ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของน้ำเสียชุมชนและเศษอาหาร

Potential of Biogas Production from Co-digestion of the Domestic Wastewater and Food Waste

ลลิตา สินไชย

Lalita Sinchai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของน้ำเสียชุมชนและเศษอาหาร

Potential of Biogas Production from Co-digestion of the Domestic Wastewater and Food Waste

ลลิตา สินไชย

Lalita Sinchai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Environmental Management
Prince of Songkla University
2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของน้ำเสียชุมชนและเศษอาหาร
ผู้เขียน นางสาวลลิตา สินไชย
สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	**คณะกรรมการสอบ**
.....	.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปุญญานิช อินทรพัฒน์)	(ดร.อรมาศ สุทธินุ่น)
	.....กรรมการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลทิศา สุขเกษม)
.....	.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีระวิทย์ รัตนพันธ์)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ สุวรรณโณ)
.....	.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธันวดี สุขสาโรจน์)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปุญญานิช อินทรพัฒน์)
	.....กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชีระวิทย์ รัตนพันธ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปุญญานิช อินทรพัฒน์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ .....
(นางสาวลลิตา สินไชย)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....
(นางสาวลลิตา สินไชย)
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารที่สภาวะมีโซฟิลิกและเทอโมฟิลิก

ผู้เขียน นางสาวลลิตา สินไชย

สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างน้ำน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร ด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งเริ่มต้นจากการศึกษาอัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมในระบบหมักแบบกะ จากนั้นนำอัตราส่วนที่ได้มาทำการศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีผลผลิตมีเทนสูงสุด ในระบบการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ Continuously Stirred Tank Reactor (CSTR) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนการหมักร่วมที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดที่คือ 10:90 w/v (เศษอาหาร:น้ำเสียชุมชน) ที่อุณหภูมิ 35 $\pm$1°C โดยมีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (BMP) สูงสุด เท่ากับ 0.674 ml CH_4 /mg $COD_{removal}$ และมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 62% ด้วยอัตราส่วน C/N เท่ากับ 29.72 จากนั้นจึงนำอัตราส่วนที่เหมาะสมมาทำการศึกษาด้วยระบบการหมักแบบไร้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่อุณหภูมิ 35 $\pm$1°C โดยทำการศึกษาที่ระยะเวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า ระยะเวลากักเก็บที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง คือ ระยะเวลากักเก็บที่ 30 วัน โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 2,760 $\pm$115.33 ml/day มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 50.43 $\pm$7.31 % อัตราการผลิตก๊าซมีเทนได้ 1,395.67 $\pm$237.97 ml/day และมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 1.097 $\pm$0.217 ml CH_4/mg $COD_{removal}$ โดยมีค่าพีเอชในระบบที่สภาวะคงที่เท่ากับ 7.25 $\pm$0.05 สภาพความเป็นด่างมีค่าเท่ากับ 3621.55 $\pm$239.28 mg/l as $CaCO_3$ ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าเท่ากับ 587.99 $\pm$60.40 mg/l as CH_3COOH และประสิทธิภาพในการบำบัด COD เท่ากับ 70.32 $\pm$1.80 % ท้ายสุดจึงทำการวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์ในระบบการหมักร่วมแบบไร้อากาศระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยอาศัยการวิเคราะห์ลำดับเบสบริเวณ 16S rDNA พบว่ามี *Bacteroides ssp.* เป็นจุลินทรีย์หลักที่สามารถตรวจพบได้ในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ โดยมีค่าความคล้ายคลึงกัน (similarity) เท่ากับ 99 %

Thesis Title	Potential of Biogas Production from Co-digestion of the Domestic Wastewater and Food Waste at Mesophilic and Thermophilic Condition.
Author	Miss Lalita Sinchai
Major Program	Environmental Management
Academic Year	2015

ABSTRACT

This research proposes the study case of the biogas production performance from co-digestion of domestic waste water and food waste under mesophilic and thermophilic condition. The optimum co-digestion ratio and the temperature were investigated in the batch system. The biogas production was operated in the semi-continuous system with the continuously stirred tank reactor (CSTR) under the selected optimum co-digestion ratio and temperature to determine the optimum hydraulic retention time (HRT). From this study, the optimum high potential of biogas and methane production for co-digestion achieved 10:90 w/v (food waste: domestic wastewater) under 35 ±1°C with 0.674 ml CH_4 /mg $COD_{removal}$ of highest biogas production potential, 62% of methane content and 29.72 of C/N ratio. Next, semi-continuous CSTR under 35 ±1°C with the optimum condition form batch experiment and various HRT at 10, 20 and 30 days were investigated. The result showed that the highest efficiency of HRT for biogas production under semi-continuous was 30 days with 2,760 ±115.33 ml/day of biogas production, 50.43 ±7.31 % of methane content, 1,395.67 ±237.97 ml/day of methane production rate, and 1.097 ±0.217 ml CH_4/mg $COD_{removal}$ of highest biogas production potential. For steady state operation, the values of pH, alkalinity, volatile organic compound and COD removal efficiency achieves 7.25 ±0.05, 3621.55 mg/l as $CaCO_3$, 587.99±60.40 mg/l as CH_3COOH and 70.32 ±1.80 %, respectively. Finally, the bacterial identification of co-digestion between domestic wastewater and food waste under semi-continuous operation was investigated by using 16s rDNA sequencing. The result showed that the *Bacteroides ssp.* was the microorganism as dominant component with 99% of similarity.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีจากอาจารย์หลาย ๆ ท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชีระวิทย์ รัตนพันธ์ ผศ.ดร. ธันวดี สุขสาโรจน์ และ ผศ.ดร.ปุญญนิช อินทรพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ ให้มุมมอง แง่คิด รวมถึงช่วยแก้ปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ในการทำวิจัย ตรวจแก้ไขความถูกต้องเรียบร้อย ตลอดจนให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ดร.อรมาศ สุทธินุ่น ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบทุกท่านที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในการสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัทโชติวัฒน์อุตสาหกรรม จำกัด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ที่ให้การสนับสนุนหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ ตลอดช่วยอำนวยความสะดวกในการเก็บหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลาที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการเข้าเก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชนเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณพนักงานทำความสะอาดโรงอาหารโรงช้าง โรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์ โรงอาหารคณะทรัพยากรธรรมชาติ ที่ให้การช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการเข้าไปเก็บตัวอย่างเศษอาหารของผู้วิจัยในทุกครั้ง

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ และนักวิทยาศาสตร์ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม ทุกท่าน ตลอดจนนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยเหลือในหลาย ๆ ขั้นตอนให้คำปรึกษาคำแนะนำต่าง ๆ ของการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวผู้วิจัย ที่สนับสนุนดูแลในทุก ๆ ด้าน และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้การศึกษาระดับปริญญาโทสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ลลิตา สินไชย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(13)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
2 การตรวจเอกสาร	
2.1 น้ำเสียชุมชน	5
2.1.1 ปริมาณน้ำเสีย	5
2.1.2 ลักษณะน้ำเสีย	6
2.1.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการตรวจวิเคราะห์น้ำเสีย	8
2.2 เศษอาหาร	10
2.3 ทฤษฎีและขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา การเกิดก๊าซชีวภาพ	11
2.3.1 ก๊าซชีวภาพ	11
2.3.2 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ	11
2.3.3 กลุ่มจุลินทรีย์สำคัญในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ	14
2.4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	15
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	16
2.6 ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ	22
2.7 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ	23
2.8 เทคนิคการจำแนกชนิดจุลินทรีย์โดยอาศัยการวิเคราะห์ลำดับเบสบริเวณ 16S rDNA	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 โครงสร้างประชากรจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์แบบไร้อากาศ	25
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 วัสดุอุปกรณ์	30
3.1.1 น้ำเสียชุมชน	30
3.1.2 เศษอาหาร	32
3.1.3 เชื้อตะกอนจุลินทรีย์	33
3.1.4 ถังปฏิกรณ์แบบกะ	35
3.1.5 ถังปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง	35
3.1.6 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพ	35
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	37
3.2.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารในการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบหมักแบบกะ	37
3.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียชุมชนด้วยการหมักร่วมกับเศษอาหารในระดับปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง	38
3.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	40
3.2.4 การวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์โดยอาศัยการวิเคราะห์ลำดับเบสบริเวณ 16S rDNA	41
3.2.4.1 การเก็บตัวอย่าง	41
3.2.4.2 การสกัดดีเอ็นเอ	41
3.2.4.3 เพิ่มปริมาณดีเอ็นเอด้วยเทคนิคพีซีอาร์	41
3.2.4.4 การระบุลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA	42
3.2.4.5 การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์	42
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุหมัก	43
4.1.1 น้ำเสียชุมชน	43
4.1.2 เศษอาหาร	45
4.1.3 เชื้อตะกอนจุลินทรีย์	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารในระบบหมักแบบกะ	48
4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียชุมชนร่วมกับเศษอาหารในระดับปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง	55
4.3.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	55
4.3.2 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) และกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid: VFA)	57
4.3.3 การบำบัดซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)	59
4.3.4 การบำบัดทีเคเอ็น (Total Kjeldah Nitrogen: TKN)	60
4.3.5 การบำบัดปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่าย (Total Solid: TS and Volatile Solid: VS)	61
4.3.6 การผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Production)	63
4.3.7 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Potential of Methane Production)	65
4.3.8 ผลการวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์โดยอาศัยการวิเคราะห์ลำดับเบสบริเวณ 16S rDNA	67
5 บทสรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	69
5.1.1 การศึกษาคุณลักษณะของวัสดุหมัก	69
5.1.2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหมักร่วมระว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารในระบบหมักแบบกะ	69
5.1.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียชุมชนร่วมกับเศษอาหารในระดับปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	82
ประวัติผู้เขียน	103

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน	5
2-2	ปริมาณน้ำเสียอาคารประเภทต่าง ๆ	6
2-3	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียชุมชน	8
2-4	ลักษณะสมบัติของเศษอาหาร	11
2-5	แสดงข้อดีและข้อจำกัดของการหมักร่วมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ	21
2-6	ข้อดีและข้อเสียของระบบถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์	24
3-1	พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียชุมชน	31
3-2	พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของเศษอาหาร	33
3-3	พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์	34
3-4	พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียก่อนและหลังการทดลอง	38
3-5	พารามิเตอร์ ประเภทของตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์น้ำเสียจากระบบ	39
4-1	คุณลักษณะของน้ำเสียชุมชน	44
4-2	คุณลักษณะของเศษอาหาร	46
4-3	คุณลักษณะของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์	47
4-4	ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง	53
4-5	ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากการทดลองแบบกะ	54
4-6	แสดงค่า Alkalinity, VFA และ VFA: Alkalinity ของ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน	58
4-7	ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน ภายใต้สภาวะคงที่ของระบบวันที่ 24	67

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่		หน้า
2-1	ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (Completely stirred tank reactor, CSTR)	23
3-1	บ่อรวบรวมน้ำเสียชุมชนระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ เทศบาลนครหาดใหญ่	31
3-2	ลักษณะเศษอาหารเหลือทิ้งจากโรงอาหาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	32
3-3	การเตรียมเศษอาหารก่อนนำไปทดลอง	33
3-4	ลักษณะทางกายภาพของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย	34
3-5	ลักษณะชุดอุปกรณ์ระบบแบบกะและการควบคุมอุณหภูมิที่ 35 $\pm$1^{o}C และ 55 $\pm$1^{o}C	36
3-6	ลักษณะชุดอุปกรณ์และการเดินระบบในการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง	36
3-7	ลักษณะชุดอุปกรณ์เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ	36
3-8	เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง	40
4-1	ลักษณะของตัวอย่างน้ำเสียชุมชน	44
4-2	ลักษณะของเศษอาหารที่ใช้ในการทดลอง	46
4-3	กราฟแสดงปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณภหภูมิ 35$\pm$1^{o}C และ 55 $\pm$1^{o}C	52
4-4	กราฟแสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณภหภูมิ 35$\pm$1^{o}C และ 55 $\pm$1^{o}C	52
4-5	แสดงค่า pH ของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร ด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ที่ HRT 10, HRT20 และ HRT 30 วัน	56
4-6	กรดไขมันระเหยง่ายในระบบหมักแบบไร้อากาศที่ HRT 10, 20 และ 30 วัน	59
4-7	ปริมาณ COD ในระบบหมักแบบไร้อากาศที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน	60
4-8	ปริมาณ TS ในระบบหมักแบบไร้อากาศจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร ที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน	62
4-9	ปริมาณ VS ในระบบหมักแบบไร้อากาศจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร ที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน	62
4-10	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน	64
4-11	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดการทดลองจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารที่ HRT 10, HRT20 และ HRT 30 วัน	64

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

HRT = Hydraulic Retention Time คือ ระยะเวลาที่น้ำถูกกักพักอยู่ในถังปฏิกิริยา

OLR = Organic Loading Rate คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในแต่ละวัน

Inf = Influentคือ น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ

Eff = Effluentคือ น้ำทิ้งที่ออกจากระบบ

MLVSS = Mixed Liquor Volatile Suspended Solids คือ ส่วนหนึ่งของ MLSS ที่เป็นอินทรีย์สาร มีค่าประมาณ 80-90% ของ MLSS

MLSS = Mixed Liquor Suspended Solids คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นโดยประมาณของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยา

COD = Chemical Oxygen Demand คือ ค่าความสกปรกของน้ำ ซึ่งเป็นปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงภายใต้สภาวะที่เป็นกรด

BOD = Biochemical Oxygen Demand คือ ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ชนิดที่ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ

TKN = Total Kjeldahl Nitrogen คือ ปริมาณไนโตรเจนที่ประกอบด้วยอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน

C/N Ratio = อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

VFA = Volatile fatty acid คือ กรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 6 ตัว สามารถละลายน้ำได้น้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถกลั่นได้ที่ความดันบรรยากาศ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ก๊าซชีวภาพคือ ก๊าซที่เกิดจากการนำของเสีย เช่น มูลสัตว์ชนิดต่างๆ น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ขยะ ของเหลือใช้ทางการเกษตร เป็นต้น มาผ่านกระบวนหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) โดยอาศัยแบคทีเรียหลายชนิดในการย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน เป็นต้น จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ อีกทั้งก๊าซชีวภาพยังเป็นทางเลือกหนึ่งของแหล่งพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยที่มีศักยภาพและ มีมูลค่าสูง โดยทั่วไปก๊าซชีวภาพ 1 ลบ.ม. ที่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 60 จะมีค่าความร้อนประมาณ 21 เมกะจูล (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553) สามารถนำก๊าซชีวภาพที่ได้มาเปลี่ยนเป็นพลังงานที่ใช้ในการประกอบอาหาร การผลิตแสงสว่าง และ การเดินเครื่องจักรดีเซลแทนที่การใช้น้ำมันเตาในการต้มน้ำและการผลิตกระแสไฟฟ้า (Metcelf and Eddy, 2004) ดังนั้นการหมักในระบบไร้อากาศจึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการของเสียด้วยข้อดีทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์ การบำบัดของเสีย และ การนำพลังงานมาใช้ประโยชน์

น้ำเสียชุมชนเป็นน้ำเสียชนิดหนึ่งที่กล่าวได้ว่ามีปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีประชากรอาศัยอย่างหนาแน่น จึงเป็นน้ำเสียชนิดหนึ่งที่เป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ โดยในปัจจุบันนั้นการบำบัดน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่จะเป็นการใช้ระบบบำบัดแบบใช้อากาศ ซึ่งมีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า อีกทั้งต้องใช้พื้นที่ในการบำบัดสูง ดังนั้นแนวทางในการเลือกใช้ระบบแบบไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียชุมชนจึงมีความน่าสนใจอย่างยิ่ง แต่ด้วยคุณลักษณะของน้ำเสียชุมชนเป็นน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์น้อย คือ มีค่าบีโอดี ซีโอดี และของแข็งแขวนลอย อยู่ในช่วง 110-400 mg/l, 250-1000 mg/l และ 100-350 mg/l ตามลำดับ (กรมโรงงานอุตาสาหกรรม, 2548) ดังนั้นหากจะนำระบบไร้อากาศมาใช้ในการจัดการน้ำเสียชุมชนเพื่อให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ที่ให้พลังและมีมูลค่าสูงแล้ว จึงได้มีการนำเอาเทคนิคการหมักร่วม (Co-digestion) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญอย่างหนึ่งของเทคโนโลยีแบบไร้อากาศและยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ

ชีวภาพอีกด้วย (Fern.andez *et al.*, 2005) และจากการศึกษาของ Manariotis and Grigoropoulos (2006) พบว่าน้ำเสียชุมชนสามารถนำมาบำบัดด้วยระบบแบบไร้อากาศ

ดังนั้นหากจะนำน้ำเสียชุมชนมามาใช้กับระบบไร้อากาศเพื่อให้เกิดผลิตก๊าซชีวภาพสามารถนำเทคนิคการหมักร่วม (Co-digestion) มาประยุกต์ใช้กับของเสียได้อย่างหลากหลาย โดยเทคนิคการหมักร่วมเป็นการนำของเสียที่มีปัญหาในการจัดการ เช่น ขยะอินทรีย์เศษอาหาร หรือขยะของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรม และเศษวัชพืชที่เหลือใช้ทางการเกษตรในบริเวณใกล้เคียงน้ำเสียชุมชนมาเป็นสารอินทรีย์ในการหมักร่วมให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น โดยปัจจุบันขยะชุมชนก็เป็นขยะอีกประเภทหนึ่งที่มีปัญหาในเรื่องของการจัดการ ซึ่งปริมาณขยะชุมชนที่มีเพิ่มมากขึ้น การกำจัดขยะเหล่านี้ต้องเสียต้นทุนในการกำจัด และอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ถ้ากำจัดไม่ถูกวิธี กรมควบคุมมลพิษ (2552) รายงานว่า ขยะชุมชนในประเทศไทยในปี พ.ศ.2551 มีปริมาณขยะ รวม 15.03 ล้านตัน มีการนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์เพียง 3.4 ล้านตัน และหากพิจารณาองค์ประกอบของขยะชุมชนของประเทศไทยแล้วพบว่ามีองค์ประกอบของเศษอาหารและอินทรีย์สารรวมกัน 63.57% เป็นเศษอาหาร 30.59% และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของเศษอาหารพบว่ามีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 50% (วุฒิภัณฑ์ คุมมินทร์, 2544) แสดงให้เห็นว่าขยะเศษอาหารเป็นสารอินทรีย์มีศักยภาพที่จะนำไปใช้ในการหมักร่วมกับน้ำเสียชุมชนได้ และการนำของขยะชุมชนมาหมักร่วมกันนั้นจะเป็นการเพิ่มศักยภาพในการผลิตพลังงานทางเลือกด้วยช่องทางในการนำขยะชุมชนกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง (Nayono *et al.*, 2010) ซึ่งจากการศึกษาของ Elena *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาในโรงงานที่ทำการหมักร่วมระหว่างมูลโคกับพืช พบว่า สามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ถึง 15 kw/ton/day และ Hamed Mashad and Ruihong (2010) พบว่าการหมักร่วมกันระหว่างมูลสัตว์กับเศษอาหารสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 87-90%

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร โดยจะทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารที่สภาวะ Mesophilic และ Thermophilic เพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และศึกษาการหมักร่วมแบบกึ่งต่อเนื่องที่สภาวะที่เหมาะสมในระดับห้องปฏิบัติการ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำเสียชุมชนในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วมกับเศษอาหารในระบบหมักแบบกะที่สภาวะ Mesophilic และ Thermophilic

2. เพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียชุมชนโดยการหมักร่วมกับเศษอาหารในระดับปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องที่สภาวะที่เหมาะสม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำน้ำเสียชุมชนมาหมักร่วมกับเศษอาหาร เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียดังกล่าวที่มีปริมาณสูงแต่มีปริมาณสารอาหารต่ำ และเป็นการเพิ่มปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ และลดปริมาณของเสียจากชุมชนได้อีกด้วย

2. สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่การจัดการน้ำเสียชุมชนโดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศร่วมกับเทคโนโลยีการหมักร่วมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อลดการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียชุมชนด้วยการหมักร่วมกับเศษอาหารที่สภาวะ Mesophilic ($35^{\circ}C$) และ Thermophilic ($55^{\circ}C$) ในครั้งนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียชุมชนที่เก็บจากบ่อรวบรวมน้ำเสียเทศบาลนครหาดใหญ่ และเศษอาหารจากโรงอาหารมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จากนั้นนำมาทำการหมักร่วมกันระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารแบบไร้อากาศ โดยจะทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเศษอาหารในการหมักร่วมกับน้ำเสียชุมชนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพในระบบหมักแบบกะ ที่สภาวะ Mesophilic ($35^{\circ}C$) และ Thermophilic ($55^{\circ}C$) จากนั้นจึงเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการทดลองขั้นถัดไป

2. เลือกอัตราส่วนที่สามารถให้ผลผลิตมีเทนได้สูงสุดจากการศึกษาส่วนที่ 1 มาทำการเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องในระดับปฏิบัติการ เพื่อศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหารหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater)

น้ำเสียชุมชน หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน และกิจกรรมที่เป็นอาชีพ เช่น น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหารและชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลายภายในครัวเรือน และอาคารประเภทต่าง ๆ เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2.1.1 ปริมาณน้ำเสีย

ปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากบ้านเรือน อาคาร จะมีค่าประมาณร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำใช้ หรืออาจประเมินได้จากจำนวนประชากร หรือพื้นที่ใช้สอยของอาคารแต่ละประเภท จากข้อมูลอัตราการเกิดน้ำเสียตารางที่ 1 เป็นการคาดการณ์อัตราการเกิดน้ำเสียชุมชน โดยแบ่งตามภาคต่าง ๆของประเทศ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของเศรษฐกิจกับการคาดการจำนวนประชากรในอนาคต นอกจากนี้การประเมินปริมาณน้ำเสียสามารถหาได้จากประเภทของอาคารในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน

ภาค	อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/คน-วัน)					
	2536	2540	2545	2550	2555	2560
กลาง	160-214	165-242	170-288	176-342	183-406	189-482
เหนือ	183	200	225	252	282	316
ตะวันออกเฉียงเหนือ	200-253	216-263	239-277	264-291	291-306	318-322
ใต้	171	185	204	226	249	275

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2545)

ตารางที่ 2-2 ปริมาณน้ำเสียอาคารประเภทต่าง ๆ

ประเภทของอาคาร	หน่วย	ปริมาณน้ำเสีย (ลิตร/วัน-หน่วย)
อาคารชุด/บ้านพัก	ยูนิต	500
โรงแรม	ห้อง	1,000
หอพัก	ห้อง	80
สถานบริการ	ห้อง	400
หมู่บ้านจัดสรร	คน	180
โรงพยาบาล	เตียง	800
ภัตตาคาร	ตารางเมตร	25
ตลาด	ตารางเมตร	70
ห้างสรรพสินค้า	ตารางเมตร	5.0
สำนักงาน	ตารางเมตร	3.0

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2545)

2.1.2 ลักษณะน้ำเสีย

ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากบ้านพักอาศัยจะประกอบไปด้วยน้ำเสียจากกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวันซึ่งมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1) **สารอินทรีย์** เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำมัน เช่น เศษข้าว ก๋วยเตี๋ยว น้ำแกง เศษใบตอง พืชผัก ชิ้นเนื้อ เป็นต้น ซึ่งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำเสียสามารถประมาณได้จากค่าปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) แต่ผลที่ได้อาจมีค่าไม่ละเอียด ดังนั้นการวัดปริมาณสารอินทรีย์จึงนิยมวัดในรูปของค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) หรือทีโอซี (Total Organic Carbon, TOC) (กรมโรงอุตสาหกรรม, 2548)

2) **สารอนินทรีย์** เป็นสารที่อยู่ในน้ำเสียทั่วๆไป สารอนินทรีย์บางชนิดช่วยให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเป็นไปได้ด้วยดี แต่บางชนิดอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ สารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เช่น คอลไรด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส Alkalinity pH โลหะหนัก ก๊าซ เป็นต้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

3) ไขมันและน้ำมัน ส่วนใหญ่ ได้แก่ น้ำมันและไขมันจากพืชและสัตว์ที่ใช้ในการทำอาหาร สบู่จากการอาบน้ำ และฟองสารซักฟอกจากการชำระล้าง สารเหล่านี้มีน้ำหนักเบาและลอยน้ำทำให้เกิดสภาพไม่น่าดูและขวางกั้นการซึมของออกซิเจนจากอากาศสู่แหล่งน้ำ

4) ของแข็ง หมายถึงปริมาณสารต่าง ๆที่มีอยู่ในน้ำเสียทั้งในลักษณะที่ไม่ละลายน้ำและที่ละลายน้ำ ของแข็งบางชนิดมีน้ำหนักเบาและแขวนลอยอยู่ในน้ำ บางชนิดหนักและจมตัวลงเบื้องล่าง ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำถ้าปล่อยทิ้งในปริมาณมากจะทำให้เกิดความสกปรกและตื้นเขินในลำน้ำธรรมชาติ ตลอดจนบังแสงแดดที่ส่องลงสู่ท้องน้ำ

5) กลิ่น กลิ่นจากน้ำเสียโดยส่วนใหญ่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่า ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศ

6) ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัส เป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ แต่เมื่อมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของสารหร่าย ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลงต่ำมากในช่วงเวลากลางคืน อีกทั้งทำให้เกิดวัชพืชน้ำ ซึ่งเป็นปัญหาแก่การสัญจรทางน้ำ

7) จุลินทรีย์ เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมากมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ได้แก่ แบคทีเรีย ไวรัส และโปรโตซัว ซึ่งน้ำเสียมีแหล่งอาหารที่จำเป็นสำหรับแบคทีเรีย ดังนั้นแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำเสียจึงมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพน้ำ คือ เชื้อแบคทีเยชนิดโคลิฟอร์ม เป็นเชื้อแบคทีเรียที่ไม่ทำให้เกิดโรค แต่ใช้เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการวัดมลพิษของสิ่งปฏิกูล (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

เนื่องจากลักษณะน้ำเสียชุมชน เป็นน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ดังนั้นองค์ประกอบหลักของน้ำเสียจึงมักเป็นพวกสารอินทรีย์และ สารอนินทรีย์ต่าง ๆ และจุลินทรีย์ที่เกิดจากการขับถ่ายของมนุษย์ ตัวอย่างลักษณะสมบัติของน้ำเสียชุมชน แสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียชุมชน

พารามิเตอร์	ช่วงของความเข้มข้น (mg/l)
1. Total Solids (TS)	350 – 1200
- Dissolved Solids (DS)	250 – 580
- Suspended Solids (SS)	100 – 350
2. Settleable Solids	5 – 20
3. Biochemical Oxygen Demand (BOD)	110 – 400
4. Chemical Oxygen Demand (COD)	250 – 1000
5. Total Nitrogen, as N	20 – 85
- Organic Nitrogen	8 – 35
- Ammonia Nitrogen	12 – 50
6. Total Phosphorus, as P	4 – 15
- Organic Phosphorus	1 – 5
- Inorganic Phosphorus	3 – 10
7. Chloride	30 – 100
8. Sulfate	20 – 50
9. Alkalinity as $CaCO_3$	50 – 200
10. Grease & Oil	50 – 150

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมควบคุมมลพิษ (2545)

2.1.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการตรวจวิเคราะห์น้ำเสีย

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย ทำเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำทาง ฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา โดยนำผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ได้ ใช้ในการประเมินสภาพการทำงาน หาสาเหตุ และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบ โดยพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์น้ำเสียมีดังนี้

1) พีเอช (pH) หมายถึง ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน โดยค่าพีเอชจะแสดงถึงความเป็นกรดหรือด่างของน้ำเสีย เป็นค่าที่มีประโยชน์อย่างมากต่อการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีวภาพ เพราะจะส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ โดยค่าพีเอชที่ประมาณ 7 จะเป็นพีเอชที่

เหมาะสม (สมทิพย์ ด่านธีรวนิชย์ และคณะ ,2541) ทั้งนี้ค่าพีเอชมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในน้ำ ดังนี้

$$pH = - \log [H^+]$$

โดยที่ $[H^+]$ = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในน้ำ (โมล/ลิตร)

2) บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลาย หรือเผาผลาญสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ ใช้เป็นดัชนีชี้ความสกปรกของน้ำได้ โดยทั่วไปการหาค่าบีโอดีใช้อุณหภูมิในการเพาะเลี้ยงที่ 20 ^{o}C เป็นเวลา 5 วัน เพราะเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำโดยทั่วไป และใช้เวลาเพียง 5 วัน เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำได้ถึง 70 % หากต้องการให้ได้ 100 % อาจต้องใช้เวลามากกว่า 20 วัน ซึ่งเป็นเวลาที่นานเกินไป ดังนั้นจึงมีการเชื่อมสัญลักษณ์ของค่าบีโอดีที่ใช้เวลาในการเพาะเลี้ยง 5 วัน เป็น BOD_5 ความสำคัญของค่าบีโอดีในการออกแบบและควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ คือ ใช้บ่งชี้ถึงค่าภาระอินทรีย์ (Organic loading) ใช้ในการหาประสิทธิภาพของระบบบำบัดและใช้สำหรับการตรวจสอบคุณภาพของน้ำตามแหล่งน้ำต่าง ๆ (กรมโรงงานอุตสากรรม, 2548)

3) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยใช้หลักการว่าสารประกอบอินทรีย์เกือบทุกชนิดจะถูกออกซิไดซ์ด้วยตัวออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong Oxidizing Agent) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ซึ่งปัจจุบันสารเคมีออกซิไดร์ก็คือ โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เนื่องจากสามารถออกซิไดร์สารอินทรีย์มากชนิดได้จนเกือบสมบูรณ์ ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ จึงส่งผลให้ค่าซีโอดีมักจะมีค่าสูงกว่าบีโอดี เพราะซีโอดีไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพ และสารที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ค่าซีโอดีเป็นค่าที่บอกถึงความสกปรกของน้ำ และมีข้อดีคือ ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อย เพียง 3 ชั่วโมง(กรมโรงงานอุตสากรรม, 2548) ในขณะที่การวิเคราะห์ค่าบีโอดีต้องใช้เวลาถึง 5 วัน ซีโอดีจึงสำคัญต่อการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้ง การตรวจสอบคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำ และยังสามารถใช้ในการประเมินค่าบีโอดีอย่างคร่าว ๆได้ โดยปกติค่าซีโอดีต่อบีโอดี ของน้ำเสียชุมชนจะมีค่าประมาณ 2-4 เท่า (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

4) ของแข็ง (Solid) หมายถึง สารทุกอย่างในของเหลวยกเว้นน้ำ โดยของแข็งแบ่งได้เป็นหลายชนิด ได้แก่ ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS) ของแข็งตกตะกอน (Settleable Solids) ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids, DS) ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid, SS) และของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS) โดยความสำคัญของการหาค่าของแข็ง คือ แสดงถึงปริมาณสิ่งเจือปนทั้งหมดในน้ำว่ามีมากน้อยเพียงไร ปริมาณของแข็งแขวนลอยจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสกปรกของน้ำเสียและบอกถึงประสิทธิภาพของระบบบำบัดเสียต่าง ๆได้และ ปริมาณ

ของแข็งระเหยจะบอกถึงปริมาณอย่างประมาณของสารอินทรีย์ที่มีในน้ำเสีย โดยวิธีที่ใช้วิเคราะห์หาค่าปริมาณของแข็งเป็นวิธีการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

5) ไนโตรเจน (Nitrogen) ธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพวกจุลินทรีย์ต่าง ๆ ดังนั้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจำเป็นต้องมีสารไนโตรเจนที่เพียงพอในน้ำเสีย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมปริมาณไนโตรเจนให้เหมาะสม โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมของ BOD_5: N = 100: 5 (กรมโรงงานอุตสากรรม, 2548) โดยสารประกอบไนโตรเจนที่เกี่ยวข้องกับน้ำเสียแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ โปรตีน กรดอะมิโน และสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรต หากตรวจพบสารประกอบไนโตรเจนในรูปอินทรีย์ไนโตรเจน (Org-N) และแอมโมเนีย-ไนโตรเจน (NH_3-N) ในปริมาณมากอาจแสดงว่าน้ำนั้นมีความสกปรกและมีการปนเปื้อน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

6) น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease) การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและไขมันในน้ำเสีย เป็นการตรวจวัดกลุ่มน้ำมันซึ่งละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) ที่ใช้ในการวิเคราะห์หรือสกัดตัวอย่างได้ เช่น ปิโตรเลียม อีเทอร์ และเฮกเซน เป็นต้น และต้องไม่ระเหยที่อุณหภูมิ 103 ^{o}C ถ้าเป็นน้ำมันที่มีการระเหยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 85 ^{o}C จะไม่รวมอยู่ในรูปของน้ำมันและไขมัน (กรมโรงงานอุตสากรรม, 2548) โดยน้ำมันและไขมัน จะเป็นสารที่ขัดขวางการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียเนื่องจาก สารพวกนี้จะไปหุ้มติดอยู่ที่ผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ เป็นผลให้จุลินทรีย์ตายหรือ เจริญเติบโตได้ไม่ดี (สมทิพย์ ด่านธีรวนิชย์ และคณะ, 2541) นอกจากนี้หากมีน้ำมันและไขมันในปริมาณมาก สารเหล่านี้จะไม่ถูกย่อยสลายในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ทำให้เกิดฝ้าที่ผิวหน้าน้ำ และทำให้ท่อน้ำเสียอุดตัน (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2549)

2.2 เศษอาหาร (Food Waste)

เศษอาหาร หมายถึง ขยะที่ได้จากห้องครัว การประกอบอาหาร รวมถึงพวกเศษผัก เศษผลไม้ และอาหารเหลือทิ้งในแต่ละวัน เป็นต้น (วุฒิภัณฑ์ คุมมินทร์, 2544) ซึ่งจากการจัดประเภทของขยะมูลฝอย เศษอาหารจัดอยู่ในประเภท ขยะย่อยสลายได้ โดยมีสัดส่วนอยู่ประมาณ 46% จากปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2546) ขยะประเภทนี้มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นอาหารของแบคทีเรีย ทำให้เกิดการย่อยสลายได้ดี

จึงทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้อีกแหล่งหนึ่ง (ธราพงษ์ วิฑิตศานต์ และคณะ, 2553) สำหรับลักษณะสมบัติของเศษอาหารดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 2-4 ลักษณะสมบัติของเศษอาหาร

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์
1. Moisture	% wt	76.97
2. Total Solid	% wt	23.02
3. Volatile Solid	% wt (as TS)	91.90
4. Ash	% wt (as TS)	8.09
5. Carbon	% wt	51.05
6. Nitrogen	% wt	5.32
7. C/N	-	9.58
8 pH	-	4.2

ที่มา: วุฒิภัณฑ์ คุมมินทร์ (2544)

2.3 ทฤษฎีและขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา การเกิดก๊าซชีวภาพ

2.3.1 ก๊าซชีวภาพ

คือ ก๊าซที่เกิดจากการนำของเสีย เช่น มูลสัตว์ชนิดต่าง ๆ น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ขยะ ของเหลือใช้ทางการเกษตร เป็นต้น มาผ่านกระบวนหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) โดยแบคทีเรียหลายชนิดเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม แบคทีเรียจะเจริญเติบโต และเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน เป็นต้น จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ

2.3.2 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนอาศัยกลไกการทำงานของจุลินทรีย์หลายจำพวก ซึ่งปฏิกิริยาของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นดังสมการที่ (1)

$$\text{Organic Matter} \longrightarrow CH_4 + CO_2 + H_2 + NH_3 + H_2 \quad (1)$$

จากปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนใหญ่ ๆได้ 4 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นที่ 1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis)

เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก โดยสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันจะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ (Extracellular Enzyme) ที่ปล่อยออกมาจากแบคทีเรียกลุ่ม Hydrolytic Bacteria ทำให้แตกตัวมีขนาดโมเลกุลเล็กลงเช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน จากปฏิกิริยานี้จะทำให้สภาพในบ่อหมักมีความเป็นกรด (ค่า pH ต่ำ) และแบคทีเรียที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาพความเป็นกรดจะทำหน้าที่ต่อไป โดยปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นมีสมการดังสมการที่ (2-4)

$$\text{Carbohydrates} \longrightarrow \text{Simple sugar + Alcohol} \quad (2)$$

$$\text{Proteins} \longrightarrow \text{Peptide + Amino acid} \quad (3)$$

$$\text{Fats} \longrightarrow \text{Glycerol + Fatty acid} \quad (4)$$

ขั้นที่ 2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

สารอินทรีย์โมเลกุลเล็กจากขั้นตอนแรก เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น จะถูกแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (Acidogenic Bacteria) ดูดซึมเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้เป็นอาหารและใช้ในการผลิตกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acids; VFAs) เช่น กรดโพรไพโอนิก กรดอะซิติก กรดบิวทิริก กรดแลกติก เป็นต้น ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 ตัว นอกจากนี้ยังจะได้ แอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจน (H_2) อีกด้วย หลังจากนั้นกรดอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างกรดนี้ จะถูกจุลินทรีย์ในกลุ่มการสร้างกรดอะซิติก (Acetic Producer) ใช้ต่อไป โดยในกระบวนการสร้างกรดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนสมการได้ดังสมาการที่ (5-7)

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

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2COOH + CH_3COOH + CO_2 + H_2 \quad (6)$$

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + CO_2 + 2H_2 \quad (7)$$

ขั้นที่ 3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogensis)

กรดไขมันระเหยที่ได้จาก กระบวนการสร้างกรดจะถูกแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตจีนิก (Acetogenic Bacteria) ย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดโพรไพโอนิก และ กรดบิวทิริก ให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างมีเทน ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเนื่องจากเป็นการลดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย ซึ่งการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในปริมาณที่สูงสามารถยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทนได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการสร้างกรดอะซิติกเขียนสมการได้ดังสมาการที่ (8-9)

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2 \qquad (8)$$

$$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2 \qquad (9)$$

ขั้นที่ 4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

เป็นกระบวนการสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) จะใช้กรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน โดยการสร้างมีเทนแบ่งตามชนิดของจุลินทรีย์ได้ 2 แบบได้แก่

1. การเปลี่ยนอะซิติกไปเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจุลินทรีย์กลุ่ม Obligate Acetoclastic Methanogens ซึ่งเป็นวิถีหลักของการผลิตก๊าซมีเทน

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 \qquad (10)$$

2. การเปลี่ยนไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นมีเทน โดยจุลินทรีย์กลุ่ม Obligate Hydrogenotrophic Methanogens หรือ Hydrogen Utilizer

$$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad (11)$$

2.3.3 กลุ่มจุลินทรีย์สำคัญในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจะต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลาย ๆกลุ่ม โดยความสามารถในการย่อยสลายของแต่ละกลุ่มจะมีผลซึ่งกันและกัน และมีผลต่อความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยแบ่งจุลินทรีย์ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ

1) จุลินทรีย์ไม่ผลิตมีเทน (Non-Methanogenic Bacteria)

เป็นจุลินทรีย์ที่อยู่ในขั้นตอน Hydrolysis และ Acid Fermentation เจริญเติบโตได้ดีที่ช่วงพีเอช 4.0-6.5 ส่วนใหญ่สามารถดำรงชีพได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน (Facultative Anaerobic Bacteria) ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง สามารถเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า ภายในเวลา 24 ชั่วโมง มักเป็นพวกสร้างอาหารเองไม่ได้ (Heterotroph) ซึ่งดำรงชีวิตได้โดยใช้สารอินทรีย์เป็นอาหาร ได้แก่ Fermentative Bacteria, Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria และ Homoacetogenic Bacteria

1.1) การทำงานของจุลินทรีย์ไม่ผลิตมีเทน

คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน ถูกย่อยสลายเป็นสารประกอบอย่างง่าย โดยจุลินทรีย์ไม่ผลิตมีเทนโดยผ่านกระบวนการ Liquification ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือกรดอินทรีย์ คีโตน แอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย เป็นต้น (อานีตา ปาเก, 2556)

- Cellulose-splitting Bacteria จะย่อยสลายเซลลูโลสให้มีโมเลกุลเล็กลง (เพื่อใช้ผลิตมีเทนโดย methanogenic bacteria) ได้แก่ *Bacteroides succinogenas*, *Clostridium omelianskii*, *Clostridium thermo ceilum*, Clostridium dissolvens

- Semi cellulose-splitting bacteria ย่อยสลาย semi-cellulose ไปเป็น xylose arabinose galactose และ mannose จุลินทรีย์ประเภทนี้อยู่ในกลุ่ม Bacteroides ruminicola Starch-splitting bacteria ย่อยสลายแป้ง ไปเป็นกลูโคส ได้แก่ bacteroides's positive cucci และ Bacterium butylicum

- Clostridium acetobutylicum ย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตเป็น cetobutanol butyric acid acetic acid และไฮโดรเจน

- Protein-splitting bacteria ย่อยโปรตีนไปเป็นกรดอะมิโน และถูกย่อยสลายต่อไปเป็นกรดอินทรีย์, Thioalcohol, แอมโมเนียม (Ammonium) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ จุลินทรีย์กลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นแกรมบวก

- Fat-splitting bacteria ย่อยไขมันไปเป็นกรดไขมัน ได้แก่ *bacillus alcaligenes*

2) จุลินทรีย์ผลิตมีเทน (Methanogenic Bacteria)

เป็นจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ผลิตก๊าซมีเทนในขั้นตอนสุดท้าย ดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Obligated Anaerobic Bacteria) เจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 6.5-7.5 มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้น้อยกว่าพวก Non-Methanogenic Bacteria และมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่า ระยะเวลาการแบ่งตัวในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน ที่อุณหภูมิ 35°C โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่มีเทน มักเป็นพวกสร้าง อาหารเองได้ (Autotroph) ที่ใช้สารอนินทรีย์ เช่นคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนในการเจริญเติบโต มีทั้งพวกที่เป็นแกรมบวกและแกรมลบ เคลื่อนที่ได้และไม่ได้ และมีทั้งพวกที่สร้างและ ไม่สร้างสปอร์

หากแบ่งจุลินทรีย์ตามความสามารถในการใช้สารอาหารจะแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. พวกที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์/ไฮโดรเจน ได้แก่ Mathanobacterium thermoautrophicum และ Mathanobacterium arbophilicum

2. พวกที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์/ไฮโดรเจนฟอร์เมท ได้แก่ Mathanobacterium formicicum, Mathanobacterium ruminanium และ Methanospirillium hungatii

3. พวกที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์/ไฮโดรเจน เมทธานอล เมทธาโนลามิน อะซิเตท และ คาร์บอนมอนอกไซด์ ได้แก่ Methanosarcina barkari และ Methanosarcina thermoautotrophicum

2.4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

1) ก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลัก มีคุณสมบัติจุดติดไฟได้ดี มีสัดส่วนประมาณ 50-75 %

2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนประกอบรอง เป็นก๊าซเฉื่อยไม่ติดไฟ มีประมาณ 36-39 %

3) ก๊าซอื่น ๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ประมาณ 1-3 % (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

เนื่องจากการผลิตก๊าซชีวภาพต้องอาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาพไร้อากาศ ซึ่งประกอบด้วยแบคทีเรียสองกลุ่มทำงานเชื่อมโยงกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาพแวดล้อมของระบบให้เหมาะสมเพื่อให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มทำงานร่วมกันได้เป็นอย่างดี โดยปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพมีดังต่อไปนี้

1) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้อากาศ โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะมีสองช่วง ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดก๊าซมีเทนขึ้นในระบบได้ดี คือ ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic) 30-40 ^{o}C จุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงนี้คือ Mesophilic Bacteria และช่วงอุณหภูมิสูง (Thermophilic) 50-60 ^{o}C จุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงนี้คือ Thermophilic Bacteria (Moonil *et al.*, 2002)

โดยปกติแล้วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์จะเร็วขึ้นอัตราการเจริญเติบโตก็เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มสูงกว่าที่เซลล์ทำงานได้ โปรตีน กรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์หลายส่วนจะถูกทำลายจนไม่สามารถกลับคืนสภาพได้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเพิ่มการเจริญเติบโตและการทำงานของเซลล์ได้จนถึงอุณหภูมิหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านั้นการทำงานและการเจริญเติบโตจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว(นันท์นภัส ขันธ์วราพันธิชัย, 2552) ซึ่งช่วงของอุณหภูมิที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงดังที่กล่าวมามีผลโดยตรงต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจะหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป คือเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 10 ^{o}C จะหยุดผลิตก๊าซมีเทน โดยทั่วไปอัตราการผลิตก๊าซมีเทนและอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิ 28-42 ^{o}C อัตราการผลิตก๊าซมีเทนและอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ระเหยง่าย จะลดลงจนถึงอุณหภูมิ 45 ^{o}C และเมื่ออุณหภูมิขึ้นถึง 50 ^{o}C ระบบจะปรับตัวได้ดีขึ้น อัตราการผลิตก๊าซมีเทนและอัตราการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนอุณหภูมิ 55 ^{o}C และลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งจนถึงอุณหภูมิ 65 ^{o}C

โดยทั่วไปการหมักแบบไร้อากาศจะนิยมทำที่อุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic) คือ 35-37 ^{o}C (Ahn and Forster, 2002) เพราะแบคทีเรียสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงได้ดี ประหยัดค่าใช้จ่าย ลดพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิ เพราะสามารถเดินระบบที่อุณหภูมิห้องได้ แต่อย่างไรก็ตาม การหมักในช่วงอุณหภูมิสูง (Thermophilic) ก็มีจุดเด่นที่ควรแก่การพิจารณามีดังนี้ (Bryant, 1979; Ahn and Forster, 2002; Jung *et al.*, 2006)

จุดเด่นของการหมักที่ช่วง Thermophilic มีดังนี้

(1) ทำให้กิจกรรมเมแทโบลิซึมของจุลินทรีย์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในช่วง Thermophilic จะสูงกว่า Mesophilic อยู่ประมาณ 1.9 เท่า

(2) ให้การผลิตก๊าซชีวภาพและการผลิตก๊าซมีเทนที่สูง

(3) ถังหมักสามารถรองรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูง

(4) ใช้ระยะเวลาเก็บกักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในถังหมักน้อย

(5) ลดปริมาตรของถังหมัก

(6) การกวนผสมทำได้ง่ายเพราะที่อุณหภูมิสูงทำให้ความหนืดของของเหลวลดลง

(7) ลดปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรคได้สูง

ข้อจำกัดของการหมักที่ช่วง Thermophilic มีข้อจำกัดดังนี้(Garber *et al*., 1975)

(1) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบค่อนข้างสูง

(2) สิ้นเปลืองพลังงาน

(3) จุลินทรีย์ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก

2) พีเอช (pH)

พีเอชเป็นตัวชี้วัดค่าความเป็นกรดหรือด่างในระบบ โดยพีเอชของน้ำเสียที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศควรจะอยู่ในช่วง 6.8 – 7.2 (Michael, 2003) เพราะเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.6 จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเกิดกลิ่นเหม็นพร้อม ๆกับมีฝ้าตะกอนขึ้นมา เมื่อพีเอชสูงกว่า 7.5 – 8.0 จะทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนน้อยลงและเชื่องช้า ถ้าหากพีเอชสูงขึ้นถึง 9.0 ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์จะไม่ทำงาน เมื่อพิจารณาพีเอชของระบบที่มีแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนพบว่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 – 7.5 ส่วนระบบที่มีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดพีเอชจะอยู่ช่วง 3.5 – 6.5 จึงทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศอาจมีค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงอยู่บ่อยครั้ง (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) ดังนั้นการควบคุมพีเอชจึงมุ่งเน้นให้เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนมากกว่า ซึ่งการควบคุมพีเอชของระบบอาจทำได้ด้วยการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na2CO3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น

3) สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างในน้ำเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาวะบัฟเฟอร์ในน้ำ โดยหมายถึงสภาวะที่ค่าพีเอชของน้ำค่อนข้างคงที่ (อุดมผล พืชน์ไพบูลย์ และคณะ, 2541) หน้าที่ของความเป็นด่างที่มี

ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ คือช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงของพีเอช ซึ่งเกิดจากเมื่อน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียหรือถังปฏิกิริยา สารอินทรีย์ในน้ำจะเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ส่งผลให้กรด-ด่างในน้ำเสียลดลง และเนื่องจากช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและ กลุ่มสร้างมีเทนมีความแตกต่างกัน ทำให้ค่าพีเอชในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงได้บ่อยครั้ง ดังนั้นจึงต้องมีค่าความเป็นด่างที่เพียงพอเพื่อรักษาระดับพีเอชในระบบ โดยทั่วไปค่าความเป็นด่างทั้งหมดควรมีประมาณ 1,000 – 5,000 mg/l as CaCO3 (Metcalf and Eddy, 1991) โดยค่าที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 2,000 – 3,000 mg/l as CaCO3 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้จากค่าความสัมพันธ์ระหว่าง กรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่าง (VFA/Alkalinity) คือ ถ้า VFA/Alkalinity มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงถึงระบบมีสภาวะเป็นบัพเฟอร์สูง ประสิทธิภาพการทำงานดี แต่ถ้า มากกว่า 0.8 แสดงถึงระบบมีสภาวะเป็นบัพเฟอร์ต่ำ ประสิทธิภาพการทำงานลดลงหรืออาจล้มเหลวได้ (สินิจนันท์ เสียงเสนาะ, 2553)

4) กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA)

กรดไขมันระเหยง่ายเป็นสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ เช่น พวกกรดอาซิติก กรดบิวทีริก กรดโพรพิโอนิก เป็นต้น หากระบบมีการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในปริมาณมาก จะส่งผลกระทบต่อระบบ โดยช่วงแรกกรดไขมันระเหยง่ายจะมีผลทำให้ความเป็นด่างของระบบลดลง ต่อมาถ้าไม่มีการใช้หรือบำบัดกรดไขมันระเหยง่ายให้มีปริมาณน้อยลง พีเอชของระบบก็จะลดต่ำลง ถ้าลดลงต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันระเหยง่าย กับการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายเป็นก๊าซมีเทนให้สมดุลกัน โดยทั่วไประบบแบบไร้อากาศควรมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายประมาณ 50 – 500 mg/l as CH3COOH (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

5) ธาตุอาหาร (Nutrient)

ธาตุอาหารที่สำคัญสำหรับแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตจะเหมือนกับจุลินทรีย์ทั่วไป เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส เป็นต้น (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ, 2554) ซึ่งธาตุอาหารหลักที่สำคัญ คือ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยปริมาณที่แบคทีเรียต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศควรมีอัตราส่วน BOD: N: P และ COD: N: P อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 100: 1.1: 0.2 และ 150: 1: 0.2 ตามลำดับ (ไพเชษฐ์ ธรรมภาณ, 2541และ เมธิยา หมวดฉิม, 2554) หากธาตุอาหารไม่เพียงพอจะทำให้แบคทีเรียในระบบเจริญเติบโตไม่สมบูรณ์

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) เป็นอัตราส่วนของธาตุ 2 ชนิด คือ คาร์บอนในรูปของคาร์โบไฮเดรต และธาตุไนโตรเจน ในรูปของโปรตีน ไนเตรทและแอมโมเนีย เป็นต้น ซึ่งคาร์บอนแบคทีเรียจะนำไปใช้สำหรับให้พลังงาน และไนโตรเจนสำหรับสร้างโครงสร้างของเซลล์ โดยทั่วไปแบคทีเรียกลุ่มไม่ใช้อากาศจะใช้คาร์บอนได้เร็วกว่าไนโตรเจนถึง 25 – 30 เท่า ดังนั้นอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนจึงเป็นปัจจัยที่จำเป็นในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยมีอัตราส่วนที่เหมาะสมเท่ากับ 25 – 30: 1 หากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าที่สูงเกินไป ไนโตรเจนจะถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว หากมีไนโตรเจนไม่เพียงพอผลคือ อัตราการเกิดเซลล์แบคทีเรียลดลง ทำให้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ลดน้อยลง ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าที่ต่ำเกินไปจะทำให้ไนโตรเจนมากเกินความต้องการ ไนโตรเจนส่วนเกินจะถูกเปลี่ยนมาสะสมอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งอาจเป็นต่อแบคทีเรียและยับยั้งการทำงานของระบบได้ (ไพเชษฐ์ ธรรมภาณ, 2541)

นอกจากนี้ปริมาณสารอาหารหรือองค์ประกอบของอาหารในน้ำเสียมีความสัมพันธ์กับชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์ในระบบ และประสิทธิภาพในการย่อยสลาย (เมธิยา หมวดฉิม, 2554) ซึ่งพบว่าสารอาหารที่ต่างชนิดกันมีอัตราการย่อยสลายช้าเร็วที่แตกต่างกัน โดยสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตจะให้อัตราย่อยสลายที่เร็วกว่าโปรตีนและไขมัน ในขณะที่ไขมันมักย่อยสลายได้ช้า แม้ไขมันที่อยู่ในรูปสารละลายจะสามารถย่อยสลายได้เร็ว แต่ไขมันส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปที่ไม่ละลายในน้ำ นอกจากนั้นจุลินทรีย์ยังต้องการสารอาหารจำพวกไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ เนื่องจากในเซลล์ของจุลินทรีย์ทุกชนิดจะประกอบไปด้วยธาตุที่สำคัญได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์

ซึ่งในการผลิตก๊าซชีวภาพ จะเกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิดทั้งในกลุ่มไม่ผลิตมีเทน และกลุ่มผลิตมีเทน ในการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ ดังนั้นชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์จึงมีความแตกต่างกันไปตามลักษณะการทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ

6) อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR)

อัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ใช้ในการกำหนดความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ การปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้มีค่าแตกต่างกัน ทำได้โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลผ่านถังหมัก หรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าสู่ระบบ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีหน่วยเป็น kg COD /L/day ถ้าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีค่าที่สูงเกินไปจะทำให้กรดไขมันระเหยเกิดมากเกินไป ทำให้พีเอชของระบบมีค่าต่ำ แต่ถ้ามีค่าที่ต่ำเกินไปจะทำให้การเกิดก๊าซชีวภาพมีปริมาณน้อย ซึ่งอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อระบบบำบัด

น้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยทั่วไปควรอยู่ในช่วงประมาณ 1.5 kg COD/L/day หรือจะคิดในรูปของของแข็งระเหยทั้งหมด จะอยู่ในช่วง 0.64 – 1.12 kg VS/L/day (Loehr, 1974)

การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบสามารถจำแนกตามลักษณะการป้อนอาหารมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี คือ (สมฤดี ฤทธิ์ยากุล, 2551)

(1) การป้อนอาหารแบบครั้งคราว (Batch)

เป็นการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเพียงครั้งเดียว หลังจากนั้นจะปล่อยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในระบบและไม่มีการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มเข้าไปอีก สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายจนหมด ระบบนี้เหมาะกับวัตถุดิบที่มีปริมาณมาก ๆ แต่ใช้เวลานานมาก การหมักแบบนี้ระบบจะไม่คงที่ และปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ

(2) การป้อนอาหารแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous)

เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ โดยจะมีการป้อนอาหารเป็นช่วง ๆ ให้สอดคล้องกับการทำงานของระบบ หลังจากนั้นจึงมีการถ่ายน้ำเสียออกก่อนที่จะเติมน้ำเสียเข้าไปใหม่อีกครั้ง ซึ่งเหมาะกับกรณีที่มีวัตถุดิบเป็นประจำ ซึ่งปกติจะมีการเติมสารอินทรีย์ใหม่ทุก ๆ วัน การหมักแบบนี้จะส่งผลดีต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ช่วยลดปัญหาจากการที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบจำนวนมากแบบกะทันหัน (Shock load) และปริมาณที่เกิดขึ้นค่อนข้างที่จะคงที่

(3) การป้อนอาหารแบบต่อเนื่อง (Continuous)

เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา คือ มีน้ำเสียเข้าออกจากระบบตลอดเวลา ดังนั้นวัสดุหมักจะถูกย่อยสลายภายในระบบช่วงเวลาหนึ่งและถูกถ่ายออกจากระบบอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ทำให้ประสิทธิภาพของระบบนี้สูง เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เพื่อต้องการให้ระบบสามารถดำเนินไปอย่างสม่ำเสมอ

7) การกวนผสม (Mixing)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในระบบเกิดการคลุกเคล้าผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และเกิดการกระจายการสัมผัส ระหว่างสารอินทรีย์และจุลินทรีย์มากขึ้น ทำให้ระบบเกิดภาวะเสถียร และทำให้ไม่เกิดฝ้า (Scum) ที่ระดับผิว ช่วยให้อุณหภูมิภายในถังมีความสม่ำเสมอ การกระจายของสารพิษเบาบางลง และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าที่ไม่มีการกวนผสม ถ้ากวนผสมไม่เพียงพออาจมีการตกตะกอนบางส่วน ทำให้ปริมาตรใช้งานของถังปฏิกรณ์ลดลง และระยะเวลากักเก็บลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ หากมีการกวนผสมมากเกินไปจะรบกวนการทำงานของจุลินทรีย์ การกวนต่อเนื่องตลอดเวลาอย่างช้า ๆ จะให้ผลดีกว่าการกวนเร็ว (สมฤดี ฤทธิ์ยากุล, 2551)

8) การหมักร่วม (Co-digestion)

การย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียด้วยเทคนิคการหมักร่วมกับของเสียจากการเกษตรต่าง ๆ นั้นถือได้ว่าเป็นการปรับปรุงกระบวนการในการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะแบบไร้อากาศ (Angelidaki and Ellegaard, 2003; Bolzonella *et al.*, 2006; Gomez et al., 2006; Romano and Zhang, 2008) โดยเทคนิคการหมักร่วมดังกล่าวนั้นเป็นกระบวนการที่เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตชีวภาพ (Callaghan *et al.*, 1999; Hartmann and Ahring, 2005) โดยมีเหตุผลมาจากการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนให้มีความเหมาะสม โดยทั่วไปจุลินทรีย์จะดำเนินกิจกรรมได้ที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 25-30:1 แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่าดังกล่าวจะน้อยกว่า เช่น ในสลัดจ์นั้นจะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพียงประมาณ 9:1 เท่านั้น (Kizilkaya and Bayrakli, 2005) และในมูลสัตว์จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สูง ด้วยอัตราส่วนดังกล่าวของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ไม่เป็นไปตามทฤษฎีจึงมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ดังนั้นเทคนิคการหมักร่วมจึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการเพิ่มอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนให้ไม่น้อยกว่า 20 (Mata-Alvarez, 2002) ซึ่งเทคนิคการหมักร่วมยังมีข้อดีและข้อจำกัดบางประการดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของการหมักร่วมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

ข้อดี	ข้อจำกัด
- ช่วยปรับสมดุลของสารอาหารในการย่อยสลายให้ดีขึ้น - ช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพ - เป็นการนำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ - ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสีย - กากตะกอนที่เหลือจากการหมักใช้เป็นปุ๋ยสำหรับปรับสภาพดินได้	- ค่า COD ของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น - การบำบัดอีกครั้งก่อนปล่อยทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม - ต้องมาการบำบัดเบื้องต้นก่อนเริ่มกระบวนการหมักร่วม

ที่มา: ดัดแปลงจาก http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/wei.pdf

2.6 ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ

1) ด้านพลังงาน

- ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อน ทดแทนการใช้น้ำมันเตา
- ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า
- ใช้ในรูปของพลังงานร่วม โดยใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและให้ความร้อนกับกระบวนการผลิตร่วมกัน
- เป็นเทคโนโลยีในการบำบัดขยะมูลฝอยซึ่งสามารถให้พลังงานสุทธิ
- มีศักยภาพในการผลิตพลังงานจาก “ขยะเปียก” ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการเผาเพื่อผลิตพลังงาน
- มีศักยภาพที่จะได้รับผลตอบแทนทางการเงินและเศรษฐศาสตร์สูง โดยเฉพาะเมื่อพลังงานชนิดอื่นมีราคาสูง และรัฐมีมาตรการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากก๊าซชีวภาพ

2) ด้านเศรษฐกิจ

- มีรายได้จากการขายไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP)
- มีรายได้จากการขายคาร์บอนเครดิต

3) ด้านสิ่งแวดล้อม

- ลดปัญหาของกลิ่นและก๊าซพิษ
- ลดปัญหาการเกิดโรค ไม่เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ เชื้อโรคและสัตว์น้ำโรค
- ลดการปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ
- ลดปัญหาต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ

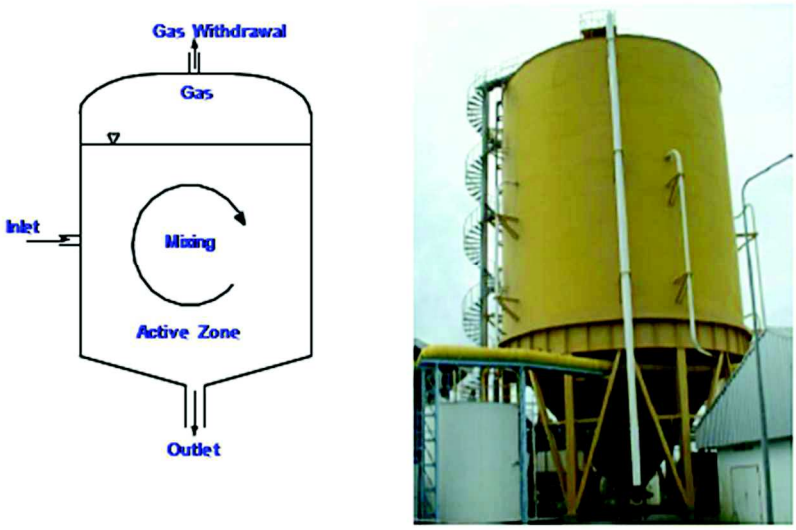
4) ด้านอื่น ๆ

- น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบฯ นำไปใช้เป็นปุ๋ยน้ำ
- กากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลาย สามารถนำไปทำปุ๋ยอัดเม็ดเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินให้ดีขึ้น

2.7 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

งานวิจัยนี้จะใช้ถังปฏิกรณ์แบบถังกวนสมบูรณ์ (Completely stirred tank reactor, CSTR) เป็นการเรียกตามลักษณะของสสารที่อยู่ในถังซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากันทุกจุด (Completely mixed) (ธราพงษ์ วิทิตศานต์ และคณะ, 2553)โดยถังกวนสมบูรณ์นี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากถังย่อยสลัดจ์ซึ่งเป็น Conventional anaerobic digester ที่มีประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากการกวนผสมไม่ดี ทำให้ระยะเวลาย่อยสลายยาวนาน จึงได้มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสกันของสารอาหารในน้ำเสียและจากถังย่อยสลัดจ์ (Septic tank) โดยมีการติดตั้งใบกวนเพื่อให้จุลินทรีย์และสารอาหารในถังปฏิกรณ์มีการสัมผัสกันมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น

ลักษณะและการทำงานของถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ มีลักษณะหลายรูปแบบ โดยรูปแบบของถังต้องสัมพันธ์กับการกวนผสม เนื่องจากการกวนเป็นสิ่งที่สำคัญในกระบวนการนี้มากเพราะทำให้ของเสียที่อยู่ในถังได้รับการผสมเป็นเนื้อเดียวกับและจุลินทรีย์ได้สัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง โดยจะเกิดการกวนผสมที่สมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อมีการกวนผสมที่เพียงพอสำหรับของเหลวที่ไม่มีความหนืดมาเกินไป (Reynolds and Richards, 1995) ในส่วนของก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาจะถูกนำออกจากถังปฏิกรณ์ทางท่อนำก๊าซด้านบนฝาถัง ดังภาพที่ 1 แสดงลักษณะถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (Completely stirred tank reactor, CSTR) และข้อดีข้อเสีย ของระบบถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ แสดงดังตารางที่ 2-6



ภาพประกอบที่ 2-1 ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (Completely stirred tank reactor, CSTR)

ที่มา: สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

ตารางที่ 2-6 ข้อดีและข้อเสียของระบบถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์

ข้อดี	ข้อเสีย
- ใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และของแข็งแขวนลอยสูง - ประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงเนื่องจากการกวนผสมดี - รักษาความสม่ำเสมอของแบคทีเรีย สารอาหาร อุณหภูมิ และ พีเอชให้เท่ากันทั่วทั้งถังได้ดี - การกวนผสมจะลดการไหลลัดวงจร ป้องกันการตกตะกอนของแบคทีเรีย และป้องกันการสะสมตัว ของน้ำเสียในจุดอับ - รับน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารพิษได้ดี	- เวลาเก็บกักของแข็ง เท่ากับเวลาเก็บกักน้ำจึงมีปริมาตรขนาดใหญ่ทำให้ค่าก่อสร้างสูงเวลาเก็บ - ต้องการพลังงานในการกวนผสม - น้ำเสียออกมีของแข็งแขวนลอยสูงเพราะไม่มีระบบตกตะกอนก่อนปล่อยออก - มีการสูญเสียจุลินทรีย์ในปริมาณสูง

ที่มา: Metcalf and Eddy (2004)

2.8 เทคนิคการจำแนกชนิดจุลินทรีย์ โดยอาศัยการวิเคราะห์ลำดับเบสบริเวณ 16S rDNA

ปัจจุบันในการติดตาม ตรวจสอบ และวิเคราะห์ความหลากหลายของจุลินทรีย์ในธรรมชาติได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในงานวิจัยด้านต่าง ๆ ซึ่งวิธีการศึกษาที่ใช้กันอยู่ทั่วไปตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันต้องอาศัยการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์บนอาหารเลี้ยงเชื้อ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้มีข้อจำกัด เนื่องจากไม่สามารถเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ได้ทุกชนิดบนอาหารเลี้ยงเชื้อ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากข้อจำกัดดังกล่าว เทคนิคทางด้านชีวโมเลกุล (Molecular biology) จึงเข้ามามีบทบาทอย่างมาก ในปัจจุบันเทคนิคลายพิมพ์ดีเอ็นเอ (DNA Fingerprinting) ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายของจุลินทรีย์กันอย่างแพร่หลาย การตรวจสอบวิเคราะห์ DAN ของแบคทีเรีย สำหรับการจำแนกชนิดของแบคทีเรียนั้น นิยมตรวจสอบที่ยีน 16S rRNA ซึ่งเป็น mRNA ที่มีเพียงชุดเดียวในยีโนมของแบคทีเรีย พบในแบคทีเรียทุกชนิดมีขนาดประมาณ 1500 เบสหรือมากกว่า โดยนิยมใช้ในการจำแนกชนิดของแบคทีเรีย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียจะขึ้นอยู่กับความคล้ายกัน (Similarity) ของลำดับเบสของ 16S rRNA genes

สำหรับภาพรวมในการจำแนกชนิดของแบคทีเรีย สามารถทำได้โดย สกัดดีเอ็นเอ (DNA extraction) แล้วทำการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอด้วยเทคนิคพีซีอาร์ (Polymerase Chain Reaction; PCR) จากนั้นหาลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA และสุดท้ายการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ตัวอย่าง DNA ก็จะสามารถจำแนกได้ว่าแบคทีเรียที่เราต้องการตรวจสอบเป็นชนิดใด (Staley et al., 2007)

2.9 โครงสร้างประชากรจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์แบบไร้อากาศ

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ จุลินทรีย์มีหน้าที่เปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทน โดยเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปของสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือมีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูง ซึ่งโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์ของระบบแบบไม่ใช้อากาศแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ Bacteria และ Archaea การย่อยแบบไม่ใช้อากาศที่มีความเสถียรภาพดีจะต้องประกอบไปด้วยจุลินทรีย์ 4 กลุ่ม คือ Hydrolytic fermentative bacteria, Proton-reducing acetogenic bacteria, Hydrogenotrophic methaogens และ aceticlastic methanogens (Zinder *et al*., 1994)

ในกระบวนการไฮโดรไลซีสจะถูกกระตุ้นด้วยแบคทีเรีย 3 กลุ่มคือ กลุ่มใช้อากาศ (Aerobic) กลุ่มที่ใช้หรือไม่ใช้อากาศ (Facultative anaerobic) และกลุ่มที่ไม่ใช้อากาศ (Stictly anaerobic) ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวเกี่ยวข้องโดยตรงกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในของเสียเพื่อเป็นสารตั้งต้นให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนใช้ต่อไป *Clostridium sp.* สามารถผลิตเอ็นไซม์ที่สามารถย่อยผนังเซลล์ของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถไฮโดรไลซีสกลุ่มเฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose)

จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมี 3 กลุ่ม คือ Methanobacteriales, Methanococcales และ Methanomicrobiales ซึ่งอยู่ภายในกลุ่ม Archaea จากการศึกษาของ Liu et al., (2002) ซึ่งได้ทำการติดตาม rRNA probes ของจุลินทรีย์ในช่วงเริ่มต้นของระบบของถังปฏิกรณ์ไม่ใช้อากาศ (Acidogenic anaerobic reactors) พบว่า Methanomicrobiales เป็นจุลินทรีย์ที่มีจำนวนมากกว่าจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนอื่น ๆ ในตะกอนจุลินทรีย์ (Seed sludge) สำหรับออเดอร์ (Order) Methanobacteriales และ Methanococcales ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มเด่นที่พบจากการทำ PCR-DGGE คือ *Methanosaeta sp.* และ *Methanobacterium sp.*

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคนิคการหมักร่วม (Co-digestion)

ในการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียนั้นถือได้ว่าเป็นการปรับปรุงกระบวนการในการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากตัวย่อยร่วมหรือวัสดุหมักร่วมนั้นมีความสำคัญในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (Hartmann and Ahring, 2005) ซึ่งส่วนใหญ่วัสดุหมักร่วมจะเป็นเศษเหลือทางการเกษตร มูลสัตว์ หรือขยะอินทรีย์ต่าง ๆ เพราะเป็นแหล่งช่วยเพิ่มธาตุอาหาร เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ เพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายให้มากขึ้น (Angelidaki and Ellegaard, 2003; Bolzonlla *et al*., 2006; Gomez *et al*., 2006; Romano and Zhang, 2008) โดยงานวิจัยที่สนับสนุนการใช้เทคนิคการหมักร่วมในสภาวะไร้อากาศมีดังนี้

Callaghan *et al.* (2002) ทำการศึกษาการใช้เทคนิคการหมักร่วมแบบไร้อากาศระหว่างมูลสัตว์กับของเสียประเภทผักและผลไม้ที่อุณหภูมิ 35 °C ในถังปฏิกรณ์ขนาด 18 L ระยะเวลาเก็บกัก 21 วัน และ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3.19-5.01 kg VS m^{-3} d^{-1} ผลจากการศึกษา พบว่า การเพิ่มปริมาณของเสียประเภทผักและผลไม้ จาก 20% ถึง 50% นั้นเป็นการปรับปรุง ผลผลิตมีเทน จาก 0.23 เป็น 0.45 และทำให้ของแข็งระเหยง่ายมีปริมาณลดลงอย่างคงที่อีกด้วย

Fezzani and BenCheikh (2008) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือ ซึ่งใช้เป็นแหล่งไนโตรเจน จากกระบวนการสกัดน้ำมันมะกอก โดยทดลองในห้องปฏิบัติการ ทำการหมักแบบกะ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส มีการป้อนน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอกเป็นสารตั้งต้นหลัก และของเสียที่เป็นของแข็งจากโรงงาน เป็น co-substrate ที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 28 56 112 และ 150 กรัมของแข็งทั้งหมด/ลิตรน้ำเสีย ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า อัตราที่เหมาะสมของของเสียที่เป็นของแข็งที่ถูกใช้เป็น co-substrate คือ 56 กรัมของแข็งทั้งหมด/ลิตรน้ำเสีย สามารถเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ จาก 11.17 ± 2.5 ลิตร/ลิตรน้ำเสีย เป็น 30.5 ± 2.5 ลิตร/ลิตรน้ำเสีย และประสิทธิภาพการกำจัด COD จากร้อยละ 44.5 ± 3 เป็น 83.4 ± 2 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการลดเวลาเริ่มต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะคงที่จาก 65 ± 25 วัน เป็น 28 ± 15 วัน

Panichnumsin *et al.* (2010) ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยเทคนิคการหมักร่วมระหว่างของเสียจากโรงงานมันสำปะหลังกับมูลสุกร โดยใช้การหมักแบบกึ่งกะด้วยระบบ stirred tank reactor ที่อุณหภูมิ 37 °C ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3.5 kg VS m^{-3} d^{-1} และระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ผลจากการศึกษา พบว่า เทคนิคการหมักร่วมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนและยังสามารถลดของแข็งระเหยง่ายได้ดีกว่า โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการย่อย

สลายของมูลสุกรเพียงอย่างเดียว พบว่า ผลผลิตมีเทนสูงขึ้นถึง 41 % เมื่อเพิ่มปริมาณของเสียจากโรงงานมันสัมปะหลังขึ้นประมาณ 60 %

Hamed and Ruihong (2010) ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่างมูลวันกับเศษอาหาร ที่สภาวะไร้อากาศด้วยระบบหมักแบบกะ ปริมาตรหมัก 500 ml ทำการเขย่าวันละครั้งก่อนวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ที่อุณหภูมิ 35 ^{o}C ทดลองที่ 2 อัตราส่วน คือ 68/32 และ 52/48 (%มูลวัว: %เศษอาหาร) ตามลำดับ โดยกำหนด VS ของระบบเท่ากับ 3 g VS/L ผลการศึกษาพบว่าศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 531 L/kg VS และ 311 L/kg VS ที่อัตราส่วน 52/48 มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน 58.7% และประสิทธิภาพการบำบัด VS เท่ากับ 68%

นฤมล เซาะกระโทก (2556) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งหมักร่วมกับตะกอนดีเคนเตอร์ของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม ผลการทดลองพบว่า การหมักร่วมมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักด้วยน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งเพียงอย่างเดียว โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการหมักร่วมใช้น้ำเสีย 180 ml กับตะกอนดีแคนเตอร์ 10 g ที่อุณหภูมิ 35±1 ^{o}C ซึ่งให้ค่าศักยภาพการผลิตมีเทนสูงสุด 0.351 L CH_4/g $COD_{removal}$ และประสิทธิภาพการบำบัด TCOD, SCOD, TS และ VS เท่ากับ 76.2, 83.6, 43.2 และ 56.8% ตามลำดับ

อิทธิผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ในการทำงานของระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ อิทธิพลของอุณหภูมิก็ส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์เช่นกัน เนื่องจากช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมมีสองช่วงคือ ช่วงอุณภูมิปานกลาง (30 – 40 ^{o}C) และช่วงอุณหภูมิสูง (50 – 60 ^{o}C) ซึ่งมีผู้ที่สนใจศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับน้ำเสียชนิดต่าง ๆ หลายงานวิจัย อย่างเช่น

เพ็ญศิริ ประชากิตติกุล (2551) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่าศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทนจากการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C และ 55°C เท่ากับ 160 และ 190 mLCH_4/g COD added ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 55°C ให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนที่ดีกว่า

Choorit and Wisarnwan (2007) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในระบบไร้อากาศ โดยทำการศึกษาในถังหมักระบบ continuous stirred tank reactors (CSTR) โดยศึกษาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิที่ 37 และ 55 °C ป้อนน้ำเสียแบบกึ่งต่อเนื่อง พบว่า ที่อุณหภูมิ 37 °C อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่ 12.25

กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน ระยะเวลากักเก็บ (HRT) ที่ 7 วัน มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการลดค่าซีโอดีลงได้ถึงร้อยละ 71.10 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 3.73 ลิตรของก๊าซ/ลิตร/วัน ซึ่งมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 71.04 และที่อุณหภูมิ 55 °C พบว่า อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่ 17.01 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน ระยะเวลากักเก็บ (HRT) ที่ 5 วัน มีประสิทธิดีที่สุดในการลดค่าซีโอดีลงได้ถึงร้อยละ 70.32 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 4.66 ลิตรของก๊าซ/ลิตร/วัน ซึ่งมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 69.53 จากผลการศึกษาจะเห็นว่า ที่อุณหภูมิสูงให้ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี การผลิตก๊าซชีวภาพ และองค์ประกอบก๊าซมีเทนที่ใกล้เคียงกันแต่ใช้ระยะเวลากักเก็บน้อยที่น้อยกว่า

Yilmaz, Yuceer and Basibuyuk (2008) ศึกษาประสิทธิภาพการบาบัดน้าทิ้งจากโรงงานกระดาษในการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยเปรียบเทียบระหว่างสภาวะแบบมีโซฟิลิก อุณหภูมิ 35 °C และ สภาวะแบบเทอร์โมฟิลิก อุณหภูมิ 55 °C ทำการหมักที่ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ (HRT) 6 ถึง 24 ชั่วโมง และใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.07–12.25 gL^{-1}ต่อวัน ปรากฏว่าเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงกว่า 8.4 g COD Ld^{-1} จะไม่ส่งผลประสิทธิภาพการกำจัด COD และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ ส่วนอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในอัตราที่สูง สภาวะแบบเทอร์โมฟิลิกสามารถกำจัด COD ได้ดีว่าสภาวะแบบมีโซฟิลิกเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของการผลิตแก๊สชีวภาพที่สภาวะแบบเทอร์โมฟิลิกสามารถกำจัด COD ได้ดีว่าสภาวะแบบมีโซฟิลิกเช่นเดียวกัน และที่สภาวะแบบมีโซฟิลิกจะตรวจพบการตกค้างของกรดไขมันระเหยได้ในน้ำทิ้งจากระบบที่มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในอัตราที่สูง

การศึกษาโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์ในระบบก๊าซชีวภาพ

Wang *et al.* (2009) ศึกษาผลกระทบของโครงสร้างแบคทีเรียจากการหมักร่วมแบบไร้อากาศระหว่างพืชและมูลวัว ซึ่งมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 3 kg VS/L/day โดยทำการวิเคราะห์ชนิดจุลินทรีย์โดยเทคนิค 16S rRNA ยีน ผลการวิเคราะห์พบว่าจุลินทรีย์กลุ่มหลักที่พบในถังปฏิกรณ์คือ *Clostridia, unclassified Bacteria* และ *Bacteroidetes*

Wang *et al.* (2010) ศึกษาผลของอัตราการป้อนและภาระบรรบุกสารอินทรีย์ต่อโครงสร้างของจุลินทรีย์ในระหว่างการหมักร่วมระหว่างหญ้ากับมูลวัวด้วยระบบ Stirred Tank Reactor แบบต่อเนื่อง ด้วยเทคนิค 16S rRNA gene-based fingerprints ในการระบุโครงสร้างของกลุ่มจุลินทรีย์ ผลจากการศึกษา พบว่า โครงสร้างของกลุ่มจุลินทรีย์จะมีความคงที่เมื่อมีการป้อนมูลวัวเพียงอย่างเดียวเข้าสู่ระบบ และป้อน 20% ของหญ้าด้วยภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2 kg VS/L/day เท่านั้น แต่เมื่อมีการป้อนภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเป็น 40 % พบว่า โครงสร้างของกลุ่มจุลินทรีย์ในกลุ่มของแบคทีเรียมีการเปลี่ยนแปลงสูง ในขณะที่อาร์คีย์นั้นจะมีการเปลี่ยน

เปลี่ยนเล็กน้อย นอกจากนี้ในระหว่าง 2 ถึง 4 kg VS m^{-3} day^{-1} ของการป้อนภาระบรรทุกสารอินทรีย์นั้นโครงสร้างของแบคทีเรียจะมีความแตกต่างเล็กน้อยแต่อาร์คีย์จะไม่มีความแตกต่างเลย ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ พบว่า Phylum *Bacteriodetes* นั้นเป็นแบคทีเรียไฟลัมภ์หลักที่พบได้ในโครงสร้างแบคทีเรีย

Gannoun *et al.* (2016) ศึกษาโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์กับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ของการหมักร่วมในสภาวะไร้อากาศของเสียโรงงานมะกอกและน้ำเสียโรงฆ่าสัตว์ภายใต้สภาวะมีโซฟิลิกและเทอโมฟิลิก ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 12 g COD/L/day โดยผลการวิเคราะห์ประชากรจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ลำดับเบสบริเวณ 16S rDNA พบ *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *synergistetes* และ *Spirochaete* เป็นจุลินทรีย์กลุ่มเด่นที่พบในถังปฏิกรณ์ และพบ *Methanobacteriales* เป็นจุลินทรีย์กลุ่มเด่นในเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบไร้อากาศที่นำมาใช้ในการทดลอง

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหมักน้ำเสียชุมชนร่วมกับเศษอาหารแบบกะ (Batch) ที่สภาวะ Mesophilic (35 $\pm$1^{o}C) และ Thermophilic (55 $\pm$1^{o}C) โดยพิจารณาอัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมจากชุดการทดลองที่มีผลผลิตมีเทนสูงสุด จากนั้นจึงนำไปศึกษาหาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วมแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous) ที่อัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อหาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุอุปกรณ์

3.1.1 น้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลัก คือ น้ำเสียชุมชนจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสียของทางเทศบาล (ภาพประกอบที่ 3-1) ด้วยวิธีแบบจ้วง (Grab Sampling) โดยทำการเก็บน้ำเสียชุมชนตลอดการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 4 ครั้ง และเก็บรักษาโดยการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 ^{o}C นำตัวอย่างน้ำเสียชุมชนมาวิเคราะห์คุณลักษณะก่อนนำไปทำการทดลองทุกครั้งโดยพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ค่าซีโอดี (COD) บีโอดี (BOD) ทีเคเอ็น (TKN) กรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ความเป็นด่าง (Alkalinity) และปริมาณของแข็งในรูปต่าง ๆ ได้แก่ ของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยง่าย (VS) ของแข็งแขวนลอย (SS) ของแข็งละลายน้ำ (TDS) โดยวิธีตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21th Edition (APHA, AWWA and WEF, 2012) และวิธีของ World Environment Center (2540) ดังตารางที่ 3-1

ภาพประกอบที่ 3-1 บ่อรวบรวมน้ำเสียชุมชนระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ เทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

ตางรางที่ 3-1 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียชุมชน

Parameters	Method
พีเอช (pH)	pH Meter
ซีโอดี (COD)	Close Reflux, Titration Method
บีโอดี (BOD)	5-Days BOD Test
ทีเคเอ็น (TKN)	Kjeldahl Method
ของแข็งทั้งหมด (TS)	Gravimetric Method
ของแข็งระเหยง่าย (VS)	Gravimetric Method
ของแข็งแขวนลอย (SS)	Gravimetric Method
ของแข็งละลายน้ำ (TDS)	Gravimetric Method
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	Titration Method
กรดไขมันระเหยง่าย (VFA)	Titration Method
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)	Walkley and Black and Kjeldahl Method

3.1.2 เศษอาหาร

เศษอาหารที่ใช้เป็นวัสดุหมักร่วมเป็นเศษอาหารชุมชนเหลือทิ้งจากโรงอาหาร โดยเก็บเศษอาหารจากถังรวบรวมเศษอาหารของโรงอาหารมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ (ภาพประกอบที่ 3-2) โดยก่อนนำมาทำการทดลองมีการเตรียมเศษอาหารขั้นต้นเพื่อผสมเศษอาหารที่เก็บรวบรวมมาใช้ในการทดลองให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันและมีลักษณะของขนาดที่ใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง (ภาพประกอบที่ 3-3) โดยนำเศษอาหารมาปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นอาหาร โดยตลอดการทดลองเก็บเศษอาหารทั้งหมด 15 ครั้ง นำตัวอย่างเศษอาหารที่ได้มาวิเคราะห์คุณลักษณะก่อนทำการทดลองทั้งหมด 8 ครั้ง และเก็บรักษาเศษอาหารโดยการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 ^{o}C โดยพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์คุณลักษณะของเศษอาหาร ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ค่าความชื้น (Moisture) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) โพแทสเซียมทั้งหมด (TK) และอินทรีย์คาร์บอน (OC) ตามวิธีของ AOAC (1990) แสดงดังตารางที่ 3-2

ภาพประกอบที่ 3-2 ลักษณะเศษอาหารเหลือทิ้งจากโรงอาหาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ภาพประกอบที่ 3-3 การเตรียมเศษอาหารก่อนนำไปทดลอง

ตารางที่ 3-2 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของเศษอาหาร

Parameters	Method
พีเอช (pH)	Electrometric Method
ความชื้น (Moisture)	Gravimetric Method
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	Kjeldahl Method
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	Spectrophotometric Molybdovanadophosphate Method
โพแทสเซียมทั้งหมด (TK)	Flame Photometric Method
อินทรีย์คาร์บอน (OC)	Walkley and Black Method
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)	Walkley and Black and Kjeldahl Method

3.1.3 เชื้อตะกอนจุลินทรีย์

เชื้อตะกอนจุลินทรีย์ (Seed) สำหรับใช้ในการเริ่มต้นระบบ (Start-Up) นำมาจากถังปฏิกรณ์ Upflow Anaerobic Sludge Blankget (UASB) ของระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็งของบริษัทโชติวัฒน์อุตสาหกรรม จำกัด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (ภาพประกอบที่ 3-4) โดยทำการเก็บเชื้อตะกอนจุลินทรีย์เพื่อใช้ตลอดการทดลอง

ทั้งหมด 4 ครั้ง นำมาวิเคราะห์ค่า MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids) เป็นส่วนหนึ่งของ MLSS ที่เป็นอินทรีย์สาร โดยมีค่าประมาณ 80-90% ของ MLSS (ธนาวัฒน์ รักกมล, 2549) เป็นค่าที่บอกปริมาณหรือความเข้มข้นเริ่มต้นโดยประมาณของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยา และวิเคราะห์คุณลักษณะอื่น ๆของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ดังตารางที่ 3-3 แล้วทำการเก็บรักษาเชื้อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นโดยการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 ºC

ภาพประกอบที่ 3-4 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3-3 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์

Parameters	Method
พีเอช (pH)	pH Meter
ซีโอดี (COD)	Close Reflux, Titration Method
ของแข็งทั้งหมด (TS)	Gravimetric Method
ของแข็งระเหยง่าย (VS)	Gravimetric Method
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	Titration Method
กรดไขมันระเหยง่าย (VFA)	Titration Method
MLVSS	Gravimetric Method

3.1.4 ถังปฏิกรณ์แบบกะ

ถังปฏิกรณ์แบบกะในระบบหมักแบบไร้อากาศทำมาจากขวดแก้วขนาด 1,300 ml ปริมาตรการหมัก (Working Volume) 1,000 ml ปิดปากขวดด้วยจุกยาง ปิดทับด้วยกาวซิลิโคน กักเก็บก๊าซชีวภาพด้วยลูกบอลยาง วัดปริมาณก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำ ปริมาตรน้ำที่ได้ดังกล่าวเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดในแต่ละวัน ทำการหมัก ที่อุณหภูมิ 35 $\pm$1^{o}C และ 55 $\pm$1^{o}C ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) (ภาพประกอบที่ 3-5) มีการกวนผสมโดยการเขย่าขวดวันละ 1 ครั้ง เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC)

3.1.5 ถังปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

ถังปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องในระบบหมักแบบไร้อากาศ ทดลองในระบบ Continuously Stirred Tank Reactor (CSTR) แบบจำลองในห้องปฏิบัติการ ปริมาตรใช้งาน (Working Volume) 5,000 ml ทำจากขวดขนาด 8,000 ml ศึกษาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองแบบกะ กวนผสมโดยประยุกต์ใช้ใบพัดจากเครื่องหมุนเวียนน้ำ ระบบให้ความร้อนด้วย Heater พร้อมติดเทอร์โมมิเตอร์ใช้วัดอุณหภูมิเพื่อควบคุมระดับของอุณหภูมิให้คงที่ (ภาพประกอบที่ 3-6) และเชื่อมต่อกับลูกบอลยางสำหรับกักเก็บก๊าซชีวภาพ วัดปริมาณก๊าซชีวภาพโดยเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas Counter) ด้วยหลักการแทนที่น้ำ

3.1.6 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas Counter) เป็นอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซแบบวงจรนับจำนวนรอบ (Guendouz *et al*. 2010) โดยชุดวัดปริมาณก๊าซนี้จะประกอบด้วยอุปกรณ์นับจำนวนรอบ ต่อเข้ากับชุดวัดปริมาณก๊าซโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ ซึ่งมีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยม ภายในใส่น้ำและรักษาระดับน้ำให้คงที่ตลอดการทดลองเพื่อความแม่นยำในการวัด (ภาพประกอบที่ 3-7)

ภาพประกอบที่ 3-5 ลักษณะชุดอุปกรณ์ระบบแบบกะและการควบคุมอุณหภูมิที่ 35 $\pm$1°C และ 55 $\pm$1°C

ภาพประกอบที่ 3-6 ลักษณะชุดอุปกรณ์และการเดินระบบในการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง

ภาพประกอบที่ 3-7 ลักษณะชุดอุปกรณ์เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารในการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบหมักแบบกะ

อัตราส่วนของวัสดุหมักร่วม คือ เศษอาหาร กับ น้ำเสียชุมชน โดยผสมในอัตราส่วน ดังนี้ ชุดทดลอง 10:90, 25:75, 50:50 และ 70:30 % w/v (ดัดแปลงจาก Callaghana F.J, *et.al.* 2002) และชุดควบคุม 0:100, 100:0 และ 30 % Seed w/v โดยชุดควบคุมที่ประกอบด้วยเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ (Seed) เพียงอย่างเดียวทำโดยการ ใช้เชื้อตะกอนจุลินทรีย์ 30% v/v ของปริมาตรใช้งาน (Working Volume) แล้วทำการปรับปริมาตรรวมด้วยน้ำกลั่น เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับชุดทดลองที่มีการหมักร่วมของวัสดุหมักในอัตราส่วนต่าง ๆ และประสิทธิภาพของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นการทดลองโดยการป้อนวัสดุหมักแบบกะหรือการเติมวัสดุหมักครั้งเดียว (batch)

เริ่มเดินระบบโดยทำการทดลองในขวดขนาด 1,300 ml ซึ่งมีปริมาตรใช้งาน (Working Volume) เท่ากับ 1,000 ml ทำการเตรียมเชื้อตะกอนจุลินทรีย์โดยการเติมเชื้อเริ่มต้นในปริมาณ 30% v/v ของปริมาตรใช้งาน ซึ่งอารียา วิรัชวรกุล (2546) อ้างถึง Hobson and Wheatly (1993) ได้แนะนำการเติมเชื้อเริ่มต้นควรมีปริมาณไม่น้อยกว่า 10% ของปริมาตรใช้งาน จากนั้นเติมวัสดุหมักผสมตามอัตราส่วนที่ต้องการศึกษา ทำการทดลองอัตราส่วนละ 2 ซ้ำ จากนั้นปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 6.80-7.20 (Michael, 2003; Poh and Chong, 2010) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 1 M และมีการกวนผสมโดยการเขย่าวันละ 1 ครั้ง ทำการหมักที่อุณหภูมิ Mesophilic (35 $\pm$1^{o}C) และ Thermophilic (55 $\pm$1^{o}C) ทิ้งให้เชื้อปรับสภาพที่อุณหภูมิห้องโดยดูจากการที่ระบบเริ่มผลิตก๊าซชีวภาพ จึงเริ่มปรับอุณหภูมิขึ้นให้เท่ากับอุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือ 35 $\pm$1^{o}C และ 55 $\pm$1^{o}C โดยที่อุณหภูมิ Thermophilic จะค่อย ๆปรับอุณหภูมิขึ้นจาก $\pm$35 ^{o}C เป็น $\pm$45 ^{o}C และจนได้อุณหภูมิที่ 55 $\pm$1 ^{o}C แล้วทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันด้วยชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่อาศัยหลักการแทนที่น้ำ (ภาพประกอบ 3-7) จนสิ้นสุดการทดลอง คือ ระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยกว่า 5 ml/d (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551) และเก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุก 3 วัน โดยหลังจากสิ้นสุดการทดลองทำการวัดค่าคุณลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลองดังตารางที่ 3-4

ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential; BMP) ของการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารด้วยการคำนวณ ค่า BMP-Test โดยทำการวัดปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดช่วงที่แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์

จนกระทั่งไม่เกิดการย่อยอีก จากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณตามสูตร BMP-Test และแสดงผลอยู่ในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมซีโอดีที่ย่อยสลาย โดยค่า BMP ที่ได้เป็นค่าที่แสดงถึงศักยภาพในการผลิตมีเทนสูงสุดของการหมักร่วมในอัตราส่วนนั้น ๆ

ตารางที่ 3-4 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียก่อนและหลังทดลอง

Parameters	Method
พีเอช (pH)	pH Meter
ซีโอดี (COD)	Close Reflux, Titration Method
กรดไขมันระเหยง่าย (VFA)	Titration Method
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)	Walkley and Black and Kjeldahl Method
องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (Gas Composition)	Gas Chomatography (TCD detector)

3.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียชุมชนด้วยการหมักร่วมกับเศษอาหารในระดับปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง

ในการศึกษานี้จะเป็นการศึกษาในระดับปฏิบัติการ (Lab-scale) โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.1 มาคัดเลือกอัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมของเศษอาหารเพื่อนำมาใช้ดำเนินการทดลองในแบบจำลองระดับ Lab-scale โดยในการศึกษานี้ใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบกวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR) คือมีการเติมน้ำเสียเข้าและดึงน้ำเสียออกในขณะที่มีการกวน โดยรูปแบบของถังเป็นดังภาพประกอบที่ 3-6 เพื่อทำการศึกษาหาระยะเวลาการกักเก็บ ที่เหมาะสมที่สุดและประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์รวมทั้งอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเพื่อสรุปถึงระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ทำการศึกษาที่ระยะเวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน ของการศึกษาการหมักหมักร่วม โดยเลือกอัตราส่วนผสมที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการหมักร่วมและปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เพื่อหาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสม โดยทำการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารตามอัตราส่วนที่เหมาะสม ในถังปฏิกรณ์ขนาด 8,000 ml ปริมาตรใช้งาน (Working Volume) 5,000 ml เริ่มเดินระบบโดยการเติมเชื้อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นจากถังปฏิกรณ์ UASB ของระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็งของบริษัทโชติวัฒน์อุตสาหกรรม จำกัด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยเติมใน

ปริมาณ 30% v/v ของปริมาตรใช้งาน (5,000 ml) ทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ โดยในการทดลองใช้เชื้อตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1,500 ml จากนั้นเติมของเสียที่ใช้ในการหมักจนถึงปริมาตรใช้งาน โดยในการทดลองใช้ปริมาณของเสียเท่ากับ 3,500 ml ปรับ pH เริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 6.80–7.20 (Poh and Chong, 2010) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 1 M ทิ้งให้เชื้อปรับตัวโดยดูจากการที่ระบบเริ่มผลิตก๊าซชีวภาพ (ปฏิรูป ผลจันทร์ และคณะ, 2557) หลังจากนั้นเริ่มเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยการป้อนของเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์และถ่ายออกจากปฏิกรณ์ในปริมาณเท่ากัน วันละ 1 ครั้ง ระหว่างทำการป้อนและถ่ายของเสียมีการกวนผสมตลอดเวลา เพื่อให้ของเสียที่ทำการทดลองมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) โดยปริมาณของเสียที่ป้อนเข้าและถ่ายออกคิดจาก ปริมาตรใช้งานหารด้วยระยะเวลากักเก็บที่ทำการศึกษาคือ 10, 20 และ 30 วัน แล้วทำการจดบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน โดยทำการศึกษาจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Stable Condition) โดยพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง $\pm$ 15% (เมธิยา หมวดฉิม, 2555) แล้วทำการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพเพื่อวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ และวิเคราะห์น้ำเสียที่ออกจากระบบตาม Standard Methods (APHA, AWWA, WPCF, 2012) ดังตารางที่ 3–5

ตารางที่ 3–5 พารามิเตอร์ ประเภทของตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์น้ำเสียจากระบบ

พารามิเตอร์	จุดเก็บตัวอย่าง	ความถี่
พีเอช (pH)	น้ำเข้า และน้ำออก	ทุกวัน
ซีโอดี (COD)	น้ำเข้า และน้ำออก	3 วัน/ครั้ง
ของแข็งทั้งหมด (TS)	น้ำเข้า และน้ำออก	3 วัน/ครั้ง
ของแข็งระเหยง่าย (VS)	น้ำเข้า และน้ำออก	3 วัน/ครั้ง
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	น้ำเข้า และน้ำออก	3 วัน/ครั้ง
กรดไขมันระเหยง่าย (VFA)	น้ำเข้า และน้ำออก	3 วัน/ครั้ง
ทีเคเอ็น (TKN)	น้ำเข้า และน้ำออก	6 วัน/ครั้ง
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (Biogas Production)	ก๊าซชีวภาพ	ทุกวัน
องค์ประกอบก๊าซ (Gas Composition)	ก๊าซชีวภาพ	ทุก 3 วัน

3.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกวัดปริมาตรโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ และทำการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นทุก 3 วัน และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) รุ่น HP 6890 (ภาพประกอบที่ 3-8) ใช้ตัววัดสัญญาณแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD) ซึ่งปรับสภาวะสำหรับการทดสอบดังนี้

Column	HP-PLOT/Q, Length 30 m × 0.53 mm ID.
Inlet temperature	250°C, Mode Split 1:20, Carrier(He) Pressure 9.0 psi
Oven temperature	Initial temperature 60°C hold 2.5 minutes
	Post run 120 °C, Post time 1 minutes
Detector temperature	250°C
Reference flow (He)	16 ml/min
Make up flow (He)	2 ml/min
Data rate	20 Hz

ภาพประกอบที่ 3-8 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 การวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์โดยอาศัยการวิเคราะห์ลำดับเบส บริเวณ 16S rDNA

3.2.4.1 การเก็บตัวอย่าง

ทำการศึกษาในถังปฏิกรณ์ของระบบกึ่งต่อเนื่อง โดยทำการเก็บตัวอย่างของเสียจากถังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลากักเก็บที่ให้ผลผลิตมีเทนดีที่สุด โดยจะเก็บในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ปริมาณ 5 ml

3.2.4.2 การสกัดดีเอ็นเอ

นำตัวอย่างของเสียที่เก็บได้ไปทำการปั่นเหวี่ยง เทส่วนใสทิ้งแล้วเก็บตะกอนเซลล์ไว้ จากนั้นนำไปสกัด DNA ด้วย Fast DNA ® SPIN Kit for Soil (Qbiogene, Inc., CA, USA) ตามวิธีการในคู่มือ โดยใช้เครื่อง FastPrep ® Instrument สำหรับทำลายผนังเซลล์ แล้วเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -20 ^{0}C จากนั้นทำการตรวจสอบ Genomic DNA ด้วยเทคนิค Electrophoresis โดยใช้ Agarose gel 1% ใน Tris-acetate (TAE; 0.04 M Tris-acetate, 0.001 M EDTA) ย้อมด้วย Ethidium bromide แล้วตรวจดูภายใต้แสงอัลตราไวโอเลต (UV) ของเครื่องตรวจสอบเจล

3.2.4.3 เพิ่มปริมาณดีเอ็นเอด้วยเทคนิคพีซีอาร์

หลังจากทำการตรวจสอบ Genomic DNA จึงนำ DNA ที่ได้มาเพิ่มจำนวนด้วยเทคนิค PCR โดยเป็นขั้นตอนการเพิ่มจำนวน DNA บริเวณ 16S rDNA โดยใช้ไพรเมอร์ 27f และ 1492r เพื่อการเริ่มต้นในการเพิ่มจำนวนด้วย PCR ด้วยเครื่อง Thermocycler (T100 Thermal Cycler-Bio-Rad) ด้วยรอบการทำงาน (Cycle) 30 รอบ ซึ่งมีสภาวะของ PCR คือ Denaturation ที่ 94°C เป็นเวลา 3 วินาที ตามด้วย Annealing ที่ 60°C เป็นเวลา 3 วินาที จากนั้นจึง Extension ที่ 72°C เป็นเวลา 45 วินาที และท้ายสุดคือเพิ่ม Extension ที่ 72°C เป็นเวลา 10 นาที ตรวจสอบ PCR product ด้วยเทคนิค Agarose gel electrophoresis จากนั้นผลิตภัณฑ์ของ PCR ถูกทำให้บริสุทธิ์ขึ้นด้วย GFXTM PCR DNA และ Gel Band Purification kit (Amersham, NJ, USA) แล้วจึงใช้ Templates เพิ่มจำนวนเป็นครั้งที่สอง โดยไพรเมอร์ครั้งที่สองนั้น คือ universal forward primer 533f และ reverse primer 907rGC (40-base pair GC-clamp) ติดกับ 5′ terminus ซึ่งสภาวะการเพิ่มจำนวน PCR ครั้งที่สองนั้นจะประกอบด้วย Denaturation เริ่มต้น ที่ 94°C เป็นเวลา 3 วินาที ตามด้วย Denaturation เริ่มต้น ที่ 94°C เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นจึง Annealing ที่ 60°C เป็นเวลา 3 วินาที และ Extension ที่ 72°C เป็นเวลา 45 วินาที โดยอุณหูมิของ Annealing จะถูดลดลง 0.5 °C ต่อหน่วยรอบเมื่ออุณหูมิสูงถึง 50 °C จากนั้น 10 Cycle ควบคุมสภาวะภายใต้สภาวะท้ายสุด Extension คือ ที่ 72°C เป็น เวลา 10

นาที (BioRad, CA, USA) โดยตรวจสอบ PCR product ที่ได้บน 1.0% Agarose gel electrophoresis และ เก็บรักษาที่ 4 ºC

3.2.4.4 การระบุลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA

หาลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA โดย PCR product ถูกทำให้บริสุทธิ์ด้วย GFXTM PCR DNA และ Gel Band Purification kit (Amersham, NJ, USA) จากนั้นจึงระบุลำดับนิวคลีโอไทด์ตาม ABI Prism ® 3100 sequencer (Applied Biosystems, CA, USA) ด้วย BigDye® terminator v3.1 cycle sequence kit (Applied Biosystems, CA, USA)

3.2.4.5 การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์

การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ตัวอย่าง DNA ที่ได้ถูกส่งไปวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ ที่บริษัท Biobasic ประเทศแคนาดา และลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ได้จะนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับจุลินทรีย์อ้างอิง (Reference Microorganisms) ที่มีอยู่ในฐานข้อมูล GenBank โดยใช้ BLAST: Ribosomal Database Project (http://rdp.cme.msu.edu)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

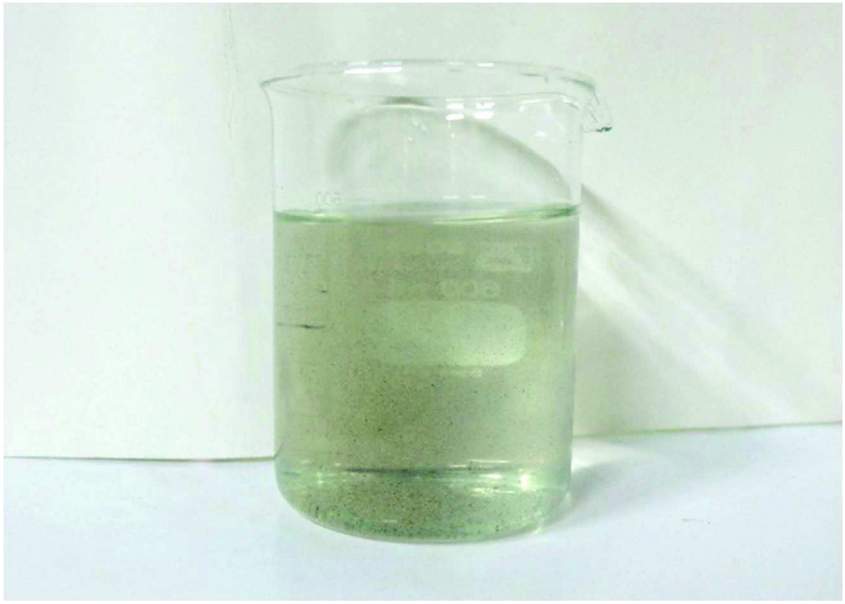
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุหมักและอัตราส่วนที่เหมาะสมของการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารในระบบหมักแบบกะ (Batch) ที่สภาวะ Mesophilic (35 $\pm$1°C) และ Thermophilic (55 $\pm$1°C) โดยพิจารณาอัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมจากชุดการทดลองที่มีผลผลิตมีเทนสูงสุด ส่วนที่สองนำผลอัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมมาศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous) ในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank Reactor; CSTR) ซึ่งงานวิจัยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุหมัก

4.1.1 น้ำเสียชุมชน

ในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียชุมชนจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลาเป็นวัสดุหมัก โดยเก็บจากบ่อรวมน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ (ภาพประกอบที่ 4-1) จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี โดยทำการเก็บน้ำเสียชุมชนมาใช้ตลอดการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 4 ครั้ง พบว่า น้ำเสียชุมชนมีสภาพเป็นกรดอ่อน คือมีค่าพีเอชเท่ากับ 6.83 $\pm$0.18 ซึ่งเป็นค่าพีเอชในช่วงที่เหมาะสมของระบบหมักแบบไร้อากาศ คือ ระหว่าง 6.8-7.2 (Michael, 2003; Poh and Chong, 2010) ความเข้มข้นของซีโอดีมีค่าเท่ากับ 177.5 $\pm$45.16 mg/l และมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) เท่ากับ 5.29 $\pm$2.40:1 ซึ่งจากค่าปริมาณความเข้มข้มของซีโอดี และอัตราส่วน C/N แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียชุมชนมีปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบในน้ำต่ำกว่าค่าแนะนำ นั่นคือ มีไนโตรเจนมากแต่มีอินทรีย์คาร์บอนน้อย โดยค่าอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมต่อระบบหมักแบบไร้อากาศมีค่าเท่ากับ 20-30:1 (Jia *et al.*, 2011) ดังนั้นจึงควรมีการหมักร่วมกับของเสียที่มีอินทรีย์คาร์บอนสูง เพื่อเพิ่ม

อัตราส่วน C/N ให้เหมาะสมกับระบบหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของน้ำเสียชุมชนแสดงดังตารางที่ 4-1



ภาพประกอบที่ 4-1 ลักษณะของตัวอย่างน้ำเสียชุมชน

ตารางที่ 4-1 คุณลักษณะของน้ำเสียชุมชน

Parameters	**ปริมาณ** ** **(หน่วย)**
พีเอช (pH)	6.83 ±0.18
ซีโอดี (COD)	177.5 ±45.16 (mg/l)
บีโอดี (BOD)	36.5 ±2.38 (mg/l)
ทีเคเอ็น (TKN)	37.5 ±12.58 (mg/l)
ของแข็งทั้งหมด (TS)	289.25 ±13.38 (mg/l)
ของแข็งระเหยง่าย (VS)	126 ±20.69 (mg/l)
ของแข็งแขวนลอย (SS)	40 ±6.58 (mg/l)
ของแข็งละลายน้ำ (TDS)	238 ±17.36 (mg/l)

ตารางที่ 4-1 คุณลักษณะของน้ำเสียชุมชน (ต่อ)

Parameters	ปริมาณ** (หน่วย)
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	169 ±14.49 (mg/l)
กรดไขมันระเหยง่าย (VFA)	29 ±3.37 (mg/l)
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)*	5.29 ±2.40:1

* คำนวณจาก ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (%) และ ปริมาณไนโตรเจน (%)

** ค่า S.D. มาจากการวิเคราะห์ตัวอย่างจำนวน 4 ครั้ง

4.1.2 เศษอาหาร

เศษอาหารที่ใช้เป็นวัสดุหมักร่วมในการทดลองนี้ ทำการเก็บจากโรงอาหารกลางของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (ภาพประกอบที่4-2) โดยนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี แสดงดังตารางที่ 4-2 พบว่า พีเอช มีค่อนข้างค่าเป็นกรดคือมีค่าเท่ากับ 5.21±0.12, ความชื้น มีค่าเท่ากับ 81.17 ±5.96 % w/w, ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด และ อินทรีย์คาร์บอน มีค่าเท่ากับ 3.59 ±0.54 % w/w, 1.80 ±0.60 % w/w, 0.08 ±0.04 % w/w และ 77.35 ±7.26 % w/w ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) เท่ากับ 21.55 ±3.10 :1 โดยตามทฤษฎีแล้วพบว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 20-30:1 (Jia *et al*., 2011) ซึ่งเป็นค่าที่มีความเป็นได้สำหรับการนำมาเป็นวัสดุหมักร่วมในระบบหมักแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป

ภาพประกอบที่ 4-2 ลักษณะเศษอาหารที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4-2 คุณลักษณะของเศษอาหาร

Parameters	ปริมาณ** (หน่วย)
พีเอช (pH)	5.21±0.12
ความชื้น (Moisture)	81.17 ±5.96 (% w/w)
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	3.59 ±0.54 (% w/w)
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	1.80 ±0.60 (% w/w)
ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (TK)	0.08 ±0.04 (% w/w)
อินทรีย์คาร์บอน (OC)	77.35 ±7.26 (% w/w)
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)*	21.55 ±3.10 :1

* คำนวณจาก ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (%) และ ปริมาณไนโตรเจน (%)

** ค่า S.D. มาจากการวิเคราะห์ตัวอย่างจำนวน 8 ครั้ง

4.1.3 เชื้อตะกอนจุลินทรีย์

เชื้อเริ่มต้นที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็งของบริษัทโชติวัฒน์อุตสาหกรรม จำกัด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ พบว่า เชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นเชื้อมีคุณลักษณะที่เหมาะต่อการเริ่มต้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากเป็นตะกอนเชื้อจุลินทรีย์จากระบบผลิตก๊าซ โดยมีค่าพีเอชเป็นกลางอยู่ในช่วงค่าแนะนำคือระหว่าง 6.8-7.2 (Michael, 2003; Poh and Chong, 2010) สภาพความเป็นด่าง อยู่ในช่วง 1,000-5,000 mg/l as $CaCO_3$ (Metcalf and Eddy, 2004) และมีค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างอยู่ในช่วงไม่เกิน 0.4 (Panpong *et al*, 2014) และมีคุณลักษณะทางเคมีอื่น ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของซีโอดีเท่ากับ 41,705.25 $\pm$827.24 mg/l ปริมาณของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 22,318.75 $\pm$1,067.55 mg/l กรดไขมันระเหยง่าย เท่ากับ 1,364.75 $\pm$81.63 mg/l และค่าความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ เท่ากับ 14,222 $\pm$693.87 mg/l ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 คุณลักษณะของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์

Parameters	ปริมาณ* (หน่วย)
พีเอช (pH)	7.31 $\pm$0.24
ซีโอดี (COD)	41,705.25 $\pm$827.24 (mg/l)
ของแข็งทั้งหมด (TS)	22,318.75 $\pm$1,067.55 (mg/l)
ของแข็งระเหยง่าย (VS)	14,213.75 $\pm$808.34 (mg/l)
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	5,189.50 $\pm$59.66 (mg/l)
กรดไขมันระเหยง่าย (VFA)	1,364.75 $\pm$81.63 (mg/l)
MLVSS	14,222 $\pm$693.87 (mg/l)
VFA: Alkalinity	0.26 $\pm$0.02

* ค่า S.D. มาจากการวิเคราะห์ตัวอย่างจำนวน 4 ครั้ง

4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารในระบบหมักแบบกะ

การศึกษานี้เป็นการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารในระบบหมักแบบกะ คือทำการเติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มต้นการทดลอง ศึกษาที่สภาวะมีโซฟิลิก (35 $\pm$1°C) และเทอโมฟิลิก (55 $\pm$1°C) มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลอง และผสมเศษอาหารกับน้ำเสียชุมชนกันในอัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตร ของปริมาตรใช้งานที่ใช้ทำการทดลอง ด้วยอัตราส่วนดังนี้ 10:90, 25:75, 50:50, 70:30 % w/v ชุดควบคุม 0:100, 100:0 และ 30 % Seed w/v โดยใช้เชื้อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 30% v/v ของปริมาตรใช้งาน วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ทำการวัดค่าคุณลักษณะทางเคมีของของเสีย ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองและเก็บบันทึกผลทั้งหมด 25 วัน และศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากการคำนวณค่า BMP (Biochemical Methane Potential) เพื่อประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของของเสียที่นำมาหมักด้วยระบบไร้อากาศ โดยจะแสดงในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อมิลลิกรัมซีโอดีของของเสียที่ถูกย่อยสลายไป

จากผลการทดลองพบว่า ในทุกอัตราส่วนมีการผลิตก๊าซชีวภาพสะสม (Accumulative Biogas) เกิดขึ้น แต่อัตราส่วนที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด คืออัตราส่วนระหว่างเศษอาหาร:น้ำเสียชุมชนที่ 10:90 ที่อุณหภูมิ 35 $\pm$1°C และ 55 $\pm$1°C โดยมีค่าเท่ากับ 7,053 ml และ 5,102 ml ตามลำดับ รองลงมาคืออัตราส่วนที่ 100:0 และน้อยที่สุดมีสองอัตราส่วนใกล้เคียงกันคือ อัตราส่วน 0:100 และ Seed ดังภาพประกอบที่ 4-3 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการเติมเศษอาหารจะเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพแต่ต้องมีอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม สอดคล้องกับงาน Jia *et al* (2011) โดยศึกษาผลของอัตราส่วนวัสดุหมักระหว่างของเสียจากผักผลไม้กับเศษอาหาร โดยการหมักร่วมที่อัตราส่วนระหว่างการของเสียจากผักผลไม้กับเศษอาหารที่อัตราส่วน 2:1 และ 1:1 ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์เดียวกัน พบว่าอัตราส่วนที่ 1:1 มีการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (Accumulative Methane) พบว่า ที่อัตราส่วนเศษอาหาร: น้ำเสียชุมชนที่ 10:90 มีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดเช่นกัน ในขณะที่อัตราส่วนที่มีสัดส่วนของเศษอาหารมากอย่างอัตราส่วน 100:0 ที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณมากเป็นอันดับสอง กลับพบว่ามีปริมาณก๊าซมีเทนสะสมในปริมาณที่น้อย (ภาพประกอบที่ 4-4) เนื่องจากในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศในช่วงแรกจะเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์และกระบวนการสร้างกรดโดยในช่วงของกระบวนการนี้จะทำให้สภาวะภายใน

ระบบมีความเป็นกรด ซึ่งหากภายในระบบมีความเป็นกรดมากเกินไปจะส่งผลต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนเนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช (pH) เป็นกลาง คือ 6.8-7.2 (Michael, 2003; Poh and Chong, 2010) นอกจากนี้ยังสัมพันธ์กับค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ซึ่งมีค่าที่แนะนำไว้สำหรับระบบหมักแบบไร้อากาศ คือ ค่า VFA อยู่ในช่วง 50-500 mg/l as CH_3COOH (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

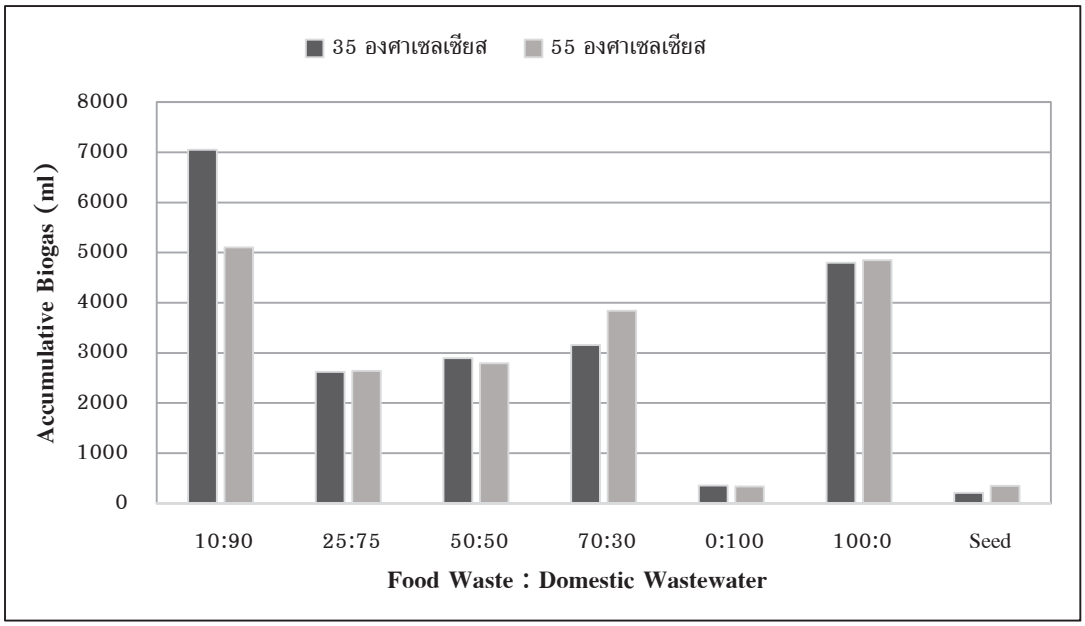
โดยหลังสิ้นสุดการทดลองได้มีการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของของเสีย พบว่า อัตราส่วนที่มี pH อยู่ในช่วงที่เป็นกลางคือ 10:90, 0:100 และ Seed โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.06-7.65 ในขณะที่อัตราส่วน 25:75, 50:50, 70:30 และ 100:0 มี pH อยู่ในช่วง 4.35-5.99 (ตารางที่ 4-4) ซึ่งมีค่าเป็นกรด เนื่องมาจากในช่วงดำเนินการทดลองจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดในระบบจะย่อยสลายสารอินทรีย์เปลี่ยนเป็น VFA เกิดขึ้นในระบบทำให้ค่า pH ในระบบลดต่ำลง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม คือ 6.8-7.2 (Michael, 2003; Poh and Chong, 2010) และสัมพันธ์กับค่า VFA ซึ่งแสดงถึงปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในระบบ โดยอัตราส่วน 25:75, 50:50, 70:30 และ 100:0 มีค่า VFA อยู่ในช่วง 3,870.07-8,372.15 mg/l (ตารางที่ 4-4) ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่แนะนำไว้สำหรับระบบหมักแบบไร้อากาศ คือ หากภายในระบบมีค่า VFA มากกว่า 50-500 mg/l จะทำให้สภาวะภายในระบบเป็นกรดไม่เหมาะต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน ส่งผลให้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนอยู่น้อย และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) จากตารางที่ 4-4 ของแต่ละอัตราส่วนพบว่า ค่าที่ได้สอดคล้องกับค่า pH ในระบบคือ อัตราส่วนที่มีค่า C/N อยู่ในช่วงที่เหมาะสม 20-30:1 (Jia *et al.*, 2011) คืออัตราส่วนที่ 10:90 ในขณะที่อัตราส่วนอื่นๆ ค่า C/N ไม่ได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักแบบไร้อากาศ

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่มีการหมักเศษอาหารเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 100:0) ซึ่งมีค่า C/N สูงกว่าค่าที่เหมาะสม โดยมีค่าเท่ากับ 80.03 และ 82.66 ที่ 35 $\pm$1°C และ 55 $\pm$1°C ตามลำดับ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้สูง แต่กลับมีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนน้อย คือมีค่าเท่ากับ 0.43% และ 0.15% ที่ 35 $\pm$1°C และ 55 $\pm$1°C ตามลำดับ ส่วนการหมักน้ำเสียชุมชนเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:100) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้น้อย เนื่องจากปริมาณของสารอาหารอาจมีน้อยเกินไป ไม่เพียงพอที่จุลินทรีย์จะใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพให้ได้ปริมาณมาก แต่มีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูง คือเท่ากับ 51% ที่ 35 $\pm$1°C และ 55 $\pm$1°C ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (ตารางที่ 4-5) ของแต่ละอัตราส่วนจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนที่มีสัดส่วนของค่า C/N อยู่มาก (ตารางที่ 4-4) จะมีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนน้อย เนื่องจากในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์และในกระบวนการสร้างกรดจะทำให้ภายในระบบมีความเป็นกรด ค่า pH ลดลง ซึ่งหากระบบมีการสะสมของ VFA

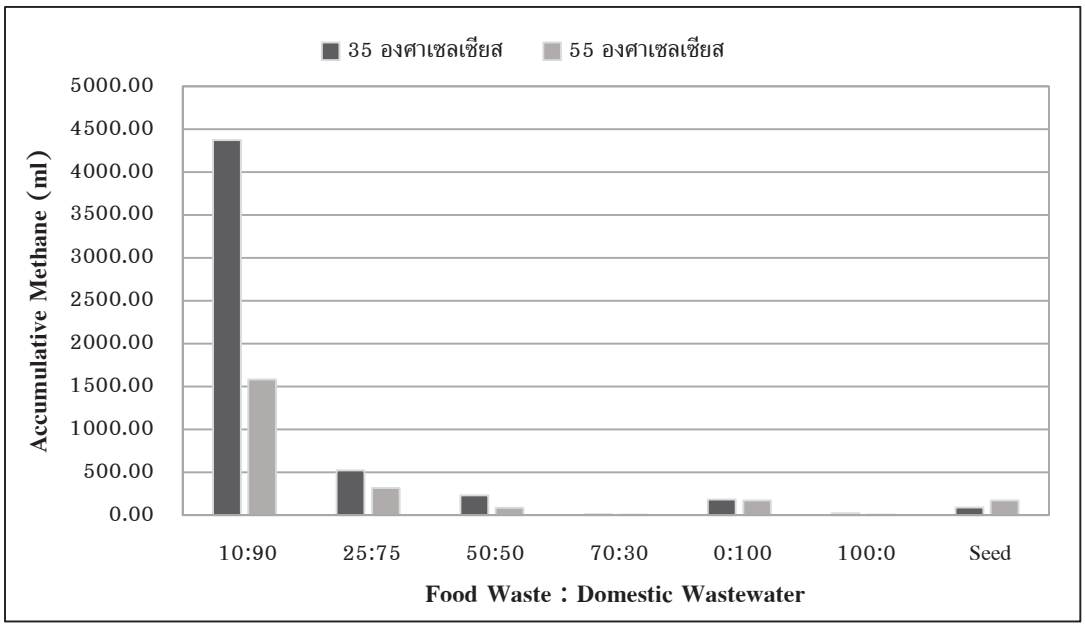
มากเกินไปจะทำให้ ค่า pH ภายในระบบลดลงมากจนอยู่ในระดับที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนในขั้นตอนถัดไป แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนที่มีสัดส่วนของเศษอาหารซึ่งเป็นแหล่งสารอาหารที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพควรมีอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมด้วย ซึ่งสอดคล้องกับค่า pH และ ค่า VFA ที่วัดได้หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ดังตารางที่ 4-3 หากมีในสัดส่วนที่มากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลต่อสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของจุลินทรีย์ภายในระบบในกระบวนการสร้างมีเทน

จากการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารในระบบหมักแบบกะ ที่สภาวะมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก เมื่อประเมินค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) ในทุกอัตราส่วน (ตารางที่ 4-5) แล้วพบว่าอัตราส่วน 10:90 ที่อุณหภูมิ 35 $\pm$1°C เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการหมักแบบไร้อากาศ เนื่องจากมีค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.674 ml CH_4/mg $COD_{removal}$ ปริมาณมีเทนสะสมเท่ากับ 4,372.86 ml มีความเข้มขนของก๊าซมีเทนเท่ากับ 62% และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 7,053 ml อีกทั้งมีอัตราส่วนของ C/N เท่ากับ 29.72 ซึ่งอยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสมคือ 20-30:1 (Jia *et al.*, 2011) ในขณะที่อัตราส่วน 10:90 ที่อุณหภูมิ 55 $\pm$1°C มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.339 ml CH_4/mg $COD_{removal}$ ปริมาณมีเทนสะสมเท่ากับ 1,581.62 ml มีความเข้มขนของก๊าซมีเทนเท่ากับ 31% และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 5,102 ml ซึ่งน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 35 $\pm$1°C อาจเนื่องมาจากระบบเทอโมฟิลิกเป็นระบบที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมได้ง่ายกว่าระบบมีโซฟิลิก (Jung *et al.*, 2006) และเมื่อมีกรดไขมันระเหยง่ายสะสมอยู่ในระบบมากอาจทำให้ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน นอกจากนี้เชื้อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองเป็นเชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบมีโซฟิลิกอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ในการหมักที่สภาวะเทอโมฟิลิก ซึ่งสอดคล้องกับ Maranon *et al.* (2012) ศึกษาการหมักร่วมของปุ๋ยคอกกับเศษอาหารและสลัดจ์เพื่อเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยผลที่ได้ให้อัตราการผลิตมีเทนต่ำเมื่อทำการหมักในสภาวะเทอโมฟิลิก (55 $\pm$1°C) คือ 0.55 L $CH_4/L_{reactor}$ day และ 440 L CH_4/kg VS_{feed} เมื่อเทียบกับ 0.75 L $CH_4/L_{reactor}$ day และ 616 L CH_4/kg VS_{feed} ที่สภาวะมีโซฟิลิก (36 $\pm$1°C) และ ผลของอุณหภูมิจากการศึกษาการหมักเศษอาหารในสภาวะไร้อากาศของ Komemoto et al. (2009) พบว่า ภายใต้สภาวะเทอโมฟิลิก (55°C และ 65°C) มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ต่ำกว่าการหมักภายใต้สภาวะมีโซฟิลิก (35°C และ 45°C) อย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 64.7 และ 62.7 ml/gVS ที่ 35°C และ 45°C ตามลำดับ

นอกจากนี้ จากตารางที่ 4-5 ผลการทดลองการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารในระบบหมักแบบกะยัง แสดงให้เห็นว่า การหมักร่วมมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และการผลิตก๊าซมีเทนสูง ซึ่งสอดคล้องกับ Carucci *et al.* (2005) และ EI-Mashad, H.M. and Zhang, R (2010) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสีย และมูลสัตว์กับเศษอาหารแล้วพบว่า การหมักร่วมสามารถให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่าการหมักวัสดุอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับการทดลองนี้ที่การหมักร่วมทำให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักน้ำเสียชุมชนหรือเศษอาหารเพียงอย่างเดียว



ภาพประกอบที่ 4-3 กราฟแสดงปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณภหภูมิ 35 $\pm$1°C และ 55 $\pm$1°C



ภาพประกอบที่ 4-4 กราฟแสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณภหภูมิ 35 $\pm$1°C และ 55 $\pm$1°C

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง

Ratio Food Waste: Domestic Wastewater	pH		COD (mg/l)		VFA (mg/l)		C/N Ratio*	
	35°C	55°C	35°C	55°C	35°C	55°C	35°C	55°C
10:90	7.32	7.06	13,336.00	15,162.31	2,039.36	2,922.83	29.72	28.16
25:75	5.43	5.62	37,384.20	37,418.51	3,684.52	3,870.07	41.83	43.95
50:50	5.99	5.38	61,013.70	61,203.12	5,753.42	5,882.15	59.60	59.08
70:30	5.13	5.85	83,598.60	83,725.73	7,132.05	7,468.31	65.78	64.85
0:100	7.12	7.48	15,172.70	15,035.16	1,021.72	1,085.56	19.65	19.71
100:0	4.35	5.73	92,203.73	93,689.30	8,676.54	8,372.15	80.03	82.66
Seed	7.26	7.65	15,109.93	14,923.05	932.33	976.75	12.57	13.13

* คำนวณจาก ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (%) และ ปริมาณไนโตรเจน (%)

ตารางที่ 4-5 ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากการทดลองแบบกะ

Ratio Food Waste: Domestic Wastewater	Accumulative Biogas Production (ml)		CH_4 Content (%)		Accumulative CH_4 (ml)		COD removal (mg)		BMP (ml CH_4/mg COD removal)	
	35°C	55°C	35°C	55°C	35°C	55°C	35°C	55°C	35°C	55°C
10:90	7,053	5,102	62	31	4,372.86	1581.62	6,492.45	4666.14	0.674	0.339
25:75	2,619	2,640	20	12	523.80	316.80	3,362.78	3328.47	0.156	0.095
50:50	2,893	2,796	8	3	231.44	83.88	2,717.83	2528.41	0.085	0.033
70:30	3,161	3,840	0.36	0.14	11.38	5.38	2,746.97	2619.85	0.004	0.002
0:100	357	336	51	51	182.07	171.36	1,181.48	1319.02	0.154	0.130
100:0	4,801	4,848	0.43	0.15	20.64	7.27	5,400.85	3915.27	0.004	0.002
Seed	208	348	43	49	89.44	170.52	755.40	942.28	0.118	0.181

4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียชุมชนร่วมกับเศษอาหารในระดับปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง

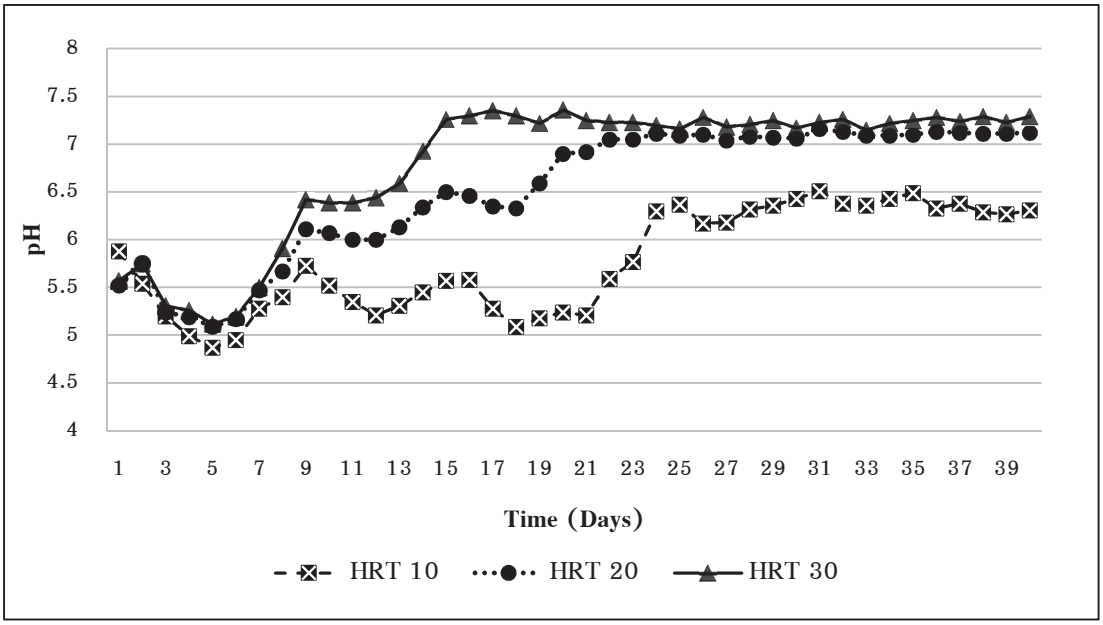
การทดลองส่วนที่สอง เป็นการนำอัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสมจากการทดลองแบบกะ คือ อัตราส่วนที่ 10:90 อุณหภูมิ 35 $\pm$1°C มาทำการหมักในระบบไร้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) เพื่อศึกษาผลของระยะเวลากักเก็บ (HRT) 10, 20 และ 30 วัน โดยมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ (OLR) เท่ากับ 1.18, 0.57 และ 0.35 g COD/L/day ที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 ตามลำดับ ซึ่งผลของการศึกษามีดังต่อไปนี้

4.3.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าพีเอช (pH) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการควบคุมระบบหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งช่วงของค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักแบบไร้อากาศอยู่ในช่วง 6.80-7.20 (Poh and Chong, 2010) โดยในการทดลองได้มีการควบคุม pH ของระบบด้วยการปรับค่า pH ของของเสียที่ป้อนเข้าระบบด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อให้มีค่า pH ของของเสียที่เข้าระบบอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ เนื่องจากวัสดุหมัก คือ น้ำเสียชุมชนมีค่า pH เป็นกลางอยู่ในช่วง 6.76-6.93 และ วัสดุหมักร่วมคือ เศษอาหารมีค่า pH เป็นกรดอ่อนอยู่ในช่วง 5.10-5.34 เมื่อนำวัสดุหมักทั้งสองมาผสมกันตามอัตราส่วน ค่า pH ที่วัดได้จริงมีค่าเป็นกรดอ่อน ๆที่อยู่ในช่วง 6.05-6.27 จึงทำให้ต้องมีการปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมก่อนการป้อนของเสียเข้าสู่ระบบทุกครั้ง

จากการทดลองพบว่าที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 ค่าพีเอชที่วัดได้ในช่วง 5 วันแรกจะมีค่าลดต่ำลงอยู่ในช่วงประมาณ 5.09-5.88 ดังภาพประกอบที่ 4-5 เนื่องจากในช่วงแรกจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอาหารให้เป็นกรดไขมันระเหยง่ายส่งผลให้ค่าพีเอชในช่วงแรกลดต่ำลง และหลังจากนั้นค่าพีเอชของทั้ง 3 HRT จึงค่อย ๆปรับค่าสูงขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงที่ของแต่ละ HRT โดย HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 pH เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ของการหมักประมาณวันที่ 27, 21 และ 15 ตามลำดับ โดยมีค่า pH เฉลี่ยที่สภาวะคงที่เท่ากับ 6.37 $\pm$0.07 7.10 $\pm$0.03 และ 7.25 $\pm$0.05 ที่ HRT 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่ง ค่า pH ของ HRT 20 และ 30 นั้นมีค่า pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งที่ HRT 30 สามารถเข้าสู่สภาวะคงได้เร็วกว่า HRT 20 เนื่องจาก ระยะเวลากับเก็บที่นานขึ้นอัตราการป้อนสารอินทรีย์ในแต่ละวันมีปริมาณพอเหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นกรดไขมันระเหยง่ายได้เหมาะสม จึงไม่มี

การสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายเกินค่าที่ระบบรับได้ ทำให้ระบบไม่ถูกยับยั้งการทำงานจากกระบวนการสร้างกรด (Owamah, HI and Izinyon, OC., 2015) และค่าสภาพความเป็นด่างของระบบก็อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเช่นกัน ในขณะที่ HRT 10 มีค่า pH เฉลี่ยในสภาวะคงที่เท่ากับ 6.37 $\pm$0.07 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่มีการแนะนำไว้ เนื่องจาก HRT 10 เป็นระยะเวลากักเก็บที่สั้นที่สุดในการทดลองนี้โดยระยะเวลากักเก็บจะสัมพันธ์กันกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ โดยระยะเวลากักเก็บยิ่งสั้นลงอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะยิ่งมากขึ้น อาจส่งผลให้ในช่วงเริ่มต้นของการหมัก กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์และกระบวนการสร้างกรด ผลิตกรดไขมันระเหยง่ายสะสมอยู่ในระบบสูงกว่าค่าที่เหมาะสมคือ 50 – 500 mg/l (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) ทำให้ค่า pH ของระบบลดต่ำลงเกินกว่าช่วงที่เหมาะสมสำหรับการหมักแบบไร้อากาศ และเมื่อระยะเวลากักเก็บเพิ่มขึ้นอัตราการป้อนสารอินทรีย์ลดลง ส่งผลให้การย่อยสลายอินทรีย์และการที่จุลินทรีย์ในกระบวนการสร้างมีเทนนำกรดไขมันระเหยง่ายไปใช้ได้อย่างสมดุลกัน สังเกตได้จากค่า pH ของระบบมีค่าสูงขึ้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ทำให้จุลินทรีย์สามารถใช้กรดไขมันระเหยง่ายจากสารอาหารหมักร่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Montneas *et al.*, 2014)



ภาพประกอบที่ 4-5 แสดงค่า pH ของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร ด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ที่ HRT 10, HRT20 และ HRT 30 วัน

4.3.2 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) และกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid: VFA)

สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ในน้ำเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาวะบัฟเฟอร์ในน้ำ โดยจะเป็นตัวช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ของระบบหมักแบบไร้อากาศให้มีค่า pH คงที่ จากการวิเคราะห์น้ำเสียที่ออกจากระบบของทั้ง 3 HRT พบว่า ค่าสภาพความเป็นด่างของการหมักที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4-5 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 1,000-5,000 mg $CaCO_3$/l ซึ่งในระบบหมักแบบไร้อากาศเมื่อค่า Alkalinity มีค่าสูงกว่า 2,000 mg $CaCO_3$/l หมายถึงว่าระบบหมักนั้นสามารถทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ (Nghiem *et al*, 2014) จากการทดลองในช่วง 3 วันแรกของระบบหมักแบบไร้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่อง ค่า Alkalinity ของ HRT 10 และ HRT 20 มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดสอดคล้องกับค่าพีเอชของทั้ง 2 HRT ก็มีค่าลดต่ำลงอย่างมากในช่วงแรกเช่นกันเนื่องด้วยเมื่อความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายภายในระบบเพิ่มสูงขึ้นความเป็นด่างไบคาร์บอเนตถูกทำลายไปทำให้ความเป็นบัฟเฟอร์ถูกทำลาย เป็นสาเหตุให้ความเป็นกรด-ด่างลดลง ขณะที่ค่าสภาพความเป็นด่างของ HRT 30 ในวันที่ 3 ของการหมักมีค่าเท่ากับ 518.70 mg $CaCO_3$/l และค่อย ๆปรับตัวสูงขึ้นจนถึงช่วงของค่าที่มีการแนะนำ จึงทำให้สามารถควบคุมการเปลี่ยนของ pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ดีและเร็วกว่า HRT 10 และ 20

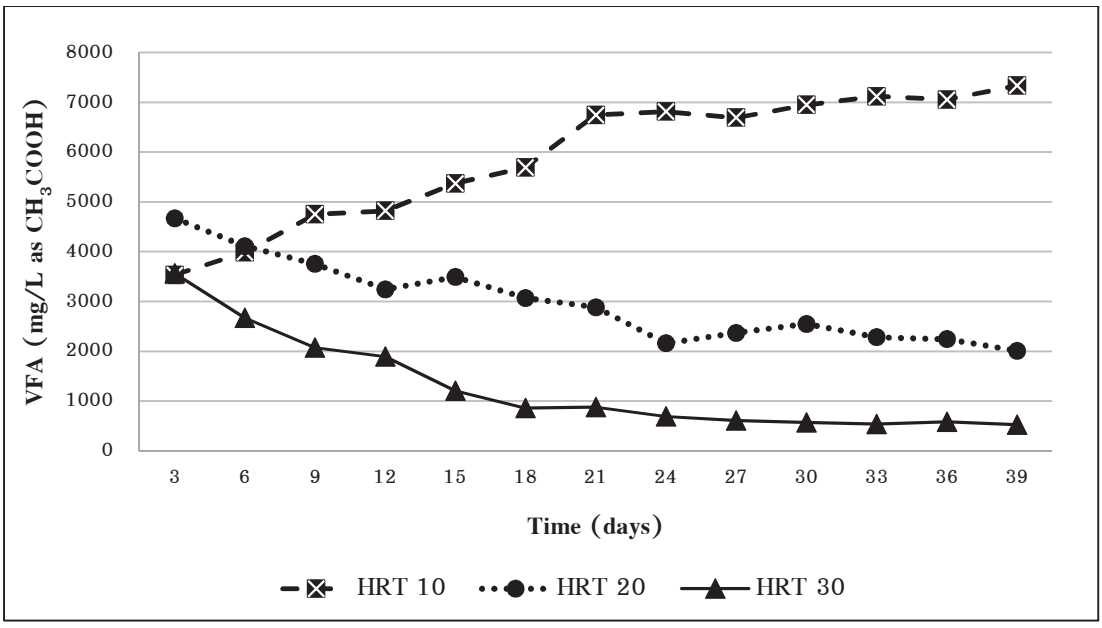
ในส่วนของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid: VFA) ซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศในขั้นตอนการสร้างกรด ซึ่งจะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน โดยเป็นค่าที่สามารถใช้บอกถึงความสมดุลในการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบหมักแบบไร้อากาศได้ โดยถ้าระบบมีค่ากรดไขมันระเหยง่ายสะสมอยู่ในปริมาณมากจะส่งผลไม่ดีต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน โดยปริมาณ VFA ที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักแบบไร้อากาศควรอยู่ในช่วง 50-500 mg/l as CH_3COOH (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) จากการทดลองพบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายของระบบในแต่ละ HRT ในช่วงแรกมีค่ากรดไขมันระเหยง่ายสะสมอยู่ในปริมาณสูงคือช่วง 3,500-4,500 mg/l as CH_3COOH และเมื่อระบบหมัก ดำเนินไปจนเข้าสู่ประมาณวันที่ 15 จะเห็นว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในระบบของ HRT 20 และ 30 มีแนวโน้มลดต่ำลง ตรงกันข้ามกับ HRT 10 มีแนวโน้มปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในระบบที่สูงขึ้น (ภาพประกอบที่ 4-6) เนื่องจาก HRT 10 มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงที่สุด คือ เท่ากับ 1.18 g COD/L/day ในขณะที่ HRT 20 และ HRT 30 มีอัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 0.57 และ 0.35 g COD/L/day ซึ่งหากอัตราการป้อนสารอินทรีย์มีปริมาณสูงเกินไปทำให้ระบบเกิดการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในระบบมากขึ้น จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายเป็นก๊าซมีเทนได้หมด จึงเกิดการ

สะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบเพิ่มขึ้น โดยปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมเฉลี่ยของ HRT 10, HRT 20 และHRT 30 มีค่าเท่ากับ 6,997.31 ±228.43, 2,272.43 ±183.03 และ 587.99±60.40 mg/l as CH_3COOH ตามลำดับ ซึ่งที่ HRT 30 มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของระบบหมักแบบไร้อากาศ ในขณะที่อีก 2 HRT มีค่ากรดไขมันระเหยง่ายเฉลี่ยสูงกว่าค่าที่มีการแนะนำไว้มาก เนื่องจากทั้ง 2 HRT มีระยะเวลากักเก็บที่สั้น ปริมาณของเสียที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวันมีปริมาณมาก จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดจึงย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นกรดไขมันระเหยง่ายสะสมในระบบปริมาณมากจนสภาวะความเป็นกรด-ด่างของระบบไม่สมดุลกัน ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Panyue *et al.*, 2008) จากตารางที่ 4-6 เมื่อพิจารณาจากค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA: Alkalinity) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการรองรับการเปลี่ยนสภาพความเป็นกรดที่เกิดขึ้นของระบบได้ โดยพบว่าที่ HRT 10 และ HRT 20 มีค่า VFA: Alkalinity สูงกว่าช่วงที่เหมาะสมคือ ไม่ควรเกิน 0.4 (Panpong *et al*, 2014) ในขณะที่ HRT 30 มีค่า VFA: Alkalinity เท่ากับ 0.16 ซึ่งอยู่ในช่วงที่แนะนำไว้ จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบหมักแบบไร้อากาศที่ HRT 30 สามารถปรับสมดุลของความเป็นกรด-ด่างภายในระบบให้เหมาะสมในการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหาร

ตารางที่ 4-6 แสดงค่า Alkalinity, VFA และ VFA: Alkalinity ของ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน

HRT (day)	Alkalinity* (mg/l as $CaCO_3$)	VAF* (mg/l as CH_3COOH)	VFA: Alkalinity
HRT 10	3402.38 ± 166.08	6997.31 ±228.43	2.06
HRT 20	3703.51 ±210.70	2272.43 ±183.03	0.61
HRT 30	3621.55 ±239.28	587.99 ±60.40	0.16

*ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง ณ วันที่ 24

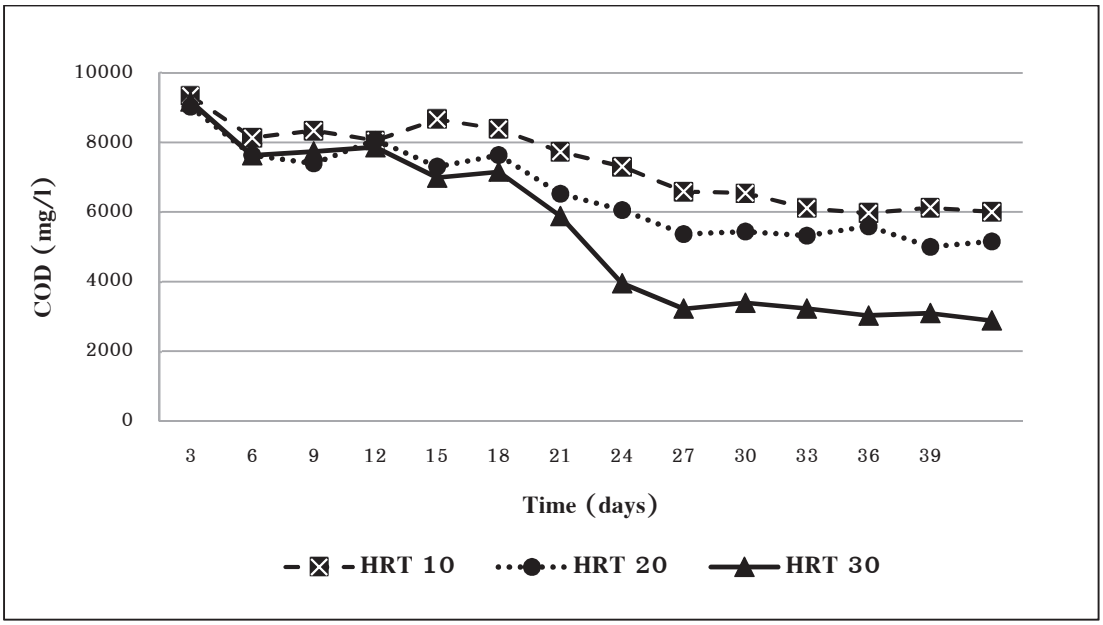


ภาพประกอบที่ 4-6 กรดไขมันระเหยง่ายในระบบหมักแบบไร้อากาศที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน

4.3.3 การบำบัดซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)

ปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD ของน้ำเสียจากการหมักแบบไร้อากาศของการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหาร โดยมีปริมาณ COD เริ่มต้นของแต่ละ HRT เท่ากับ 11,827 $\pm$64.32, 11,361.43 $\pm$76.10 และ 10,549.93 $\pm$71.68 mg/l ที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 ตามลำดับ เมื่อดำเนินการหมักจนระบบเข้าสู่ประมาณวันที่ 24 พบว่าปริมาณ COD ของระบบหมักมีค่าเฉลี่ยของแต่ละ HRT เท่ากับ 6,227 $\pm$273 , 5,315 $\pm$208 และ 3,138 $\pm$179 mg/l ที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 ตามลำดับ (ภาพประกอบที่ 4-7) โดยเมื่อคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด COD พบว่า ที่ HRT 10, 20 และ 30 มีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 47.24 $\pm$2.26 %, 53.20 $\pm$1.68 % และ 70.32 $\pm$1.80 % ตามลำดับ โดยที่ HRT 30 มีประสิทธิภาพการบำบัด COD ได้สูงสุด และรองลงมาเป็น HRT 20 และ HRT 10 ตามลำดับดังภาพประกอบที่ 4-7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาในการกักเก็บนานขึ้น จะส่งผลให้จุลินทรีย์มีระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้นานขึ้น ค่าประสิทธิภาพในการบำบัด COD นั้นจึงสูงตามไปด้วย สอดคล้องกับงานของ Fezzani and BenCheikh (2008) ศึกษาการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกกับของเสียที่เป็นของแข็งจากโรงงานน้ำมันมะกอก ที่

สภาวะมีโซฟิลิก ที่ HRT 12, 24 และ 36 วัน พบว่า HRT ที่ 36 วันมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดโดยสามารถกำจัดได้ถึง 89 % ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 0.67 gCOD/l/day



ภาพประกอบที่ 4-7 ปริมาณ COD ในระบบหมักแบบไร้อากาศที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน

4.3.4 การบำบัดทีเคเอ็น (Total Kjeldah Nitrogen: TKN)

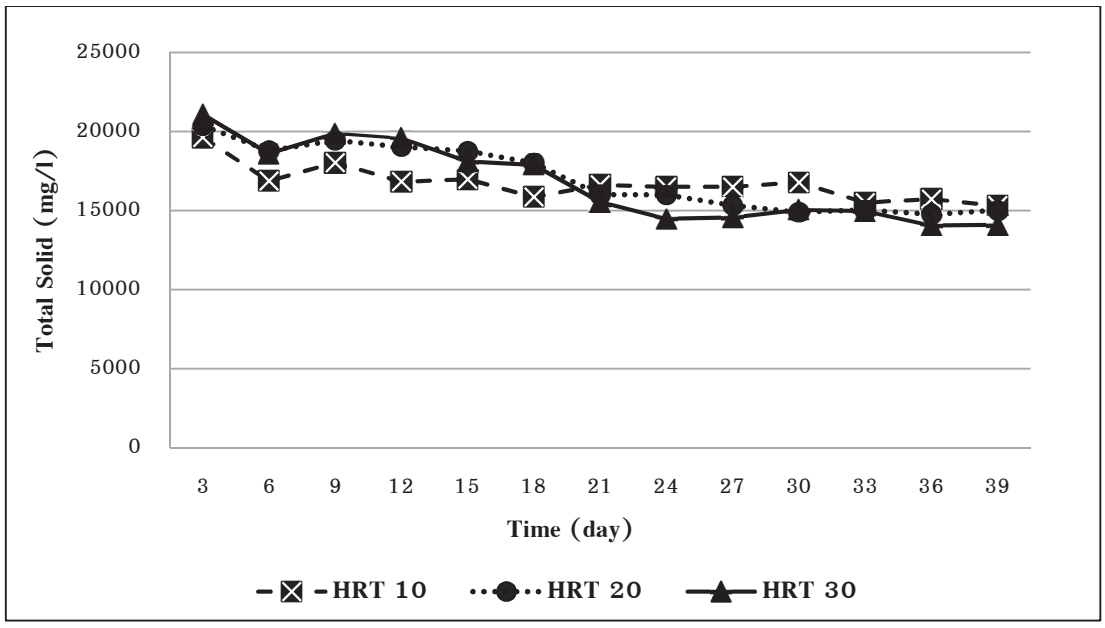
จากผลการวิเคราะห์ค่า TKN พบว่า ปริมาณ TKN ของน้ำเสียจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารในสภาวะไร้อากาศในช่วง 6 วันแรกปริมาณ TKN ของ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน มีค่าเท่ากับ 260, 230 และ 180 mg/l ตามลำดับ จากนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ประมาณวันที่ 24 ของการหมัก ปริมาณของค่า TKN ที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยเท่า 193 $\pm$11.02, 154 $\pm$5.13 และ 116 $\pm$5.29 mg/l ที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่าทีเคเอ็นลดลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในทุก HRT เนื่องจากในการบำบัดไนโตรเจนนั้นไม่สามารถกระทำได้โดยอาศัยกระบวนการแบบไร้อากาศเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้ร่วมกับกระบวนการแบบใช้อากาศร่วมด้วย ดังนั้นปริมาณทีเคเอ็นที่หายไป เนื่องจากอาจถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ และอาจถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจนจากการ

เกิดปฏิกิริยา Anammox คือการที่จุลินทรีย์ดึงออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมาใช้ โดยอาจจะเกิดขึ้นในช่วงแรกของการหมักเท่านั้น เมื่อออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำถูกใช้หมด กระบวนการดังกล่าวก็จะสิ้นสุดลง (Butler and Richardsont, 2005)

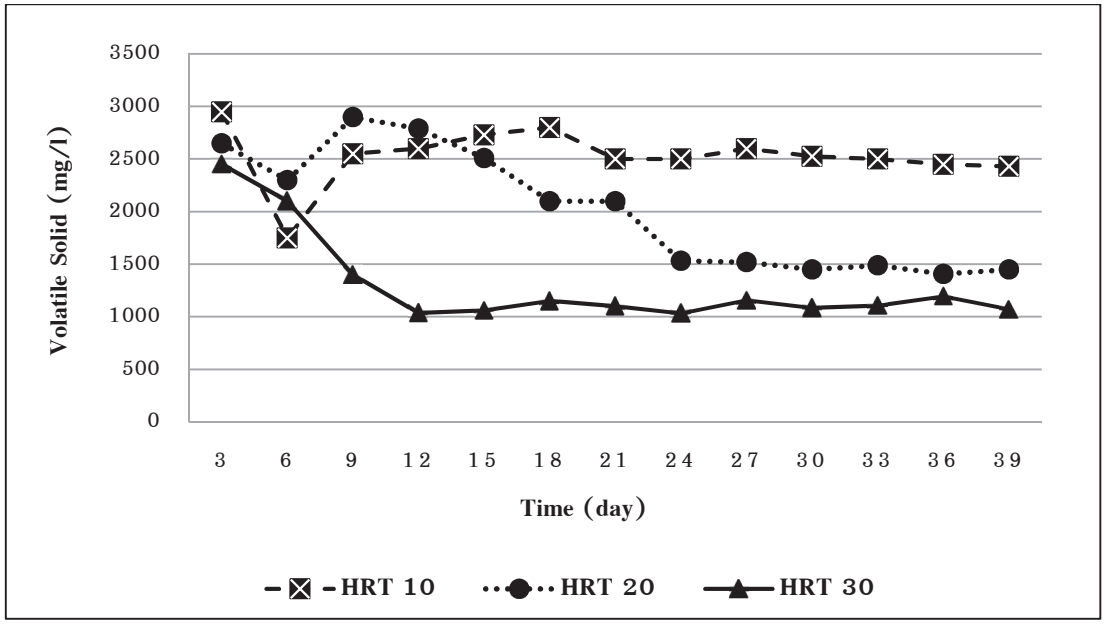
4.3.5 การบำบัดปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่าย (Total Solid: TS and Volatile Solid: VS)

จากการหมักน้ำเสียชุมชนร่วมกับเศษอาหารในสภาวะไร้อากาศที่ HRT 10, 20 และ 30 วัน ผลการทดลองพบว่า เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ประมาณวันที่ 24 ของการหมัก มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) เฉลี่ยเท่ากับ 16,262 $\pm$603.89, 15,293 $\pm$511.13 และ 14,675 $\pm$540.14 mg/l (ภาพประกอบที่ 4-8) และประสิทธิภาพการบำบัด TS เท่ากับ 31.03 $\pm$2.56 %, 33.16 $\pm$2.23 % และ 37.74 $\pm$2.29 % ที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน ตามลำดับ โดยการทดลองที่ HRT 10 มีประสิทธิภาพในการบำบัด TS ได้น้อยที่สุด เนื่องจากที่ HRT 10 มีปริมาณการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบหมักในปริมาณมากและถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายเป็นกรดไขมันระเหยง่ายได้ในปริมาณสูง ส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบหมักจึงถูกย่อยสลายเปลี่ยนไปสารอื่นได้น้อยลง

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหย (VS) ของของเสียจากระบบหมักแบบไร้อากาศที่ HRT 10, 20 และ 30 วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่ประมาณวันที่ 24 ของการหมัก พบว่ามีปริมาณค่า VS เฉลี่ยเท่ากับ 2,501 $\pm$54.96, 1,475 $\pm$47.73 และ 1099 $\pm$53.52 (ภาพประกอบที่ 4-9) และมีประสิทธิภาพการบำบัด VS เท่ากับ 33.13 $\pm$1.47 %, 59.75 $\pm$1.30 % และ 69.71$\pm$ 1.47 % ที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน ตามลำดับ โดย HRT 30 มีประสิทธิภาพในการบำบัด VS สูงสุด เนื่องจากมีระยะเวลากักที่นาน ทำให้จุลินทรีย์สามารถมีเวลาเพิ่มขึ้นในการย่อยสลายสารินทรีย์ในระบบเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้มาก ซึ่งสอดคล้องกันกับใน HRT ดังกล่าวมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของ COD ได้สูงสุดเช่นกัน ในขณะที่ HRT 10 และ 20 วัน เป็นระยะเวลากักเก็บที่สั้นลง อาจมีผลต่อจุลินทรีย์ในระบบที่อาจถูกชะล้างออก ก่อนที่จะได้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ทำให้ผลของประสิทธิภาพการกำจัด VS ลดลง (Hazimah *et al*, 2003)



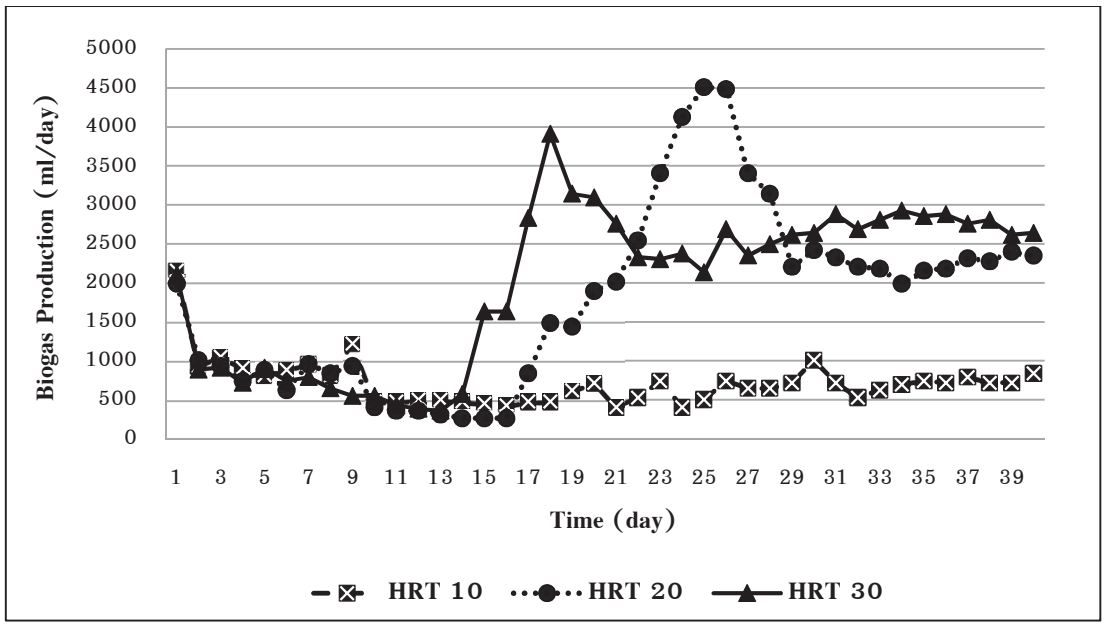
ภาพประกอบที่ 4-8 ปริมาณ TS ในระบบหมักแบบไร้อากาศจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร ที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน



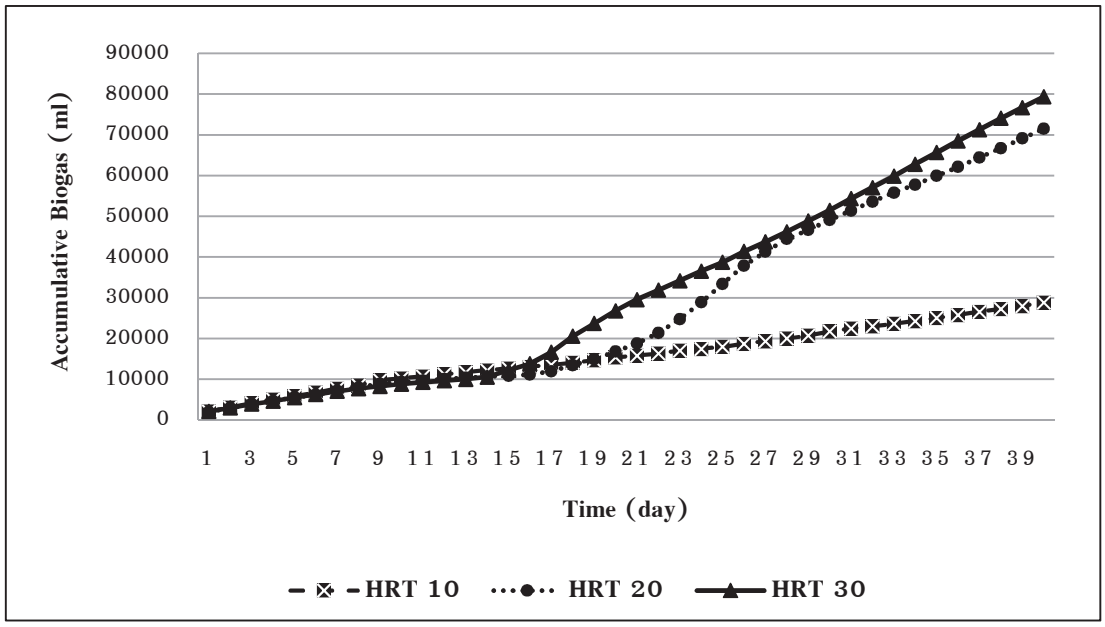
ภาพประกอบที่ 4-9 ปริมาณ VS ในระบบหมักแบบไร้อากาศจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร ที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน

4.3.6 การผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Production)

จากการศึกษาการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารในสภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิ 35 $\pm$1°C แบบกึ่งต่อเนื่อง โดยใช้เวลาในการทดลอง 39 วัน พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Production) ในช่วงเริ่มต้นระบบมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง (ภาพประกอบที่ 4-10) เนื่องจากในระยะเริ่มต้นเป็นช่วงของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์จากโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็ก โดยแบคทีเรียกลุ่ม Hydrolytic Bacteria ทำให้ในช่วงแรกนั้นยังมีการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นได้น้อย หลังจากนั้นระบบจึงเริ่มเข้าสู่เป็นช่วงที่มีการสร้างกรด สังเกตได้จากในช่วงแรกค่า pH ของระบบจะลดลง ดังภาพประกอบที่ 4-5 และเมื่อภายในระบบมีการสร้างสมดุลการทำงานระหว่างกัน ทำให้ทุกระบบมีการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยมีการผลิตก๊าซชีวภาพที่สภาวะคงที่เฉลี่ย เท่ากับ 710 $\pm$ 85.57, 2,253 $\pm$ 121.10 และ 2,760 $\pm$ 115.33 ml/day (ภาพประกอบที่ 4-10) และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดการทดลองในแต่ละ HRT เท่ากับ 28,872, 71,508 และ 79,392 ml ที่ HRT 10, 20 และ 30 วัน ตามลำดับ (ภาพประกอบที่ 4-11) โดยที่ HRT 20 และ 30 มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ HRT 10 มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพน้อยที่สุด เนื่องจากระยะเวลากักเก็บเป็นค่าสัมพันธ์กับปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (OLR) คือเมื่อระยะเวลากักเก็บสั้นลงทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้น โดยในการทดลองนี้ HRT 10 เป็นระยะเวลากักเก็บที่สั้นที่สุด มีปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบมากที่สุด ทำให้ระบบเกิดสภาพที่เรียกว่า Over load เพราะมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินจนจุลินทรีย์ในระบบไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ทัน ทำให้สภาวะภายในระบบเป็นกรด โดยจากภาพประกอบที่ 4-6 ค่า VFA แสดงให้เห็นว่าใน HRT ดังกล่าวมีการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยง่ายอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้สภาพภายในระบบมีความเป็นกรดสูงซึ่งไม่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ขณะที่ HRT 20 และ 30 มีค่ากรดไขมันระเหยง่ายลดลง และพีเอชค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายให้เป็นก๊าซมีเทนได้อย่างสมดุลกัน นอกจากนี้ระยะเวลากักเก็บที่สั้นลงยังทำให้จุลินทรีย์ในระบบถูกดึงออกมาจากระบบ (Wash Out) ในอัตราที่เร็วกว่าการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ภายในระบบ ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดน้อยลง



ภาพประกอบที่ 4-10 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน



ภาพประกอบที่ 4-11 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดการทดลองจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารที่ HRT 10, HRT20 และ HRT 30 วัน

4.3.7 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Potential of Methane Production)

จากการทดลองศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร ผลการทดสอบวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (Methane Content) ทุก 3 วันจนสิ้นสุดการทดลอง ในช่วงแรกของการทดลองความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมีเปอร์เซ็นค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเป็นช่วงการปรับตัวของจุลินทรีย์ในระบบ และหลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน อยู่ในช่วง 20.65-22.12% , 38.03-41.20% และ 53.06-60.02% ตามลำดับ (ตารางที่ 4-7) จากผลการวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพจะเห็นได้ว่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารที่ HRT ต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่ลดลง (ภาพประกอบหที่ 4-6 และ ตารางที่ 4-6) มีเพียง HRT 10 เท่านั้นที่มีสัดส่วนก๊าซมีเทนต่ำสุด เนื่องจาก HRT 10 เป็นระยะเวลากักเก็บที่สั้นที่สุดในการทดลองนี้ ดังนั้นเมื่อระยะเวลากักเก็บลดลงทำให้มีอัตราการป้อนของเสียเข้าระบบในปริมาณมาก จุลินทรีย์ย่อยสารอินทรีย์ในระบบเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่ายได้มากเกินความสามารถของจุลินทรีย์ในการนำสารอาหารนั้นไปใช้ ทำให้เกิดปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสะสมในระบบมากเกินจนสภาวะภายในระบบมีความเป็นกรดมาก เป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายไปเป็นก๊าซมีเทน สอดคล้อง Maranon *et al*. (2012) ที่ศึกษาการหมักร่วมของปุ๋ยคอกกับเศษอาหารและสลัดจ์เพื่อเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจากการทดลองพบว่า การผลิตก๊าซมีเทนจะลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบเพิ่มขึ้นและระยะเวลากักเก็บลดลง

ในส่วนของอัตราการผลิตก๊าซมีเทน (Methane Production) ที่ HRT 10, 20 และ 30 วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่า HRT 30 มีปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อวันสูงที่สุด รองลงมาคือ HRT 20 และ HRT 10 โดยมีค่าเท่ากับ 1,395.67 $\pm$237.97, 894.61 $\pm$78.76 และ 137.28 $\pm$23.96 ml/day ตามลำดับ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการผลิตก๊าซชีวภาพและความเข้มข้นของก๊าซมีเทน และเมื่อพิจารณาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Methane Yield) พบว่าในช่วงที่ระบบเข้าสู่งสภวาะคงที่ Methane Yield ของ HRT 10, 20 และ 30 มีค่าเท่ากับ 0.049 $\pm$0.012, 0.616 $\pm$0.099 และ 1.097 $\pm$0.217 ml CH_4/ mg $COD_{removal}$ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ Methane yield จากการทดลองนี้ในทุก HRT (ตารางที่ 4-7) กับค่าแนะนำตามทฤษฎีของกระบวนหมักแบบไร้อากาศ โดยมีค่าเท่ากับ 0.50 ml CH_4/mg $COD_{removal}$ (MetCalf and Eddy, 2004) ผลการเปรียบเทียบ พบว่า Methane Yield ที่ HRT 20 และ 30 วัน มีค่ามากกว่าค่าแนะนำ และ HRT ที่สามารถผลิต Methane Yield ได้สูงสุด คือ HRT 30 โดยค่า

Methane Yield ที่ได้สัมพันธ์กับปริมาณก๊าซชีวภาพและสัดส่วนของก๊าซมีเทน และสอดคล้องกับอัตราการบำบัดซีโอดีในระบบด้วยเช่นกัน

โดยจากการทดลองสรุปได้ว่า การหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารในระบบไร้อากาศ แบบกึ่งต่อเนื่อง ภายใต้สภาวะมีโซฟิลิก (35 $\pm$1°C) ที่อัตราส่วน 10:90 w/v โดยมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 0.35 g COD/L/day พบว่า ที่ HRT 30วัน มีค่า Methane Yield สูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.097 $\pm$0.217 ml CH_4/mg $COD_{removal}$ จึงถือได้ว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่มีศักยภาพในการผลิตมีเทน สำหรับการหมักร่วมของน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการศึกษานี้กับงานวิจัยอื่น ๆพบว่าสามารถผลิต Methane Yield สูงสุดได้มากกว่า งานวิจัยของ Maranon *et al.* (2012) ที่ศึกษาการหมักร่วมของปุ๋ยคอกกับเศษอาหารและสลัดจ์เพื่อเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจากผลการทดลองผลที่ได้ให้ Methane Yield เท่ากับ 603 L CH_4/kg VS_{feed} ที่สภาวะมีโซฟิลิก (36 $\pm$1°C) Cunsheng *et al.* (2013) ทำการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารกับปุ๋ยคอก แบบกึ่งต่อเนื่อง สามารถผลิต Methane Yield ได้เท่ากับ 388 ml CH_4/g $VS_{removal}$ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 10 g VS/L/day และ Jungmin and Chang-Min (2015) ที่ศึกษาการเพิ่มขึ้นของการผลิตมีเทนโดยการหมักร่วมของสลัดจ์กับสาหร่าย และน้ำชะขยะเศษอาหาร พบว่า การหมักร่วมของของเสียสามารถให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่สูงกว่าการหมักของเสียอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว โดยสามารถผลิต Methane Yield ได้เท่ากับ 176 $\pm$6.8 L CH_4/g VS มีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเท่ากับ 52.7% โดยผลการเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการหมักร่วมของน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารในการศึกษานี้ให้ผล Methane Yield ที่สูงกว่างานวิจัยอื่น อาจเนื่องมาจากวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบต่างกัน และใช้ค่า $COD_{removal}$ ในการคำนวณแทน VS_{feed} และ $VS_{removal}$ ดังนั้นจึงทำให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ได้มีค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 4-7 ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหารที่ HRT 10, HRT 20 และ HRT 30 วัน ภายใต้สภาวะคงที่ของระบบวันที่ 24

Parameter	HRT 10	HRT 20	HRT 30
Biogas Production (ml/day)	710 ± 85.57	2,253 ± 121.10	2,760 ± 115.33
CH_4 Content (%)	20.65-22.12	38.03-41.20	53.06-60.02
Methane Production (ml/day)	137.28 ±23.96	894.61 ±78.76	1,395.67 ±237.97
Methane Yield (ml CH_4/mg $COD_{removal}$)	0.049 ±0.012	0.616 ±0.099	1.097 ±0.217
COD removal (mg/l)	5,576 ±267.20	6,040 ±172.25	7,436 ±223.15
ปริมาณการป้อนน้ำเสีย (L/day)	0.500	0.250	0.167

4.3.8 ผลการวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์โดยอาศัยการวิเคราะห์ลำดับเบสบริเวณ 16S rDNA

จากการวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์โดยอาศัยการวิเคราะห์ลำดับเบสบริเวณ 16S rDNA ในการทดลองนี้ โดยเก็บตัวอย่างของเสียในถังปฏิกรณ์จากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารที่ HRT ที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดจากการเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยจากการนำผลการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ได้ เมื่อนำมา Blast ด้วย Ribosomal Database Project ซึ่งผลการวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์ในระบบหมักแบบไร้อากาศ แบบกึ่งต่อเนื่องที่สภาวะคงที่ของ HRT 30 วัน ซึ่งเป็นระยะเวลากักเก็บที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดจากการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหาร โดยพบว่า *Bacteroides* ssp. เป็นจุลินทรีย์หลักที่สามารถตรวจพบได้ในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ โดยมี Accession number คือ HQ180357 และมีค่าความคล้ายคลึงกัน (Similarity) เท่ากับ 99 % ซึ่งเป็นเชื้อที่พบได้ในช่วงของการผลิตกรด ซึ่งเป็นเชื้อที่จะสามารถผลิตสารอาหารที่เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญสำหรับจุลินทรีย์

กลุ่มสร้างมีเทน ในการนำไปใช้ผลิตก๊าซมีเทนได้ โดยผลจากการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun *et al*. (2013) ซึ่งศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวสาลี และศึกษากลุ่มของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ ที่สภาวะมีโซฟิลิก (37 °C) HRT 25 วัน พบว่ามี *Bacteroides* และ *Firmicutes* เป็นจุลินทรีย์กลุ่มหลักที่พบได้ในถังปฏิกรณ์ นอกจากนี้ Nishiyama *et al.* (2009) สามารถแยกเชื้อ *Bacteroides* ได้จากถังปฏิกรณ์ของการหมักของเสียจากวัว โดยมีสภาวะในการหมักที่อุณหภูมิในช่วง 30–35 °C

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์ของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง โดยเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานอาหารทะเลแช่แข็ง พบว่ามีกลุ่มจุลินทรีย์ Uncultured *Idiomarinaceae* bacterium นั้นเป็นจุลินทรีย์หลักที่สามารถตรวจพบได้ โดยมี Accession number. คือ AJ440241 และมีค่า Similarity เท่ากับ 97 % ทั้งนี้กลุ่มจุลินทรีย์ดังกล่าวเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ทนเค็มที่ชอบอาศัยในสภาวะที่มีความเค็มสูงจึงจะสามารถเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะน้ำเสียของโรงงานอาหารทะเล และจากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าหลังจากการนำไปใช้เป็นเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในการหมักร่วมกับระหว่างน้ำเสียชุมชนกับเศษอาหาร จะเห็นได้ถึงการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มจุลินทรีย์ ที่เปลี่ยนแปลงตามสารอาหารที่ใช้ในการหมักและสภาวะในการหมักอีกด้วย (Farooqui *et al*., 2015)

บทที่ 5

บทสรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียชุมชนหมักร่วมกับเศษอาหารด้วยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้กาศที่สภาวะมีโซฟิ ลิก (35 $\pm$1°C) และเทอโมฟิลิก (55 $\pm$1°C) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาคุณลักษณะของวัสดุหมัก

จากการศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสียชุมชนจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครหาดใหญ่ พบว่ามีค่าพีเอชเท่ากับ 6.83 $\pm$0.18 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมของระบบหมักแบบไร้อากาศ คือช่วง 6.8–7.2 และความเข้มข้นของซีโอดีมีค่าเท่ากับ 177.5 $\pm$45.16 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5.29 $\pm$2.40 :1 ซึ่งจากค่าปริมาณความเข้มข้มของซีโอดี และค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของน้ำเสียชุมชน แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียชุมชนมีปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบในน้ำต่ำ โดยควรปรับเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณคาร์บอนในน้ำเสีย นอกจากนี้วัสดุหมักร่วมในการศึกษานี้ คือ เศษอาหาร จากโรงอาหารกลางของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา เมื่อนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมี พบว่ามีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 21.55 $\pm$3.10 :1 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเศษอาหารในโรงอาหารนั้นคืออินทรีย์คาร์บอน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการนำไปใช้เป็นวัสดุหมักร่วมของน้ำเสียชุมชนของเทศบาลนครหาดใหญ่ ดังนั้นเศษอาหารจึงเป็นแหล่งอาหารสำคัญที่นำมาใช้ในการหมักร่วมเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพกับน้ำเสียชุมชน

5.1.2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหมักร่วมระว่างน้ำเสียชุมชนและเศษอาหารในระบบหมักแบบกะ

จากการศึกษาศักยภาพในการผลิตมีเทนสูงสุดของการหมักร่วมในระบบไร้กาศแบบกะที่สภาวะมีโซฟิลิก (35 $\pm$1°C) และเทอโมฟิลิก (55 $\pm$1°C) ที่อัตราส่วนระหว่าง เศษอาหารต่อน้ำเสียชุมชน คือ 10:90, 25:75, 50:50, 70:30 % w/v พบว่า อัตราส่วนเศษอาหารต่อน้ำเสีย 10:90 w/v ที่สภาวะมีโซฟิลิก (35 $\pm$1°C) นั้นมีศักภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

(BMP) ได้สูงสุด คือ เท่ากับ 0.674 ml CH_4 /mg $COD_{removal}$ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสม (Accumulative Biogas) ได้สูงสุด คือ เท่ากับ 7,053 ml มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ (CH_4 Content) เท่ากับ 62% ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (Accumulative Methane) สูงสุดเท่ากับ 4,372.86 ml ด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) เท่ากับ 29.72 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นจึงเลือกนำอัตราส่วนในการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารต่อน้ำเสียชุมชนที่อัตราส่วน 10:90 ที่ 35 $\pm$1°C ไปทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง

5.1.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียชุมชนร่วมกับเศษอาหารในระดับปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง

จากการเดินระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยอัตราส่วนการหมักร่วมระหว่างเศษอาหารและน้ำเสียชุมชน 10:90 ที่ 35 $\pm$1°C ด้วยระบบ CSTR ที่ HRT 10, 20 และ 30 วัน พบว่า ที่ HRT 30 วันเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการหมักร่วมโดยมีค่าพีเอช เท่ากับ 7.25 $\pm$0.05 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม สภาพความเป็นด่างมีค่าเท่ากับ 3621.55 $\pm$239.28 mg/l as $CaCO_3$ ซึ่งอยู่ช่วงที่เหมาะสมคือ 1,000-5,000 mg/l as $CaCO_3$ ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าพีเอช โดยมีค่าเท่ากับ 587.99 $\pm$60.40 mg/l as CH_3COOH โดยเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่มีการแนะนำ ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี เท่ากับ 70.32 $\pm$1.80 % และมีค่าการผลิตก๊าซชีวภาพที่สภาวะคงที่เฉลี่ย (Biogas Production) เท่ากับ 2,760 $\pm$115.33 ml/day และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (Accumulative Biogas) ตลอดการทดลองเท่ากับ 79,392 ml โดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ (CH_4 Content) อยู่ในช่วง 53.06 – 60.02 % อัตราการผลิตก๊าซมีเทน (Methane Production) ที่สภาวะคงที่ เท่ากับ 1,395.67 $\pm$237.97 ml/day และมีศักยภาพการผลิตมีเทน (Methane Yield) เท่ากับ 1.097 $\pm$0.217 ml CH_4/mg $COD_{removal}$ ทั้งนี้เมื่อลด HRT ให้สั้นลงจะเป็นการยิ่งทำให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพยิ่งลดลง จนทำให้ระบบเกิดการล้มเหลว จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบหมักไร้อากาศที่อัตราส่วนเศษอาหารต่อน้ำเสียชุมชน 10:90 ที่ 35°C และ HRT ที่ 30 วัน เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด และทำการนำตัวอย่างของเสียจากถังปฏิกรณ์ไปวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์โดยอาศัยการวิเคราะห์ลำดับเบสบริเวณ 16S rDNA พบว่ามี *Bacteroides* ssp. เป็นจุลินทรีย์หลักที่สามารถตรวจพบได้ในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ โดยมี Accession no. คือ HQ180357 และมีค่า Similarity เท่ากับ 99 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างการเตรียมเศษอาหารด้วยการปั่นก่อนนำไปหมัก กับการหมักแบบที่ไม่มีการเตรียมเศษอาหารก่อน ว่าผลการศึกษาต่างกันหรือไม่ เป็นการลดการใช้พลังงานในขั้นตอนของการเตรียมวัสดุหมักร่วม

2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงชนิดของเศษอาหารที่ใช้เพื่อจำแนกชนิดที่มีสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด

3. ควรมีการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์เริ่มและสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

4. ควรมีการพัฒนาให้มีการทดลองในระบบบำบัดระดับอุตสาหกรรมเพื่อนำผลการศึกษาในสภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้จริงได้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2553. *รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2551*. กรุงเทพฯ: รุ่งศิลป์การพิมพ์.

กรมควบคุมมลพิษ. 2545. *น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ครุสภาลาดพร้าว.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2553. *คู่มือการปฏิบัติงานการผลิตและใช้ก๊าซชีวภาพอย่างปลอดภัยสำหรับฟาร์มปศุสัตว์*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัย ค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. ม.ป.ป. *ก๊าซชีวภาพ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัย ค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. *ตำราระบบบำบัดมลพิษ*. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2546. *คู่มือการคัดแยกขยะรีไซเคิล*. พิมพ์ครั้งที่ 1. หนังสือในโครงการ การจัดการครัวเรือนและโรงเรียน เพื่อลดขยะชุมชน กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม.

กรรณิการ์ สิริสิงห. 2549. *เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: ประยูรวงศ์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2542. *การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment)*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ สยามสเตชั่นเนอรี่ซัพพลายส์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. *วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 4*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์.

ชลกาญจน์ ชาติดวงเพชร. 2551. ประสิทธิภาพของระบบแอนแอโรบิกซีเควนซิ่งแบทรีแอกเตอร์ (เอเอสบีอาร์) ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ดวงหทัย สิงห์คะ และ วสุ ปฐมอารีย์. 2554. เทคนิค Denaturing Gradient Gel Electrophoresis: หลักการ และการประยุกต์ใช้ทางจุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม. *ว.วิทย. มข.*39(3) 321-333.

ธนาวัฒน์ รักกมล. 2549. ประสิทธิภาพของระบบบำบัดเอเอสบีอาร์ แบบเทอร์โมฟิลิกและมีโซฟิลิกในการบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธราพงษ์ วิฑิตศานต์, นวดล เหล่าศิริพจน์, ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ ภาวิณี ชัยประเสริฐ. 2553. *รายงานสถานภาพของการวิจัยและผลิตเอทานอล ไบโอดีเซล ไบโอแก๊ส และน้ำมันชีวภาพในประเทศไทย (Position Paper on Biofuel Development in Thailand)*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท วี พลัส กรุ๊ป (ไทยแลนด์) จำกัด.

นงลักษณ์ สุวรรณพินิจ และ ปรีชา สุวรรณพินิจ. 2554. *จุลชีววิทยาทั่วไป*. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นฤมล เซาะกระโทก. 2556. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

นันท์นภัส ขันธ์วราพันธิชัย. 2552. ผลของอุณหภูมิและการบำบัดเบื้องต้นต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ปฏิรูป ผลจันทร์, ปวันรัตน์ บุญอ่อน และ ภัทรวดี สุขสุวรรณ์. 2557. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการผลของชนิดและปริมาณมูลสัตว์ ระยะในการกวนผสม และความเข้มข้นของแข็งต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ โดยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

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

ไพเชษฐ์ ธรรมภาณ. 2541. ผลของระยะเวลากักเก็บน้ำของถังปฏิกิริยาสร้างกรดต่อการบำบัดน้ำเสียมูลสุกร โดยกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เมธิยา หมวดฉิม. 2554. การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วกับกากตะกอนดีแคนเตอร์จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วุฒิภัณฑ์ คุมมินทร์. 2544. การผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหารที่มีความเข้มข้นสูงโดยการหมักแบบชั้นกรองไร้อากาศ 2 ขั้นตอน ร่วมกับวิธีการวนน้ำหมัก. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมทิพย์ ด่านธีรวนิชย์, อุดมผล พืชน์ไพบูลย์, เจิดจรรย์ ศิริวงศ์ และ พนาลี ชีวกิดาการ. 2541. *น้ำเสีย: การควบคุมและบำบัด*. พิมพ์ครั้งที่ 1. สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

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

สมฤดี ฤทธิ์ยากุล. 2551. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และผลพลอยได้จากการหมักมูลสุกรร่วมกับสาหร่ายหนามจากทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2553. *คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas)*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี.

สินิจนันท์ เสียงเสนาะ. 2553. ผลของสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จากกากตะกอนปาล์มของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อานีตา ปาเก. 2556. การผลิตแก๊สชีวภาพจากสาหร่ายขนาดใหญ่ร่วมกับซีรัมจากการผลิตน้ำยางข้น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อารียา วิรัชวรกุล. 2546. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาจุลชีววิทยา, ภาควิชาจุลชีววิทยา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุดมผล พืชน์ไพบูลย์. 2551. เทคนิคการวิเคราะห์น้ำ น้ำเสียและขยะมูลฝอย. สงขลา: เทคโนโลยีการศึกษา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Ahn, J.-H. and Forster, C.F. 2002. A comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic upflow filters treating paper – pulp – liquors. *Process Biochemistry*. 38: 257-262.

Angelidaki, I. and Ellegaard, L. 2003. Co-digestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants – status and future trends. Appl. *Biochem. Biotechnol*. 109: 95-105.

AOAC. 1990. *Official Method of Analysis of the Association of Official Analysis Chemists*. 15 th ed. U.S.A.: AOAC, Inc.

APHA, AWWA and WEF. 2012. *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater.* 22 nd ed. Maryland : American Public Health Association.

biogas production. *Waste Management.* 32: 1821-1825.

Bodelier, P.L., Meima-Franke, M., Zwart, G. and Laanbroek, H.J. 2005. New DGGE strategies for the analyses of methanotrophic microbial communities using different combinations of existing 16S rRNA-based primers. *FEMS. Microbiol*. Ecol. 52:163-174.

Bolzonella, D., Battistoni, P., Susini, C. and Cecchi, F. 2006. Anaerobic codigestion of waste activated sludge and OFMSW: the experiences of Viareggio and Treviso plants (Italy). *Water Sci. Technol*. 53: 203-211.

Bryant, M.P. Microbial Methane Production Theoretical Aspects. *Animal Science.* 1979. 48(1): 193-201.

Butler C.S. and Richardsont D.J. 2005. The emerging molecular stracture of the nitrogen cycle: an introduction to the proceedings of the 10th annual N-cycle meeting. *Biochemical Society Transactions.* 33: 113-118.

Carucci, G., Carrasco, F., Trifoni, K., Majone, M. and Beccari, M., 2005. Anaerobic digestion of food industry wastes: effect of codigestion on methane yield. *Journal of Environmental Engineering*. 131: 1037-1045.

Callaghan, F.J., Wase, D.A.J., Thayanithy, K. and Forster, C.F. 1999. Co-digestion of waste organic solids: batch studies. *Bioresour Technology*. 67: 117-122.

Callaghan, F.J., Wasea, D.A.J., Thayanithya, K., Forsterb, C.F. 2002. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit andvegetable wastes and chicken manure. *Biomass and Bioenergy*. 27: 71-77.

Choorit, W. and Wisarnwan, P. 2007. Effect of temperature on the anaerobic digestion of palm oil mill effluent. *J. Biotechnol*. 10(3): 376-385.

Cunsheng Zhang, Gang Xiao, Liyu Peng, Haijia Su, Tianwei Tan. 2013. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology.* 129: 170 - 176.

Dearman, B., Marschner, P. and Bentham, R.H. 2006. Methane production and microbial community Structure in single-stage batch and sequential batch systems anaerobically co-digesting food waste and biosolids. *Appl Microbiol Biotechnol*. 69: 589-596.

Elena C., Maurizio R. and Vincenzo., R. 2010. Investigation of increasing organic loading rate the co- digestion of energy crops and cow manure mix. *Bioreurce Technology*. 101: 3013-3019.

El-Mashad, H.M. and Zhang, R., 2010. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource technology*. 101: 4021-4028.

Farooqui, S.M., Wright, M.H. and Greene, A.C., 2016. Aliidiomarina minuta sp. nov., a haloalkaliphilic bacterium that forms ultra-small cells under non-optimal conditions. *Antonie van Leeuwenhoek*. DOI 10.1007/s10482-015-0611-3.

Fern´andez, A., S´anchez, S. and Font, X. 2005. Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of Municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin. *Biochemical Engineering Journal*. 26: 22-28.

Fezzani, B. and BenCheikh, R. 2008. Optimisation of the mesophilic anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with olive mill solid waste in a batch digester. *Desalination*. 228: 159-167.

Gannoun, H., Omri, I., Chouari, R., Khelifi, E., Godon, J.J., Hamdi, M., Sghir, A. and Bouallagui, H., 2016. Microbial community structure associated with the high loading anaerobic codigestion of olive mill and abattoir wastewaters. *Bioresource technology*. 201: 337-346.

Garber, W.F., Ohara, G.T., Colbaugh, J.E. and Raksit, S.K. 1975. Thermophilic digestion at the hyperion treatment plant. *Journal Water Pollution Control Federation*. 47: 950-961.

Gomez, X., Cuetos, M.J., Cara, J., Moran, A. and Garcia, A.I. 2006. Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes - conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy*. 31: 2017-2024.

Hartmann, H. and Ahring, B.K. 2005. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: influence of co-digestion with manure. *Water Resaech*. 39: 1543-1552.

Hazimah, A.H., Ooi, T.L. and Salmiah, A., 2003. Recovery of glycerol and diglycerol from glycerol pitch. *Journal of Oil Palm Research*. *15*: 1-5.

Jia, L., J. Zuo, L. Gan P. li, F. Liu, K. wanfg, L. Chen, and H. Gam. 2011 Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fuild and vegetable waste and food waste of China. *Journal of Environ Sciences* 23: 1403-1507.

Jung Kon Kim., Baek Rock Oh., Young Nam Chum. and Si Wouk Kim. 2006. Effects of Temperature and Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Food Waste. *Bioscience and Bioengineering*. 102: 328-332.

Jungmin Kim and Chang-Min Kang. 2015. Increased anaerobic production of methane by co-digestion of sludge with microalgal biomass and food waste leachate. *Bioresource Technology*. 189: 409-412.

Kizilkaya, R. and Bayrakli, B. 2005. Effects of N-enriched sewage sludge on soil enzyme activities. *Applied Soil Ecology*. 30:192-202.

Liu, W., Chan, OC., Fang, HHP. 2002. Microbial community dynamics during start-up of acidogenic anaerobic reactors. *Water Research*. 36: 3203-3210.

Loehr, R.C. 1974. *Agriculture waste Management: Problems, Processes and Approaches*. New York: Academic press, Inc. London, Chapman & Hall.

Lueders, T. and Friedrich, M.W. 2003. Evaluation of PCR amplification bias by terminal restriction fragment length polymorphism analysis of small-subunit rRNA and mcrA genes by using defined template mixtures of methanogenic pure cultures and soil DNA extracts. *Appl. Environ*. Microbiol. 69:320-326.

Manariotis, I.D. and Grigoropoulos, S.G. 2006. Municipal Wastewater Treatment Using Upflow Anaerobic Filters. *Water Environment Research*. 78: 233-242.

Maranon, E., Castrillon, L., Quiroga, G., Fernandez-Nava, Y., Gomez, L., Garcla, M.M. 2012. Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Waste Management*. 32: 1821-1825.

Mata-Alvarez, J. ed., 2003. *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA publishing.

McGraw-Hill, Inc Michael H. Gerardi. 2003. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. Hoboken New Jersey: Wiley Interscience a John Wiley and Sons, Inc.

Metcalf and Eddy. 1991. Wastewater Engineering Treatment Disposal Reuse. *McGrawHill* New York.

MetCalf and Eddy. 2004. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. *McGrawHill*. New York.

Montaes S, Perez M and Solera R. 2014. Anaerobic mesophilic co-digestion of sewage sludge and sugar beet pulp lixiviation in batch reactors: Effect of pH control. *Chemical Engineering Journal*. 255: 492-499.

Moonil Kim., Young-Ho Ahn. And R.E. Speece. 2002. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic. *Water Reseaech*. 36: 4369-4385.

Nayono, S.E, Gallert, C. and Winter, J. 2010. Co-digestion of press water and food waste in abiowaste Digester for improvement of biogas production. *Bioresour. Technol*. (inpress)

Nishiyama, T., Ueki, A., Kaku, N., Watanabe, K. and Ueki, K., 2009. Bacteroides graminisolvens sp. nov., a xylanolytic anaerobe isolated from a methanogenic reactor treating cattle waste. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 59: 1901-1907.

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.

Owamaha H.I. and Izinyon O.C. 2015. The effect of organic loading rates (OLRs) on theperformances of food wastes and maize husks anaerobic co-digestion in continuousmode. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 11:71-76.

Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B. and Chaiprasert, P. 2010. Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. *Biomass and Bioenergy*. 34: 1117-1124.

Panponga K, Srisuwana G, O-Thong S, Kongjand P. 2014. Anaerobic Co-digestion of Canned Seafood Wastewater with Glycerol Waste for Enhanced Biogas Production. *Energy Procedia*. 52: 328 – 336.

Panyue, Z., G. Zeng, 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.

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.

Prasertsan P, O-Thong S, Birkeland N-K. 2009. Optimization and microbial community analysis for production of biohydrogen from palm oil mill effluent by thermophilic fermentative process. *International journal of hydrogen energy*. 34: 7448-7459.

Rattanapan C, Suksaroj TT, Kantachote D, Rakkamond T, Katemai W. 2012. Biogas Production from Co-digestion of Domestic Wastewater and Food Waste. *Health and the Environment Journal*. 3: 1-9.

Reynolds, T.D. and P.A. Richard. 1995. Unit Operation and Process in Environmental Engineering. *Boston*, PWS Inc.

Romano, R.T. and Zhang, R.H. 2008. Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor. *Bioresource Technology*. 99: 631-637.

Sait, L., Galic, M., Strugnell, R.A. and Janssen, P.H. 2003. Secretory antibodies do not affect the composition of the bacterial microbiota in the terminal ileum of 10-week-old mice. Appl. *Environ. Microbiol*. 69: 2100-2109.

Shin, S. G., Lee, C., Hwang, K., Ahn, J. and Hwang, S. 2008. Use of order-specific primers to investigate the methanogenic diversity in acetate enrichment system. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 35: 1345-1352.

Staley, J.T., E.F. Fritsch, S. Lory and J.J. Perry. 2007. *Microbial Life*. 2nd ed., Sinauer Associates. New York, USA. 45 p.

Sun, L., Müller, B. and Schnürer, A. 2013. Biogas production from wheat straw: community structure of cellulose- degrading bacteria. *Energy, Sustainability and Society*. 3: 1.

Tawfik, A., Sobhey, M. and Badawy, M. 2008. Treatment of a Combined Dairy and Domestic Wastewater in an Up- flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor Followed by Activated Sludge (AS system). *Desalination*. 227: 167-177.

Wang, H., Lehtomäki, A., Tolvanen, K., Puhakka, J. and Rintala, J. 2009. Impact of crop species on bacterial community structure during anaerobic co- digestion of crops and cow manure. *Bioresource technology*. 100: 2311-2315.

Wang, H., Tolvanen, K., Lehtoma, A., Puhakka. J. and Rintala, J. 2010. Microbial community in anaerobic co- digestion of grass silage and cow manure in a laboratory continuously stirred tank reactor. *Biodegradation*. 21: 135-146.

Yilmaz, T., Yuceer, A. and Basibuyuk, M. 2008. A comparison of the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating papermill wastewater. *Bioresource technology*. 99: 156-163.

Zinder, S. 1994. Syntrophic acetate oxidation and "Reversible Acetogenesis". New York London, Chapman & Hall.

ภาคผนวก

วิธีวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์หา COD แบบ Close Reflux, Titrimetric Method

ค่า COD หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (95-100%) จะถูกออกซิไดส์ โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง (Strong oxidizing agent) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดทดลองชนิด borosilicate ขนาด 25×150 mm พร้อมจุก TFE
2. ที่ใส่หลอดทดลอง
3. เตาย่อย COD ที่อุณหภูมิ 150 ± 2°C
4. ปิเปตขนาด 1 และ 10 mL
5. บิวเรตขนาด 50 mL
6. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL

สารเคมี

1. สารละลาย digestion reagent

ละลาย $K_2Cr_2O_7$ 4.913 g ซึ่งอบแห้งที่ 103 °C เป็นเวลา 2 ชม. ในน้ำกลั่น 500 mL ค่อยๆ เติม conc. H_2SO_4 167 mL เติม $HgSO_4$ลงไป 33.3 g คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 L ด้วยน้ำกลั่น

2. กรด sulfuric เข้มข้นที่ผสม $AgSO_4$ (Sulfuric Acid reagent)

ละลาย $AgSO_4$ 22 g ใน Conc. H_2SO_4ซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 kg (2.5 L) แล้วตั้งทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ละลาย

3. สารละลายมาตรฐาน ferrous ammonium sulfate (FAS) 0.1 N

ละลาย Fe $(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$ 39 g ในน้ำกลั่น แล้วเติม conc. H_2SO_4ลงไป 20 mL ทำให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนครบปริมาตร 1 L สารละลายนี้ต้องนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลาย digestion reagent ดังนี้ คือ เติมน้ำกลั่น 10 mL สารละลาย digestion reagent 14 mL จากนั้นใช้ปิเปตต่อยๆเติม Sulfuric Acid reagent ลงไป 14 mL ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำมาไทเทรตกับสารละลาย ferrous ammonium sulfate (FAS) โดยใช้ ferroinจำนวน 2-3 หยด เป็นอินดิเคเตอร์ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ

$$\text{Normality of FAS solution} = \frac{\text{ml } K_2Cr_2O_7 \times 0.10}{\text{ml Fe } (NH_4)_2(SO_4)_2}$$

4. สารละลาย ferroinอินดิเคเตอร์

ละลาย 1-10 phenantroline monohydrate 1.485 g และ $FeSO_4$. $7H_2O$ 695 mg ในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรครบ 100 mL

วิธีการทดลอง

1. ล้างหลอดแก้วทดลอง และฝาจุกด้วยกรด H_2SO_4 20% ก่อนเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์

2. ปิเปตตัวอย่างน้ำมา 10 mL ใส่ลงในหลอดทดลอง แล้วเติม digestion reagent ลงไป 6 mL

3. ค่อย ๆเติม กรด sulfuric เข้มข้นที่ผสม $AgSO_4$ลงไป 14 mL ให้ไหลลงก้นหลอดแก้วเพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ใต้ชั้นของน้ำตัวอย่างและ digestion reagent

หมายเหตุ ภายหลังการเติมกรดซัลฟุริก ให้สังเกตสีของตัวอย่างดังต่อไปนี้

- ถ้าได้เป็นสีเขียว แสดงว่า ปริมาณ $K_2Cr_2O_7$เหลืออยู่มาก ใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างน้อยเกินไปต้องเพิ่มปริมาณน้ำตัวอย่างอีก
- ถ้าได้สีเขียวอมเหลือง แสดงว่าปริมาณน้ำตัวอย่างเหมาะสม สามารถนำตัวอย่างไปรีฟลักซ์ได้
- ถ้าได้สีเขียวอมฟ้า แสดงว่าปริมาณน้ำตัวอย่างมากเกินไป ต้องทำการเจือจางน้ำตัวอย่างให้มีความเข้มข้นน้อยกว่านี้

โดยจะใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำตัวอย่าง : น้ำกลั่น เท่าไหร่ก็ได้ แต่ผลรวมของปริมาตรน้ำตัวอย่างต้องเท่ากับ 10 mL

4. ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่น แล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลาย ๆ ครั้งอย่างทั่วถึงก่อนจะนตัวอย่างไป รีฟลักซ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนสะสมอยู่ที่ก้นหลอด ซึ่งอาจแตกไดขณะทำการรีฟลักซ์

5. ให้ทำ blank โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างด้วยวิธีการทดลองเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง ประมาณ 1-2 หลอด

6. นำหลอดแก้วทั้งหมดที่ใส่น้ำตัวอย่างและ Blank วางบนที่ตั้งหลอดทดลอง แล้วเข้าเตาอบที่ทำให้อุณหภูมิถึง 150 ± 2 °C ก่อนหน้านี้แล้ว เมื่อครบเวลา 2 ชม. ให้นำตัวอย่างออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งเย็น

7. เทตัวอย่างจากหลอดไส่ลงในขวดชมพู่ แล้วไทเทตรกับสารละลาย FAS จนกระทั่งถึงจุดยุติจะเห็นการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ อ่านปริมาตรที่ไทเทรตตอนเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลแดงทันที

การคำนวณ $$\text{COD, mg/L} = \frac{(a-b)\times N\times 8000}{\text{ml sample}}$$

a = ml ของ Fe $(NH_4)_2(SO_4)_2$ที่ใช้ไทเทรต Blank

b = ml ของ Fe $(NH_4)_2(SO_4)_2$ที่ใช้ไทเทรต น้ำตัวอย่าง

N = Normality ของ Fe $(NH_4)_2(SO_4)_2$ที่ใช้

ตารางที่ 1-1 แสดงปริมาณของตัวอย่างน้ำและ Reagent ต่าง ๆ ในหลอดทดลอง

Digestion vessel	Sample (ml)	Digestion solution (ml)	H_2SO_4 reagent (ml)	Total final volume (ml)
Culture Tube :				
16 × 100 mm	2.5	1.5	3.5	7.5
20 × 150 mm	5.0	3.0	7.0	15.0
25 × 150 mm	10.0	14.0	14.0	30.0
Standard 10 ml sample	2.5	1.5	3.5	7.5

2. การวิเคราะห์ของแข็งในน้ำ

Solids หมายถึง สิ่งเจือปนในน้ำที่เหลืออยู่เมื่อระเหยน้ำออกจนหมด ไม่รวมถึงสารบางอย่างที่ระเหยไปกับน้ำ เช่น กรดอินทรีย์และกรดต่าง ๆที่ละลายในน้ำ สิ่งเจือปนที่เหลือเป็นของแข็งนี้มีสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งอาจจะละลายในน้ำหรือไม่ก็ได้ การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งในน้ำทำได้โดยการชั่งน้ำหนัก (gravimetric method) แล้วรายงานผลในรูปน้ำหนักสารต่อปริมาตรของน้ำตัวอย่าง

2.1 Total Solids (TS) คือ สิ่งที่เหลืออยู่ภายหลังการระเหยน้ำออกจนหมดและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C TS อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามลักษณะการละลาย คือ

1) Dissolved Solids (DS) หมายถึง ส่วนที่ละลายได้ในน้ำ ซึ่งส่วนมากได้แก่ กรดอินทรีย์ เช่น NaClและสารอินทรีย์บางอย่าง เช่น น้ำตาล
2) Insoluble Solids หมายถึง ส่วนที่ไม่ละลายในน้ำ แบ่งเป็น 2 ชนิดตามขนาดของชิ้นส่วนที่
ไม่ละลาย คือ

- Suspended Solids (SS) หมายถึง ส่วนที่ไม่ละลายในน้ำแต่มีขนาดเล็กพอที่จะแขวนลอย (suspend) อยู่ในน้ำได้ หาได้โดยการกรองตัวอย่างน้ำด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (glass fiber filter, GF/C) แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C
- Settleable Solids หมายถึง ตะกอนที่มีขนาดใหญ่และมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำจะตกตะกอนรวมกันที่ส่วนล่างเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก หาได้โดยนำน้ำตัวอย่างมาใส่ใน ภาชนะที่เรียกว่า Imhoff cone หรือ กระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1 ชม. แล้วอ่าน ปริมาตรของตะกอนที่ตกลงมา มีหน่วยเป็น มล./ลิตร

2.2 Volatile Solids (VS) and Fixed Solids (FS) หมายถึง ของแข็งที่สลายไปเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 550–600 °C ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบอินทรีย์กลายเป็น CO_2และ H_2O ในขณะที่สารอนอนทรีย์ส่วนใหญ่จะไม่เกิดการแยกสลายที่อุณหภูมิดังกล่าว ดังนั้นน้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลือคือของแข็งคงตัวซึ่งเป็นสารอนินทรีย์

การวิเคราะห์ของแข็งไม่ว่าจะอยู่ในรูปใดจะใช้วิธี gravimetric คือการชั่งน้ำหนักหลังจากทำให้แห้งแล้ว ดังนั้นภาชนะก่อนที่จะนำมาใช้จะต้องแห้ง ปราศจากฝุ่นละอองหรือความชื้น โดยจะต้องนำภาชนะไปทำให้แห้งในตู้อบ (oven) ที่อุณหภูมิ 180 °C ประมาณ 2 ชม. นำมาทิ้งให้เย็นใน dessicatorแล้วจึงชั่งน้ำหนัก หลังการชั่งน้ำหนักครั้งที่ 1 แล้วภาชนะควรจะมีน้ำหนักคงที่ ถ้าน้ำหนักเปลี่ยนแปลงให้นำภาชนะไปอบจนกว่าจะได้น้ำหนักคงที่ สำหรับตัวอย่างที่ต้องการหา volatile solids ต้องนำภาชนะที่ใช้ไปเผาที่อุณหภูมิ 550±50°C ในเตาเผา (muffle furnace) 1 ชม. เมื่อทำให้เย็นใน dessicator แล้วจึงจะนำมาใช้ได้

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ถ้วยกระเบื้อง (evaporating dish)
2. อ่างไอน้ำ (water bath)
3. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 mm
4. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
5. ตู้อบแห้ง
6. ตู้ดูดความชื้น
7. เครื่องดูดพร้อมปั๊มดูดอากาศ
8. Bucher's funnel

วิธีวิเคราะห์

1. Total Solids (TS)

1.1 นำถ้วยกระเบื้องที่มีน้ำหนักคงที่แล้วจาก dessicator มาชั่ง สมมติให้น้ำหนัก = A

1.2 คนตัวอย่างน้ำให้เข้ากันดีแล้วตวงโดยใช้กระบอกตวง 100-200 มล. (ปริมาตรที่ใช้ขึ้นกับปริมาณของแข็งในน้ำ) ใส่ในถ้วยกระเบื้องข้อ 1 นำไประเหยบนอ่างไอน้ำจนแห้ง

1.3 นำถ้วยกระเบื้องที่ระเหยน้ำแห้งแล้วไปใส่ในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 103-105°C เพื่อไล่ความชื้นนานประมาณ 1 ชม. แล้วนำไปทำให้เย็นใน desiccator

1.4 เมื่อเย็นแล้วจึงนำมาชั่ง สมมติ = B

$$\text{TS, mg/l} = \frac{(B-A)\times 10^6}{\text{ml sample}}$$

2. Suspended Solids (TSS)

2.1 นำกระดาษกรอง GF/C มาชั่งโดยเครื่องชั่งละเอียด สมมติได้น้ำหนัก = C กรัม นำไปวางบน evaporating dish หรือ petridish ก็ได้

2.2 วางกระดาษกรองลงบน Buchner's funnel ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดอากาศโดยใช้ปากคีบที่สะอาดใช้ น้ำกลั่นฉีดบนกระดาษกรองให้ทั่ว แล้วเปิดปั๊มดูดอากาศเพื่อให้กระดาษกรองแนบสนิทดีกับกรวย

2.3 ปิเปตตัวอย่างน้ำ 50-100 mL (ปริมาตรที่ใช้ขึ้นกับของแข็งแขวนลอยในน้ำ) ใส่ไปบนกระดาษกรอง ทีละน้อยพร้อมกับเปิดปั๊มดูดอากาศ พยายามให้ของแข็งกระจายไปทั่ว ๆกระดาษกรอง

2.4 ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างของแข็งที่ติดอยู่ข้างกรวยจนหมดและรอจนกว่าจะแห้งแล้วใช้ปากคีบค่อย ๆหยิบกระดาษกรองออกนำไปวางบนภาชนะที่ใส่เดิม

2.5 นำไปอบให้แห้งในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 103-105 °C นานประมาณ 1 ชม. ทำให้เย็นใน dessicatorแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก สมมติได้ = D

$$\text{SS, mg/l} = \frac{(D-C)\times 10^6}{\text{ml sample}}$$

3. Dissolved Solids (DS)

สามารถหาได้โดย การคำนวณ DS = TS − TSS

4. Total Volatile Solids (TVS)

4.1 นำถ้วยกระเบื้องหลังจากหา TS แล้วมาเผาใน muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550°C จนได้เป็นเถ้าสีขาว ลดอุณหภูมิของถ้วยกระเบื้องลงโดยนำออกจากเตาเผาไปใส่ในตู้อบก่อน แล้วจึงนำไปทำให้เย็นในตู้ดูดความชื้น

4.2 นำไปชั่งน้ำหนักสมมติได้ = E

$$\text{TVS, mg/l} = \frac{(B-E) \times 10^6}{\text{ml sample}}$$

$$\text{FS, mg/l} = \text{TS} - \text{TVS}$$

3. กรดไขมันระเหยง่ายและความเป็นด่าง (VFA and Alkalinity)

โดยวิธี Titration Method

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดพีเอช
2. บิวเรต25 ml
3. เตาไฟฟ้าและเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Hot plate and stirrer)
4. บีกเกอร์10 ml

สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.02 N
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 002 N

วิธีวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่าง 50 ml ที่ผ่านการเหวี่ยง centrifuge รินเฉพาะส่วนใส ตวงใส่บีกเกอร์ใบละ 50 ml
2. นำมาไทเทรตด้วยกรดซัลฟิวริก 0.02 N จนมีพีเอช เท่ากับ 4.5 บันทึกปริมาตรที่ใช้ แล้วไทเทรตต่อเท่ากับพีเอชเป็น 3
3. นำไปต้มให้เดือด ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วไทเทรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.02 N จนพีเอช เท่ากับ 4 จดปริมาตรเริ่มต้น ไทเทรตต่อจนพีเอชเท่ากับ 7 จดปริมาตรสิ้นสุด

การคำนวณ VFA (mg $CaCO_3$/L) = $\frac{A \times N \times 50,000}{Ml\ ของตัวอย่างน้ำ}$

เมื่อ A = ml ของ NaOHที่ใช้

N = normality ของ NaOH

การคำนวณ Alkalinity, mg/l $CaCO_3$ = $\frac{A \times N \times 50,000}{ml\ ของตัวอย่างน้ำ}$

เมื่อ A = ml ของกรดมาตรฐานที่ใช้

N = normality ของกรดมาตรฐาน

4. การวิเคราะห์ Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)

ไนโตรเจน (Nitrogen) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด มีความสำคัญต่อการสังเคราะห์โปรตีน หากพบว่าไนโตรเจนในแหล่งน้ำมากเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหา Euthrophicationซึ่งมีพืชน้ำมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เกิดปัญหามลพิษทางน้ำตามมา ปริมาณไนโตรเจนที่พบในน้ำ มีอยู่หลายแบบ ได้แก่ ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen) ไนโตรเจนที่อยู่ในอินทรีย์หรือออร์แกนิก-ไนโตรเจน (Organic Nitrogen) ไนไตรท์-ไนโตรเจน (Nitrate-nitrogen) และก๊าซไนโตรเจน (N_2)

TKN หมายถึง ผลบวกระหว่าง Organic Nitrogen และ Ammonia Nitrogen (TKN= NH_3-N+Organic N) ที่มีอยู่ในโปรตีนของพืชหรือสัตว์ หรือที่เกิดจากกระบวนการสิ่งมีชีวิต เช่น เกิดจากการขับถ่ายของเสีย โดยในปัสสาวะจะยูเรีย ซึ่งยูเรียจะมีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย เป็นต้น การวิเคราะห์ไนโตรเจนด้วย วิธี Kjeldahl Method จะได้ผลรวมของ Organic Nitrogen และ Ammonia Nitrogen โดยหากต้องการปริมาณของ Organic Nitrogen เพียงอย่างเดียวต้องทำ การวิเคราะห์แอมโมเนียออกไปจากตัวอย่างของน้ำ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Kjeldahl ซึ่งค่าที่ได้นี้จะเป็นปริมาณ Organic Nitrogen

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดเครื่องย่อยสลาย (digestion apparatus) ประกอบด้วย Kjeldahl Method ขนาด 800 ml และอุปกรณ์ทำความร้อนที่ให้ความร้อนได้ถึง 365-370°C (การ digestion ต้องทำในตู้ที่ดูดควันที่มีอุปกรณ์สำหรับดักไอกรนที่เกิดขึ้นจากการ digestion)
2. ชุดเครื่องกลั่นหา แอมโมเนีย (ammonia)
3. ขวดวัดปริมาตร (volumetric flasks)
4. ปิเปต(pipets)
5. กระบอกตวง (Cylinder)

6. ขดรูปชมพู่ (flask)

สารเคมี

1. น้ำกลั่นที่ปราศจาก แอมโมเนีย (ammonia)

2. สารละลายผสมอินดิเคเตอร์(indicator)

ชั่งสาร Methyl red มา 200 mg นำมาละลายใน ethyl alcohol 95% จำนวน 100 ml ชั่งสาร Methyl blue มา 100 mg นำมาละลายใน ethyl alcohol 95% จำนวน 50 ml นำสารละลายผสมให้เข้ากันสารละลายผสมนี้มีอายุ การใช้งาน 1 เดือน

3. สารละลายIndicating Boric Acid

ชั่งสาร boric acid (H_3BO_3) จำนวน 20 g ในน้ำกลั่น เติมสารละลายผสม Indicator จำนวน 10 ml แล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

4. กรด H_2SO_4เข้มข้น

5. สาร Potassium Sulfate (K_2SO_4)

6. สารละลาย Copper Sulfate ($CuSO_4$)

ชั่งสาร $CuSO_4$ จำนวน 25.115 g นำมาละลายในน้ำกลั่นแล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

7. สารละลาย Sodium Hydroxide (NaOH) + Sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$)

นำสาร NaOHจำนวน 500 g และ $Na_2S_2O_3$จำนวน 25 g ละลายในน้ำกลั่นแล้วเติมน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

8. สารละลาย Glutamic acid (1,000 mg/l = 95.14 mg N/l)

อบสาร Glutamic acid ที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นในตู้ดูดความชื้น ชั่งสารมา 1.000 g ใส่ใน volumetric flask ขนาด 1 L เติมน้ำกลั่นให้ได้ 1,000 ml สารละลายนี้เก็บไว้ในตู้เย็นได้นาน 3 สัปดาห์

9. สารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 1 N

นำกรด H_2SO_4เข้มข้น มา 28 ml เจือจางให้ได้ 1,000 ml ด้วยน้ำกลั่น

10. สารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 0.02 N

นำสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 1 N มา 20 ml เจือจางให้ได้ 1,000 ml ด้วยน้ำกลั่น

การ Standardize สารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 0.02 N

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน Sodium Carbonate โดยอบสาร Na_2CO_3ที่ 250°C เป็นเวลา 4 ชม. นำมา 0.025 g เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 ml สารละลายนี้เก็บได้นาน 1 สัปดาห์

2. นำสารละลาย Sodium Carbonate ที่เตรียมได้มา 10 ml เจือจางให้ได้ 200 ml ด้วยน้ำกลั่น

3. เติมสารละลาย Indicating Boric Acid จำนวน 50 ml แล้วนำไป ไตรเตรทด้วยสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4 0.02 N

11. สารละลาย Borate Buffer

นำสารละลาย 0.025 M $Na_2B_4O_7$ (9.5 g ของ $Na_2B_4O_7 \times 10H_2O$/L) มา 500 ml เติม 0.1 N NaOHจำนวน 88 ml แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 ml

การเตรียมเครื่องมือกลั่น

1. นำ Kjeldahl Flask ขนาด 800 ml เติมเม็ดบีทประมาณ 5-7 เม็ด

2. นำน้ำกลั่นที่ปราศจากแอมโมเนีย 500 ml

3. เติมสารละลาย Borate Buffer 20 ml แล้วปรับ pH ให้ได้ 9.5 ด้วยสารละลาย NaOH 6 N

4. นำไปกลั่นล้างชุดกลั่นจนกระทั่งปราศจาก Ammonia

5. ปล่อยให้ Kjeldahl Flask คงสภาพเดิมหลังจากกลั่นเสร็จแล้วจนกว่าจะเริ่มทำการกลั่นตัวอย่างจึงถอด Kjeldahl Flask ออกและเปลี่ยน Kjeldahl Flask ที่มีตัวอย่างแทนที่

วิธีวิเคราะห์

การเตรียมตัวอย่าง

1. ใส่ glass beads 3-4 เม็ด ลงใน Kjeldahl Flask ขนาด 800 ml แล้วเติมสาร K_2SO_4ปริมาณ 6.7 g

2. เติมตัวอย่างในปริมาณที่เหมาะสมตามตารางข้างล่าง

ตาราง ก-2 ปริมาณตัวอย่างที่ต้องใช้

อินทรีย์ไนโตรเจนในตัวอย่าง (mL/L)	ปริมาณตัวอย่าง (mL)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50
50-100	25

3. เจือจางน้ำตัวอย่างให้ได้ 300 mL

4. เติมสารละลาย $CuSO_4$ 10 mL

5. เติมกรด H_2SO_4เข้มข้น 10 mL เขย่า Kjeldahl Flask ให้สารเข้ากัน

6. นำไปต้มให้เหลือปริมาตรประมาณ 10-20 mL ในการต้มเมื่อน้ำระเหยไปหมดแล้วจะมีควันขาวขุ่นเกิดขึ้นให้ต้มต่อไปอีก 30 นาที ตัวอย่างที่มีสีขุ่นจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนหรือใสจึงปิดเตาทิ้งให้เย็น

7. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 300 mL

8. เติมสารละลาย NaOH-$Na_2S_2O_3$จำนวน 50 mL

9. นำ Kjeldahl Flask ที่มีตัวอย่างไปประกอบกับชุดกลั่น แกว่งขวดให้สารละลายเข้ากัน กลั่นโดยเก็บน้ำส่วนที่กลั่นได้อย่างน้อย 200 mL ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 mL ซึ่งมีสารละลาย Indicating Boric Acid อยู่ 50 mL รวมปริมาตรทั้งหมดที่จะได้เป็น 250 mL และให้ปลายของแท่งแก้วที่นำน้ำที่กลั่นได้ จุ่มอยู่ในสารละลาย Indicating Boric Acid

10. นำส่วนที่กลั่นได้ไป ไตรเตรท (titrate) หาค่า Ammonia ด้วยสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4จนกระทั่งสีเปลี่ยนเป็นสีม่วงอ่อน โดยใช้น้ำกลั่น 200 mL ผสมกับ Indicating Boric Acid อยู่ 50 mL เป็นตัวเทียบสีจุดสิ้นสุด

11. ให้ทำ Blank โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างและวิเคราะห์เหมือนกับตัวอย่างทุกขั้นตอน

การคำนวณ

$$\text{Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), mg/l} = \frac{(A-B)\times 14{,}000\times N}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง, mL}}$$

A = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4ที่ใช้สำหรับตัวอย่าง (ml)

B = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4ที่ใช้สำหรับ Blank (ml)

C = Normality ของสารละลายมาตรฐาน H_2SO_4

5. ปริมาณความชื้น (Moisture content)

หาปริมาณความชื้นเริ่มต้นโดยวิธีอบในตู้อบ 103-105°C

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตาอบไฟฟ้า
2. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด
3. ถ้วยกระเบื้อง

วิธีวิเคราะห์

1. นำถ้วยกระเบื้องไปอบที่ 105 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปใส่ในตู้ดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็น
2. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องเริ่มต้น นำตัวอย่างมาใส่แล้วชั่งน้ำหนัก
3. นำไปอบที่ ประมาณ 24 ชั่วโมง
4. นำออกจากตู้อบ แล้วใส่ในตู้ดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่หายไป บันทึกผล
5. คำนวณหาความชื้นในตัวอย่าง

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

6. วิธีวิเคราะห์อินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

การประยุกต์ใช้หลักการของ Walkley and Blank โดยย่อยตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์ด้วยกรดซัลฟูริก แล้วทำการออกซิไดซ์อินทรีย์คาร์บอนในปุ๋ยอินทรีย์ด้วยกรดโครมิกที่มากเกินพอ จากนั้นไทเทรดกรดโครมิกที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาด้วยสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ผลวิเคราะห์ที่ได้จะมีค่าเป็น 77 เปอร์เซ็นต์ของอินทรีย์คาร์บอนที่มีอยู่จริง โดยปริมาณของอินทรีคาร์บอนจะคิดเป็น 58 เปอร์เซ็นของอินทรีย์วัตถุ เมื่อเปรียบเทียบกับการหาปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอย่างละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. Burette ขนาด 50 มิลลิลิตร
3. เครื่องแก้ว และวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ในการปฏิบัติการวิเคราะห์

สารเคมี

1. Ferrous sulfate($FeSO_4.7H_2O$) หรือ Ammonium Ferrous
2. sulfate ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$), AR grade
3. O-phenanthroline indicator ($C_{18}H_8N_2.H_2O$),SO_4AR grade
4. Potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$), AR grade
5. sulfuric acid 98% (H_2SO_4), AR grade
6. Siversulfate($Ag_2\ SO_4$), AR grade

วิธีการ

การเตรียม Reagent

1. สารละลายมาตรฐาน Potassium dichromate (Oxidizing agent) I N

ชั่งPotassium dichromate ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 °Cนาน 2 ชั่วโมง จำนวน 49.0247 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร คนให้ละลายหมด ถ่ายและล้างใส่ Volumetric flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน

2. สารละลาย Ferrous sulfate (Reducing agent) 0.5 N

ชั่ง Ferrous sulfate จำนวน 139.0085 กรัม ใส่ใน (หรือใช้ Ammonium Ferroussulfate จำนวน 196.07 กรัม) ใส่ใน Beakerขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 600 มิลลิลิตร คนให้ละลายหมด ถ่ายและล้างใส่ Volumetric flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร

เติม 98% H_2SO_4 20 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

3. สารละลาย O-phenanthroline Ferrous sulfateindicator

ชั่ง O-phenanthroline จำนวน 0.74 กรัม และ Ferrous sulfate จำนวน 0.35 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร คนจนละลายหมด

4. สารละลาย Siversulfate ใน 98% H_2SO_4

ชั่ง Siversulfate จำนวน 15 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 2000 มิลลิลิตร เติม 98% $H_2SO_4$1 ลิตร คนให้เข้ากัน

การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

1. ชั่งตัวอย่างปุ๋ยจำนวน 0.1xxx กรัม ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร

2. ปิเปตสารละลาย Potassium dichromate ปริมาณ 10 มิลลิลิตร เติมลงไปในตัวอย่างปุ๋ย (ข้อ 1)

3. เติม 98% H_2SO_4 หรือสารละลาย Siversulfate ใน 98% H_2SO_4 (กรณีที่ตัวอย่างมี Chloride (CI)) ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ลงไปในตัวอย่างปุ๋ย (ข้อ 2) อย่างช้าๆ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดควัน 16 ชั่วโมง

4. เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมสารละลาย O-phenanthroline Ferrous sulfate 0.5 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

นำสารละลายตัวอย่างมาไทเทรดด้วยสารละลาย Ferrous sulfate จนได้สารละลายสีเขียว และเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นน้ำตาลปนแดง แสดงว่าถึงจุดยุติ บันทึกผล

<u>หมายเหตุ</u> ทำ Blank โดยไม่ใส่ตัวอย่างปุ๋ย เตรียมและวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่างปุ๋ย

การคำนวณ

$$\% \text{ อินทรีย์คาร์บอน(OC)} = \frac{0.3896 \times N \times \text{ml of } K_2CR_2O_7(C-D)}{\text{wt.of sample (g)} \times C}$$

B = ปริมาตรของ $K_2CR_2O_7$ที่เติมลงไปในตัวอย่าง และ Blank (ml)

C = ปริมาตรของ $FeSO_4.7H_2O$ ที่ Titrate พอดีกับ $K_2CR_2O_7$ ใน Blank (ml)

D = ปริมาตรของ $FeSO_4.7H_2O$ ที่ Titrate พอดีกับ $K_2CR_2O_7$ ในตัวอย่าง(ml)

N = ความเข้มข้นเป็น Normal ของสารละลายมาตรฐาน $K_2CR_2O_7$

% อินทรีวัตถุ (OM) = % O.C. x 1.7241 (Equivalent to soil)

ค่า C/N = (% O.C.)/(%TN)

% TN = ปริมาณ Total Nitrogen (%)

<u>หมายเหตุ</u> ในกรณีปุ๋ยต้องทำการวิเคราะห์หาความชื้น 2 ครั้ง ให้คูณปริมาณที่ได้ด้วย Moisture loss factor

7. วิธีวิเคราะห์ไนโตรเจน

ใช้ Kjeldahl method โดยการย่อยตัวอย่างปุ๋ยด้วย H_2SO_4 เข้มข้น และ Salicylic acid มี Potassium sulfteและ Copper sulfteเป็นสารเร่งปฏิกิริยา ทำให้สารละลายเป็นด่างด้วย Sodium hydroxide แล้วนำไปกลั่น ดักจับ Ammonia ที่เกิดขึ้นด้วยกรดบอริก ทำการติเตรทสารละลายที่ได้จากการกลั่นด้วยสารละลายกรดเกลือที่ใช้ในการติเตรท มาคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ตู้อบ (Hot air oven)
3. Macro Kjeldahl digestion and distillation apparatus
4. Burette ขนาด 50 มิลลิลิตร

5. โถดูดความชื้น (Desiccator)

6. เครื่องแก้ว และวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ในการปฏิบัติการวิเคราะห์

สารเคมี

1. Boric acid (H_2BO_3), AR grade

2. Copper sulfate ($CuSO_45H_2O$), AR grade

3. Ethyl alcohol 90% (C_2H_5OH), AR grade

4. Methylene blue, AR grade

5. Potassium sulfate (K_2SO_4), AR grade

6. Slaicylic acid ($C_6H_4(OH).COOH$), AR grade

7. Sodium carbonate anhydrous (NA_2CO_3), AR grade

8. Sodiumhydroxide (NaOH), Commercial grade หรือ AR grade

9. Sodium thiosulfate ($NA_2S_2O_3.5H_2O$), AR grade

10. Standard hydrochloric acid (HCI), AR grade

11. Sulfuric acid 98% (H_2SO_4), AR grade

12. Zinc granular), AR grade

วิธีการ

การเตรียม Reagent

1. การละลายกรดบอริก 4%

ชั่ง Boric acid จำนวน 40 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 2000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาณ 500 มิลลิลิตร นำไปต้มจนละลายหมด เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชั่ง Sodiumhydroxide จำนวน 500 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 2000 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่ประมาณ 800 มิลลิลิตร คนให้ละลายหมดในตู้ดูดควัน เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

3. สารละลาย Mixed indicator

3.1 ชั่ง Methyl red จำนวน 0.20 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 200มิลลิลิตร เติม 90% Ethyl alcohol ปริมาณ 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

3.2 ชั่ง Methylene blue จำนวน 0.10 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 200มิลลิลิตร เติม 90% Ethyl alcohol ปริมาณ 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

3.3 นำสารละลายข้อ 3.1 และ 3.2 มาเทรวมกัน แล้วคนให้เข้ากัน

4. Mixed catalyst

ผสม Copper sulfate และ Potassium sulfate ในอัตราส่วน 1:9 โดยน้ำหนัก

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.2 นอร์มอล

ละลาย Standard HCI 1 N จำนวน 1 Ampoule ลงใน Volumetric flask ขนาด 5000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2. การหาค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.2 N (Standardization)

2.1 ชั่ง Sodium carbonate anhydrous ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 0.44xx กรัม ใส่ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 500 มิลลิลิตร

2.2 เติมน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร หยดสารละลาย Mixed indicator 2-3 หยด จะได้สารละลายสีเขียวอ่อน

2.3 นำไปติเตรทกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.2 นอร์มอล จนถึงจุดยุติ จะได้สารละลายสีชมพูม่วง บันทึกผล คำนวณหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ตามสูตร

$$N\ (HCI) = \frac{\text{น้ำหนักของ } N_2CO_3(g) \times 1000 \times \text{Purity ของ } N_2CO_3}{52.99 \times \text{ปริมาตร HCI (ml)} \times 100}$$

สมมูลย์ของ $N_2CO_3 = 52.99$

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์ จำนวน 0.3xxx กรัม ใส่ใน Kjeldahl flask ขนาด 800 มิลลิลิตร เติม Salicylic acid จำนวน 2 กรัม เติม 98% H_2SO_4 และ Sodium thiosulfate จำนวน 5 กรัม

2. นำไปตั้งบนเตาสำหรับย่อยตัวอย่าง ทำการย่อยตัวอย่างโดยใช้ไฟปานกลาง จนกระทั่งได้สารละลายสีน้ำตาล ปิดไป และตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

3. เติม Mixedcatalyst จำนวน 10 กรัม และทำการย่อยอีกครั้ง จนได้สารละลายสีเขียวใส ปิดไป ตั้งไว้ให้เย็น

4. เติมน้ำกลั่น 350 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลาย NaOHปริมาณ 100 มิลลิลิตร และ Zinc granular จำนวน 5 กรัม

5. นำ Kjeldahl flask ต่อกับเครื่องกลั่น โดยให้ปลายเครื่องกลั่นจุ่มอยู่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายกรดบอริก 100 มิลลิลิตร และสารละลาย Mixed indicator ปริมาณ 4-5 หยด

6. ทำการกลั่นจนได้ปริมาตรของสารละลายใน Erlenmeyer flask ข้อ 5 ปริมาณ 350 มิลลิลิตร

7. นำสารละลายที่ได้ไปติเตรทกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก มาตรฐาน 0.2N บันทึกผล

8. ทำ Blank โดยไม่ใส่ตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับตัวอย่าง

คำนวณ

$$\%\text{Total N} = \frac{\text{N(HCl) x \{m\}(HCl)-ml(Blank)\} x 1.40067}}{\text{Wt. of sample(g)}}$$

<u>หมายเหตุ</u> ในกรณีปุ๋ยต้องทำการวิเคราะห์หาความชื้น 2 ครั้ง ให้คูณปริมาณที่ได้ด้วย Moisture loss factor

8. วิธีวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตทั้งหมด

วิเคราะห์โดย Spectrophotometric molybdovanadophosphate method ใช้กรดผสม ($HClO_4$:HNO_3=1:1) ในการย่อยตัวอย่างเพื่อให้ฟอสฟอรัสในตัวอย่างปุ๋ยอยู่ในรูปสารละลายฟอสเฟต จากนั้นทำให้เกิดสีกับ Molybdovanadate reagent วัดหาปริมาณฟอสฟอรัสด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400-420 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส

เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอย่างละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. Spectrophotometer
3. เตาระเหยความร้อน (Hot plate) หรือ Digestion block พร้อม tube
4. เครื่องแก้วและวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ในการปฏิบัติการวิเคราะห์

สารเคมี

1. Ammonium molybdate[$(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$], AR grade
2. Ammonium metavanadate(NH_4VO_3), AR grade
3. Nitric acid 69-70% (HNO_3), AR grade
4. Perchloric acid 69-70% ($NClO_4$), AR grade
5. Potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4), AR grade

วิธีการ

การเตรียม Reagent

1. กรดผสม HNO_3:$NCIO_4$อัตรา 1:1

ผสม 69-70%HNO_3กับ $NCIO_4$

ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

1.1 Molybdvanadate reagent

1) ชั่ง Ammonium molybdateจำนวน 40 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำร้อน (น้ำกลั่น) ปริมาณ 400 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น

2) ชั่ง Ammonium metavanadate ปริมาณ 2 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำร้อน (น้ำกลั่น) ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นเติม 69-70%$NCIO_4$ปริมาณ 450 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น

3) ค่อย ๆ รินผสมสารละลายAmmonium molybdate ลงในสารละลาย Ammonium metavanadate ใน Volumetric flask ขนาด 2000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เขย่าให้เข้ากัน และถ่ายเก็บไว้ในขวดแก้วสีชา

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1. สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (Standard P) 1000 ppm

ชั่ง KH_4PO_4 ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 2 ชั่วโมง จำนวน 1.0984 กรัม ใส่ใน Volumetric flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2. สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 100 ppm

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 1000 ppm ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร ละลายและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

3. สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 0,1,2,3,4,5,6 และ 7 ppm (Working standard)

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 100 ppm ปริมาณ 0,1,2,3,4,5,6 และ 7 มิลลิลิตร ใส่ Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

1. ชั่งตัวอย่างปุ๋ยจำนวน 0.3xxx-1.xxxxกรัม ใส่ Erlenmetric flask ขนาด 125 มิลลิลิตร หรือใส่ Digestion tube

2. เติมกรดผสม HNO_3:$NCIO_4$ ปริมาณ 20 มิลลิลิตร นำไปย่อยบน Hot plate หรือ Digestion block ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

3. ถ่ายสารละลายตัวอย่าง และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น ใส่ Volumetric flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน กรณีที่เป็นสารละลายมีตะกอนขุ่น นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

วิธีวิเคราะห์

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่างปริมาณ 5 มิลลิลิตร หรือตามความเหมาะสม ตามปริมาณความเข้มข้นของตัวอย่าง ใส่ในVolumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร

2. เติม Molybdovanadate reagent10 มิลลิลิตร (อัตรส่วน 1:10 ของปริมาตร Volumetric flask) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 30 นาที

3. นำ Working standard 0,1,2,3,4,5,6 และ 7 ppmเติม Molybdovanadate reagent10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 30 นาที

4. นำสารละลายตัวอย่าง (ข้อ 2) และWorking standard (ข้อ 3) ไปวัดความเข้มของสีด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร บันทึกค่า Absorbance (A) หรือ Transmittance (%T)

5. หาค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสารละลายตัวอย่างกับกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและค่า A หรือ %T ของ Working standard (Standardcurve)

คำนวณ

$$\%P = \frac{\text{ppm P from standardcurve x dilution factor x 100}}{\text{wt of sample(g) x } 10^6}$$

$$\%P_2O_5 = \frac{\%P \times [(2 \times \text{Atomic wt.of P}) + (5 \times \text{Atomic wt.ofO})]}{2 \times \text{Atomic wt. of P}}$$

<u>หมายเหตุ</u> ในกรณีปุ๋ยต้องทำการวิเคราะห์หาความชื้น 2 ครั้ง ให้คูณปริมาณที่ได้ด้วย Moisture loss factor

9. วิธีวิเคราะห์โพแทชทั้งหมด

วิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมด้วย Flame photometric method โดยวัดความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมา (Intensive of emission) ของตัวอย่างปุ๋ยที่ผ่านการย่อยด้วยกรดผสม เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม

เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอย่างละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. Flame photometer
3. เตาระเหยความร้อน (Hot plate) หรือ Digestion block พร้อม tube
4. เครื่องแก้วและวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ในการปฏิบัติการวิเคราะห์

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 1000 ppm
2. Calcium carbonate ($CaCO_3$), AR grade
3. Hydrochloric acid 36-38% (HCI,conc.), AR grade
4. Nitric acid 69-70%(HNO_3), AR grade
5. Perchloric acid 69-70%($HCIO_4$), AR grade

วิธีการ

การเตรียม Rreagent

1. สารละลาย Suppressor

1.1 ชั่ง $CaCO_3$จำนวน 12.5 กรัม ใส่ใน Beaker ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร เติม 36-38% HCI ปริมาณ 105 มิลลิลิตร ลงไปทีละน้อย

1.2 นำไปต้มพอเดือด ทิ้งไว้ให้เย็น

1.3 เทใส่ Volumetric flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2. กรดผสม กรดผสม HNO_3:$NCIO_4$อัตรา 1:1
ผสม 69-70%HNO_3กับ $NCIO_4$
ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

การตรียมสารละลายพื้นฐาน

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม (Standard K) 100 ppm

ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 1000 ppm ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม 0,3,6,9,12 และ 15 ppm

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 100 ppm ปริมาณ 0,3,6,9,12 และ 15 มิลลิลิตร ใส่ Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลายตัวอย่าง

1. ชั่งตัวอย่างปุ๋ยจำนวน 1.xxxx กรัม ใส่ Erlenmetric flask ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมกรดผสม HNO_3:$NCIO_4$ ปริมาณ 20 มิลลิลิตร นำไปย่อยบน Hot plate หรือ Digestion blockที่อุณหภูมิไม่เกิน 220°Cย่อยจนมีควันขาวเกิดขึ้นเหนือสารละลายหรือสารละลายมีลักษณะสีใส ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30-40 นาที จากนั้นยกลงจาก Hot plate หรือ Digestion block ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

2. ถ่ายสารละลายตัวอย่าง และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น ใส่ Volumetric flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน กรณีที่เป็นสารละลายมีตะกอนขุ่น นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1

วิธีวิเคราะห์

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง ให้มีความเข้มข้นของโพแทสเซียม อยู่ในช่วง 0-15 ppm ใส่ในVolumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตรเติมสารละลาย Suppressor 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2. นำ Working standard 0,3,6,9,12 และ 15 ppm เติม สารละลาย Suppressor 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

3. นำสารละลายตัวอย่าง (ข้อ 1) และWorking standard (ข้อ 2) ไปวัดค่า Intensive of emission ด้วย Flame photometer

4. หาค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของสารละลายตัวอย่างกับกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโพแทสเซียม กับค่า Intensive of emission ของ Working standard (Standardcurve)

คำนวณ

$$\%K = \frac{1.2046 \times \text{ppm K} \times \text{dilution factor} \times 100}{\text{Wt of sample} \times 10^6}$$

<u>หมายเหตุ</u> ในกรณีปุ๋ยต้องทำการวิเคราะห์หาความชื้น 2 ครั้ง ให้คูณปริมาณที่ได้ด้วย Moisture loss factor

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวลลิตา สินไชย

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5410920036

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

ทุนการศึกษา

ทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2555

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Sinchai, L., Suksaroj, T. and Rattanapan, C. 2014. Potential of biogas production from co-digestion of domestic wastewater and food waste at mesophilic condition. *Fifth International institute of engieers and researcr (IIER)* 8th November 2014 Singapore.