต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

ผลการทดลองพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่ได้เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนการเติมตะกอนดีแคนเตอร์แต่ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสูงสุดที่อัตราส่วนผสม 180W:10DC เท่ากับ  $0.351 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{removal}}$  ในขณะที่อัตราส่วนผสม 180W:0DC, 180W:2DC, 180W:5DC, 180W:8DC และ 180W:20DC สามารถผลิตได้เท่ากับ 0.140, 0.192, 0.239, 0.314 และ  $0.300 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{removal}}$  เป็นที่น่าสังเกตว่าการหมักที่อัตราส่วนผสม 180W:20DC ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่ำกว่าที่อัตราส่วนผสม 180W:10DC แม้ว่าจะมีการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดก็ตาม อาจเนื่องมาจากตัววัสดุหมักเริ่มต้นมีปริมาณ VFA สูงกว่าค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนทำให้ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคาดว่าจะมีจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดเกิดขึ้นในระบบหมักมากกว่าชนิดสร้างมีเทน จึงส่งผลให้การหมักที่อัตราส่วนผสม 180W:20DC ซึ่งมีการเติมตะกอนดีแคนเตอร์สูงสุดมีส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำเท่ากับ 47.1% ส่วนที่อัตราส่วนผสม 180W:0DC, 180W:2DC, 180W:5DC, 180W:8DC และ 180W:20DC เท่ากับ 33.1, 34.2, 60.4, 69.9 และ 76.7% ตามลำดับ และค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ( $0.351 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{removal}}$ ) ที่ได้จากการทดลองน้อยกว่าค่าในทางทฤษฎีเท่ากับ  $0.395 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{removal}}$  (Speece, 1996 อ้างถึงใน Bishop, 2010) เนื่องจากวัสดุที่ใช้หมักในการทดลองมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากสูง ดังนั้นจึงทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบได้หมดและบางส่วนถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ แต่ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับการศึกษาของวรภรณ์ แสงหล่อ (2549) ซึ่งทำการทดลอง BMP เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของตะกอนดีแคนเตอร์เท่ากับ  $0.365 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{removal}}$





รูปที่ 3.4 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่อัตราส่วนต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

เมื่อพิจารณาการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งกับตะกอนดีแคนเตอร์ พบว่า การหมักร่วมมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักด้วยน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราส่วนผสมที่มีการเติมตะกอนดีแคนเตอร์จะช่วยเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในระบบหมักสูงกว่าและมีอัตราส่วนปริมาณสารอาหาร TCOD:TKN ใกล้เคียงกับค่าที่แนะนำในการหมักแบบไร้ออกซิเจนคือ 100:1.1 (Souza, 1986 และ McCarty, 1964) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 100:2.4-100:5 ส่วนการทดลองที่อัตราส่วน 180W:0DC ไม่มีการเติมตะกอนดีแคนเตอร์มีอัตราส่วน TCOD:TKN เท่ากับ 100:8.3 แสดงว่าการเติมตะกอนดีแคนเตอร์นอกจากช่วยเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ให้กับวัสดุหมักแล้วยังช่วยปรับอัตราส่วนปริมาณสารอาหารให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการหมักแบบไร้ออกซิเจน ดังนั้นปริมาณการเติมตะกอนดีแคนเตอร์จะมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

โดยอัตราส่วน 180W:10DC ซึ่งมีการเติมตะกอนดีแคนเตอร์ 10 g เป็นค่าที่ดีที่สุดในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ในระบบสูงและอัตราส่วน TCOD:TKN เท่ากับ 100:2.6 ซึ่งใกล้เคียงกับความต้องการของจุลินทรีย์ในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน (100:1.1) ทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดและชนิดสร้างมีเทนเกิดขึ้นได้ดีและมีความสมดุลกัน ส่งผลให้สภาวะต่างๆ เช่น พีเอช, VFA, Alkalinity และ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ที่เกิดขึ้นในระบบอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน ดังนั้นจึงทำให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนสามารถย่อยสลาย VFA ที่จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดผลิตขึ้นจากกระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) เปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนในกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) ได้ดีตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสูงสุดในก๊าซชีวภาพ ซึ่งหากเติมตะกอนดีแคนเตอร์ในปริมาณน้อยกว่า 10 g พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบจะน้อยลง เนื่องจากการเติมตะกอนดีแคนเตอร์ในปริมาณต่างกันหมายถึงการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบต่างกัน ดังนั้นเมื่อเติม

ตะกอนดีแคนเตอร์น้อยกว่า 10 g สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบจึงน้อยลงและอัตราส่วน TCOD:TKN ที่ได้สูงกว่าค่าที่แนะนำ จึงอาจทำให้มีไนโตรเจนที่มากเกินไปเกินความต้องการของจุลินทรีย์ในระบบเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ในระบบสูงส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนได้ ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่ำ และในการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบ Batch ซึ่งจะมีการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบเพียงครั้งเดียว เมื่อดำเนินการทดลองจุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่และผลิตก๊าซชีวภาพทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในระบบลดลง ดังนั้นอัตราส่วนที่มีสารอินทรีย์น้อยจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้สร้างเซลล์ใหม่และเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนได้น้อย ส่วนการเติมตะกอนดีแคนเตอร์มากกว่า 10 g จะทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์ในระบบมากเกินไปเกินความต้องการของจุลินทรีย์ จึงเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในระบบ เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนไม่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดผลิตขึ้นในระบบได้ทัน ซึ่งจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนยังสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เนื่องจากระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง แต่จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนในระบบเป็นเหตุให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำ นอกจากนั้นในระบบมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ย่อยสลายยากสูง จึงทำให้จุลินทรีย์ต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์นาน จุลินทรีย์บางส่วนอาจตายไปและการสร้างเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนเกิดขึ้นช้าส่งผลให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดและชนิดสร้างมีเทนไม่มีความสมดุลกัน และผลการศึกษาของสมฤดี ฤทธิยากุล (2551) ที่ทำการหมักสาหร่ายหนามร่วมกับมูลสุกรจะมีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักสาหร่ายหนามหรือมูลสุกรเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับการทดลองนี้เมื่อหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์จะมีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลเพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Parawira *et al.* (2004) ที่นำของเสียจากมันฝรั่งและใบของต้นบีท (Sugar beet) หมักร่วมกัน พบว่าการหมักร่วมของวัสดุทั้งสองประเภทที่ทุกอัตราส่วนมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักวัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว

จากการทดลองเพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองพบว่า

1) สภาพแวดล้อมในการทำงานของระบบ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ในทุกอัตราส่วนมีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.7-7.1 ค่า Alkalinity เฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,120-3,894 mg/l as  $\text{CaCO}_3$  ค่า VFA เฉลี่ยอยู่ในช่วง 46-610 mg/l as  $\text{CH}_3\text{COOH}$  ค่า VFA/Alkalinity เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.04-0.14 ค่า  $\text{NH}_3\text{-N}$  เฉลี่ยอยู่ในช่วง 123-143 mg/l และค่า TKN เฉลี่ยอยู่ในช่วง 140-550 mg/l

2) ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ในทุกอัตราส่วนมีประสิทธิภาพการบำบัด TCOD อยู่ในช่วง 63.7-85.4% SCOD อยู่ในช่วง 71.2-87.5% TS อยู่ในช่วง 29.3-43.4% และ VS อยู่ในช่วง 45.4-57.8%

3) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมอยู่ในช่วง 0.09-2.12 l ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมอยู่ในช่วง 0.03-0.78 l องค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 33.1-47.1% และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.140-0.351 l  $\text{CH}_4/\text{g}$  TCOD<sub>removal</sub>

สรุปผลการทดลอง การหมักร่วมระหว่างน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเล แชน้ำกับตะกอนดีแคนเตอร์ พบว่า การหมักร่วมมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักด้วยน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแชน้ำเพียงอย่างเดียว โดยอัตราส่วนที่ใช้ตะกอนดีแคนเตอร์ 10 g หมักร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแชน้ำ ปริมาณ 180 ml เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการหมักแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากมีค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ 0.351 l CH<sub>4</sub>/g TCOD<sub>removal</sub> โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD, SCOD, TS และ VS เท่ากับ 76.18, 83.55, 43.16 และ 56.79% ตามลำดับ

### 3.2.2 เปรียบเทียบผลการทดลองหมักแบบไร้ออกซิเจนด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแชน้ำเพียงอย่างเดียวกวนผสม 24 ชั่วโมง และการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแชน้ำกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง

ในการทดลองส่วนที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแชน้ำเพียงอย่างเดียว ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง การทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแชน้ำหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง และการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแชน้ำหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ระยะเวลาการกวน 12 ชั่วโมง โดยทั้ง 3 การทดลองดำเนินการหมักแบบไร้ออกซิเจน ทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) ที่ระยะเวลาพักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน มีผลการศึกษาดังนี้

#### 1) อุณหภูมิ (Temperature)

ในการทดลองดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิ ณ จุดที่ตั้งของถังปฏิกรณ์ พบว่า การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 25.5-29.5°C ส่วนการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 12 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 27.0-31.5°C โดยอุณหภูมิในช่วงที่ดำเนินการทดลองของการหมักร่วมทั้งกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง ค่อนข้างคงที่ในช่วงที่ดำเนินการทดลอง ซึ่งทั้ง 2 การทดลองมีช่วงอุณหภูมิอยู่ในสภาวะการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Mesophilic ที่มีช่วงอุณหภูมิประมาณ 20-40°C (Gray, 1989) ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน

#### 2) ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญในการควบคุมระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถสร้างมีเทนได้นั้นจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมาก ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมค่าพีเอชให้มีความเหมาะสมด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทนจะทำงานได้ดีที่สุดในช่วงค่าพีเอช 6.8-7.2 (Poh and Chong, 2010) ถ้าพีเอชมีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง จาก

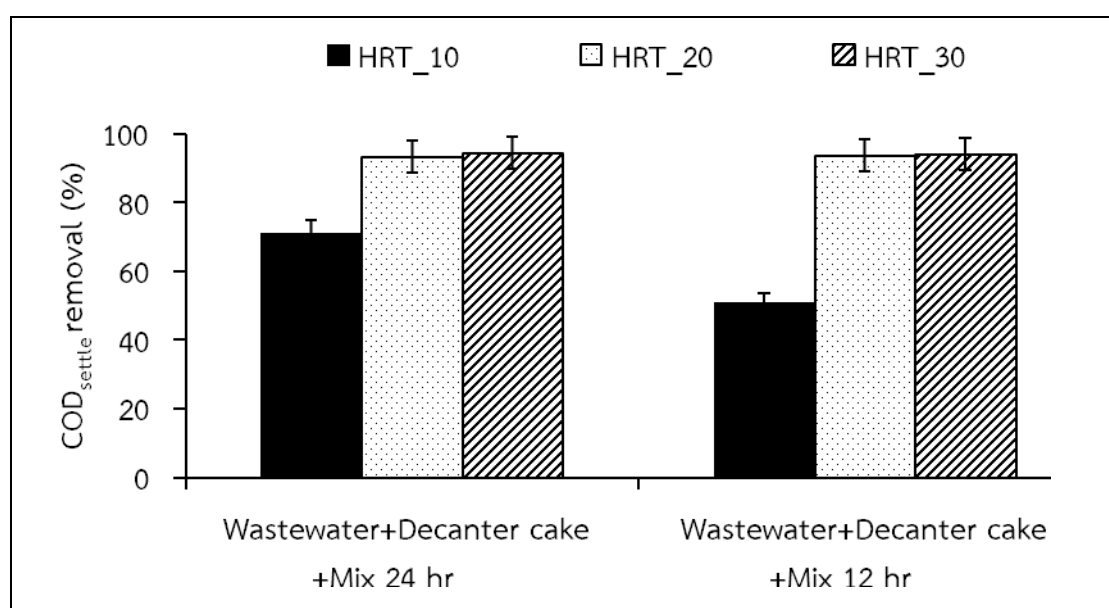
การตรวจวัดค่าพีเอชในน้ำเสียที่ออกจากระบบซึ่งเป็นตัวแทนของค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์พบว่า เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ภายในระบบหมักทั้ง 3 ระยะเวลาที่เก็บ โดยในการทดลองจะทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียก่อนเข้าระบบด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) เพื่อให้ได้ค่าพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากวัสดุที่ใช้หมักร่วมคือ ตะกอนดีแคนเตอร์มีคุณสมบัติที่มีสภาพเป็นกรด (พีเอช 4.6) ส่วนน้ำเสียมีสภาพเป็นกลาง (พีเอช 6.5) ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกันจึงทำให้คุณสมบัติของวัสดุผสมมีค่าพีเอชโดยเฉลี่ยประมาณ 6 ซึ่งค่าพีเอชที่ได้ต่ำกว่าค่าที่แนะนำในการหมักแบบไร้ออกซิเจนและอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ จากผลการทดลองพบว่า การใช้น้ำเสียหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชที่ตรวจวัดได้อยู่ในช่วง 6.9-7.1 และเมื่อลดระยะเวลาการกวนผสมเพียง 12 ชั่วโมง ของการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์ พบว่าค่าพีเอชของระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงกว่าการหมักร่วมกวนผสม 24 ชั่วโมง โดยค่าพีเอชที่ตรวจวัดได้อยู่ในช่วง 7.0-7.2 เนื่องจากการลดระยะเวลาการกวนผสมส่งผลให้ความสามารถในการสัมผัสสารอินทรีย์กับจุลินทรีย์ในระบบได้น้อยทำให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็น VFA ได้น้อย และค่า Alkalinity ของการหมักร่วมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง ที่เกิดขึ้นในระบบค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้อัตราส่วน VFA/Alkalinity ของการหมักร่วมกวนผสม 24 ชั่วโมง สูงกว่าการหมักร่วมกวนผสม 12 ชั่วโมง จึงทำให้กำลังบัฟเฟอร์ในระบบหมักร่วมกวนผสม 24 ชั่วโมง มีค่าต่ำกว่าการหมักร่วมกวนผสม 12 ชั่วโมง และจากการทดลองพบว่า ค่าพีเอชที่ระยะเวลาที่เก็บ 10 วัน ของการหมักร่วมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง เกิดการสะสมของปริมาณ VFA ในระบบสูงกว่าช่วงที่เหมาะสม (50-500 mg/l) ทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงต่ำกว่าระยะเวลาที่เก็บ 20 และ 30 วัน และอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) ของระบบได้ (Panyue *et al.*, 2008) นอกจากนี้การหมักร่วมกวนผสม 24 ชั่วโมง จุลินทรีย์ในระบบยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจนเพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ได้มากกว่าทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์ในระบบน้อยที่จะถูกเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ทำให้มีตัวช่วยในการสร้างกำลังบัฟเฟอร์ของระบบลดลงส่วนหนึ่ง ซึ่งการที่ระบบมี  $\text{NH}_3\text{-N}$  ในระดับที่เหมาะสมจะสามารถลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้จากการที่แอมโมเนียมไอออนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเกิดเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตช่วยควบคุมสมดุลของค่าพีเอชในระบบได้ส่วนหนึ่ง เป็นผลให้การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 ชั่วโมง ค่าพีเอชของระบบที่เกิดขึ้นต่ำกว่าการหมักร่วมกวนผสม 12 ชั่วโมง โดยจากผลการทดลองทั้ง 2 ชุดการทดลองพบว่า ค่าพีเอชของระบบที่ตรวจวัดได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการหมักแบบไร้ออกซิเจน (พีเอช 6.8-7.2) จึงทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ

### 3) การบำบัดซีโอดี (Settleable Chemical Oxygen Demand: Settleable COD)

ในการวิเคราะห์ COD ของระบบทดลองจะทำการวิเคราะห์ 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็น TCOD ของน้ำเสียเข้าระบบจะทำการกวนผสมตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์และส่วนที่ 2 เป็น COD<sub>settle</sub> จะทำการวิเคราะห์เฉพาะในส่วนของน้ำเสียออกจากระบบ โดยตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ 15 นาที ก่อนทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้ง 3 ระยะเวลาที่เก็บ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด COD<sub>settle</sub> ของการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคแเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัด COD<sub>settle</sub> ที่วิเคราะห์ได้สูงกว่าการหมักร่วมกวนผสม 12 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 94.4% ที่ระยะเวลาที่เก็บ 30 วัน เนื่องจากการหมักร่วมโดยใช้ตะกอนดีแคแเตอร์เต็มในน้ำเสียทำให้คุณสมบัติของน้ำเสียที่ได้มีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ TCOD ของน้ำเสียเพียงอย่างเดียว ดังนั้นเมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบสูงขึ้นจุลินทรีย์ในระบบจึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เข้าระบบได้มากขึ้น และการเติมตะกอนดีแคแเตอร์ในน้ำเสียยังสามารถช่วยปรับคุณสมบัติของวัสดุผสมในส่วนของอัตราส่วน TCOD:TKN ให้มีค่าใกล้เคียงกับความต้องการของจุลินทรีย์ในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนคือ 100:1.1 (Souza, 1986 และ McCarty, 1964) จึงส่งผลให้จุลินทรีย์ในระบบมีการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ได้มากขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เข้ามาในระบบในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้จุลินทรีย์ในระบบสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้มากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด COD<sub>settle</sub> ที่ได้สูง แต่การหมักร่วมจะทำให้ น้ำเสียที่เข้าระบบมีปริมาณของ TS สูง ผลที่ตามมาคือจะต้องใช้ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียในระบบนานขึ้นจึงจะมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD<sub>settle</sub> ได้ดี เนื่องจากตัวตะกอนดีแคแเตอร์มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากจากการเปรียบเทียบสัดส่วน SCOD/TCOD ของตะกอนดีแคแเตอร์มีค่าประมาณ 20.2 และอาจจะมีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากจำพวกลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบด้วย เนื่องจากวัสดุที่ใช้หมักร่วมคือตะกอนดีแคแเตอร์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มของโรงงานน้ำมันปาล์มดิบการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าวจะต้องอาศัยจุลินทรีย์ที่เฉพาะเจาะจง (จิรวุฒน์ ชาลีวรรณ, 2546 อ้างถึงในสมฤดี ฤทธิ์ยากุล, 2551) และโดยทั่วไปจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายก่อนจึงจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยยาก ทำให้จุลินทรีย์ในระบบต้องใช้ระยะเวลานานขึ้นในการย่อยสลายสารอินทรีย์จำพวกนี้ เพราะหากลดระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียเป็น 10 วัน อย่างเช่นในการทดลองนี้ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เก็บต่ำสุดของการทดลองผลที่เกิดขึ้นพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด COD<sub>settle</sub> มีค่าต่ำสุดเนื่องจากระบบเกิดสภาพ Over load เพราะมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบในปริมาณมากเกินไปและไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ทันเพราะต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายวัสดุหมักร่วม และเมื่อทำการทดลองโดยลดระยะเวลาการกวนผสมของการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคแเตอร์เป็น 12 ชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดเฉลี่ยสูงสุดที่ได้เท่ากับ 93.9% ที่ระยะเวลาที่เก็บ 30 วัน จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัด COD<sub>settle</sub> มีค่าลดลง เนื่องจากการลดระยะเวลาการกวนผสมจะส่งผลให้ความสามารถในการสัมผัสสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบเกิดขึ้นได้ไม่ดีผลที่ตามมาคือประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้การลดระยะเวลาการกวนผสมทำให้สภาวะต่างๆ ที่เกิดขึ้นใน

ระบบ เช่น พีเอช, Alkalinity และ VFA เป็นต้น ไม่มีความสมดุลทั่วทั้งถังปฏิกรณ์ส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพของระบบลดลง ดังนั้นจึงทำให้การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD<sub>settle</sub> สูงสุด และสอดคล้องกับอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัด COD<sub>settle</sub> เป็นตัวบ่งชี้ถึงการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพ โดยประสิทธิภาพการบำบัด COD<sub>settle</sub> เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ทั้งการหมักร่วมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด COD<sub>settle</sub> ช่วงสภาวะคงที่ของระยะเวลาที่เก็บ 10, 20 และ 30 วัน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง

#### 4) การบำบัดของแข็งทั้งหมด (Total Solid: TS) และของแข็งระเหยได้ (Volatile Solid: VS)

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้ง 3 ระยะเวลาที่เก็บ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่า การทดลองหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัด TS และ VS ของการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ที่ระยะเวลาที่เก็บ 20 และ 30 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกันคือ TS เท่ากับ 38.5 และ 36.4% ส่วน VS เท่ากับ 51.1 และ 47.4% เนื่องจากระยะเวลาที่ใช้นานพอที่จุลินทรีย์จะสามารถย่อยสลาย TS และ VS ที่เข้ามาในระบบได้และการใช้ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย 20 และ 30 วัน อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าระบบมีความแตกต่างกันไม่มากนักจึงทำให้จุลินทรีย์ในระบบสามารถที่จะย่อยสลาย TS และ VS ได้ไม่แตกต่างกัน และเมื่อทำการทดลองโดยลดระยะเวลาการกวนผสมของการหมักร่วมเป็น 12 ชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด TS และ VS มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการหมักร่วมกวนผสม 24 ชั่วโมง เนื่องจากการลดระยะเวลาการกวนผสมจุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับ TS และ VS ในระบบได้

น้อยลงและเกิดการแยกชั้นของวัสดุหมัก โดยตะกอนที่หนักจะตกตะกอนอยู่ด้านล่างส่วนตะกอนที่เบาจะถูกก๊าซชีวภาพดันให้ลอยตัวอยู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัด TS และ VS ที่ได้จากการทดลองที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 และ 30 วัน มีค่าต่ำกว่าการหมักรวมกวนผสม 24 ชั่วโมงเล็กน้อย ซึ่ง TS บำบัดได้เท่ากับ 37.3 และ 36.1% ส่วน VS บำบัดได้เท่ากับ 51.1 และ 47.4% อาจเป็นเพราะว่าถึงแม้จะลดระยะเวลาการกวนผสมแต่จุลินทรีย์ในระบบยังสามารถย่อยสลาย TS และ VS ได้ที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 และ 30 วัน แต่จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อลดระยะเวลาพักเก็บเป็น 10 วัน ของการหมักรวมกวนผสม 12 ชั่วโมง ที่มีประสิทธิภาพการบำบัด TS และ VS ต่ำสุดเท่ากับ 14.7 และ 21.2% และต่ำกว่าการหมักรวมกวนผสม 24 ชั่วโมง ซึ่งบำบัดได้เท่ากับ 30.9 และ 31.2% เนื่องจากระบบมีปริมาณ TS และ VS เข้าระบบสูงสุด โดยประสิทธิภาพการบำบัด TS และ VS ของน้ำเสียออกจากระบบทั้งการหมักรวมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA

##### 5) สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) และกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid: VFA)

ค่า Alkalinity เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบ หากระบบมีค่า Alkalinity สูง แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูงทำให้สามารถรักษาค่าพีเอชของระบบให้มีความคงตัวได้นานเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของพีเอช แต่หากค่า Alkalinity ของระบบต่ำ แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำส่งผลให้ไม่สามารถรักษาค่าพีเอชของระบบให้มีความคงตัวได้ ทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง และหากค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของระบบจะส่งผลให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนไม่สามารถทำงานได้ จากการทดลองทั้ง 3 ระยะเวลาพักเก็บ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าการหมักรวมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคแตรกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง มีค่า Alkalinity ของน้ำเสียออกจากระบบสูง เนื่องจากการหมักโดยใช้น้ำเสียร่วมกับตะกอนดีแคแตรจะทำให้คุณสมบัติของวัสดุหมักมีค่าพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบประมาณ 6 จึงทำให้ต้องมีการเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) มากในการปรับค่าพีเอชเพื่อให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการหมักแบบไร้ออกซิเจน (6.8-7.2) นอกจากนั้นในระบบมีปริมาณไนโตรเจนบางส่วนมากเกินความต้องการของจุลินทรีย์จะเปลี่ยนมาสะสมอยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3\text{-N}$  หากอยู่ในระดับที่เหมาะสมสามารถลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้ จากการที่แอมโมเนียไอออนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเกิดเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตช่วยควบคุมสมดุลของค่าพีเอชและสร้างกำลังบัฟเฟอร์ให้กับระบบได้ และที่ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน ของการหมักรวมกวนผสม 12 ชั่วโมง ค่า Alkalinity ของน้ำเสียออกจากระบบสูงกว่าการหมักรวมกวนผสม 24 ชั่วโมง เนื่องจากมีการสะสมของ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ในระบบสูงกว่าจะเห็นได้จากค่า  $\text{NH}_3\text{-N}$  ของน้ำเสียออกจากระบบการหมักรวมกวนผสม 12 ชั่วโมง สูงกว่าการหมักรวมกวนผสม 24 ชั่วโมง และการหมักรวมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง มีค่า Alkalinity ของน้ำเสียออกจากระบบอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนคือ 1,000-5,000 mg/l as  $\text{CaCO}_3$  (Osman and Delia, 2005) ซึ่งที่ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน ของการหมักรวมกวนผสม 12 ชั่วโมง สูงกว่าค่าที่แนะนำเล็กน้อย (5,045 mg/l as  $\text{CaCO}_3$ ) แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ (ตารางที่ 3.4)

ในส่วนของปริมาณ VFA ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบได้ว่ามีความสมดุลในการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างกรดและจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน โดยถ้าระบบมีปริมาณ VFA สะสมอยู่มากจะเป็นอันตรายต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน และทำให้ระบบเกิดการล้มเหลวได้ (Forday and Greenfield, 1982) ซึ่งปริมาณ VFA ช่วงที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนคือ 50-500 mg/l as  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (Halbert, 1981) จากการวิเคราะห์ปริมาณ VFA ทั้ง 3 ระยะเวลาพักเก็บ พบว่า การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 ชั่วโมง มีค่า VFA ของน้ำเสียออกจากระบบสูงกว่าการหมักร่วมกวนผสม 12 ชั่วโมง เนื่องจากการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์ทำให้ น้ำเสียที่เข้าระบบมี VFA สูงและมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบสูงจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดจึงย่อยสลายสารอินทรีย์เป็น VFA ได้สูงทำให้มี VFA ในระบบสูง และการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 ชั่วโมง ส่งผลให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดสามารถสัมผัสและย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็น VFA ได้สูงกว่าการหมักร่วมกวนผสม 12 ชั่วโมง ทำให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนยังสามารถย่อยสลาย VFA เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้สูงกว่าการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 12 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการบำบัด  $\text{COD}_{\text{settle}}$  และอัตราการเกิดก๊าซมีเทน ผลจากการวิเคราะห์ค่า VFA ทั้งการหมักร่วมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง พบว่า อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน ยกเว้นที่ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน ของการหมักร่วมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง ที่ค่า VFA ของระบบ (1,158 และ 1,250 mg/l as  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) สูงกว่าช่วงที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนคือ 50-500 mg/l as  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (Halbert, 1981) (ตารางที่ 3.4) เนื่องจากระบบไม่สามารถรองรับปริมาณสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นสูงสุดในการทดลองได้ จึงทำให้ระบบเกิดสภาพ Over load และจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบบางส่วนถูกดึงออกจากถังหมัก (Wash out) ในอัตราที่เร็วกว่าการเพิ่มจำนวนขึ้น ทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ในระบบลดลงเรื่อยๆ จนในที่สุดการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนน้อยกว่าชนิดสร้างกรดและไม่สามารถเปลี่ยน VFA ในระบบที่เกิดจากการผลิตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดได้ทันจึงทำให้เกิดการสะสมของ VFA เพิ่มขึ้นในระบบ ส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบลดลงและเกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน (Methanogenesis) (Panyue *et al.*, 2008) ทำให้มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำ การเพิ่มขึ้นของ VFA เกิดขึ้นเมื่อลดระยะเวลาพักเก็บซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของชญาบุช แสงวิเชียร (2554) และ Choorit (2007) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มพบว่า เมื่อลดระยะเวลาพักเก็บจะทำให้มี VFA เกิดการสะสมเพิ่มขึ้นในระบบ

จากผลการทดลองเมื่อนำมาหาค่าอัตราส่วนของ VFA/Alkalinity ซึ่งเป็นค่าที่มีความสำคัญต่อการควบคุมระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากเป็นค่าที่บ่งบอกถึงกำลังบัฟเฟอร์ของระบบ โดยค่า VFA/Alkalinity ที่มีความเหมาะสมในการเดินระบบแบบไร้ออกซิเจนอยู่ในช่วง 0.4-0.8 (สุภกิจ ดีโสภา, 2545) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ VFA/Alkalinity ทั้งการหมักร่วมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง พบว่า แนวโน้มที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับค่า VFA ของระบบ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่า การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง ที่ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน อัตราส่วน VFA/Alkalinity ที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากมีปริมาณ VFA และค่า Alkalinity สูง และการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 ชั่วโมง สูง



กว่า 12 ชั่วโมง เนื่องจากมีปริมาณ VFA สูงแต่ค่า Alkalinity ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งทั้ง 3 ระยะเวลาที่เก็บ มีอัตราส่วน VFA/Alkalinity อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของการเดินระบบแบบไร้ออกซิเจน (ตารางที่ 3.4) แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูงเพียงพอแก่การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบ เนื่องจากอัตราส่วน VFA/Alkalinity หากมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าหากอัตราส่วน VFA/Alkalinity ที่เกิดขึ้นในระบบมีค่ามากกว่า 0.8 จะทำให้ระบบมีค่าพีเอชลดลงและอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนได้ (สุภกิจ ดีโสภา, 2545) โดยค่า Alkalinity VFA และอัตราส่วน VFA/Alkalinity ของน้ำเสียออกจากระบบ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ของการหมักรวมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA

ตารางที่ 3.4 ค่า Alkalinity, VFA, VFA/Alkalinity, NH<sub>3</sub>-N และ TKN ช่วงสภาวะคงที่ของระยะเวลาเก็บ 10, 20 และ 30 วัน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง

วัสดุหมัก	HRT (d)	Alkalinity (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )		VFA (mg/l as CH <sub>3</sub> COOH)		VFA/Alkalinity		NH <sub>3</sub> -N (mg/l)		TKN (mg/l)	
		inf	eff	inf	eff	inf	eff	inf	eff	inf	eff
Wastewater+ Decanter+Mix 24 hr	10	2,833	3,784	696	1,215	0.30	0.32	82	94	342	268
	20	2,356	3,085	637	296	0.32	0.09	90	120	307	321
	30	2,419	3,050	717	310	0.31	0.10	78	162	309	341
Wastewater+ Decanter+Mix 12 hr	10	4,867	5,045	561	1,250	0.15	0.25	112	168	424	294
	20	2,415	2,984	592	123	0.28	0.04	118	203	357	386
	30	1,116	3,094	548	117	0.52	0.04	100	217	361	369

## 6) แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen: $\text{NH}_3\text{-N}$ ) และเจตาห์ลไนโตรเจน (Total Kjeldah Nitrogen: TKN)

ปริมาณ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ที่มีในระบบเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนของวัสดุหมัก โดยไนโตรเจนที่มากเกินไปความต้องการของจุลินทรีย์จะถูกเปลี่ยนมาสะสมอยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3\text{-N}$  จึงทำให้เกิดการสะสมของ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ในระบบ จากการทดลองทั้ง 3 ระยะเวลาที่เก็บ (ตารางที่ 3.4) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 ชั่วโมง ปริมาณ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ที่เกิดขึ้นในระบบหมักมีค่าต่ำกว่าการหมักร่วมกวนผสม 12 ชั่วโมง เนื่องจากการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์ (100:2) ทำให้น้ำเสียที่เข้าระบบมีอัตราส่วน TCOD:TKN ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมในการหมักแบบไร้ออกซิเจน (100:1.1) (Souza, 1986 และ McCarty, 1964) ซึ่งจุลินทรีย์ที่ทำงานในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนมีความต้องการไนโตรเจนปริมาณน้อยในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่จึงทำให้นิโตรเจนปริมาณน้อยที่จะถูกเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ของน้ำเสียออกจากระบบมีค่าต่ำ นอกจากนั้นการหมักร่วมกวนผสม 24 ชั่วโมง จุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบได้มากกว่าการกวนผสมเพียง 12 ชั่วโมง ดังนั้นจุลินทรีย์ในระบบจึงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนได้มาก ทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบน้อยที่จะถูกเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3\text{-N}$  (สมฤดี ฤทธิ์ยากุล, 2551) จึงทำให้ปริมาณ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ของน้ำเสียออกจากระบบมีค่าต่ำกว่าการหมักร่วมกวนผสม 12 ชั่วโมง จากการศึกษาของ Sterling *et al.* (2001) พบว่า ปริมาณ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ที่จะส่งผลกระทบต่อระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนจะต้องมีความเข้มข้นมากถึง 100 mg/l ซึ่งจากการทดลองพบว่า ทั้งการหมักร่วมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง มีปริมาณ  $\text{NH}_3\text{-N}$  เกิดขึ้นในระบบหมักสูงกว่าค่าที่เหมาะสม ยกเว้นที่ระยะเวลาที่เก็บ 30 วัน ของการหมักร่วมกวนผสม 24 ชั่วโมง แต่ค่าที่เกิดขึ้นยังไม่เป็นพิษกับระบบ เนื่องจากความเข้มข้นของ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ที่เป็นพิษต่อระบบจะเกิดขึ้นตั้งแต่ 1,500 mg/l (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543)

สารอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นสารอาหารที่จุลินทรีย์ใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ โดยทั่วไป ปริมาณ TKN เมื่อเทียบกับ TCOD ในน้ำเสียของระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการอย่างน้อยควรมีอัตราส่วน TCOD:TKN เท่ากับ 100:1.1 (Souza, 1986 และ McCarty, 1964) และจากผลการวิเคราะห์ TKN พบว่า ปริมาณ TKN ในน้ำเสียเข้าระบบของการหมักโดยใช้น้ำเสียร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์กวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ระบบต้องการ เมื่อเทียบกับปริมาณ TKN ที่ระบบต้องการคิดเป็นอัตราส่วน TCOD:TKN ได้ประมาณ 100:2 และ 100:4

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของ TKN ทั้งการหมักร่วมกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณ TKN ในน้ำเสียออกจากระบบลดลงเมื่อเริ่มดำเนินการทดลอง เนื่องจากปริมาณ TKN ไม่ได้ถูกบำบัดออกจากระบบ แต่บางส่วนที่หายไปถูกนำไปใช้เป็นสารอาหารของจุลินทรีย์ในการสร้างเซลล์ใหม่และ TKN ถูกเปลี่ยนเป็น  $\text{NH}_3\text{-N}$  และในทางทฤษฎีแล้วการบำบัด TKN ไม่สามารถกระทำได้โดยอาศัยกระบวนการทางชีววิทยาแบบไร้ออกซิเจนเพียงอย่างเดียวแต่ต้องดำเนินการควบคู่กับกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจนร่วมด้วย (ธนาวัฒน์ ด่านวานิชกุล, 2548) โดยปริมาณ  $\text{NH}_3\text{-N}$  และ TKN ของน้ำเสียออกจากระบบ ทั้ง 2 การทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA

## 7) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ในการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบหมักทำได้โดยใช้หลักการแทนที่น้ำ ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ โดยอาศัย จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดและชนิดสร้างมีเทนทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองด้วยระบบ หมักแบบไร้ออกซิเจน พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่วัดได้ในแต่ละชุดการทดลองทั้ง 3 ระยะเวลา กักเก็บของการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียวรวม 24 ชั่วโมง มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ สูงสุดในช่วง 5 วันแรก และค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) โดยใช้ เวลาในการทดลอง 40 วัน การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์รวม 24 ชั่วโมง ให้ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงในช่วงแรกและค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่สภาวะคงที่ ใช้เวลาในการทดลอง 65 วัน และการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์รวม 12 ชั่วโมง ให้อัตราการผลิตก๊าซ ชีวภาพค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองจนเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งใช้เวลาในการทดลอง 86 วัน จากการ ทดลองจะพบว่า ในการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียวและการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอน ดีแคนเตอร์ รวม 24 ชั่วโมง ในช่วงแรกของการทดลองให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงเนื่องจาก ได้ดำเนินการทดลองต่อจากการเลี้ยงเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อน สารอินทรีย์เข้าระบบในช่วงแรกจุลินทรีย์จึงย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น โดยจะ ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยได้ง่ายก่อน หลังจากนั้นจึงจะดำเนินการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยได้ ยากจึงทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงแรกสูงและค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาการทดลอง และ สอดคล้องกับอัตราการลดลงของปริมาณสารอินทรีย์ในรูป  $\text{COD}_{\text{settle}}$  และ VFA

เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นช่วงระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่า ที่ ระยะเวลาเก็บ 10 วัน ของทั้ง 3 ชุดการทดลองให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด (ตารางที่ 3.6) เนื่องจากเป็นระยะเวลาเก็บต่ำสุดของการทดลองนี้ทำให้มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ สูงสุด ซึ่งการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียวรวม 24 ชั่วโมง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย สูงสุดเท่ากับ 0.33  $\text{V/d}$  เมื่อทำการหมักร่วมรวม 24 และ 12 ชั่วโมง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ ไกล่เคียงกันและมากกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการหมักร่วมทำให้น้ำเสียที่ เข้าระบบมีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าการใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียว โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 2.99 และ 3.00  $\text{V/d}$  ซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการบำบัด  $\text{COD}_{\text{settle}}$  และการ ลดลงของปริมาณ VFA ในระบบ

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของก๊าซมีเทนพบว่า ช่วงระบบเข้าสู่สภาวะคงที่การหมัก โดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียวรวม 24 ชั่วโมง องค์ประกอบของก๊าซมีเทนโดยเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 15.4% ที่ระยะเวลาเก็บ 30 วัน เมื่อทำการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคนเตอร์รวม 24 ชั่วโมง พบว่า องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพมีค่าสูงกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียง อย่างเดียว เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบหมักสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่เป็น VFA และ เปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนได้สูงซึ่งองค์ประกอบของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 64.5% ที่ ระยะเวลาเก็บ 20 วัน และเมื่อทำการทดลองโดยลดระยะเวลาการรวมของสารอินทรีย์เป็น 12 ชั่วโมง พบว่า องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพมีค่าลดลง เนื่องจากการลดระยะเวลาการ รวมส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้ไม่ดีเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็น VFA

ได้น้อยและเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนน้อยลงตามไปด้วย โดยองค์ประกอบของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 45.1% ที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 วัน ซึ่งจากการศึกษาของ Teodorita *et al.* (2008) พบว่าก๊าซชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้นั้นจะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 50-75% และจากผลการทดลองจะเห็นว่าองค์ประกอบของก๊าซมีเทนที่ได้สูงสุดจากการทดลองของการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคแตรกวนผสม 24 ชั่วโมง เท่านั้น ที่มีค่าอยู่ช่วงที่แนะนำ ซึ่งสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ VFA ที่ลดลง

ในส่วนของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลองที่ระยะเวลาพักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน พบว่า การทดลองหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคแตรกวนผสม 24 และ 12 ชั่วโมง มีแนวโน้มของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสอดคล้องกับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ การลดลงของปริมาณสารอินทรีย์ในรูป  $\text{COD}_{\text{settle}}$  และ VFA เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นช่วงระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่า ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน ของการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียวกวนผสม 24 ชั่วโมง สามารถผลิตก๊าซมีเทนโดยเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.04 l/d แต่เมื่อทำการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคแตรกวนผสม 24 ชั่วโมง สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียว ซึ่งเห็นผลที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการเกิดก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซมีเทนโดยก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.87 l/d ที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 วัน และเมื่อทำการลดระยะเวลา กวนผสมของการหมักร่วมเป็น 12 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่ำกว่าการหมักร่วมกวนผสม 24 ชั่วโมง ซึ่งเหตุผลที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการเกิดก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซมีเทนโดยก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.24 l/d ที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 วัน

เมื่อพิจารณาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน พบว่า ช่วงระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ของการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียวกวนผสม 24 ชั่วโมง ที่ระยะเวลาพักเก็บ 30 วัน มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 0.078 l  $\text{CH}_4/\text{g}$   $\text{TCOD}_{\text{added}}$  การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคแตรกวนผสม 24 ชั่วโมง ที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 วัน มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.292 l  $\text{CH}_4/\text{g}$   $\text{TCOD}_{\text{added}}$  และการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียกับตะกอนดีแคแตรกวนผสม 12 ชั่วโมง ที่ระยะเวลาพักเก็บ 30 วัน มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.202 l  $\text{CH}_4/\text{g}$   $\text{TCOD}_{\text{added}}$  ซึ่งค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพ องค์ประกอบของก๊าซมีเทน ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นของการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียวและใช้น้ำเสียหมักร่วมกับตะกอนดีแคแตรกวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA

จากการทดลองทั้ง 3 ชุดการทดลองพบว่า การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งกับตะกอนดีแคแตรกวนผสม 24 ชั่วโมง ปริมาณก๊าซชีวภาพ องค์ประกอบของก๊าซมีเทน ปริมาณก๊าซมีเทนและค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น สูงกว่าการหมักร่วมกวนผสม 12 ชั่วโมง และการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการหมักร่วมทำให้คุณสมบัติของวัสดุหมักร่วมที่ได้มีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นและช่วยปรับปรุงอัตราส่วน  $\text{TCOD}:\text{TKN}$  ให้มีความเหมาะสมต่อการหมักแบบไร้ออกซิเจน นอกจากนั้นการกวนผสมตลอดเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้จุลินทรีย์ในระบบสามารถสัมผัสและย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีในระบบได้อย่างทั่วถึงและสภาวะ

ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบมีความสมดุลทั่วทั้งถังปฏิกรณ์มากกว่าใช้ระยะเวลาควมผสมเพียง 12 ชั่วโมง เพราะตัววัสดุหมักร่วมที่เกิดขึ้นจากการเติมตะกอนดีแคนเตอร์มีปริมาณ TS เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการกวนผสมอย่างต่อเนื่องเพื่อลดปัญหาการแยกชั้น ของตัวตะกอนซึ่งเป็นสาเหตุให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบเกิดขึ้นได้ไม่ดีและมีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซมีเทน โดยการทดลองที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 วัน เป็นระยะเวลาพักเก็บที่ให้ผลดีที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพในการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งกับตะกอนดีแคนเตอร์ด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR เนื่องจากให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด  $0.292 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{added}}$  อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่สภาวะคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 2.89 และ  $1.87 \text{ l/d}$  ตามลำดับองค์ประกอบของก๊าซมีเทนเท่ากับ 64.5% และประสิทธิภาพในการบำบัด  $\text{COD}_{\text{settle}}$  เท่ากับ 93.4%

จากการศึกษาของ Luostarinen *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษากาหมักตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียร่วมกับตะกอนไขมันพบว่า การหมักโดยใช้ตะกอนน้ำเสียเพียงอย่างเดียวจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพลดลง แต่มีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาพักเก็บ เช่นเดียวกับการทดลองนี้เมื่อหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวโดยใช้ระยะเวลาพักเก็บมากขึ้นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง แต่มีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับงานวิจัยของชญาช แซงวิเชียร (2554) ที่ศึกษาการเกิดก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมยางด้วยกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนจากถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพลดลง แต่มีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาพักเก็บ โดยศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้สูงสุดเท่ากับ  $0.210 \text{ l CH}_4/\text{g COD}_{\text{removal}}$  ซึ่งต่ำกว่าการทดลองนี้ อาจเนื่องมาจากการใช้ค่า COD ในการคำนวณ ลักษณะน้ำเสียและระบบที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gebauer (2004) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากสลัดจ์ของฟาร์มเลี้ยงปลาด้วยระบบไร้ออกซิเจนที่สภาวะมีโซฟิลิกด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้เท่ากับ  $0.184 \text{ l CH}_4/\text{g COD}_{\text{added}}$  ซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองนี้ ในส่วนของการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียวแต่เมื่อเทียบกับการหมักร่วมค่าที่ได้ต่ำกว่าการทดลองนี้ ส่วนงานวิจัยของธนาวัฒน์ ด่านวานิชกุล (2554) ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารในถังหมักแบบ CSTR พบว่า ที่ระยะเวลาพักเก็บมากขึ้นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพก๊าซมีเทน ประสิทธิภาพในการบำบัดและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้ลดลง โดยศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้สูงสุดเท่ากับ  $0.286 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{removal}}$  ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้และมีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่สูงกว่าเนื่องจากการใช้ค่า COD ในการคำนวณและลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกัน

จากการทดลองศึกษาระยะเวลาพักเก็บที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวควมผสม 24 ชั่วโมง และการหมักร่วมโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวมผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง เติระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ผลการทดลองพบว่า

1) สภาพแวดล้อมในการทำงานของระบบเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า ที่ระยะเวลาพักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน ของการหมักโดยใช้น้ำเสียร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์กวมผสม 24 ชั่วโมง อุณหภูมิของระบบอยู่ในช่วง  $25.5\text{-}29.5^{\circ}\text{C}$  ค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.9-7.1 ค่า Alkalinity

เฉลี่ยอยู่ในช่วง 3,019-3,669 mg/l as CaCO<sub>3</sub> ค่า VFA เฉลี่ยอยู่ในช่วง 301-1,158 mg/l as CH<sub>3</sub>COOH ค่า VFA/Alkalinity เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.01-0.31 ค่า NH<sub>3</sub>-N เฉลี่ยอยู่ในช่วง 94-162 mg/l และค่า TKN เฉลี่ยอยู่ในช่วง 268-341 mg/l และการหมักโดยใช้น้ำเสียร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง อุณหภูมิของระบบอยู่ในช่วง 27.0-31.5°C ค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.0-7.2 ค่า Alkalinity เฉลี่ยอยู่ในช่วง 3,094-5,045 mg/l as CaCO<sub>3</sub> ค่า VFA เฉลี่ยอยู่ในช่วง 117-1,250 mg/l as CH<sub>3</sub>COOH ค่า VFA/Alkalinity เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.04-0.25 ค่า NH<sub>3</sub>-N เฉลี่ยอยู่ในช่วง 168-217 mg/l และค่า TKN เฉลี่ยอยู่ในช่วง 294-386 mg/l

2) ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า ที่ระยะเวลา กักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน ของการหมักโดยใช้น้ำเสียร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการบำบัด COD<sub>settle</sub> อยู่ในช่วง 71.2-94.5% TS อยู่ในช่วง 17.9-37.4% และ VS อยู่ในช่วง 31.2-50.1% และการหมักโดยใช้น้ำเสียร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการบำบัด COD<sub>settle</sub> อยู่ในช่วง 51.0-93.9% TS อยู่ในช่วง 14.7-37.3% และ VS อยู่ในช่วง 21.2-51.8%

3) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน ของการหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียว กวนผสม 24 ชั่วโมง ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.14-0.33 l ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.02-0.04 l องค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 9.9-15.4% และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.055-0.078 l CH<sub>4</sub>/g TCOD<sub>added</sub> การหมักร่วม กวนผสม 24 ชั่วโมง มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.85-2.99 l ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.18-1.87 l องค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 51.9-64.5% และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.131-0.292 l CH<sub>4</sub>/g TCOD<sub>added</sub> และการหมักร่วม กวนผสม 12 ชั่วโมง มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.94-3.00 l ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.71-1.24 l องค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 23.5-45.1% ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.055-0.202 l CH<sub>4</sub>/g TCOD<sub>added</sub>

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ระหว่างการหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวและใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง

Waste	HRT (d)	*OLR (kg TCOD /m <sup>3</sup> /d)	**Average biogas production (l/d)	*Maximum biogas production (l/d)	**Average methane production (l/d)	*Maximum methane production (l/d)	**Average methane (%)	*Maximum methane (%)	**Methane yield (l CH <sub>4</sub> /g TCOD <sub>added</sub> )
Wastewater	10	0.07	0.33	0.70	0.04	0.26	9.9	37.3	0.055
Wastewater + Decanter+Mix 24 hr		1.38	2.99	5.50	1.58	3.12	51.9	60.2	0.131
Wastewater + Decanter+Mix 12 hr		1.33	3.00	3.83	0.71	1.24	23.5	45.0	0.055
Wastewater	20	0.03	0.17	0.35	0.02	0.14	10.7	38.8	0.057
Wastewater + Decanter+Mix 24 hr		0.71	2.89	3.53	1.87	2.29	64.5	66.7	0.292
Wastewater + Decanter+Mix 12 hr		0.71	2.79	3.66	1.24	2.44	45.1	66.8	0.183
Wastewater	30	0.02	0.14	0.26	0.02	0.07	15.4	39.9	0.078
Wastewater + Decanter+Mix 24 hr		0.48	1.85	2.35	1.18	1.46	63.5	67.4	0.286
Wastewater + Decanter+Mix 12 hr		0.47	1.85	2.44	0.87	1.32	44.1	65.4	0.202

หมายเหตุ : \* ค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นตลอดการทดลอง

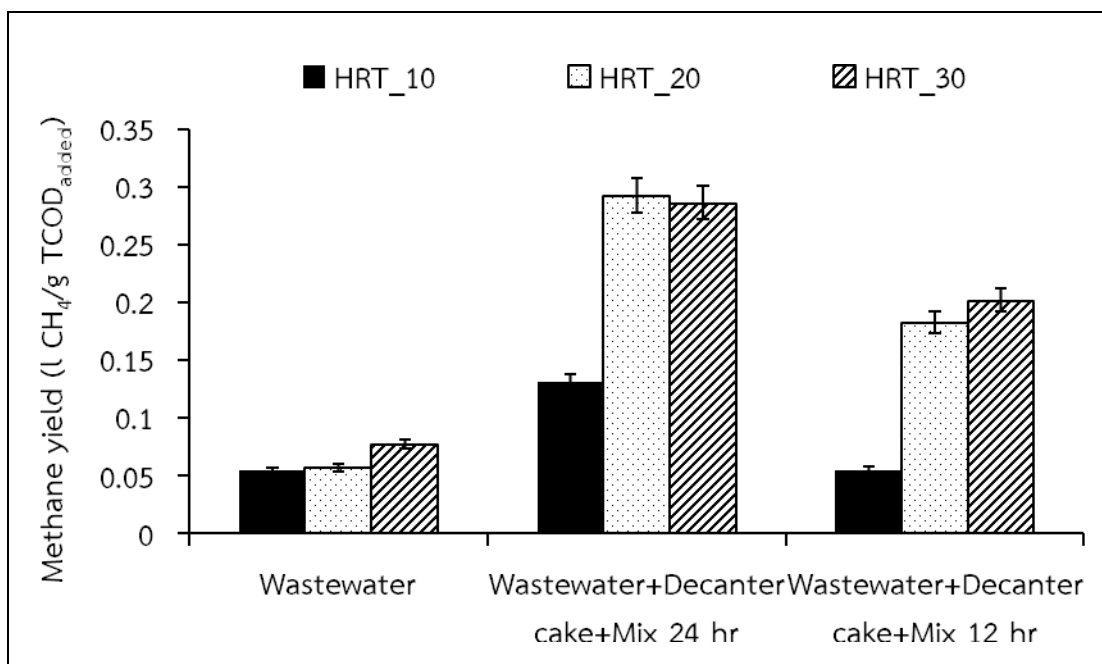
\*\*ค่าเฉลี่ยช่วงสภาวะคงที่



### 3.3 สรุปผลการทดลองระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ของการหมักตะกอนดีแคนเตอร์ร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง การทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง และการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ระยะเวลาการกวน 12 ชั่วโมง โดยทั้ง 3 การทดลองดำเนินการหมักแบบไร้ออกซิเจนทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) ที่ระยะเวลาพักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน พบว่า การทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง ให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ  $0.078 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{added}}$  การทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง ให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ  $0.292 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{added}}$  และการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ระยะเวลาการกวน 12 ชั่วโมง ให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ  $0.202 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{added}}$  (รูปที่ 3.6) และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้ง 3 การทดลอง ที่สถานะคงที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) จากการใช้สถิติแบบ One-way ANOVA

เมื่อเปรียบเทียบค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากทฤษฎีคือ  $0.395 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{removal}}$  (Speece, 1996 อ้างถึงใน Bishop, 2010) พบว่า การทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้สูงสูดน้อยกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี เนื่องจากวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากสูง ดังนั้นจึงทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบได้หมดและสารอินทรีย์ส่วนหนึ่งถูกใช้ไปในการสร้างเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ และน้อยกว่างานวิจัยของ พรพิมล (2554) ที่ได้ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ  $0.530 \text{ l CH}_4/\text{g SCOD}_{\text{removal}}$  แต่สูงกว่างานวิจัยของ Beatriz *et al.* (2012) ที่ได้ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ  $0.285 \text{ l CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$  เนื่องจากวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบต่างกัน และใช้  $\text{TCOD}_{\text{added}}$  ในการคำนวณแทน  $\text{SCOD}_{\text{removal}}$  และ  $\text{TCOD}_{\text{removal}}$  ดังนั้นจึงทำให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้มีค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนช่วงสภาวะคงที่ของระยะเวลาเก็บ 10, 20 และ 30 วัน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวและใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง

สรุปผลการทดลองพบว่า การทดลองโดยใช้ระยะเวลาเก็บและระยะเวลาการกวนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์คือ ที่ระยะเวลาเก็บ 20 วัน ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง เนื่องจากที่ระยะเวลาเก็บ 20 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 2.88 Vd โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ 64.6% สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด 1.86 Vd และให้ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 0.292 l CH<sub>4</sub>/g TCOD<sub>added</sub> ซึ่งสูงกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ที่ระยะเวลาการกวน 12 ชั่วโมง ประมาณ 1.4 เท่า และสูงกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว ที่ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง ประมาณ 3.7 เท่า เนื่องจากการหมักร่วมทำให้วัสดุหมักมีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นและช่วยปรับอัตราส่วน TCOD:TKN ให้อยู่ในระดับที่จุลินทรีย์ในระบบต้องการและการกวนผสม 24 ชั่วโมง ทำให้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบสามารถสัมผัสกับปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบได้มากขึ้น สภาวะที่เกิดขึ้นในระบบมีความสมดุลทั่วทั้งถังปฏิกรณ์และมีความเหมาะสมต่อระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดและชนิดสร้างมีเทนในระบบมีความสมดุลกัน ดังนั้นเมื่อจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบมากขึ้น จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนก็สามารถนำกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดสร้างขึ้นเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การกวนผสมยังช่วยในเรื่องของการลดขนาดถังหมักเพราะสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดีที่ระยะเวลาเก็บน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ระยะเวลาเก็บ 30 วัน และในส่วนของระยะเวลาเก็บต้องมีความเหมาะสมต่อการหมักแบบไร้ออกซิเจน เพราะ

หากใช้ระยะเวลาที่เก็บน้อยเกินไปอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เข้าระบบจะมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบในปริมาณมากเกินไปทำให้เกิดสภาพ Over load และจุลินทรีย์บางส่วนถูกดึงออกจากถังหมัก (Wash out) ในอัตราที่เร็วกว่าจุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนขึ้น จึงทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ในระบบลดลงเรื่อยๆ จนในที่สุดการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนน้อยกว่าชนิดสร้างกรดและไม่สามารถเปลี่ยน VFA ที่เกิดจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดผลิตขึ้นในระบบได้ทันจึงทำให้เกิดการสะสมของ VFA เพิ่มขึ้นในระบบ จากสภาวะความไม่สมดุลของจุลินทรีย์ที่สร้างกรดและจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนในระบบ จึงทำให้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นในระบบเป็นก๊าซมีเทนได้น้อยลง หากใช้ระยะเวลาที่เก็บมากเกินไปก็มีผลต่อการหมักแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาที่เก็บจะทำให้มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยและจุลินทรีย์อยู่ในระบบนานทำให้ต้องใช้พลังงานในการดำรงชีวิต ดังนั้นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายนำไปใช้เป็นพลังงาน ทำให้จุลินทรีย์มีการสร้างเซลล์ใหม่น้อยลง จึงทำให้ความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนน้อยลงตามไปด้วย

### 3.4 การประเมินทางด้านค่าพลังงานที่ได้จากการใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวกับใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคแเตอร์

การประเมินทางด้านพลังงาน เพื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากการใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวกับใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคแเตอร์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

#### 1) ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง

จากการศึกษาข้อมูลปริมาณน้ำเสียของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งพบว่า ให้กำลังการผลิตประมาณ  $5 \times 10^5$  ton/year น้ำเสียที่เกิดขึ้น  $31 \text{ m}^3/\text{ton}$  ทำให้เกิดน้ำเสียประมาณ  $1.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{year}$  (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2544 และกรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

ดังนั้น จะมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด

$$\begin{aligned} &= 1.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{year} \times 1,000 \text{ l} \\ &= 15 \times 10^9 \text{ l/year} \end{aligned}$$

#### 2) ปริมาณตะกอนดีแคแเตอร์ที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม

โดยจากการศึกษาข้อมูลของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจะมีปริมาณทะลายปาล์มสดที่เข้ากระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มประมาณ  $6.4 \times 10^6$  ton/year (The Centre for Agricultural Information and Regional Offices of Agricultural Economics, 2007) จากการศึกษานี้ของ Chavalparit *et al.* (2006) พบว่า ปริมาณตะกอนดีแคแเตอร์ที่เกิดขึ้นในโรงงานประมาณ 4.2% หรือ 42 kg/ton ของทะลายปาล์มสด

ดังนั้น จะมีปริมาณตะกอนดีแคแเตอร์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด

$$\begin{aligned} &= 6.4 \times 10^6 \text{ ton/year} \times 4.2\% \\ &= 26.9 \times 10^4 \text{ ton/year} \\ &= 26.9 \times 10^7 \text{ kg/year} \end{aligned}$$

### 3) อัตราส่วนตะกอนดีแคนเตอร์กับน้ำเสียที่ใช้ในการหมัก

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนตะกอนดีแคนเตอร์ 10 g หรือ 0.01 kg ต่อน้ำเสีย 180 ml หรือ 0.18 l

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ตะกอนดีแคนเตอร์ } 0.01 \text{ kg} & \quad \text{ใช้น้ำเสียในการหมัก } 0.18 \text{ l} \\ \text{ตะกอนดีแคนเตอร์ } 26.9 \times 10^7 \text{ kg} & \quad \text{ใช้น้ำเสียในการหมัก} \\ & = \frac{(26.9 \times 10^7 \text{ kg} \times 0.18 \text{ l})}{0.01 \text{ kg}} \\ & = 48.4 \times 10^8 \text{ l} \end{aligned}$$

### 4) ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมัก

- จากการทดลองหมักน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำเสีย 0.18 l ต่อตะกอนดีแคนเตอร์ 0.01 kg ด้วยระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน เติบระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 2.89 V/d โดยใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ 0.5 V/d

ดังนั้น ปริมาณวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง =  $48.4 \times 10^8$  V/year  
สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้

$$\begin{aligned} & = \frac{\text{ปริมาณวัสดุหมัก} \times \text{อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ}}{\text{อัตราการป้อนสารอินทรีย์}} \\ & = \frac{48.4 \times 10^8 \text{ (V/year)} \times 2.89 \text{ (V/d)}}{0.5 \text{ (V/d)}} \\ & = 28 \times 10^9 \text{ V/year} \\ & = 28 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year} \end{aligned}$$

- จากการทดลองหมักโดยใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียวด้วยระบบหมักไร้ออกซิเจน เติบระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.17 V/d โดยใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ 0.5 V/d

ดังนั้น ปริมาณวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง =  $48.4 \times 10^8$  V/year  
สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้

$$\begin{aligned} & = \frac{\text{ปริมาณวัสดุหมัก} \times \text{อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ}}{\text{อัตราการป้อนสารอินทรีย์}} \\ & = \frac{48.4 \times 10^8 \text{ (V/year)} \times 0.17 \text{ (V/d)}}{0.5 \text{ (V/d)}} \\ & = 16.5 \times 10^8 \text{ V/year} \\ & = 16.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year} \end{aligned}$$



## บทที่ 4

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 บทสรุป

จากการทดลองเพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลองคือ การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 3 เป็นการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง และชุดการทดลองที่ 4 เป็นการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ใช้ระยะเวลาการกวน 12 ชั่วโมง โดยการทดลองที่ 2-4 การทดลองดำเนินการหมักแบบไร้ออกซิเจนทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) ที่ระยะเวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์สูงกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว โดยอัตราส่วนที่ใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งปริมาณ 180 ml หมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ 10 g ที่อุณหภูมิ  $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$  เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการหมักแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากมีค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ  $0.351 \text{ l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{removal}}$  โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD, SCOD, TS และ VS เท่ากับ 76.18, 83.55, 43.16 และ 56.79% ตามลำดับ

2) เปรียบเทียบการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวและใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสมที่ 24 และ 12 ชั่วโมง ที่ระยะเวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน การทดลองโดยใช้ระยะเวลา กักเก็บและระยะเวลาการกวนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพของการใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์คือ ที่ระยะเวลากักเก็บ 20 วัน ใช้ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง เนื่องจากสามารถการผลิตก๊าซชีวภาพได้ 2.88  $\text{V/d}$  องค์ประกอบของก๊าซมีเทน 64.6% ผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด 1.86  $\text{V/d}$  และมีค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 0.292  $\text{l CH}_4/\text{g TCOD}_{\text{added}}$  ซึ่งสูงกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ ที่ระยะเวลาการกวน 12 ชั่วโมง ประมาณ 1.4 เท่า และสูงกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว ที่ระยะเวลาการกวน 24 ชั่วโมง ประมาณ 3.7 เท่า

3) การประเมินทางด้านพลังงาน การหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์สามารถเปลี่ยนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้  $19 \times 10^9$  MJ/year ส่วนการหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวสามารถเปลี่ยนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้  $48 \times 10^6$  MJ/year ซึ่งจากการประเมินทางด้านพลังงานของการหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์สามารถเปลี่ยนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้มากกว่าการหมักโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียวประมาณ 26 เท่า

#### 4.2 ข้อเสนอแนะ

1) จากการทดลองพบว่าการใช้ตะกอนดีแคนเตอร์หมักร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งสามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ จึงควรมีการนำตะกอนดีแคนเตอร์หมักร่วมกับน้ำเสียประเภทที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูง เช่น โรงงานปลากระป๋อง เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุหมักให้มีความเหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพและเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของวัสดุหมักร่วมได้เพิ่มขึ้น

2) การนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต ควรมีการพัฒนาการทดลองเป็นแบบระบบบำบัดระดับโรงงานนำร่อง (Pilot plant) โดยนำผลของสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงาน

3) ควรมีการทดลองนำตะกอนดีแคนเตอร์ไปทำการบำบัดเบื้องต้น เช่น การใช้ความร้อน การใช้กรดหรือด่าง เป็นต้น ก่อนดำเนินการหมักแบบไร้ออกซิเจน เพื่อช่วยให้จุลินทรีย์ในระบบสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ง่ายและเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้เพิ่มขึ้น

### บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. *แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษอุตสาหกรรมอาหารทะเล*  
*แซ่เยือกแข็ง: ประเภทปลา. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สถาบัน*  
*สิ่งแวดล้อมไทย. กรุงเทพฯ: ม.ป.ท.*
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.  
 2548. *ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม*  
*แห่งประเทศไทย.*
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. *โครงการศึกษาเพื่อประเมินปริมาณสารมลพิษอุตสาหกรรมทางน้ำ*  
*จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย. ม.ป.ท.*
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. พลังงานก๊าซชีวภาพ. ม.ป.ป.  
[http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com\\_content&view=article&id=141&Itemid=122&lang=th](http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=141&Itemid=122&lang=th). (สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2555).
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. *วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: มิตร*  
*นราการพิมพ์.*
- เครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย. 2550. ทฤษฎีแก๊สชีวภาพ. ม.ป.ป.  
<http://teenrt.chiangmai.ac.th.htm>. (สืบค้นเมื่อ 30 พฤษภาคม 2550).
- จิรวัดน์ ชาลีวรรณ. 2546. ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบไร้ออกซิเจนอัตราการย่อยสูงของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง. วิศวกรรม  
 ศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์,  
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- \_\_\_\_\_. 2546. ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบไร้ออกซิเจนอัตรา  
 การย่อยสูงของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง. วิศวกรรมศาสตร  
 มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.  
 อ้างถึงใน สมฤดี ฤทธิ์ยากุล, 2551. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและผลพลอยได้จากการ  
 หมักมูลสุกรร่วมกับสาหร่ายหนามจากทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
 , สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม ,  
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.



จำเป็น อ่อนทอง. 2547. *คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช*. พิมพ์ครั้งที่ 2. ม.ป.ท.

ชญาณุช แสงวิเชียร. 2554. การเกิดก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมยางด้วยกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนจากถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธนาคารแห่งประเทศไทย. 2544. สถิติเศรษฐกิจและการเงิน. ตุลาคม.

ธนาวัฒน์ ด่านวานิชกุล. 2554. จลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอาหารในถังหมักแบบกวนสมบูรณ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ธนาวัฒน์ รักกมล. 2548. ประสิทธิภาพของระบบบำบัดเอเอสปีอาร์ แบบเทอร์โมฟิลิกและมีโซฟิลิกในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธีระพงศ์ จันทนิยม. 2551. กระบวนการไร้ของเสียในอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม. *วารสารหาดใหญ่วิชาการ* ปีที่ 6(2): 159-164.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. *การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมแห่งประเทศไทย.

นันทน์ภัส ชันธวัราพันธ์ชัย. 2552. ผลของอุณหภูมิและการบำบัดเบื้องต้นต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นิลวรรณ ไชยหนูและพฤกษ์ อักกะรังสี. 2552. ต้นแบบของการใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องในสถานะเทอร์โมฟิลิกสำหรับบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย* ครั้งที่ 23.

นุกูล อินทระสังขา, มาลี แก้วชนิด, ปนัดดา พรหมรักษ์ และธวัชชัย เทพนวล. 2546. ปัญหาน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมชีวภาพในจังหวัดสงขลาและจังหวัดพัทลุง. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ* ปีที่ 6(1): 54-64

พรพิมล วาสนามงคล. 2554. กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรและกลีเซอรอลดิบ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เพ็ญศิริ ประชาภิตติกุล. 2551. ผลของอุณหภูมิและสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วราภรณ์ แสงหล่อ. 2549. การบำบัดน้ำเสียจากน้ำชะกากตะกอนโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยระบบบำบัดแบบยูเอเอสพีและแอนแอโรบิคเอสปีอาร์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วริญญา บุญรัตพันธ์. 2551. การทดสอบประสิทธิภาพถังคั้ดพันธุ์เพื่อปรับปรุงระบบบำบัดแอกติเวเต้ดสลัดจ์ในโรงงานอาหารทะเลแช่แข็ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วิภารัตน์ ชัยเพชร. 2551. การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทะเลกระป๋องโดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนในถังสร้างกรดแบบไร้อากาศและถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสพี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วีระศักดิ์ ทองลิ้มปี. 2540. การบำบัดน้ำเสียของโรงงานอาหารทะเลแช่แข็งโดยวิธีเอสปีอาร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ศูนย์สถิติการเกษตร. 2555. *ผลพยากรณ์การผลิตพืชไร่ ไม้ยืนต้นและไม้ผลที่สำคัญ ปี 2555*. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2551. โครงการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในรูปแบบการหมักย่อยร่วมโดยถังปฏิกรณ์ UASB และ CSTR เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทยและ World Environmental Center. 2535. *คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สินิจนันท์ เสียงเสนาะ. 2553. ผลของอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนปาล์มของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุรพล สายพานิช. 2540. การศึกษากระบวนการคอนแทกต์สแตปิลไฮเซชันไร้อากาศแบบกวนสมบูรณ์. สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุภกิจ ดีโสภิตา. 2545. การศึกษาสมรรถนะการหมักมูลฝอยชุมชนแบบไร้ออกซิเจนชนิดสองขั้นตอนที่อัตราการระบวรทุกสารอินทรีย์ของถังสร้างกรดต่างกัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมฤดี ฤทธิยากุล, 2551. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและผลพลอยได้จากการหมักมูลสุกรร่วมกับสาหร่ายหนามจากทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตร. 2554. การผลิต การตลาดปาล์มน้ำมันปี 2554. กรุงเทพมหานคร: กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์.

อารีญา วีระวรกุล. 2546. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาจุลชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุดมผล พิษณุไพบูลย์. 2551. เทคนิคการวิเคราะห์น้ำ น้ำเสียและขยะมูลฝอย. สงขลา: เทคโนโลยีการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

องค์พัฒนา วรรณกลัด. 2552. การควบคุมอัตราส่วนซีโอติต่อที่เคเอ็นที่เหมาะสมสำหรับสภาวะไซมอลทาเนียสไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชันในอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Ahn, J. H. and C. F. Forster, 2002. The effect of temperature variations on the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated papermill wastewater. *Process Biochemistry* 37: 589-594.

APHA, AWWA and WEF. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21<sup>st</sup> ed, American Public Health Association, New York.

- Banerjee, A., P. Elefsiniotis and D. Tuhtar. 1998. Effect of HRT and temperature on the acidogenesis of municipal primary sludge and industrial wastewater. *Wat. Sci. Tech.* 38 (8-9): 417-423.
- Beatriz Molinuevo-Salces, Cristina Gonzalez-Fernandez, Xiomar Gomez, Maria Cruz Garcia-Gonzalez and Antonio Moran. 2011. Vegetable processing wastes addition to improve swine manure anaerobic digestion: Evaluation in terms of methane yield and SEM characterization. *Applied Energy* 91: 36-42.
- Bishop, G. C. 2010. Evaluation of laboratory biochemical methane potentials as a predictor of anaerobic dairy manure dairy manure digester biogas production. Agricultural and Biosystems Engineering Faculty, Iowa State University.
- Bouskova, A., M. Dohanyos, J. E. Schmidt, and I. Angelidaki. 2005. Strategies for changing temperature from mesophilic to thermophilic conditions anaerobic CSTR reactors treating sewage sludge. *Water Research* 39: 1481-1488.
- Brown, N. L. and P. B. S. Tata. 1985. Biomethanation. ENSIC Review no. 17/18. Environmental Sanitation Information Center, Asian Institute of Technology, Bangkok. อ้างถึงใน Polprasert, C. 1989. Organic waste recycling. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley and Sons.
- Budiyono, I. N. Widiassa, S. Johari, and Sunarso. 2010. The influence of total solid contents on biogas yield from cattle manure using rumen fluid inoculum. *Energy Research Journal* 1(1): 7-12.
- Chavalparit, O., W. H. Rulkens, A. P. J. Mol, and S. Khaodhair. 2006. Options for environmental sustainability of the crude palm oil industry in Thailand through enhancement of industrial ecosystems. *Environment. Development and Sustainability* 8: 271-87. อ้างถึงใน Singh, R. P., A. Embrandiri, M. H. Ibrahim and N. Esa, 2011. Management of biomass residues generated from palm oil mill: Vermicomposting a sustainable option. *Resources Conservation and Recycling* 55: 423-434.
- Choorit, W. 2007. Effect of temperature on the anaerobic digestion of palm oil mill effluent. *Journal of Biotechnology* 10. No.3 Issue of July 15, 2007.

- Dieter, D. and S. Angelika. 2008. *Biogas from Waste and Renewable Resources*. 1<sup>st</sup> ed. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Forday, W. and P. F. Greenfield. 1982. *The role of anaerobic digestion in wastewater treatment in anaerobic digestion-recent development in technology and control (Hallbert E. ed.)*. Department of Chemical Engineering. The university of Sydney. p. 1-25.
- Gebauer, R. 2004. Mesophilic anaerobic treatment of sludge from saline fish farm effluents with biogas production. *Bioresource Technology* 93: 155-167.
- Grady, C. P. L., Jr., G. T. Daigger, and H. C. Lim. 1999. *Biological wastewater treatment*. 2<sup>nd</sup> ed. Marcel Dekker Inc., New York.
- Gray, N. F. 1989. *Biology of wastewater treatment*. New York: Oxford University Press.
- Guangxue, W., M. G. Healy, and X. Zhan. 2009. Effect of the solid content on anaerobic digestion of meat and bone meal. *Bioresource Technology* 100. 4326-4331.
- Guendouz, J., P. Buffiere, J. Cacho, M. Carrere, and J. Delgenes. 2010. Dry anaerobic digestion in batch mode: Design and operation of a laboratory-scale, completely mixed reactor. *Waste Management*.
- Halbert, E. J. 1981. Process operation and monitoring; C. poison and inhibitors. *Proceeding of the 1<sup>st</sup> ASEAN Seminar Workshop on Biogas Technology, ASEAN Committce on Scilnce and Technology Manila*. Philippines: 369-385.
- Hamed, M., E. I. Mashad, and R. Zhang. 2010. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology* 101: 4021-4028
- Hayes, T. P. and T. L. Theis. 1978. The distribution of heavy metals in anaerobic digestion. *Wat. Poll. Control Fed* 50(1): 307-313.

- Hobson, N. P. and A. D. Wheatly. 1993. Anaerobic digestion: Modern theory and practice. *Elsevier Applied Science Publisher*. New York. 269. อ้างถึงใน อารียา วิรัชวรกุล. 2546. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาจุลชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Izarail, S. and P. K. Mathai. 2006. *Wastewater sludge processing*. 1<sup>st</sup> ed. USA: John Wiley & Sons.,Inc.
- Jia, L., J. Zuo, L. Gan, P. Li, F. Liu, K. Wang, L. Chen, and H. Gan. 2011. Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China. *Journal of Environmental Sciences* 23(8): 1403-1408.
- John, G. H., R. K. Noel, H. A. S. Peter, T. S. James, and T. W. Stanley. 1994. *Bergey's manual of determinative bacteriology*. 9<sup>th</sup> ed. New York. Williams and Wilkins.
- Kim, M., Y. H. Ahn, and R. E. Speece. 2002. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs thermophilic. *Wat. Res*: 1-17.
- Luostarinen, S., S. Luste and M. Sillanpaa. 2009. Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant. *Bioresource Technology* 100: 79-85.
- Macleod, F. A., S. R. Guiot, and J. W. Costeron. 1990. Layered structure and bacterial aggregates produced in an upflow anaerobic sludge bed and filter reactor. *Appl. Environ. Microbiol.* 55(6): 1589-1607.
- Mahendra, K. J., J. G. Zeikus, and L. Bhatnagar. 1991. Methanogen, pp. 226-246. In P. N. Levett, ed. *Anaerobic Microbiology*. Oxford University, New York.
- Marchaim, U. and C. Krause. 1993. Propionic to acetic acid ratios in overloaded anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 43: 195-203.
- McCarty, P.L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamental part I, II, III and IV. Process Design. *Journal Public Works*; 95.

- \_\_\_\_\_. 1964. Anaerobic waste treatment fundamental part I, II, III and IV. Process Design. *Journal Public Works*; 95. อ้างถึงใน Reynolds, T. D. and P. A. Richard, 1995. Unit Operations and Process in Environmental Engineering. Boston, PWS Inc.
- Metcalf and Eddy. 2004. Treatment disposal and reuse. *Wastewater Engineering*, 4<sup>th</sup> ed. New York. McGraw-Hill Inc.
- Middlebrok, E. J. 1979. Agro industries. *Industrial Pollution Control* 1. John Wiley and Son, N.Y.
- Mshandete. A., A. Kivaisi, M. Rubindamayugi, and B. Mattiasson. 2004. Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes. *Bioresource Technology* 95: 19-24.
- N. p. 2553. Anaerobic digestion. <http://www.greatlakesbiogas.com/site/works>. (สืบค้นเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2553).
- Osman, N. A. and T. S. Delia. 2005. Effect of alkalinity on the performance of a simulated landfill bioreactor digesting organic solid wastes. *Chemosphere* 59: 871-879.
- Paepatung, N. A. Noppharatan, and W. Songkasiri. 2009. Bio-methane potential of biological solid materials and agricultural wastes. *Asian Journal on Energy and Environment* 10(1): 19-27.
- Pagilla, K. R., H. Kim, and T. Cheunbarn. 2000. Aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of swine waste. *Wat. Res* 34(10): 2747-2753.
- Panyue, Z., G. Zeng, G. Zhang, Y. Li, B. Zhang, and M. Fan. 2008. Anaerobic co-digestion of biosolids and organic fraction of municipal solid waste by sequencing batch process. *Fuel Processing Technology* 89: 485-489.
- Parawira, W., M. Murto, R. Zvauya and B. Mattiasson. 2004. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. *Renewable Energy* 29: 1811-1823.

- Poh, P. E. and M. F. Chong. 2010. Biomethanation of Palm Oil Mill Effluent (POME) with a thermophilic mixed culture cultivated using POME as a substrate. *Chemical Engineering Journal* 164: 146-154.
- Polprasert, C. 1989. Organic waste recycling. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley and Sons.
- Prasertsan, P., P. Wattijumnong., P. Sophanodora, and W. Coorit. 1988. Seafood processing industries within Songkhla-Hat Yai region the survey of basic data emphasis on waste. *Songkhla Journal of Science and Technology* 10: 193-200.
- Price, E. C. and P. N. Cheremisinoff. 1981. *Biogas: production and utilization*. Ann Arbor Science, Ann Arbor. อ้างถึงใน Polprasert, C. 1989. Organic waste recycling. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley and Sons.
- Rajeshwari, K. V., M. Balakrishnan, A. Kansal, K. Lata and V. V. N. Kishore. 2000. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renew. Sustain. Energy Rev* 4: 135-156. อ้างถึงใน Budiyono, I. N. Widiassa, S. Johari, and Sunarso, 2010. The influence of total solid contents on biogas yield from cattle manure using rumen fluid inoculum. *Energy Research Journal* 1(1): 7-12.
- Rao, M. S., S. P. Singh, A. K. Singh and M. S. Sodha. 2000. Bioenergy conversion studies of the organic fraction of MSW: Assessment of ultimate bioenergy production potential of municipal garbage. *Applied Energy* 66: 75-87.
- Raynal, J., J. P. Delegenes and R. Moletta. 1998. Two-phase anaerobic digestion of solid waste by multiple liquor fraction process. *Bioresource Technology* 65: 97-103. อ้างถึงใน ชญานุช แสงวิเชียร. 2554. การเกิดก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมยางด้วยกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนจากถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Reynolds, T. D. and P. A. Richard. 1995. *Unit Operations and Process in Environmental Engineering*. Boston, PWS Inc.



- Roposo, F., C. J. Banks, I. Siegert, S. Heaven, and R Borja. 2006. Influence of inoculums to substrate ratio on thenbiochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochemistry* 41: 1444-1450.
- Roposo, F., R. Borja, B. Rincon, and A. M. Jimenez. 2008. Assessment of process control parameters in the biochemical methane potential of sunflower oil cake. *Biomass and Bioenergy* 32: 1235-1244.
- Salminen, E. A. and J. A. Rintala. 2002. Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultryslaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading. *Wat. Res:* 1-8.
- Sastry, C. A. and S. Vickineswaty. 1995. *Anaerobic Waste Treatment Plants*. In Waste Treatment Plants. Edited by Sastry. C. A., Hashim, M. A. and Agamothu, P., New Delhi, Narosa Publishing House.
- Schuchardt, F., D. Darnoko and P. Guritno. 2002. Composting of empty oil palm fruit bunch (EFB) with simultaneous evaporation of oil mill wastewater (POME). *Proceedings of the International Oil Palm Conference. Organized by Indonesian Agency for Agricultural Research and Development*. Nusa Dua. Bali. Indonesia: pp. 1-9.
- Shanmugam, P. and N. J. Horan. 2009. Simple and rapid methods to evaluate methane potential and biomass yield for a range of mixed solid waste. *Bioresource Technology* 100: 471-474.
- Souza, M. E. 1986. Criteria for the utilization design and operation of UASB reactors. *Wat Res* 18: 55-69.
- Speece, R. 1996. *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*. USA: Archae Press, Nashville, Tennessee. อ้างถึงใน Bishop, G. C. 2010. Evaluation of laboratory biochemical methane potentials as a predictor of anaerobic dairy manure dairy manure digester biogas production. Agricultural and Biosystems Engineering Faculty, Iowa State University.

- Stering, J. r., M. C., R. E. Lacey, C. R. Engler and S. C Ricke. 2001. Effect of ammonia nitrogen on H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> during anaerobic digestion of dairy cattle manure. *Bioresource Technology* 77: 9-18.
- Sung, S. and T. Liu. 2003. Ammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion. *Chemosphere*: 1-10.
- Tchobonoglous, G. and F. L. Burton, 1991. Disposal and reuse. *Wastewater Engineering Treatment*. McGraw Hill ing. New York.
- Teodorita, A. S. et al. 2008. *Biogas Handbook*. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg.
- The Centre for Agricultural Information (CAI) and Regional Offices of Agricultural Economics. 2007. Agricultural Statistics of Thailand. Office of Agricultural Economics <http://www.oae.go.th/pdf/yea/2007/yearbook50.pdf>. (accessed February 21, 2009).
- Wen, C., X. Huang and Y. Qian. 1999. Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration. *Process Biochemistry* 35: 335-340.
- Wikipedia. 2555. Continuous stirred-tank reactor. [http://en.wikipedia.org/wiki/Continuous\\_stirred-tank\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_stirred-tank_reactor). (สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2555). This page was last modified on 22 November 2012 at 18:28.
- Wong, M. H. and Y. H. Cheung. 1995. Gas production and digestion efficiency of sewage sludge containing elevated toxic metals. *Bioresource Technology* 54: 261-268.
- Yahya, A., P. C. Sye, A. T. Ishola, and H. Suryanto. 2010. Effect of adding palm oil mill decanter cake slurry with regular turning operation on the composting process and quality of compost from oil palm empty fruit bunches. *Bioresource Technology* 101: 8736-8741.

- Yen, H. W. and D. E. Brune. 2007. Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. *Bioresource Technology* 98(8): 130-134. อ้างถึงใน
- Jia, L., J. Zuo, L. Gan, P. Li, F. Liu, K. Wang, L. Chen, and H. Gan, 2011. Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China. *Journal of Environmental Sciences* 23(8): 1403-1408.
- Yilmazer, G. and O. Yenigun. 1999. Two-phase anaerobic treatment of cheese whey. *Wat. Sci. Tech.* 40(1): 289-295.
- Zupancic, G. D. and M. Ros. 2003. Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion. *Renewable Energy* 28: 2255-2267.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

## การวิเคราะห์ตะกอนดีแคเตอร์

### 1. การวิเคราะห์ความชื้น (Moisture) (อุดมผล, 2546)

ความชื้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่าง

#### 1.1 อุปกรณ์

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

#### 1.2 วิธีการ

- 1) นำถ้วยกระเบื้องไปอบที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น นำไปชั่ง จดน้ำหนักที่ได้
- 2) นำตัวอย่างที่ทำการสุ่มตัวอย่างแล้วประมาณ 2 g ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 103-105°C จนตัวอย่างแห้งสนิทคือ น้ำหนักตัวอย่างคงที่ ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น นำตัวอย่างไปชั่ง จดน้ำหนักที่ได้

#### 1.3 การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

### 2. การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS) และปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solid, VS) (อุดมผล, 2546)

ปริมาณของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณตัวอย่างแห้ง

ปริมาณของแข็งระเหยได้ หมายถึง ปริมาณของตัวอย่างที่เผาไหม้ได้

#### 2.1 อุปกรณ์

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

#### 2.2 วิธีการ

- 1) นำถ้วยกระเบื้องไปเผาที่อุณหภูมิ 550±50°C ประมาณ 1 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นประมาณ 2 ชั่วโมง นำถ้วยกระเบื้องไปชั่ง จดน้ำหนักที่ได้ (A)
- 2) นำตัวอย่างใส่ในถ้วยกระเบื้องประมาณ 2 g (B) นำไปอบให้แห้งในตู้อบประมาณ 2 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่อบแห้งสนิทแล้วใส่ในโถดูดความชื้นประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปชั่ง จดน้ำหนักที่ได้ (C)
- 3) นำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 550±50°C ประมาณ 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็น ประมาณ 2 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปชั่ง จดน้ำหนักที่ได้ (D)

## 2.3 การคำนวณ

- การคำนวณปริมาณของแข็งทั้งหมด

$$\text{Total Solid (\%)} = \frac{(C-A) \times 100}{B}$$

เมื่อ A = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องก่อนอบ  
B = ปริมาณตัวอย่าง  
C = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องและตัวอย่างหลังอบ

- การคำนวณปริมาณของแข็งระเหยได้

$$\text{Volatile Solid (\%)} = \frac{(D-C) \times 100}{B}$$

เมื่อ B = ปริมาณตัวอย่าง  
C = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องและตัวอย่างหลังอบ  
D = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องและตัวอย่างหลังเผา

## 3. การวิเคราะห์ค่าพีเอช (pH) (ดัดแปลงจากจำเป็น, 2547)

### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องแก้ว

- 1) เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 g
- 2) กระบอกตวง (Measuring cylinder) ขนาด 100 ml
- 3) เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)
- 4) บีกเกอร์ ขนาด 50 ml
- 5) แท่งแก้วคนสาร

### 3.2 วิธีทำการ

- 1) ชั่งตัวอย่าง 5 g ใส่ในบีกเกอร์
- 2) เติมน้ำกลั่นลงไป 25 ml ทำให้ได้สัดส่วนของตัวอย่างต่อน้ำเท่ากับ 1:5
- 3) คนตัวอย่างจนผสมเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 1 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนประมาณ 30 นาที จึงวัดค่าพีเอชส่วนที่เป็นน้ำใส

## 4. การวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอน (Carbon, C) (ดัดแปลงจากจำเป็น, 2547)

### 4.1 อุปกรณ์และเครื่องแก้ว

- 1) เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 g
- 2) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 ml
- 3) บิวเรต (Burette) ขนาด 50 ml
- 4) ปิเปตแบบปริมาตร (Volumetric pipette) ขนาด 10 ml
- 5) กระบอกตวง (Measuring cylinder) ขนาด 10 และ 100 ml
- 6) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 500 และ 1000 ml

#### 4.2 สารเคมี

1) โปแทสเซียมไดโครเมต 0.167 โมลาร์ (1 นอร์แมล) : สารละลายโปแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate :  $K_2Cr_2O_7$ ) (ผ่านการอบที่อุณหภูมิ  $105^\circ C$  ประมาณ 3 ชั่วโมง) 49.04 g ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1 l

2) เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซาไฮเดรต (FAS) 1 โมลาร์ (1 นอร์แมล) : ละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซาไฮเดรต (Ferrous ammonium sulfate hexahydrate :  $Fe(NH_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) 196.07 g ในน้ำกลั่นประมาณ 400 ml ให้ความร้อน กวนผสมจนสารละลายหมดวางให้เย็นแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ ) ลงไป 15 ml และปรับปริมาตรเป็น 500 ml

3) กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid) เข้มข้นอย่างน้อย 96% (96-98% w/w  $H_2SO_4$ )

4) เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroin indicator) : ละลายฟีแนนโทโรลีนโมโนไฮเดรต (1, 10 O-phenantroline monohydrate :  $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$ ) 1.485 g ในน้ำกลั่น และเติม FAS 1 โมลาร์ 8 ml ก่อนปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 ml

#### 4.3 วิธีกร

1) ชั่งตัวอย่าง 1 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml

2) ใช้ปิเปตดูดโปแทสเซียมไดโครเมต 10 ml เติมลงไปขวดและแกว่งให้ผสมเข้ากับตัวอย่าง ในขั้นนี้ให้ทำแบลนค์ (Blank) โดยเติมโปแทสเซียมไดโครเมต 10 ml ลงในขวดที่ไม่มีตัวอย่างด้วย

3) นำไปเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 ml ภายในตู้ดูดควัน โดยค่อยๆ เทกรดลงด้านข้างขวด และทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

4) เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50 ml แล้วหยดเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ลงไป 3-4 หยดแกว่งให้เข้ากัน

5) นำไปไทเทรตด้วย FAS (ควรไทเทรต Blank ก่อน) จนกระทั่งถึงจุดยุติ (End point) โดยสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลปนแดง บันทึกปริมาตร FAS ที่ใช้

#### 4.4 การคำนวณ

$$\text{Molarity ของ FAS (M}_1\text{)} = \frac{6(0.167 \times \text{ปริมาณโปแทสเซียมไดโครเมต})}{\text{ปริมาณ FAS ที่ใช้}}$$

$$\text{อินทรีย์คาร์บอน (g/kg)} = \frac{3.896 \times M_1 \times (V_B - V_1)}{W}$$

เมื่อ

$M_1$  = Molarity ของ FAS

$V_1$  = ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

$V_B$  = ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการไทเทรตโปแทสเซียมไดโครเมต

(Blank)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้



## 5. การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด (Nitrogen, N) (ดัดแปลงจากจำเป็น, 2547)

### 5.1 อุปกรณ์และเครื่องแก้ว

- 1) เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.0001 g
- 2) เตาย่อยตัวอย่าง (Digestion block)
- 3) เครื่องกลั่นไนโตรเจน (Nitrogen distillation apparatus)
- 4) หลอดย่อยตัวอย่าง (Kjeldahl tube) ขนาด 100 ml
- 5) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 ml
- 6) บิวเรต (Burette) ขนาด 50 ml
- 7) กระจกตวง (Measuring cylinder) ขนาด 10 และ 100 ml

### 5.2 สารเคมี

- 1) กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid) เข้มข้น 98% w/w  $H_2SO_4$
- 2) สารผสมเร่งปฏิกิริยา (Catalyst mixture) : ผสมโปแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulphate :  $K_2SO_4$ ), คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulphate :  $CuSO_4$ ) และซีลีเนียม (Selenium : Se) อัตราส่วน 100:10:1 โดยน้ำหนัก

3) อินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator) : ละลายเมธิลเรด (Methyl red) 0.066 g และโบรโมกรีน (Bromocresol green) 0.099 g ในเอธานอล (Ethanol) 95% w/w ประมาณ 80 ml แล้วจึงปรับปริมาตรด้วยเอธานอลเป็น 100 ml

4) กรดบอริกผสมอินดิเคเตอร์ : ละลายกรดบอริก (Boric acid :  $H_3BO_3$ ) 40 g ในน้ำร้อนประมาณ 1,800 ml รอให้เย็นแล้วจึงเติมอินดิเคเตอร์ผสมลงไปประมาณ 20 ml จะได้สารละลายผสมสีม่วงแดง (หากเป็นสีชมพูให้ค่อยๆปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ประมาณ 2.5-3 ml) จากนั้นจึงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 2 l

5) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% น้ำหนักต่อปริมาตร (w/v) : ค่อยๆละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide : NaOH) 400 g ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1 l

6) สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) 0.005 โมลาร์ : ชั้นแรกควรเตรียม 1 โมลาร์ก่อน โดยตวงกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ( $H_2SO_4$  98% w/w) 55.4 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 l จากนั้นเจือจางเป็น 200 เท่า แล้วนำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอนโดยนำไปไทเทรตกับสารละลายทริสไฮดรอกซีเมทิลอะมิโนมีเทน (THAM) 0.02 โมลาร์ จำนวน 5 ml ไทเทรตจนสีของอินดิเคเตอร์ผสมในสารละลาย THAM เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้และคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก เช่นเดียวกับการเทียบความเข้มข้นมาตรฐาน

### 5.3 วิธีการ

- 1) การย่อย
  - 1.1 ชั่งตัวอย่าง 1 g ใส่ในหลอดย่อยตัวอย่างขนาด 100 ml
  - 1.2 ใส่ลูกแก้ว (Glass bead) ลงในหลอดประมาณ 5-6 เม็ด ตักสารเร่งปฏิกิริยาผสมใส่ลงไปประมาณ 1 g
  - 1.3 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 ml ภายในตู้ควัน โดยค่อยๆ เทกรดลงด้านข้างขวด และเขย่าให้ผสมกับตัวอย่าง

1.4 นำไปย่อยด้วยเตาย่อยตัวอย่างโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 380°C จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมฟ้าและตัวอย่างมีสีขาว

1.5 ทำ Blank โดยนำหลอดไปเติมสารและย่อยเช่นเดียวกับตัวอย่าง

2) การกลั่น

2.1 จัดเครื่องกลั่นให้พร้อมจะใช้งาน และเติมน้ำกลั่นลงไปในตัวอย่างประมาณ 10 ml เขย่าจนตะกอนละลาย

2.2 นำหลอดใส่เข้าเครื่องกลั่น และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปประมาณ 15 ml

2.3 ตวงสารละลายกรดบอริกที่ผสมอินดิเคเตอร์ 5 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml นำไปวางตรงตำแหน่งที่รองรับแก๊สแอมโมเนียจากการกลั่น

2.4 กลั่นจนได้ปริมาตรประมาณ 30 ml จึงหยุดและฉีดล้างปลายคอนเดนเซอร์ด้วยน้ำกลั่น

3) การไทเทรต

3.1 เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.005 โมลาร์ (จะต้องทราบความเข้มข้นที่แน่นอน) ลงในบิวเรตและจัดบิวเรตให้พร้อมที่จะไทเทรต

3.2 นำสารละลายที่กลั่นได้ซึ่งมีสีเขียวไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกจนเปลี่ยนเป็นสีม่วง

4) การหาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก

4.1 นำกรดที่เตรียมได้จากสารเคมี ข้อ 6 ใส่ในบิวเรต

4.2 ปิเปตสารละลายสารละลายทริสไฮดรอกซีเมทิลอะมีนมีเทน 0.02 โมลาร์ จำนวน 10 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ml

4.3 หยดอินดิเคเตอร์ผสมลงไป 2-3 หยด และนำไปไทเทรตจนสารละลายในขวดรูปชมพู่เปลี่ยนจากสีเขียวในสภาพที่เป็นเบสเป็นสภาพสีชมพูในสภาพที่เป็นกรด

4.4 บันทึกปริมาตรกรดที่ใช้และคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก

#### 5.4 การคำนวณ

$$M_2 = \frac{M_1 V_1}{V_2}$$

$$\text{Nitrogen (g/kg)} = \frac{28.01 \times M_2 \times (V_3 - V_B)}{W}$$

เมื่อ  $M_1$  = ความเข้มข้นของ THAM

$M_2$  = ความเข้มข้นของ  $H_2SO_4$

$V_1$  = ปริมาตร THAM

$V_2$  = ปริมาตร  $H_2SO_4$  ที่ใช้ไทเทรตกับ THAM

$V_3$  = ปริมาตร  $H_2SO_4$  ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง

$V_B$  = ปริมาตร  $H_2SO_4$  ที่ใช้ไทเทรต Blank

W = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบจากการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

วันที่	Biogas (mL/d)						Cumulative biogas (mL/d)					
	อัตราส่วน						อัตราส่วน					
	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0
1	0.0	0.0	5.7	24.5	37.1	64.5	0	0	5.7	24.5	37.1	64.5
2	0.0	10.5	5.3	21.5	20.9	42.3	0	10.5	11.0	46.0	58.0	106.8
3	3.1	10.5	46.0	29.0	32.3	63.0	3.1	21.0	57.0	75.0	90.3	169.8
4	3.4	3.2	2.7	19.5	26.8	82.5	6.5	24.2	59.7	94.5	117.0	252.3
5	6.3	2.1	1.7	10.4	12.0	23.4	12.8	26.2	61.4	104.9	129.0	275.7
6	7.9	2.3	2.0	7.7	4.9	8.5	20.6	28.5	63.4	112.6	133.9	284.2
7	13.6	10.0	8.7	11.5	11.5	19.8	34.2	38.5	72.1	124.1	145.4	303.9
8	3.8	4.0	7.8	0.4	0.0	4.4	38.0	42.5	79.9	124.5	145.4	308.3
9	10.8	12.8	1.5	2.2	1.6	4.2	48.7	55.3	81.3	126.7	147.0	312.5
10	8.4	12.5	0.0	0.2	3.8	15.5	57.1	67.8	81.3	126.9	150.7	328.0
11	5.8	7.9	0.4	2.8	2.8	9.3	62.8	75.6	81.7	129.6	153.5	337.3
12	4.6	5.4	1.2	2.1	4.1	11.0	67.4	81.0	82.9	131.7	157.6	348.3
13	2.2	1.5	1.9	2.4	3.9	11.0	69.5	82.4	84.7	134.1	161.5	359.3
14	9.7	9.1	11.2	8.4	7.9	12.4	79.2	91.5	95.9	142.4	169.3	371.7

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	Biogas (mL/d)						Cumulative biogas (mL/d)					
	อัตราส่วน						อัตราส่วน					
	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC
15	1.2	1.4	8.3	0.3	0.0	2.0	80.4	92.9	104.2	142.7	169.3	373.7
16	0.0	2.6	20.5	4.8	0.0	0.5	80.4	95.4	124.7	147.5	169.3	374.2
17	6.2	5.3	36.8	10.7	1.1	1.1	86.6	100.7	161.5	158.2	170.4	375.3
18	1.9	5.2	29.0	21.5	3.3	1.0	88.4	105.9	190.5	179.6	173.7	376.2
19	1.2	5.4	14.6	31.5	7.0	0.6	89.6	111.3	205.0	211.1	180.7	376.8
120	0.0	5.6	3.3	37.5	15.0	0.7	89.6	116.9	208.3	248.6	195.7	377.5
21	0.0	11.3	6.4	36.0	32.5	6.2	89.6	128.2	214.7	284.6	228.2	383.7
22	0.2	7.6	1.4	21.4	41.0	0.0	89.8	135.7	216.1	306.0	269.1	383.7
23	0.1	9.3	2.1	17.5	45.0	0.0	89.9	145.0	218.2	323.5	314.1	383.7
24	0.0	11.8	3.1	10.1	53.0	0.0	89.9	156.8	221.3	333.6	367.1	383.7
25	0.0	11.0	5.2	0.7	21.0	0.0	89.9	167.8	226.5	334.3	388.1	383.7
26	0.0	11.5	8.3	6.3	5.7	0.0	89.9	179.3	234.7	340.6	393.8	383.7
27	0.0	12.3	11.5	4.9	3.3	0.5	89.9	191.5	246.2	345.5	397.1	384.2
28	0.0	15.4	15.6	11.0	9.6	6.3	89.9	206.9	261.8	356.4	406.7	390.4
29	0.0	5.2	12.0	3.3	3.8	0.2	89.9	212.1	273.8	359.7	410.5	390.6

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	Biogas (mL/d)						Cumulative biogas (mL/d)					
	อัตราส่วน						อัตราส่วน					
	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC
30	0.0	7.5	11.2	9.7	11.7	3.5	89.9	219.6	285.0	369.3	422.2	394.1
31	0.0	7.3	10.5	10.5	10.5	6.1	89.9	226.8	295.5	379.8	432.7	400.2
32	0.0	6.9	9.9	16.0	18.5	19.0	89.9	233.7	305.3	395.8	451.2	419.2
33	0.0	6.0	4.8	11.5	17.5	31.0	89.9	239.7	310.1	407.3	468.6	450.2
34	0.0	7.9	9.6	15.0	14.1	61.5	89.9	247.5	319.7	422.3	482.7	511.7
35	0.0	14.7	14.3	20.3	19.6	51.3	89.9	262.2	334.0	442.6	502.3	562.9
36	0.0	3.5	7.3	6.8	5.2	80.8	89.9	265.7	341.3	449.4	507.4	643.7
37	0.0	9.7	8.5	12.5	9.1	34.0	89.9	275.3	349.8	461.9	516.5	677.7
38	0.0	10.5	3.5	17.0	11.0	28.1	89.9	285.8	353.3	478.9	527.5	705.7
39	0.0	13.3	5.4	13.8	9.8	5.7	89.9	299.0	358.7	492.6	537.3	711.4
40	0.0	6.2	5.8	14.5	12.0	7.6	89.9	305.2	364.5	507.1	549.3	719.0
41	0.0	1.0	6.1	15.0	11.8	11.2	89.9	306.2	370.6	522.1	561.0	730.2
42	0.0	0.5	13.6	23.0	19.0	26.0	89.9	306.7	384.1	545.1	580.0	756.2
43	0.0	1.2	10.1	11.6	10.0	26.5	89.9	307.8	394.2	556.7	590.0	782.7
44	0.0	0.7	11.1	18.8	17.0	46.0	89.9	308.5	405.3	575.4	607.0	828.7

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	Biogas (mL/d)						Cumulative biogas (mL/d)					
	อัตราส่วน						อัตราส่วน					
	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC
45	0.0	0.4	12.3	18.0	17.5	41.5	89.9	308.9	417.6	593.4	624.5	870.2
46	0.0	1.0	15.3	21.0	22.0	33.5	89.9	309.8	432.8	614.4	646.5	903.7
47	0.0	0.6	15.8	22.0	24.0	21.0	89.9	310.4	448.6	636.4	670.5	924.7
48	0.0	0.4	17.0	23.0	26.5	15.8	89.9	310.8	465.6	659.4	697.0	940.4
49	0.0	0.0	24.5	28.5	34.0	19.1	89.9	310.8	490.1	687.9	731.0	959.5
50	0.0	0.0	11.3	24.5	32.3	9.1	89.9	310.8	501.4	712.4	763.3	968.6
51	0.0	0.0	12.8	21.5	31.0	10.5	89.9	310.8	514.1	733.9	794.3	979.1
52	0.0	0.0	10.2	24.0	38.0	15.0	89.9	310.8	524.3	757.9	832.3	994.1
53	0.0	0.0	9.7	20.5	31.5	18.5	89.9	310.8	534.0	778.4	863.8	1,012.6
54	0.0	0.0	10.5	16.0	32.0	25.5	89.9	310.8	544.5	794.4	895.8	1,038.1
55	0.0	0.0	14.5	12.2	29.0	26.8	89.9	310.8	559.0	806.6	924.8	1,064.8
56	0.0	0.0	13.0	22.3	38.8	39.8	89.9	310.8	572.0	828.9	963.5	1,104.6
57	0.0	0.0	10.6	8.0	31.0	39.5	89.9	310.8	582.6	836.9	994.5	1,144.1
58	0.0	0.0	14.0	9.3	30.5	49.8	89.9	310.8	596.6	846.1	1,025.0	1,193.8
59	0.0	0.0	13.4	7.7	25.5	51.0	89.9	310.8	609.9	853.8	1,050.5	1,244.8

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	Biogas (mL/d)						Cumulative biogas (mL/d)					
	อัตราส่วน						อัตราส่วน					
	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC
60	0.0	0.0	10.1	6.5	24.5	59.5	89.9	310.8	620.0	860.3	1,075.0	1,304.3
61	0.0	0.0	7.6	5.5	20.0	64.5	89.9	310.8	627.5	865.8	1,095.0	1,368.8
62	0.0	0.0	6.2	7.8	15.8	69.8	89.9	310.8	633.7	873.6	1,110.8	1,438.6
63	0.0	0.0	3.3	13.1	13.9	61.0	89.9	310.8	637.0	886.7	1,124.7	1,499.6
64	0.0	0.0	1.9	6.0	1.0	60.0	89.9	310.8	638.8	892.7	1,125.7	1,559.6
65	0.0	0.0	0.8	8.8	2.7	56.5	89.9	310.8	639.6	901.4	1,128.4	1,616.1
66	0.0	0.0	0.7	6.3	2.3	49.8	89.9	310.8	640.3	907.7	1,130.6	1,665.8
67	0.0	0.0	2.4	3.9	1.6	56.5	89.9	310.8	642.6	911.6	1,132.2	1,722.3
68	0.0	0.0	1.6	2.4	2.1	58.8	89.9	310.8	644.2	914.0	1,134.3	1,781.1
69	0.0	0.0	0.7	1.9	1.9	57.0	89.9	310.8	644.9	915.9	1,136.2	1,838.1
70	0.0	0.0	2.5	1.2	1.9	61.8	89.9	310.8	647.4	917.0	1,138.0	1,899.8
71	0.0	0.0	0.9	1.0	1.4	32.5	89.9	310.8	648.2	918.0	1,139.4	1,932.3
72	0.0	0.0	1.3	0.9	1.2	35.5	89.9	310.8	649.5	918.9	1,140.6	1,967.8
73	0.0	0.0	1.3	0.7	1.3	27.8	89.9	310.8	650.8	919.5	1,141.9	1,995.6
74	0.0	0.0	1.4	0.3	2.1	27.8	89.9	310.8	652.2	919.8	1,143.9	2,023.3



ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	Biogas (mL/d)						Cumulative biogas (mL/d)					
	อัตราส่วน						อัตราส่วน					
	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC
75	0.0	0.0	0.0	0.5	2.4	18.5	89.9	310.8	652.2	920.3	1,146.3	2,041.8
76	0.0	0.0	0.0	0.4	2.4	13.4	89.9	310.8	652.2	920.7	1,148.6	2,055.2
77	0.0	0.0	0.0	0.6	2.0	17.1	89.9	310.8	652.2	921.3	1,150.6	2,072.2
78	0.0	0.0	0.0	0.4	1.8	5.1	89.9	310.8	652.2	921.7	1,152.4	2,077.3
79	0.0	0.0	0.0	0.8	1.2	5.5	89.9	310.8	652.2	922.5	1,153.5	2,082.8
80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	6.7	89.9	310.8	652.2	922.5	1,153.9	2,089.4
81	0.0	0.0	0.0	1.5	2.2	5.1	89.9	310.8	652.2	923.9	1,156.1	2,094.5
82	0.0	0.0	0.0	1.2	1.2	4.0	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,098.4
83	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,101.6
84	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,104.2
85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,107.0
86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,109.6
87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,112.0
88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,113.2
89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,114.7

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	Biogas (mL/d)						Cumulative biogas (mL/d)					
	อัตราส่วน						อัตราส่วน					
	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC	180W: 0DC	180W: 2DC	180W: 5DC	180W: 8DC	180W: 10DC	180W: 20DC
90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,116.1
91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,117.5
92	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,119.0
93	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	89.9	310.8	652.2	925.1	1,157.3	2,120.5

ตารางที่ ข.2 องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

วันที่	Methane (%)					
	อัตราส่วน					
	180W:0DC	180W:2DC	180W:5DC	180W:8DC	180W:10DC	180W:20DC
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	33.1	34.2	46.7	23.3	27.7	29.6
14	32.4	32.9	54.7	27.0	27.7	29.0
21	0.0	34.1	56.7	56.9	43.5	23.2
28	0.0	32.8	55.1	60.2	56.4	23.4
35	0.0	33.5	60.4	64.3	62.1	42.7
42	0.0	0.0	54.7	64.1	64.4	37.1
49	0.0	0.0	56.7	69.8	76.7	47.1
56	0.0	0.0	0.0	54.6	60.9	30.2
63	0.0	0.0	0.0	59.7	59.3	41.3
70	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.1
77	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	46.6
84	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
91						0.0

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว กวณผสม 24 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	TCOD inf (mg/l)		
	HRT		
	10	20	30
1	813	852	890
4	600	580	660
7	900	900	943
10	780	780	810
13	619	628	656
16	647	628	654
19	745	691	809
22	566	566	583
25	688	618	715
28	600	703	609
31	741	769	722
34	688	706	732
37	746	650	729
40	542	485	477

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง เพียงอย่างเดียว กวนผสม 24 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	33			0.70	0.35	0.17	0.26	0.14	0.07	37.3	38.8	39.9
2	30			0.52	0.35	0.17	-	-	-	-	-	-
3	33.5			0.52	0.26	0.17	0.17	0.09	0.07	31.7	34.4	38.6
4	34			0.52	0.35	0.17	-	-	-	-	-	-
5	33.5			0.61	0.18	0.17	0.16	0.06	0.06	26.5	33.5	34.8
6	32.5			0.52	0.26	0.17	-	-	-	-	-	-
7	30			0.35	0.18	0.17	0.09	0.05	0.06	24.9	29.6	33.2
8	33			0.52	0.26	0.26	-	-	-	-	-	-
9	28			0.44	0.26	0.09	0.10	0.08	0.03	23.7	28.5	31.7
10	26.5			0.35	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-
11	31			0.44	0.35	0.09	0.10	0.10	0.03	22.4	27.3	30.2
12	33			0.35	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-
13	32			0.35	0.26	0.17	0.06	0.06	0.05	16.8	23.6	28.7
14	32.5			0.35	0.18	0.09	-	-	-	-	-	-
15	33			0.44	0.18	0.17	0.06	0.04	0.05	14.9	22.3	26.8
16	33.5			0.44	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง เพียงอย่างเดียว กวนผสม 24 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
17	32			0.35	0.26	0.09	0.05	0.06	0.02	14.0	20.9	25.7
18	28.5			0.35	0.09	0.17	-	-	-	-	-	-
19	29			0.52	0.18	0.09	0.06	0.03	0.02	11.6	16.0	20.4
20	26.5			0.35	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-
21	29			0.52	0.26	0.17	0.05	0.04	0.03	9.2	14.9	19.6
22	30.5			0.35	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-
23	33			0.52	0.35	0.17	0.05	0.05	0.03	8.7	13.4	18.1
24	32.5			0.35	0.18	0.26	-	-	-	-	-	-
25	33.5			0.35	0.18	0.09	0.03	0.02	0.01	7.6	10.6	16.0
26	32.5			0.35	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-
27	33.5			0.44	0.18	0.09	0.04	0.02	0.01	10.1	12.5	16.0
28	33			0.35	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-
29	34			0.44	0.18	0.17	0.05	0.02	0.03	10.5	12.7	15.7
30	33			0.26	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-
31	34			0.35	0.18	0.09	0.04	0.02	0.01	10.8	11.5	16.1
32	34			0.35	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง เพียงอย่างเดียว กวนผสม 24 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
33	34			0.44	0.18	0.17	0.04	0.02	0.03	10.1	11.2	15.3
34	34.5			0.35	0.09	0.17	-	-	-	-	-	-
35	33.5			0.26	0.18	0.09	0.03	0.02	0.01	10.4	10.2	15.2
36	32			0.26	0.09	0.17	-	-	-	-	-	-
37	30			0.35	0.18	0.09	0.04	0.02	0.01	10.1	8.7	14.0
38	31			0.26	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-
39	30.5			0.26	0.18	0.09	0.02	0.01	0.01	9.5	8.3	14.5
40	32			0.26	0.18	0.17	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	TCOD inf (mg/l)			COD <sub>settle</sub> eff (mg/l)			COD <sub>settle</sub> removal (%)		
	HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	15,120	17,520	15,120	8,640	8,880	6,000	42.9	49.3	60.3
4	18,783	13,826	15,652	1,070	965	783	94.3	93.0	95.0
7	15,391	16,174	17,217	1,330	913	913	91.4	94.4	94.7
10	16,435	16,957	17,739	1,722	913	835	89.5	94.6	95.3
13	15,652	18,000	15,391	1,304	1,017	965	91.7	94.3	93.7
16	14,941	14,941	17,647	1,341	1,153	671	91.0	92.3	96.2
19	11,647	12,471	13,412	1,859	1,224	600	84.0	90.2	95.5
22	16,235	16,706	16,941	1,859	1,224	1,224	88.6	92.7	92.8
25	14,909	16,000	16,364	2,091	673	436	86.0	95.8	97.3
28	14,909	14,909	14,545	1,927	545	473	87.1	96.3	96.8
31	16,364	16,000	16,000	2,182	691	618	86.7	95.7	96.1
34	11,262	12,000	11,815	2,178	849	480	80.7	92.9	95.9
37	11,077	11,631	12,554	2,917	702	609	73.7	94.0	95.1
40	11,273	13,091	11,818	2,982	873	618	73.5	93.3	94.8
43	11,636	11,273	12,000	2,800	691	691	75.9	93.9	94.2
46	12,750	12,000	13,500	3,338	788	637	73.8	93.4	95.3
49	12,000	12,353	12,000	3,424	794	671	71.5	93.6	94.4
52	12,706	13,412	12,706	3,600	1,094	688	71.7	91.8	94.6
55	14,182	15,273	15,636	3,636	836	800	71.7	91.8	94.6
58	11,657	10,971	10,971	3,634	566	463	68.8	94.8	95.8
61	11,652	13,043	11,826	4,626	939	939	60.3	92.8	92.1
64	14,914	15,257	13,886	4,354	823	926	70.8	94.6	93.3



ตารางที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์ค่า TS และ VS ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	TS inf (g/l)			TS eff (g/l)			TS <sub>removal</sub> (%)			VS inf (g/l)			VS eff (g/l)			VS <sub>removal</sub> (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	13.0	13.3	12.7	10.7	11.5	12.3	18.1	13.6	3.3	10.7	10.8	10.2	7.4	7.7	8.5	31.0	28.8	16.8
4	12.8	12.8	12.6	10.4	11.0	11.7	18.9	14.3	7.4	10.4	10.2	10.0	7.2	7.6	8.1	31.1	25.5	18.6
7	13.4	13.6	13.1	9.5	10.4	11.6	29.3	23.3	11.4	10.7	10.7	10.2	6.6	7.1	8.1	38.7	33.9	20.9
10	13.8	13.0	14.0	9.2	10.1	11.8	33.7	22.3	16.1	11.1	10.2	10.8	6.2	6.9	8.2	43.6	32.5	23.9
13	13.8	14.3	14.3	9.3	9.9	10.6	32.5	31.2	25.7	11.1	11.0	11.1	6.4	6.7	7.2	42.7	39.1	35.2
16	15.9	14.6	14.8	9.1	9.8	11.0	42.6	32.8	26.0	12.8	11.6	12.0	6.2	6.7	7.6	51.4	42.6	36.2
19	14.0	13.9	14.0	9.6	9.7	10.6	31.8	30.0	24.1	11.1	11.1	11.0	6.6	6.6	7.4	40.9	40.5	33.2
22	13.7	14.6	14.7	9.3	9.3	10.1	32.4	35.9	31.3	10.9	11.6	11.6	6.2	6.2	6.8	42.9	46.5	41.0
25	12.6	12.8	12.8	9.2	8.8	9.7	26.7	30.8	24.1	10.1	10.4	10.2	6.5	6.0	6.8	36.1	42.5	33.3
28	13.4	14.1	14.2	9.8	9.2	9.3	26.5	34.9	34.1	9.8	10.1	10.1	6.6	6.1	6.2	32.3	40.4	39.0
31	13.6	13.5	13.9	9.6	8.9	9.5	29.0	34.2	31.7	10.1	9.8	9.9	6.5	5.8	6.2	36.0	41.1	37.0
34	14.5	14.9	14.6	10.9	9.0	9.6	25.3	39.6	34.2	11.0	11.6	11.2	7.4	5.9	6.3	32.6	49.6	44.1
37	11.6	14.9	14.2	9.4	9.0	9.6	18.8	39.4	32.2	8.2	11.7	11.6	6.1	5.9	6.3	26.2	50.0	45.8
40	14.0	13.9	14.3	10.9	9.0	9.6	22.4	35.0	32.6	11.0	11.1	11.2	7.4	5.9	6.3	33.0	47.1	44.0
43	15.0	14.9	15.0	10.9	9.0	9.6	27.5	39.7	36.0	10.6	10.8	11.6	7.4	5.9	6.3	30.5	46.0	45.6
46	15.1	15.3	15.0	12.9	10.1	9.6	14.8	33.9	36.0	11.7	11.8	11.4	7.7	5.8	5.7	34.0	50.5	50.4

ตารางที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์ค่า TS และ VS ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	TS inf (g/l)			TS eff (g/l)			TS <sub>removal</sub> (%)			VS inf (g/l)			VS eff (g/l)			VS <sub>removal</sub> (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
49	14.3	14.7	14.8	12.7	9.8	9.9	11.6	33.5	33.0	10.2	10.6	10.7	7.9	5.7	6.0	23.1	46.1	43.3
52	15.3	15.7	15.3	12.6	10.0	10.7	17.5	36.2	30.0	12.0	12.3	11.9	8.1	5.9	6.7	32.7	52.1	43.2
55	14.6	14.2	15.3	12.6	9.0	9.6	13.7	36.8	37.4	10.1	10.5	10.2	6.5	4.7	5.4	35.6	54.9	46.6
58	16.4	14.9	15.2	13.0	9.3	9.5	21.0	37.7	37.5	11.1	10.7	11.0	7.3	5.3	5.8	34.0	50.7	47.2
61	18.1	17.7	17.5	15.5	9.8	9.9	14.0	44.4	43.7	11.2	12.1	12.1	7.7	5.6	6.0	31.4	53.5	50.5
64	20.2	19.0	18.2	16.0	9.8	9.8	20.9	48.6	46.0	13.8	13.9	13.8	9.9	5.5	5.8	28.1	60.2	57.9

ตารางที่ ข.7 ผลการวิเคราะห์ค่า Alkalinity และ VFA ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	Alkalinity eff (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )			VFA eff (mg/l as CH <sub>3</sub> COOH)			VFA/Alkalinity		
	HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	2,544	2,850	3,075	79	94	88	0.03	0.03	0.03
4	2,250	2,588	2,850	96	105	75	0.04	0.04	0.03
7	2,119	2,556	2,844	90	91	83	0.04	0.04	0.03
10	1,938	2,425	2,669	119	140	108	0.06	0.06	0.04
13	1,825	2,306	2,594	37	25	25	0.02	0.01	0.01
16	1,075	1,819	2,238	44	53	50	0.04	0.03	0.02
19	1,844	2,194	2,450	92	39	36	0.05	0.02	0.01
22	1,713	2,100	2,363	221	90	86	0.13	0.04	0.04
25	1,688	2,063	2,325	228	85	81	0.13	0.04	0.03
28	1,900	2,113	2,363	311	105	106	0.16	0.05	0.04
31	2,100	2,244	2,431	496	178	158	0.24	0.08	0.06
34	2,056	2,238	2,363	494	104	100	0.24	0.05	0.04
37	2,119	2,206	2,400	591	160	146	0.28	0.07	0.06
40	2,150	2,200	2,375	651	163	201	0.30	0.07	0.08
43	4,344	3,425	3,281	1,038	434	420	0.24	0.13	0.13
46	3,806	3,331	3,150	1,064	375	263	0.28	0.11	0.08
49	3,638	3,281	3,169	1,293	486	510	0.36	0.15	0.16
52	3,381	3,169	3,069	1,189	193	215	0.35	0.06	0.07
55	4,319	3,131	3,238	1,481	391	395	0.34	0.12	0.12
58	4,481	3,231	3,244	1,560	291	391	0.35	0.09	0.12
61	4,788	3,375	3,250	1,555	220	358	0.32	0.07	0.11
64	4,819	3,500	3,324	1,733	248	204	0.36	0.07	0.06

ตารางที่ ข.8 ผลการวิเคราะห์ค่า  $\text{NH}_3\text{-N}$  และ TKN ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	$\text{NH}_3\text{-N}$ inf (mg/l)			$\text{NH}_3\text{-N}$ eff (mg/l)			TKN inf (mg/l)			TKN eff (mg/l)		
	HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	36	42	42	274	319	311	337	351	301	650	650	762
4	45	41	38	216	277	328	301	316	347	613	675	759
7	36	36	39	154	270	325	322	319	298	427	553	658
10	17	28	25	140	230	277	294	277	175	448	438	641
13	59	45	73	104	202	249	336	308	354	330	437	498
16	151	146	98	106	196	241	361	291	319	230	392	375
19	73	78	67	101	174	218	287	294	287	378	455	543
25	60	70	56	84	151	210	312	308	326	354	417	511
31	91	98	97	78	132	185	259	343	343	284	413	494
37	80	130	71	81	118	157	322	193	172	280	294	398
43	78	80	66	59	98	148	259	301	329	255	288	333
49	46	42	45	78	101	132	340	350	343	263	294	311
55	52	48	45	78	112	189	396	336	291	252	392	350
61	155	148	162	174	171	182	392	354	413	288	336	314

ตารางที่ ข.9 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	28.5			7.3	7.2	7.3	1.40	1.15	0.17	-	-	-	-	-	-
2	28.5			7.2	7.2	7.2	4.02	2.38	0.17	-	-	-	-	-	-
3	29.5			7.2	7.3	7.3	4.80	2.65	0.09	2.62	1.18	0.05	54.5	44.8	59.2
4	29.0			7.2	7.2	7.2	4.37	2.73	0.09	-	-	-	-	-	-
5	29.0			7.0	7.1	7.1	5.50	3.18	0.17	3.06	1.79	0.10	55.6	56.2	56.1
6	28.5			6.9	7.0	6.9	4.89	2.73	0.09	-	-	-	-	-	-
7	28.5			7.0	7.1	7.0	5.24	3.00	0.17	3.12	1.77	0.10	59.5	59.1	58.5
8	27.0			7.1	7.2	7.2	4.80	2.73	0.17	-	-	-	-	-	-
9	27.0			6.9	7.1	7.1	5.07	2.91	0.09	2.67	1.60	0.05	52.7	54.8	52.3
10	27.5			6.9	7.1	7.1	4.11	2.56	0.09	-	-	-	-	-	-
11	29.0			6.9	7.1	7.1	5.24	2.65	1.83	2.62	1.49	1.02	50.1	56.2	56.0
12	28.0			6.7	6.9	6.9	5.07	3.00	1.65	-	-	-	-	-	-
13	28.0			6.8	7.0	7.1	5.07	2.47	1.39	2.62	1.45	0.77	51.6	58.8	55.2
14	28.5			6.7	6.9	6.9	5.07	2.65	1.31	-	-	-	-	-	-
15	26.5			6.8	7.0	7.0	4.98	2.91	0.61	2.95	1.70	0.35	59.2	58.4	57.3
16	26.5			6.7	6.9	6.9	4.72	2.73	1.13	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.9 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
17	26.5			6.7	7.0	7.1	4.54	2.21	1.05	2.67	1.19	0.59	58.7	53.9	56.8
18	27.0			6.7	7.0	7.0	4.02	2.73	0.09	-	-	-	-	-	-
19	26.0			6.7	7.0	7.0	4.11	3.00	0.44	2.28	1.71	0.27	49.6	57.1	57.3
20	26.0			6.6	6.9	6.9	4.28	2.91	0.09	-	-	-	-	-	-
21	27.5			6.7	7.0	7.0	3.32	2.65	0.17	1.78	1.55	0.10	53.7	58.5	57.6
22	27.0			6.6	6.8	6.9	3.67	3.09	0.78	-	-	-	-	-	-
23	28.0			6.6	6.9	6.9	3.32	2.65	0.26	1.70	1.52	0.15	51.3	57.3	56.5
24	27.5			6.6	6.9	6.9	3.58	3.09	0.61	-	-	-	-	-	-
25	27.0			6.6	6.9	6.9	3.76	3.00	0.26	1.94	1.70	0.14	51.7	56.8	54.6
26	28.0			6.7	6.9	7.0	3.41	2.65	0.17	-	-	-	-	-	-
27	28.0			6.6	6.9	6.9	3.49	2.91	0.35	1.77	1.61	0.19	50.7	55.2	55.9
28	27.5			6.6	6.9	6.9	3.76	3.00	0.17	-	-	-	-	-	-
29	27.5			6.6	6.9	6.9	3.41	2.73	0.09	2.05	1.78	0.06	60.2	65.1	64.6
30	28.0			6.7	6.9	6.9	3.41	2.82	0.17	-	-	-	-	-	-
31	28.0			6.6	6.8	6.8	3.84	2.91	0.09	2.29	1.87	0.05	59.6	64.3	62.9
32	28.5			6.7	6.9	6.9	3.23	2.56	1.31	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.9 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
33	28.0			6.7	6.9	6.9	4.02	3.09	1.92	2.34	2.00	1.24	58.2	64.6	64.8
34	27.0			6.7	6.9	6.9	3.49	2.73	0.96	-	-	-	-	-	-
35	26.5			6.7	6.9	6.8	3.32	2.65	1.92	1.84	1.66	1.20	55.5	62.6	62.4
36	25.5			6.6	6.8	6.9	2.97	2.65	1.74	-	-	-	-	-	-
37	27.0			6.7	6.9	7.0	2.80	2.56	1.65	1.53	1.56	0.90	54.6	60.9	54.5
38	27.5			6.8	7.0	7.2	3.06	3.00	1.83	-	-	-	-	-	-
39	28.5			6.6	6.8	6.9	3.23	3.00	1.74	1.78	1.99	1.17	55.0	66.5	67.4
40	28.5			6.7	6.8	6.9	3.14	3.00	1.57	-	-	-	-	-	-
41	28.0			6.8	7.0	7.1	3.23	2.82	1.39	1.86	1.88	0.92	57.5	66.7	66.3
42	28.0			6.7	6.8	7.0	3.41	2.91	1.22	-	-	-	-	-	-
43	27.0			6.7	6.8	6.9	3.32	2.73	1.31	1.95	1.82	0.86	58.7	66.4	66.1
44	27.0			6.8	6.8	6.9	3.06	2.56	1.57	-	-	-	-	-	-
45	26.5			6.7	6.8	6.8	3.14	1.15	1.83	1.80	0.76	1.21	57.2	66.6	66.0
46	26.5			7.1	7.1	7.1	3.06	2.73	1.74	-	-	-	-	-	-
47	26.0			7.1	7.1	7.1	2.45	2.47	1.65	1.33	1.64	1.08	54.2	66.4	65.3

ตารางที่ ข.9 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
48	25.5			6.9	7.1	7.1	2.62	2.47	1.74	-	-	-	-	-	-
49	26.5			6.9	7.0	7.0	2.62	2.82	1.65	1.33	1.86	1.08	50.8	65.8	65.0
50	27.0			6.9	7.1	7.1	2.88	3.26	2.00	-	-	-	-	-	-
51	27.5			7.0	7.1	7.2	2.97	3.26	1.92	1.45	2.12	1.23	48.8	64.9	64.1
52	27.5			6.9	7.1	7.1	2.80	3.00	2.09	-	-	-	-	-	-
53	28.0			6.9	7.1	7.1	3.14	3.53	2.18	1.59	2.29	1.39	50.5	64.8	63.8
54	28.0			6.8	7.1	7.1	2.45	2.82	1.65	-	-	-	-	-	-
55	27.5			6.9	7.1	7.1	3.23	3.26	2.26	1.62	2.11	1.43	50.2	64.8	63.3
56	27.5			6.9	7.1	7.1	2.88	2.82	1.74	-	-	-	-	-	-
57	28.0			7.0	7.1	7.1	2.97	3.00	1.92	1.46	1.92	1.22	49.2	64.1	63.6
58	28.0			7.0	7.1	7.1	3.14	3.26	2.18	-	-	-	-	-	-
59	28.0			7.1	7.1	7.2	3.14	3.35	2.00	1.52	2.12	1.25	48.4	63.2	62.6
60	28.0			7.0	7.1	7.1	2.71	3.00	2.00						
61	28.5			7.0	7.1	7.2	3.06	3.35	2.35	1.47	2.11	1.46	48.0	62.9	62.2
62	29.0			7.0	7.1	7.2	2.97	2.82	2.18	-	-	-	-	-	-
63	28.5			7.0	7.1	7.2	2.97	3.35	2.09	1.39	2.11	1.30	46.8	62.8	62.3



ตารางที่ ข.9 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 24 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
64	28.0			7.1	7.2	7.3	3.06	3.00	2.09	-	-	-	-	-	-
65	28.5			7.1	7.2	7.3	2.97	3.09	2.00	1.35	1.91	1.23	45.4	62.0	61.2

ตารางที่ ข.10 ผลการวิเคราะห์ค่า COD ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	TCOD inf (mg/l)			COD <sub>settle</sub> eff (mg/l)			COD <sub>settle</sub> removal (%)		
	HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	13,886	15,257	14,914	4,354	823	926	68.6	94.6	93.8
4	16,348	15,478	15,652	4,591	870	870	71.9	94.4	94.4
7	15,429	15,429	16,114	4,663	771	891	69.8	95.0	94.5
10	14,333	15,000	15,333	4,933	900	1,000	65.6	94.0	93.5
13	14,333	14,333	15,667	5,467	900	867	61.9	93.7	94.5
16	14,919	14,270	14,919	5,189	957	941	65.2	93.3	93.7
19	15,000	15,333	13,333	5,533	850	833	63.1	94.5	93.8
22	18,667	18,667	19,333	5,467	1,000	967	70.7	94.6	95.0
25	11,640	12,240	11,520	6,640	792	732	43.0	93.5	93.6
28	10,200	10,080	10,680	6,316	768	696	38.1	92.4	93.5
31	9,840	9,840	10,560	6,800	864	720	30.9	91.2	93.2
34	13,120	14,400	13,920	5,280	1,280	880	59.8	91.1	93.7
37	12,158	15,632	15,000	5,921	932	868	51.3	94.0	94.2
40	12,632	12,947	14,368	6,079	884	805	51.9	93.2	94.4
43	13,500	14,167	14,000	6,083	983	883	54.9	93.1	93.7
46	14,833	15,833	15,500	6,250	950	950	57.9	94.0	93.9
49	11,415	12,293	12,146	5,927	849	746	48.1	93.1	93.9
52	11,854	13,756	13,171	5,122	849	790	56.8	93.8	94.0
55	11,700	13,800	13,200	6,450	900	750	44.9	93.5	94.3
58	14,345	16,828	14,897	6,690	1,034	883	53.4	93.9	94.1
61	13,171	14,927	13,756	7,463	1,024	907	43.3	93.1	93.4
64	14,747	15,325	15,614	7,807	896	867	47.1	94.2	94.4
67	12,698	13,814	13,674	6,000	935	753	52.7	93.2	94.5
70	12,293	14,634	10,244	6,732	922	820	45.2	93.7	92.0
73	11,581	13,814	14,512	5,581	879	740	51.8	93.6	94.9
76	12,267	13,067	13,333	6,267	800	800	48.9	93.9	94.0
79	11,473	12,659	12,132	5,275	765	778	54.0	94.0	93.6
82	13,565	12,000	12,261	5,413	926	665	60.1	92.3	94.6
85	12,414	13,517	15,724	6,483	910	1,048	47.8	93.3	93.3

ตารางที่ ข.11 ผลการวิเคราะห์ค่า TS และ VS ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับ ตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	TS inf (g/l)			TS eff (g/l)			TS <sub>removal</sub> (%)			VS inf (g/l)			VS eff (g/l)			VS <sub>removal</sub> (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	20.2	19.0	18.2	16.0	9.8	9.8	20.9	48.6	46.0	13.8	13.9	13.8	9.9	5.5	5.8	28.1	60.2	57.9
4	18.0	17.4	16.7	13.7	9.9	9.9	23.8	43.1	40.9	13.1	13.1	12.6	7.8	5.6	5.6	40.1	57.6	55.0
7	22.1	19.0	19.5	16.4	10.5	10.3	26.0	45.0	47.3	13.2	13.8	13.6	9.4	5.9	6.1	28.6	57.5	55.0
10	21.1	18.6	18.2	16.5	10.6	10.3	21.6	42.9	43.4	13.1	13.7	13.3	9.7	5.8	6.0	26.1	57.6	54.8
13	21.0	19.2	19.4	18.3	10.7	10.0	18.3	44.6	48.2	13.3	14.2	14.0	11.2	5.8	5.7	27.2	59.0	59.7
16	21.0	20.2	19.8	19.6	10.8	10.4	17.6	46.7	47.5	15.1	15.1	14.7	12.7	6.2	6.2	31.3	58.8	58.1
19	20.8	19.5	18.6	17.5	10.5	10.2	16.0	46.4	45.1	13.8	14.4	14.1	11.0	5.8	5.8	20.7	59.6	59.0
22	23.5	21.7	21.3	19.0	11.2	11.6	19.2	48.5	45.6	16.2	16.0	16.3	12.5	6.4	6.8	23.0	59.7	58.0
25	18.4	17.9	17.8	16.3	11.0	11.4	11.4	38.5	36.1	12.8	13.2	13.0	10.0	6.2	6.7	21.6	52.8	48.2
28	15.4	14.9	14.5	14.0	10.3	10.2	9.6	30.5	29.9	10.8	11.3	11.6	8.1	5.8	5.8	24.8	48.4	50.2
31	16.9	14.4	14.5	14.7	10.2	10.2	12.7	29.1	29.8	10.4	10.9	11.1	9.1	5.8	5.8	12.2	47.2	47.5
34	17.0	15.2	14.2	15.5	10.2	10.2	8.6	32.5	28.4	11.6	11.8	11.4	10.2	6.1	6.2	11.9	48.3	45.6
37	16.2	14.2	14.1	14.5	10.4	10.5	10.8	26.7	25.3	11.7	11.2	11.3	8.9	6.5	6.5	24.4	41.7	42.7
40	16.8	15.3	14.4	13.9	10.1	10.0	17.1	34.5	30.3	10.7	11.5	10.8	8.4	5.9	6.0	21.4	48.7	44.9
43	19.3	14.9	14.8	14.7	9.9	9.5	23.8	33.6	35.9	10.7	10.9	11.1	8.3	5.6	5.4	22.2	48.4	51.6
46	16.5	14.0	14.4	14.5	9.3	9.6	12.3	33.4	33.5	10.8	10.7	11.4	8.2	5.3	5.7	23.9	50.7	49.4

ตารางที่ ข.11 ผลการวิเคราะห์ค่า TS และ VS ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	TS inf (g/l)			TS eff (g/l)			TS <sub>removal</sub> (%)			VS inf (g/l)			VS eff (g/l)			VS <sub>removal</sub> (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
49	15.2	15.2	14.3	12.0	9.1	9.7	20.8	39.9	32.3	11.9	11.6	11.3	8.4	5.3	5.8	29.3	54.7	48.5
52	21.3	16.4	16.9	16.8	9.3	9.8	21.0	43.3	41.9	11.7	12.2	11.7	10.0	5.9	6.0	14.5	51.7	49.0
55	23.5	16.7	15.8	20.3	10.5	9.7	13.7	37.3	38.5	12.6	12.2	11.8	10.1	6.2	5.5	19.4	49.1	53.1
58	15.7	15.1	15.0	13.3	10.0	9.5	15.0	33.8	36.8	11.2	11.0	11.3	9.8	5.4	5.1	12.0	50.9	54.6
61	14.8	15.4	14.2	13.3	9.9	10.1	10.5	36.0	28.9	11.0	12.0	11.1	9.3	5.9	6.0	16.2	50.9	46.1
64	16.6	16.2	15.6	14.0	10.1	9.4	15.8	37.8	39.4	12.6	12.5	12.3	9.7	5.7	5.6	22.5	54.8	54.6
67	16.7	15.6	15.3	15.0	10.8	10.0	10.3	30.5	34.6	12.4	12.1	12.1	9.4	6.6	6.3	24.2	45.5	48.3
70	23.4	17.3	17.8	18.8	10.0	10.6	19.8	42.4	40.1	14.2	13.0	11.6	11.7	6.5	6.2	17.2	50.3	46.5
73	16.6	16.5	16.1	14.2	10.5	10.6	14.5	36.0	34.0	11.2	12.6	13.1	8.8	6.4	6.1	21.8	48.9	53.4
76	19.7	15.5	14.5	15.9	9.8	9.5	19.5	37.0	34.7	12.1	11.7	11.7	9.5	5.6	5.2	21.1	52.3	55.7
79	20.2	17.2	16.7	17.7	11.8	10.4	12.3	31.5	37.9	14.1	13.9	14.1	11.2	7.1	6.2	20.9	48.5	56.0
82	17.6	17.0	14.8	15.1	10.1	9.7	14.1	40.4	34.4	12.4	12.5	11.7	9.8	5.9	5.9	20.9	52.6	49.9
85	19.7	16.8	14.2	17.5	9.6	9.4	11.4	42.9	33.8	10.4	10.8	11.0	8.2	5.2	5.5	20.9	52.3	50.0

ตารางที่ ข.12 ผลการวิเคราะห์ค่า Alkalinity และ VFA ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	Alkalinity eff (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )			VFA eff (mg/l as CH <sub>3</sub> COOH)			VFA/Alkalinity		
	HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	4,819	3,500	3,324	1,733	248	204	0.36	0.07	0.06
4	4,519	3,469	3,300	2,116	433	295	0.47	0.12	0.09
7	5,481	3,775	3,356	2,075	356	288	0.38	0.09	0.09
10	5,644	3,875	3,638	2,189	380	561	0.39	0.10	0.15
13	5,906	3,900	3,631	2,141	275	184	0.36	0.07	0.05
16	5,606	3,850	3,631	2,363	291	359	0.42	0.08	0.10
19	5,500	3,881	3,688	1,453	181	159	0.26	0.05	0.04
22	5,206	4,013	3,813	1,813	163	147	0.35	0.04	0.04
25	4,775	3,956	3,844	1,319	309	319	0.28	0.08	0.08
28	4,475	3,850	3,794	1,084	125	138	0.24	0.03	0.04
31	4,713	3,663	3,569	1,197	116	78	0.25	0.03	0.02
34	4,931	3,856	3,794	1,050	109	109	0.21	0.03	0.03
37	4,713	3,663	3,744	1,006	106	113	0.21	0.03	0.03
40	4,788	3,556	3,606	934	116	109	0.20	0.03	0.03
43	5,650	3,669	3,506	900	103	97	0.16	0.03	0.03
46	5,663	3,444	3,406	938	109	109	0.17	0.03	0.03
49	5,775	3,081	3,038	1,228	103	100	0.21	0.03	0.03
52	5,888	3,056	3,031	1,216	103	97	0.21	0.03	0.03
55	7,944	3,175	3,038	1,191	103	97	0.15	0.03	0.03
58	6,706	3,144	2,969	1,288	106	109	0.19	0.03	0.04
61	5,750	3,094	2,875	1,366	113	128	0.24	0.04	0.04
64	4,844	3,056	2,869	1,275	113	106	0.26	0.04	0.04
67	4,219	2,969	2,813	1,175	116	106	0.28	0.04	0.04
70	4,813	3,000	3,619	1,263	119	116	0.26	0.04	0.03
73	4,919	2,931	3,375	1,266	109	103	0.26	0.04	0.03
76	5,288	2,894	3,213	1,328	116	125	0.25	0.04	0.04
79	5,325	2,831	3,119	1,116	128	128	0.21	0.05	0.04
82	5,019	2,919	2,913	1,366	184	150	0.27	0.06	0.05

ตารางที่ ข.12 ผลการวิเคราะห์ค่า Alkalinity และ VFA ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Alkalinity eff (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )			VFA eff (mg/l as CH <sub>3</sub> COOH)			VFA/Alkalinity		
	HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30
85	5,938	3,269	2,831	1,216	103	103	0.20	0.03	0.04

ตารางที่ ข.13 ผลการวิเคราะห์ค่า NH<sub>3</sub>-N และ TKN ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	NH <sub>3</sub> -N inf (mg/l)			NH <sub>3</sub> -N eff (mg/l)			TKN inf (mg/l)			TKN eff (mg/l)		
	HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	167	167	178	160	143	146	578	543	424	424	441	424
7	136	251	225	255	202	207	501	588	417	438	469	431
13	237	258	263	286	238	232	487	525	588	412	378	350
19	241	241	246	283	246	235	438	532	497	400	406	426
25	108	115	106	252	252	246	364	333	361	395	361	389
31	87	104	105	210	207	227	347	326	333	356	322	356
37	116	125	125	160	199	204	382	413	354	322	420	400
43	195	199	199	174	230	246	441	410	483	283	400	395
49	160	227	232	188	210	232	466	413	515	216	302	496
55	260	265	297	266	244	328	543	553	483	370	420	426
61	262	273	274	272	244	255	588	585	599	445	454	479
67	116	125	83	216	230	235	448	364	273	314	409	442
73	115	123	127	160	199	213	431	385	459	314	389	420
79	105	105	91	129	182	202	392	322	350	255	361	244

ตารางที่ ข.14 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง หมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
1	27.5			7.1	7.2	7.2	2.53	3.22	2.00	0.90	1.92	1.02	35.8	59.5	50.7
2	28.0			7.1	7.2	7.2	2.53	3.31	2.09	-	-	-	-	-	-
3	28.0			7.0	7.2	7.2	2.44	3.31	2.26	0.82	1.79	1.14	33.5	54.0	50.1
4	28.5			7.0	7.2	7.3	2.44	3.22	2.18	-	-	-	-	-	-
5	29.0			7.0	7.2	7.3	2.87	3.05	2.18	1.05	1.64	1.15	36.4	53.8	52.9
6	29.0			7.0	7.2	7.3	3.22	2.26	2.26	-	-	-	-	-	-
7	29.5			7.1	7.2	7.3	3.05	2.26	2.26	1.13	1.21	1.29	37.1	53.3	56.8
8	29.0			7.1	7.2	7.3	3.05	1.74	2.26	-	-	-	-	-	-
9	30.0			7.1	7.2	7.2	2.96	2.53	2.26	1.16	1.26	1.19	39.2	49.8	52.4
10	29.0			7.1	7.3	7.3	2.96	2.44	2.26	-	-	-	-	-	-
11	29.0			7.1	7.2	7.3	2.79	2.00	2.26	1.15	1.03	1.14	41.4	51.4	50.5
12	29.5			7.1	7.2	7.3	2.87	3.05	2.26	-	-	-	-	-	-
13	29.5			7.1	7.2	7.3	2.79	2.70	2.26	1.13	1.48	1.21	40.6	54.7	53.3
14	30.0			7.1	7.2	7.2	2.70	3.40	2.18	-	-	-	-	-	-
15	29.5			7.1	7.2	7.3	2.87	2.96	1.92	1.13	1.55	0.95	39.3	52.3	49.6
16	29.0			7.1	7.2	7.2	2.79	3.22	2.26	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.14 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง หมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
17	30.0			7.1	7.3	7.3	2.70	3.14	2.18	1.22	1.78	1.22	45.0	56.6	55.9
18	30.0			7.1	7.2	7.3	2.87	3.31	2.26	-	-	-	-	-	-
19	30.0			7.0	7.2	7.3	2.87	3.14	2.18	1.24	1.75	1.06	43.2	55.9	48.6
20	30.5			7.0	7.2	7.3	3.14	2.00	2.26	-	-	-	-	-	-
21	30.0			7.0	7.2	7.3	2.53	1.57	2.26	0.97	0.71	1.18	38.6	45.3	51.9
22	30.0			7.1	7.2	7.3	1.31	3.40	2.18	-	-	-	-	-	-
23	30.5			7.1	7.3	7.3	2.09	3.31	2.26	0.40	1.52	1.02	23.9	45.8	44.9
24	30.5			7.0	7.3	7.3	2.18	2.70	2.35	-	-	-	-	-	-
25	31.0			7.0	7.2	7.3	2.26	2.53	2.44	0.58	0.98	1.22	25.7	38.9	49.9
26	31.0			7.0	7.3	7.3	2.44	2.26	2.44	-	-	-	-	-	-
27	31.0			7.0	7.3	7.3	2.44	2.79	2.26	0.75	1.39	1.32	30.9	49.9	58.5
28	30.5			6.9	7.3	7.3	2.70	2.61	2.44	-	-	-	-	-	-
29	31.0			6.9	7.3	7.3	2.44	2.26	2.00	0.66	1.21	0.93	27.2	53.6	46.6
30	30.0			6.8	7.2	7.3	2.44	1.39	1.92	-	-	-	-	-	-
31	31.0			6.8	7.2	7.3	2.44	1.92	1.92	0.81	1.05	0.93	33.1	54.9	48.7
32	29.5			6.9	7.2	7.2	2.44	2.96	1.83	-	-	-	-	-	-



ตารางที่ ข.14 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง หมักร่วมกับตะกอนดีแคเนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
33	29.0			6.9	7.2	7.2	2.35	2.70	0.96	0.59	1.53	0.44	25.1	56.5	46.2
34	27.0			6.9	7.2	7.2	2.18	2.79	1.74	-	-	-	-	-	-
35	28.5			6.9	7.2	7.2	2.35	2.87	1.92	0.62	1.37	1.02	26.4	47.6	53.0
36	29.5			6.9	7.1	7.2	2.26	2.87	1.83	-	-	-	-	-	-
37	31.0			6.9	7.1	7.2	2.53	3.22	2.09	0.76	1.60	1.13	30.0	49.5	53.9
38	28.0			6.9	7.1	7.2	2.87	2.79	1.48	-	-	-	-	-	-
39	28.5			6.9	7.1	7.2	2.87	3.05	1.92	0.95	1.90	1.14	33.2	62.4	59.3
40	29.5			6.8	7.1	7.2	2.96	2.87	1.39	-	-	-	-	-	-
41	30.5			6.9	7.1	7.2	3.14	3.14	1.13	1.09	2.02	0.63	34.7	64.5	55.5
42	30.0			6.9	7.1	7.1	3.14	3.05	2.00	-	-	-	-	-	-
43	30.5			7.0	7.1	7.2	2.96	3.05	0.96	0.98	1.75	0.63	33.0	57.4	65.4
44	30.5			7.1	7.1	7.2	2.87	2.96	1.65	-	-	-	-	-	-
45	30.5			7.1	7.1	7.2	2.79	2.87	1.57	0.74	1.63	1.01	26.4	56.6	64.4
46	30.5			7.1	7.1	7.2	2.79	2.96	0.96	-	-	-	-	-	-
47	31.0			7.2	7.1	7.2	2.79	3.05	1.92	0.95	1.88	1.24	34.1	61.7	64.7

ตารางที่ ข.14 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง หมักร่วมกับตะกอนดีแคเนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
48	31.0			7.0	7.1	7.1	2.96	2.87	1.05	-	-	-	-	-	-
49	31.0			7.1	7.1	7.2	3.05	3.05	1.05	1.01	1.96	0.67	33.2	64.3	64.2
50	28.0			7.0	7.0	7.0	2.35	2.44	0.78	-	-	-	-	-	-
51	28.0			7.1	7.0	7.0	2.61	2.00	2.26	0.76	0.96	1.22	29.1	47.7	53.8
52	29.0			7.1	7.0	7.0	2.53	2.70	2.44	-	-	-	-	-	-
53	29.0			7.1	7.0	7.0	3.14	2.87	1.92	0.96	1.53	1.13	30.5	53.2	58.7
54	30.0			7.2	7.0	7.0	3.05	2.87	1.92	-	-	-	-	-	-
55	31.0			7.3	7.1	7.1	3.83	3.66	2.09	1.10	2.44	1.14	28.8	66.8	54.3
56	30.5			7.3	7.1	7.1	2.96	2.96	0.35	-	-	-	-	-	-
57	30.0			7.3	7.1	7.1	1.74	3.05	0.35	0.57	1.67	0.20	32.6	54.6	56.8
58	31.0			7.3	7.1	7.2	3.05	3.05	0.52	-	-	-	-	-	-
59	31.5			7.2	7.1	7.2	3.40	3.31	0.44	0.93	1.88	0.26	27.2	56.8	59.5
60	30.0			7.2	7.1	7.2	3.40	3.31	0.44	-	-	-	-	-	-
61	31.0			7.2	7.1	7.2	3.14	3.05	1.74	1.00	1.75	1.04	31.8	57.3	59.8
62	30.5			7.1	7.1	7.2	3.14	3.05	2.18	-	-	-	-	-	-
63	29.0			7.1	7.1	7.2	3.31	3.14	2.00	1.11	1.79	1.19	33.6	57.0	59.6

ตารางที่ ข.14 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง หมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (l/d)			Methane (l/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
64	28.0			7.0	7.1	7.2	3.14	2.87	2.00	-	-	-	-	-	-
65	31.0			7.0	7.2	7.2	3.22	3.05	2.09	0.75	1.31	0.89	23.2	43.0	42.7
66	29.5			6.9	7.2	7.2	3.05	3.05	1.65	-	-	-	-	-	-
67	31.0			6.8	7.1	7.1	2.96	2.79	2.00	0.68	1.26	0.63	23.1	45.3	31.4
68	30.5			6.9	7.1	7.2	3.05	2.96	1.92	-	-	-	-	-	-
69	31.0			6.8	7.1	7.2	3.14	2.44	2.09	0.74	1.04	0.88	23.7	42.6	42.3
70	30.5			6.9	7.1	7.2	3.05	2.44	1.83	-	-	-	-	-	-
71	30.0			7.0	7.1	7.3	2.96	2.53	2.00	0.46	1.18	0.89	15.4	46.6	44.2
72	31.0			7.0	7.1	7.3	2.87	2.35	1.83	-	-	-	-	-	-
73	31.0			7.0	7.1	7.3	2.79	1.83	1.83	0.68	0.84	0.82	24.3	45.9	44.8
74	31.0			7.0	7.1	7.3	3.05	2.53	1.92	-	-	-	-	-	-
75	31.0			7.0	7.1	7.3	3.05	2.96	1.92	0.76	1.16	0.86	24.8	39.3	45.0
76	30.0			7.1	7.1	7.3	2.79	2.87	1.74	-	-	-	-	-	-
77	28.5			7.1	7.1	7.2	2.96	2.87	1.92	0.62	1.18	0.85	21.1	41.2	44.5
78	29.5			7.1	7.1	7.3	3.14	3.05	1.92	-	-	-	-	-	-
79	29.0			7.1	7.1	7.3	2.87	2.87	1.83	0.66	1.16	0.69	23.0	40.2	37.7

ตารางที่ ข.14 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง หมักร่วมกับตะกอนดีแคนเตอร์ กวนผสม 12 ชั่วโมง (ต่อ)

วันที่ ทดลอง	Temperature (°C)			pH			Biogas (L/d)			Methane (L/d)			Methane (%)		
	HRT			HRT			HRT			HRT			HRT		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
80	28.0			7.1	7.1	7.3	2.87	2.87	1.83	-	-	-	-	-	-
81	28.0			7.1	7.1	7.2	2.87	2.70	1.83	0.59	1.26	0.86	20.6	46.5	46.8
82	30.5			7.1	7.1	7.2	2.87	2.87	2.09	-	-	-	-	-	-
83	30.0			7.1	7.1	7.2	3.05	3.05	2.09	0.76	1.45	0.96	24.9	47.4	46.0
84	29.0			7.1	7.1	7.2	2.96	2.87	2.00	-	-	-	-	-	-
85	30.5			7.1	7.1	7.2	2.87	2.79	2.00	0.69	1.29	0.88	23.9	46.2	44.1
86	28.0			7.1	7.0	7.0	2.96	2.87	2.09	-	-	-	-	-	-

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อสกุล	นางสาวนฤมล เชาวะกระโทก	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5210120115	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (อนามัยสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	2552

## ทุนการศึกษา

ทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2553

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

นฤมล เชาวะกระโทก และคณะ. 2554. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับกากตะกอนดีแคเนเตอร์ของอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมและการจัดการสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 3. ณ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร. วันที่ 14-15 มีนาคม 2554.

นฤมล เชาวะกระโทก และ ธนียา เกาศล. 2555. ผลของอุณหภูมิต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับกากตะกอนดีแคเนเตอร์ของอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 11. ณ โรงแรมโพธิ์วิลล รีสอร์ท แอนด์ สปา, เชียงราย. วันที่ 21-23 มีนาคม 2555.

Thaniya Kaosol and Narumol Sohgrathok. 2012. Influence of Hydraulic Retention Time on Biogas Production from Frozen Seafood Wastewater using Decanter Cake as Anaerobic Co-digestion Material. World Academy of Science, Engineering and Technology. 65.