ผลของสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จากกากตะกอนปาล์ม
ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก

นางสาวสินิจนันท์ เสียงเสนาะ วท.บ. (เทคโนโลยีชีวภาพ)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2553

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร.พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ)

..... กรรมการ
(ผศ.จารุรัตน์ วรนิสรากุล)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนปาล์ม ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาวสินิจนันท์ เสียงเสนาะ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนปาล์ม ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส) โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ จำนวน 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (R1) อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก และไม่มีการเติมสารอาหารเสริม, ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (R2) อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก และมีการเติมสารอาหารเสริมเฉพาะเหล็ก นิเกิล และโคบอลต์, ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (R3) อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกและมีการเติมสารอาหารเสริมตามสูตรของ Speece และถังปฏิกรณ์ที่ 4 (R4) อุณหภูมิมีโซฟิลิกและไม่มีการเติมสารอาหารเสริม ถังปฏิกรณ์แต่ละถังมีปริมาตรการใช้งาน 2 ลิตร ระยะเวลากักเก็บน้ำ 10 วัน และเดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 0.5 – 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้ตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นที่มีความเข้มข้นในรูปของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร การประเมินผลทำโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองพบว่า ที่ภาระสารอินทรีย์ในช่วง 0.5 ถึง 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ R1 - R4 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 90 และที่ภาระสารอินทรีย์ที่ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ R1 - R4 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.69, 0.68, 0.79 และ 0.61 ลิตรต่อลิตรต่อวัน และมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนร้อยละ 54.30, 57.77, 60.22 และ 50.69 ตามลำดับ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกและมีการเติมสารอาหารเสริม Speece มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 190 วัน ผลการตรวจสอบค่าความจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์ (SMA) พบว่าถังปฏิกรณ์ R3 มีค่า SMA สูงขึ้นเล็กน้อย

คำสำคัญ : กากตะกอนปาล์ม / มีโซฟิลิก / เทอร์โมฟิลิก / แอนแอโรบิกเอสบีอาร์ / สารอาหารเสริม

Thesis Title	Effect of Supplementary Nutrients on Biogas Production of Decanter Cake from Palm Oil Mill Industry at Thermophilic Condition
Thesis Credit	12
Candidate	Miss Sinitnun Seingsanor
Thesis Advisor	Dr.Saroch Boonyakitsombut
Program	Master of Engineering
Field of Study	Environmental Engineering
Department	Environmental Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2553

Abstract

The objective of this research was to study the effect of supplementary nutrients on biogas production of decanted cake from palm oil mill industry at thermophilic temperature (55°C). Four lab-scale anaerobic sequencing batch reactors were used in this investigation; namely, thermophilic temperature without nutrient supplementation (R1), thermophilic temperature with Fe, Ni and Co supplementation (R2), thermophilic temperature with Speece's formula supplementation (R3) and mesophilic temperature without nutrient supplementation (R4). Each reactor had a working volume of 2 liters, hydraulic retention time of 10 days and was operated at organic loading rate of 0.5 – 3 kg COD/m^3.d. The seed sludge had TVS concentration of 10,000 mg/l. The reactor performance was evaluated in terms of COD removal, biogas production rate and methane production rate. When the organic loading rate was controlled in a range of 0.5-3 kg COD/m^3.d, the results showed that all reactors had COD removal of higher than 90 percent. At organic loading rate of 3 kg COD/m^3.d, R1 - R4 had biogas production rates of 0.69, 0.68, 0.79 and 0.61 L/L-d with the methane content of 54.30, 57.77, 60.22 and 50.69 percent, respectively. The results showed that supplementary nutrients and thermophilic temperature significantly affected biogas production. After 190 days of operation, the quality of bacteria in terms of Specific Methanogenic Activity (SMA) in thermophilic with Speece's formula supplementation reactor (R3) increased slightly.

Keywords : Supplementary nutrient / Thermophilic / Mesophilic / Decanter cake / Anaerobic SBR

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างยิ่ง ที่ให้แนวคิด คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และให้คำปรึกษา รวมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และผศ.จารุรัตน์ วรนิสรากุล ในการให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางรวมทั้งข้อเสนอในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย-ศูนย์เครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณจงกลนี ประดิษฐ์พงษ์ และคุณพิระดา ว่องเกษฎา เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำหรับการอำนวยความสะดวก แนะนำการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ขอขอบพระคุณ คุณเด่นใจ โพธิ์ทอง และ คุณนวลจันทร์ เลาหศิริชัยกูล เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิชาการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่อำนวยความสะดวกด้านต่าง ๆ ขอขอบคุณ คุณวลัยรัตน์ มาลัยหอม และ คุณอมรรัตน์ บุญมี ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ ขอขอบคุณเพื่อนที่ช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ซ
รายการรูปประกอบ	ญ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฏ

บทที่

1. บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**3**
2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ	3
2.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ	4
2.3 กลไกลการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน	6
2.4 สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ	8
2.5 ระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์	12
2.6 ข้อดีของระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์	13
2.7 หลักการทำงานของระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์	14
2.8 บทบาทของธาตุอาหารเสริมที่มีต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศ	15
2.9 ปาล์มน้ำมัน	17
2.10 บีเอ็มพี	21
2.11 เอสเอ็มเอ	21
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22

3. แผนการดำเนินงานวิจัย **25**

3.1 แผนการทดลอง 25

3.2 ตะกอนหัวเชื้อ 26

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ 26

3.4 อาหารเสริม 28

3.5 พารามิเตอร์ในการทดลองและวิธีการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง 29

3.6 การดำเนินการในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ 30

3.7 การศึกษาถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากการตะกอนปาล์มโดยวิธีบีเอ็มพี 31

3.8 การศึกษาความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์โดยวิธีเอสเอ็มเอ 31

4. ผลการทดลอง **32**

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของกากตะกอนปาล์ม 32

4.2 ผลการทดลองบีเอ็มพี 33

4.3 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์มโดยระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ 34

4.4 ปัจจัยที่ควบคุมการทำงานของจุลินทรีย์ 45

4.5 ประสิทธิภาพในการกักเก็บจุลินทรีย์ในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ 52

4.6 ผลการทดลองหาค่าความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนหรือเอ็สเอ็มเอ 56

4.7 การเปรียบเทียบงานวิจัยกับงานวิจัยอื่น 60

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ **63**

5.1 สรุปผลการทดลอง 63

5.2 ข้อเสนอแนะ 64

เอกสารอ้างอิง **65**

ภาคผนวก

ก รายการคำนวณ 68

ข ข้อมูลจากการทดลอง 72

ประวัติผู้วิจัย **109**

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 3

2.2 สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการหมักก๊าซมีเทนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 9

2.3 ปริมาณของกรดไขมันอิสระชนิดต่าง ๆ ในน้ำมันปาล์มดิบ 19

2.4 ปริมาณสารต่าง ๆ ในน้ำมันปาล์ม 19

3.1 ระยะเวลาในการดำเนินงาน 25

3.2 คุณลักษณะของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง 26

3.3 ปริมาณสารอาหารที่เติมให้กับแบคทีเรียในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ 28

3.4 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ 29

3.5 การดำเนินการในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่แต่ละภาระสารอินทรีย์ 30

3.6 การควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการทดลอง 30

4.1 ลักษณะของกากตะกอนปาล์ม 32

4.2 ผลการทดลองของการทดลองบีเอ็มพี 33

4.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ณ ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัว 38

4.4 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ณ ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัว 38

4.5 ประสิทธิภาพของระบบโดยคำนวณจากปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว 41

4.6 ค่ากรดไขมันระเหยและสภาพด่างของแต่ละถังปฏิกรณ์ที่สภาวะคงตัว 46

4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัสทั้งหมด 50

4.8 ค่าของแข็งแขวนลอย, ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย และอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยต่อค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยแต่ละถังปฏิกรณ์ ณ ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ 56

4.9 สัดส่วนของก๊าซมีเทนจากการทดลองหาค่าเอสเอ็มเอของตะกอนจุลินทรีย์ 57

4.10 ค่าความสามารถจำเพาะของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนก่อนการทดลองโดยใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหาร 58

4.11 ค่าความสามารถจำเพาะของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนหลังสิ้นสุดการทดลองโดยใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหาร 58

4.12 ค่าความสามารถจำเพาะของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนก่อนการทดลองโดยใช้กากตะกอนปาล์มเป็นสารอาหาร 59

4.13 ค่าความสามารถจำเพาะของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนหลังสิ้นสุดการทดลองโดยใช้กากตะกอนปาล์มเป็นสารอาหาร 60
ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ 73
ข.2 ค่าพีเอชที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ 79
ข.3 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 1 85
ข.4 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 2 87
ข.5 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 3 89
ข.6 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 4 91
ข.7 ของแข็งแขวนลอย, ของแข็งแขวนลอยละเหยในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 93
ข.8 ของแข็งแขวนลอย, ของแข็งแขวนลอยละเหยในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 95
ข.9 อัลคาไลนิตี้, วีเอฟเอ ในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 97
ข.10 อัลคาไลนิตี้, วีเอฟเอ ในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 99
ข.11 ทีเคเอ็นน้ำเข้าและทีเคเอ็นน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 101
ข.12 ทีเคเอ็นน้ำเข้าและทีเคเอ็นน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 103
ข.13 ฟอสฟอรัสทั้งหมดน้ำเข้าและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 105
ข.14 ฟอสฟอรัสทั้งหมดน้ำเข้าและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 107

รายการรูปประกอบ

รูป **หน้า**

2.1 ปฏิกิริยาชีวเคมีของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน 6

2.2 การเดินระบบในถังปฏิกรณ์แบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ 15

3.1 แสดงทิศทางการไหลของถังปฏิกรณ์ระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ 27

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและอุปกรณ์วัดก๊าซชีวภาพ 27

4.1 การเปรียบเทียบค่าบีเอ็มพีของการทดลองที่อุณหภูมิมีโซฟิลิก, เทอร์โมฟิลิก และค่าทางทฤษฎี 34

4.2 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพในแต่ละวันที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ 35

4.3 ปริมาณการผลิตมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ (คำนวณ) 36

4.4 ประสิทธิภาพของระบบโดยคำนวณจากปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น 40

4.5 ค่าซีโอดีของน้ำเข้า, ซีโอดีน้ำออก (กรอง), ร้อยละการกำจัดซีโอดีที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ 44

4.6 ค่าพีเอชแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ 45

4.7 ปริมาณกรดไขมันระเหยและความเป็นด่างที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ 48

4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อความเป็นด่างทั้งหมดที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ 49

4.9 เปอร์เซ็นต์การกำจัดของไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัสทั้งหมด 51

4.10 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ 54

4.11 ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยต่อของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ 55

ประมวลศัพท์และคำย่อ

มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
$AlCl_3.6H_2O$	=	Aluminium chloride, 6 - hydrate
AnSBR	=	Anaerobic Sequencing Batch Reactor
BMP	=	Biochemical Methane Potential
BOD	=	Bilogical Oxygen Demand
$C_6H_{12}O_6$	=	Glucose
$CaCl_2.2H_2O$	=	Calcium chloride dihydrate
CH_4	=	Methane
CO_2	=	Carbon dioxide
$CoCl_2.6H_2O$	=	Cobalt chloride, 6 – hydrate
COD	=	Chemical Oxygen Demand
$CuCl_2.2H_2O$	=	Copper (II) chloride dihydrate
d	=	Day
$FeCl_2.4H_2O$	=	Ferrous chloride, 4 – hydrate
g	=	Gram
H_2S	=	Hydrogen sulfide
H_3BO_3	=	Boric acid
HRT	=	Hydraulic Retention Time
KCl	=	Potassium chloride
KI	=	Potassium iodide
L	=	Liter
mg	=	Milligram
$MgSO_4.7H_2O$	=	Magnesium sulfate, 7 - hydrate
$MnCl_2.4H_2O$	=	Manganese (II) chloride, 4 - hydrate
$(NaPO_3)_6$	=	Sodium hexametaphosphate
$Na_2S.9H_2O$	=	Sodium sulfate, 9 – hydrate

Na_2SeO_4	=	Sodium selenate
$NaMoO_4.2H_2O$	=	Sodium molybdate dihydrate
$NaWO_4.2H_2O$	=	Sodium tungstate dihydrate
NH_4Cl	=	Ammonium chloride
$(NH_4)_2HPO_4$	=	Ammonium iron (II) hydrogen phosphate
NH_4VO_3	=	Ammonium metavanadate
$NiCl_2.6H_2O$	=	Nickel (II) chloride, 6 – hydrate
OLR	=	Organic Loading Rate
SMA	=	Specific Methanogenic Activity
SS	=	Suspended Solids
TKN	=	Total Kjeldahl Nitrogen
TP	=	Total Phosphorus
VFA	=	Volatile Fatty Acid
VSS	=	Volatile Suspended Solids
$ZnCl_2$	=	Zinc chloride

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

สืบเนื่องจากวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันที่มีความผันผวน ทำให้ต้นทุนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมสูงขึ้น เกิดผลกระทบต่อผู้บริโภค เป็นเหตุให้มีการตื่นตัวในการหาทางออกเกี่ยวกับเชื้อเพลิงอื่น ซึ่งการใช้พลังงานทดแทนถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งพลังงานทดแทนมีหลายประเภท แต่ที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในขณะนี้คือก๊าซชีวภาพ เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงจากพลังงานฟอสซิลที่กำลังจะหมดไป ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดจากการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เพื่อให้ได้ผลพลอยได้จากการบำบัดเป็นก๊าซชีวภาพ แต่ในปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ อาจเป็นเรื่องรองจากการที่จะผลิตก๊าซชีวภาพให้ได้ปริมาณมากเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยในภาคอุตสาหกรรมบางประเภทมีความพร้อมทั้งด้านการลงทุนและคุณภาพของน้ำเสียนั้น

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย นิยมปลูกมากในภาคใต้ของประเทศไทย เช่น กระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร และสตูล โดยได้ผลผลิตเป็น ทะลายปาล์มสด 4.5 ล้านตัน/ปี และมีแนวโน้มว่าพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยปีละ 5% [1] ซึ่งทะลายปาล์มสดที่ได้นั้น นำมาเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมันปาล์ม โดยจะสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากทะลายปาล์มสด กะลาปาล์ม ใยปาล์ม และทะลายเปล่า ซึ่งในกระบวนการผลิตนั้นจะมีเศษวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตทั้งในรูปของทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม ตะกอน และน้ำเสีย ได้สร้างปัญหาในด้านมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนใกล้เคียง อีกทั้งยังกลายเป็นรายจ่ายส่วนเกินที่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการนำเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย รวมถึงกากตะกอนของเสียเข้ามาช่วยลดปริมาณสารอินทรีย์ และระบบบำบัดแบบไร้อากาศจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในกระบวนการบำบัด

ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จึงเน้นการใช้กากตะกอนปาล์มที่เหลือจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มไปผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มมูลค่าของเหลือใช้โดยกระบวนการแบบไร้อากาศ โดยเน้นการศึกษาผลของการเติมสารอาหารเสริมและอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก โดยการทดลองนี้จะทำการทดลองที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบบำบัดแบบไร้อากาศจากกากตะกอนปาล์มจากขั้นตอนการกรองแยกน้ำมันปาล์ม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของการเติมสารอาหารเสริมที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สถานที่ทำการทดลอง	:	ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ (AnSBR) 1 วัฏจักรเท่ากับ 24 ชั่วโมง
ของเสียที่ใช้	:	กากตะกอนปาล์มจากขั้นตอนการกรองแยกน้ำมันปาล์ม
ชนิดของถังปฏิกรณ์	:	ถังปฏิกรณ์มีปริมาตรใช้งาน 2 ลิตร ทั้งหมด 4 ชุด
ตัวแปรต้นในการทดลอง	:	การเติมสารอาหารเสริมตามสูตรของ Speece [2], การเติมสารอาหารเสริมเฉพาะเหล็ก นิเกิลและโคบอลต์และการไม่เติมของสารอาหารเสริม อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ 10 วัน
ตัวแปรตาม	:	ก๊าซชีวภาพ, สัดส่วนมีเทน, พีเอช, ซีโอดี, ของแข็งแขวนลอย, กรดอินทรีย์ระเหยง่าย, ค่าความเป็นด่าง, ค่าทีเคเอ็น, ค่าปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด
ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้	:	เป็นตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสบีในระดับห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 30 และ 55 องศาเซลเซียส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงผลของการเติมสารอาหารเสริมและอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนปาล์ม เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ หรือระบบแอนแอโรบิก เป็นระบบนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศนี้เป็นการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ทำให้ไม่ต้องเติมออกซิเจน ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ และสามารถรับอัตราภาระสารอินทรีย์สูงได้ อีกทั้งยังได้พลังงานได้แก่ ก๊าซมีเทน เป็นต้น ซึ่งก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ในอดีตเข้าใจว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจำเป็นต้องเป็นน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีสูง ๆ แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนารูปแบบของถังปฏิกรณ์ขึ้นเรื่อย ๆ จนสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีต่ำได้ เช่น น้ำเสียจากชุมชน เป็นต้น โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีข้อดีและข้อเสียดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ [3]

ข้อดีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ	ข้อเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ
1. มีตะกอนแบคทีเรียที่ต้องนำไปบำบัดและกำจัดน้อย 2. สลัดจ์ที่ต้องนำไปกำจัดสามารถนำไปรีดน้ำออกได้ง่าย 3. ไม่ต้องใช้สารตัวกลาง ทำให้ค่าใช้จ่าย ลดลง 4. มีความต้องการธาตุอาหารเสริมน้อย เช่น ไนโตรเจน(N), ฟอสฟอรัส(P) เป็นต้น 5. เกิดก๊าซมีเทนซึ่งนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ดี 6. สามารถรับอัตราภาระสารอินทรีย์สูง 7. สามารถเก็บรักษาตะกอนแบคทีเรียในอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียสได้ถึง 1 ปี จึงเป็นระบบที่สามารถใช้กับแหล่งที่มีน้ำเสียเป็นช่วง ๆ ได้	1. ต้องควบคุมพีเอชให้เหมาะสมคือควบคุมสภาพความเป็นด่างให้มีเพียงพอ (Alkalinity) 2. ใช้เวลาในการเริ่มต้นเดินระบบค่อนข้างนาน เนื่องจากแบคทีเรียภายในระบบมีการเจริญเติบโตช้า 3. คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดนี้โดยส่วนมากจะไม่ได้มาตรฐานน้ำทิ้ง (BOD_5 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) 4. ต้องพยายามรักษามวลชีวภาพในระบบให้เหมาะสม และควบคุมการหลุดออกของมวลชีวภาพเนื่องจาก สารพิษ สารยับยั้ง การเจริญเติบโตอาจมีผลกระทบต่อแบคทีเรีย 5. แบคทีเรียโดยเฉพาะพวกที่ผลิตมีเทนมีความสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอชที่แคบประมาณ 6.8 – 7.2

2.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

แบคทีเรียที่มีบทบาทต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ และจำเป็นต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียร่วมกัน ดังนี้

2.2.1 แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน [4]

แบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่สร้างมีเทนนี้มีทั้งแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาด (obligate anaerobes) คือสามารถมีชีวิตอยู่ได้ในสภาวะไร้ออกซิเจน และพวกที่ใช้ออกซิเจนได้บ้าง (facultative anaerobes) คือสามารถมีชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน มีจำนวนมากกว่าแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาดหลายสิบเท่า โดยพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เป็นไฮโดรเจนที่มีความสำคัญต่อแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มคือแบคทีเรียที่สร้างกรด และแบคทีเรียที่สร้างมีเทน เจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 4.0 – 6.5 มีอัตราการเจริญเติบโตและทนต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้สูง สามารถแบ่งกลุ่มของแบคทีเรียได้ 2 กลุ่มดังนี้

2.2.1.1 แบคทีเรียสร้างกรด

เป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ใหญ่ที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ และสามารถใช้สารอาหารได้หลายชนิดจึงมีอัตราการเจริญเติบโตสูง โดยจะปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Soluble organic matter) และกรดอินทรีย์ (Organic acid) ไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFA) ซึ่งได้แก่พวก กรดอะซิติก, กรดบิวทีริก, กรดโพรไพออนิก, กรดฟอร์มิก ฯลฯ นอกจากนี้ยังได้แอลกอฮอล์, คีโตน, คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน

2.2.1.2 แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก

แบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนสารประกอบที่ยังเป็นโมเลกุลใหญ่ ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจึงต้องมีการเปลี่ยนสารเหล่านี้ให้เป็นสารประกอบอย่างง่ายสำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทนก่อน ซึ่งแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกนี้สามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1. Homoacetogenic Bacteria

แบคทีเรียชนิดนี้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็คตรอนโดยกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผ่านวิธีที่เรียกว่า Acetyl-CoA pathway สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในสภาวะออโทโทรฟิก (autotrophic) คือใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอมและแหล่งคาร์บอน และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็คตรอนเพื่อเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก นอกจากนี้ยังเจริญเติบโตในสภาวะเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic) โดยใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม ในการผลิตกรดอะซิติก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีทั้งบิวทีเรทและอะซิเตท ซึ่งเป็นสารตัวกลางในการผลิตก๊าซมีเทน

2. H_2 - producing acetogenic Bacteria

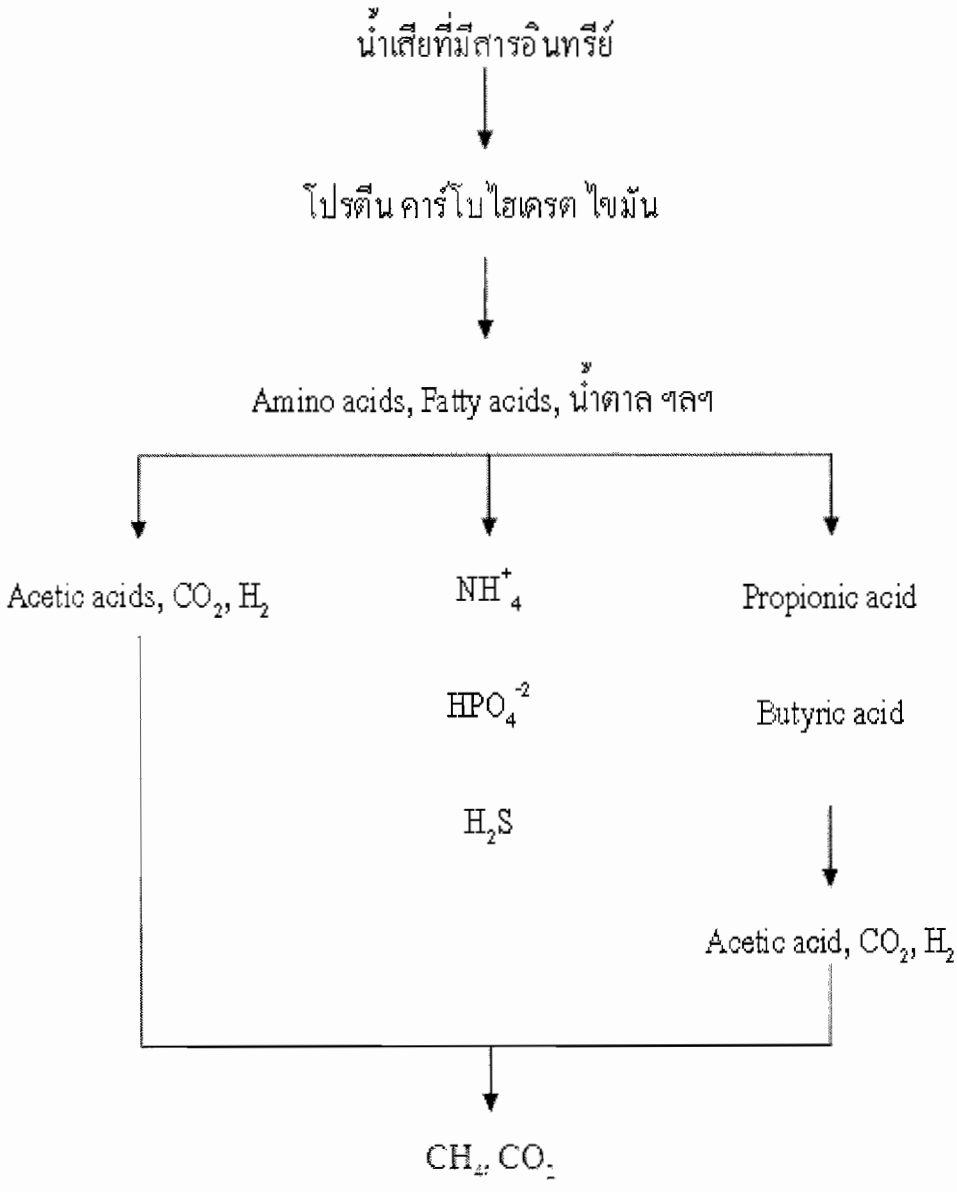
แบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิส ซึ่งได้แก่ แอลกอฮอล์และกรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก) แล้วสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนขึ้นมา ซึ่งเป็นอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทน ดังนั้นแบคทีเรียชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญ เพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดกับแบคทีเรียสร้างมีเทน แต่แบคทีเรียชนิดนี้จะเจริญเติบโตได้ไม่ดีเมื่ออยู่ตามลำพัง เพราะก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมามีการสะสมจะทำให้มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง ทำให้กระบวนการสร้างกรดอะซิติกไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้น การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและสร้างมีเทนให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน เพราะต่างก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้เมื่ออยู่เพียงลำพัง นั่นคือ แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะสร้างอาหารให้แบคทีเรียที่สร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนก็ช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้แบคทีเรียที่สร้างกรด

2.2.2 แบคทีเรียที่สร้างมีเทน [4]

แบคทีเรียที่สร้างมีเทนมีการเจริญเติบโตอย่างช้าๆ และเป็นกลุ่มที่มีการเลือกชนิดของอาหารมากและยังเป็นกลุ่มที่บอบบาง เช่น เจริญเติบโตได้ไม่ดีเมื่ออยู่ในช่วงพีเอชไม่เหมาะสม (พีเอชที่เหมาะสมระหว่าง 6.8 – 7.2) โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้ส่วนมากเป็นพวก Obligate Anaerobic Bacteria คือ เจริญเติบโตได้ในสภาวะไม่ใช้อากาศเท่านั้น แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรก คือ Acetrophic Methanogens เป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ย่อยสลายกรดอะซิติก สารอินทรีย์โมเลกุลเล็กไปเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกกลุ่มหนึ่ง คือ Hydrogentrophic Methanogens เป็นแบคทีเรียกลุ่มที่เปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนไปเป็นก๊าซมีเทน

2.3 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation) – รีดักชั่น (reduction) หรือปฏิกิริยารีด็อก (REDOX) โดยที่สารอินทรีย์จะเป็นสารให้อิเล็คตรอน ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นสารรับอิเล็คตรอนตัวสุดท้าย ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีปฏิกิริยาชีวเคมีที่ซับซ้อนกว่าระบบใช้ออกซิเจน โดยที่ปฏิกิริยาชีวเคมีของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 และ กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมี 4 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาชีวเคมีของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน [3]

2.3.1 ขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ขั้นตอนนี้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ถูกไฮโดรไลซิสให้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง สามารถละลายน้ำ โดยใช้เอนไซม์ที่ขับออกสู่ภายนอกของเซลล์ (Extracellular Enzyme) จากแบคทีเรียหลายกลุ่ม ส่วนใหญ่จะเป็นแบคทีเรียพวกสร้างกรด (Acidogenic Bacteria) โดยที่คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน ตามลำดับ เอนไซม์ที่ขับออกสู่ภายนอกเซลล์นี้ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ในขั้นตอนนี้เพียงแต่ลดขนาดของสารอินทรีย์เท่านั้นยังไม่มีการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

2.3.2 ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาการสร้างกรดอินทรีย์ (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่ละลายน้ำที่เป็นผลจากกระบวนการไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียทั้งประเภทที่ดำรงชีพได้ในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนอิสระ ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานโดยกระบวนการหมัก ผลของกระบวนการนี้จะเกิดกรดระเหยง่าย ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH), กรดโพรไพออนิก (CH_3CH_2COOH), กรดบิวทิริก ($CH_3CH_2CH_2COOH$) เป็นต้น แบคทีเรียพวกนี้เรียกว่า แบคทีเรียสร้างกรด ซึ่งชนิดของแบคทีเรียจะแตกต่างขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์และสภาพแวดล้อม

ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 2H_2$$

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$$

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3CH_2COOH + CH_3COOH + CO_2 + H_2$$

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$$

2.3.3 ขั้นที่ 3 ปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติก (Acitogenesis)

กรดอินทรีย์ระเหยที่มีอะตอมมากกว่า 2 อะตอม ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างกรด เปลี่ยนไปเป็นอะซิเตท ฟอร์เมท ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาสำคัญในการหลีกเลี่ยงการสะสมกรดอินทรีย์ระเหย ซึ่งอาจทำให้ค่าพีเอชลดลงจนยับยั้งกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนได้ แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจเรียกว่าแบคทีเรียสร้างไฮโดรเจน เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ได้แต่ตัวที่สร้างกรดได้อาจไม่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้

ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้

$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$

$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$

2.3.4 ขั้นที่ 4 ปฏิกิริยาการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียพวกสร้างมีเทน จะเปลี่ยนสารประกอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 เป็นก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ซึ่งถ้าระบบมีแบคทีเรีย Methanogens ปริมาณมากพอ และมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี จะได้ก๊าซมีเทนประมาณ 60 – 70% คาร์บอนไดออกไซด์ 20 – 30% และก๊าซอื่น ๆ (H_2 และ N_2) อีกเล็กน้อย โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจะสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศเท่านั้น จึงทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่าจุลินทรีย์สร้างกรด เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีอัตราการเจริญเติบโตที่จำเพาะต่ำ ทำให้ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นช้า แบคทีเรียกลุ่มนี้มี 2 ประเภทคือ

1. แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากใช้กรดอะซิติก แบคทีเรียพวกนี้จะใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงาน ดังสมการต่อไปนี้

$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2$

2. แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากไฮโดรเจนและโดยแบคทีเรียพวกนี้จะใช้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งพลังงาน ดังสมการต่อไปนี้

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

และแบคทีเรียชนิดนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารอาหารอย่างเดียวได้ เพราะกรดฟอร์มิกสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออดไซด์ได้ง่าย ดังสมการต่อไปนี้

$HCOOH \longrightarrow CO_2 + H_2$

2.4 สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศเป็นกระบวนการที่อาศัยการทำงานของแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มที่ไม่สร้างมีเทน และแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน ดังนั้นถ้าแบคทีเรียกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งทำงานผิดปกติ หรือมีจำนวนไม่สมดุลก็จะส่งผลถึงแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งทันที ดังนั้นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของระบบไร้อากาศ ได้แก่ อุณหภูมิ พีเอช สภาพความเป็นด่าง กรดระเหยง่าย สารอาหารเสริม สารพิษ โดยช่วงค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ ต่อกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการหมักก๊าซมีเทนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ [3]

สภาวะแวดล้อม	ช่วงค่าที่เหมาะสม	ช่วงที่ยอมรับได้
พีเอช	6.8 — 7.4	6.2 — 7.8
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	30 — 35	25 — 40
กรดระเหยง่าย (mg/1 as Acetic acid)	50 — 500	2,000
ความเป็นด่าง (mg/1 as $CaCO_3$)	2,000 — 3,000	1,000 — 5,000
ORP (mV)	-520 ถึง-530	-490 ถึง-550

2.4.1 พีเอช

ค่าของพีเอชเป็นตัวที่วัดความเป็นกรดหรือด่าง พีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไร้อากาศควรอยู่ระหว่าง 6.8 – 7.2 เป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ถ้าค่าพีเอชไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวแบคทีเรียก็จะมีประสิทธิภาพการทำงานลดลง ส่วนแบคทีเรียที่สร้างกรดจะปรับตัวได้ในช่วงพีเอชที่กว้าง เพราะฉะนั้นจึงเน้นควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมกับกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน ค่าพีเอชได้สามารถควบคุมโดยการควบคุมปริมาณของกรดระเหยง่ายและสภาพความเป็นด่าง ถ้ามีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมากก็จะส่งผลให้ปริมาณของกรดระเหยง่ายมากตามด้วย เนื่องจากสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดระเหยง่ายโดยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด และหากมีปริมาณกรดระเหยง่ายมากขึ้นแล้วแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถย่อยสลายได้ทันจะทำให้ค่าพีเอชของระบบต่ำลง และถ้าลดต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมก็จะเป็นผลเสียต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน

2.4.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยพบว่าอัตราของปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่ในระบบบำบัดทางชีวภาพนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีไม่เพิ่มขึ้นมากนักเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาเคมี สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่สองช่วง คือ ระหว่าง 30 ถึง 40 องศาเซลเซียส และระหว่าง 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการให้มีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นได้ตามปกติ ในระบบควรมีอุณหภูมิอย่างน้อย 20 องศาเซลเซียส และพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 15 ถึง 40 องศาเซลเซียส การผลิตก๊าซมีเทนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะเพิ่มขึ้นเกือบสองเท่าเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส

2.4.3 กรดไขมันระเหยและสภาพความเป็นด่าง

กรดไขมันระเหยที่ผลิตโดยแบคทีเรียสร้างกรด ปกติควรมีค่าประมาณ 50 – 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของกรดอะซิติก กรณีกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจะเป็นสัญญาณบ่งบอกว่าระบบกำลังจะเสียสมดุล และทำให้การชะลอตัวของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สร้างมีเทนหรือเร่งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สร้างกรด สภาพความเป็นด่างเป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมพีเอชของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ สภาพความเป็นด่างส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปความเป็นด่างไบคาร์บอเนต ค่าความเป็นด่างอาจเพิ่มขึ้นจากการรวมตัวของแอมโมเนียที่เกิดจากการย่อยสลายโปรตีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่แบคทีเรียขับออกมา ความเป็นด่างของระบบจะบอกความจุของบัฟเฟอร์ (Buffer capacity) ดังนั้นควรรักษาสภาพให้อยู่ในระดับ 2,000 – 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร [6]

ถ้า VFA/Alkalinity น้อยกว่า 0.4 แสดงถึงระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง ประสิทธิภาพการทำงานดี

ถ้า VFA/Alkalinity มากกว่า 0.8 แสดงถึงระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำ ประสิทธิภาพการทำงานลดลงหรืออาจล้มเหลวได้

ในบางครั้งระบบจะมีปริมาณความเป็นด่างไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องเติมสารเคมีเพื่อให้ระบบมีความจุบัฟเฟอร์สูงขึ้น ซึ่งการเลือกสารเคมีที่ใช้เพิ่มความเป็นด่างในระบบ ควรเลือกสารเคมีที่ละลายน้ำได้ดี ให้คาร์บอเนต (HCO_3) ได้โดยตรงและราคาถูก ตัวอย่างเช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ละลายน้ำได้ดี แต่มีราคาแพงกว่าสารเคมีอื่น

2.4.4 สารอาหารเสริม

ในการย่อสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ร้อยละ 90 ของสารอินทรีย์ที่ถูกใช้จะเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพและร้อยละ 10 จะถูกใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ ซึ่งแบคทีเรียจะทำงานได้ดีจำเป็นต้องมีสารอาหารหลายชนิด ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารอาหารเสริมหลักและสารอาหารเสริมรอง สารอาหารที่จำเป็นต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ เช่น ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) ควรมีอยู่ในอัตราส่วนเหมาะสมคือ COD:N:P เท่ากับ 100:1:0.2 หรือ BOD:N:P เท่ากับ 100:1:0.2 หากไม่เพียงพอจะทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ และการผลิตก๊าซชีวภาพของแบคทีเรียลดลง และในทางตรงกันข้ามหากมีปริมาณสารไนโตรเจนมากเกินไปก็จะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ส่วนสารอาหารอื่น ๆ ที่จำเป็นได้แก่ เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับระบบไม่ใช้อากาศมีความต้องการสารอาหารน้อยกว่าระบบใช้อากาศ โดยปกติแบคทีเรียทั้งในระบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศมักจะอยู่ในรูป $C_5H_7NO_2$ โดยมีฟอสฟอรัสประมาณ 0.2 เท่าของไนโตรเจนคิดในเทอมน้ำหนัก

2.4.5 สารพิษ

สารพิษมีผลกระทบโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และรบกวนการทำงานการย่อยสลายของแบคทีเรียโดยเฉพาะแบคทีเรียที่ผลิตมีเทน อาจเกิดการปนเปื้อนมากับของเสียหรือจากผลของปฏิกิริยาชีวเคมีของแบคทีเรียในระบบ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิด และความเข้มข้นของสารพิษนั้น สารพิษไม่ได้หมายความถึงสารอันตรายแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังรวมถึงสารอาหารจำเป็นบางตัวที่หากมีมากเกินไปก็อาจกลายเป็นสารพิษได้ เพื่อเป็นการลดความเป็นพิษลง และป้องกันระบบล้มเหลว จึงควรตรวจวัดปริมาณสารพิษในน้ำเสียก่อนทำการป้อนเข้าสู่ระบบ สารพิษที่มีผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศได้แก่ กรดระเหยง่าย แอมโมเนีย และซัลไฟด์

- กรดระเหยง่าย

ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์เข้ามามาก แบคทีเรียจะผลิตกรดระเหยง่ายออกมามาก จนเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในถังหมักทำให้ระบบล้มเหลว ถ้าในระบบมีบัฟเฟอร์สูงพอที่จะรักษาพีเอชให้ใกล้เคียง 7 กรดระเหยง่ายเข้มข้นสูงถึง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแของกรดอะซิติกจะไม่เป็นพิษโดยตรงต่อจุลินทรีย์

- ไฮโดรเจนซัลไฟด์

เป็นสารพิษตัวหนึ่งที่มีผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศปกติไฮโดรเจนซัลไฟด์จะได้จากการย่อยสลายสารประกอบซัลเฟอร์ และจากการย่อยสลายสารอินทรีย์จำพวกโปรตีนที่ปะปนกับของเสีย พบว่าสารประกอบซัลไฟด์ที่ละลายน้ำหากมีจำนวนมากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีผลกระทบต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน และหากมีจำนวนมากกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีผลกระทบต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดซึ่งผลกระทบจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีผลกระทบต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประการ คือ 1. การยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่มย่อยสลายซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria) และ 2. ส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนลดลง การยับยั้งลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

- แอมโมเนีย

มาจากการย่อยสลายพวกโปรตีนโดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียไอออน (NH_4^+) และแอมโมเนีย (NH_3) ถ้าค่าพีเอชสูงขึ้นจะทำให้เกิดแอมโมเนีย ซึ่งจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์มากกว่าแอมโมเนียไอออน

2.4.6 ภาระบรรทุกสารอินทร์ (Organic Loading)

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะส่งผลถึงเสถียรภาพของระบบ ซึ่งการเปลี่ยนภาระบรรทุกสารอินทรีย์สามารถทำได้ 2 วิธีดังนี้ วิธีที่หนึ่งคือการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ในน้ำเสีย วิธีที่สองคือการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งมีผลต่อระยะเวลาการกักเก็บของเหลวภายในถังปฏิกรณ์ การเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบโดยควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำเสียกับระยะเวลาที่เหมาะสมในการสัมผัสอาหารของแบคทีเรีย

2.4.7 สภาวะไร้อากาศ

ออกซิเจนอิสระหรือสารเพิ่มออกซิเจน (Oxidizing agent) จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนโดยตรง จึงควรป้องกันไม่ให้มีอากาศเข้าไปในระบบบำบัดแบบไร้อากาศโดยตรง นอกจากนี้การมีสารลดออกซิเจนอิสระในน้ำทิ้ง เช่น H_2S, Na_2S ให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้แบคทีเรียทำงานได้ดีขึ้น แต่ไม่ควรให้มีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะจะมีผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรีย

2.5 ระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์

ระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์เป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศในอัตราสูง มีจุลินทรีย์ในระบบอยู่ในลักษณะของตะกอนแขวนลอย มีลักษณะการทำงานเป็นแบบกะ (Batch) กระบวนการต่าง ๆ ในระบบจะถูกดำเนินการเป็นลำดับขั้นตอนภายในถังปฏิกรณ์เดียวกัน ใช้สเกลเวลาเป็นตัวกำหนดขั้นตอนการดำเนินงานของระบบ คล้ายกับระบบเอสบีอาร์ (SBR) การทำงานของระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์มี 4 ขั้นตอน คือ (1) ขั้นตอนการเตรียมถังและเติมน้ำเสียเข้าถัง (Feed) (2) ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา (React) (3) ขั้นตอนการตกตะกอน (Settle) (4) ขั้นตอนการระบายน้ำใสและตะกอนส่วนเกิน (Decant/effluent withdrawal)

ในระหว่างขั้นตอนการเติมน้ำเสียเข้าถังและขั้นตอนการทำปฏิกิริยา ระบบจะใช้ระยะเวลา 2 – 3 นาทีในแต่ละชั่วโมงในการกวนแบบสมบูรณ์ เพื่อให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำได้อย่างทั่วถึง การกวนจะเป็นไปในลักษณะที่ค่อนข้างเบาเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนจุลินทรีย์ที่เป็นฟลอค การกวนในลักษณะไม่ต่อเนื่องจะดีกว่าการกวนในลักษณะต่อเนื่องเพราะจะทำให้จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นสามารถตกตะกอนได้ดี [5] ค่าอัตราส่วนสารอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M ratio) จะมีค่าสูงสุดในตอนเริ่มต้นของขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับลักษณะของสารอินทรีย์ที่เข้า

ระบบและคุณภาพน้ำที่ต้องการ สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยสูง ความต้องการเวลาในการสัมผัสจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์จะมากขึ้น เพื่อทำให้การสลายตัวของอนุภาคเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ การย่อยสลายตัวของสารอินทรีย์ทำให้มีก๊าซเกิดขึ้นจนทำให้ชั้นตะกอนจุลินทรีย์ฟุ้งทั้งถังคล้ายกับมีการกวนด้วยใบพัดกวน ซึ่งเมื่อปริมาณสารอินทรีย์ลดลงอัตราการผลิตก๊าซจะลดลง ซึ่งเป็นสภาวะที่ตะกอนจุลินทรีย์จะตกตะกอนได้ดี เมื่ออัตราการผลิตก๊าซลดลงต่ำสุด ระบบจะมีการตกตะกอนชั้นตะกอนจุลินทรีย์ออกจากส่วนที่เป็นน้ำใส ทำให้สามารถแยกชั้นน้ำใสที่อยู่ตอนบนทิ้งได้ ในขั้นตอนสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา (React Phase) ค่าอัตราส่วนสารอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M ratio) จะมีค่าน้อย มวลชีวภาพ (biomass) จะจับตัวกันเป็นฟลอคและตกตะกอน ในระหว่างขั้นตอนการระบายน้ำออกจากระบบ จุลินทรีย์ที่มีการตกตะกอนที่ไม่ดีจะถูกระบายออกจากระบบด้วย ซึ่งจะเหลือแต่จุลินทรีย์ที่เป็นฟลอคที่มีน้ำหนักมากกว่าอยู่ในปฏิกรณ์ [6]

กระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์นี้ ได้นำไปใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่เกิดจากการสังเคราะห์นมแห้ง ที่อุณหภูมิ 5 – 25 องศาเซลเซียส โดยมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (ซีโอดี) ที่ป้อนเข้าระบบ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร [5] ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) จะถูกเปลี่ยนโดยใช้การแปรผันค่าระยะเวลากักน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT) จาก 6 – 24 ชั่วโมง ผลการทดลองที่ 25 องศาเซลเซียส สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 92 – 98 รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เท่ากับ 1.2 – 24 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และผลการทดลองที่ 5 องศาเซลเซียส สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 85- 75 รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.9 – 2.4 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ คือ ความเร็วในการตกตะกอน (Settling velocity) ของตะกอนในขั้นตอนการตกตะกอน ก่อนที่จะมีการระบายน้ำใสออก ระยะเวลาในการตกตะกอนจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที ค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids) ของน้ำที่ออกจากระบบอยู่ในช่วง 50 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ระยะเวลากักน้ำ (Hydraulic Retention Time, HRT) จะอยู่ในช่วง 6 – 24 ชั่วโมง และอายุตะกอน (Sludge Retention Time, SRT) อยู่ในช่วง 50 – 200 วัน [6]

2.6 ข้อดีของระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์

1. ไม่จำเป็นต้องป้อนเชื้อตะกอนที่เป็นเม็ด และไม่ต้องเลี้ยงเชื้อให้เป็นเม็ดเหมือนระบบยูเอเอสบี
2. การออกแบบเดินระบบ และการควบคุมระบบสามารถทำได้ง่าย

3. ระบบสามารถกำหนดช่วงเวลาในการปล่อยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วได้ ทำให้น้ำทิ้งสามารถถูกกักในระบบจนกระทั่งได้คุณภาพที่ต้องการ แล้วจึงปล่อยทิ้ง
4. ใช้ถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียว ไม่ต้องมีถังตกตะกอนจึงประหยัดเนื้อที่
5. สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ เช่น ลดการสร้างถังตะกอน, การติดตั้งปั๊มในการสูบสลัดจ์ และยังลดพื้นที่และพลังงานในการเดินระบบ

2.7 หลักการทำงานของระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์

2.7.1 ขั้นตอนการเตรียมถังและเติมน้ำเสียเข้าถัง (Fill Phase)

รับน้ำเสียจากกระบวนการที่เกิดน้ำเสียเข้ามาในถังปฏิกรณ์ซึ่งมีตะกอนจุลินทรีย์อยู่ในถัง โดยปริมาตรน้ำเสียเริ่มต้นในถังอาจต่ำประมาณร้อยละ 25 ของปริมาตรถังซึ่งเป็นปริมาตรน้ำเสียที่เหลืออยู่ในช่วงสุดท้ายของช่วงระบายน้ำใส ให้เติมน้ำเสียจนถึงระดับสูงสุดที่กำหนดไว้ (100 เปอร์เซ็นต์) เวลาที่ใช้ในการเติมน้ำเสียโดยทั่วไปประมาณร้อยละ 25 ของเวลาทั้งหมดใน 1 วัฏจักร

2.7.2 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Phase)

เป็นขั้นตอนที่จุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนอยู่ในน้ำทิ้ง อาศัยการกวนแบบสมบูรณ์ เพื่อให้จุลินทรีย์มีโอกาสสัมผัสกับสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำได้อย่างทั่วถึง จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นมีระดับการเจริญเติบโตที่สามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มตะกอนที่จะสามารถตกตะกอนได้ ระยะเวลาที่ใช้ประมาณร้อยละ 40 ของเวลา 1 วัฏจักร

2.7.3 ขั้นตอนการตกตะกอน (Settle Phase)

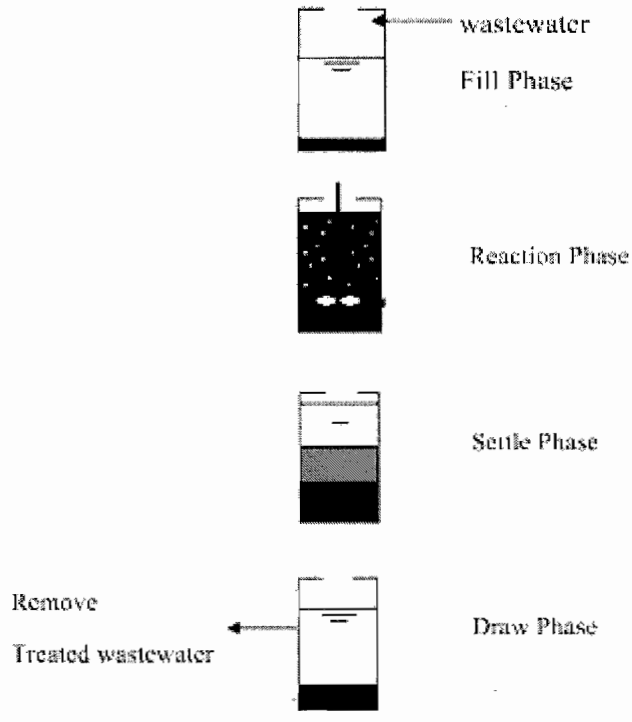
กระบวนการนี้จะหยุดนิ่งเพื่อให้ตะกอนเกิดการตกตะกอน เพื่อเป็นการแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว การตกตะกอนในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าในระบบอื่น ๆ เพราะของเหลวอยู่ในสภาพน้ำนิ่งอย่างสมบูรณ์ จะไม่ถูกรบกวนจากการไหลของน้ำหรือสภาวะอื่น ๆ ระยะเวลาที่ใช้ประมาณร้อยละ 20 ของเวลา 1 วัฏจักร

2.7.4 ขั้นตอนระบายน้ำใสและตะกอนส่วนเกิน (Draw Phase)

เป็นขั้นตอนในการระบายน้ำส่วนที่ใสหรือน้ำที่มีคุณภาพดีแล้ว ซึ่งอยู่ด้านบนของชั้นตะกอน การระบายน้ำส่วนใสนี้จะใช้ชีวิตใดก็ได้ที่จะไม่ทำให้ตะกอนฟุ้งกระจายและหลุดออกไปกับน้ำส่วนใส สำหรับการระบายตะกอนส่วนเกินไปจำกัดนั้น ควรทำหลังจากการระบายน้ำส่วนใสเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากการระบายตะกอนอาจทำให้ตะกอนฟุ้ง ซึ่งหากมีการระบายน้ำใสในขณะนั้นอาจ

ทำให้ตะกอนที่ฟุ้งหลุดออกไปกับน้ำส่วนใสด้วย ระยะเวลาที่ใช้ในการระบายน้ำออกประมาณร้อยละ 15 ของเวลา 1 วัฏจักร

ระยะเวลาทั้งหมดในหนึ่งวัฏจักรอาจแปรผันได้ตั้งแต่ 3 – 24 ชั่วโมง การระบายตะกอนเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการปฏิบัติการในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ โดยปกตินั้นการระบายตะกอนจะทำในช่วงการตกตะกอน (Settle) หรือทำในช่วงของการเกิดปฏิกิริยา (React) ก็ได้ นอกจากนี้ปริมาตรตะกอนที่ระบายออกขึ้นอยู่กับค่าอายุตะกอน (Sludge Retention Time, SRT) ลักษณะเด่นของระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ คือ ไม่มีการหมุนเวียนตะกอนเนื่องจากการตกตะกอนเกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เดียวกัน และเมื่อถังปฏิกรณ์ทำงานครบ 4 ขั้นตอนแล้ว ถือว่าทำงานครบ 1 วัฏจักร โดยแต่ละวัฏจักรอาจใช้เวลาเท่ากับ 1 วัน หรือต่างจากนี้ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราไหลของน้ำเสียด้วย ขั้นตอนการดำเนินงานของระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเดินระบบในถังปฏิกรณ์แบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ [5]

2.8 บทบาทของธาตุอาหารเสริมที่มีต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศ [4]

ระบบบำบัดแบบไร้อากาศเป็นระบบที่อาศัยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียสร้างกรด และแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน ขณะที่กลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทนมีความต้องการสารอาหารบางชนิดในปริมาณที่น้อยแต่ขาดไม่ได้ ได้แก่ เหล็ก, นิกเกิล, โคบอลต์และซัลเฟอร์ในรูปซัลไฟด์

ดังนั้นหากน้ำเสียขาดแคลนสารอาหารดังกล่าว จะไม่เกิดการผลิตก๊าซมีเทนจากระบบไม่ใช้อากาศขึ้น นอกจากนี้ยังมีธาตุอาหารอีก 3 ชนิดที่มีรายงายถึงความต้องการของแบคทีเรีย คือ โมลิบดินัม (Mo), ทังสเตน (W), และเซเลเนียม (Se) แต่ยังไม่มีข้อมูลยืนยันถึงความต้องการที่ชัดเจน แต่ถ้าธาตุอาหารแต่ละชนิดมีในปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดความเป็นพิษภายในระบบขึ้นได้

2.8.1 เหล็ก

เหล็กเป็นสารอาหารเสริมรองที่พบในเนื้อเยื่อของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนมากกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะช่วยในการขับของเสียออกนอกเซลล์ของแบคทีเรีย และยังพบมากในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ แต่การเติมเหล็กในระบบบำบัดแบบไร้อากาศอาจทำให้ซัลไฟด์ตกตะกอน

2.8.2 โคบอลต์

โคบอลต์เป็นสารอาหารเสริมรองซึ่งอยู่ในรูปของเอนไซม์จำเพาะ และโคลินอยด์ พบในเอนไซม์คาร์บอนมอนอกไซด์ดีไฮโดรจีเนส เป็นเอนไซม์ที่จำเป็นในขั้นตอนการทำงานของการสร้างอะซิเตด (acetogenesis) มีความสามารถในการละลายน้ำ ได้ดีกว่าเหล็ก แต่ก็อาจเกิดปัญหาทำให้ซัลไฟด์ตกตะกอนเช่นเดียวกับเหล็กได้

2.8.3 นิกเกิล

นิกเกิลเป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน โดยแบคทีเรียมีความต้องการนิกเกิลในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ เมื่อนิกเกิลเข้าสู่เซลล์จะอยู่ในรูปของ F_{430} ซึ่งเป็นโคเอนไซม์ที่มีความสำคัญต่อแบคทีเรียกลุ่มนี้มาก โดยทั่วไปนิกเกิลจะปนอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิม

2.8.4 ซัลไฟด์

ซัลไฟด์เป็นสารอาหารเสริมรองที่มีบทบาทต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศทั้งด้านบวก และด้านลบ เนื่องจากซัลไฟด์สามารถรวมกับเหล็ก นิกเกิล และโลหะหนักที่จำเป็นต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศ แยกตัวออกจากน้ำตกตะกอนเป็นผลึก และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระดับความเข้มข้นสูงกว่า 100 – 150 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนและซัลไฟด์ปริมาณเล็กน้อยก็เป็นสารที่มีความจำเป็นต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ความต้องการซัลไฟด์ของแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่ในช่วง 1 – 25 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.8.5 โมลิบดินัม

โมลิบดินัมเป็นสารอาหารเสริมรองที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในรูปของเอนไซม์ฟอร์เมตดีไฮโดรจีเนส (formate dehydrogenase) แต่ถ้ามีโมลิบดินัมในปริมาณที่มากเกินไปอาจยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต

2.8.6 ทังสเตน

ทังสเตนเป็นสารอาหารเสริมรองที่เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ฟอร์เมตดีไฮโดรจีเนส และช่วยในกระบวนการเมทาบอลิซึม(metabolism) ของคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเช่นเดียวกับนิกเกิล

2.8.7 เซลิเนียม

เซลิเนียมเป็นสารอาหารเสริมรองที่เป็นองค์ประกอบโดยทั่วไปของเอนไซม์ในแบคทีเรียระบบไร้อากาศซึ่งอยู่ในกรดนิวคลีอิกของแบคทีเรีย เอนไซม์ที่มีเซลิเนียมเป็นองค์ประกอบคือ ฟอร์เมตดีไฮโดรจีเนส (formate dehydrogenase) เอนไซม์ที่มีเซลิเนียมจะทำงานได้ดีที่พีเอชเป็นกลางค่าปฏิกิริยารีดอกซ์ต่ำ หากมีเซลิเนียมปริมาณเหมาะสมอาจช่วยในการย่อยสลายกรดไขมัน และช่วยเร่งปฏิกิริยาในระบบไร้อากาศได้

2.8.8 ทองแดง

ทองแดงเป็นสารอาหารเสริมรองพบมากในแบคทีเรียพวกสร้างมีเทน ทองแดงเป็นองค์ประกอบอยู่ในเอนไซม์ซูเปอร์ดีสมูเทส (super dismutase) แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการรายงานที่แน่ชัดว่า การเติมทองแดงจะสามารถกระตุ้นการทำงานของระบบไร้อากาศได้

2.8.9 สังกะสี

สังกะสีเป็นสารอาหารเสริมรองที่มีความคล้ายคลึงกับโคบอลต์ พบในแบคทีเรียที่สร้างมีเทน สังกะสีเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ฟอร์เมตดีไฮโดรจีเนส และ ไฮโดรจีเนส แต่ยังไม่มีการรายงานที่แน่ชัดว่าสังกะสีสามารถช่วยกระตุ้นการทำงานของระบบไร้อากาศได้

2.9 ปาล์มน้ำมัน [7]

ปาล์มน้ำมันมีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกา จัดเป็นพืชยืนต้นขนาดใหญ่ที่มีความทนทานต่อภัยธรรมชาติและยังเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย สำหรับศักยภาพของปาล์มน้ำมันทั้งในปัจจุบันและ

ในอนาคตนั้นยังมีโอกาสเติบโตอีกมาก ด้วยคุณสมบัติหลายด้านในการอุปโภคและบริโภค อีกทั้งน้ำมันที่สกัดได้จากผลปาล์มยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์และใช้เป็นสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้มากมาย อาทิเช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น นอกจากนี้ปาล์มน้ำมันยังเป็นพืชที่อนุรักษ์สภาพแวดล้อม (Ecofriendly Crop) คือเมื่อปลูกไปเป็นระยะเวลานานจะทำให้ระบบนิเวศน์ที่เคยเสียหายกลับคืนสู่สภาวะปกติ โดยการจัดตามอนุกรมวิธานได้ดังนี้

Class	:	Angiosperman
Subclass	:	Monocotyledon
Order	:	Palmae
Subfamily	:	Cocoides
Genus	:	Elaeis
Species	:	guineensis
Sciencetific name	:	*Elaeis guineensis Jacq*

2.9.1 ส่วนประกอบของทะลายปาล์มน้ำมัน [8]

ส่วนประกอบของทะลายปาล์มเมื่อนำมาแปรรูปแล้วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วจะประกอบไปด้วย ผลปาล์มน้ำมัน 71%, ทะลายเปล่าของปาล์ม 28% และสิ่งเจือปนอื่น 1% โดยที่ผลปาล์มน้ำมัน 71% แบ่งได้เป็น น้ำมันปาล์ม 22% (น้ำมันปาล์มโอเลอิน 15%, น้ำมันปาล์มสเตียริน 5% และ กรดไขมันปาล์ม 2%), ความชื้น 26%, กากเส้นใยปาล์ม 11% และเมล็ดปาล์มน้ำมัน 12% (เนื้อในกะลาปาล์ม 5.5% น้ำมันจากเนื้อในกะลาปาล์ม 2.5%, กากเนื้อในกะลาปาล์ม 3.0% และกะลาปาล์มน้ำมัน 6.5)

2.9.2 กระบวนการแปรรูปปาล์มน้ำมัน [8]

น้ำมันที่ได้จากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมันได้มาจากสองส่วนด้วยกัน คือ น้ำมันปาล์มจากเปลือกนอก (Mesocarp) น้ำมันที่ได้ในส่วนนี้เป็นน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm oil) มีลักษณะเป็นสีแดงเข้ม ลักษณะเป็นของเหลวที่มีน้ำปนอยู่ จากนั้นทำการแยกเอาสิ่งสกปรกและกากใยออกด้วยวิธีการกรอง แล้วค่อยนำไปขจัดความชื้นให้อยู่ในมาตรฐานเพื่อลดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อนส่งไปยังโรงกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อไป โดยปริมาณของกรดไขมันอิสระและปริมาณสารต่าง ๆ ที่มีในน้ำมันปาล์มแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และ 2.4 น้ำมันจากเนื้อในเมล็ดปาล์ม (Kernel)น้ำมันที่ได้จากส่วนนี้เป็นน้ำมันเนื้อใน (palm kernel oil) ได้จากการหีบเนื้อในเมล็ดด้วยแรงอัดสูง หรือสกัดด้วยตัวทำลาย น้ำมันที่ได้ในส่วนนี้จะมีลักษณะแตกต่างจากน้ำมันที่ได้ในส่วนแรก คือ มีลักษณะใสไม่มีสีจนถึงมีสีเหลืองอ่อน โดยที่จะมีคุณสมบัติและส่วนประกอบที่ใกล้เคียงกับน้ำมะพร้าว

ตารางที่ 2.3 ปริมาณของกรดไขมันอิสระชนิดต่าง ๆ ในน้ำมันปาล์มดิบ [8]

ชนิดของกรดไขมัน	ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมัน
กรดไขมันอิ่มตัว	
กรดลอริก (Lauric Acid) C12	เล็กน้อย
กรดไมริสติก (Myristic Acid) C12	2
กรดปาล์มเมติก (Palmitic Acid) C18	43
กรดสเตียริก(Stearic Acid) C18	7
กรดอราซิติก (Arachidic Acid) C20	เล็กน้อย
รวม	52
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	
กรดโอเลอิก (Oleic Acid) C18 : 1	39
กรดลิโนเลอิก (linoleic Acid) C18 : 2	9
กรดลิโนลอเนอิก (Linolemeic Acid) C18 : 3	เล็กน้อย
รวม	48

ตารางที่ 2.4 ปริมาณสารต่าง ๆ ในน้ำมันปาล์ม [8]

ชนิดของสาร	ร้อยละ
สารพวกคาร์โรทีนอยด์	0.03 – 0.15
Tocopherols	0.00. – 0.11
Sterols	0.003 – 0.1
Phosphatide	0.05 – 0.1
Total alcohol	0.08

2.9.3 วิธีการแปรรูปปาล์มน้ำมัน [8]

ในอุตสาหกรรมแปรรูปน้ำมันปาล์มมีกระบวนการ 3 กระบวนการด้วยกันคือ

2.9.3.1 กระบวนการสกัดน้ำมันแบบแยกเปลือกและส่วนเนื้อในเมล็ดโดยใช้น้ำ

1. ทะลายปาล์ม (FFB : Fresh Fruit Bunch) มาอบด้วยไอน้ำ โดยใช้หม้ออบความดันไอ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 40 – 80 นาที โดยมีจุดประสงค์ เพื่อ ยับยั้งกระบวนการที่จะทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ในผลปาล์มน้ำมัน, ช่วยให้ผลปาล์มหลุดออกจากทะลายได้ง่าย

ก่อนส่งยังขั้นตอนต่อไป, ทำให้ชั้นเปลือกนุ่มเพื่อจะได้สกัดน้ำมันจากผลปาล์มออกมาได้ง่าย, ช่วยลดปริมาณน้ำในผลปาล์มและเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สามารถแยกกะลาและเนื้อในออกจากกันได้ง่าย

2. จากนั้นนำผลปาล์มเข้าเครื่องนวดเพื่อแยกผลปาล์มออกจากทะลาย ผลปาล์มจะถูกส่งไปย่อยเปลือกออกจากเมล็ดในด้วยเครื่องบดย่อยที่อุณหภูมิ ประมาณ 95 องศาเซลเซียส
3. นำเมล็ดในที่ได้ส่งยังเครื่องตะแกรงเมล็ดเพื่อแยกส่วนของกะลาและเนื้อในออกจากกัน ซึ่งเนื้อในเมล็ดปาล์มจะถูกนำไปอบแห้งแล้วส่งต่อไปยังโรงกลั่นน้ำมันปาล์ม
4. น้ำมันดิบและเปลือกนอกที่มีน้ำมันจะถูกส่งไปยังเครื่องหีบน้ำมันแบบเกลียวอัด ทำการหีบน้ำมันดิบออกจากเปลือก ส่วนกากจะถูกส่งยังเตาเผาเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับกะลา
5. ทำการแยกน้ำมันดิบออกจากสิ่งสกปรกโดยผ่านเครื่องกรองน้ำมันแบบเครื่องจักรกรองหลายชั้น และนำน้ำมันดิบที่กรองได้ผ่านเครื่องฟอกเหวี่ยงความเร็วสูงเพื่อทำความสะอาดแยกน้ำและปนเปื้อนออกจากน้ำมันดิบ
6. น้ำมันดิบที่ได้ยังมีสิ่งปนเปื้อนอยู่ต้องส่งเข้าเครื่องกำจัดความชื้นเพื่อให้ได้ตามมาตรฐานความชื้นที่กำหนดจากนั้นจึงบรรจุถังรอจำหน่ายต่อไป

2.9.3.2 การกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

ขั้นตอนนี้เป็นการนำเอาน้ำมันปาล์มดิบมาทำให้บริสุทธิ์ โดยขจัดสิ่งปนเปื้อนออกไปจนได้ค่าความบริสุทธิ์ตามที่มาตรฐานกำหนด สามารถบริโภคได้ โดยสามารถแบ่งสารปนเปื้อนออกตามผลที่ทำให้เกิดกับน้ำมันได้ดังนี้

1. กลุ่มไฮโดรเลติค ได้แก่ความชื้น สิ่งสกปรก กรดไขมันอิสระ กลีเซอร์ไรด์และเอนไซม์ต่างๆ
2. กลุ่มออกซิเดทีฟ ได้แก่ พวกโลหะหนัก สารพวกออกซิเดชัน เม็ดสี โตโคฟอรอล และฟอสฟาไตด์
3. สารที่เป็นตัวเร่งให้เกิดสารพิษ ได้แก่สารประกอบพวกไนโตรเจน กำมะถันและฮาโลเจน" โดยการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์มี 2 กระบวนการด้วยกันดังต่อไปนี้
4. กระบวนการทางกายภาพ เป็นกระบวนการนำน้ำมันดิบมากำจัดสิ่งปนเปื้อนพวกฟอสฟาไทด์ออก โดยใช้กรดฟอร์มิก หลังจากนั้นจะนำไปกำจัดกรดและกลิ่นเพื่อแยกเอากรดไขมันอิสระ แอสดีไซด์ และคีโตนออก โดยการพ่นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 230 – 240 องศาเซสเซียส นาน 1 – 2 ชั่วโมง จะได้นำมันที่เรียกว่าน้ำมันอาร์บี
5. กระบวนการทางเคมี เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีเกือบทุกขั้นตอน ดังนั้นจึงมีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยสูง โดยจะนำกรดฟอสฟอริคมาแยกน้ำมันปาล์มดิบออกจากฟอสฟาไทด์ก่อน จากนั้นจะนำไปกำจัดกรดไขมันอิสระโดยใช้สารโซดาไฟ แล้วนำไปไล่ความชื้นและฟอกสีด้วยดินฟอกสี กรองดินฟอกสีออกผ่านไปยังขบวนการกำจัดกลิ่น โดยใช้ไอน้ำเพื่อแยกกรดที่เหลือ อัลดีไฮด์ และคีโตนออก นอกจากนี้ไอน้ำยังสามารถกำจัดกลิ่นหืนและฟอกสีน้ำมันได้ด้วย โดยน้ำมันที่ได้จะเรียกว่าน้ำมันอาร์บีดีเช่นกัน

2.10 บีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential, BMP)

บีเอ็มพีเป็นการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของของเสียที่นำมาบำบัดด้วยระบบแบบไร้อากาศ ค่าบีเอ็มพีมีจุดประสงค์เพื่ออธิบายว่าสารอินทรีย์ในน้ำเสียสามารถถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยแสดงในรูปปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมซีโอดีของสารอินทรีย์ เช่น น้ำเสียมีค่าบีเอ็มพีเท่ากับ 1000 มิลลิกรัมมีเทนเทียบเท่าซีโอดีต่อลิตรน้ำเสีย แสดงว่าในน้ำเสีย 1 ลิตร มีสารอินทรีย์ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียภายใต้สภาวะไร้อากาศและก่อให้เกิดก๊าซมีเทนคิดเทียนเท่าในเทอมซีโอดีได้ 1000 มิลลิกรัม

2.11 เอสเอ็มเอ (Specific Methanogenic Activity, SMA)

ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบและความสามารถในการทำงานของระบบ ซึ่งความสามารถของระบบจะขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ ค่าเอสเอ็มเอเป็นค่าที่บอกถึงคุณภาพของตะกอนจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งค่าเอสเอ็มเอยิ่งมีค่ามากเพียงใดจะแสดงว่าตะกอนแบคทีเรียยิ่งมีคุณภาพดี ค่าเอสเอ็มเอมักรายงานในหน่วยของกรัมมีเทนเทียบเท่าซีโอดีต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน หรือ กรัมมีเทนเทียบเท่าซีโอดีต่อกรัมเอสเอสต่อวัน เช่น ตะกอนชนิดหนึ่งมีค่าเอสเอ็มเอเท่ากับ 0.1 กรัมมีเทนเทียบเท่าซีโอดีต่อกรัมเอสเอสต่อวัน แสดงว่า 1 กรัมของตะกอนนั้นสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนได้สูงสุดวันละ 0.1 กรัมต่อวัน โดยทั่วไปค่าเอสเอ็มเอมักอยู่ในช่วง 0.05- 2 กรัมซีโอดีเทียบเท่ามีเทนต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน การหาค่าเอสเอ็มเอเพื่อเป็นการตรวจสอบความเร็วในการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตก๊าซมีเทน การทดลองเอสเอ็มเอสารอินทรีย์มักจะมาจากกรดอะซิติก เนื่องจากกรดอะซิติกเป็นกรดระเหยง่ายเป็นแหล่งของซีโอดีและความเร็วในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนมักจะถูกจำกัดในขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอะซิติกไปเป็นก๊าซมีเทน

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Borja และคณะ [9] ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในห้องปฏิบัติการ ด้วยถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี ขนาด 16 ลิตร โดยทำการป้อนน้ำเสียที่ค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 5.1 ถึง 42.5 กรัมต่อลิตร เวลากักพักน้ำ 4 วัน แล้วทำการวิเคราะห์ค่า การผลิตก๊าซมีเทน, VFA, การเจริญเติบโตของตะกอนแบคทีเรีย และค่าซีโอดี ผลการทดลองพบว่าที่ภาระอินทรีย์ 10.6 กรัมซีโอดีต่อลิตร ต่อวัน สามารถกำจัดซีโอดีได้ 96 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบยูเอเอสบีสามารถบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Sharma และ Singh [10] ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นสุราด้วยระบบยูเอเอสบี โดยทำการเติมสารอาหารเสริมหลัก (Ca,P) และสารอาหารเสริมรอง (Ni,Fe,Co) ให้กับน้ำเสีย โดยทำการทดลองภายในสภาวะ Mesophilic ผลพบว่า Ca และ P จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดและเร่งการสร้างเม็ดตะกอน ส่วนเกลือของ Ni,Fe และ Co เมื่อรวมกันแล้วก็จะช่วยพัฒนาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและกระบวนการสร้างเม็ดตะกอนด้วยเช่นกัน

Zandvoort และคณะ [11] ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารอาหารเสริมที่มีต่อระบบยูเอเอสบี โดยทำการลดความเข้มข้นของสารอาหารเสริมที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส มีค่าพีเอชเท่ากับ 7 มีเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย 12 ชั่วโมง มีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 2.6 – 7.8 ก.ซีโอดี/ล.-วัน ทำการทดลอง 261 วัน จากการทดลองพบว่าเมทานอลจะย่อยสลายเป็นมีเทนโดยแบคทีเรียภายในระบบในช่วง 92 วันของการทดลอง หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงซึ่งเกิดจากการสะสมของเมทานอลและค่าวีเอฟเอของน้ำทิ้ง ทำให้มีค่าเอสเอ็มเอจาก 1.517 ก.ซีโอดี/ก.วีเอสเอส-วัน เป็น 0.152 ก.วีเอสเอส-วัน ซึ่งเชื่อว่าเกิดจากการที่แบคทีเรียเปลี่ยนอะซิเตทไปเป็นมีเทนได้น้อยลง อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากสารอาหารเสริมที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงทำการสุ่มเชื้อแบคทีเรียมาทดสอบหาค่าเอสเอ็มเอกับสารอาหารเสริม เช่น Fe,Ni และ Co ผลที่ได้พบว่า Fe ช่วยเพิ่มค่าเอสเอ็มเอให้สูงขึ้นได้เร็ว ดังนั้นจึงทำการเติม Fe เพิ่มลงไปเมื่อวันที่ 111 ของการทดลอง ผลที่ได้พบว่ามีการสะสมของอะซิเตทน้อยลงและระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

Bodik และคณะ [12] ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลากักพักน้ำ ต่อการเริ่มต้นของระบบและควบคุมระบบบำบัดให้อยู่ใน สภาวะคงตัวของระบบ UAF (upflow anaerobic filter) และระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์โดยในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียจากชุมชนและมีการเติมกลูโคสและโซเดียมอะซิเตดลงในน้ำเสียชุมชนนี้ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ระบบ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 9 – 23 องศาเซลเซียส และ เวลากักพักน้ำ 6 – 46 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยสำหรับถังปฏิกรณ์

แอนแอโรบิกเอสบีอาร์เท่ากับร้อยละ 88 และระบบ UAF เท่ากับร้อยละ 46 – 92 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลากักพักน้ำ

Najafpour และคณะ[13] ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสเอฟเอฟ (Upflow Anaerobic Sludge Fixed Film,UASFF) ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์แบบตะกอนเม็ด โดยถังปฏิกรณ์ยูเอเอสเอฟเอฟนี้เป็นถังปฏิกรณ์ผสม ที่ด้านบนของถังเป็นยูเอฟเอฟ (Upflow Fixed – Film,UFF) และด้านล่างของถังเป็นยูเอเอสบีโดยวัตถุประสงค์ในการศึกษานี้เพื่อต้องการลดระยะเวลาในการเริ่มเดินระบบให้สั้นลง(ซึ่งระบบยูเอเอสบีจะมีปัญหาในการใช้ระยะเวลาในการเริ่มเดินระบบนานถึง 2 – 4 เดือน และสามารถควบคุมให้มีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำสั้นๆได้ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิที่ 38 องศาเซลเซียส เวลาในการกักเก็บน้ำ 1.5 และ 3 วัน โดยเริ่มอัตราภาระสารอินทรีย์ที่ 2.63 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึง 23.15 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน จากการทดลองพบว่าแบคทีเรียสามารถพัฒนาเป็นตะกอนเม็ดได้อย่างรวดเร็วภายใน 20 วัน ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 1.5 และ 3 วันสามารถกำจัดซีโอดีได้สูงสุด ร้อยละ 89 และ 93 ตามลำดับ และที่อัตราภาระสารอินทรีย์สูงสุดสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.361 ลิตรมีเทนต่อซีโอดีที่ถูกกำจัดไป fixed – film ภายในระบบจะเป็นตัวช่วยให้แบคทีเรียไม่หลุดออกนอกระบบและยังสร้างสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการตะกอนเม็ดของแบคทีเรียด้วย

Parawira และคณะ[14] งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบีโดยบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักเบียร์ โดยใช้ปริมาตรถังปฏิกรณ์ขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร ใช้ระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี โดยมีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ 24 ชั่วโมง วัตถุประสงค์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบยูเอเอสบีโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานหมักเบียร์ เนื่องจากน้ำเสียประเภทนี้มีปริมาณของแข็งและสารอินทรีย์อยู่สูงจึงจำเป็นต้องทำการบำบัดขั้นต้นก่อนที่จะเข้าระบบบำบัดแบบยูเอเอสบี ซึ่งผลการทดลองพบว่าซีโอดีลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์, ปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลงเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์และปริมาณของแข็งนอนก้นลดลงเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ และมีการตรวจพบว่าในน้ำที่ออกจากระบบยูเอเอสบีมีระดับออโตฟอสฟอรัส และไนโตรเจนสูงกว่าในน้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบซึ่งทำให้เป็นการสะสมของสารอาหารในระบบ และจากผลการทดลองปรากฏว่าน้ำเสียที่ออกจากระบบมีคุณภาพน้ำที่สามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้

Kida และคณะ[15] งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความต้องการ Ni^{2+} และ Co^{2+} ที่มีผลต่อกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน และโคเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสร้างมีเทนด้วย โดยระบบไร้อากาศนี้จะใช้น้ำเสียที่มีอะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนและเดินระบบแบบซีเอสทีอาร์ (CSTR) พบว่า Ni^{2+} และ Co^{2+} ที่เติมลงในน้ำเสียสังเคราะห์จะช่วยให้มีโคเอนไซม์ F430 และโคลินอยด์

ในมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น 0.62 ไมโครโมลของนิกเกิลต่อกรัมวีเอสเอส และ 0.67 ไมโครโมลของโคบอลต์ต่อกรัมวีเอสเอส ตามลำดับ และการที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริมดังกล่าวจะไม่พบว่ามีโคเอนไซม์ F430 และโคลินอยด์ในมวลชีวภาพ และแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนก็จะลดลง แสดงให้เห็นว่าระบบมี ความต้องการของ Ni^{2+} และ Co^{2+} สำหรับกระบวนการสร้างมีเทน

Wiegant และคณะ [16] ทำการศึกษาการย่อยสลายด้วยระบบไร้อากาศของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง (14-65 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร) ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก ใช้น้ำเสียจากโรงกลั่นแอลกอฮอล์เป็นตัวอย่างในการทดลอง ทำการทดลองในการป้อนน้ำเสียแบบกึ่งต่อเนื่อง เปรียบเทียบคุณภาพของน้ำออกของการย่อยสลายที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส) กับที่อุณหภูมิมีโซฟิลิก (30 องศาเซลเซียส) ที่ภาระสารอินทรีย์เดียวกัน จากการทดลองพบว่าปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนต่อกิโลกรัมลดลงเกือบเป็นเส้นตรงเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเสีย ซึ่งส่งผลให้ความเข้มข้นของกรดระเหยง่ายสูงขึ้นแสดงว่าความเข้มข้นของกรดระเหยง่ายในน้ำออกขึ้นอยู่กับภาระสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบ แต่ความเป็นพิษของน้ำเสียจากโรงกลั่นแอลกอฮอล์เป็นปัจจัยที่สำคัญมากกว่าภาระสารอินทรีย์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียไปเป็นก๊าซมีเทน

เพ็ญศิริ ประชากิตติกุล [17] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ระดับห้องปฏิบัติการ มีปริมาตร 2 ลิตร โดยแบ่งเป็นการทดลองภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก (55 ° C) และสภาวะมีโซฟิลิก (30±1° C) เดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.5 - 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ระยะเวลากักพักน้ำ 10 วัน เริ่มต้นระบบโดยใส่เชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาจากระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ในรูปเอ็มแอลเอสเอสประมาณ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแต่ละอัตราภาระสารอินทรีย์ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ผลการทดลองที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.5-3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกและมีโซฟิลิกมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ90 ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรถังสูงสุดเท่ากับ 1.29 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ซึ่งสูงกว่าถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิกเล็กน้อยที่มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรถังสูงสุดเท่ากับ 1.23 ลิตรต่อลิตรต่อวัน โดยในปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของทั้งสองถังปฏิกรณ์มีส่วนประกอบของก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 63

บทที่ 3 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยเป็นการศึกษาผลของการเติมสารอาหารเสริม ที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนปาล์ม ที่อุณหภูมิสูง โดยถังปฏิกรณ์ด้วยระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ 2 ลิตร จำนวน 4 ถัง คือ ถังปฏิกรณ์ที่ 1ไม่มีการเติมสารอาหารเสริมอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส, ถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีการเติมสารอาหารเสริมเฉพาะเหล็ก นิเกิล และโคบอลต์ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส, ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่มีการเติมสารอาหารเสริมตามสูตรของ Speece [2] ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสและถังปฏิกรณ์ที่ 4 ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริมที่อุณหภูมิห้อง โดยมีระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปี 2552											ปี 2553
	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค. – ก.ย.
1.ศึกษาทฤษฎี												
2.เตรียมอุปกรณ์												
3.ทำการทดลอง												
4.วิเคราะห์และสรุปผล												

3.2 ตะกอนหัวเชื้อ

ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้นำมาจากถังปฏิกรณ์การทดลองการย่อยสลายน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยระบบยูเอเอสบี ระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการทดลองที่อุณหภูมิห้องและ 55 องศาเซลเซียส โดยการทดลองจะใส่เชื้อตะกอนจุลินทรีย์ลงในถังปฏิกรณ์ความเข้มข้นถังละ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยคุณลักษณะเริ่มต้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

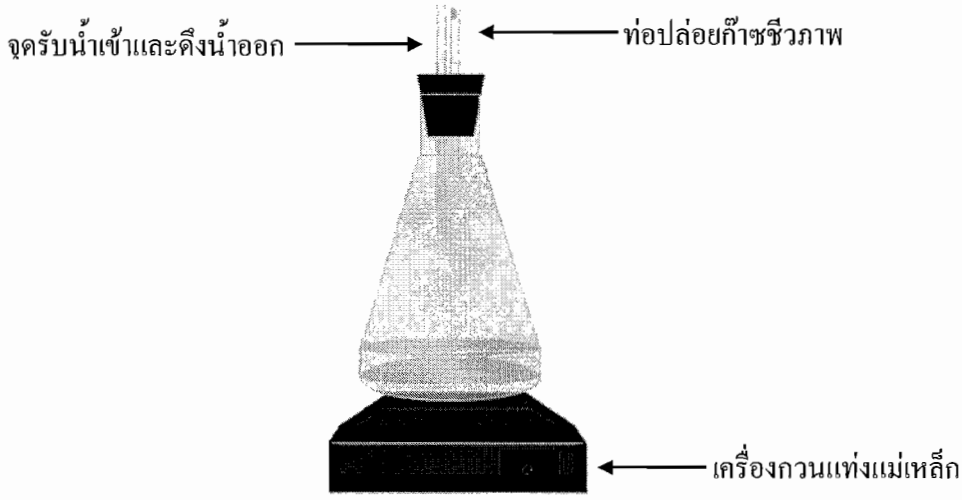
คุณลักษณะของเชื้อ	อุณหภูมิ 30^{o} c	อุณหภูมิ 55^{o} c
ของแข็งทั้งหมด (TS) มิลลิกรัมต่อลิตร	81,000	87,000
ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (TVS) มิลลิกรัมต่อลิตร	49,000	53,000
ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรีย SMA (gCH_4 – COD / gVSS.d)	0.09	0.10

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

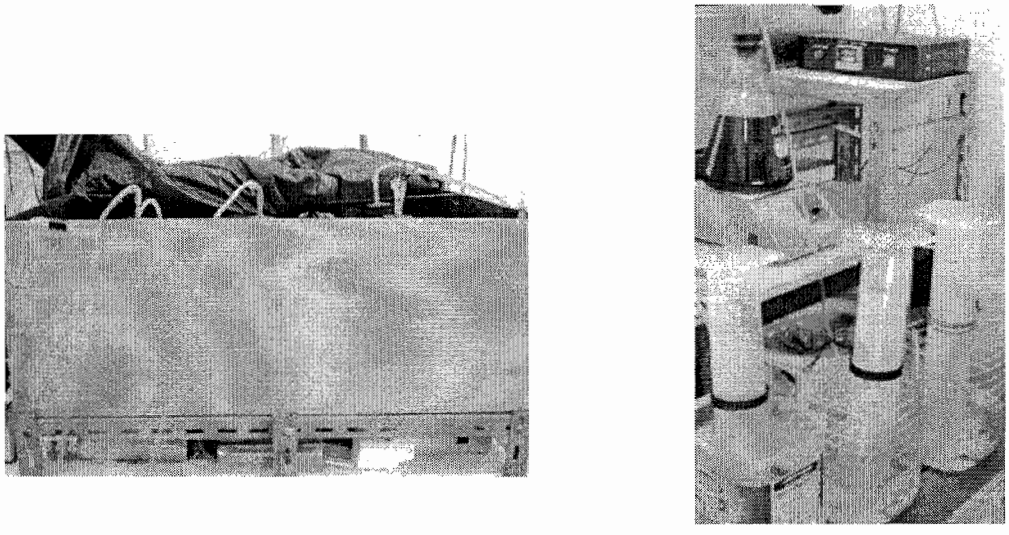
เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ประกอบด้วย อุปกรณ์ต่อถังแบบ Anaerobic Sequencing Batch Reactor และเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.3.1 อุปกรณ์ต่อถังแบบ Anaerobic Sequencing Batch Reactor

ถังปฏิกรณ์แบบ AnSBR ขนาดความจุทดลอง 2 ลิตร จำนวน 4 ถัง
ถังน้ำขนาด 1 ลิตร จำนวน 4 ถัง
เครื่องกวน (Magnetic stirrer) จำนวน 4 เครื่อง
เครื่องควบคุมอุณหภูมิ 1 เครื่อง
อ่างควบคุมอุณหภูมิ 1 เครื่อง
ตัววัดอุณหภูมิ 1 เครื่อง
จุกยาง จำนวน 4 อัน
สายยาง



รูปที่ 3.1 แสดงทิศทางการไหลของถังปฏิกรณ์ระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและอุปกรณ์วัดก๊าซชีวภาพ

3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

1. พีเอชมิเตอร์
2. เครื่องชั่งแบบละเอียด
3. เครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก
4. แท่งแม่เหล็ก
5. เครื่องมือที่ใช้ในการย่อยสลายเพื่อหาค่า TKN (Micro-Kjeldahl, Digestion Unit)
6. โถดูดความชื้น

3.4 สารอาหารเสริม

ปริมาณและชนิดของสารอาหารเสริมที่เติมลงในถังปฏิกรณ์แสดงในตารางที่ 3.3 โดยปริมาณความเข้มข้นของสารอาหารดังกล่าวเพียงพอต่อน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีไม่เกิน 10,000 มก./ล. หากน้ำเสียมีความเข้มข้นของซีโอดีที่สูงกว่า 10,000 มก./ล. ต้องทำการเพิ่มปริมาณสารเคมี

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารอาหารที่เติมให้กับแบคทีเรียในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ [2]

ชนิดของสารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดของสารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)
สารอาหารเสริมหลัก		สารอาหารเสริมรอง	
NH_4Cl	400	NH_4VO_3	0.5
$MgSO_4.7H_2O$	400	$CuCl_2.2H_2O$	0.5
KCl	400	$ZnCl_2$	0.5
$Na_2S.9H_2O$	300	$AlCl_3.6H_2O$	0.5
$CaCl_2.2H_2O$	50	$NaMoO_4.2H_2O$	0.5
$(NH_4)_2HPO_4$	80	H_3BO_3	0.5
		$NiCl_2.6H_2O$	0.5
สารอาหารเสริมรอง		$NaWO_4.2H_2O$	0.5
$FeCl_2.4H_2O$	40	Na_2SeO_4	0.5
$CoCl_2.6H_2O$	10		
KI	10		
$(NaPO_3)_6$	10		
$MnCl_2.4H_2O$	0.5		

3.5 พารามิเตอร์ในการทดลองและวิธีการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

วิธีการวิเคราะห์น้ำเสียจากกากตะกอนปาล์ม และน้ำทิ้งจากถังปฏิกรณ์ ค่าที่ทำการวิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ [18]

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์	จุดเก็บน้ำตัวอย่าง
1. ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids,SS)	Gravimetric Method (Glass Fiber GC-50 size 47 mm)	1 ครั้ง/สัปดาห์	น้ำออก
2. ของแข็งแขวนลอยระเหย (Mixed liquorvolatile suspended solids,VSS)	Gravimetric Method (Glass Fiber GC-50 size 47 mm)	1 ครั้ง/ 2 สัปดาห์	ในถังปฏิกรณ์ , น้ำออก
3.ของแข็งระเหย (TVS)	Gravimetric Method (Glass Fiber GC-50 size 47 mm)	2ครั้ง/การทดลอง	ในถังปฏิกรณ์
4. ซีโอดี (COD)	Close Reflux and Titrimetic Method	1 ครั้ง/สัปดาห์	น้ำเข้า , น้ำออก
5. ไนโตรเจน (TKN)	Micro-Kjeldahl Method	1 ครั้ง/สัปดาห์	น้ำเข้า , น้ำออก
6. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus)	Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method	1 ครั้ง/สัปดาห์	น้ำเข้า , น้ำออก
7. กรดระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA)	Titrimetic Method	1 ครั้ง/สัปดาห์	น้ำออก
8. ความเป็นด่างทั้งหมด (Alkalinity)	Titrimetic Method	1 ครั้ง/สัปดาห์	น้ำออก
9. พีเอช	Potentiometric Method กระดาษลิตมัส	1 ครั้ง/สัปดาห์ ทุกวัน	ในถังปฏิกรณ์ , น้ำออก
10. เอสเอ็มเอ (SMA)	Methanogenic activity test	2ครั้ง/การทดลอง	ในถังปฏิกิริยา
11. ปริมาณก๊าซชีวภาพ	แทนที่น้ำ	ทุกวัน	-
12. สัดส่วนก๊าซมีเทน	Gas Chomatography	1 ครั้ง/ ภาระสารอินทรีย์	-

3.6 การดำเนินการในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์

ในการทดลองนี้มีถังปฏิกรณ์ทั้งหมด 4 ถัง โดยแบ่งการทดลองตามที่แสดงในตารางที่ 3.5 และตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 การดำเนินการในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่แต่ละภาระสารอินทรีย์

ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	การดำเนินงานในถังปฏิกรณ์			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ($55^{o}c$)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ($55^{o}c$)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ($55^{o}c$)	ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (RT)
0.5	ไม่เติมสารอาหารเสริม	เติมสารอาหารเสริมเฉพาะเหล็ก ,นิเกิลและโคบอลต์	เติมสารอาหารเสริม Speece	ไม่เติมสารอาหารเสริม
1				
2				
3				

ตารางที่ 3.6 การควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆในการทดลอง

ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ซีโอดีน้ำเข้า (มก/ล)	ระยะเวลากักเก็บน้ำ (วัน)	ปริมาตรถังปฏิกรณ์ (ล)	ปริมาตรการป้อนน้ำเสียและระบายน้ำใสออกจากถังปฏิกรณ์ใน 1 วัน (มล)
0.5	5,000	10	2	200
1	10,000	10	2	200
2	20,000	10	2	200
3	30,000	10	2	200

การทดลองทำการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 3.6 ซึ่งทำการทดลองในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ ควบคุมวัฏจักรการทำงาน 24 ชั่วโมง คือการดึงน้ำส่วนใสและป้อนน้ำเสีย 1 ชั่วโมง, การทำปฏิกิริยา 20 ชั่วโมง และการตกตะกอน 3 ชั่วโมง โดยในแต่ละวัฏจักรจะมีปริมาตรการป้อนน้ำเสียและระบายน้ำใสออกจากถังปฏิกรณ์ 200 มิลลิลิตร และควบคุมระยะเวลากักเก็บน้ำในระบบ 10 วัน

3.7 การศึกษาถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากกากตะกอนปาล์ม โดยวิธีบีเอ็ม

การศึกษาค่าบีเอ็มพีเป็นการทดลองเพื่อหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียซึ่งอยู่ในรูปปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมซีโอดีของน้ำเสียทั้งหมด ในการหาค่าบีเอ็มพีของของเสียกากตะกอนปาล์มนี้แบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ การทดลองที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิมีโซฟิลิก (30 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างที่เป็นชุดควบคุมของทั้งสองอุณหภูมิซึ่งจะใส่อาหารเสริมและตะกอนจุลินทรีย์เหมือนกับตัวอย่างอื่น แต่จะไม่มีการเติมของเสียกากตะกอนปาล์มลงไป เพื่อให้ทราบถึงปริมาณก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในตะกอนจุลินทรีย์โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดควบคุมนี้จะถูกหักออกจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดทดลอง ซึ่งแต่ละตัวอย่างจะทำการทดลองแบบสองซ้ำ ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างลงในขวดซีรัมขนาด 120 มิลลิลิตร โดยปริมาตรของเสียในขวด 60 มิลลิลิตร ตะกอนจุลินทรีย์ 10 มิลลิลิตร และสารอาหารเสริมสูตร Speece [2]
2. ไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากขวดด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน ในอัตราส่วน 30 ต่อ 70 เป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงปิดขวดและครอบด้วยฝาอลูมิเนียม
3. วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยจะวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจนเข้าสู่สภาวะ คงตัว คือ ไม่มีก๊าซเกิดขึ้นเพิ่ม การวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นกระทำด้วยการแทนที่น้ำ
4. เมื่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่แล้ว จะนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์หาสัดส่วนของก๊าซมีเทน
5. นำค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นไปหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสีย

3.8 การศึกษาความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์ โดยวิธีเอสเอ็มเอ

การทดลองนี้ทำเพื่อศึกษาความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์ ในตอนก่อนเริ่มทำการทดลอง และสิ้นสุดการทดลองในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ ในการทำการทดลองเอสเอ็มเอนี้จะแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ การทดลองที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิมีโซฟิลิก (30 องศาเซลเซียส) โดยใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งซีโอดี โดยทำการแปรผันความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่ค่าต่าง ๆ โดยจะมีชุดควบคุมเพื่อใช้ปรับปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในตะกอนจุลินทรีย์ โดยแต่ละตัวอย่างจะทำการทดลองสองซ้ำ

บทที่ 4 ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนปาล์ม ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรก เป็นการศึกษาหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของกากตะกอนปาล์มโดยวิธีบีเอ็มพี ส่วนที่สอง เป็นการศึกษาผลของสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์ม ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยดำเนินการทดลองในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ที่มี 1) การเติมสารอาหารเสริมตามสูตรของ Speece [2], 2) เติมสารอาหารเสริมเฉพาะเหล็ก นิเกิล และโคบอลต์, 3) ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริม และ 4) ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่มีการเติมสารอาหาร และส่วนที่สามเป็นการศึกษาคุณภาพของตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการทดลองโดยวิธีเอสเอ็มเอ โดยทำการศึกษา 2 ครั้ง คือ ตอนเริ่มต้นและสิ้นสุด การทดลองในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ ซึ่งงานวิจัยนี้มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของกากตะกอนปาล์ม

จากการวิเคราะห์ลักษณะของกากตะกอนปาล์ม ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า กากตะกอนปาล์มที่ใช้ในการทดลองมีค่าซีโอดีเท่ากับ 1,073 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง, มีค่าของแข็งเท่ากับร้อยละ 25, ความชื้นเท่ากับร้อยละ 75, ฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับ 5.95 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง มีค่าทีเคเอ็นเท่ากับ 228 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งและค่าพีเอช มีค่าเท่ากับ 5 – 6

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของกากตะกอนปาล์ม

พารามิเตอร์	ค่าที่วิเคราะห์ได้
TCOD (mg/g dryweight)	1,073
TCOD * (mg/L)	2,500
SCOD * (mg/L)	825
% solid	25 %
% moisture	75 %
TP (mg/ g dryweight as P)	5.95
TKN (mg/ g dryweight as N)	228
pH *	5 – 6
BMP (ml.CH_4/ gCODadd)	178 (อุณหภูมิห้อง)
	192 (55 องศาเซลเซียส)

หมายเหตุ : * กากตะกอนปาล์มที่ผ่านการผสมน้ำในอัตราส่วนกากตะกอนปาล์ม 1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร

4.2 ผลการทดลองบีเอ็มพี

เพื่อให้ทราบถึงกากตะกอนปาล์มที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ว่าสามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศได้ดีเพียงใด จึงได้ทำการศึกษาถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากกากตะกอนปาล์มของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยวิเคราะห์จากปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นต่อกรัมซีโอดีทั้งหมด โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิมีโซฟิลิก (อุณหภูมิห้อง) และอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส) การทดลองนี้ทำการวัดก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ จนเข้าสู่สภาวะการเกิดก๊าซคงที่ จากนั้นเมื่อนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่ช่วงสภาวะคงที่มาวิเคราะห์หาสัดส่วนของก๊าซมีเทนทั้งหมดด้วยเครื่อง Gas Chromatography ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของการทดลองบีเอ็มพี

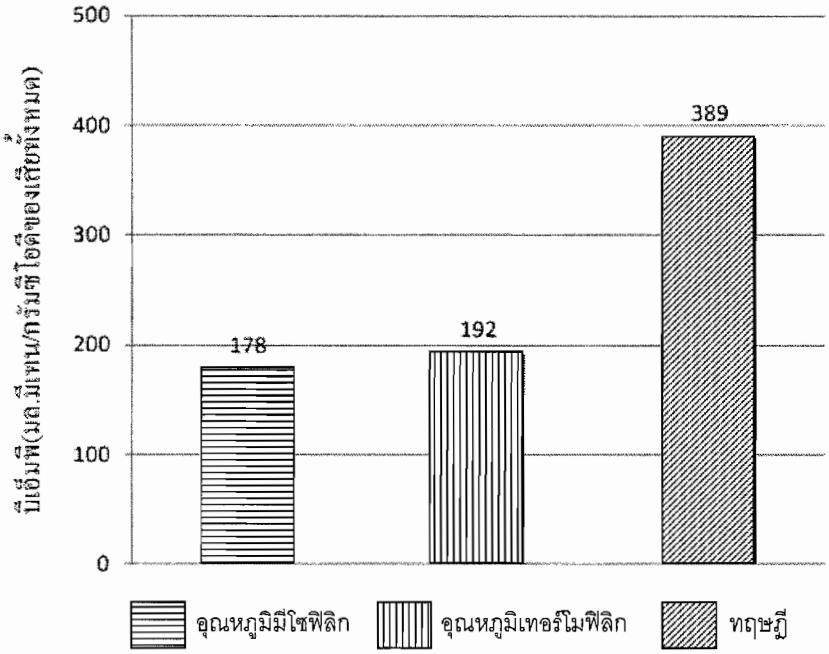
คุณสมบัติของน้ำเสีย	อุณหภูมิมีโซฟิลิก (RT)	อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55 °C)
ซีโอดีเริ่มต้น (กรัมซีโอดี)	0.26	0.26
ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดจากการคำนวณทางทฤษฎี (มิลลิลิตรมีเทน)	101.40	101.40
ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดจากการทดลอง (มิลลิลิตรมีเทน)	46.51	50.10
ร้อยละของก๊าซมีเทนในช่วงสภาวะคงตัว	68	69
ศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทนจากการคำนวณทางทฤษฎี (มิลลิลิตรมีเทน/กรัมซีโอดีของเสียทั้งหมด)	388.46*	388.46*
ศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทนจากการทดลอง (มิลลิลิตรมีเทน/กรัมซีโอดีของเสียทั้งหมด)	178	192

หมายเหตุ : * ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิมีโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดร้อยละ 68 และ 69 ตามลำดับ ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดของการทดลองที่อุณหภูมิมีโซฟิลิกและอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกมีค่าเท่ากับ 46.51 และ 50.10 มิลลิลิตรมีเทน คิดเป็นศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทน เท่ากับ 178 และ 192 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมด ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปริมาณก๊าซมีเทนที่คำนวณได้จากทางทฤษฎีที่สามารถคำนวณได้จากค่า 388.46 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสอยู่ประมาณร้อยละ 50

ค่าศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทนหรือค่าบีเอ็มพีจะแสดงในรูปของปริมาณ ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมซีโอดีของของเสียที่ถูกเติมลงไป ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิลิตรก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดีของเสียที่ถูกเติม ในการทดลองนี้ค่าบีเอ็มพีจะแสดงในหน่วยของมิลลิลิตรก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดีของเสียทั้งหมด

รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าบีเอ็มพีของการทดลองที่อุณหภูมิมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก พบว่าน้ำเสียจากกากตะกอนปาล์มมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนหรือค่าบีเอ็มพีเท่ากับ 178 และ 192 มิลลิลิตรก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมด สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก ตามลำดับ แสดงว่ากากตะกอนปาล์มสามารถถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศ ได้ประมาณร้อยละ 40- 50 โดยที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกมีการย่อยสลายได้ดีกว่าอุณหภูมิมีโซฟิลิก



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าบีเอ็มพีของการทดลองที่อุณหภูมิมีโซฟิลิก, เทอร์โมฟิลิก และค่าทางทฤษฎี

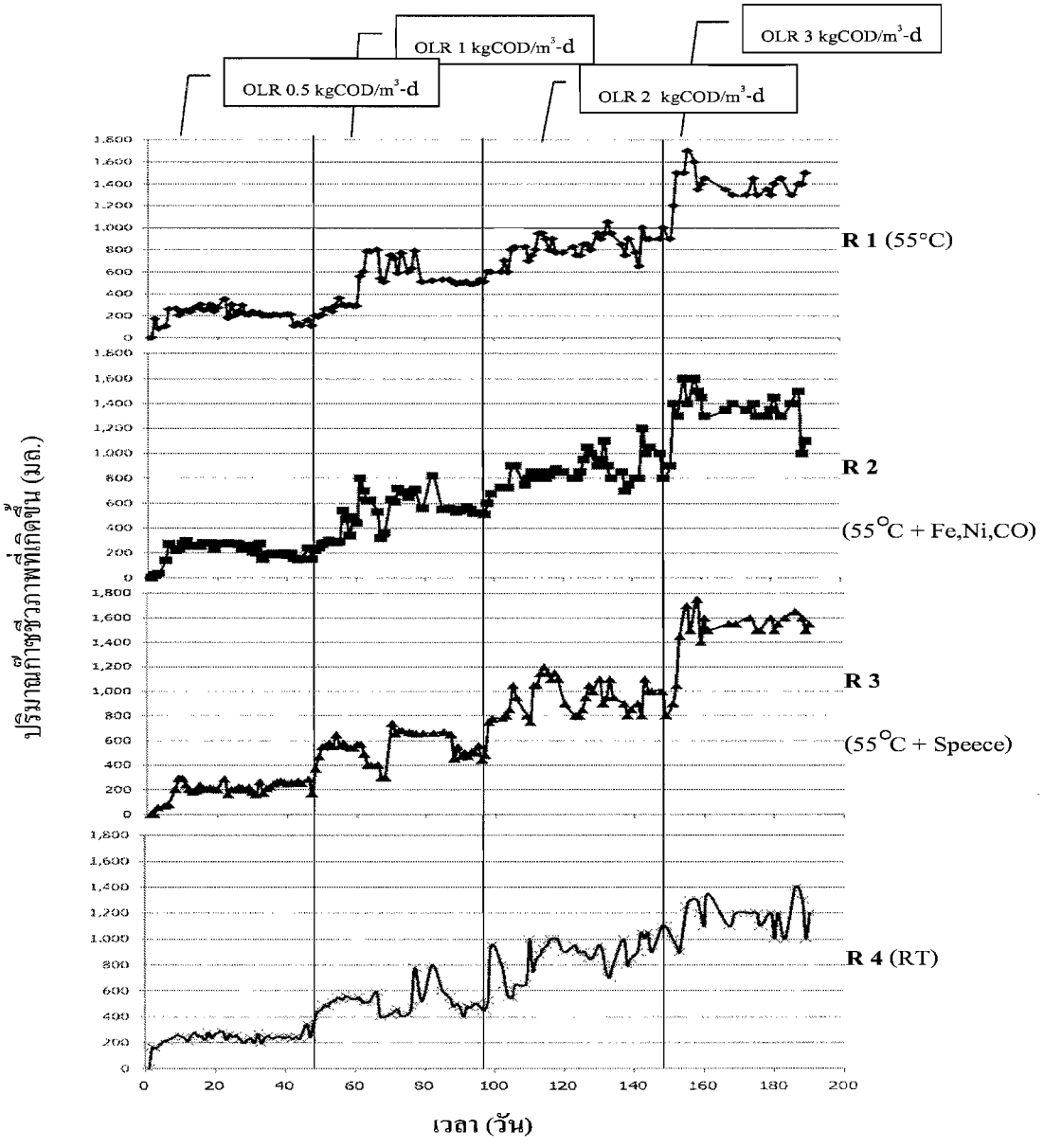
4.3 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนปาล์มโดยระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์

เนื่องจากกากตะกอนปาล์มที่ใช้เป็นของเสียในการทดลองนี้มีค่าซีโอดีเท่ากับ 1,073 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และ การพิจารณาประสิทธิภาพของระบบจากความสามารถในการกำจัดซีโอดีเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถแสดงถึงประสิทธิภาพของ ระบบที่แท้จริงได้ เนื่องจากจะมีซีโอดีส่วนที่ไม่ย่อยสลายตกค้างอยู่ในระบบ และเนื่องจากซีโอดีที่ถูกกำจัดในระบบไม่ใช้อากาศส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไป

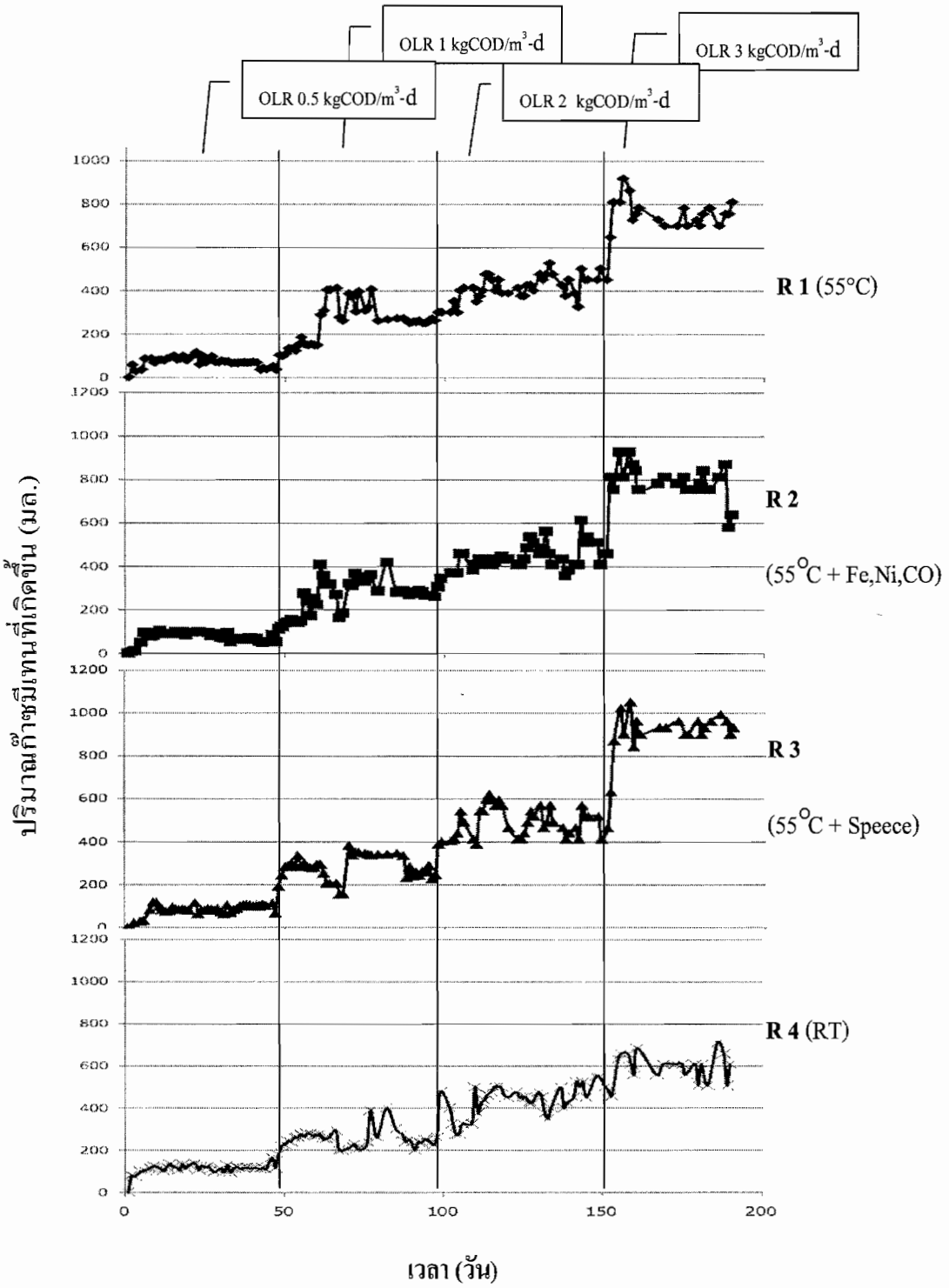
อยู่ในรูปของก๊าซชีวภาพ ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพของระบบในการทดลองนี้จึงเน้นที่การผลิตก๊าซชีวภาพเป็นสำคัญ

4.3.1 ก๊าซชีวภาพและร้อยละก๊าซมีเทน

ผลการทดลองในรูปที่ 4.2 แสดงถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับซีโอดีที่ถูกย่อยสลายไป โดยรูปที่ 4.3 แสดงถึงปริมาณก๊าซมีเทน (คำนวณ) และ ตารางที่ 4.4 แสดงถึงสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ที่สภาวะคงตัว ดังนั้นจึงนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมาพิจารณาประสิทธิภาพของระบบโดยตลอดการทดลองทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันด้วยวิธีแทนที่น้ำ



รูปที่ 4.2 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพในแต่ละวันที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ



รูปที่ 4.3 ปริมาณการผลิตมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (คำนวณ)

4.3.1.1 เปรียบเทียบผลของการเติมสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

สารอาหารเสริมที่ใช้ในการทดลองเป็นไปตามสูตรของสารอาหารเสริมหลัก และสารอาหารเสริมรองตามสูตรของ Speece [2] โดยการเติมสารอาหารเสริมในการทดลองคือ ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกที่ 1

ไม่มีการเติมสารอาหารเสริม, ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกที่ 2 มีการเติมสารอาหารเสริมเฉพาะเหล็ก นิเกิล และโคบอลต์, ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกที่ 3 มีการเติมสารอาหารเสริมและถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิกที่ 4 ไม่มีการเติมสารอาหารเสริมตั้งแต่ต้นจนสิ้นสุดการทดลอง

จากรูปที่ 4.2 พบว่าทุกถังปฏิกรณ์มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันสูงขึ้นตามภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้น และจากตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นตารางปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อในแต่ละถังปฏิกรณ์มีค่าซีโอดีในน้ำออกใกล้เคียงกันในแต่ละภาระสารอินทรีย์ โดยเปรียบเทียบที่ภาระสารอินทรีย์ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะพบว่าค่าของถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 มีค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัวเฉลี่ย เท่ากับ 0.13 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 12 – 26 ของการทดลอง และ 0.13 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 36 – 46 ของการทดลองตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.12 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 28 – 41 และ 0.12 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 34 – 47 ของการทดลองตามลำดับ แต่เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นของระบบแบคทีเรียยังอยู่ในช่วงปรับตัวทำให้ไม่เห็นความแตกต่างในภาระสารอินทรีย์นี้ และเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่สภาวะคงตัว คือเท่ากับ 0.33 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 71 – 87 ของการทดลอง ซึ่งสูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 4 ที่มีค่าเท่ากับ 0.25 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 89 – 97 ของการทดลอง 0.26 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 85 – 97 ของการทดลอง และ 0.27 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 53 – 64 ของการทดลอง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ถังปฏิกรณ์ที่เป็นเทอร์โมฟิลิก จะพบว่า การที่มีการเติมสารอาหารเสริม ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีประสิทธิภาพมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริม ถึงแม้ว่าในกรณีที่ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีการเติมสารอาหารเสริมเฉพาะเหล็ก นิเกิล และโคบอลต์ ก็พบว่ามีปริมาณก๊าซชีวภาพมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริม เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่สภาวะคงตัว คือเท่ากับ 0.56 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 111 – 118 ของการทดลอง ซึ่งสูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 4 ที่มีค่าเท่ากับ 0.40 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 118 – 128 ของการทดลอง, 0.42 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 110 – 125 ของการทดลอง และ 0.45 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 120 – 131 ของการทดลอง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ถังปฏิกรณ์ที่เป็นเทอร์โมฟิลิก จะพบว่า การที่มีการเติมสารอาหารเสริม ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมีประสิทธิภาพมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริม ถึงแม้ว่าในกรณีที่ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีการเติมสารอาหารเสริมเฉพาะเหล็ก นิเกิล และโคบอลต์ ก็พบว่ามีปริมาณก๊าซชีวภาพมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริม เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์สูงสุดที่ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ยังคงพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่สภาวะคงตัวสูงที่สุด คือเท่ากับ 0.78 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 160 – 190 ของการทดลอง ซึ่งสูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 4 ที่มีค่าเท่ากับ

0.69 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 159 – 175 ของการทดลอง, 0.68 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 160 – 186 ของการทดลอง และ 0.61 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ในวันที่ 155 – 173 ของการทดลอง ตามลำดับ ซึ่งที่ภาระสารอินทรีย์สุดท้ายนี้ ถังปฏิกรณ์ที่ 4 มีค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัวน้อยที่สุด เนื่องจากเมื่อภาระสารอินทรีย์สูงขึ้น และของเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นกากตะกอนปาล์มที่นำมาผสมน้ำ ทำให้มีตะกอนมาก ทำให้ขั้นตอนการบำบัดน้ำส่วนใสออกจากระบบจะมีตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกมามากด้วยเช่นกัน และเนื่องจากถังปฏิกรณ์ที่เป็นเทอร์โมฟิลิกมีการควบคุม อุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีอุณหภูมิเป็นเหมือนการช่วยในการบำบัดด้วยทำให้ตะกอนที่สะสมอยู่ในระบบถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ณ ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัว

ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น(ลิตร/ลิตร-วัน)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ($55^{o}C$)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ($55^{o}C$+Fe,Ni,CO)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ($55^{o}C$ + Speece)	ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (RT)
0.5	0.11	0.13	0.13	0.12
1	0.25	0.26	0.33	0.27
2	0.40	0.42	0.56	0.45
3	0.69	0.68	0.79	0.61

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ณ ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัว

ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ร้อยละของก๊าซมีเทน			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ($55^{o}C$)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ($55^{o}C$+Fe,Ni,CO)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ($55^{o}C$ + Speece)	ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (RT)
0.5	31.33	38.78	40.42	46.67
1	51.67	51.01	51.74	53.24
2	50.38	51.72	51.76	50.12
3	54.30	57.77	60.22	50.69

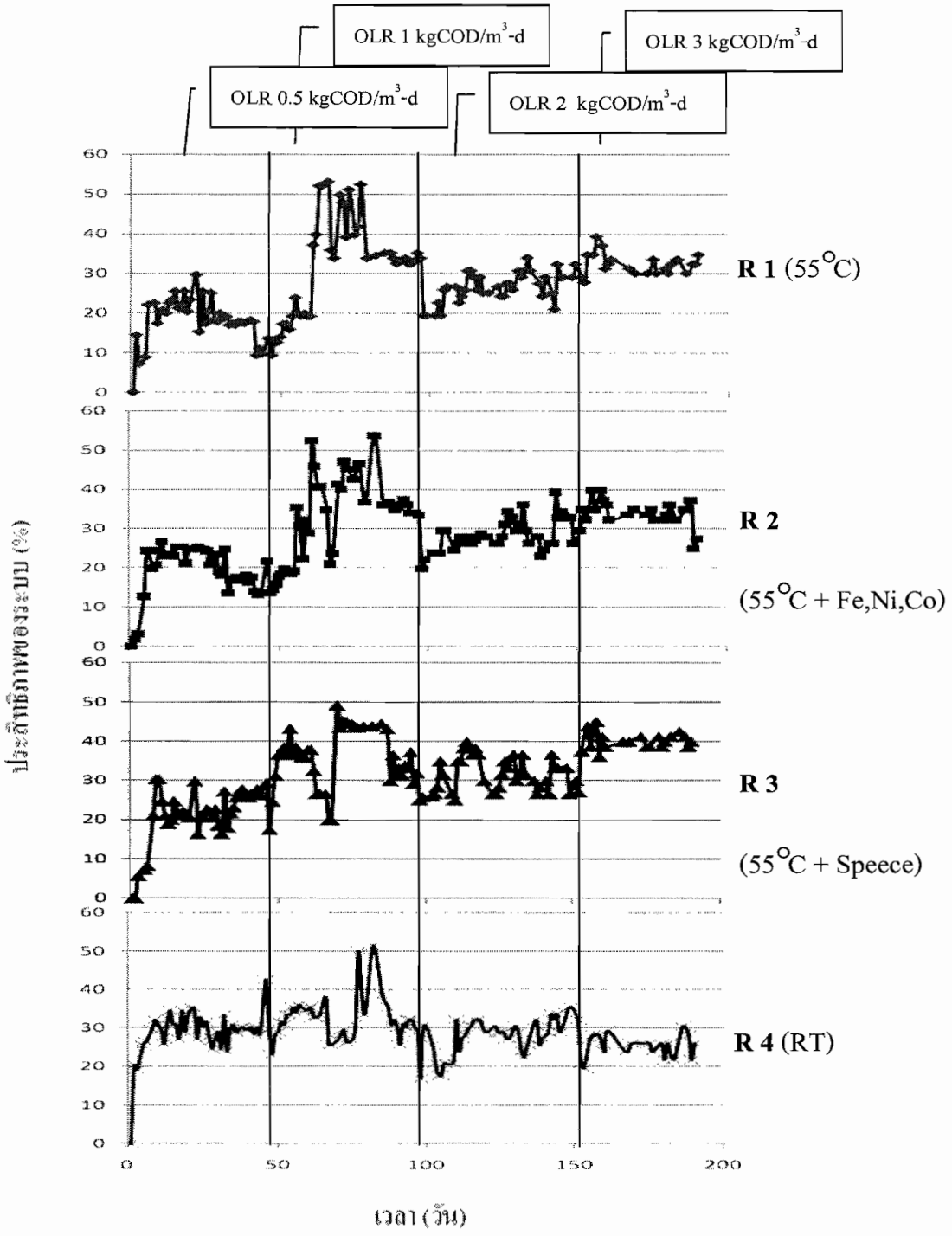
เมื่อนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์หาสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Gas Chromatography ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.3 ปริมาณการผลิตมีเทนที่เกิดขึ้นแต่ละวันที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ และตารางที่ 4.4 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ณ ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่สภาวะคงตัว จากตารางที่ 4.4 จะพบว่าที่ภาระสารอินทรีย์ที่ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ทำการวัดสัดส่วนของก๊าซมีเทนในวันที่ 35 ของการทดลอง โดยเมื่อพิจารณาที่

ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก ถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นร้อยละ 38.78 และ 40.42 ซึ่งมีค่าไม่ต่างกันมากนัก และมีค่ามากกว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นร้อยละ 31.33 เนื่องมาจากการที่ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ไม่ได้มีการเติมสารอาหารเสริมเป็นผลให้มีการปรับตัวต่อกากตะกอนปาล์มที่ใช้เป็นของเสียได้ช้ากว่า

เมื่อพิจารณาที่ความแตกต่างด้านอุณหภูมิ ถังปฏิกรณ์ที่ 4 ที่เป็นมีโซฟิลิก มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงกว่าทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์ เนื่องจากในถังปฏิกรณ์ที่ 4 มีการหลุดของตะกอนจุลินทรีย์ที่เป็นแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนน้อยกว่าทุกถังปฏิกรณ์ตามหัวข้อที่ 4.5.1 และเป็นช่วงเริ่มแรกของระบบเกิดจากจุลินทรีย์ก่อนนำมาใช้ในถังปฏิกรณ์ที่ 4 เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องอยู่แล้ว ดังนั้นจุลินทรีย์จึงปรับตัวเข้ากับอุณหภูมิได้อยู่แล้ว และเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทำการวัดสัดส่วนของก๊าซมีเทนในวันที่ 85 ของการทดลองได้สัดส่วนของก๊าซมีเทนใกล้เคียงกันทั้ง 4 ถังปฏิกรณ์ คือเท่ากับร้อยละ 51.67, 51.01, 51.74 และ 53.24 ตามลำดับ เนื่องจากถังปฏิกรณ์ที่ 1,2 และ 3 มีการปรับตัวกับอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส) จึงทำให้มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์ที่ 4 และเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทำการวัดสัดส่วนของก๊าซมีเทน ในวันที่ 118 ของการทดลองได้สัดส่วนของก๊าซมีเทนใกล้เคียงกันทั้ง 4 ถังปฏิกรณ์ คือเท่ากับร้อยละ 50.38, 51.72, 51.76 และ 50.12 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์สูงสุดที่ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันทำการวัดในวันที่ 167 ของการทดลอง สัดส่วนของก๊าซมีเทนใน ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกและมีการเติมสารอาหารเสริมนั้น มีค่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 60.22 และในถังปฏิกรณ์ที่ 1,2 และ 4 มีสัดส่วนก๊าซมีเทนเท่ากับร้อยละ 54.30, 57.77 และ 50.69 ตามลำดับ เนื่องจากจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 มีการได้รับสารอาหารเสริมทำให้ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 4 ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริม

4.3.2 ประสิทธิภาพของระบบ

เนื่องจากกากตะกอนปาล์มซึ่งเป็นของเสียที่ใช้ป้อนเข้าสู่ระบบในการทดลองนี้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็งแขวนลอยที่ไม่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ยาก ซึ่งส่วนหนึ่งจะถูกย่อยสลายได้ก๊าซชีวภาพและบางส่วนที่ไม่ย่อยสลายเกิดการสะสมของส่วนในระบบ ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบจึงพิจารณาจากซีโอดีที่ย่อยสลายได้และเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งก๊าซมีเทนนับเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบ โดยก๊าซมีเทนที่ได้ปริมาตร 388.46 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะสมมูลกับสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดไปปริมาณ 1 กรัม [2] จากสัดส่วนนี้สามารถนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบได้ ซึ่งค่าประสิทธิภาพของระบบที่ได้นี้นับว่าเป็นพารามิเตอร์ที่เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพของระบบโดยคำนวณจากปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบโดยคำนวณจากปริมาณก๊าซมีเทนทีภาระสารอินทรีย์ต่างๆและตารางที่ 4.5 แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบโดยคำนวณจากปริมาณก๊าซมีเทนที่สภาวะคงตัว ภาระสารอินทรีย์เริ่มแรกที่ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เมื่อพิจารณาที่ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก พบว่าถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 27.4 ซึ่งสูงกว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ไม่มีการเติมสารอาหารอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างด้านอุณหภูมิ

ถังปฏิกรณ์ที่ 4 ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริมยังคงมีประสิทธิภาพดีกว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 อาจเป็นผลมาจากการที่เป็นช่วงเริ่มต้นของระบบการทดลอง เชื้อที่นำมาใช้ในระบบนั้นยังไม่ชินต่ออุณหภูมิที่เทอร์โมฟิลิก เป็นผลให้ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีประสิทธิภาพของระบบช่วงเริ่มแรกน้อยกว่าในถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิก

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพของระบบโดยคำนวณจากปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว

ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน(ร้อยละ)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ($55^{o}C$)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ($55^{o}C$+Fe,Ni,CO)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ($55^{o}C$ + Speece)	ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (RT)
0.5	17.8	23.8	27.4	29.4
1	32.6	34.4	44.0	34.2
2	26.1	27.3	37.2	28.7
3	31.7	34.8	40.1	26.6

เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เมื่อพิจารณาถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก พบว่าถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีประสิทธิภาพของระบบโดยคำนวณจากปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัวสูงที่สุดคือ ร้อยละ 44.0 และสูงอย่างมีนัยสำคัญ โดยสูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 ที่มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 32.6 และ 34.4 ตามลำดับ จากการที่แบคทีเรียในระบบมีการปรับตัวเข้ากับอุณหภูมิแล้วนั้น มีผลให้ถังปฏิกรณ์ที่เป็นเทอร์โมฟิลิกมีค่าประสิทธิภาพของระบบมากขึ้น และจากการที่ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่มีการเติมสารอาหารเสริม Speece นั้นทำให้แบคทีเรียสามารถปรับตัวได้ดีกว่าในถังปฏิกรณ์อื่น และเมื่อพิจารณาความแตกต่างด้านอุณหภูมิ ถังปฏิกรณ์ที่ 4 ที่เป็นมีโซฟิลิกและไม่มีการเติมสารอาหารเสริมมีค่าประสิทธิภาพของระบบมีค่าร้อยละ 34.2 ซึ่งใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 อาจเป็นผลจากการที่ถังปฏิกรณ์ที่ 4 นั้น แบคทีเรียปรับตัวต่ออุณหภูมิแล้วตั้งแต่เริ่มทำการทดลองแต่ไม่ได้มีการกระตุ้นให้ทำงานได้ดีด้วยการเติมสารอาหารเสริม จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นไม่มาก

เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทุกถังปฏิกรณ์ มีประสิทธิภาพของระบบลดลงเท่ากับร้อยละ 26.1, 27,3, 37.2 และ 28.7 ตามลำดับ อาจเป็นผลจากมีการปรับสภาวะต่อสารอินทรีย์ที่สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์ที่ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่ 3 นั้นมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 40.1 ซึ่งสูงกว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 4 ที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 31.7, 34.8 และ 26.6 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ถังปฏิกรณ์ที่ 4 ที่มีค่าร้อยละประสิทธิภาพของระบบน้อยที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับภาระสารอินทรีย์แรกที่ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อ

ลูกบาศก์เมตรต่อวันนั้น ซึ่งแสดงว่าการเติมสารอาหารเสริมและกระตุ้นปฏิกิริยาโดยอุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ และจากการการทดลองพบว่าที่ภาระสารอินทรีย์ที่ 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันนั้นมีค่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าภาระสารอินทรีย์อื่น

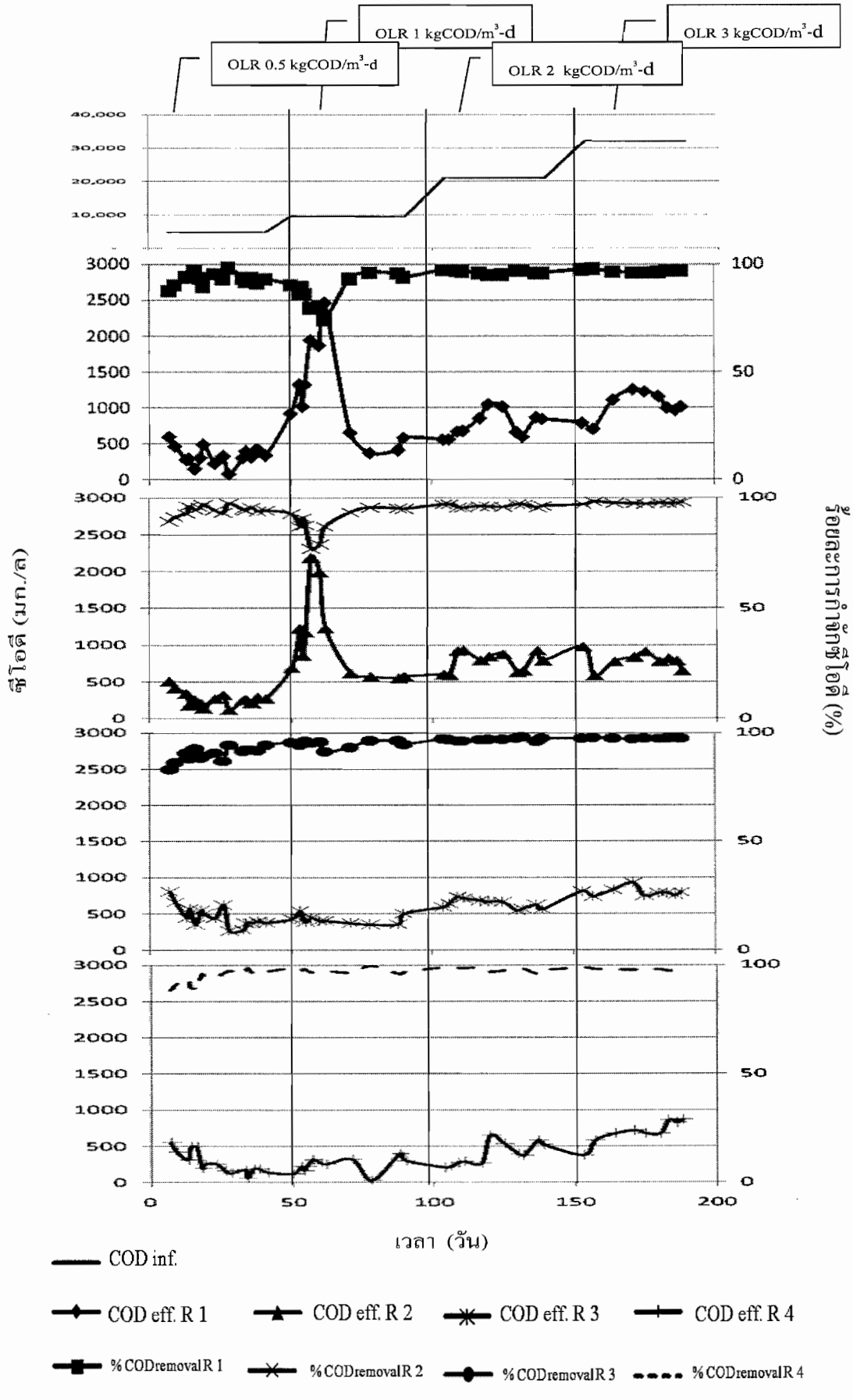
4.3.3 ซีโอดี

ค่าซีโอดีของน้ำที่ออกจากระบบ เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่แสดงความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ของระบบ ซึ่งในการทดลองนี้ค่าซีโอดีละลายที่ออกจากระบบจะแสดงถึงความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ได้เพียงบางส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้เท่านั้น เนื่องจากจะมีกากตะกอนปาล์มบางส่วนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ และยังตกค้างอยู่ในถังปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 4.5 แสดงถึงค่าซีโอดีของน้ำเข้า, ซีโอดีน้ำออก (กรอง), ร้อยละการกำจัดซีโอดี ที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในแต่ละถังปฏิกรณ์

จากผลการทดลองพบว่าช่วงเริ่มต้นของการทดลองเมื่อรับภาระสารอินทรีย์ที่ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งเป็นช่วงการปรับสภาพของตะกอนจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับน้ำเสียและการปรับให้ชินต่อสภาพอุณหภูมิ ถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 มีค่าซีโอดีละลายในน้ำออกใกล้เคียงกันซึ่งน้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งจะสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 90 แต่เมื่อเปรียบเทียบถังปฏิกรณ์ที่เป็นเทอร์โมฟิลิกและมีโซฟิลิก จะพบว่าในจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิกซึ่งชินต่ออุณหภูมิอยู่แล้วจึงมีค่าซีโอดีในน้ำออกน้อยกว่าถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก ซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.3.2 ประสิทธิภาพของระบบ

เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 มีค่าซีโอดีสูงในช่วงเริ่มแรกของภาระสารอินทรีย์อาจเกิดจากการที่มีการเพิ่มภาระสารอินทรีย์และเมื่อจุลินทรีย์ปรับตัวแล้วค่าซีโอดีละลายก็จะลดลงโดยเทียบกับในถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่มีการเติมสารอาหารเสริม Speece นั้นทำให้จุลินทรีย์ในระบบมีการปรับตัวได้ดีกว่าทำให้เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์ระบบจึงไม่มีปัญหา ซึ่งในภาระสารอินทรีย์ที่ 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2, และ 3 มีค่าซีโอดีละลายในน้ำออกที่สภาวะคงตัวใกล้เคียงกันซึ่งน้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตรและในถังปฏิกรณ์ที่ 4 มีค่าซีโอดีละลายในน้ำออกเฉลี่ยน้อยกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 90 อาจเกิดจากการที่กากตะกอนปาล์มละลายอยู่ในน้ำได้น้อยเมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก

ภาระสารอินทรีย์ที่ 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 มีค่าซีโอดีในน้ำออกที่สภาวะคงตัวเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือน้อยกว่า 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 95 และถังปฏิกรณ์ที่ 4 มีค่าซีโอดีในน้ำออกสภาวะคงตัวเฉลี่ยเท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 98 ที่ภาระสารอินทรีย์สูงสุด 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีค่าซีโอดีในน้ำออกที่สภาวะคงตัวเฉลี่ยคือน้อยกว่า 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 96 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 มีค่าซีโอดีในน้ำออกที่สภาวะคงตัวเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือน้อยกว่า 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 97 และถังปฏิกรณ์ที่ 4 มีค่าซีโอดีในน้ำออกที่สภาวะคงตัวเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือน้อยกว่า 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 97 แต่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่มีการเติมสารอาหารเสริม Speece มีผลต่อสมรรถนะของระบบและในถังปฏิกรณ์ที่ 2 ที่มีการเติมสารอาหารเสริมเฉพาะ เหล็ก นิเกิลและ โคบอลต์จะมีแนวโน้มที่ค่อยๆลดลงซึ่งเป็นผลจาการเติมสารอาหารเสริมแต่ช้ากว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 3 ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่ 4 จะพบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อภาระสารอินทรีย์สูงขึ้น

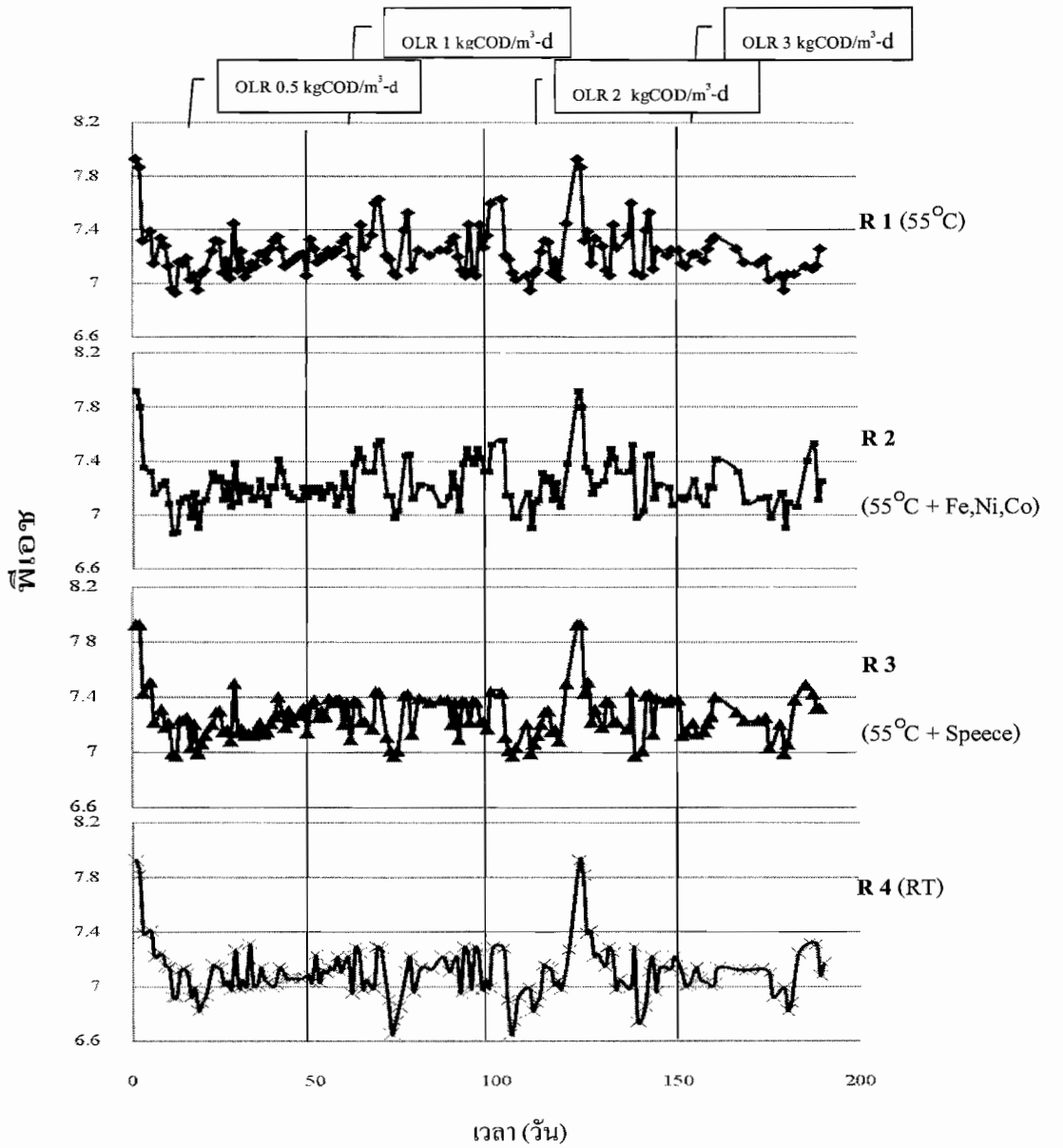


รูปที่ 4.5 ค่าซีโอดีของน้ำเข้า, ซีโอดีน้ำออก (กรอง), ร้อยละการกำจัดซีโอดี ที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ

4.4 ปัจจัยที่ควบคุมการทำงานของจุลินทรีย์

4.4.1 พีเอช (pH)

เนื่องจากจุลินทรีย์ประเภทผลิตก๊าซมีเทนมีความอ่อนไหวต่อค่าพีเอช โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ประเภทนี้ คือ 6.8 – 7.2 แต่เนื่องจากจุลินทรีย์ประเภทผลิตกรดจะสร้างกรดขึ้นมาเมื่อมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเติมบัฟเฟอร์ได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ลงไปเพื่อให้มีค่าพีเอชที่เหมาะสม ในการทดลองนี้พบว่ามีค่าพีเอชตลอดการทดลอง มีค่าในช่วง 6.8 – 7.7 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 โดยถือว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบไม่ใช้อากาศ



รูปที่ 4.6 ค่าพีเอชแต่ละถังปฏิกรณ์ ที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ

4.4.2 กรดไขมันระเหยและสภาพด่าง (Volatile fatty acid, VFAและ Alkalinity)

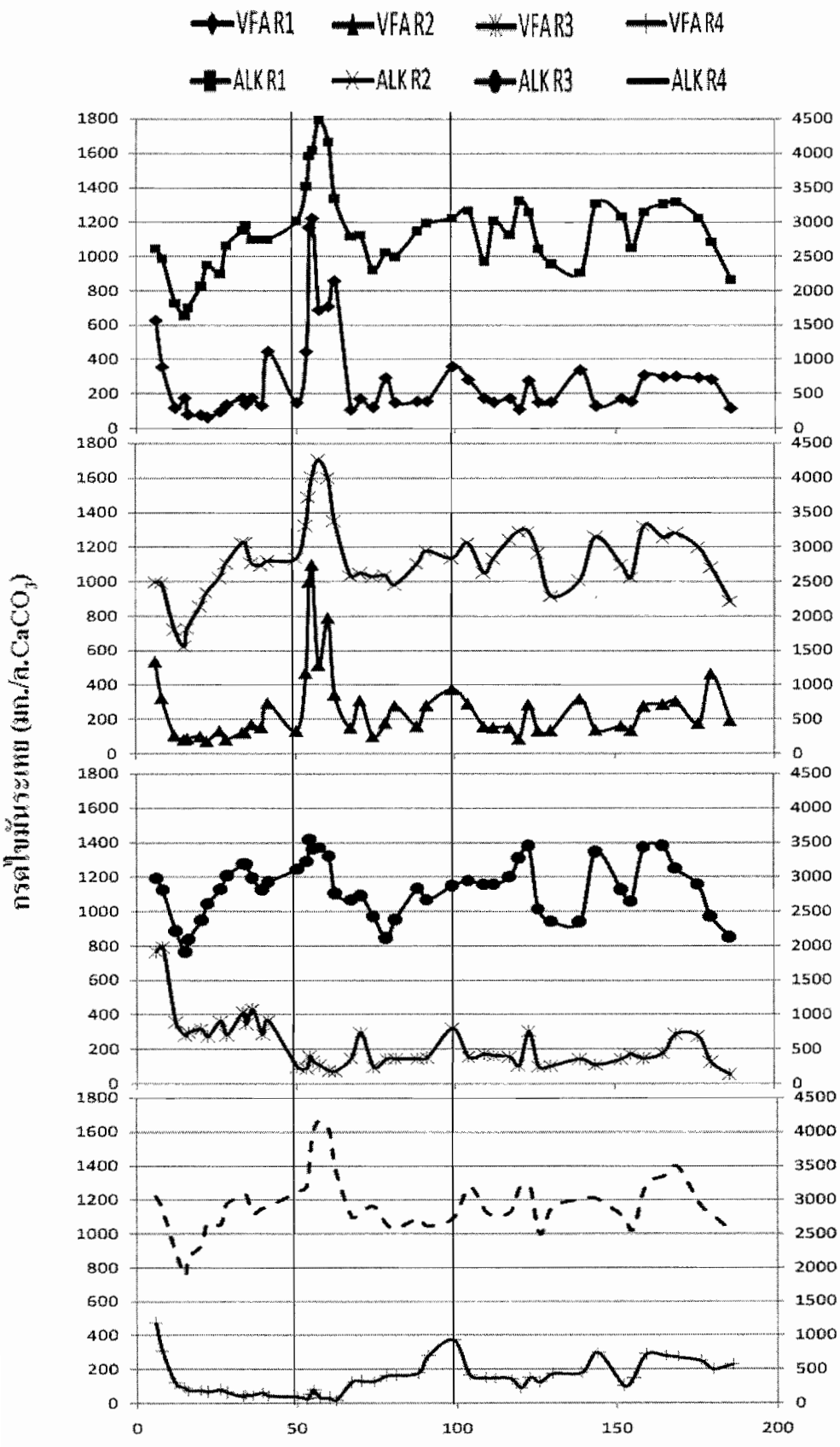
ปริมาณกรดไขมันระเหยถือว่าเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงสภาพการทำงานที่แท้จริงของระบบแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งปกติแล้วปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนจะสมดุลกับอัตราการสร้างกรดอินทรีย์ ซึ่งจะมีค่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หากปริมาณความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในระบบมากเกินไป แสดงว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นและจะทำให้การเติบโตของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนช้าลงหรือทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่สร้างกรดเกิดเร็วขึ้น ส่งผลให้ค่าพีเอชต่ำลงเนื่องจากการสะสมของกรดอินทรีย์จนเป็นสาเหตุให้จุลินทรีย์สร้างมีเทนไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ดังนั้นการทดลองนี้จึงทำการตรวจวัดค่าของกรดไขมันระเหยและสภาพด่างเพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานของระบบในช่วงระยะเวลาต่างๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ค่ากรดไขมันระเหยและสภาพด่างของแต่ละถังปฏิกรณ์ที่สภาวะคงตัว

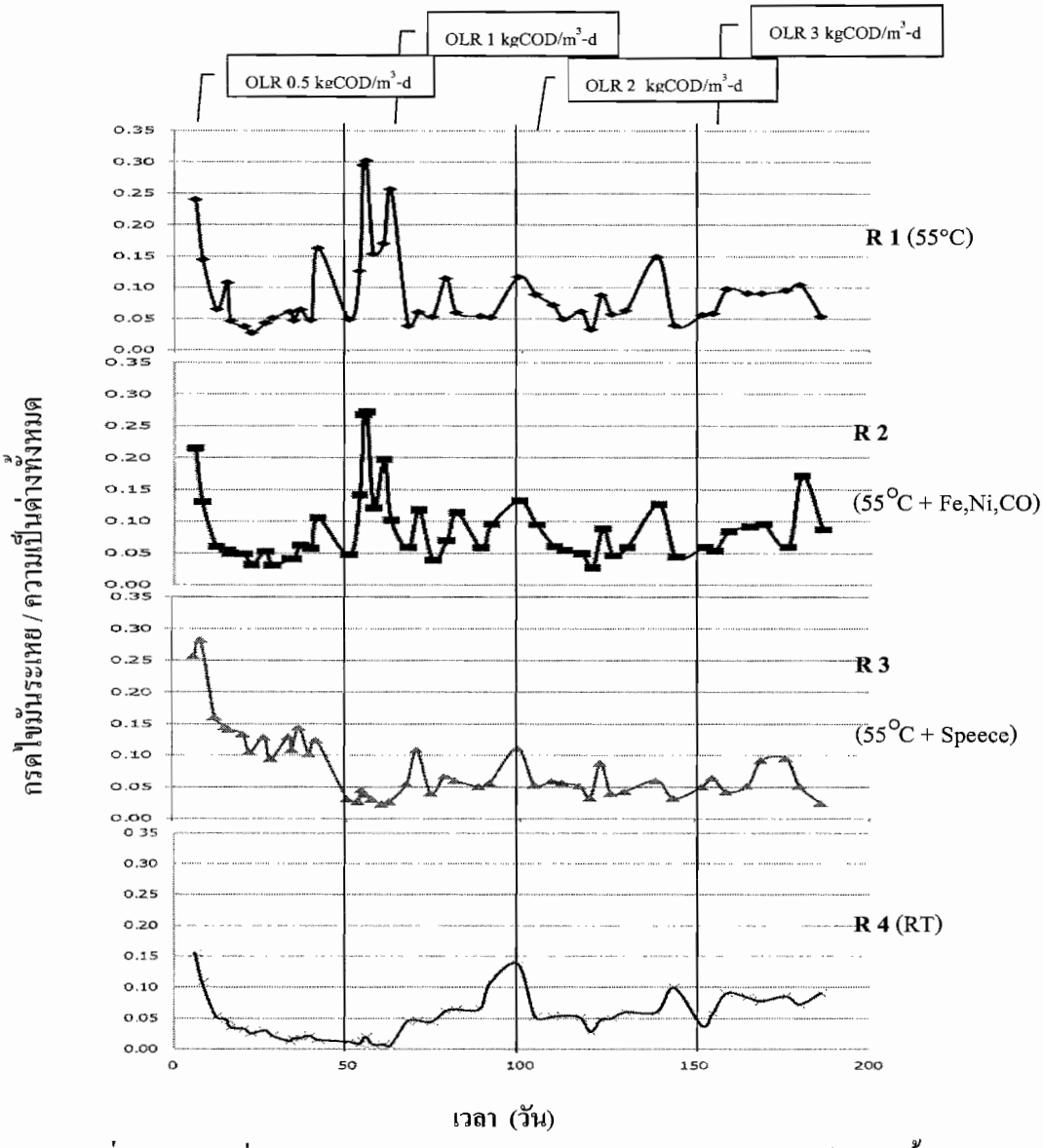
ถังปฏิกรณ์ที่	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ค่ากรดไขมันระเหย (มก./ล.$CaCO_3$)	สภาพด่าง (มก./ล.$CaCO_3$)	อัตราส่วนกรดไขมันระเหย / สภาพด่าง
1	0.5	152	2,794	0.05
2		122	2,680	0.05
3		303	2,471	0.12
4		87	2,430	0.04
1	1	175	2,670	0.07
2		226	2,739	0.08
3		132	2,898	0.05
4		167	3,656	0.05
1	2	182	2,833	0.06
2		173	2,864	0.06
3		134	3,011	0.04
4		185	2,929	0.06
1	3	293	3,081	0.10
2		262	3,159	0.08
3		149	2,992	0.05
4		254	3,040	0.08

จากตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 แสดงถึงปริมาณกรดไขมันระเหยและสภาพด่างของน้ำที่ออกจากระบบที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆนั้น ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบที่ภาระสารอินทรีย์ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำที่ออกจากระบบของถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ถัง จะมีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากระบบสามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยไปเป็นก๊าซมีเทนได้มาก อาจเนื่องมาจากที่ภาระสารอินทรีย์นี้มีการผลิตกรดไขมันระเหยในปริมาณที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนสามารถนำไปใช้ได้อย่างดี และเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 พบว่าในช่วงเริ่มเปลี่ยนภาระสารอินทรีย์มีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมสูงขึ้น เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยได้ทัน และจะมีปริมาณที่ลดลง เมื่อเดินระบบที่ภาระสารอินทรีย์ดังกล่าวผ่านไประยะหนึ่ง เนื่องจากระบบสามารถปรับตัวและการที่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบทำให้มีพีเอชที่เหมาะสำหรับการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนให้ย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีปริมาณที่มากขึ้นได้ เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์ที่ 2 และ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันระบบสามารถปรับตัวให้ย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีปริมาณที่มากขึ้นได้โดยจะพบว่าที่ภาระสารอินทรีย์ที่ 2 และ 3 มีปริมาณกรดไขมันระเหยที่ที่อยู่ในช่วง 200 – 300 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยที่ค่าดังกล่าวถือเป็นค่าที่ไม่สูงและต่ำกว่าในช่วงที่เหมาะสมมาก สภาพด่างเป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมความเป็นกรดด่างของระบบซึ่งในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ ความเป็นด่างเหมาะสมอยู่ในช่วง 2,000 – 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร บางครั้งในระบบจะมีความเป็นด่างไม่เพียงพอที่จะควบคุมพีเอชและควบคุมกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องเติมสารเคมี การทดลองนี้ทำการเพิ่มบัฟเฟอร์ของน้ำเสียโดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ซึ่งส่งผลให้สภาพด่างของระบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.7 ที่ทำการทดลองวัดสภาพด่างของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นด่างทั้งหมดอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 2,000 – 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากจากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 จะพบว่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างซึ่งเป็นตัวชี้ประสิทธิภาพการทำงานถ้า VFA/ALK น้อยกว่า 0.4 แสดงถึงระบบมีกำลังบัพเฟอร์สูงประสิทธิภาพการทำงานดี ถ้า VFA/ALK มากกว่า 0.8 แสดงถึงระบบมีกำลังบัพเฟอร์ต่ำประสิทธิภาพการทำงานลดลงหรืออาจล้มเหลวได้ จากการทดลองพบว่าทั้ง 4 ถังปฏิกรณ์มีอัตราส่วนน้อยกว่า 0.4 ตลอดการทดลองซึ่งเป็นผลที่น่าพอใจเนื่องจากระบบมีกำลังบัพเฟอร์สูง ประสิทธิภาพการทำงานดี



รูปที่ 4.7 ปริมาณกรดไขมันระเหยและความเป็นด่างที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อความเป็นด่างทั้งหมดที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ

4.4.5 ทีเคเอ็นและฟอสฟอรัสทั้งหมด

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่มีความจำเป็นที่มีความสำคัญที่จุลินทรีย์ใช้ในการสร้างเซลล์ แต่เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศจะมีอัตราการสร้างเซลล์ที่ต่ำ แต่ก็มีความต้องการใช้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณน้อยแต่ก็ไม่สามารถที่จะขาดแคลนได้ เนื่องจากจุลินทรีย์มีความต้องการใช้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในปริมาณที่เป็นไปตามสัดส่วนของ COD : N : P เท่ากับ 150 : 1 : 0.2 ซึ่งค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์นั้นควรจะรักษาระดับให้อยู่ระหว่าง 40 – 70 มิลลิกรัมต่อลิตร[2] หากในระบบมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไม่เพียงพอจะเป็นผลให้การกำจัดซีโอดีไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งกากตะกอนปาล์มที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าไนโตรเจนและ

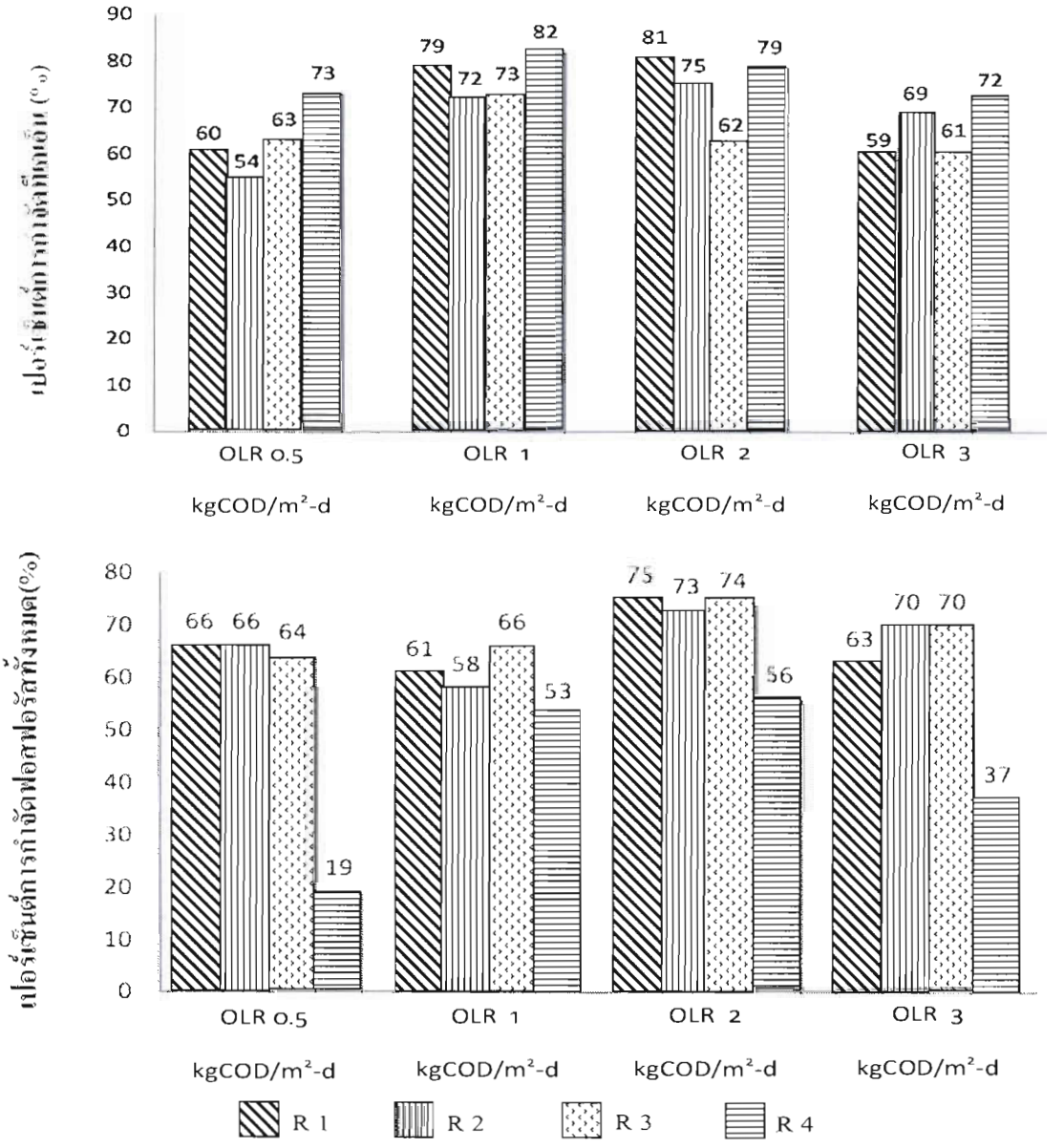
ฟอสฟอรัสเท่ากับ 228 และ 5.98 มิลลิกรัมต่อกรัมแห้ง ตามลำดับ และมีสัดส่วน COD : N : P เท่ากับ 150 : 32 : 0.84 และในการทดลองนี้จะมีการเติมสารอาหารเสริมเป็นไปตามตารางที่ 3.5 ซึ่งตารางที่ 4.7 แสดงค่าไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเข้า, น้ำออกจากระบบ และเปอร์เซ็นต์การกำจัดในระบบ และรูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัสทั้งหมด

ตารางที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัสทั้งหมด

ถัง ปฏิกรณ์	ภาร สารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ ลบ.ม-วัน)	ค่าไนโตรเจน(ทีเคเอ็น) (มก.-ไนโตเจน/ลิตร)			ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก.-ฟอสฟอรัส/ลิตร)		
		เข้า ระบบ [a]	ที่กำจัด [b]	% การ กำจัด	เข้า ระบบ [a]	ที่กำจัด [b]	% การ กำจัด
1	0.5	197	119	60	32	21	66
2		197	107	54	32	21	66
3		325	205	63	47	30	64
4		197	144	73	32	6	19
1	1	265	209	79	36	22	61
2		265	192	72	36	21	58
3		391	285	73	53	35	66
4		265	216	82	36	19	53
1	2	301	243	81	52	39	75
2		301	227	75	52	38	73
3		448	277	62	66	49	74
4		301	239	79	52	29	56
1	3	356	210	59	49	31	63
2		356	244	69	49	34	70
3		486	296	61	70	49	70
4		356	255	72	49	18	37

หมายเหตุ : [a] ค่า TKN และ TP เป็นค่าที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างน้ำเสียที่ไม่ผ่านการกรอง

[b] ค่า TKN และ TP เป็นค่าที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างน้ำส่วนใสที่ออกจากระบบและผ่านการกรอง



รูปที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การกำจัดของไนโตรเจน (ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัสทั้งหมด

จากรูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดไนโตรเจน(ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัสทั้งหมด ที่คำนวณจากการใช้ไปของสารอาหารในน้ำส่วนใสที่ออกจากระบบหลังจากจบ 1 วัฏจักร โดยแสดงถึงความสามารถในการกำจัดไนโตรเจน(ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัสทั้งหมด ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น เนื่องจากมีไนโตรเจน(ทีเคเอ็น) และฟอสฟอรัสทั้งหมดยังคงตกค้างอยู่ในถังปฏิกรณ์ ภาระสารอินทรีย์เริ่มแรกที่ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เปอร์เซ็นต์การกำจัดทีเคเอ็นในถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิกมีค่าการใช้ทีเคเอ็นสูงกว่าเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทุกถังปฏิกรณ์มีเปอร์เซ็นต์การใช้ทีเคเอ็นที่สูงขึ้น โดยในถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิกยังคงสูงกว่า

ในถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก แต่เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ค่าการกำจัดทีเคเอ็นในถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีค่าน้อยลง และเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะพบว่าที่ถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีการกำจัดทีเคเอ็นที่น้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องหัวข้อที่ 4.3.3 ค่าซีโอดีที่มีค่าสูงขึ้นและหัวข้อที่ 4.4.2 ค่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่างมีค่าสูงขึ้น อาจเกิดจากการที่จุลินทรีย์ในระบบนำไนโตรเจนไปใช้ในกิจกรรมภายในเซลล์น้อยลง มีการสร้างเซลล์ใหม่ที่น้อยลง ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 4 มีแนวโน้มที่จะลดลงเช่นกัน ซึ่งโดยรวมแล้วในแต่ละภาระสารอินทรีย์การกำจัดทีเคเอ็นในถังปฏิกรณ์ที่เป็นเทอร์โมฟิลิกน้อยกว่าในถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิก อาจเป็นผลจากอุณหภูมิที่ทำให้การทำงานของจุลินทรีย์ในระบบเทอร์โมฟิลิกนำไปใช้น้อยกว่า

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมด ที่ภาระสารอินทรีย์เริ่มแรกที่ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะพบว่าที่ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีค่าที่ใกล้เคียงกันและสูงกว่าในถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิกอย่างมีนัยสำคัญ และเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน การกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดในถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีค่าใกล้เคียงกันกับที่ภาระสารอินทรีย์ที่ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และในถังปฏิกรณ์ที่ 4 มีการกำจัดฟอสฟอรัสมีแนวโน้นเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 2 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน การกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดในถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีค่าใกล้เคียงกันและเพิ่มสูงขึ้นจากภาระสารอินทรีย์ก่อน โดยที่ปฏิกรณ์ที่ 4 มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดใกล้เคียงกับภาระสารอินทรีย์ก่อน แต่เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน การกำจัดฟอสฟอรัสในทุกถังปฏิกรณ์มีแนวโน้มที่ลงลด ซึ่งโดยรวมแล้วในแต่ละภาระสารอินทรีย์การกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดในระบบถังปฏิกรณ์ที่เป็นเทอร์โมฟิลิกมีการใช้ที่สูงกว่าในถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิกอาจเป็นผลจากอุณหภูมิที่ทำให้การทำงานของจุลินทรีย์ในระบบเทอร์โมฟิลิกนำไปใช้มากกว่า

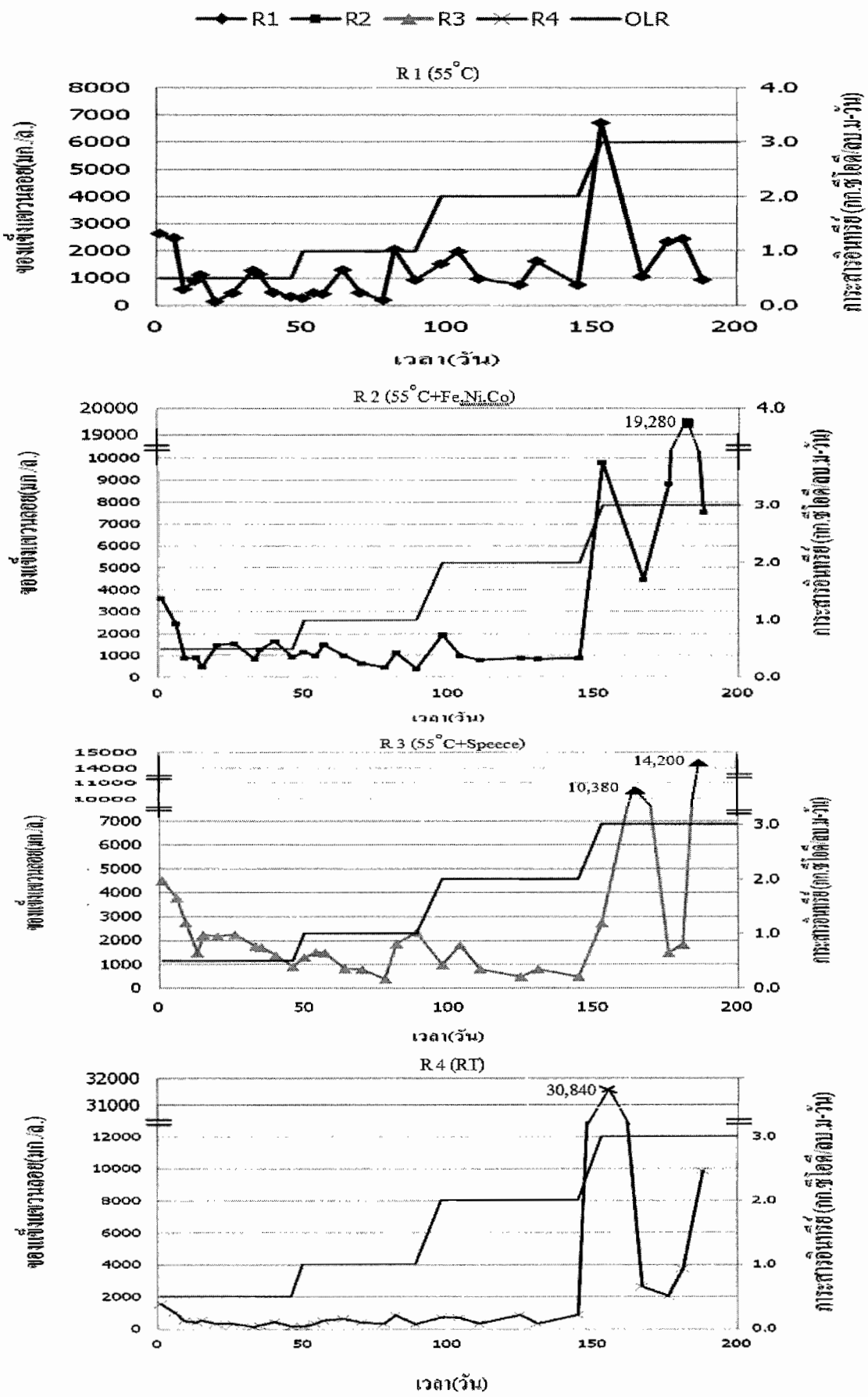
4.5 ประสิทธิภาพในการกักเก็บจุลินทรีย์ในระแบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์

4.5.1 ของแข็งแขวนลอย (SS) และของแข็งแขวนลอยระเหย (VSS)

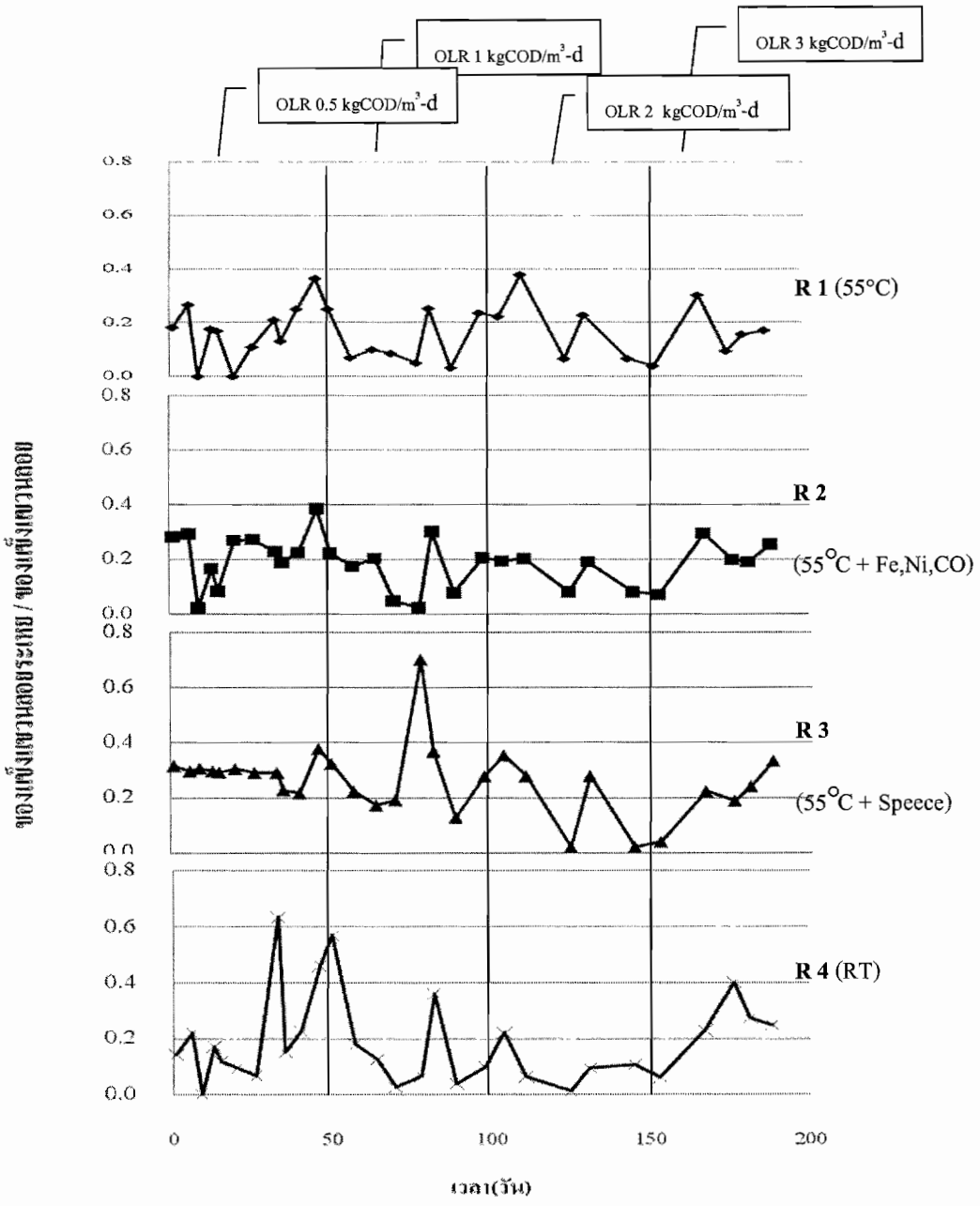
ในการทดลองทำวิจัยนี้ด้วยระบบบำบัดแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ โดยที่ขั้นตอนสุดท้ายของการทำงานในหนึ่งวัฏจักรจะมีการระบายน้ำส่วนใสออกจากระบบ ก่อนที่จะเติมน้ำเสียเข้ามาใหม่ ซึ่งในขั้นตอนการระบายน้ำส่วนใสนั้นมีความสำคัญมากที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้โดยสามารถตรวจวัดได้ด้วยปริมาณของแข็งแขวนลอย ของแข็งแขวนลอยระเหยและอัตราส่วนระหว่างของแข็งแขวนลอยระเหยต่อของแข็งแขวนลอย ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองตัวนี้สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดถึงปริมาณของแข็งที่เป็นสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำส่วนใสที่ออกจากระบบซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการตกตะกอนของของแข็ง

แขวนลอยในถังปฏิกรณ์ได้ ของแข็งแขวนลอยระเหยซึ่งเป็นสารอินทรีย์นี้เป็นส่วนสำคัญเนื่องจากประกอบไปด้วยกากตะกอนของเสียและตะกอนจุลินทรีย์ ดังนั้นหากระบบมีปริมาณของแข็งแขวนลอยหลุดออกไปกับน้ำส่วนใสมาก นั่นก็หมายถึงว่าระบบระบบมีความสามารถในการตกตะกอนที่ไม่ดี ทำให้การกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ไว้ในระบบลดลงได้ ซึ่งส่งผลให้ค่าซีโอดีในน้ำส่วนใสที่ออกจากระบบสูงขึ้นได้ ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.10, 4.11 และตารางที่ 4.8

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออก โดยในช่วงแรกของการทดลองที่ภาระสารอินทรีย์ที่ 0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในถังปฏิกรณ์ที่ 4 ที่ใช้อุณหภูมิห้องในการเดินระบบจะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกเพียง 150 – 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 ที่ใช้อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสในการเดินระบบ จะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออก 200 – 4500 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์ที่ 1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเกิดจากการที่ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกทั้ง 3 ถังมีการตกตะกอนที่ดีขึ้น แต่ค่าของแข็งแขวนลอยจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์ และจะพบว่าทุกภาระสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำออกสูงกว่าในถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิก ซึ่งเกิดจากในถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีลักษณะเป็นฟลอคขนาดเล็กและไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้เกิดการแขวนลอยของตะกอนจุลินทรีย์ในขั้นตอนการตกตะกอน และที่ภาระสารอินทรีย์สุดท้ายที่ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทั้งสี่ถังปฏิกรณ์จะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนโดยบางครั้งสูงถึง 30,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในถังปฏิกรณ์ที่ 4 เนื่องจากเมื่อทำการกวนผสมแล้วมีการปล่อยให้ตกตะกอน พบว่าแทบไม่เกิดการตกตะกอนเลย โดยการที่ไม่มีตกตะกอนในถังปฏิกรณ์นั้นเนื่องมาจากภาระสารอินทรีย์ที่เพิ่มสูงขึ้น จะมีปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบเพิ่มมากขึ้น จนระบบไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบในปริมาณมากนี้ได้อย่างสมบูรณ์ และจากการสังเกตพบว่ามีตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนหลุดออกมา ซึ่งเกิดจากก๊าซชีวภาพที่ยังคงมีการผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องจนยกตัวชั้นตะกอนด้านล่างขึ้นมา ส่งผลให้ตะกอนหลุดออกมา เพราะยังคงมีสารอินทรีย์ (ซีโอดีทั้งหมด) เหลืออยู่มากในช่วงปลายของขั้นตอนการทำปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลเสียต่อระบบเนื่องจากระบบสูญเสียมวลชีวภาพ และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 ในตอนท้ายของการทดลอง พบว่าถังปฏิกรณ์ทั้ง 4 มี ค่าของแข็งทั้งหมดเท่ากับ72,340, 63,680 ,74,520 และ 45,440 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หรือคิดเป็นของแข็งระเหยทั้งหมดเท่ากับ 30,620 , 29,040 ,32,880 และ 20,580 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ งมีปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นจากเชื้อตั้งต้น ทั้งนี้ปริมาณที่ตะกอนนี้จะรวมถึงกากตะกอนปาล์มที่ไม่ย่อยและตกค้างในระบบด้วย



รูปที่ 4.10 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.11 ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยต่อของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.8 รูปที่ 4.11 แสดงอัตราส่วนระหว่างของแข็งแขวนลอยระเหยต่อของแข็งแขวนลอย โดยค่าอัตราส่วนนี้จะเป็นค่าที่แสดงถึงสารอินทรีย์ในน้ำออกต่อปริมาณสารทั้งหมดในน้ำออก ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าทุกถังปฏิกรณ์มีอัตราส่วนค่อนข้างต่ำ แสดงว่าของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ แต่เมื่อพิจารณาในแต่ละภาระสารอินทรีย์ จะพบว่าช่วงเริ่มต้นของระบบมีค่าอัตราส่วนระหว่างของแข็งแขวนลอยระเหยต่อของแข็งแขวนลอยน้อยกว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อสิ้นสุดในแต่ละภาระสารอินทรีย์มีสารอินทรีย์ที่ออกจากระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นทั้งจุลินทรีย์ในระบบที่เพิ่มมากขึ้นและกากตะกอนปาล์มส่วนที่ไม่ถูกย่อยสลาย

ตารางที่ 4.8 ค่าของแข็งแขวนลอย, ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย และอัตราส่วนของแข็งแขวนลอยระเหยต่อค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย แต่ละถังปฏิกรณ์ ณ ภาระสารอินทรีย์ต่าง ๆ

ถังปฏิกรณ์	ภารสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ค่าของแข็งแขวนลอย (มก./ล)	ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย (มก./ล)	ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยต่อ ค่าของแข็งแขวนลอย
1	0.5	1,056	200	0.19
2		1,458	357	0.24
3		2,259	665	0.29
4		496	80	0.16
1	1	770	163	0.21
2		905	261	0.29
3		1,304	471	0.36
4		427	118	0.28
1	2	1,273	273	0.21
2		1,050	175	0.17
3		883	228	0.26
4		623	62	0.10
1	3	2,698	268	0.10
2		9,988	1,874	0.19
3		6,120	1,578	0.26
4		9,816	1,348	0.14

4.6 ผลการทดลองหาค่าความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนหรือเอสเอ็มอ

ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบและความสามารถของระบบ โดยความสามารถของระบบจะขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ ค่าเอสเอ็มเอเป็นค่าที่บอกถึงคุณภาพของตะกอนจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ดังนั้นค่าเอสเอ็มเอจึงเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบความรวดเร็วในการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซมีเทน

ตารางที่ 4.9 สัดส่วนของก๊าซมีเทนจากการทดลองหาค่าเอสเอ็มเอของตะกอนจุลินทรีย์

ร้อยละของก๊าซมีเทน					
ก่อนการทดลอง		หลังสิ้นสุดการทดลอง			
อุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิ 55 °C	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 *	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 a*	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 b*	ถังปฏิกรณ์ที่ 4 **
60.81	61.60	63.49	64.14	67.32	63.22

หมายเหตุ : * = ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก(55°C) และไม่มีการเติมสารอาหารเสริม

a* = ถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก(55°C) และมีการเติมสารอาหารเสริมเฉพาะเหล็ก, นิเกิลและโคบอลต์

b* = ถังปฏิกิริยาเทอร์โมฟิลิก(55°C) และมีการเติมสารอาหารเสริมสูตรของ Speece

** = ถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิก(RT) และไม่มีการเติมสารอาหารเสริม

การทดลองนี้ได้นำตะกอนจุลินทรีย์ในระบบมาทดสอบหาค่าเอสเอ็มเอเพื่อเป็นการตรวจสอบคุณภาพของตะกอนจุลินทรีย์โดยทำการทดสอบ 2 ครั้ง คือ ตอนเริ่มต้นของการทดลองและตอนสิ้นสุดการทดลอง การทดสอบนี้ใช้ของเสียที่ใช้ในการทดลอง คือน้ำเสียจากกากตะกอนปาล์มและกรดอะซิติกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายโดยเป็นแหล่งของซีโอดี เนื่องจากความเร็วในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน โดยการทดลองแปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียจากกากตะกอนปาล์มและกรดอะซิติกให้มีซีโอดีต่างๆ เพื่อเป็นการหาประสิทธิภาพสูงสุดของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ การทดลองนี้จะทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ จนเข้าสู่สภาวะของการเกิดก๊าซที่คงที่จากนั้นนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Gas Chromatography ผลการวิเคราะห์สัดส่วนของก๊าซมีเทนจากการทดลองค่าเอสเอ็มเอของตะกอนจุลินทรีย์แสดงดังตารางที่ 4.9 และค่าความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้กรดอะซิติกและกากตะกอนปาล์มเป็นสารอาหารที่ความเข้มข้นของซีโอดีต่างๆ ก่อนและหลังสิ้นสุดการทดลองของระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์แสดงดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

ตารางที่4.10 ค่าความสามารถจำเพาะของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนก่อนการทดลอง โดยใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหาร

ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทน (กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส-วัน)	
	อุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิ 55 °C
2,400	0.07	0.07
3,200	0.09	0.10

ตารางที่ 4.11 ค่าความสามารถจำเพาะของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนหลังสิ้นสุดการทดลอง โดยใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหาร

ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทน (กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส-วัน)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ($55^{o}C$)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ($55^{o}C$+Fe,Ni,Co)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ($55^{o}C$+Speece)	ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (RT)
1,300	0.09	0.08	0.11	0.08
2,400	0.11	0.11	0.13	0.08
3,600	0.12	0.13	0.15	0.09

จากการทดลองหาค่าเอสเอ็มเอโดยใช้กรออะซิติดเป็นสารอาหารพบว่าค่าเอสเอ็มเอของตะกอนจุลินทรีย์ก่อนดำเนินการทดลองในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์เท่ากับ 0.09 และ 0.10 กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส-วัน ที่อุณหภูมิห้องและ 55°C ตามลำดับ ซึ่งเป็นความสามารถสูงสุดในการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนซึ่งแสดงว่าตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในการทดลองมีคุณภาพเริ่มต้นไม่แตกต่างกัน หลังจากดำเนินการทดลองในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ซึ่งเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ด้วยกากตะกอนปาล์มที่อุณหภูมิมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกและมีการเติมสารอาหารเสริมตามตารางที่ 3.5 เป็นเวลา 190 วันสิ้นสุดลงพบว่าค่าเอสเอ็มเอของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นโดยในถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเอสเอ็มเอเท่ากับ 0.12, 0.13 และ 0.15 กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส-วัน ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าเมื่อสิ้นสุดการทดลองในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์เชื้อจุลินทรีย์มีคุณภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีขึ้น และมีค่าสูงกว่าถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิกที่ 4 ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริมตลอดการทดลองมีค่าเอสเอ็มเอเท่ากับ 0.09 กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส-วัน มีค่าเท่าเดิมแสดงว่าจุลินทรีย์มีคุณภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ไม่ต่างจากเดิม เมื่อเปรียบเทียบค่าเอสเอ็มเอของถังปฏิกรณ์ที่เป็นเทอร์โมฟิลิกนั้นมีค่าสูงกว่าในถังปฏิกรณ์ที่เป็น

มีโซฟิลิกซึ่งแสดงว่าในถังปฏิกรณ์ที่เป็นเทอร์โมฟิลิกนั้นมีคุณภาพและความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีกว่าถังปฏิกรณ์ที่เป็นมีโซฟิลิก และเมื่อพิจารณาเฉพาะถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกนั้นพบว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 3 มีค่าสูงสุดแสดงว่า มีคุณภาพและความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่าเชื้อจุลินทรีย์เมื่อเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 ซึ่งหมายความว่าการเติมสารอาหารเสริมมีผลต่อค่าเอสเอ็มเออย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบค่าเอสเอ็มเอที่ได้จากการใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหารกับค่าเอสเอ็มเอที่ได้จากการใช้กากตะกอนปาล์มเป็นสารอาหาร ทุกถังปฏิกรณ์พบว่าค่าเอสเอ็มเอที่ได้จากการใช้กรดอะซิติกและน้ำเสียจากกากตะกอนปาล์มเป็นสารอินทรีย์มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเริ่มมีความคุ้นเคยกับน้ำเสียจากกากตะกอนปาล์ม เมื่อพิจารณาที่ถังปฏิกรณ์ที่เป็นเทอร์โมฟิลิกจะพบว่าถังปฏิกรณ์ที่ 3 ที่มีการเติมสารอาหารเสริม Speece ตลอดการทดลองนั้นมีค่าเอสเอ็มเอเท่ากับ 0.16 กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส-วัน ซึ่งเป็นความสามารถสูงสุดในการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งสูงกว่าในถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 มีค่าเอสเอ็มเอเท่ากับ 0.10 และ 0.11 กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส-วัน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่เดินระบบที่อุณหภูมิมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกจะพบว่าค่าเอสเอ็มเอของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกจะมีค่ามากกว่าถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิก เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิสูงมีการย่อยสารอาหารได้เร็วกว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิมีโซฟิลิก และการเติมสารอาหารเสริม Speece ทำให้ตะกอนมีคุณภาพและความสามารถในการย่อยสลายกากตะกอนปาล์มได้ดีกว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่เติมสารอาหารเสริม

ตารางที่ 4.12 และ 4.13 ค่าความสามารถจำเพาะของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนก่อนและสิ้นสุดการทดลองในระบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ โดยใช้กากตะกอนปาล์มเป็นสารอาหาร

ตารางที่ 4.12 ค่าความสามารถจำเพาะของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนก่อนการทดลอง โดยใช้กากตะกอนปาล์มเป็นสารอาหาร

ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**ความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทน (กรัมซีโอดี – มีเทน/กรัมวีเอสเอส-วัน)**	
	อุณหภูมิ 55 °C	**อุณหภูมิห้อง**
4,300	0.05	0.05

ตารางที่ 4.13 ค่าความสามารถจำเพาะของตะกอนจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนหลังสิ้นสุดการทดลอง โดยใช้กากตะกอนปาล์มเป็นสารอาหาร

ความเข้มข้นซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทน (กรัมซีโอดี – มีเทน/กรัมวีเอสเอส-วัน)			
	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 ($55^{o}C$)	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 ($55^{o}C$+Fe,Ni,Co)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ($55^{o}C$+Speece)	ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (RT)
3,000	0.09	0.09	0.12	0.07
5,000	0.10	0.11	0.16	0.08

4.7 การเปรียบเทียบงานวิจัยกับงานวิจัยอื่น

จากงานวิจัยของ Zandvoort และคณะ[11] ทำการวิจัยโดยใช้เมทานอลเป็นของเสียในการทดลองเดินระบบบำบัดแบบยูเอเอสบี ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเดินระบบถึงวันที่ 92 ประสิทธิภาพของระบบลดลงจึงนำจุลินทรีย์ในระบบมาทำการทดลองแบบกะหาค่าเอสเอ็มเอที่ใช้เมทานอลเป็นสารอาหารมีค่าลดลงจาก 1.517 กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส – วัน เป็น 0.152 กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส – วัน จึงทำการเติมสารอาหารเสริมเฉพาะเหล็ก ที่ความเข้มข้น 10 ไมโครโมล ซึ่งมีผลต่อการเกิดมีเทนอย่างรวดเร็วและลดการสะสมของอะซิเตท ในระบบแบบกะ ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการทดลองนี้ที่เมื่อเริ่มต้นทำการทดลองนั้นมีค่าเอสเอ็มเอโดยใช้กากตะกอนปาล์มเป็นสารอาหารเท่ากับ 0.06 กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส – วัน และเมื่อทำการทดลองโดยระบบบำบัดแอนแอโรบิกเอสบีอาร์โดยเติมสารอาหารเสริมเหล็ก นิเกิล และโคบอลต์ตลอดการทดลองเมื่อจบการทดลองได้นำจุลินทรีย์ในระบบมาทำการทดลองหาค่าเอสเอ็มเอโดยเติมสารอาหารเสริมเหล็ก นิเกิลและโคบอลต์มีค่าเท่ากับ 0.11 กรัมซีโอดี – มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส – วัน แต่ที่ค่าเอสเอ็มเอในการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักเกิดจากลักษณะของของเสียที่ใช้ในการทดลองต่างกันและกากตะกอนปาล์มเป็นของเสียที่ย่อยสลายยากและระบบเป็นแบบกะทำให้ของเสียมีการสัมผัสกับจุลินทรีย์ยาก

จากงานวิจัยของ Sharma และ Singh [10] กล่าวถึงการเติมสารอาหารเสริมรอง (เหล็ก นิเกิลและโคบอลต์) ให้กับน้ำเสียจากโรงงานกลั่นสุรา สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี (จากประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 67 เป็นร้อยละ 76) และเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้จะพบว่าความแตกต่างกันระหว่างถังปฏิกรณ์ที่มีการเติมสารอาหารเสริมเหล็ก นิเกิลและโคบอลต์กับถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเกิดขึ้นที่ภาระสารอินทรีย์สูงสุดที่ 3

กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร – วัน โดยพบว่าที่ถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริม มีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีลดลงแต่ในถังปฏิกรณ์ที่มีการเติมสารอาหารเหล็ก นิเกิล และโคบอลต์มีแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงขึ้น

จากงานวิจัยของ Boeja และคณะ[9] ทำการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) ในห้องปฏิบัติการด้วยระบบบำบัดแบบยูเอเอสบีขนาด 16 ลิตร โดยทำการป้อนน้ำเสียที่ค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 5.1 ถึง 42.5 กรัมต่อลิตรมีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ 4 วัน ซึ่งผลการทดลองพบว่าที่ภาระสารอินทรีย์ 10.6 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร – วัน สามารถกำจัดซีโอดีได้สูงถึงร้อยละ 96 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดแบบยูเอเอสบีสามารถบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ดีกว่าระบบบำบัดแบบอื่นและเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ที่ทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยระบบบำบัดแบบ แอนแอโรบิกเอสบีอาร์ ที่มีปริมาตร 2 ลิตร ร้อยละการกำจัดซีโอดีที่ภาระสารอินทรีย์สูงสุดที่ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร – วัน เท่ากับร้อยละ 97 แต่เนื่องจากไม่สามารถรับภาระสารอินทรีย์ที่สูงมากได้ เพราะถังปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ เมื่อภาระสารอินทรีย์สูงขึ้นทำให้มีตะกอนค้างอยู่ในระบบมากจนไม่สามารถตกตะกอนแยกน้ำส่วนใสได้ ทำให้มีตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกมากับน้ำส่วนใสส่งผลต่อระบบ

จากงานวิจัยของ เพ็ญศิริ ประชากิตติกุล [17] ทำการศึกษาโดยเดินระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ระดับห้องปฏิบัติการ ของเสียที่ใช้ในการทดลองคือกากตะกอนปาล์มโดยการทดลองภายใต้สภาวะเทอร์โมฟิลิก (55 ° C) และสภาวะมีโซฟิลิก (30±1°C)เดินระบบที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.5 - 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่ระยะเวลากักพักน้ำ 10 วันโดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแต่ละอัตราภาระสารอินทรีย์ จะพบว่าถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกและมีโซฟิลิกมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ90 และประสิทธิภาพในการกำจักซีโอดีเป็นก๊าซมีเทน เท่ากับ 0.26 และ 0.24 ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัดตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกันกับในการวิจัยนี้ที่ทุกถังปฏิกรณ์ที่ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 90 และที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของทั้งถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกและมีโซฟิลิกมีส่วนประกอบของก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 63 ในงานวิจัยนี้มีค่าส่วนประกอบของก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 60.18 ในถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกซึ่งจะเห็นว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นไปในทำนองเดียวกัน และในถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิกมีปริมาณก๊าซชีวภาพมากกว่าในถังปฏิกรณ์มีโซฟิลิก จะเห็นว่าการที่อุณหภูมิสูง (55 องศาเซลเซียส) และมีการเติมสารอาหารเสริมนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าที่อุณหภูมิมีโซฟิลิก

จากงานวิจัยของ Bodik และคณะ[12] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและค่าการกักเก็บน้ำต่อการเริ่มต้นของระบบ และควบคุมระบบบำบัด ให้อยู่ในสภาวะคงตัวของระบบ UAF (upflow anaerobic filter) และ AnSBR (anaerobic sequencing batch) โดยใช้น้ำเสียจากชุมชนและมีการเติมกลูโคสและโซเดียมอะซิเตทด้วยก่อนที่จะป้อนเข้าระบบโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 9 – 23 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ 6 – 46 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์แอนแอโรบิกเอสบีอาร์ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการกักเก็บน้ำต่างกันมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยไม่ต่างกันเท่ากับร้อยละ 86 – 88 แต่ที่อุณหภูมิต่ำต้องมีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำสูงจะทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ที่ใช้ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องและ 55 องศาเซลเซียส จะพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยไม่ต่างกันคือมากกว่าร้อยละ 90 แต่เมื่อพิจารณาที่ลักษณะของของเสียที่ใช้ในการทดลองนี้ทำให้ต้องดูควบคู่ไปกับประสิทธิภาพของระบบโดยการคำนวณจากปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น จะพบว่าระบบที่มีอุณหภูมิสูง (55 องศาเซลเซียส) มีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่ใช้อุณหภูมิห้องที่ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำที่เท่ากัน

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองศึกษาผลของสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนปาล์ม ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก โดยเดินระบบแบบแอนแอโรบิกเอสบีอาร์ ทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง ที่อุณหภูมิ 55 และอุณหภูมิห้อง โดยตัวแปรต้นที่ใช้คือการเติมสารอาหาร เสริมตามสูตรของ Speece การเติมสารอาหาร เสริม เฉพาะเหล็ก นิเกิลและโคบอลต์ และการไม่เติม สารอาหารเสริมที่อัตราภาระสารอินทรีย์ตั้งแต่ 0.5 – 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถ สรุปผลการทดลองที่ได้ดังต่อไปนี้

1. น้ำเสียจากกากตะกอนปาล์มมีค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนหรือค่า บีเอ็มพี 178 และ 192 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมด ที่อุณหภูมิมีโซฟิลิกและอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก ตามลำดับ

2. การเติมสารอาหารเสริมและอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิกส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ อย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาที่ภาระสารอินทรีย์ที่ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์ที่ 3 ทีมีการเติมสารอาหารเสริมตามสูตรของ Speece และอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.79 และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไปเป็นก๊าซมีเทน เท่ากับร้อยละ 40.1 ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ที่ 1, 2 และ 3 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.69, 0.68 และ 0.61 ลิตรต่อลิตรต่อวัน และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไปเป็นก๊าซมีเทนเท่ากับร้อยละ 31.1, 34.8, และ 26.6 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 90 ทุกถังปฏิกรณ์

3. เมื่อดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 190 วัน ตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์เทอร์โมฟิลิก ที่มีการเติมสารอาหารตามสูตรของ Speece มีคุณภาพในการผลิตก๊าซมีเทนดีขึ้นซึ่งแสดงได้จาก ค่าความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนหรือค่าเอสเอ็มเอที่สูงขึ้นจาก 0.10 เป็น 0.15 กรัมซีโอดี ต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน สำหรับตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยามีโซฟิลิกที่ไม่มีการเติม สารอาหารเสริมตลอดการทดลองมีคุณภาพในการผลิตก๊าซมีเทนไม่ต่างจากตอนเริ่มต้นระบบ แสดงจากค่าเอสเอ็มเอที่เท่ากันในตอนเริ่มต้นและท้ายการทดลองคือเท่ากับ 0.09 กรัมซีโอดี มีเทนต่อกรัมวีเอสเอสต่อวัน ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ศึกษาที่ภาระสารอินทรีย์ 0.5, 1, 2 และ 3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันเท่านั้น ซึ่งควรมีการศึกษาที่ค่าภาระสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นเพื่อหาค่าภาระสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการบำบัดกากตะกอนปาล์มและการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด

2. งานวิจัยนี้เป็นระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิคเอสบีอาร์ ซึ่งมีข้อจำกัดด้านขนาดของถังปฏิกรณ์ที่เล็กและหากระยะเวลาในการตกตะกอนต่ำจะทำให้ขั้นตอนการดึงน้ำส่วนใสออกจากระบบอาจมีชีวมวลหลุดออกจากระบบสูง และเนื่องจากของเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นกากตะกอนปาล์ม ทำให้มีตะกอนที่ค้างอยู่ในระบบมาก หากอุปกรณ์ที่ใช้ในการกวนผสมมีกำลังต่ำอาจทำให้เกิด dead zone ภายในถังปฏิกรณ์ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

เอกสารอ้างอิง

1. **มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม**, 2008, [Online] Available: http://www.efe.or.th [2009,February 2].

2. Speece, R.E., 1996, **Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater**, Arche Press, Nashville, Tennessee, p.115.

3. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543, **วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย**, เล่ม 4, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 291 – 297, 346 – 356.

4. มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542, **เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่มที่ 2**,พิมพ์ครั้งที่ 1,โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 89 – 93.

5. Masse, D.I., Masse, L., 1999, Treatment of Slaughterhouse Wastewater in Anaerobic Sequencing Batch Reactors, **Canadian Agricultural Engineering**, Vol. 42, No. 3, p. 132.

6. Metcalf and Eddy 2004, **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**", 4th ed., McGraw Hill, Singapore, p. 99.

7. พรชัย เหลืองอาภาพงศ์, 2549, **คัมภีร์ปาล์มน้ำมันพืชเศรษฐกิจเพื่ออุปโภคและบริโภค**, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์มติชน., หน้า 294 – 302.

8. เอกชัย พฤกษ์อำไพ, 2548, **คู่มือปาล์มน้ำมัน**, พิมพ์ครั้งที่ 1,เพ็ท-แพล้น พลับลิชชิ่ง, หน้า 241 – 284.

9. Borja, R., Banks, C.J., 1994., Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent Using and Up – flow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, **Biomass and Bioenergy**, Vol. 6, Issue 5. pp. 381 – 389.

10. Jitender Sharma. and Rajendra Singh., 2001., Effect of nutrient supplementation on anaerobic sludge development and activity for treating distillery effluent., **Bioresource Technology**, Vol. 79, pp. 203 – 206.

11. Zandvoort, M.H.,Geert, R.,Lettinga, G.and Lens, P.N.L., 2003, Methanol Degradation in Granular Sludge Reactors at Sub – Optimal Metal Concentrations: Role of Iron, Nickel and Cobalt, **Enzyme and Microbial Technology**, Vol. 33, pp. 190 – 198.

12. Bodik, I., 2002, "The Use of Upflow Anaerobic Filter and AnSBR for Wastewater Treatment at Ambient Temperature", **Water Research**, Vol. 36, pp. 1084 – 1088.

13. Najafpour, G.D., Zinatizadeh, A.A.L., Mohamed, A.R., Hasnain Isa, M. and Nasrollahzadeh, H., 2006, "High-rate Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent in an Upflow Anaerobic Sludge – Fixed Film Bioreactor", **Process Biochemistry**, Vol. 41, pp. 370 – 379.

14. Parawira, W., Kudita, I., Nyandoroh, M.G. and Zvauya, R., 2005, "A Study of Industrial Anaerobic Treatment of Opaque Beer Brewery Wastewater in a Tropical Climate Using a Full – Scale UASB Reactor Seeded with Activated Sludge", **Process Biochemistry**, Vol. 40, pp. 593 – 599.

15. Kida, K., Shigematsu, T., Kijima, J., Numaguchi, M., mochinaga, Y., ABE, N. and Moromura, S., 2001, "Influence of Ni^{2+} and Co^{2+} on Methanogenic Activity and the Amounts of Coenzymes Involved in Methanogenesis", **Journal of Bioscience and ioengineering**,Vol. 91, No. 6, pp. 590 – 595.

16. Wiegant, W.M., Classen, J.A. and Lettinga, G., "Thermophilic Anaerobic Digestion of High Strength Wastewaters", **Process Biochemistry**, Vol. 41, pp. 370 – 379.

17. เพ็ญศิริ ประชากิตติกุล, **ผลของอุณหภูมิต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ของกากตะกอนปาล์ม จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 52

18. APHA, AWWA & WEF, 1998. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20th ed., Washington D.C.

ภาคผนวก ก

รายการคำนวณ

สูตรการคำนวณและตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสีย (BMP)

สูตรการคำนวณ

BMP = A/gCOD

เมื่อ

BMP = ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสีย (มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมด)

A = ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด (มิลลิลิตรมีเทน)

gCOD = ซีโอดีเริ่มต้น (กรัมซีโอดีทั้งหมด)

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสีย

มีเทนสะสมสูงสุด	127.93	มิลลิลิตร
ซีโอดีเริ่มต้น	0.4	กรัมซีโอดี
BMP	127.93/0.4	
	331	(มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมด)

ดังนั้นค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 331 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมด

2. การคำนวณค่าสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์ (SMA)

สูตรการคำนวณ

SMA = gCH4 – COD/(t*VSS)

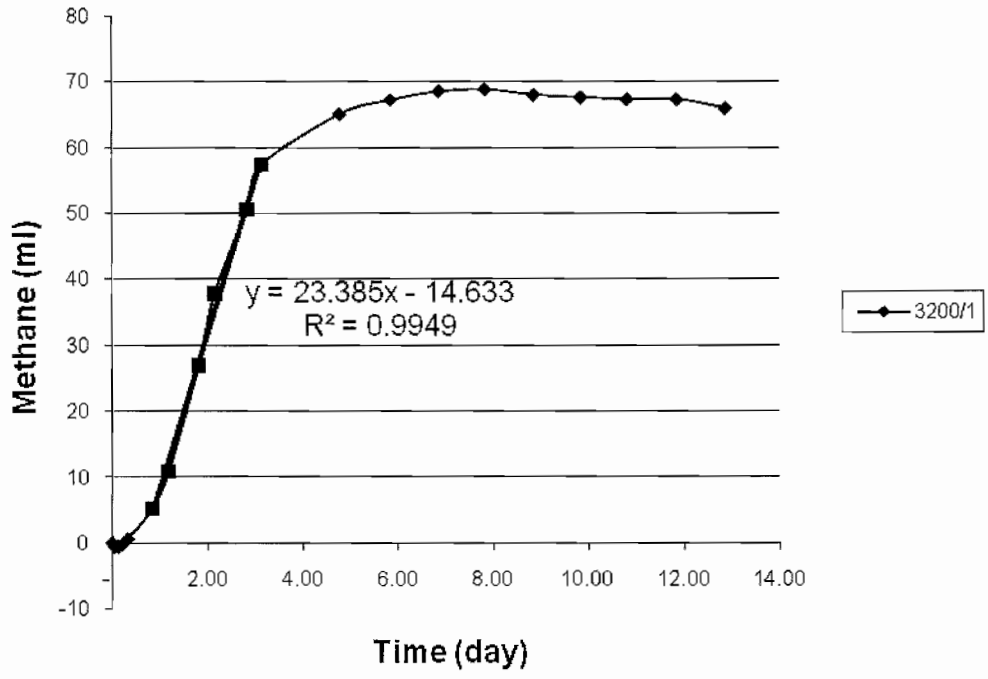
เมื่อ

SMA = ความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์ (กรัมซีโอดี-มีเทน/กรัมวีเอสเอส-วัน)

gCH_4-COD/t = อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเทียบเท่ากรัมซีโอดี (กรัมซีโอดี-มีเทน/วัน)

VSS = ความเข้มข้นของของแข็งระเหยง่ายของตะกอนจุลินทรีย์ (กรัมวีเอสเอส)

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน



ความชันสูงสุดของกราฟแสดงความสัมพันธ์

ระหว่างปริมาณมีเทนสะสมกับเวลา 23.385 (มิลลิลิตรมีเทนต่อวัน)

อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเทียบเท่ากรัมซีโอดี 23.385/389

= 0.0601 (กรัมซีโอดี-มีเทนต่อวัน)

ของแข็งระเหยของตะกอนจุลินทรีย์ 0.1428 (กรัมวีเอสเอส)

SMA 0.0601/0.1428

= 0.4210

ดังนั้น ค่าความสามารถจำเพาะในการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์เท่ากับ 0.4210 (กรัมซีโอดี-มีเทนต่อกรัมวีเอสเอส-วัน)

3. ปริมาณการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบและระบายน้ำใสออกจากระบบต่อ 1 วัฏจักร

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์	0.5	กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน
น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบมีค่าซีโอดี	5,000	มิลลิกรัมต่อลิตร
ปริมาตรถัง	2	ลิตร

ปริมาณการป้อนน้ำเสีย $\frac{0.5\times10^{-3}\ \mathrm{kgCOD/L}\times 2\mathrm{L}}{5000\times10^{-6}\mathrm{kg/L}}$

= 0.2 ลิตรต่อวัน

ดังนั้น ปริมาณการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบและระบายน้ำใสออกจากระบบต่อ 1 วัฏจักร = 200 มิลลิลิตรต่อวัน

4. การคำนวณเวลากักเก็บน้ำ (HRT)

ปริมาตรถัง	2	ลิตร
ปริมาณการป้อนน้ำเสีย	0.2	ลิตรต่อวัน
ระยะเวลากักน้ำ	2/0.2	วัน
	10	วัน

ดังนั้นเวลาในการกักเก็บน้ำเท่ากับ 10 วัน

5. การคำนวณประสิทธิภาพของระบบจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น	260	มิลลิลิตรต่อวัน
ร้อยละของก๊าซมีเทน	63	

ทางทฤษฎี 1 กรัมซีโอดี เท่ากับ 389 มิลลิลิตรมีเทนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบเท่ากับร้อยละ $\frac{260\ \mathrm{ml/d}\times 0.63}{389\frac{\mathrm{ml.CH_4}}{1\mathrm{gCOD}}\times \mathrm{gCODinf/d}}\times 100$

= 42.11

หมายเหตุ : ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในการทำลองที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส) และ มีโซฟิ ลิก (30 องศาเซลเซียส) ทำการเก็บก๊าซที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่1 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่2 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่3 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่4 (มล./วัน)
1	0.5	0	0	0	0
2	0.5	170	20	0	165
3	0.5	85	35	55	155
5	0.5	105	140	70	208
6	0.5	260	270	80	215
8	0.5	265	220	205	240
9	0.5	205	230	295	260
10	0.5	240	270	295	250
11	0.5	245	295	240	240
12	0.5	235	255	205	210
13	0.5	265	260	185	250
14	0.5	275	260	195	280
15	0.5	300	255	240	250
16	0.5	250	280	215	250
17	0.5	260	280	205	220
18	0.5	300	280	215	280
19	0.5	240	235	210	235
20	0.5	275	275	200	270
22	0.5	350	275	290	285
23	0.5	180	280	160	220
24	0.5	300	275	205	265
25	0.5	205	275	200	245
26	0.5	240	270	220	255
27	0.5	295	230	215	225
28	0.5	215	240	200	200
29	0.5	210	260	220	220

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่1 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่2 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่3 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่4 (มล./วัน)
30	0.5	235	210	180	235
31	0.5	220	200	160	200
32	0.5	225	275	265	270
33	0.5	200	150	175	195
34	0.5	205	185	210	240
35	0.5	200	190	225	250
36	0.5	210	195	250	235
37	0.5	210	185	265	240
38	0.5	205	190	270	245
39	0.5	210	200	260	240
40	0.5	215	180	250	240
41	0.5	210	195	260	245
42	0.5	110	155	255	230
43	0.5	130	145	270	245
44	0.5	115	150	255	230
46	0.5	160	240	285	345
47	0.5	110	150	170	240
48	1	200	220	370	360
49	1	190	240	470	440
50	1	210	270	550	450
51	1	260	280	560	490
52	1	260	300	580	480
53	1	240	280	550	520
54	1	290	280	650	520
55	1	360	290	560	550
56	1	300	540	580	530

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่1 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่2 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่3 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่4 (มล./วัน)
57	1	290	470	550	560
58	1	300	340	540	550
59	1	290	490	540	540
60	1	290	440	570	540
61	1	560	800	570	550
62	1	600	700	490	510
63	1	785	620	400	510
64	1	785	620	400	520
66	1	800	530	400	590
67	1	540	320	300	400
68	1	510	360	300	400
70	1	750	630	740	420
71	1	720	610	655	440
72	1	590	720	680	460
73	1	770	690	680	410
75	1	600	650	670	420
76	1	630	690	660	480
77	1	790	710	655	780
79	1	510	560	660	520
82	1	520	820	660	800
85	1	530	550	670	600
87	1	530	560	650	550
88	1	510	550	450	480
89	1	490	530	550	500
90	1	500	540	470	470
91	1	500	550	500	400

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่1 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่2 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่3 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่4 (มล./วัน)
92	1	510	570	470	480
93	1	490	550	510	470
94	1	490	520	500	500
95	1	500	520	560	500
96	1	530	520	440	470
97	1	510	510	480	450
98	2	600	600	750	525
99	2	600	675	775	950
102	2	600	725	780	800
103	2	700	725	800	650
104	2	600	725	850	550
105	2	800	900	1050	550
106	2	825	900	950	650
109	2	825	750	800	650
110	2	700	800	750	1000
111	2	750	850	1050	750
112	2	800	800	1050	850
113	2	950	850	1150	875
114	2	950	850	1200	925
115	2	900	800	1150	950
116	2	800	825	1100	1000
117	2	900	850	1150	1000
118	2	775	875	1100	1000
120	2	775	850	900	900
123	2	825	800	800	950
124	2	750	800	800	900

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่1 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่2 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่3 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่4 (มล./วัน)
125	2	750	850	850	900
126	2	850	950	950	900
127	2	850	1050	1050	850
128	2	800	1000	1000	850
130	2	950	900	1100	950
131	2	900	950	900	900
132	2	950	1100	950	750
133	2	1050	900	1100	700
134	2	950	800	950	800
137	2	850	850	900	1000
138	2	750	700	800	800
139	2	900	750	850	850
141	2	775	800	900	900
142	2	650	800	800	1050
143	2	1000	1200	1100	1000
144	2	900	1000	1000	1050
145	2	900	1050	1000	900
148	2	900	1000	1000	1100
149	2	1000	800	800	1100
151	2	900	900	900	1000
152	3	1200	1400	1050	950
153	3	1500	1300	1450	900
155	3	1500	1600	1700	1250
156	3	1700	1400	1500	1300
158	3	1600	1600	1750	1300
159	3	1350	1500	1400	1200

ตารางที่ ข.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่1 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่2 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่3 (มล./วัน)	ถังปฏิกิริยาที่4 (มล./วัน)
160	3	1400	1450	1600	1100
161	3	1450	1300	1500	1350
167	3	1350	1350	1550	1100
169	3	1300	1400	1550	1200
173	3	1300	1350	1600	1200
175	3	1450	1400	1500	1200
176	3	1300	1300	1500	1100
179	3	1350	1300	1600	1200
180	3	1300	1350	1500	1000
181	3	1400	1450	1550	1200
183	3	1450	1300	1600	1000
186	3	1300	1400	1650	1400
188	3	1400	1500	1600	1300
189	3	1400	1000	1500	1000
190	3	1500	1100	1550	1200

ตารางที่ ข.2 ค่าพีเอชที่เกิดขึ้น ในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่ 1	ถังปฏิกิริยาที่ 2	ถังปฏิกิริยาที่ 3	ถังปฏิกิริยาที่ 4
1	0.5	7.93	7.92	7.93	7.93
2	0.5	7.87	7.8	7.93	7.82
3	0.5	7.32	7.35	7.43	7.39
5	0.5	7.39	7.32	7.51	7.41
6	0.5	7.15	7.16	7.22	7.22
8	0.5	7.34	7.22	7.31	7.24
9	0.5	7.28	7.25	7.18	7.15
10	0.5	7.13	7.08	7.21	7.14
11	0.5	6.96	6.86	6.99	6.92
12	0.5	6.93	6.87	6.97	6.92
13	0.5	7.16	7.09	7.23	7.12
14	0.5	7.15	7.12	7.23	7.13
15	0.5	7.19	7.13	7.25	7.1
16	0.5	7.03	6.98	7.03	6.92
17	0.5	7.06	7.16	7.2	6.99
18	0.5	6.95	6.9	6.99	6.82
19	0.5	7.07	7.09	7.06	6.88
20	0.5	7.1	7.11	7.12	6.93
22	0.5	7.24	7.31	7.2	7.16
23	0.5	7.32	7.25	7.29	7.14
24	0.5	7.31	7.28	7.3	7.13
25	0.5	7.08	7.11	7.15	7.01
26	0.5	7.17	7.24	7.16	7.04
27	0.5	7.04	7.06	7.08	6.98
28	0.5	7.45	7.38	7.5	7.27
29	0.5	7.1	7.09	7.14	6.99

ตารางที่ ข.2 ค่าพีเอชที่เกิดขึ้น ในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่ 1	ถังปฏิกิริยาที่ 2	ถังปฏิกิริยาที่ 3	ถังปฏิกิริยาที่ 4
30	0.5	7.24	7.22	7.17	7.05
31	0.5	7.13	7.13	7.15	7.01
32	0.5	7.22	7.26	7.21	7.14
33	0.5	7.22	7.13	7.13	7.05
34	0.5	7.17	7.07	7.15	7.03
35	0.5	7.26	7.21	7.21	7
36	0.5	7.32	7.2	7.26	7.02
37	0.5	7.35	7.41	7.4	7.14
38	0.5	7.26	7.32	7.29	7.12
39	0.5	7.13	7.21	7.18	7.06
40	0.5	7.15	7.16	7.3	7.06
41	0.5	7.17	7.13	7.22	7.06
42	0.5	7.21	7.11	7.27	7.06
43	0.5	7.22	7.2	7.32	7.07
44	0.5	7.06	7.13	7.14	7.09
46	0.5	7.33	7.2	7.35	7.03
47	0.5	7.26	7.17	7.38	7.23
48	1	7.16	7.2	7.25	7.03
49	1	7.2	7.12	7.3	7.12
50	1	7.2	7.17	7.26	7.1
51	1	7.25	7.22	7.39	7.14
52	1	7.21	7.2	7.36	7.13
53	1	7.25	7.07	7.38	7.22
54	1	7.25	7.13	7.38	7.11
55	1	7.31	7.31	7.2	7.18
56	1	7.35	7.2	7.36	7.22

ตารางที่ ข.2 ค่าพีเอชที่เกิดขึ้น ในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่ 1	ถังปฏิกิริยาที่ 2	ถังปฏิกิริยาที่ 3	ถังปฏิกิริยาที่ 4
57	1	7.2	7.03	7.09	6.95
58	1	7.1	7.38	7.37	7.29
59	1	7.44	7.42	7.22	6.98
60	1	7.27	7.32	7.22	7.05
61	1	7.36	7.32	7.17	6.99
62	1	7.6	7.52	7.44	7.29
63	1	7.63	7.55	7.43	7.28
64	1	7.21	7.14	7.11	6.9
66	1	7.18	7.14	7.01	6.65
67	1	7.08	6.98	6.97	6.74
68	1	7.06	7.03	7.01	6.85
70	1	7.4	7.44	7.41	7.11
71	1	7.53	7.45	7.42	7.22
72	1	7.11	7.12	7.13	6.96
73	1	7.25	7.22	7.39	7.14
75	1	7.21	7.2	7.36	7.13
76	1	7.25	7.07	7.38	7.22
77	1	7.25	7.13	7.38	7.11
79	1	7.31	7.31	7.2	7.18
82	1	7.35	7.2	7.36	7.22
85	1	7.2	7.03	7.09	6.95
87	1	7.1	7.38	7.37	7.29
88	1	7.06	7.49	7.36	7.25
89	1	7.44	7.42	7.22	6.98
90	1	7.1	7.38	7.37	7.29
91	1	7.06	7.49	7.36	7.25

ตารางที่ ข.2 ค่าพีเอชที่เกิดขึ้น ในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่ 1	ถังปฏิกิริยาที่ 2	ถังปฏิกิริยาที่ 3	ถังปฏิกิริยาที่ 4
92	1	7.44	7.42	7.22	6.98
93	1	7.27	7.32	7.22	7.05
94	1	7.36	7.32	7.17	6.99
95	1	7.1	7.11	7.12	6.93
96	1	7.24	7.31	7.2	7.16
97	1	7.32	7.25	7.29	7.14
98	2	7.31	7.28	7.3	7.13
99	2	7.08	7.11	7.15	7.01
102	2	7.17	7.24	7.16	7.04
103	2	7.04	7.06	7.08	6.98
104	2	7.45	7.38	7.5	7.27
105	2	7.93	7.92	7.93	7.93
106	2	7.87	7.8	7.93	7.82
109	2	7.32	7.35	7.43	7.39
110	2	7.39	7.32	7.51	7.41
111	2	7.15	7.16	7.22	7.22
112	2	7.34	7.22	7.31	7.24
113	2	7.28	7.25	7.18	7.15
114	2	7.1	7.38	7.37	7.29
115	2	7.06	7.49	7.36	7.25
116	2	7.44	7.42	7.22	6.98
117	2	7.27	7.32	7.22	7.05
118	2	7.36	7.32	7.17	6.99
120	2	7.6	7.52	7.44	7.29
123	2	7.08	6.98	6.97	6.74
124	2	7.06	7.03	7.01	6.85

ตารางที่ ข.2 ค่าพีเอชที่เกิดขึ้น ในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่ 1	ถังปฏิกิริยาที่ 2	ถังปฏิกิริยาที่ 3	ถังปฏิกิริยาที่ 4
125	2	7.4	7.44	7.41	7.11
126	2	7.53	7.45	7.42	7.22
127	2	7.11	7.12	7.13	6.96
128	2	7.25	7.22	7.39	7.14
130	2	7.17	7.07	7.15	7.03
131	2	7.26	7.21	7.21	7
132	2	7.32	7.2	7.26	7.02
133	2	7.35	7.41	7.4	7.14
134	2	7.26	7.32	7.29	7.12
137	2	7.16	7.09	7.23	7.12
138	2	7.15	7.12	7.23	7.13
139	2	7.19	7.13	7.25	7.1
141	2	7.03	6.98	7.03	6.92
142	2	7.06	7.16	7.2	6.99
143	2	6.95	6.9	6.99	6.82
144	2	7.07	7.09	7.06	6.88
145	2	7.07	7.06	7.38	7.24
148	2	7.13	7.4	7.49	7.32
149	2	7.11	7.53	7.42	7.31
151	2	7.13	7.11	7.32	7.08
152	3	7.26	7.25	7.32	7.17
153	3	7.13	7.21	7.52	7.04
155	3	7.07	7.25	6.98	7.45
156	3	7.21	7.25	7.03	7.93
158	3	7.2	7.15	7.44	7.87
159	3	7.41	7.13	7.45	7.32

ตารางที่ ข.2 ค่าพีเอชที่เกิดขึ้น ในแต่ละถังปฏิกรณ์ที่ภาระสารอินทรีย์ต่างๆ (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกิริยาที่ 1	ถังปฏิกิริยาที่ 2	ถังปฏิกิริยาที่ 3	ถังปฏิกิริยาที่ 4
160	3	7.16	7.22	7.12	7.39
161	3	7.14	7.03	7.22	7.43
167	3	7.13	7.12	7.17	7.51
169	3	7.01	7.1	7.2	7.22
173	3	7.04	7.14	7.12	7.31
175	3	7.25	7.04	7.19	7.13
176	3	7.21	6.98	7.03	6.98
179	3	7.13	7.27	7.06	7.16
180	3	7.15	6.99	7.32	7.2
181	3	7.21	7.05	7.35	7.41
183	3	7.26	7.00	7.26	7.32
186	3	7.4	7.31	7.16	7.09
188	3	7.29	7	7.15	7.12
189	3	7.18	7.01	7.19	7.13
190	3	7.3	7.14	7.03	6.98

ตารางที่ ข.3 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 1

วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดีน้ำเสีย (มก./ล)	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ซีโอดีน้ำทิ้ง(มก./ล) (กรอง)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
7	4,756	0.5	596	87.58
9		0.5	464	90.32
13		0.5	275	94.26
14	4,932	0.5	290	93.95
16		0.5	151	96.84
18		0.5	303	93.67
19	4,876	0.5	490	89.78
23		0.5	227	95.27
26		0.5	325	93.21
28	4,945	0.5	79	98.35
33		0.5	306	93.62
34		0.5	393	91.79
36	4,736	0.5	310	93.54
38		0.5	427	91.09
41		0.5	335	93.00
50	9,472	1	920	90.31
53		1	1,326	86.04
54		1	1,016	89.29
55	9,521	1	1,321	86.09
57		1	1,941	79.56
60	9,485	1	1,863	80.39
62		1	2,458	74.12
71		1	652	93.13
78	9,543	1	369	96.11
88		1	408	95.70
90		1	579	93.90

ตารางที่ ข.3 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 1(ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดีน้ำเสีย (มก./ล)	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ซีโอดีน้ำทิ้ง(มก./ล) (กรอง)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
104	22,319	2	556	97.35
106		2	556	97.35
109		2	667	96.82
111	21,145	2	679	96.77
117		2	851	95.94
120		2	1,046	95.02
125		2	1,015	95.16
130	21,268	2	656	96.87
132		2	595	97.16
137		2	865	95.88
139		2	840.00	96.00
153	31,496	3	788	97.54
157		3	702	97.80
164		3	1,108	96.53
171	32,852	3	1,251	96.09
175		3	1,224	96.17
180		3	1,158	96.38
183	31,743	3	997	96.88
186		3	963	96.99
188		3	1,014	96.83

ตารางที่ ข.4 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 2

วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดีน้ำเสีย (มก./ล)	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ซีโอดีน้ำทิ้ง(มก./ล) (กรอง)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
7	4,756	0.5	510	89.36
9		0.5	412.	91.40
13		0.5	340	92.90
14	4,932	0.5	178	96.29
16		0.5	256	94.65
18		0.5	210	95.62
19	4,876	0.5	140	97.08
23		0.5	271	94.34
26		0.5	320	93.31
28	4,945	0.5	118	97.53
33		0.5	251	94.75
34		0.5	86	98.21
36	4,736	0.5	210	95.61
38		0.5	293	93.89
41		0.5	274	94.27
50	9,472	1	690	92.73
53		1	1,227	87.08
54		1	856	90.98
55	9,521	1	1,175	87.62
57		1	2,185	77.00
60	9,485	1	1,990	79.05
62		1	1,229	87.06
71		1	616	93.51
78	9,543	1	1,463	84.59
88		1	452	95.24
90		1	475	95.00

ตารางที่ ข.4 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 2(ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดีน้ำเสีย (มก./ล)	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ซีโอดีน้ำทิ้ง(มก./ล) (กรอง)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
104	22,319	2	602	97.13
106		2	591	97.18
109		2	920	95.61
111	21,145	2	932	95.56
117		2	794	96.22
120		2	846	95.97
125		2	876	95.82
130	21,268	2	630	97.00
132		2	648	96.91
137		2	925	95.59
139		2	788	96.24
153	31,496	3	977	96.95
157		3	582	98.18
164		3	777	97.57
171	32,852	3	840	97.38
175		3	910	97.16
180		3	777	97.57
183	31,743	3	819	97.44
186		3	785	97.54
188		3	650	97.97

ตารางที่ ข.5 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 3

วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดีน้ำเสีย (มก./ล)	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ซีโอดีน้ำทิ้ง(มก./ล) (กรอง)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
7	4,756	0.5	805	83.23
9		0.5	658	86.29
13		0.5	445	90.71
14	4,932	0.5	570	88.12
16		0.5	350	92.70
18		0.5	548	88.56
19	4,876	0.5	502	89.54
23		0.5	439	90.84
26		0.5	622	87.04
28	4,945	0.5	266	94.44
33		0.5	424	91.15
34		0.5	270	94.36
36	4,736	0.5	372	92.25
38		0.5	396	91.73
41		0.5	268	94.40
50	9,472	1	427	95.50
53		1	536	94.35
54		1	427	95.50
55	9,521	1	383	95.96
57		1	442	95.34
60	9,485	1	403	95.76
62		1	832	91.24
71		1	634	93.32
78	9,543	1	351	96.30
88		1	356	96.25
90		1	498	94.75

ตารางที่ ข.5 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 3(ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดีน้ำเสีย (มก./ล)	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ซีโอดีน้ำทิ้ง(มก./ล) (กรอง)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
104	22,319	2	591	97.18
106		2	637	96.96
109		2	794	96.22
111	21,145	2	805	96.16
117		2	679	96.77
120		2	661	96.85
125		2	661	96.85
130	21,268	2	543	97.41
132		2	411	98.04
137		2	840	96.00
139		2	557	97.35
153	31,496	3	805	97.48
157		3	737	97.70
164		3	827	97.41
171	32,852	3	925	97.11
175		3	844	97.36
180		3	860	97.31
183	31,743	3	785	97.54
186		3	752	97.65
188		3	794	97.52

ตารางที่ ข.6 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 4

วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดีน้ำเสีย (มก./ล)	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ซีโอดีน้ำทิ้ง(มก./ล) (กรอง)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
7	4,756	0.5	557	88.39
9		0.5	425	91.13
13		0.5	314	93.44
14	4,932	0.5	499	89.60
16		0.5	499	89.60
18		0.5	198	95.86
19	4,876	0.5	256	94.65
23		0.5	256	94.65
26		0.5	162	96.61
28	4,945	0.5	128	97.33
33		0.5	177	96.30
34		0.5	61	98.72
36	4,736	0.5	186	96.12
38		0.5	189	96.06
41		0.5	140	97.07
50	9,472	1	120	98.73
53		1	219	97.69
54		1	164	98.27
55	9,521	1	221	97.67
57		1	318	96.65
60	9,485	1	266	97.19
62		1	253	97.33
71		1	321	96.61
78	9,543	1	29	99.69
88		1	400	95.79
90		1	301	96.83

ตารางที่ ข.6 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ 4(ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ซีโอดีน้ำเสีย (มก./ล)	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ซีโอดีน้ำทิ้ง(มก./ล) (กรอง)	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
104	22,319	2	208	99.01
106		2	220	98.95
109		2	276	98.68
111	21,145	2	287	98.63
117		2	264	98.74
120		2	653	96.89
125		2	538	97.44
130	21,268	2	394	98.12
132		2	376	98.21
137		2	891.	95.76
139		2	522	97.51
153	31,496	3	377	98.82
157		3	582	98.18
164		3	678	97.88
171	32,852	3	720	97.75
175		3	678	97.88
180		3	678	97.88
183	31,743	3	861	97.31
186		3	828	97.41
188		3	870	97.28

ตารางที่ ข.7 ของแข็งแขวนลอย, ของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		เอสเอส (มก/ล)	วีเอสเอส (มก/ล)	เอสเอส (มก/ล)	วีเอสเอส (มก/ล)
1	0.5	2,640	480	3,620	1020
6	0.5	2,480	660	2,460	720
9	0.5	600	10	880	20
13	0.5	910	160	900	150
15	0.5	1,130	190	480	40
20	0.5	150	10	1,480	400
26	0.5	460	50	1,540	420
33	0.5	1,290	270	830	190
35	0.5	1,150	150	1,270	240
40	0.5	480	120	1,650	370
46	0.5	330	120	930	360
50	1	280	70	1,170	260
54	1	470	170	990	260
57	1	430	30	1,490	260
64	1	1,310	130	980	200
70	1	470	40	630	30
78	1	200	10	460	10
82	1	2,060	520	1,130	340
89	1	940	30	390	30
98	2	1,530	360	1,950	400
104	2	1,980	440	980	190
111	2	980	370	790	160
125	2	760	50	870	70
131	2	1,630	370	840	160
145	2	760	50	870	70
153	3	6,710	260	9,800	690
167	3	1,060	320	4,480	1,320

ตารางที่ ข.7 ของแข็งแขวนลอย, ของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2(ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		เอสเอส (มก/ล)	วีเอสเอส (มก/ล)	เอสเอส (มก/ล)	วีเอสเอส (มก/ล)
176	3	2,340	220	8,840	1,760
181	3	2,440	380	19,280	3680
188	3	940	160	7,540	1920

ตารางที่ ข.8 ของแข็งแขวนลอย, ของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3		ถังปฏิกรณ์ที่ 4	
		เอสเอส (มก/ล)	วีเอสเอส (มก/ล)	เอสเอส (มก/ล)	วีเอสเอส (มก/ล)
1	0.5	4,500	1,420	1,560	220
6	0.5	3,780	1,120	1,000	220
9	0.5	2,740	840	480	10
13	0.5	1,480	440	410	70
15	0.5	2,220	650	510	60
20	0.5	2,160	660	320	30
26	0.5	2,230	650	300	20
33	0.5	1,750	510	110	70
35	0.5	1,710	390	200	30
40	0.5	1,380	300	440	100
46	0.5	900	340	130	60
50	1	1,300	420	140	80
54	1	1,500	490	320	50
57	1	1,480	330	500	90
64	1	810	140	640	80
70	1	780	150	410	10
78	1	370	260	310	20
82	1	1,850	680	830	300
89	1	2,340	300	270	10
98	2	970	270	720	70
104	2	1,810	640	680	150
111	2	790	220	320	20
125	2	470	10	850	10
131	2	790	220	320	30
145	2	470	10	850	90
153	3	2,720	110	30,840	1,860
167	3	10,380	2,320	2,620	600

ตารางที่ ข.8 ของแข็งแขวนลอย, ของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4(ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3		ถังปฏิกรณ์ที่ 4	
		เอสเอส (มก/ล)	วีเอสเอส (มก/ล)	เอสเอส (มก/ล)	วีเอสเอส (มก/ล)
176	3	1,480	280	2,040	820
181	3	1,820	440	3,740	1,020
188	3	14,200	4,740	9,840	2,440

ตารางที่ ข.9 อัลคาไลนิตี้, วีเอฟเอ ในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		อัลคาไลนิตี้ (มก/ล)	วีเอฟเอ (มก/ล)	อัลคาไลนิตี้ (มก/ล)	วีเอฟเอ (มก/ล)
6	0.5	2,612	627	2,492	536
8	0.5	2,465	356	2,480	324
12	0.5	1,820	119	1,808	108
15	0.5	1,632	176	1,562	85
16	0.5	1,746	81	1,825	90
20	0.5	2,071	77	2,143	103
22	0.5	2,375	64	2,344	74
26	0.5	2,249	97	2,558	134
28	0.5	2,656	135	2,766	85
33	0.5	2,875	175	3,063	125
34	0.5	2,953	140	3,063	124
36	0.5	2,743	177	2,771	172
39	0.5	2,743	131	2,736	157
41	0.5	2,743	447	2,800	295
50	1	3,018	148	2,833	135
53	1	3,518	445	3,315	470
54	1	3,960	1,170	3,720	998
55	1	4,040	1,223	4,020	1,095
57	1	4,480	688	4,260	515
60	1	4,160	709	4,000	790
62	1	3,340	859	3,380	344
67	1	2,792	108	2,583	153
70	1	2,812	171	2,625	310
74	1	2,306	122	2,571	100
78	1	2,558	293	2,589	181
81	1	2,494	150	2,457	279
88	1	2,870	156	2,759	162

ตารางที่ ข.9 อัลคาไลนิตี้, วีเอฟเอ ในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2(ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		อัลคาไลนิตี้ (มก/ล)	วีเอฟเอ (มก/ล)	อัลคาไลนิตี้ (มก/ล)	วีเอฟเอ (มก/ล)
91	1	2,981	156	2,944	282
99	2	3,058	358	2,837	376
104	2	3,167	282	3,055	290
109	2	2,426	175	2,630	159
112	2	3,018	150	2,833	153
117	2	2,815	173	3,111	153
120	2	3,308	109	3,228	88
123	2	3,148	277	3,228	286
126	2	2,611	150	2,908	134
130	2	2,393	152	2,294	136
139	2	2,265	338	2,520	319
144	2	3,268	129	3,149	139
152	2	3,077	173	2,743	163
155	3	2,622	154	2,561	137
159	3	3,143	307	3,306	277
165	3	3,260	297	3,136	288
169	3	3,291	299	3,198	305
176	3	3,058	293	2,996	178
180	3	2,713	284	2,704	464
186	3	2,157	116	2,218	193

ตารางที่ ข.10 อัลคาไลนิตี้, วีเอฟเอ ในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3		ถังปฏิกรณ์ที่ 4	
		อัลคาไลนิตี้ (มก/ล)	วีเอฟเอ (มก/ล)	อัลคาไลนิตี้ (มก/ล)	วีเอฟเอ (มก/ล)
6	0.5	2,976	765	3,048	474
8	0.5	2,808	794	2,851	308
12	0.5	2,215	356	2,242	119
15	0.5	1,913	279	1,882	90
16	0.5	2,095	297	2,143	77
20	0.5	2,371	317	2,329	77
22	0.5	2,609	275	2,656	69
26	0.5	2,823	363	2,631	81
28	0.5	3,016	285	2,938	65
33	0.5	3,188	413	3,047	40
34	0.5	3,180	346	3,070	53
36	0.5	2,986	432	2,800	51
39	0.5	2,814	288	2,871	63
41	0.5	2,929	364	2,900	45
50	1	3,111	96	3,111	38
53	1	3,222	88	3,204	27
54	1	3,540	160	3,660	55
55	1	3,400	130	4,000	80
57	1	3,420	106	4,160	33
60	1	3,300	76	4,020	32
62	1	2,760	73	3,440	19
67	1	2,667	147	2,750	126
70	1	2,729	296	2,812	132
74	1	2,429	97	2,898	130
78	1	2,114	142	2,635	163
81	1	2,383	144	2,569	167
88	1	2,833	144	2,722	179

ตารางที่ ข.10 อัลคาไลนิตี้, วีเอฟเอ ในน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4(ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 3		ถังปฏิกรณ์ที่ 4	
		อัลคาไลนิตี้ (มก/ล)	วีเอฟเอ (มก/ล)	อัลคาไลนิตี้ (มก/ล)	วีเอฟเอ (มก/ล)
91	1	2,667	150	2,611	282
99	2	2,874	320	2,727	376
104	2	2,944	156	3,185	168
109	2	2,889	172	2,833	150
112	2	2,889	163	2,759	150
117	2	3,000	155	2,824	145
120	2	3,268	106	3,188	91
123	2	3,449	305	3,188	153
126	2	2,532	100	2,492	125
130	2	2,354	102	2,888	175
139	2	2,347	142	3,000	181
144	2	3,363	108	3,005	300
152	2	2,815	142	2,743	105
155	3	2,643	171	2,551	148
159	3	3,429	145	3,204	290
165	3	3,447	178	3,353	282
169	3	3,121	288	3,478	272
176	3	2,888	276	2,919	251
180	3	2,426	124	2,759	201
186	3	2,130	52	2,528	229

ตารางที่ ข.11 ทีเคเอ็นน้ำเข้าและทีเคเอ็นน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำออก (กรอง) (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำออก (กรอง) (มก/ล)
2	0.5	185		185	
6	0.5	203	81	203	93
13	0.5		80		87
20	0.5	199	75	199	91
26	0.5		77		92
30	0.5		81		86
36	0.5	198	75	198	95
42	0.5		74		93
47	0.5		80		89
50	1	264	57	264	75
55	1		58		75
61	1		55		74
66	1	269	56	269	70
70	1		58		73
78	1		52		74
83	1	262	53	262	72
89	1		54		73
98	2	309	59	309	76
104	2		53		79
111	2		62		76
120	2	288	66	288	76
128	2		55		72
135	2		60		73
141	2	307	55	307	73
149	2		55		71

ตารางที่ ข.11 ทีเคเอ็นน้ำเข้าและทีเคเอ็นน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำออก (กรอง) (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำออก (กรอง) (มก/ล)
153	3	356	149	356	109
167	3		145		112
176	3	357	142	357	121
181	3		146		107
188	3	355	147	355	110

ตารางที่ ข.12 ทีเคเอ็นน้ำเข้าและทีเคเอ็นน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำออก (กรอง) (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำออก (กรอง) (มก/ล)
2	0.5	326		185	
6	0.5	328	128	203	60
13	0.5		125		52
20	0.5	324	111	199	52
26	0.5		125		55
30	0.5		121		51
36	0.5	324	109	198	56
42	0.5		124		52
47	0.5		120		49
50	1	393	109	264	49
55	1		107		48
61	1		107		50
66	1	391	105	269	51
70	1		118		48
78	1		102		50
83	1	391	105	262	49
89	1		101		50
98	2	448	189	309	62
104	2		157		62
111	2		159		69
120	2	449	177	288	61
128	2		178		62
135	2		154		58
141	2	448	172	307	62
149	2		178		63

ตารางที่ ข.12 ทีเคเอ็นน้ำเข้าและทีเคเอ็นน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4(ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำออก (กรอง) (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำเข้า (มก/ล)	ทีเคเอ็นน้ำออก (กรอง) (มก/ล)
153	3	485	209	356	113
167	3		188		106
176	3	488	161	357	99
181	3		210		111
188	3	485	183	355	80

ตารางที่ ข.13 ฟอสฟอรัสทั้งหมดน้ำเข้าและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		TP น้ำเข้า (มก/ล)	TP น้ำออก (กรอง) (มก/ล)	TP น้ำเข้า (มก/ล)	TP น้ำออก (กรอง) (มก/ล)
6	0.5		11		10
18	0.5	33	12	33	11
22	0.5		10		12
28	0.5		12		12
34	0.5	32	13	32	13
38	0.5		12		10
43	0.5		11		11
47	0.5	33	11	33	10
50	1	38	16	38	15
58	1		14		16
63	1		15		14
69	1	35	14	35	17
75	1		13		14
82	1	37	14	37	15
95	1		14		14
98	2	52	-	52	-
101	2		13		15
112	2		13		14
120	2	53	13	53	15
128	2		14		14
135	2		13		13
141	2	52	13	52	14
149	2		14		14
153	3		18		16
167	3	49	18	49	15

ตารางที่ ข.13 ฟอสฟอรัสทั้งหมดน้ำเข้าและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		TP น้ำเข้า (มก/ล)	TP น้ำออก (กรอง) (มก/ล)	TP น้ำเข้า (มก/ล)	TP น้ำออก (กรอง) (มก/ล)
179	3		17		14
184	3	49	18	49	15
189	3		18		15

ตารางที่ ข.14 ฟอสฟอรัสทั้งหมดน้ำเข้าและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		TP น้ำเข้า (มก/ล)	TP น้ำออก (กรอง) (มก/ล)	TP น้ำเข้า (มก/ล)	TP น้ำออก (กรอง) (มก/ล)
6	0.5		17		26
18	0.5	48	17	33	27
22	0.5		18		27
28	0.5		17		26
34	0.5	47	17	32	26
38	0.5		18		26
43	0.5		18		27
47	0.5	47	17	33	26
50	1	53	19	38	17
58	1		19		17
63	1		18		18
69	1	54	18	35	17
75	1		19		17
82	1	53	18	37	17
95	1		18		17
98	2	66	-	52	-
101	2		18		24
112	2		17		24
120	2	67	18	53	24
128	2		17		23
135	2		17		24
141	2	66	17	52	24
149	2		17		23
153	3		21		32
167	3	70	22	49	31

ตารางที่ ข.14 ฟอสฟอรัสทั้งหมดน้ำเข้าและน้ำออกของถังปฏิกรณ์ที่ 3 และ 4 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ภาระสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม-วัน)	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
		TP น้ำเข้า (มก/ล)	TP น้ำออก (กรอง) (มก/ล)	TP น้ำเข้า (มก/ล)	TP น้ำออก (กรอง) (มก/ล)
179	3		21		30
184	3	69	20	49	31
189	3		21		31

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล นางสาวสินิจนันท์ เสียงเสนาะ

วัน เดือน ปีเกิด 3 มีนาคม 2527

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย
	โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ หอวัง นนทบุรี พ.ศ. 2544
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
	มหาวิทยาลัยรามคำแหง พ.ศ. 2549
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2553

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ สินิจนันท์ เสียงเสนาะ และ สาโรช บุญยกิจสมบัติ, 2553, "ผลของสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จากกากตะกอนปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก" , **การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 9**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

วันที่ 22 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2553

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) สินิจนันท์ เสียงเสนาะ รหัสประจำตัว 51400413 เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับ ○ ประกาศนียบัตรบัณฑิต ◉ ปริญญาโท ○ ปริญญาเอก หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ อยู่บ้านเลขที่ 81/19 หมู่ 3 ตรอก/ซอย ศรีอุดมทรัพย์ ตำบล/แขวง บ้านใหม่ อำเภอ/เขต ปากเกร็ด จังหวัด นนทบุรี รหัสไปรษณีย์ 11120 เป็น "ผู้โอน"ขอโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี รศ.ดร.ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์ ตำแหน่ง รองคณบดีฝ่ายวิชาการ เป็นตัวแทน "ผู้รับโอน" สิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาและมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง ผลของสารอาหารเสริมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนปาล์มของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ อาจารย์ที่ปรึกษา และ/หรืออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรือให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก่อน

5. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาประเภทอื่น ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปีนับจากวันลงนามในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าว รวมถึงการจัดสรรผลประโยชน์อันพึงเกิดขึ้นจากส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ในอนาคต โดยให้เป็นไปตามระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

6. ในกรณีที่มีผลประโยชน์เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาอื่นที่ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการจัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญาดังกล่าวตามอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วยการบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

ลงชื่อ.....ผู้โอนสิทธิ
(นางสาวสินิจนันท์ เสียงเสนาะ)

ลงชื่อ.....ผู้รับโอนสิทธิ
(รศ.ดร.ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์)
รองคณบดีฝ่ายวิชาการ ปฏิบัติการแทนคณบดีฯ

ลงชื่อ.....พยาน
(ดร.สาโรช บุญยกิจสมบัติ)

ลงชื่อ.....พยาน
(ผศ.จารุรัตน์ วรนิสรากุล)