

ผลของความลาดชันความเร็วและอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อการบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน  
สกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ระบบเอเอสบีอาร์



นายันทพงศ์ จันทมาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

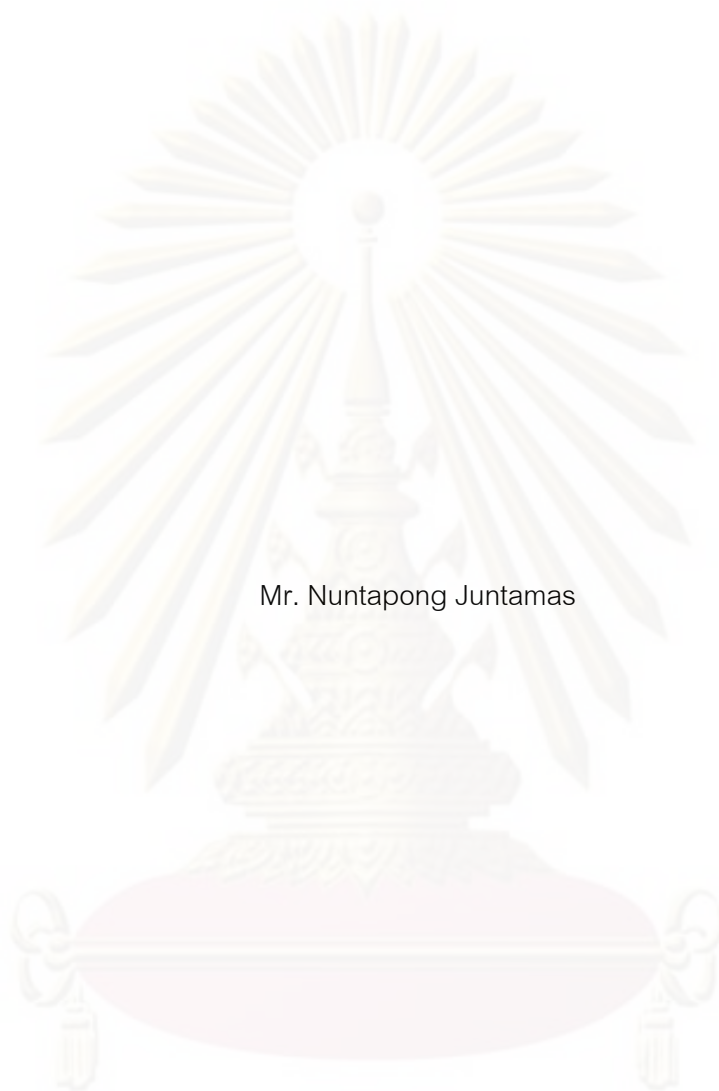
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF VELOCITY GRADIENT AND ORGANIC LOADING RATE ON WASTEWATER  
TREATMENT FROM PALM OIL MILL USING ASBR SYSTEM



Mr. Nuntapong Juntamas

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science

(Interdisciplinary Program)

Graduate School  
Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของความลาดชันความเร็วและอัตราภาระบรรทุก  
สารอินทรีย์ต่อการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมัน  
ปาล์มโดยใช้ระบบเอเอสบีอาร์

โดย

นายันทพงศ์ จันทมาศ

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภาวนันต์)

กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. สาโรช บุญยกิจสมบัติ)

นันทพงศ์ จันทมาศ : ผลของความลาดชันความเร็วและอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ระบบเอเอสบีอาร์. (EFFECT OF VELOCITY GRADIENT AND ORGANIC LOADING RATE ON WASTEWATER TREATMENT FROM PALM OIL MILL USING ASBR SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล, 113 หน้า.

การกวนผสมและอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเดินระบบที่มีผลต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ระดับของการกวนผสมวัดได้ในรูปของความลาดชันความเร็ว การทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความลาดชันความเร็วและอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนผสมรูปทรงกระบอกที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน ขนาด 10 ลิตร ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความลาดชันความเร็วจาก 25 เป็น 50 75 และ 100 ต่อวินาที อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 12 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีผลทำให้สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างเพิ่มขึ้นตามความลาดชันความเร็ว โดยที่ความลาดชันความเร็ว 50 ต่อวินาที ทั้งในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้สูงสุดคือ 76.00 และ 81.75 เปอร์เซ็นต์ ผลผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุดคือ 204 และ 51 มิลลิลิตรต่อวันตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนแก๊สมีเทนเท่ากับ 43 เปอร์เซ็นต์ เมื่อลดอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 10 8 และ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันที่ความลาดชันความเร็วเท่ากันคือ 50 ต่อวินาที พบว่าปริมาณฟองและคราบสบู่ที่ผิวหน้าถังปฏิกรณ์กวนผสมลดลงตามอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน ทั้งในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้สูงสุดคือ 80.71 และ 84.31 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุดคือ 424 และ 420 มิลลิลิตรต่อวัน คิดเป็นสัดส่วนแก๊สมีเทน 51 และ 48 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและสำหรับการกวนในแนวตั้งมีผลให้เกิดฟองและคราบสบู่ที่ผิวหน้าของถังปฏิกรณ์กวนผสมน้อยกว่าการกวนในแนวนอน

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

นันทพงศ์ จันทมาศ

# #5087151920 : MAJOR OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : COMPLETELY STIRRED TANK REACTOR/ VELOCITY GRADIENT/  
ORGANIC LOADING RATE/

NUNTAPONG JUNTAMAS: EFFECT OF VELOCITY GRADIENT AND ORGANIC LOADING RATE ON WASTEWATER TREATMENT FROM PALM OIL MILL USING ASBR SYSTEM. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 113 pp.

Stirring and organic loading rate are significant factors of operating system for anaerobic treatment. Level of stirring can be measured in term of velocity gradient. An objective of this study is to observe results of velocity gradient and organic loading rate to waste water treatment from palm oil mill. Studies were carried out on 10-liter completely stirred tank reactor with vertical and horizontal mixing. The result shows that the increasing of velocity gradient from 25 to 50, 75 and 100  $s^{-1}$  at the organic loading rate of 12  $g[COD]L^{-1}d^{-1}$  has effected to the ratio of volatile fatty acid and alkaline in reactor also increased due to velocity gradient. At velocity gradient of 50  $s^{-1}$  both in vertical and horizontal mixing, gave out the highest efficiency for COD removal of 76.00 and 81.75 percent, could produce which is the most of biogas as is 204 and 51  $ml-d^{-1}$  respectively, which is the same amount of 43 percent of methane gas. When decreasing organic loading rate to 10, 8 and 5  $g[COD]L^{-1}d^{-1}$  at the same of velocity gradient 50  $s^{-1}$ , the result showed that bubbles and scum produced on surface of reactor has also decreased due to the organic loading rate. At the organic loading rate of 10  $g[COD]L^{-1}d^{-1}$ , both in vertical and horizontal mixing the highest efficiency for COD removal was 80.71 and 84.31 percent respectively. The results also indicate that at the organic loading rate of 5  $g[COD]L^{-1}d^{-1}$  produced the most of biogas as is 424 and 420  $ml-d^{-1}$  which are 51 and 48 percent of methane gas respectively. Efficiency of COD removal of reactor that has horizontal mixing and vertical mixing, it was found that no significant difference was observed. Moreover bubbles and scum were produced in stirring with vertical mixing more than in stirring with horizontal mixing.

Field of Study : Environmental Science.....

Student's Signature

*Chavalit Ratanatamskul*

Academic Year : 2009.....

Advisor's Signature

*Chavalit Ratanatamskul*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่างๆ เกี่ยวกับการวิจัยมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนประสบความสำเร็จด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ (ประธานกรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา (กรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภาวสันต์ (กรรมการ) และ อาจารย์ ดร. สาโรช บุญยกิจสมบัติ (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้ให้คำแนะนำในการปรับปรุงและแก้ไขให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร. นุชรา สีนบัวทอง นักวิทยาศาสตร์หัวหน้างานวิเคราะห์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คุณนิพนธ์ อรุณรัตน์ ผู้จัดการสิ่งแวดล้อม คุณอนงค์ แสงสุวรรณ และ คุณสนิภา ฝ่องแผ้ว พนักงานฝ่ายสิ่งแวดล้อม บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ที่ช่วยให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำตลอดการทดลอง

ขอขอบคุณ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้เงินทุนสำหรับการทำวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ เก็บตัวอย่างพร้อมจัดส่งน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

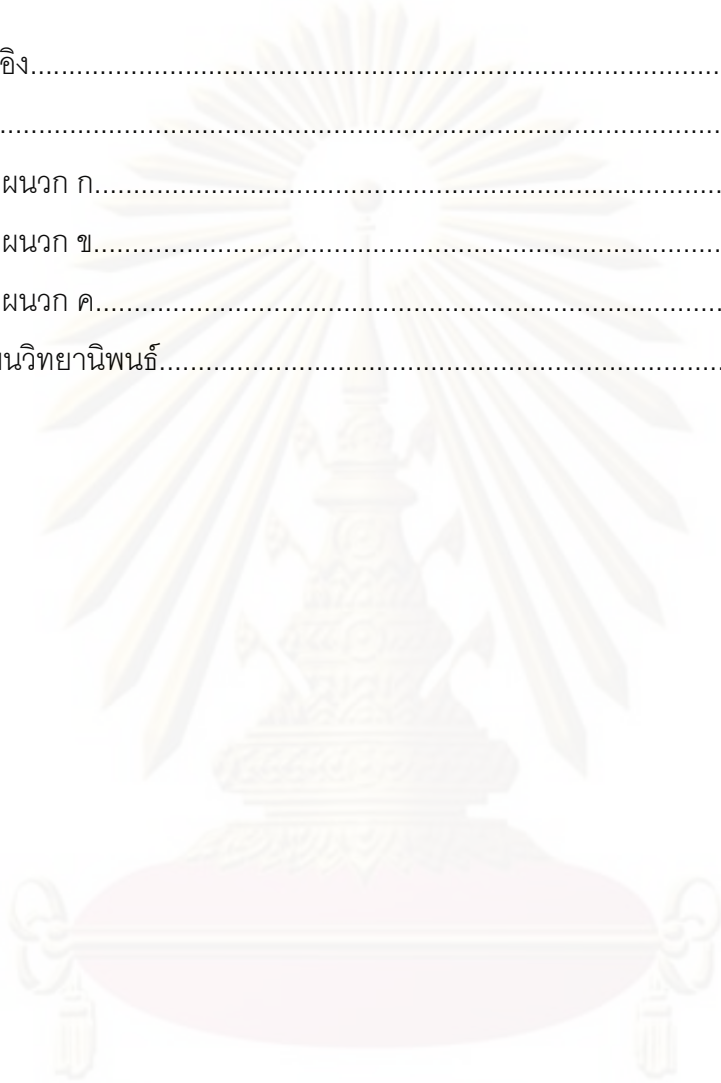
ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ บิดา-มารดา และครอบครัวที่ได้อบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุน เกี่ยวกับการเรียนในทุกๆ ด้าน ท่านเหล่านี้เป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดสำหรับผู้วิจัยเสมอมา จนถึงวันที่ประสบความสำเร็จทางการศึกษา จึงขอมอบความดีต่างๆ ที่เกิดขึ้นให้ท่านเหล่านี้ ด้วยความรักและเคารพตลอดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.....	5
2.2 หลักการพื้นฐานของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ.....	8
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ.....	15
2.4 การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบบำบัดแบบเอเอสปีอาร์.....	26
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3 อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง.....	40
3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.2 หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบ.....	41
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.4 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	43
3.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	44
3.6 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ.....	52
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	53
4.1 ผลการทดลองตอนที่ 1 การศึกษาเพื่อหาค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสม..	53

บทที่	ช หน้า
4.2 ผลการทดลองตอนที่ 2 การศึกษาเพื่อหาค่าอัตราภาวะบรรทุทุกสารอินทรีย์ที่ เหมาะสม.....	80
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	99
รายการอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก.....	106
ภาคผนวก ข.....	108
ภาคผนวก ค.....	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113



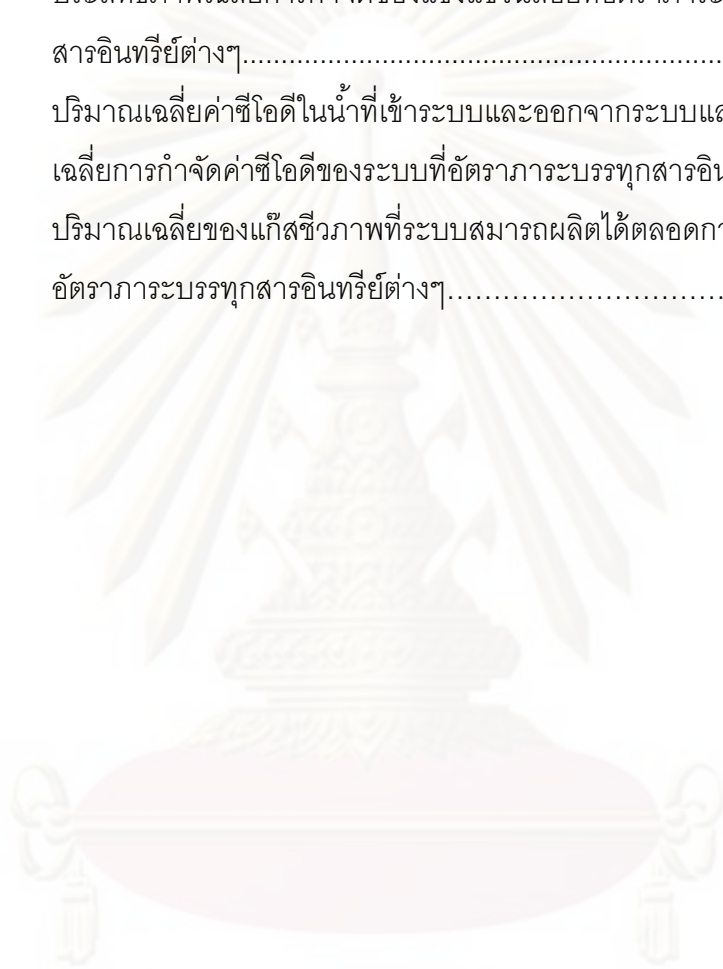
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ข้อกำหนดขั้นต่ำสุดสำหรับน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ.....	2
2.1	คุณลักษณะโดยเฉลี่ยของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 4 โรงงาน....	7
2.2	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของเซลล์แบคทีเรียและอัตราการย่อยสลายตัวของแบคทีเรียในช่วงเย็นไอจิ้นัส สำหรับแบคทีเรียในถังหมักแบบไร้อากาศ.....	14
2.3	ความเข้มข้นของอิออนบวกที่กระตุ้นและยับยั้งปฏิกิริยา.....	19
2.4	การเพิ่มความเข้มข้นของอิออนแต่ละชนิด.....	20
2.5	การลดความเข้มข้นของอิออนแต่ละชนิด.....	20
2.6	ประเภทของโลหะหนักที่พบในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	21
2.7	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่สามารถยับยั้งการทำงานของระบบ.....	21
2.8	ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียอิออน.....	22
2.9	ค่า $\Delta G^\circ$ ในการรีดิวซ์ซัลเฟตและสร้างมีเทน.....	23
2.10	ค่าคงที่ $K_L$ ของไบโกลนที่มีการติดตั้งภายในถังปฏิกรณ์กลวนผสม.....	33
2.11	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.....	39
3.1	ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทำการทดลอง.....	41
3.2	พารามิเตอร์ ความถี่ และวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรตาม.....	46
4.1	ปริมาณเฉลี่ยของไขมันและน้ำมันในน้ำที่เข้าระบบและน้ำที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของระบบที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ.....	62
4.2	ปริมาณเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของระบบที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ.....	67
4.3	ปริมาณเฉลี่ยของค่าซีไอดีในน้ำที่เข้าระบบและน้ำที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของระบบที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ....	72
4.4	ปริมาณเฉลี่ยของแก๊สชีวภาพที่ระบบสามารถผลิตได้ตลอดการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ.....	76

ตารางที่		ญ หน้า
4.5	ปริมาณเฉลี่ยของไขมันและน้ำมันในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.....	86
4.6	ปริมาณเฉลี่ยแข็งแขวนลอยในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบและประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.....	90
4.7	ปริมาณเฉลี่ยค่าซีโอดีในน้ำที่เข้าระบบและออกจากระบบและประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดค่าซีโอดีของระบบที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.....	94
4.8	ปริมาณเฉลี่ยของแก๊สชีวภาพที่ระบบสามารถผลิตได้ตลอดการทดลองที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ต่างๆ.....	97



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	10
2.2	ถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอนและแนวตั้ง.....	27
2.3	ถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการใช้ใบพัดในการกวนผสม.....	28
2.4	ถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการใช้การสูบน้ำเสียหมุนเวียนภายในถังปฏิกรณ์.....	29
2.5	ถังปฏิกรณ์กวนผสมที่อาศัยแก๊สที่เกิดขึ้นภายในถังเป็นตัวกวนผสม.....	29
2.6	ความลาดชันความเร็ว.....	30
2.7	ชนิดของใบกวนและลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์กวนผสม.....	32
3.1	ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.....	40
3.2	ลักษณะของถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน.....	42
3.3	แผนผังการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสปีอาร์.....	44
3.4	แผนการดำเนินการทดลอง.....	45
4.1	สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับวันที่ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่มี การกวนในแนวตั้ง.....	54
4.2	พีเอชของน้ำออกจากระบบกับวันที่ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มี การกวนในแนวตั้ง.....	54
4.3	สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับวันที่ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่ มีการกวนในแนวนอน.....	57
4.4	พีเอชของน้ำออกจากระบบกับวันที่ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มี การกวนในแนวนอน.....	57
4.5	ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับความลาดชัน ความเร็วภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและ แนวนอน.....	58
4.6	ความเข้มข้นของไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็ว ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	60
4.7	ความเข้มข้นของไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็ว ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	60
4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชัน ความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	61

ภาพที่	หน้า	
4.9	ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชัน ความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	61
4.10	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดไขมันและน้ำมันเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวน สมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ.....	63
4.11	ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันกับความลาดชัน ความเร็วในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน.....	64
4.12	ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็ว ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	65
4.13	ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็ว ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	65
4.14	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชัน ความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	66
4.15	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชัน ความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	66
4.16	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของแข็งแขวนลอยเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวน สมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ.....	68
4.17	แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยกับความ ลาดชันความเร็วในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน.....	69
4.18	ความเข้มข้นของค่าซีโอดีกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	70
4.19	ความเข้มข้นของค่าซีโอดีกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	70
4.20	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็ว ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	71
4.21	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็ว ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	71
4.22	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดค่าซีโอดีเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มี การกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ.....	73
4.23	ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกับความลาดชันความเร็วในถัง ปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน.....	74

ภาพที่	หน้า
4.24 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นเก็บวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็ว ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	75
4.25 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นเก็บวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็ว ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	75
4.26 ประสิทธิภาพเฉลี่ยปริมาณแก๊สชีวภาพเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ.....	77
4.27 ความสัมพันธ์ของปริมาณแก๊สชีวภาพเฉลี่ยกับความลาดชันความเร็วในถัง ปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน.....	78
4.28 ความสัมพันธ์สัดส่วนแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพกับความลาดชันความเร็วในถัง ปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน.....	79
4.29 สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะ บรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	81
4.30 พีเอชของน้ำออกจากระบบกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรทุก สารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	81
4.31 สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะ บรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	82
4.32 พีเอชของน้ำที่ออกจากระบบกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรทุก สารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	82
4.33 ความเข้มข้นไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรทุก สารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	84
4.34 ความเข้มข้นไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรทุก สารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	84
4.35 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะ บรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง.....	85
4.36 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะ บรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน.....	85
4.37 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดไขมันและน้ำมันเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวน สมบูรณที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่อัตราภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ ต่างๆ.....	86

ภาพที่	หน้า
4.38	ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง..... 88
4.39	ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน..... 88
4.40	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง..... 89
4.41	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน..... 89
4.42	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของแข็งแขวนลอยเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีอัตราการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..... 90
4.43	ความเข้มข้นซีไอดีกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง..... 92
4.44	ความเข้มข้นซีไอดีกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน..... 92
4.45	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง..... 93
4.46	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน..... 93
4.47	ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดซีไอดีเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..... 94
4.48	ปริมาณแก๊สชีวภาพที่กับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง..... 96
4.49	ปริมาณแก๊สชีวภาพที่กับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน..... 96
4.50	ปริมาณแก๊สชีวภาพเฉลี่ยเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..... 97
ผ.1	ใบกวนแบบใบพายที่ใช้กวนน้ำเสียในถังปฏิกรณ์กวนผสม..... 110
ผ.2	ตำแหน่งของการวางอุปกรณ์ต่างๆในการทดลอง..... 110
ผ.3	ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..... 111

ภาพที่	หน้า
ผ.4	ลักษณะน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์กวนผสมบิวอร์ที่มีการกวนใน แนวตั้งที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ..... 111
ผ.5	ลักษณะน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์กวนผสมบิวอร์ที่มีการกวนใน แนวนอนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ..... 112
ผ.6	ลักษณะน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์กวนผสมบิวอร์ที่มีการกวนใน แนวตั้งและแนวนอนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ..... 112



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปาล์มเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยมักปลูกกันมากในจังหวัดของทางภาคใต้ จังหวัดที่มีการปลูกปาล์มน้ำมันมาก ได้แก่ กระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร ตรัง สตูล และสงขลา ตามลำดับ ซึ่งมีผลของปาล์มสดออกสู่ตลาดประมาณ 3.48 ล้านตันต่อปี คิดเป็นมูลค่าของผลผลิตประมาณ 4,176 ล้านบาทต่อปี (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2546)

ปัญหาสิ่งแวดล้อมและพลังงานถือเป็นปัญหาที่กำลังได้รับความสนใจกันทั่วโลกเนื่องจากปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และลักษณะของผลกระทบดังกล่าวเกิดในระยะยาวส่งผลกระทบต่อในวงกว้างและรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ ส่วนหนึ่งของปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้พลังงานของมนุษย์ พลังงานที่มนุษย์ใช้เพื่อการดำรงชีวิตมีวิวัฒนาการมาอย่างยาวนาน ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพและสะดวกในการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยไม่ได้มองถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้น เมื่อพลังงานถูกพัฒนาให้อยู่ในรูปแบบที่ใช้ได้ง่าย การใช้พลังงานจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผลที่เกิดขึ้นจากการใช้พลังงานอย่างไม่รู้คุณค่า คือปัญหาสิ่งแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงภาวะอากาศหรือการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน ถือเป็นปัญหาที่ชัดเจนที่สุดเนื่องจากส่งผลกระทบต่อมนุษย์ โดยไม่แบ่งเชื้อชาติและวรรณะ อุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์มเป็นอุตสาหกรรมที่อยู่ในวัฏจักรของปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและพลังงานโดยตรง น้ำมันปาล์มที่สกัดได้นั้น นอกเหนือจากการนำมาใช้เพื่อการผลิตเป็นสินค้าจำพวกอาหารและเครื่องใช้แล้ว น้ำมันปาล์มส่วนหนึ่งจะถูกส่งต่อเข้าสู่อุตสาหกรรมน้ำมัน ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ผลิตออกไปเป็นน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งถือได้ว่าเป็นพลังงานทดแทนที่มีความยั่งยืนเนื่องจากมนุษย์สามารถผลิตขึ้นได้เอง สามารถควบคุมวัตถุดิบและกระบวนการผลิตได้ครบทุกขั้นตอน ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ประเทศไทยมีความต้องการน้ำมันปาล์มเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรมสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยกระทรวงพลังงานร่วมมือกับกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้มีการวางแผนการเพิ่มพื้นที่สำหรับการเพาะปลูกปาล์ม โดยคาดหวังไว้ว่าภายในปีใน ปี พ.ศ. 2554 พื้นที่ในการเพาะปลูกปาล์มจะต้องเพิ่มขึ้นจาก จากเดิมอีกประมาณ 2.5 ล้านไร่ โดยจากเดิมที่มีพื้นที่เพาะปลูกอยู่ 3 ล้านไร่ (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2550) ทั้งนี้เพื่อเป็นการสนับสนุนภาคอุตสาหกรรมทั้งอาหารและพลังงาน ที่มีความต้องการใช้น้ำมันปาล์มสูงขึ้น ในปี พ.ศ. 2538 ประเทศไทยมีโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มทั้งหมด 49 โรงงาน เป็นโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐาน 17 โรงงานซึ่งมีกำลังการผลิตรวมมากกว่าร้อยละ 60 ของกำลังการผลิตรวมทั้งหมด (อุตสาหกรรม, กระทรวง, กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540)



ในขั้นตอนของการสกัดน้ำมันปาล์มมีการใช้น้ำเข้าสู่กระบวนการในปริมาณมาก จึงมักก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากตามไปด้วย โดยการสกัดน้ำมันปาล์ม 1 ตัน ก่อให้เกิดน้ำเสียได้ประมาณ 0.5-0.75 ตัน (Yacop, 2006) ประกอบกับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากน้ำเสียทั่วไป คือมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่างๆค่อนข้างสูง คุณสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐานของประเทศไทยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ บีโอดี (BOD) ซีโอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (SS) และน้ำมันและไขมัน (O&G) ประมาณ 27, 52, 13 และ 9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (อุตสาหกรรม, กระทรวง, กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเหล่านี้ หากโรงงานไม่ทำการบำบัดที่ดีพอก็จะก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นรบกวนสร้างความเดือดร้อนแก่ชุมชนโดยรอบ เมื่อถูกปล่อยออกไปสู่แหล่งน้ำสาธารณะ น้ำเสียดังกล่าวก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมในน้ำได้ (อารีย์ กังแฮ, 2536) และถึงแม้ว่าน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเหล่านี้จะผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพมาแล้ว แต่น้ำทิ้งที่ได้ดังกล่าวยังมีค่าของสารมลพิษสูงกว่าค่ามาตรฐานอยู่มาก ดังนั้นกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม จึงได้จัดทำข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับคุณภาพน้ำทิ้งเฉพาะของอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ แสดงดังตารางที่ 1.1

**ตารางที่ 1.1** แสดงข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ (อุตสาหกรรม, กระทรวง, กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540)

ปัจจัย	ค่ากำหนดขั้นต่ำที่สุด
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	<100 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	< 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid)	< 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำมันและไขมัน (Oil and Fat)	< 25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนโตรเจนทั้งหมด (Tatal Nitrogen)	< 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
พีเอช (pH)	5 ถึง 9
อุณหภูมิ (Temperature)	< 40 องศาเซลเซียส

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม นิยมใช้กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic treatment) เนื่องจากสามารถรองรับสารอินทรีย์ความเข้มข้นสูงๆได้ สามารถประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในการเติมอากาศและมีการเปลี่ยนแปลงของเสียสารอินทรีย์ไปเป็นแก๊สมีเทนอย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือแหล่งพลังงานต่อ และมีความต้องการสารอาหารในการสร้างผลผลิตจากมวลเซลล์ต่ำ (Nagatsuta-cho และYokohama, 1999) ปัญหาอย่างหนึ่งของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มคือ น้ำเสียมีความเข้มข้นของสารมลพิษสูงมีไขมันและน้ำมันและของแข็งเจือปนอยู่ในปริมาณมาก จึงมักก่อให้เกิดการอุดตันในท่อบำบัดน้ำเสีย และปัญหาสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปมักมีปัญหาเกี่ยวกับน้ำมันเคลือบที่ผิวเม็ดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ทำให้น้ำเสียและเชื้อจุลินทรีย์กระจายอยู่อย่างไม่สม่ำเสมอ จนทำให้การบำบัดด้อยประสิทธิภาพลงได้ ดังนั้นการเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มนั้น จึงควรมีส่วนของเครื่องมือที่ใช้สำหรับกวนน้ำเสียภายในระบบบำบัดกับเชื้อจุลินทรีย์ให้มีความสม่ำเสมอ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำเสียของเชื้อจุลินทรีย์ภายในระบบให้เกิดได้สูงสุด นอกจากนี้แล้วสำหรับการกวนน้ำเสียภายในระบบให้ผสมผสานกันเป็นอย่างดีกับเชื้อจุลินทรีย์ ยังเป็นการช่วยลดปัญหาการเกิดขึ้นตะกอนลอยภายในระบบบำบัด สำหรับระดับของการผสมผสานของเหลวหรือความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการกวนของเหลวภายในระบบเรียกว่า ความลาดชันความเร็ว (Velocity Gradient, G) (มันสิน ตันตุลเวศม์, 2542) นอกจากนี้แล้วปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศคือ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) เนื่องจากการป้อนปริมาณของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบอย่างเหมาะสมนั้นจะทำให้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและทำให้เกิดความสมดุลของเชื้อจุลินทรีย์ภายในระบบ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียนั้นๆ เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและมีความสมบูรณ์ของระบบมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงได้เลือกใช้ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR) นำมาบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยภายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์มีใบกวนสำหรับกวนน้ำเสียกับเชื้อจุลินทรีย์ให้เกิดการผสมผสานกันได้อย่างสมบูรณ์ โดยในขั้นตอนแรกของงานวิจัยเป็นการศึกษาเพื่อหาค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และภายหลังจากได้ความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมแล้ว จะนำความลาดชันความเร็วดังกล่าวมาประกอบเพื่อทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป คือการหาค่าปริมาณสารอินทรีย์สูงสุดที่เข้าสู่ระบบและระบบสามารถรองรับได้ หรือการหาค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับระบบ เพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียเกิดประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการบำบัดน้ำเสียและการผลิตแก๊สชีวภาพต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของความลาดชันความเร็วต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนผสม
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนผสม
3. เพื่อศึกษาผลของแนวระนาบการกวนของเหลวของถังปฏิกรณ์กวนผสมต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแบบไร้อากาศ ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องมือในการบำบัดคือถังปฏิกรณ์กวนผสมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ความจุของถังปฏิกรณ์กวนผสมประมาณ 10 ลิตร ภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมติดตั้งใบพัดสำหรับกวนน้ำเสีย โดยมีระนาบของการกวนภายในถังปฏิกรณ์เป็น 2 แบบ คือ กวนในแนวตั้งและกวนในแนวนอน
2. ใช้หัวเชื้อซึ่งเป็นตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์กวนผสม เก็บจากบ่อหมักน้ำเสียแบบไร้อากาศของ บริษัทชุมชนพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน)
3. ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง เก็บตัวอย่างจากบ่อกักน้ำเสียรวมของกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil, CPO) จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัทชุมชนพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งละประมาณ 200 ลิตร ใส่ถังพลาสติกพอลิเอทิลีน ขนาด 25 ลิตร
4. ทำการทดลองทุกขั้นตอนการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 29-32 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเดินระบบจนคงที่ในแต่ละครั้งที่เดินระบบประมาณ 30 วัน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศด้วยระบบถังปฏิกรณ์กวนผสม
2. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศด้วยระบบถังปฏิกรณ์กวนผสม
3. ได้แนวทางสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อเป็นพลังงานทดแทนจากของเสียประเภทน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งเป็นการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์และใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่า

## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

##### 2.1.1 แหล่งที่มาของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มในประเทศไทยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ กระบวนการผลิตแบบมาตรฐานหรือแบบใช้น้ำในกระบวนการ กระบวนการผลิตแบบยาลดปาล์ม และกระบวนการผลิตแบบทอดผลปาล์ม (ผาสุข กุลวณิชย์, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และอรัญ หันพงศ์กิตติกุล, 2534) ในบรรดากระบวนการผลิตทั้งหมดนี้มีเพียงกระบวนการผลิตแบบใช้น้ำเท่านั้นที่ก่อให้เกิดน้ำเสียขึ้น ทางโรงงานจำเป็นต้องทำการบำบัด ในขณะที่กระบวนการผลิตแบบยาลดปาล์มซึ่งจัดเป็นการผลิตแบบแห้งเป็นระบบที่มีการใช้ความร้อนแห้งในกระบวนการสกัดน้ำมัน ส่วนการผลิตแบบทอดผลปาล์มนั้นจะใช้น้ำมันปาล์มเป็นตัวสกัดน้ำมันออกจากผลปาล์มโดยตรงจึงไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมัน (พูนสุข ประเสริญสรพรพ์, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และอรัญ หันพงศ์กิตติกุล, 2533) กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐานแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบที่มีการใช้เครื่องดีแคนเตอร์ (Decanter) และแบบที่มีการใช้เครื่องซีพาราเตอร์ (Separator) โดยมีขั้นตอนเริ่มต้นคล้ายกัน เริ่มจากการนำทะลายปาล์มสดมาอบด้วยไอน้ำที่มีอุณหภูมิระหว่าง 120-130 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ประมาณ 45 นาที จุดประสงค์ของการอบเพื่อหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิสที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม และทำให้ผลปาล์มอ่อนนุ่ม ขั้วหลุดออกจากทะลายปาล์มได้ง่าย ส่วนทะลายปาล์มที่อบแล้วจะถูกนำไปป้อนเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลาย ซึ่งเป็นเครื่องแบบโรตารีหมุนด้วยความเร็วประมาณ 23 รอบต่อนาที ทะลายปาล์มจะถูกลำเลียงเข้าสู่เตาเผาซึ่งจะได้เถ้าที่มีโปแตสเซียมสูง ส่วนผลปาล์มจะถูกนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์มซึ่งมีลักษณะเป็นถังรูปทรงกระบอกภายในมีใบพัดสำหรับกวนผลปาล์มให้ฉีกขาดออกจากเมล็ดและเซลล์ทำให้น้ำมันแตกตัวออกง่าย การหีบน้ำมันโดยทั่วไปจะใช้เวลาในกวนนานประมาณ 15-20 นาที จากนั้นจะป้อนเข้าสู่เครื่องหีบแบบเกลียวอัด (Screw press) ซึ่งน้ำมันที่สกัดได้จะถูกส่งต่อเข้าถัง กรองเพื่อแยกน้ำมันออกจากเศษเส้นใยและสิ่งสกปรกอื่นๆ โดยใช้เครื่องดีแคนเตอร์หรือเครื่องซีพาราเตอร์ ซึ่งวิธีหลังจะใช้ควบคู่กับการใช้วิธีตกตะกอนในถังก่อนป้อนเข้าเครื่องเหวี่ยงจากนั้นจึงนำไปไล่ความชื้นแล้วจึงนำไปเก็บในถัง กระบวนการผลิตแบบนี้จัดเป็นกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสามารถให้ผลผลิตของน้ำมันเท่ากับ 0.2 ตันต่อทะลายปาล์มที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ กระบวนการผลิตนี้มีกำลังการผลิตสูงได้น้ำมันที่มีมาตรฐานแต่ข้อเสียคือมีน้ำเสียออกจากกระบวนการผลิตประมาณ 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของน้ำมันปาล์มที่ผลิตได้

### 2.1.2 ปริมาณและลักษณะน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มมีแหล่งที่มาจาก 2 ขั้นตอนที่สำคัญ คือ น้ำล้างปาล์มและน้ำเสียจากหม้อฆ่าเชื้อ (Sterilizer condensate) ส่วนของน้ำเสียที่มาจากเครื่องดีแคนเตอร์หรือเครื่องซีฟาราเตอร์ ก่อนไหลไปรวมกันเป็นน้ำเสียรวมในบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงาน น้ำเสียจากหม้อฆ่าเชื้อมีประมาณ 200 ลิตร ต่อ 10 ตันทะลายปาล์ม คิดเป็นปริมาณร้อยละ 2 ของ ปริมาตรโดยน้ำหนักของทะลายปาล์ม (พูนสุข ประเสริฐสรรพ, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และอรัญ หันพงศิกิตติกุล, 2533) ส่วนปริมาณน้ำเสียทั้งหมดที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มคิดเป็นร้อยละ 60 ของปริมาณทะลายปาล์มและมีน้ำมันร้อยละ 2 ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งจากหม้อฆ่าเชื้อ หรือมีน้ำเสีย คิดเป็น 2.5-3.0 เท่าของปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้ น้ำเสียที่เกิดจากการหีบผลปาล์มจะมีสภาพเป็น กรดและมีสารอินทรีย์อยู่ในปริมาณสูง นั่นคือพีเอชมีค่าตั้งแต่ 3.0-4.6 และซีโอดีมีค่าตั้งแต่ 15.1 จนถึง 65.1 กรัมต่อลิตร สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในสภาวะแบบ ไร้อากาศนั้น พบว่าสามารถเปลี่ยนของเสียไปเป็นแก๊สมีเทนซึ่งสามารถนำแก๊สดังกล่าวมาใช้เป็น เชื้อเพลิงได้ ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ แหล่งที่มาได้แก่ บ่อรวบรวมน้ำเสีย น้ำเสียจากหม้อฆ่าเชื้อและน้ำเสียจากเครื่องดีแคนเตอร์ หรือเครื่องซีฟาราเตอร์ สำหรับลักษณะโดยรวมของน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ที่ได้รับมาจากบ่อน้ำเสีย รวมพบว่ามีค่าบีโอดี เท่ากับ 57.38 กรัมต่อลิตร ซีโอดีเท่ากับ 73.23 กรัมต่อลิตร ของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 68.98 กรัมต่อลิตร ของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 35.23 กรัมต่อลิตร และไขมันเท่ากับ 1.23 กรัมต่อลิตร เฉลี่ยสูงกว่าน้ำเสียจากเครื่องดีแคนเตอร์หรือเครื่องหมุนเหวี่ยงซึ่งมีค่าเฉลี่ยต่างๆ เท่ากับ 33.19 59.52 23.63 11.60 และ 0.005 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ในขณะที่น้ำเสียจาก หม้อฆ่าเชื้อมีค่าซีโอดีเท่ากับ 75.60 กรัมต่อลิตร และของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 75.56 กรัมต่อลิตร เฉลี่ยสูงกว่าบ่อน้ำเสียรวม (พูนสุข ประเสริฐสรรพ, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และอรัญ หันพงศิกิตติกุล, 2533) และเมื่อศึกษาถึงลักษณะน้ำเสียจากขั้นตอนการผลิตต่างๆ ของโรงงาน สกัดน้ำมันปาล์มจำนวน 4 โรงงาน แสดงดังตารางที่ 2.1 พบว่าน้ำเสียจากหม้อหนึ่งมีปริมาณของ สารแขวนลอยเฉลี่ย 10.30 กรัมต่อลิตร และมีน้ำมันปริมาณเฉลี่ย 14.57 กรัมต่อลิตร น้ำเสียจาก เครื่องซีฟาราเตอร์มีน้ำมันเหลืออยู่เท่ากับ 12.78 กรัมต่อลิตร ในขณะที่น้ำเสียจากเครื่อง ดีแคนเตอร์มีน้ำมันเหลืออยู่เท่ากับ 15.21 กรัมต่อลิตร น้ำเสียจากบ่อพักน้ำเสียรวมและน้ำเสียจาก บ่อดักน้ำมันสุดท้ายมีน้ำมันเท่ากับ 9.45 และ 11.36 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ Okiy และคณะอ้าง โดย อารีย์ กังแฮ (2536) กล่าวว่าน้ำเสียจาก โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีสารอินทรีย์ได้แก่ ไขมัน และของแข็งแขวนลอยรวมทั้งแร่ธาตุต่างๆ อยู่ในปริมาณที่สูงซึ่งมีความสามารถที่จะก่อให้เกิด ปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะโดยเฉลี่ยของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 4 โรงงาน (อนุญาตให้พวงศีกิตติกุล และคณะ, 2537)

โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีไอดี (มก/ล)	บีไอดี (มก/ล)	ของแข็งละลายน้ำ (มก/ล)	ไขมันและน้ำมัน (มก/ล)
บ. เอเชียยน้ำมันปาล์มจำกัด <sup>ก</sup>	4.65	64.90	113,960	59,389	26,300	14,700
บ. ทักษิณปาล์มจำกัด <sup>ก</sup>	4.58	64.90	68,344	30,704	20,800	7,600
บ. สยามน้ำมันปาล์มและอุตสาหกรรมจำกัด <sup>ก</sup>	4.67	63.40	42,644	21,450	5,200	14,200
บ. อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มจำกัด <sup>ก</sup>	4.53	54.10	57,641	29,100	17,500	7,700
ค่าเฉลี่ย	4.61	66.33	70,647	35,160	17,500	11,100
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.06	3.70	26,249	14,149	7,800	3,400

หมายเหตุ

ก - ใช้เฉพาะเครื่องดีแคนเตอร์

ข - ใช้ทั้งเครื่องซีฟิฟาเรเตอร์และเครื่องดีแคนเตอร์

ค - ใช้เฉพาะเครื่องซีฟิฟาเรเตอร์

## 2.2 หลักการพื้นฐานของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

กระบวนการย่อยทางชีววิทยาแบบไร้อากาศ (Anaerobic Process) เป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาที่ใช้แบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกกาศหลายกลุ่ม ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และสลับซับซ้อนอันได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน ผลพลอยได้จากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกกาศคือแก๊สชีวภาพ (Biogas) ซึ่งประกอบด้วยแก๊สหลายชนิด โดยมีแก๊สเทน ( $\text{CH}_4$ ) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนแก๊สอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย แก๊สมีเทนเป็นแก๊สที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงโดยสามารถให้พลังงานความร้อนได้สูงถึงประมาณ 9,000 กิโลแคลอรี/ม<sup>3</sup> หรือ 21,000 กิโลจูล/ม<sup>3</sup> ดังนั้นแก๊สชีวภาพซึ่งปกติจะมีแก๊สมีเทนอยู่ประมาณ 60-65% จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานได้ เช่น เผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับขับเคลื่อนเครื่องยนต์ที่สันดาปภายในหรือเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้า เป็นต้น กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศมีกระบวนการที่สลับซับซ้อนมาก โดยปฏิกิริยาทางชีวเคมีเกิดขึ้นนับร้อยกระบวนการซึ่งต้องอาศัยเอนไซม์หรือตัวเร่ง ปฏิกิริยาช่วยในการเข้าทำปฏิกิริยาด้วย แม้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะมีการศึกษากันมาอย่างยาวนาน แต่ในปัจจุบันการศึกษาด้านนี้ก็ยังไม่หยุดนิ่ง ยังคงมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ทราบถึงกลไกและลักษณะการทำงานของแบคทีเรียและทำให้การออกแบบและควบคุมระบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

### 2.2.1 กลไกการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

#### 2.2.1.1 แบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

การย่อยสลายทางชีววิทยาแบบไร้อากาศนั้นเกิดขึ้นจากการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายชนิดในการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์จนกระทั่งได้แก๊สชีวภาพ แบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกกาศหลายกลุ่มเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยมีวิธีการจำแนกหรือแบ่งกลุ่มได้หลายวิธี โดยในวิธีแรกอาจแบ่งตามลักษณะสภาวะการดำรงชีพของแบคทีเรียซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ Facultative Anaerobic Bacteria หรือแบคทีเรียที่สามารถอยู่ได้ทั้งสภาวะที่มีหรือไม่มีออกซิเจน และ Obligate Anaerobic Bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ต้องอยู่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเท่านั้น ดังนั้นแบคทีเรียในกลุ่มนี้จึงไม่สามารถทำการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือผลิตแก๊สชีวภาพได้หากระบบมีการละลายของออกซิเจนอิสระ นอกจากนี้แล้วยังสามารถแบ่งชนิดของแบคทีเรียแบบไร้อากาศตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ แบคทีเรียชนิดสร้างกรด (Acid Former Bacteria) เป็นแบคทีเรียในกลุ่ม Facultative Anaerobic Bacteria และแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกกาศ แบคทีเรียกลุ่มนี้จะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งไปเป็นกรดอินทรีย์ต่างๆ แบคทีเรียในกลุ่มนี้ประกอบด้วย *Pseudomonas*, *Flavobacteria*, *Aerobacter*

และ *Escherichia* เป็นต้น แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane Former Bacteria) เป็นแบคทีเรียชนิดที่ไม่ใช้อากาศในการดำเนินชีวิตอย่างแท้จริง จะย่อยสลายสารพวกกรดอินทรีย์ไปเป็นแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียกลุ่มนี้ ได้แก่ *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanococcus* และ *Methanobacillus* เป็นต้น ซึ่งเป็นแบคทีเรียในจีนัส (Genus) ที่อยู่ในตระกูล Methanobacteriaceae เติบโตได้ช้า โดยทั่วไปมีความต้องการเวลากักเก็บตะกอน (Solid Retention Time, SRT) มากกว่า 4 วัน แบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรดและสร้างมีเทนจะต้องมีการพึ่งพาซึ่งกันและกัน และชนิดสุดท้ายคือ แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria, SBR) ปริมาณของแบคทีเรียชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ในน้ำเสียโดยเป็นแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนซัลเฟตให้กลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ทั้งนี้แบคทีเรียชนิดดังกล่าวจะทำงานได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนๆ พีเอชประมาณ 5 แต่ในขณะที่แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตทำงานได้ดีจะส่งผลให้แบคทีเรียสร้างมีเทนลดการผลิตแก๊สมีเทนลง เนื่องจากที่ช่วงพีเอชและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการทำงานของแบคทีเรียทั้งสองชนิดแตกต่างกัน ดังนั้นในน้ำเสียที่มีซัลเฟตในปริมาณที่สูงจำเป็นต้องมีการปรับพีเอชให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมอยู่เสมอหรือจำเป็นต้องกำจัดซัลเฟตออก ก่อนที่จะจ่ายน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพต่อไป

### 2.2.1.2 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

สารอินทรีย์ที่มีปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจะเป็นสารประกอบจำพวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน ทั้งที่อยู่ในรูปของของแข็งและสารละลาย กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียแบบไร้อากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: Solubilisation หรือ Hydrolysis

ขั้นตอนที่ 2: Acidogenesis

ขั้นตอนที่ 3: Acetogenesis

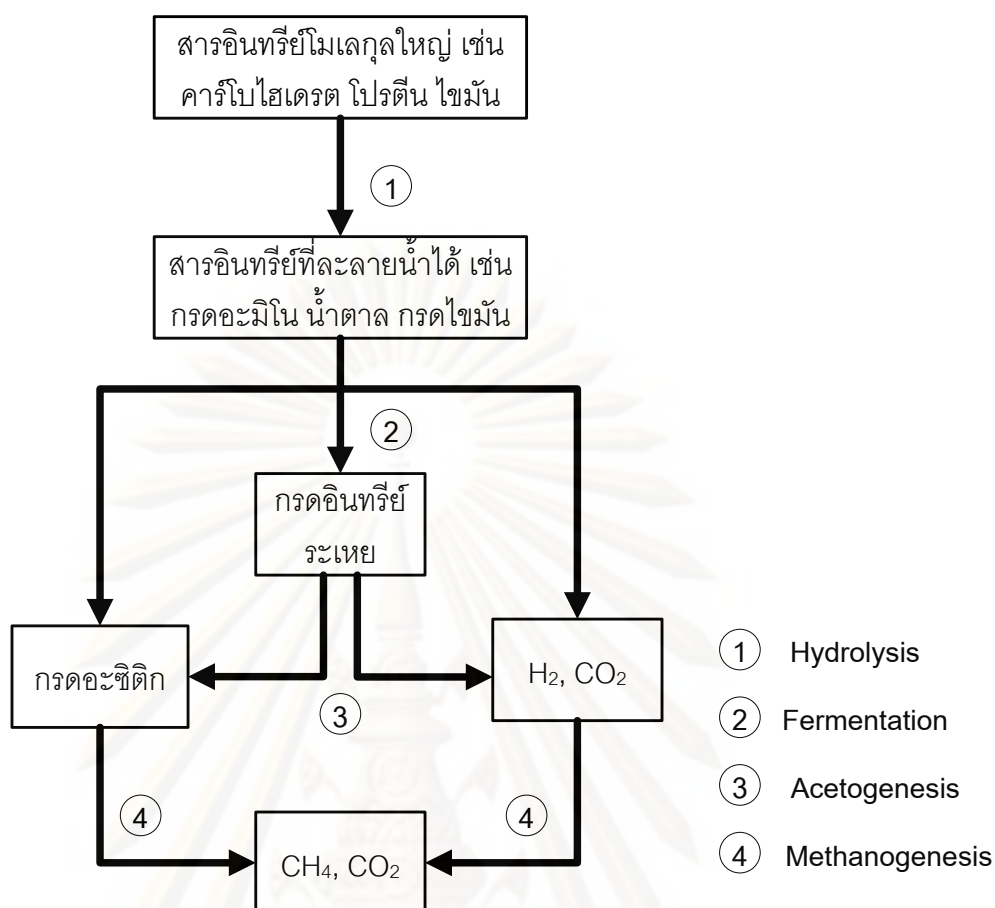
ขั้นตอนที่ 4: Methanogenesis

โดยอาจแบ่งขั้นตอนในการย่อยสลายได้เป็น 2 ระดับ ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายคือการย่อยสลายแบบไม่มีการสร้างแก๊สมีเทนและการย่อยสลายแบบที่มีการสร้างแก๊สมีเทน

### การย่อยสลายแบบไม่มีการสร้างแก๊สมีเทน

ในกระบวนการการสร้างแก๊สมีเทนจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการเปลี่ยนโมเลกุลขนาดใหญ่ของสารอินทรีย์จำพวก โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน ให้มีขนาดเล็กลงจนถึงขั้นของกรดไขมันระเหยขนาดเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกรวมกันว่า เป็นขั้นตอนการสร้างกรด (Acid Formation Phase) โดยกลไกการสร้างกรดแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือกระบวนการที่เกิดขึ้นภายนอกเซลล์และกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์



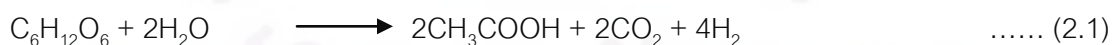


ภาพที่ 2.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (ดัดแปลงจาก สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

การย่อยสลายภายนอกเซลล์ได้แก่ขั้นตอนที่ 1 คือกระบวนการ Solubilisation หรือกระบวนการ Hydrolysis สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีน จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular Enzyme) ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยว (Monomer) สำหรับใช้ในกระบวนการสร้างกรด แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายคือแบคทีเรียจำพวกแฟคคัลเททีฟแอนแอโรบิคแบคทีเรีย (Facultative Anaerobic Bacteria) โดยกลุ่มของแบคทีเรียในขั้นตอนนี้แบ่งได้ตามชนิดของเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ คือ Cellulytic Lipolytic และ Proteolytic สำหรับความเร็วของกระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย ซึ่งเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจะเลือกชนิดของปฏิกิริยาชนิดของสารที่เข้าทำปฏิกิริยารวมถึงการทำงานของเอนไซม์ ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิและการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น หลังจากเกิดกระบวนการย่อยสลายภายนอกเซลล์ การย่อย

สลายก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการย่อยสลายภายในเซลล์ ซึ่งได้แก่ ขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 ในรูปที่ 2.1 โดยในขั้นตอนที่ 2 หรือการเกิดกระบวนการ Acidogenesis การย่อยสลายในขั้นตอนนี้จะใช้สารที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนแรกเป็นสารตั้งต้นสำหรับแบคทีเรียประเภทสร้างกรด โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนสารอาหารดังกล่าวให้เป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) โดยกรดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีปริมาณสัดส่วนของกรดอะซิติกสูงสุดและมีการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย แบคทีเรียสร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีเป็นผลสืบเนื่องมาจากการอยู่ร่วมกันของแบคทีเรียหลายสปีชีส์ (Species) กรณีที่กลุ่มของแบคทีเรียสร้างกรดมีการสร้างกรดมากเกินไป จะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบผลิตแก๊สชีวภาพโดยรวม เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนจะถูกยับยั้งการทำงาน เนื่องจากกรดที่มากเกินไปให้ค่าพีเอชของระบบลดลงและส่งผลกระทบต่อการทำงานของกลุ่มแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนได้ สำหรับแบคทีเรียในขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis) คือแบคทีเรียในกลุ่มของ Fermentative Bacteria หรือ Acidogens ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydrolysis ได้อีกด้วย การกำหนดชนิดของผลผลิตในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ชนิดของสารตั้งต้นที่ได้รับจากขั้นตอนที่ 1 และความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Partial Pressure) เช่น ในการย่อยสลายของกลูโคสในสภาวะที่มีความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าต่ำ (Low Hydrogen Partial Pressure) ผลที่ได้ คือ กรดอะซิติก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ถ้าในสภาวะที่มีความดันย่อยของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าสูง (High Hydrogen Partial Pressure) ผลผลิตที่ได้จะอยู่ในรูปของกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังตัวอย่างในปฏิกิริยาแสดงดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

สภาวะ Low Hydrogen Partial Pressure

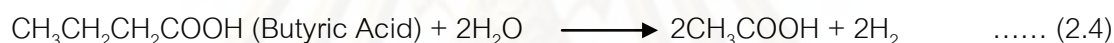


สภาวะ High Hydrogen Partial Pressure

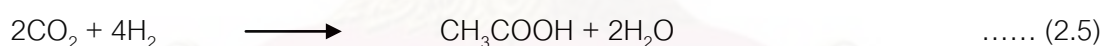


สำหรับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 3 หรือการเกิดกระบวนการ Acetogenesis นั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากการที่แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ผลิตแก๊สมีเทนต้องการสารอาหารที่มีความเฉพาะเจาะจงสูง โดยสารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ประกอบไปด้วยกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอลและเมธิลามีน แต่ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหย

ที่มีคาร์บอนอะตอมเกินกว่าสองอะตอม เช่น กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก เป็นสารอาหารในการผลิตแก๊สมีเทนโดยตรงได้ ดังนั้นในกรณีที่กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid) ที่สร้างขึ้นยังอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของแบคทีเรีย จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านั้นให้มีอะตอมของคาร์บอนที่ลดลง เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ แบคทีเรียกลุ่มหนึ่งที่สามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมให้เป็นกรดอะซิติกได้ ได้แก่ แบคทีเรียที่สร้างแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria) ผลผลิตที่ได้ประกอบไปด้วยกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ดีในภายใต้สภาวะ Low Hydrogen Partial Pressure แสดงดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)



นอกจากการสร้างกรดด้วยกระบวนการทั้งสองชนิดแล้ว ยังพบว่าแบคทีเรียบางกลุ่มที่สามารถสร้างกรดอะซิติกได้จากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน แสดงดังสมการที่ (2.5)



#### กระบวนการย่อยสลายที่มีการสร้างมีเทน

กระบวนการนี้เกิดขึ้นเฉพาะในขั้นตอนที่ 4 เรียกว่ากระบวนการ Methanogenesis โดยที่กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และแก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียชนิดสร้างแก๊สมีเทน (Methane Former Bacteria) การเกิดแก๊สมีเทนเกิดได้ 2 แบบ แบบแรกคือเกิดจากการเปลี่ยนกรดอะซิติกไปเป็นแก๊สมีเทนซึ่งแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากในส่วนขั้นตอนนี้มีปริมาณเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ ของแก๊สมีเทนที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ (Chongrak Polprasert, 1996) และอีกส่วนหนึ่งจะเกิดจากการรีดิวซ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนให้กลับกลายเป็นแก๊สมีเทน โดยแบคทีเรียประเภท Hydrogen-Utilizing Methane Bacteria แสดงดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

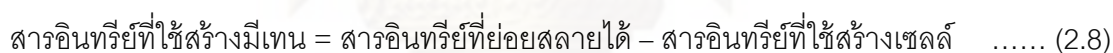




แบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนเจริญเติบโตได้ช้าและสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก ทำให้ช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่มนี้แคบ โดยสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอชประมาณ 6.8 - 7.2 และแบคทีเรียในกลุ่มที่มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate) หรือการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์ใหม่ต่อชั่วโมง ต้องการสารอาหารที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ดังนั้นการเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทน จึงขึ้นอยู่กับการทำงานของแบคทีเรียสร้างกรด โดยแบคทีเรียทุกกลุ่มที่อยู่ภายในระบบต้องทำงานอย่างสัมพันธ์กัน ดังนั้นเมื่อพิจารณากลุ่มของแบคทีเรียที่อยู่ร่วมกันในระบบการหมักแบบไร้อากาศ พบว่ากลุ่มของแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนจะเป็นกลุ่มแบคทีเรียหลักในการควบคุมความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดในระบบ เนื่องจากแบคทีเรียในกลุ่มนี้มีอัตราการเจริญเติบโตได้ช้าที่สุดและมีข้อจำกัดทางด้านสภาพแวดล้อมมากกว่าแบคทีเรียในกลุ่มอื่นๆ

### 2.2.2 อัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ

ในขณะที่เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศจะเกิดแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลักและมีแก๊สแอมโมเนีย ไฮโดรเจน และแก๊สชนิดอื่นๆ อีกเล็กน้อย นอกจากนั้นสารบางส่วนยังใช้สำหรับการสร้างเซลล์ขึ้นใหม่ของแบคทีเรีย แสดงดังสมการที่ (2.8)



ยกตัวอย่างเช่น ถ้าให้กลูโคสแทนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของสารในการสร้างแก๊สมีเทนเป็นดังสมการที่ (2.9)



จากสมการเมื่อใช้กลูโคสสำหรับการทดลองปริมาณ 180 กรัม ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับปริมาณค่าซีไอดี 192 กรัม สามารถสร้างเป็นแก๊สมีเทนได้ 48 กรัม ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP) แก๊สมีเทนที่ได้จะมีปริมาตรเท่ากับ 67.2 ลิตร เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างแก๊สมีเทนมีค่าเท่ากับปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายลงด้วยสารอินทรีย์ที่ถูกใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ของแบคทีเรีย โดยปริมาณเซลล์ใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์สามารถคำนวณได้ แสดงดังสมการที่ (2.10)

$$P_x = QES_0 \frac{Y}{1+k_d\theta_c} \times \frac{1}{1,000} \quad \dots (2.10)$$

โดยที่	$P_x$	=	ปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ (กก/วัน)
	$Q$	=	อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ (ม <sup>3</sup> /วัน)
	$Y$	=	สัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นของเซลล์แบคทีเรีย (กก/กก VSS)
	$E$	=	ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ (%)
	$S_0$	=	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้น (มก/ล)
	$\theta_c$	=	อายุตะกอน (วัน)
	$k_d$	=	อัตราการย่อยสลายตัวของแบคทีเรียในช่วงเอ็นโอจีเนส (วัน <sup>-1</sup> )

โดยค่าสัมประสิทธิ์การเพิ่มขึ้นของเซลล์แบคทีเรียและอัตราการย่อยสลายตัวของแบคทีเรียในช่วงเอ็นโอจีเนสมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ ว่าเป็นสารประกอบพวกไขมัน คาร์โบไฮเดรตหรือโปรตีน แสดงดังตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการเพิ่มขึ้นของเซลล์แบคทีเรียการย่อยสลายตัวของแบคทีเรียในช่วงเอ็นโอจีเนส สำหรับแบคทีเรียในถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ (Metcalf และ Eddy, 1991)

สารอินทรีย์	ค่าสัมประสิทธิ์	ช่วงค่า	ทั่วไป
กรดไขมัน	$Y$	0.040-0.070	0.050
	$K_d$	0.030-0.050	0.040
คาร์โบไฮเดรต	$Y$	0.020-0.040	0.030
	$K_d$	0.025-0.035	0.024
โปรตีน	$Y$	0.050-0.090	0.075
	$K_d$	0.010-0.020	0.014

## 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

ปัจจัยที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศสามารถจำแนกออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ความเป็นด่าง สารพิษ สารยับยั้ง และลักษณะของเสียหรือน้ำเสียที่ใช้ในการเดินระบบหรือใช้ในการทดลองในระบบบำบัดน้ำเสียนั้นๆ และส่วนของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกับเดินระบบ ได้แก่ การกวนผสม อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ และระยะเวลาที่เก็บของเหลว

### 2.3.1 พีเอช

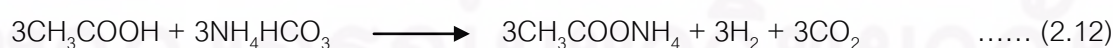
แบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน (Methanogens) จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอชมากที่สุด โดยขั้นตอนการเกิดแก๊สชีวภาพ (Methanogenesis) จะเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอช 6.8–7.2 และพีเอชที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 7.0 (Diaz และคณะ, 1993) ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.2 ในขณะที่แบคทีเรียชนิดที่สร้างกรด (Acidogens) สามารถอาศัยอยู่ในสภาพที่พีเอชระหว่าง 5.0–8.0 นอกจากนี้ค่าพีเอชยังส่งผลทางอ้อมต่อแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน โดยจะส่งผลต่อความเข้มข้นหรือไอออนของสารต่างๆ เช่น กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid) แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ซึ่งจะมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียแตกต่างกัน ในการออกแบบระบบบำบัดแบบไร้อากาศในบางครั้ง ได้แยกขั้นตอนของการสร้างกรดและการสร้างแก๊สมีเทนออกจากกัน (Two Stage Anaerobic Reactor) เพื่อที่จะทำให้สามารถย่อยสลายน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสหรือส่วนที่มีองค์ประกอบเป็นไฟเบอร์บางส่วนก่อน เช่น การหมักขยะอินทรีย์ เป็นต้น

### 2.3.2 สภาพความเป็นกรดและความเป็นด่าง

สภาพความเป็นกรดและความเป็นด่างเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรียสองพวกทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง ความเป็นกรดในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมาจากกรดคาร์บอนิกและกรดไขมันระเหย โดยกรดไขมันระเหยจะมีผลต่อระบบบำบัดมากกว่ากรดคาร์บอนิก ปกติปริมาณกรดไขมันระเหยในรูปของกรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 50-500 มก/ล หากมีปริมาณของกรดไขมันระเหยในรูปของกรดอะซิติกมีค่ามากกว่า 2,000 มก/ล. จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีวภาพลดลงและถ้าระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยในรูปของกรดอะซิติกมีค่าตั้งแต่ 8,000-10,000 มก./ล. ขึ้นไป จะมีผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบโดยตรง ดังนั้นต้องมีการรักษาสมดุลของระบบให้มีปริมาณการสร้างกรดไขมันระเหยให้เท่ากับหรือต่ำกว่าอัตราการนำไปเพื่อสร้างแก๊สมีเทน แต่ถ้ามีการสร้างกรดไขมันระเหยมากเกินไปจะส่งผลให้พีเอชของระบบต่ำ เกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นได้บ่อยในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ การป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสร้างกรดระเหยมากเกินไป

โดยการปรับให้ระบบมีบัฟเฟอร์ที่เพียงพอเพื่อป้องกันการลดลงอย่างรวดเร็วของพีเอชในระบบ ทั้งนี้สภาพความเป็นด่างในระบบจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงบัฟเฟอร์ที่มีอยู่ในระบบ โดยสภาพความเป็นด่างในถังหมักแบบไร้อากาศจะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต ซึ่งจะทำหน้าที่ในการสะเทินคาร์บอนไดออกไซด์และกรดไขมันระเหยในระบบเพื่อให้พีเอชเป็นกลาง สำหรับสภาพความเป็นด่างน้อยที่สุดในการป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพีเอชอย่างรวดเร็ว มีค่าเท่ากับปริมาณต่างไบคาร์บอเนตที่ใช้ในการสะเทินกรดคาร์บอนนิครวมกับปริมาณต่างไบคาร์บอเนตเพื่อใช้ในการสะเทินกรดไขมันระเหย สำหรับปริมาณต่างที่ต้องการเพื่อใช้ในการสะเทินกรดคาร์บอนนิคขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ซึ่งความสามารถในการละลายจะสอดคล้องกับความดันย่อย (Partial Pressure) ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนปริมาณต่างเพื่อใช้ในการสะเทินกรดไขมันระเหยจะมีค่าเท่ากับปริมาณกรดไขมันระเหย เนื่องจากจำนวนโมลที่เข้าทำปฏิกิริยาของกรดไขมันระเหยและต่างไบคาร์บอเนตเป็นแบบ 1 ต่อ 1 ในบางครั้งการหาปริมาณต่างที่ต้องการจากปริมาณกรดไขมันระเหยและกรดคาร์บอนิคในน้ำอาจทำให้การควบคุมระบบทำได้ลำบาก แก้ไขปัญหาได้ไม่ทันทั่วถึง ดังนั้นจะประเมินปริมาณต่างที่ต้องเติมจากสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยและปริมาณต่างที่มีอยู่ในระบบ หากอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนต (VFA/ALK) มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง หากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบัฟเฟอร์ของระบบนั้นๆมีค่าต่ำมาก พีเอชสามารถจะลดลงได้อย่างรวดเร็ว สภาพความเป็นด่างภายในระบบหมักแบบไม่ใช้อากาศมาได้จากหลายแหล่ง โดยอาจมาจากเกลือของแอมโมเนีย เช่น แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) และแอมโมเนียอะซิเตต ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ )

ถ้ากระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่เกิดขึ้นภายในระบบบำบัดน้ำเสียนั้นเป็นไปอย่างสมบูรณ์ แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตจะเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงของพีเอชโดยจะทำหน้าที่เป็นตัวบัฟเฟอร์ซึ่งจะลดสภาพความเป็นกรดอันเนื่องมาจากกรดไขมันระเหย แสดงดังสมการที่ (2.11) (2.12) และ (2.13)



จากสมการข้างต้น ถ้าน้ำทิ้งมีปริมาณของสารประกอบไนโตรเจนอย่างเพียงพอและมีการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์แล้ว จะได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ที่ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันระเหยที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์และจะได้แอมโมเนียมอะซิเตต ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) ซึ่งจะถูกละลายโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนให้กลายเป็นมีเทนต่อไปและได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตกลับคืนมา แต่ถ้าปริมาณของไบคาร์บอเนตน้อยบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันระเหยแล้วจะทำให้ได้กรดไขมันระเหยมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทำให้พีเอชลดต่ำลง จนกระทั่งแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นจะไม่สามารถย่อยสลายแอมโมเนียมอะซิเตตได้ และพบว่าการเปลี่ยนแปลงของพีเอชนั้นยังขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศอีกด้วย สำหรับปริมาณของความเป็นด่างที่มีอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียนั้น McCarty (1964) ได้พบความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณของด่างไบคาร์บอเนตที่เหมาะสม พบว่าความเป็นด่างนั้นไม่ควรจะต่ำกว่า 1,000 มก/ล ในรูปของหินปูน ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้พีเอชของระบบลดต่ำลงจนไปเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำนั้นๆ ในกรณีที่ความเป็นด่างมีอยู่ไม่เพียงพอ ก็จำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีลงไปเพื่อเพิ่มความเป็นด่างให้แก่ระบบ โดยปริมาณสารเคมีที่เติมลงไปนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของถังปฏิกิริยา ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณที่เติมลงไปได้ แสดงดังสมการที่ (2.14)

$$N = A \times E \times V \quad \dots\dots (2.14)$$

โดยที่ N = ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้เติมลงไป (กก.)  
 A = ปริมาณของความเป็นด่างที่ขาดไป (มก/ล ในรูปของ  $\text{CaCO}_3$ )  
 E = ( $\text{CaCO}_3$  น้ำหนักสมมูลของปูน  $\text{CaCO}_3$   $\text{m}^3 = 50\text{m}^3$ )  
 V = ปริมาตรของถังปฏิกิริยา (Digester Volumn) ( $\times 1,000 \text{ m}^3$ )

โดยความเป็นด่างที่ต้องมีความจำเป็นต้องเติมลงไปในระบบบำบัดน้ำเสีย มีวิธีการประเมินได้จากสัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยและสภาพความเป็นด่างที่มีอยู่ในระบบซึ่งสำหรับแนวทางในการคำนวณความเข้มข้นของด่างหรือปริมาณเบสเพื่อใช้เพื่อเติมลงไปในระบบบำบัดน้ำเสียหรือถังปฏิกรณ์สำหรับบำบัดน้ำเสีย โดยอาศัยความเข้มข้นของซีโอดีและความเป็นด่างที่มีอยู่ในน้ำเสีย แสดงดังสมการที่ (2.15)

$$\text{ปริมาณด่างที่ต้องเติม (มก/ล ในรูปหินปูน)} = A(\text{COD}) - \text{ALK} \quad \dots\dots (2.15)$$



โดยที่ A	=	0.1 เมื่อ COD สูงกว่า 5,000 มก/ล.
	=	0.2 เมื่อ COD ต่ำกว่า 5,000 มก/ล.
COD	=	ความเข้มข้นของซีโอดีในน้ำเข้า (มก/ล)
ALK	=	ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตในน้ำเข้า (มก/ล ในรูปหินปูน)

สารเคมีที่เติมลงไปในระบบเพื่อเพิ่มความเป็นด่างให้แก่ระบบบำบัดมีด้วยกันหลายประเภท ได้แก่ สารจำพวกด่างแก่ (ไฮดรอกไซด์) เช่น โซดาไฟ (โซเดียมไฮดรอกไซด์, NaOH) สารจำพวกไบคาร์บอเนต และคาร์บอเนต ตัวอย่าง เช่น ด่างไบคาร์บอเนต ปูนขาว (แคลเซียมคาร์บอเนต, CaCO<sub>3</sub>) เป็นต้น โดยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) เป็นสารเคมีที่ดีที่สุดในการควบคุมพีเอช เพราะสามารถละลายน้ำได้ดี และให้ค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนตแก่ระบบโดยตรงแต่สารเคมีชนิดนี้จะมีราคาแพงกว่าสารเคมีชนิดอื่นๆ นอกจากนี้การเติมสารเคมีจำเป็นต้องคำนึงถึงความ เป็นพิษจากปริมาณไอออนบวก (Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>) ที่เติมลงไปด้วย

### 2.3.3 อุณหภูมิ

ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไร้อากาศ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงตามการเจริญเติบโตของกลุ่มแบคทีเรีย คือ ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 50-65 °C โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Thermophilic Bacteria ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20-45 °C โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Mesophilic Bacteria และช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 5-15 °C โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Psychrophilic Bacteria สำหรับกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ การทำงานของแบคทีเรียจะอยู่ในช่วงมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก การบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศในช่วงเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรียจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงกว่าในช่วงมีโซฟิลิก โดยสามารถทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิกประมาณ 20-50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสำหรับในต่างประเทศที่อยู่ในเขตนานจึงต้องเพิ่มอุณหภูมิให้กับ น้ำทิ้ง แต่สำหรับประเทศไทยนี้ระบบบำบัดจะทำงานอยู่ในช่วงมีโซฟิลิกได้เองโดยไม่ต้องใช้ความร้อนช่วยแม้ว่าประสิทธิภาพของระบบในช่วงมีโซฟิลิกจะต่ำกว่าแต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องของค่าใช้จ่าย พบว่าค่าใช้จ่ายในการทำความร้อนจะแพงมาก ทำให้ผู้ออกแบบในประเทศไทยไม่นิยมที่จะออกแบบระบบบำบัดให้อยู่ในช่วงเทอร์โมฟิลิก นอกจากนี้แบคทีเรียยังมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในการออกแบบระบบจึงควรมีการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของระบบมีการเปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิเพียง 2-3 องศาเซลเซียส มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแก๊สมีเทนอย่างมาก การรักษาอุณหภูมิของระบบให้มีความสม่ำเสมอ จึงมีความสำคัญมากกว่าการควบคุมให้ระบบมีอุณหภูมิอยู่ในจุดที่ให้อัตราการย่อยสลายสูงสุด

### 2.3.4 สารพิษและสารยับยั้งปฏิกิริยา

น้ำเสียที่จะบำบัดด้วยกรรมวิธีทางชีววิทยาไม่ควรมีสารที่เป็นพิษอยู่ ซึ่งสารที่เป็นพิษอาจปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียได้ ทั้งในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ทั้งนี้ผลของสารพิษมีตั้งแต่พิษโดยตรง (Toxic) ลงไปถึงแค่เพียงยับยั้ง (Inhibited) การทำงานของแบคทีเรียโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลของสารพิษที่มีต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนจะมีความไวต่อสิ่งที่มารบกวน ความรุนแรงของพิษหรือการยับยั้งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้นๆ อย่างไรก็ตามในบางกรณีสารเหล่านั้นก็อาจสามารถกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ หากมีความเข้มข้นที่พอเหมาะ สารที่เป็นพิษหรือสารที่สามารถยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำทิ้งทางชีววิทยาแบบไร้อากาศสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มๆ ได้ดังต่อไปนี้

#### อิออนบวก

อิออนบวกที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ได้แก่ โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) แมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) และแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ซึ่งธาตุเหล่านี้หากมีความเข้มข้นที่อยู่ในระดับที่มีความเหมาะสมจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียมากจนเกินความจำเป็นก็จะเกิดเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ โดยปกติอิออนบวกที่มีวาเลนซ์สูง (มีประจุบวกสูง) จะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนบวกที่มีวาเลนซ์ต่ำ ระดับความเป็นพิษของอิออนบวกต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นของอิออนบวกที่กระตุ้นและยับยั้งปฏิกิริยา (McCarty, 1964)

ชนิดของอิออนบวก	ความเข้มข้น(มก/ล)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งมาก
$\text{Na}^+$	100-200	3,500-5,500	>8,000
$\text{K}^+$	200-400	2,500-4,500	>12,000
$\text{Ca}^{2+}$	100-200	2,500-1,500	>8,000
$\text{Mg}^{2+}$	75-150	1,000-1,500	>3,000

พิษของอิออนบวกสามารถลดลงได้ (Antagonism) เมื่ออยู่ร่วมกับธาตุอื่นๆ ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น พิษของ  $\text{Na}^+$  มีความเข้มข้น 3,500 มก/ล สามารถทำให้ลดลงได้ถ้าในระบบมี  $\text{Mg}^{2+}$  และ  $\text{Ca}^{2+}$  ที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 50-1,000 มก/ล แต่ในทางตรงกันข้ามอิออนบางชนิดจะไปเพิ่มความเป็นพิษให้มากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกัน (Synergism) การลดหรือเพิ่มความเข้มข้นของอิออนบวกแต่ละชนิด แสดงได้ตามตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.4 ชนิดของไอออนที่เพิ่มความเป็□นพิษและชนิดของไอออนที่เสริมความเป็นพิษในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา (Kugelman และChin, 1971)

ไอออนที่เป็นพิษ	ไอออนเสริมความเป็นพิษ
Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )	Calcium, Magnesium, Potassium
Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	Ammonium, Magnesium
Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ )	Ammonium, Calcium,
Potassium ( $\text{K}^+$ )	None
Sodium ( $\text{Na}^+$ )	Ammonium, Calcium, Magnesium

ตารางที่ 2.5 ชนิดของไอออนที่เพิ่มความเป็□นพิษและชนิดของไอออนที่ช่วยลดความเป็นพิษในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา (Kugelman และChin, 1971)

ไอออนที่เป็นพิษ	ไอออนลดความเป็นพิษ
Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )	Sodium
Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	Sodium, Potassium
Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ )	Sodium, Potassium
Potassium ( $\text{K}^+$ )	Ammonium, Calcium, Magnesium, Sodium
Sodium ( $\text{Na}^+$ )	Potassium

### โลหะหนัก

โลหะหนักที่มีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ได้แก่ แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) ทองแดง (Cu) และโครเมียม (Cr) ซึ่งจะอยู่ในน้ำทิ้งในรูปของไอออน ทั้งนี้โลหะหนักที่อาจพบในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ แสดงดังตารางที่ 2.5 โดยทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) จะมีผลต่อระบบผลิตแก๊สชีวภาพมากที่สุด ทั้งนี้ค่าความเป็นพิษของสารประกอบโลหะหรือไอออนโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานทางไฟฟ้า ค่าพีเอช และค่า Ionic Strength ของระบบ เนื่องจากโลหะหนักแต่ละชนิดสามารถที่จะรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมโมเนีย คาร์บอนเนต ซัลไฟด์ และฟอสเฟตได้ ดังนั้นจึงเป็นการยากในการประเมินถึงความเป็นพิษของโลหะหนักแต่ละชนิด ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2.6 และตารางที่ 2.7 ที่แสดงถึงโอกาสในการพบและความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิด แม้ว่าโลหะหนักจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ แต่โลหะหนักบางประเภทยังคงมีความจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรีย เนื่องจากแบคทีเรียจะดึง

สารประกอบโลหะหนักเหล่านี้ไปใช้กระบวนการเมแทบอลิซึม เช่น นิกเกิล หรือโคบอลต์ เป็นต้น ความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถที่จะลดลงได้ ถ้าน้ำเสียมีปริมาณของ ซัลไฟด์ ( $S^{2-}$ ) ที่พอเหมาะเนื่องจากซัลไฟด์สามารถรวมตัวกับโลหะหนักสามารถกลายเป็นเกลือของโลหะหนักซึ่งไม่สามารถจะละลายน้ำได้ ยกเว้นในกรณีของโครเมียม เนื่องจากโครเมียมที่มีประจุบวกหก ( $Cr^{6+}$ ) จะถูกรีดิวซ์ให้เป็นโครเมียมที่มีประจุบวกสาม ( $Cr^{3+}$ ) ซึ่งโครเมียมจะไม่สามารถละลายน้ำในช่วงพีเอชของระบบถังหมักแบบไร้อากาศจึงไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษขึ้น ในการใช้ซัลไฟด์เพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนัก จะใช้ที่ความเข้มข้นของซัลไฟด์ประมาณ 0.5 มิลลิกรัม สำหรับการตกตะกอนโลหะหนัก 1.0 มิลลิกรัม แต่การเติมซัลไฟด์ลงไปโดยตรงอาจจะก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบบำบัดน้ำเสียได้เนื่องจากตัวของซัลไฟด์เอง สำหรับการควบคุมไม่ให้เกิดพิษเนื่องจากการเติมซัลไฟด์ลงไปมากเกินไปสามารถทำได้สองวิธีด้วยกัน โดยวิธีการแรกให้วิเคราะห์ปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพอย่างต่อเนื่องและทำการหยุดการเติมซัลไฟด์ทันทีเมื่อมีการตรวจพบการปนเปื้อนอยู่ในแก๊สชีวภาพ โดยการวิเคราะห์คืออิลิคโทรดแบบ Silver-Silver Sulfide วัดปริมาณของซัลไฟด์ที่ละลายอยู่ในน้ำและรายงานค่าออกมาในรูปของ  $pS(-\log [S^{2-}])$

**ตารางที่ 2.6** ประเภทของโลหะหนักที่พบในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ (Kugelman และ Chin, 1971)

พบมาก	พบบ่อย	ไม่ค่อยพบ
Cadmium( $Cd^{2+}$ )	Arsenic(As)	Aluminium(Al)
Chromium( $Cr^{6+}$ )	Iron(Fe)	Cobalt(Co)
Copper( $Cu^{2+}$ )	Manganese(Mn)	Molybdenum(Mo)
Lead( $Pb^{2+}$ )	Mercury(Hg)	Selenium(Se)
Nickle( $Ni^{2+}$ )	Silver(Ag)	Tin(Sn)
Zinc( $Zn^{+}$ )		

**ตารางที่ 2.7** ความเข้มข้นของโลหะหนักที่สามารถยับยั้งการทำงานของระบบ (Mignone, 2005)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น(มก/ล)
Arsenic(As)	0.5-1.0
Cadmium(Cd)	0.01-0.02
Chromium( $Cr^{6+}$ )	1.0-1.5
Copper(Cu)	0.5-1.0
Nickle(Ni)	1.0-2.0
Zinc(Zn)	0.5-1.0

### แอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ เช่น โปรตีนหรือปุ๋ยยูเรียเป็นต้น และได้ผลผลิตในรูปของแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) หรือแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของระบบ แสดงดังสมการที่ (2.16)



ปริมาณของแอมโมเนียมไอออนจะมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช โดยเมื่อค่าพีเอชมีค่าประมาณ 7.0 ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมีประมาณ 1 % ของแอมโมเนียทั้งหมด โดยจะมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมากขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น สำหรับความเป็นพิษของแอมโมเนียนั้นพบว่าแอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียมากกว่าแอมโมเนียมไอออน โดยพบว่าแอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 150 มก/ล ในขณะที่แบคทีเรียสามารถทนต่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนได้สูงถึง 3,000 มก/ล ดังนั้นในการรักษาพีเอชของระบบบำบัดให้มีค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียอยู่ที่ประมาณ 7.0 หรือต่ำกว่านี้จะทำให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนซึ่งเป็นพิษต่อระบบน้อยกว่า ตารางที่ 2.8 แสดงถึงระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับการลดพิษของแอมโมเนียไนโตรเจนสามารถทำได้โดยการเจือจางน้ำทิ้งให้มีความเข้มข้นของแอมโมเนียก่อนเข้าสู่ระบบมีความเข้มข้นที่ลดลงหรือทำการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำทิ้งให้อยู่ในระดับที่ไม่ไปยับยั้งการทำงานของเชื้อแบคทีเรียภายในระบบก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด ตัวอย่างเช่น ใช้กระบวนการ Ammonia Stripping เพื่อเป็นการลดความเข้มข้นของแอมโมเนียเป็นต้น

ตารางที่ 2.8 ระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียมต่อระบบไอออน (McCarty, 1964)

แอมโมเนียมไนโตรเจน (มก/ล)	ผลต่อระบบ
50-200	ปริมาณพอเหมาะ
200-1,000	ยังไม่เกิดผลชัดเจน
1,500-3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อมีค่าพีเอชสูงกว่า 7
>3,000	เป็นพิษโดยตรง

## ซัลเฟต

พิษของซัลไฟด์ต่อแบคทีเรีย เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณซัลไฟด์สูง การย่อยสลายซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) หรือโปรตีนในน้ำทิ้ง โดยซัลเฟตในน้ำเสียมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ ขึ้นอยู่กับอิออนประจุบวกที่ซัลเฟตรวมอยู่ โดยส่วนที่มีการรวมกับโลหะหนักจะตกตะกอน ส่วนที่เหลือจะละลายน้ำหรืออยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และเมื่อละลายน้ำสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายน้ำที่แบคทีเรียสามารถทนได้อยู่ระหว่าง 50-160 มก/ล และจะเป็นพิษขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 200 มก/ล (McCarty, 1964) วิธีที่สามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ลงได้ โดยการทำให้ซัลไฟด์ตกตะกอน การเจือจางน้ำทิ้งหรือการแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำทิ้งก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด การที่น้ำเสียมีปริมาณของซัลเฟตมาก เช่น น้ำเสียจากโรงงานน้ำยางข้น ปริมาณของซัลเฟตที่มีมากเกินไป จะทำให้มีแบคทีเรียที่สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ เช่น *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum* เจริญเติบโตได้ดี

ตารางที่ 2.9 ค่า  $\Delta G^\circ$  ในปฏิกิริยาการรีดิวซ์ซัลเฟตและสร้างมีเทน (McCarty, 1964)

ปฏิกิริยา	$\Delta G^\circ$ (kJ)
1. $4\text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \longrightarrow \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	-152.5
2. $4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-135.6
3. $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \longrightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{S}$	-47.6
4. $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{CH}_4$	-31.0
5. $4\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 4\text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{HCO}_3^- + 3\text{HS}^- + \text{H}^+$	-150.6
6. $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$	-76.6
7. $4\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 12\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 4\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 3\text{CH}_4$	-102.4

จากตารางที่ 2.9 จะเห็นว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาการรีดิวซ์ซัลเฟตและการสร้างแก๊สมีเทน โดยใช้สารตั้งต้นชนิดเดียวกันคือไฮโดรเจนและกรดอะซิติก ในปฏิกิริยาที่รีดิวซ์ซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ (ปฏิกิริยาที่ 1 และ 3) โดยใช้ไฮโดรเจนและกรดอะซิติกเป็นสารตั้งต้นตามลำดับ จะมีค่า  $\Delta G^\circ$  ที่ต่ำกว่าในปฏิกิริยาที่สร้างมีเทน (ปฏิกิริยาที่ 2 และ 4) แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นปฏิกิริยาที่ให้พลังงานมากกว่า ดังนั้นจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาการสร้างมีเทน การที่น้ำเสียมีซัลเฟตในปริมาณที่สูงจึงทำให้ได้ผลผลิตที่เป็นแก๊สมีเทนลดน้อยลงเนื่องจากสารตั้งต้นถูกใช้ไปในปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟตมากกว่าการสร้างมีเทนผลผลิตที่ได้จึงเป็นแก๊ส

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีกลิ่นเหม็น ที่พีเอชต่ำอาจเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ แต่หากพิจารณาในแง่ของ การย่อยสลายกรดไพรูวอิกเป็นกรดอะซิติกแล้ว พบว่าการรีดิวซ์ซัลเฟตที่เกิดขึ้น สามารถลด การสะสมของกรดไพรูวอิกในระบบได้ ดังนั้นการที่มีซัลเฟตในน้ำเสียจึงมิได้ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ความเป็นพิษของซัลเฟตที่มีต่อระบบมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช โดยที่พีเอช 6.4-7.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถยับยั้งการทำงานของระบบได้ 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อมี ความเข้มข้น 250 มก/ล ในขณะที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียง 90 มก/ล สามารถส่งผลในการยับยั้งการ ทำงานของระบบได้เท่ากันเมื่อพีเอชมีค่า 7.8-8.0

### 2.3.5 สารอาหาร

สารอาหารในน้ำเสียมีความสัมพันธ์โดยตรงกับชนิดของกลุ่มแบคทีเรียในระบบ รวมไปถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและผลิตภัณฑ์ชีวภาพ โดยพบว่าสารอาหารที่ต่างชนิด กันมีผลต่ออัตราการย่อยสลายที่แตกต่างกัน โดยสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตจะให้อัตราการ ย่อยสลายที่เร็วกว่าโปรตีนและไขมัน ในเซลล์แบคทีเรียทุกชนิดจะประกอบไปด้วยธาตุที่สำคัญคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ออกซิเจน และซัลเฟอร์ โดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ ต้องการปริมาณไนโตรเจนต่อน้ำหนักเซลล์เท่ากับ 9.4 (Cell Weight/N = 9.4) ในขณะที่แบคทีเรีย ชนิดไม่ใช้อากาศจะสร้างเซลล์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากได้ เมื่อมีอัตราส่วนของธาตุไนโตรเจนต่อ คาร์บอน (N/C) ในสารอาหารประมาณ 0.0620 และยังต้องการธาตุฟอสฟอรัส เท่ากับ 1 ใน 7 ของ ปริมาณของธาตุไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบในเซลล์ ดังนั้นน้ำทิ้งควรมีสารอาหารที่เพียงพอแก่ การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยทั่วไปความต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะอยู่ใน อัตราส่วน 11 ต่อ 2 ดังนั้น ถ้าปริมาณแบคทีเรียที่เกิดขึ้นมี ประมาณ 0.1 กก ต่อ 1 กก BOD ที่ถูก ย่อยสลาย อัตราส่วนของ BOD:N:P จะเท่ากับ 100:1.1:0.2 ซึ่งต่ำกว่าอัตราส่วนที่ใช้ในการย่อย สลายแบบใช้ออกซิเจนอิสระซึ่งมีค่าเท่ากับ 100:5:1 ดังนั้นในน้ำเสียที่มีสารอาหารต่ำแต่มี สารอินทรีย์หรือซีโอดีสูง เช่น น้ำเสียจากโรงงานน้ำอัดลม จึงสามารถที่จะใช้ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ อากาศได้โดยไม่ต้องมีการเติมสารอาหารเพิ่มเติม

### 2.3.6 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์บางชนิดสามารถยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ ซึ่งได้แก่ แอลกอฮอล์ (Alcohol) จำพวกเมทานอล (Methanol) และกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาว (Long Chain Fatty Acid) การทำลายความเป็นพิษของสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถทำได้โดยการป้อนน้ำทิ้งเข้าสู่ ระบบบำบัดอย่างต่อเนื่อง (Continuous Feed) ซึ่งจะต้องเริ่มจากความเข้มข้นที่น้อยๆ แล้วจึงปรับ ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ เพื่อให้แบคทีเรียมีความคุ้นเคยและสามารถปรับตัวได้ หรืออาจแก้ไข ได้โดยการเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ ก่อนที่จะจ่ายน้ำ เสียเข้าสู่ระบบ

### 2.3.7 การกวน

การกวนนอกจากจะมีจุดประสงค์เพื่อให้จุลินทรีย์มีโอกาสสัมผัสกับสารอาหาร และมีการกระจายตัวไปทั่วถึงในถังปฏิกรณ์ (Gray, 1981) ยังมีจุดประสงค์อื่น ๆ อีกคือเพื่อรักษา ระดับของอุณหภูมิภายในถังหมักให้มีระดับเดียวกันทั้งถัง เพื่อเป็นการกระจายสารพิษ เช่น โดสะ หนักและกรดอะซิติกให้กระจายไปทั่วทั้งถังหมัก ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดการสะสมของสารพิษ ณ จุด ใดจุดหนึ่งของถังหมักซึ่งจะมีผลต่อการยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียที่รุนแรงขึ้น เพื่อป้องกันมิให้ เกิดการแยกชั้นของตะกอนลอยพวกไขมันและน้ำมันตรงบริเวณผิวหน้าของถังหมักทำให้เกิดเป็น ฝ้าไขและเป็นการส่งเสริมให้แก๊สแยกตัวออกจากชั้นตะกอนบริเวณก้นถังหมักได้ง่ายขึ้น วิธีการ กวนในระบบไร้อากาศอาจใช้ใบพัดกวนน้ำเสียอย่างช้าๆหรือใช้วิธีให้น้ำตะกอนไหลเวียนในถัง หมักหรืออาจใช้วิธีให้เกิดจากระบบไหลขึ้นสู่ด้านบนของถังหมักเพื่อดันเอาตะกอนและน้ำเสียให้ ไหลไปทั่วถังหมัก การกวนเป็นสิ่งจำเป็นมากสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ ทั้งนี้เพื่อเป็น การรักษาระดับของของแข็งระเหยภายในถังหมักให้มีปริมาณสม่ำเสมอทั่วทั้งถังหมักและเพื่อให้ ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด ปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยในถังหมักที่มีระบบการกวน และไม่มีระบบการกวน โดยพบว่าในถังหมักที่ไม่มีระบบการกวนปริมาณของแข็งทั้งสองชนิดจะมี การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอตลอดแนวลึกของถังหมักในทางตรงข้ามกับถังหมักที่มีระบบการกวน ปริมาณของของแข็งทั้งสองชนิดจะมีปริมาณใกล้เคียงกันตลอดแนวลึกของถัง (Loehr, 1974)

### 2.3.8 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ □

อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพใน การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบและเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัด แบบไม่ใช้อากาศอีกด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นแก๊สมีเทนต้องมื ความเข้มข้นของแบคทีเรียในปริมาณพอเหมาะ กับปริมาณสารอินทรีย์ จึงจะทำให้แบคทีเรียมี การย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไป จะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากแบคทีเรียบางส่วนถูกทำลายไปเพราะสภาพที่ ไม่สมดุล ในทางตรงกันข้ามหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไป จะทำให้การใช้ถัง หมักไม่เต็มประสิทธิภาพ ไม่คุ้มค่าในการลงทุนและยังส่งผลให้แบคทีเรียในระบบปรับตัวเข้ากับ สภาพสารอินทรีย์ที่มีปริมาณต่ำ ผลที่ตามมาคือระบบอาจล้มเหลวได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามค่า ของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามธรรมชาติและชนิดของน้ำเสีย จึงจำเป็นต้อง ปรับค่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ในการเดินระบบให้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ใช้ด้วย สำหรับ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบระบบ สามารถหาได้จากการ ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการหรือจากระบบจริงที่มีผู้เดินระบบสำเร็จมาแล้ว



### 2.3.9 เวลาเก็บกัก

เวลาเก็บกักในระบบของการหมักแบบไม่ใช้อากาศในที่นี้หมายถึงเวลากักเก็บแบบที่เรีย (Solid Retention Time, SRT) หรือระยะเวลาที่กักพักทางชลศาสตร์ (Hydraulic Retention Time, HRT) ที่ของเสียอยู่ในระบบจนกระทั่งหลุดออกมาจากระบบ ซึ่งการควบคุมระบบนิยมใช้ค่าเวลาการกักเก็บของเหลวหรือระยะเวลาที่กักพักทางชลศาสตร์ (HRT) เนื่องจากสามารถคำนวณได้ง่ายกว่า การควบคุมเวลาเก็บกักในการเดินระบบมีความสำคัญ เนื่องจากถ้าเวลาเก็บกักยาวนานเกินไปนั้นก็จะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบบำบัด เพราะต้องใช้ถังหมักที่มีขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามหากใช้เวลาเก็บกักสั้นเกินไป แบบที่เรียก็จะเจริญเติบโตไม่ทันก็จะเกิดการหลุดออกจากระบบจำนวนมากซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบลดต่ำลง การควบคุมเวลาเก็บกักที่เหมาะสมจะช่วยให้แบบที่เรียที่อยู่ในระบบมีปริมาณคงที่หรือมีปริมาณเพิ่มขึ้นระยะเวลาเก็บกักเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยสภาพแวดล้อมภายในระบบและลักษณะของของเสียที่ ป้อนเข้าสู่ระบบ รวมไปถึงชนิดของแบบที่เรียในระบบเป็นสำคัญ

### 2.3.10 โลหะบางชนิด

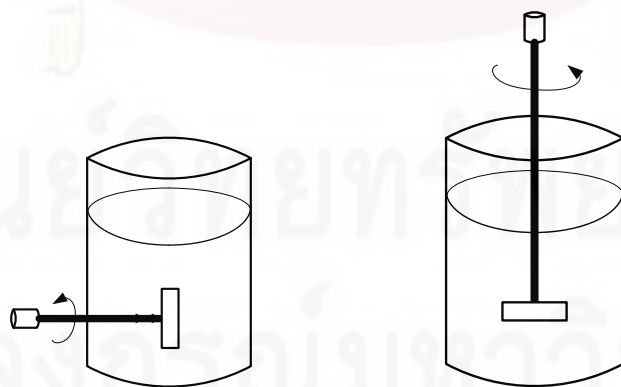
ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ นอกจากธาตุอาหารหลักในระบบอันได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสแล้ว แบบที่เรียสร้างมีเทนยังต้องการธาตุอาหารเสริมประเภทโลหะอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสารที่มักทำการเติมลงไปในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศคือนิกเกิลและโคบอลต์ ซึ่งพบว่าหากระบบมีธาตุโลหะเหล่านี้ในปริมาณที่น้อยเกินไปประสิทธิภาพในการทำงานของระบบจะลดลง โดยการขาดธาตุโลหะเหล่านี้จะส่งผลต่อการทำงานของแบบที่เรียสร้างมีเทนเท่านั้น แต่ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของแบบที่เรียสร้างกรด นอกจากนิกเกิลและโคบอลต์แล้วยังมีการศึกษาถึงการเติมธาตุโลหะอื่นๆ ลงไปในระบบ ได้แก่ โมลิบดีนัม ทังสแตน เซเลเนียม แต่ผลการศึกษายังไม่มีความชัดเจน สำหรับปริมาณการเติมนิกเกิลและโคบอลต์ลงไปในระบบจะอยู่ที่ประมาณ 50 มิลลิกรัม ในรูปของโลหะนั้นๆ ต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ของถังปฏิกรณ์

## 2.4 การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบบำบัดแบบเอเอสบีอาร์

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสบีอาร์ (Anaerobic Sequencing Batch Reactor, ASBR) คือการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศโดยใช้อุปกรณ์ที่สำคัญคือถังปฏิกรณ์กวนผสมสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR) โดยทำการกวนน้ำเสียและเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ภายในระบบให้มีการสัมผัสกันและเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เป็นแก๊สชีวภาพ โดยในแต่ละรอบของการทดลองจะมีการหยุดการกวนผสมเพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์ภายในระบบตกตะกอนแยกตัวออกจากน้ำเสียทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาเชื้อจุลินทรีย์หลุดออกจากระบบ ส่วนน้ำเสียที่ถูกบำบัดเรียบร้อยแล้วก็จะถูกถ่ายออกจากระบบต่อไป และในการทดลองในรอบใหม่ก็จะมีเติมน้ำเสียเข้าสู่ระบบและเริ่มการกวนในถังปฏิกรณ์กวนผสมสมบูรณ์ใหม่อีกครั้งหนึ่ง

### 2.4.1 ถังปฏิกรณ์กวนผสม (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR)

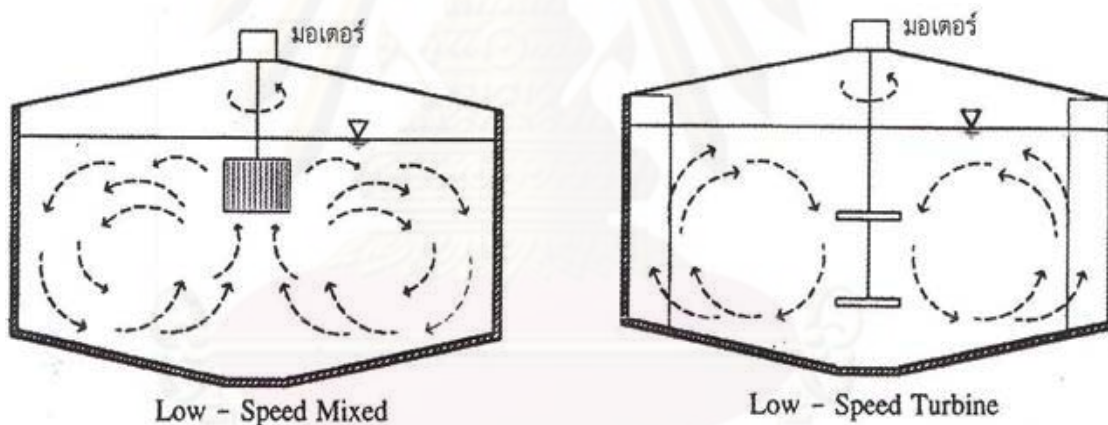
ถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบไร้อากาศเป็นการเรียกตามลักษณะของสสารที่อยู่ภายในถังซึ่งมีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากันทุกจุด (Completely mixed) ถังปฏิกรณ์แบบนี้ถือเป็นถังปฏิกรณ์อุดมคติและเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่เก่าแก่ที่สุดประเภทหนึ่ง โดยถังชนิดนี้ถูกพัฒนาขึ้นจากถังย่อยสลัดจ์ซึ่งเป็น Conventional Anaerobic Digester ที่มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากการกวนผสมไม่ดี ทำให้ใช้เวลาย่อยสลាយาวนาน จึงได้มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสกันของสารอาหารในน้ำเสียและจากถังย่อยสลัดจ์ โดยมีการติดตั้งใบกวน เช่น แบบใบพาย (Paddle) แบบสกรู (Screw) หรือ ใช้แก๊ส (Gas Diffuser) ในการกวนผสม เพื่อให้จุลินทรีย์และสารอาหารในถังปฏิกรณ์มีการสัมผัสกันมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียดีขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.2 ถังปฏิกรณ์แบบนี้มีระยะเวลากักเก็บของแข็ง (Solid Retention Time) เท่ากับระยะเวลาที่กักทางชลศาสตร์ (Hydraulic Retention Time) ถัง CSTR นี้จึงเหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง มีสารแขวนลอยสูงหรือแม้กระทั่งมีสารพิษปนอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากถังปฏิกรณ์มีการกวนอยู่ตลอดเวลา ทำให้เมื่อสารพิษถูกป้อนเข้าระบบจะถูกเจือจางทันทีและเนื่องจากไม่มีความแตกต่างของความเข้มข้นทั้งในแง่ของสารอาหารและเซลล์จุลินทรีย์ ดังนั้นความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์ในน้ำเสียที่ออกจากระบบเท่ากับภายในถังปฏิกรณ์ จึงมักพบปัญหาเซลล์จุลินทรีย์ในระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นถังปฏิกรณ์แบบนี้จึงเหมาะกับของเสีย เช่น มูลสัตว์ เนื่องจากในมูลสัตว์มีจุลินทรีย์ชนิดที่ไร้อากาศอยู่แล้ว เพื่อให้จุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทน ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตที่ช้า สามารถเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณได้มากพอก่อนที่จะหลุดออกจากระบบไปกับน้ำเสียขาออก ระบบจึงจะรักษาปริมาณเซลล์จุลินทรีย์ให้คงที่ได้



ภาพที่ 2.2 ถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน

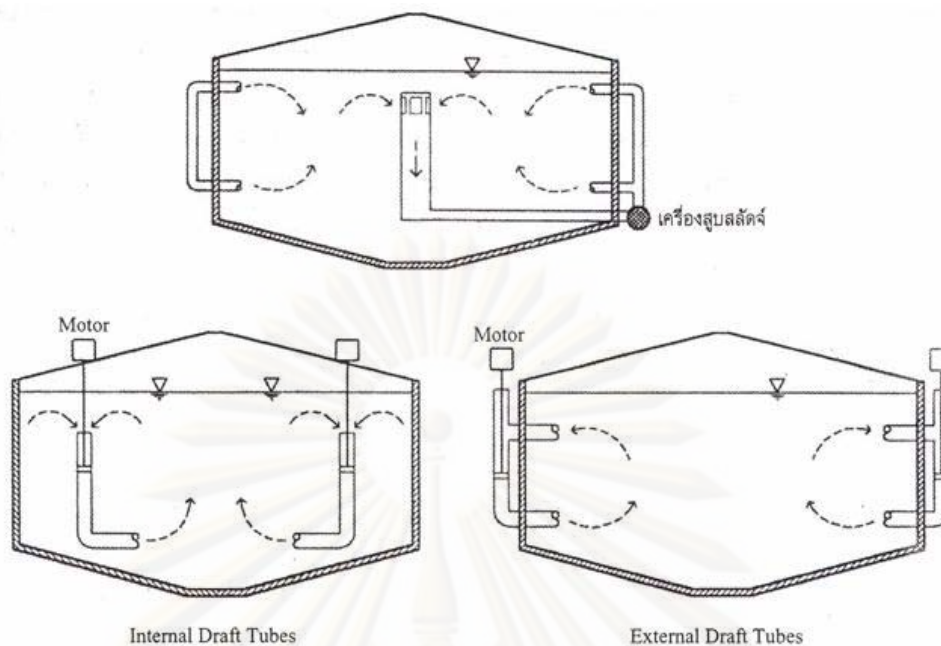
#### 2.4.2 การกวนผสมในถังปฏิกรณ์ (Mixing)

การกวนผสมให้น้ำเสียและจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ผสมกันอย่างทั่วถึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากเพื่อให้ปฏิกิริยาชีวเคมีในระบบบำบัดน้ำเสียเกิดสมบูรณ์มากที่สุด แต่ก็ยังเป็นสิ่งที่ยากมากที่จะเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามหากระบบบำบัดน้ำเสียหรือถังปฏิกรณ์มีการกวนผสมอย่างทั่วถึงอาจทำให้จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียสามารถสัมผัสกับน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้มากขึ้นและทั่วถึงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดสูงขึ้น การกวนผสมน้ำเสียในถังปฏิกรณ์มีอยู่หลายวิธี แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่การกวนผสมจะต้องไม่ก่อให้เกิดสภาวะมีการเติมออกซิเจนเข้าสู่ระบบ การกวนผสมที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 วิธี (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2006) ดังนี้ การกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical mixing) เป็นการกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล เช่น ใบพัด (Impeller) ซึ่งใบพัดที่จะเลือกใช้ก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์เช่น ใบพัดแบบ Puddle หรือ Turbine อย่างไรก็ตามในการผสมความจำเป็นต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อให้เกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 2.3



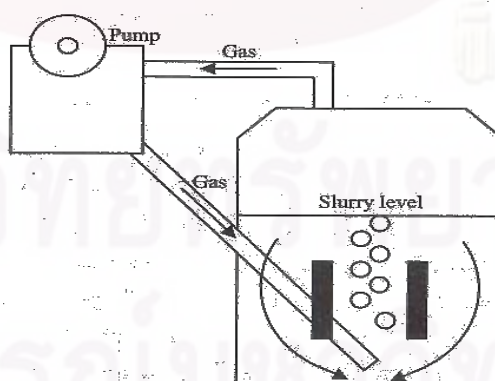
ภาพที่ 2.3 ถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการใช้ใบพัดในการกวนผสม (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2006)

การกวนผสมโดยใช้วิธีการสูบน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ให้เกิดการหมุนเวียน (Mixing by recirculation of wastewater) วิธีการนี้ง่ายมากและใช้พลังงานไม่ค่อยสูงมาก แต่มีข้อเสียคือประสิทธิภาพไม่ค่อยดีนัก โดยเป็นการติดตั้งเครื่องสูบน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์และป้อนกลับเข้าทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ เพื่อทำให้เกิดการหมุนเวียนและการกวนผสมของน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการใช้การสูบน้ำเสียหมุนเวียนภายในถังปฏิกรณ์ (สันตติ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2006)

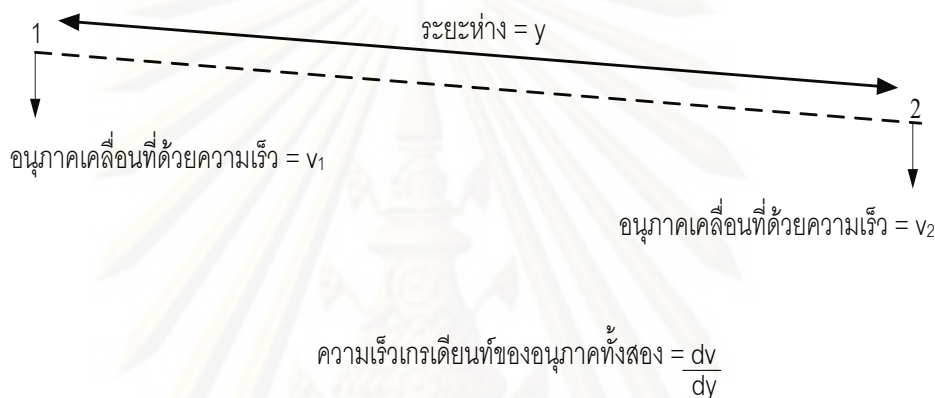
การกวนผสมโดยการนำก๊าซที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียในถังปฏิกรณ์มาใช้ในการกวนผสม (Maxing by producing gas) วิธีการกวนผสมแบบนี้จะอาศัยแก๊สซึ่งเกิดจากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีทั้ง  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$  และอื่นๆ เป็นตัวช่วยในการกวนผสม โดยจะเป็นการกวนก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์บางส่วนกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ทำให้เกิดการแปรปรวนหรือการกวนผสมของน้ำเสียและตะกอนของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีอาศัยแก๊สที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เป็นตัวกลางกวนผสม (สันตติ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2006)

### 2.4.3 ความลาดชันความเร็ว (Velocity Gradient, G)

สำหรับการวัดระดับของการกวนผสมในถังว่ามีมากน้อยเพียงใดนั้น ในทางวิศวกรรมศาสตร์ทางการบำบัดน้ำดิบเพื่อการผลิตน้ำประปาและการบำบัดน้ำเสีย จะวัดการกวนผสมโดยใช้ค่าความลาดชันความเร็วหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าความเร็วเกรเดียนท์ โดยความลาดชันความเร็วหรือความเร็วเกรเดียนท์หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเร็วในแต่ละชั้นของของเหลวที่อยู่ระหว่างแผ่นระนาบ ซึ่งก็คือ ความเร็วต่อระยะทาง (ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี, 2551) แสดงดังรูป 2.6



ภาพที่ 2.6 ความลาดชันความเร็ว (ดัดแปลงจาก ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี, 2551)

โดยหากค่าความลาดชันความเร็วมีค่าสูงขึ้น บ่งบอกได้ว่าการกวนผสมของเหลวภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมชนิดนั้นๆจะมีลักษณะของการผสมผสมที่รุนแรงหรือมีความปั่นป่วนเกิดขึ้นภายในระบบบำบัดน้ำเสียสูงขึ้น ในกรณีที่มีการกวนผสมเกิดขึ้นจากการใช้แรงกล ความลาดชันความเร็วจะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ให้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของน้ำภายในระบบบำบัด โดยสามารถคำนวณค่าความลาดชันความเร็วได้ตามสมการของแคมป์และสไตต์ (Pedocchi และ Piedra-Cveva, 2005) แสดงดังสมการ 2.17 และ 2.18

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad \dots\dots (2.17)$$

และ

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu}} \quad \dots\dots (2.18)$$

โดยที่	G	=	ความลาดชันความเร็ว (ต่อวินาที)
	P	=	กำลังที่ต้องการในการปั่นกวน (นิวตัน-เมตรต่อวินาที)
	W	=	กำลังที่ต้องการในการปั่นกวนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรน้ำ (นิวตัน-เมตรต่อวินาทีต่อลูกบาศก์เมตร)
	$\mu$	=	ความหนืดพลวัตต์ของน้ำ (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)
	V	=	ปริมาตรของน้ำในถังปฏิกรณ์กวนผสม (ลูกบาศก์เมตร)

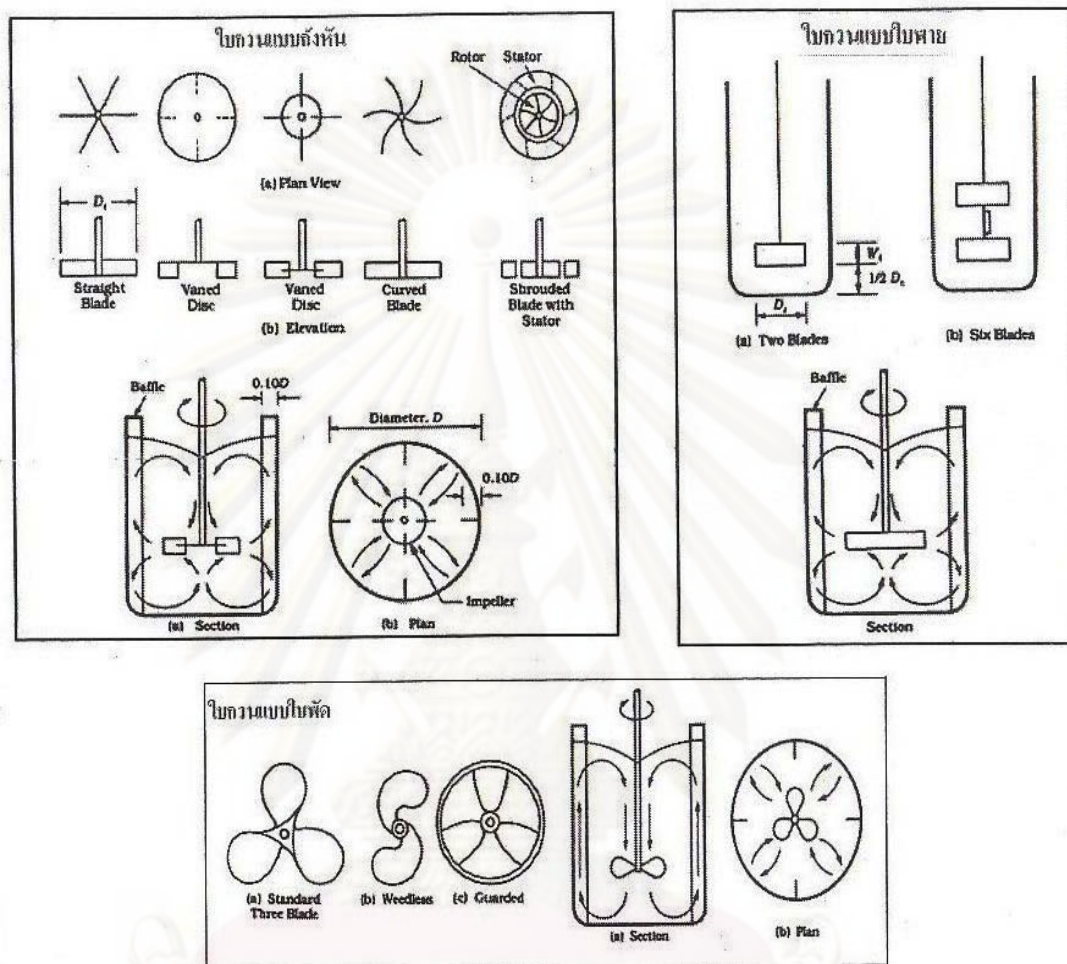
กำลังที่ต้องใช้ในการปั่นกวนภายในถังปฏิกรณ์ภายหลังจากทราบจากการคำนวณในสมการที่ 2.1 แล้ว เมื่อต้องการออกแบบถังปฏิกรณ์กวนผสมโดยการใช้อัตราในการขับเคลื่อนเครื่องมือสำหรับปั่นกวนนั้นๆ เมื่อทราบข้อมูลเกี่ยวกับค่าความลาดชันความเร็ว ความหนืดพลวัตต์ของน้ำ และปริมาตรของน้ำในถังปฏิกรณ์ ชนิดและขนาดของใบกวน สามารถคำนวณหาขอบของมอเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการติดตั้งเพื่อกวนของเหลวภายในถังได้ดังสมการที่ 2.19 โดยสมการที่ใช้ในที่นี้ใช้สำหรับการออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับกวนช้าหรือมีความเร็วรอบโดยประมาณไม่เกิน 200 รอบต่อวินาทีหรือมีเลขเรย์โนลด์ไม่เกิน 10,000 เท่านั้น

$$P = K_L n^2 D_i^3 \mu \quad \dots (2.19)$$

โดยที่	P	=	กำลังที่ต้องการในการปั่นกวน (นิวตัน-เมตรต่อวินาที)
	$K_L$	=	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของใบกวนดังแสดงในตารางที่ 2.10
	n	=	ความเร็วรอบในการกวน (รอบต่อวินาที)
	$D_i$	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน (เมตร)
	$\mu$	=	ความหนืดพลวัตต์ของน้ำ (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)

สำหรับใบกวนที่ใช้ในการปั่นกวนของเหลวหรือน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมนั้นหากแบ่งตามลักษณะของใบกวนที่กวนน้ำเสียสามารถแบ่งใบกวนออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ ใบกวนแบบกังหัน (Turbine) ใบกวนแบบใบพัด (Propeller) และใบกวนแบบใบพาย (Paddles) แต่หากแบ่งใบกวนโดยพิจารณาจากทิศทางการไหลของของเหลวภายในถังปฏิกรณ์ในขณะที่กำลังทำการกวนในถังปฏิกรณ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ การไหลตามแนวแกน (Axial flow) และการไหลตามแนวรัศมี (Radial flow) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมุมระหว่างใบกวนกับแกนที่ใช้ในการหมุนใบกวน และลักษณะของใบกวนทิศทางการไหลของของเหลวที่ถูกกวน สำหรับลักษณะของใบกวนแต่ละชนิดและทิศทางการไหลของของเหลวที่ถูกกวน แสดงดังรูปที่ 2.7 (ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี, 2551)

และสำหรับใบกวนแต่ละชนิดที่ใช้ในการกวนของเหลวภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมนั้น จะให้ค่าคงที่สำหรับการกวนและได้ค่าความลาดชันความเร็วที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.10



ภาพที่ 2.7 ชนิดของใบกวนและลักษณะการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์กวนผสม (ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี, 2551)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.10 ค่า  $K_L$  ของใบกวนที่มีการติดตั้งภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุน (ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี, 2551)

ชนิดของใบกวน	$K_L$
ใบกวนแบบใบพัด 3 ใบ ที่มีระยะช่วงเกลียวเท่ากับ 1 (Propeller, 3 blades)	41.0
ใบกวนแบบใบพัด 3 ใบ ที่มีระยะช่วงเกลียวเท่ากับ 2 (Propeller, 3 blades)	43.5
ใบกวนแบบใบกังหัน 4 ใบ ที่มีติดอยู่บนจานกลม (Turbine, 4 flat blades)	60.0
ใบกวนแบบใบกังหัน 6 ใบ ที่มีติดอยู่บนจานกลม (Turbine, 6 flat blades)	65.0
ใบกวนแบบใบกังหัน 6 ใบ ที่มีลักษณะโค้ง (Turbine, 6 curved blades)	70.0
ใบกวนแบบใบกังหัน 6 ใบ ที่มีลักษณะเอียง $45^\circ$ ( Fan turbine, 6 blades at $45^\circ$ )	70.0
ใบกวนแบบใบกังหัน 6 ใบ ที่มีลักษณะโค้ง และมีขอบรอบใบพัด (Shrouded turbine, 6 curved blades)	97.5
ใบกวนแบบใบกังหัน 6 ใบ ที่มีขอบรอบปลายใบพัดและไม่มีแผ่นกั้น (Shrouded turbine, with stator, no baffles)	172.5
ใบกวนแบบใบพาย 2 ใบ โดยที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพายต่อความสูงของใบพายเท่ากับ 4 ( Flat paddles, 2 blades (single paddle ), $D_i / W_i = 4$ )	43.0
ใบกวนแบบใบพาย 2 ใบ โดยที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพายต่อความสูงของใบพายเท่ากับ 6 ( Flat paddles, 2 blades, $D_i / W_i = 6$ )	36.5
ใบกวนแบบใบพาย 2 ใบ โดยที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพายต่อความสูงของใบพายเท่ากับ 8 ( Flat paddles, 2 blades, $D_i / W_i = 8$ )	33.0
ใบกวนแบบใบพาย 4 ใบ โดยที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพายต่อความสูงของใบพายเท่ากับ 6 ( Flat paddles, 4 blades, $D_i / W_i = 6$ )	49.0
ใบกวนแบบใบพาย 6 ใบ ( Flat paddles, 6 blades)	71.0

**หมายเหตุ** กรณีที่ถังกวนไม่มีการติดตั้งแผ่นกั้นภายในถังกวนและต้องการใช้กำลังในการปั่นกวนเท่ากับกำลังที่ใช้ในการปั่นกวนถังกวนที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นภายในถัง จะได้ว่าค่า  $K_L$  ของใบกวนจะมีค่าเพียง 75% ของใบกวนที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นภายในถังกวน ซึ่งก็หมายความว่า ถังกวนที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นกั้นภายในถังต้องใช้ใบกวนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าถังกวนที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นภายในถังภายใต้เงื่อนไขที่กำลังในการปั่นกวนภายในถังกวนที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นกั้นภายในถังเท่ากับกำลังที่ใช้ในการปั่นกวนถังกวนที่มีการติดตั้งแผ่นกั้นภายในถัง



## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิรวรรณ ออตยะกุล (2549) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการไร้อากาศแบบสองขั้นตอน โดยใช้ถังปฏิกริยาระดับห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วยถังสร้างกรดแบบเฮชยูเอสบี (HUSB) ขนาด 14 ลิตร และระบบยูเอเอสบี (UASB) ขนาด 3.14 ลิตร ผลการทดลองพบว่าเมื่อเริ่มเดินระบบที่พีเอชเริ่มต้น 6.00 ระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ 14 วัน จากการทดลองไฮโดรไลซิสพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 75.49 และมีประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยได้ร้อยละ 91.18 และจากการเดินระบบถังปฏิกริยา HUSB พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 58.21 และมีประสิทธิภาพการสร้างกรดไขมันระเหยร้อยละ 84.64 สำหรับขั้นตอนของการสร้างแก๊สมีเทนในระบบ UASB พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 79.54 ที่ระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ 27 ชั่วโมง อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 28 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน องค์ประกอบของแก๊สมีเทนร้อยละ 67.70 และมีประสิทธิภาพการสร้างแก๊สมีเทนได้ 0.11-0.15 ลิตรต่อกรัมบีโอดี

Anjan และKalia-Shiv (2001) ศึกษาผลของการผสมของเหลวสำหรับช่วยย่อยสลายต่ออัตราการผลิตแก๊สชีวภาพจากของเสียจำพวกมูลสัตว์ในถังหมักไร้อากาศ โดยทำการทดลองหมักมูลสัตว์ 40 กิโลกรัม เปรียบเทียบการย่อยสลายใน 2 ถัง คือ ถังหมักที่มีมูลสัตว์เพียงอย่างเดียว และถังหมักที่มีมูลสัตว์ถูกผสมด้วยของเหลวช่วยย่อยสลาย ผลการทดลองพบว่า ถังที่มีมูลสัตว์อย่างเดียวสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 821 ลิตรและถังที่มีการผสมของเหลวเพื่อช่วยย่อยสลายสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 1,457 ลิตร โดยการผสมของเหลวสำหรับช่วยย่อยสลายนั้นไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพเท่านั้น แต่สามารถช่วยในการกำจัดของแข็งระเหยได้อีกด้วย โดยพบว่าสำหรับถังที่มีการผสมของเหลวสำหรับช่วยย่อยสลายนั้นสามารถกำจัดของแข็งระเหยสูง 36.1 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ถังที่ไม่มีการผสมสามารถกำจัดของแข็งระเหยได้เพียง 23.93 เปอร์เซ็นต์

Arthur (1999) รวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการกวนผสมของเหลวในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยสามารถสรุปได้เป็น 3 พารามิเตอร์ดังนี้

1. ค่าอัตราการพลิก (Turnover rate) คือ อัตราการพลิกของน้ำด้วยแก๊สชีวภาพที่มีการหมุนเวียนลงในระบบต่อเวลา จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าควรใช้ค่าอัตราการพลิกของน้ำเป็น 20 นาทีต่อครั้งสำหรับการย่อยสลายน้ำเสียที่มีสลัดจ์หนาแน่น และใช้ค่าอัตราการพลิกเป็น 30 นาทีต่อครั้งสำหรับการย่อยสลายน้ำเสียที่มีสลัดจ์ไม่หนาแน่น

2. ค่าความลาดชันความเร็ว (G: Velocity Gradient) คือค่ารากที่สองของกำลังการทำงานของเครื่องกวนผสมของเสียหารด้วยความหนืดของของเหลวและปริมาตรน้ำเสียภายใน

ระบบบำบัดนั้นๆ จากการศึกษาพบว่าค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย ควรมีค่าอยู่ในช่วง 50-85 ต่อวินาที

3. ค่ากำลังการหมุนของเครื่องกวนผสมต่อปริมาตรของของเสียที่ต้องการกำจัด (Hp/1000 cu ft) คือค่ากำลังการทำงานต่อปริมาตรของเสีย กำหนดโดย US EPA โดยระบุว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียทั่วไปควรรอยู่ในช่วง 0.20-0.30 HP/1000 cu ft

Chaoui และRichard (2008) ศึกษาผลของความถี่ในการกวนผสมต่อปริมาณแก๊สมีเทนในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยทดลองกวนของเหลวเป็น 1, 2 และ 3 ครั้งต่อวัน ในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุน วัตปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ผลการทดลองพบว่า การกวนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การผลิตแก๊สมีเทนเกิดขึ้นน้อยลง โดยการกวนที่มากเกินไปส่งผลให้กลุ่มของแบคทีเรียเสียหาย และทำให้การย่อยสลายของแบคทีเรียเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนได้มากขึ้น

Hashimoto, Roman และHruska (2004) ศึกษาถึงผลของระยะเวลาในการกวนผสมของเหลวภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมและสถานะความเป็นสุญญากาศภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมต่ออัตราการผลิตมีเทนโดยการหมักแบบไร้อากาศจากของเสียจากการปศุสัตว์ ผลการทดลองพบว่า การกวนผสมในถังหมักอย่างต่อเนื่องสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้สูงกว่าการกวนเพียงวันละ 2 ชม อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าทั้งที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 4 วันและ 6 วัน การกวนแบบต่อเนื่องจะมีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนได้สูงกว่าการกวนเพียงครั้งคราวคิดเป็น 8-11 เปอร์เซ็นต์

Kaparaju และคณะ (2008) ศึกษาผลของการกวนผสมต่ออัตราการผลิตมีเทนในสถานะการย่อยสลายของแบคทีเรียเทอโมฟิลิกจากของเสียจำพวกพวกปุ๋ย โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับการทำงานจริงๆ 2 ขั้นตอน ตอนแรกศึกษาถึงระยะเวลาในการกวนผสมตอนที่ 2 ศึกษาถึงความรุนแรงในการกวนผสม โดยตอนแรกของเสียจำพวกปุ๋ยจะถูกกวนผสมในถังปฏิกรณ์กวนผสมด้วย 3 อัตราคือ ที่การกวนผสมอย่างต่อเนื่อง การกวนต่ำ 2 ชั่วโมงก่อนเติมน้ำเสียและการกวนเล็กน้อยคือ 10 นาทีก่อนการเติมน้ำเสีย ผลการทดลองพบว่า การกวนในระดับต่ำและการกวนเพียงเล็กน้อยจะมีอัตราการผลิตมีเทนสูงกว่าการกวนอย่างต่อเนื่อง 1.3 เปอร์เซ็นต์ และ 12.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผลการทดลองนี้ก็สนับสนุนการทดลองในระดับการปฏิบัติงาน จริงพบว่าการกวนในระดับต่ำสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้สูงกว่าการกวนแบบต่อเนื่อง 7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลการทดลองเปรียบเทียบถึงความรุนแรงจากการกวนผสมพบว่าที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารมลพิษสูง การกวนผสมแบบปานกลาง (กวนต่อเนื่อง 35 รอบต่อนาที) และการกวนผสมเล็กน้อย (กวนไม่ต่อเนื่อง 10 นาทีก่อนเติมของเสีย) ได้ผลดีกว่าการกวนต่อเนื่องที่มีระดับความรุนแรงสูง(กวนต่อเนื่อง 110 รอบต่อนาที) ส่วนในสถานะที่มีอัตราความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำพบว่าการกวนผสมแบบปานกลางจะได้ผลดีที่สุด

Karim และคณะ (2005) ศึกษาถึงผลของการผสมผสานของเหลวสำหรับการย่อยสลายแบบไร้อากาศของของเสียจากสัตว์ โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ 6 ถัง ใช้วิธีการกวนด้วยแก๊สชีวภาพในอัตราที่แตกต่างกันตั้งแต่ไม่กวนเพิ่มขึ้นจนถึงอัตราการกวนเป็น 3 ลิตรต่ออนาที ผลการทดลองพบว่า อัตราการผลิตแก๊สมีเทนมีปริมาณ 0.40-0.45 ลิตรต่อลิตรต่อวัน โดยถังที่มีปริมาณแก๊สมีเทนสูงสุดคิดเป็น 0.45 ลิตรต่อลิตรต่อวัน คือถังที่ไม่มีการกวนน้ำเสียด้วยแก๊สชีวภาพ รองลงมาคือถังที่อัตราการกวนเป็น 1 2 และ 3 ลิตรต่ออนาที ตามลำดับ และเมื่อลดขนาดความสูงของถังลงจากจาก 40 เป็น 26 และ 13 มิลลิเมตร ตามลำดับ และให้มีอัตราการกวนเท่ากันเป็น 1 ลิตรต่ออนาที พบว่าขนาดความสูงขนาดกลางคือที่ 26 มิลลิเมตรมีปริมาณแก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดคิดเป็น 0.45 ลิตรต่อลิตรต่อวัน รองลงมาคือที่ความสูง 13 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ

Karim และคณะ (2005) ศึกษาผลของการกวนผสมของของเหลวสำหรับการย่อยสลายแบบไร้อากาศของเสียจากปศุสัตว์ โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ 10 ถัง ใช้วิธีการกวนผสมของเหลวที่แตกต่างกันได้แก่ การกวนผสมด้วยแก๊สชีวภาพ การกวนผสมด้วยใบพัดและการกวนผสมด้วยการหมุนวนน้ำเสียภายในถัง โดยในการกวนแต่ละแบบจะศึกษาที่ ระดับความเข้มข้นน้ำเสียของของแข็ง 2 ระดับคือที่ 5 เปอร์เซ็นต์และ 10 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นความเข้มข้นของแข็ง 3.08 และ 6.2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $35 \pm 2$  องศาเซลเซียส ค่าระยะเวลาที่กักพักทางจุลชีวศาสตร์เป็น 16.2 วัน ผลการทดลองพบว่า การกวนผสมน้ำเสียไม่มีความจำเป็นสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของของแข็ง 5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากในถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวนมีอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพได้ใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนด้วยวิธีต่างๆ โดยสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 0.84-0.94 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของของแข็งสูงขึ้น เป็น 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการกวนผสมมีความจำเป็นเนื่องจากในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนผสมด้วยแก๊สชีวภาพ การกวนผสมด้วยใบพัด และการกวนผสมด้วยการหมุนวนน้ำ พบว่ามีอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงกว่าถังที่ไม่มีการกวนผสมคิดเป็น 29, 22 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นการกวนจึงจำเป็นสำหรับระบบบำบัดที่มีความเข้มข้นของของแข็งในน้ำเสียในปริมาณที่สูงๆ

Kim, Ahn และ Speece (2002) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการย่อยสลายแบบไร้อากาศของเสียจากปศุสัตว์ที่อุณหภูมิปานกลางคือ 35 องศาเซลเซียส และสูงคือ 55 องศาเซลเซียส โดยทดลองเปรียบเทียบในถัง 4 ชนิดคือ ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องเติมน้ำเสียแบบกะ ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องเติมน้ำเสียแบบต่อเนื่อง ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องแบบ 2 เฟส และถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวน โดยเพิ่มอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เรื่อยๆ และสังเกตจุดที่ระบบล้มเหลวคือมีพีเอชต่ำกว่า 5 ผลการทดลองพบว่า ถังปฏิกรณ์ที่ระบบล้มเหลวเป็นลำดับแรก คือถังปฏิกรณ์ย่อยที่อุณหภูมิสูงเติมน้ำเสียแบบกะ ถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวนมีอุณหภูมิปานกลาง และถังปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบ 2 เฟสที่อุณหภูมิสูง สามารถรองรับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ได้

7.4 กรัมของของแข็งระเหยต่อลิตรต่อวัน รองลงมาคือ ถึงปฏิกรณ์ที่มีอุณหภูมิปานกลางแบบกวน ต่อเนื่องเติมน้ำเสียแบบกะและแบบ 2 เฟส สามารถรองรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ได้ 10.1 กรัมของของแข็งระเหยต่อลิตรต่อวัน ถึงปฏิกรณ์ที่สามารถรองรับค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ได้สูงสุดคือ ถึงปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ต่อเนื่องที่เติมน้ำเสียแบบต่อเนื่องทั้งอุณหภูมิปานกลาง และอุณหภูมิสูง และถึงปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวนอุณหภูมิปานกลาง สามารถรองรับได้ 20.3 กรัมของของแข็งระเหยต่อลิตรต่อวัน ส่วนถึงที่มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้สูงสุดคือ ถึงปฏิกรณ์กวนต่อเนื่องแบบ 2 เฟสอุณหภูมิสูง และถึงปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวนอุณหภูมิสูง สามารถกำจัดของแข็งระเหยได้  $77 \pm 2$  และ  $77 \pm 1$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Najafour และคณะ (2006) ศึกษาการย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบอัตราสูงของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ถึงปฏิกรณ์ยูเอเอสเอฟเอฟ (UASFF) โดยทำการทดลองเดินระบบที่ 38 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ (HRT) เป็น 1.5 และ 3 วัน ทำการทดลองโดยการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ของระบบจาก 1.75 จนถึง 23.15 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน ผลการทดลองพบว่าสามารถลดค่าชีโอดีเฉลี่ยลงได้ 89 และ 97 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์เป็น 1.5 และ 3 วันตามลำดับ และพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 7.10-8.74 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวันระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ 3 วัน สามารถกำจัดค่าชีโอดีได้สูงสุดคือ  $97 \pm 5$  เปอร์เซ็นต์ สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้สูงสุดคือ 0.34 ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัดต่อวัน ส่วนสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ สัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพจะลดลง โดยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.75 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีสัดส่วนของแก๊สมีเทนสูง 84 เปอร์เซ็นต์ และลดลงตามลำดับ จนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 23.15 สัดส่วนของแก๊สมีเทนลดลงเหลือเพียง 62 เปอร์เซ็นต์

Ndegwa และคณะ (2008) ศึกษาผลของความถี่ในการหมุนเวียนน้ำเสียในระบบบำบัดน้ำเสียและผลของอุณหภูมิต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากของเสียจากโรงงานฟาร์มสุกร โดยใช้ระบบเอเอสบีอาร์ (ASBRs) ทำการทดลองโดยใช้ปั๊มสูบน้ำสำหรับหมุนเวียนน้ำเสีย และเพิ่มความถี่ในการหมุนเวียนน้ำจาก 1 เป็น 3 ครั้งต่อวัน และเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 องศาเซลเซียส เป็น 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า การหมุนเวียนน้ำ และการเพิ่มอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จาก 1 เป็น 3 ครั้งต่อวันและ 20 องศาเซลเซียส เป็น 35 องศาเซลเซียส ส่งผลโดยลบต่อเปอร์เซ็นต์ของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี และปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบบำบัดน้ำเสียพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 20 เป็น 35 องศาเซลเซียสและการเพิ่มการหมุนเวียนน้ำเสียภายในระบบบำบัดจาก 1 เป็น 3 ครั้งต่อวัน พบว่ามีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเกิดได้สูงขึ้น

Ronnachai Chaisri และคณะ (2007) ศึกษาผลของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อการสร้างกรดไขมันระเหยและการผลิตแก๊สมีเทนจากการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบไร้อากาศในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี (UASB) และยูเอฟเอเอฟ (UFAF) โดยใช้ถัง UASB เป็นถังสำหรับผลิตกรดไขมันระเหย และใช้ถัง UFAF เป็นถังผลิตมีเทนสำหรับสร้างแก๊สมีเทน ทำการทดลองโดยเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จาก 2.50 ถึง 17.5 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน สำหรับถัง UASB และจาก 1.10 ถึง 10.00 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน สำหรับถัง UFAF โดยสอดคล้องกับระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บกักของเสียอยู่ในช่วง จาก 20.0 ถึง 2.86 วัน สำหรับถัง UASB และจาก 13.5 ถึง 1.50 วัน สำหรับถัง UFAF ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของการกำจัดชีโอดีสำหรับถังปฏิกรณ์ทั้งสองมากกว่า 80.0 เปอร์เซ็นต์ กรดไขมันระเหยจะถูกผลิตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ปริมาณของกรดไขมันระเหยทั้งหมดและกรดอะซิติกในถัง UASB เท่ากับ 5.50 และ 4.90 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งได้รับที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์เท่ากับ 17.5 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน โดยระยะเวลาในการเก็บกักเท่ากับ 2.86 วัน ขณะที่ผลการทดลองในถังปฏิกรณ์ UFAF พบว่า การผลิตมีเทนและแก๊สชีวภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึง 7.50 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน โดยให้ผลการผลิตมีเทนสูงสุด 0.342 ลิตรมีเทนต่อกรัมชีโอดีที่ถูกใช้ไป และเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นถึง 10.0 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน การผลิตมีเทนและแก๊สชีวภาพจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับถัง UASB และถัง UFAF อยู่ที่ประมาณ 15.5 และ 7.5 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ

Rincon และคณะ (2008) ศึกษาอิทธิพลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) และระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ (HRT) ต่อกลุ่มของจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันมะกอก โดยทดลองเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จาก 1.5 เป็น 11.0 และ ระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์จาก 108 เป็น 15 วัน ผลการทดลองพบว่าที่ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เป็น 1.5-9.2 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน และค่าระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์ เป็น 108-17 วัน อัตราการกำจัดชีโอดีอยู่ในช่วง 97-77 เปอร์เซ็นต์ และที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์และระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์เป็น 9.2 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน และ 17 วัน ตามลำดับ ผลิตแก๊สมีเทนได้  $0.244 \pm 0.005$  ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัดและเมื่อศึกษาถึงกลุ่มของจุลินทรีย์โดยวิธี ลายพิมพ์โมเลกุล การโคลนนิ่งและการศึกษาลำดับเบส พบว่า เมื่อเพิ่มค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ แบคทีเรียที่พบส่วนใหญ่อยู่ในไฟลัม Firmicutes จินัสที่พบเป็นกลุ่มหลักคือ Crostridium ส่วนแบคทีเรียในกลุ่มอื่นๆ ที่สามารถพบเห็นได้แก่ Gammaproteobacteria Actinobacteria Bacteroidetes และ Deferribacteres

Wanna Choorit และ Pornpan Wisarnsom (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบ 2 ถัง คือ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และที่ 55 องศาเซลเซียส โดยทดลองหาค่าอัตราภาวะบรรทุกสารอินทรีย์และระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ของน้ำเสียที่เหมาะสม ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสอัตราภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมคือ 12.25 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน ระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ที่เหมาะสมคือ 7 วัน ส่วนที่ 55 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมคือ 17.01 กรัมชีโอดีต่อลิตรต่อวัน ระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ที่เหมาะสมคือ 5 วัน โดยที่ 37 องศาเซลเซียสสามารถลดค่าชีโอดีลงได้คิดเป็น 71.10 เปอร์เซ็นต์ ผลิตแก๊สชีวภาพได้ในอัตรา 3.73 ลิตรต่อชุดการทดลองต่อวัน คิดเป็นแก๊สมีเทน 71.04 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ 55 องศาเซลเซียสพบว่าสามารถลดค่าชีโอดีได้สูง 70.32 เปอร์เซ็นต์ ผลิตแก๊สชีวภาพได้ 4.66 ลิตรต่อชุดการทดลองต่อวัน คิดเป็นแก๊สมีเทน 69.53 เปอร์เซ็นต์

Yacob และคณะ (2006) ทดลองในถังปฏิกรณ์แบบปิดขนาด 500 ลูกบาศก์เมตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มซึ่งมีค่าชีโอดีอยู่ในช่วงของ 34,150-78,460 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์แบบเปิดผลการทดลอง พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าชีโอดีได้สูง 97 เปอร์เซ็นต์ ประสบผลสำเร็จในการเดินระบบที่ระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ต่ำสุด 17 วัน ภายในระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3 เดือน ขณะที่ถังปฏิกรณ์แบบเปิดมีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีสูงเพียง 80.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาที่กักพักทางชีวศาสตร์ 20 วัน เมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์พบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจะลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของน้ำจึงส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ

ตารางที่ 2.11 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ชื่อ-สกุล (ปีที่ตีพิมพ์)	ระบบที่ใช้ในการ บำบัดน้ำเสีย	การกำจัด ชีโอดี (%)	ปริมาณแก๊สมีเทน (L/gCOD <sub>removal</sub> )	สัดส่วนแก๊ส มีเทน (%)
จิรวรรณ ออตยกุล (2549)	HUSB + UASB	79.54	0.15	67.70
Najafour และคณะ (2006)	UASFF	97.00	0.34	84.00
Roonachai และคณะ (2007)	UASB + UFAF	80.00	0.34	70.00
Wanna และ Pornpan (2006)	CSTR	71.10	0.46	71.04

## บทที่ 3

### อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง

#### 3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้สำหรับการทดลองในครั้งนี้เก็บตัวอย่างจากบ่อกักน้ำเสียรวมของกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil, CPO) จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มจำกัด (มหาชน) โดยอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำเสียในขณะเก็บตัวอย่างอยู่ในช่วง  $30 \pm 2$  องศาเซลเซียส วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียใช้วิธีการเก็บตัวอย่างแบบ จ้วง (Grab Sampling) โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียทั้งหมดใส่ถังพลาสติกที่บดแสงพอลิเอทิลีนขนาด 25 ลิตร ปริมาณน้ำเสียที่เก็บทั้งหมดประมาณ 200 ลิตร เก็บรักษาตัวอย่างน้ำเสียทั้งหมดไว้ที่ อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิประมาณ  $28 \pm 3$  องศาเซลเซียส ลักษณะของตัวอย่างน้ำเสียดังกล่าว เป็นของเหลวขุ่นมีสีน้ำตาลเข้มเมื่อวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจะเกิดการแยกตัวของส่วนใสและส่วนของ ตะกอนออกจากกัน แต่ลักษณะของการแยกชั้นจะไม่มี การแบ่งชั้นของส่วนที่เป็นของเหลวใสกับ ตะกอนอย่างชัดเจน ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้โดยเฉลี่ย แสดงดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

**ตารางที่ 3.1** ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทำการทดลองในครั้งนี้

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์
พีเอช (pH)	3.67±0.09
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD)	53,156±1,256
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)	105,504±3,378
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solid, TSS)	52,356±1,267
ไขมันและน้ำมัน (Grease and Oil, G&O)	2,101±156
กรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid, VFA)	1,478±67

**3.2 หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบ (ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์)**

หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์สำหรับการทดลองครั้งนี้ ใช้หัวเชื้อซึ่งเป็นตะกอนจุลินทรีย์จากบ่อบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ของบริษัทชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มจำกัด (มหาชน) โดยทำการเก็บหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ดังกล่าวจากบ่อบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งหัวเชื้อมีความคุ้นเคยกับน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแล้ว หลังจากที่ได้เก็บหัวเชื้อขึ้นมาแล้ววางหัวเชื้อที่ผสมน้ำเสียทิ้งไว้ให้เชื้อจุลินทรีย์ตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสีย จากนั้นจึงทำการแยกน้ำเสียที่อยู่ส่วนบนออกจากเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ โดยเก็บเอาเฉพาะส่วนที่เป็นเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ด้านล่างใส่ลงในถังพลาสติกที่บดแสงซึ่งผลิตจากพอลิเอทิลีนขนาด 25 ลิตร ปิดฝาถังพลาสติกและเติมน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มลงไปเพื่อเป็นอาหารสำหรับเชื้อจุลินทรีย์ในขณะขนส่ง ลักษณะของหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ดังกล่าว มีลักษณะเป็นสีดำเข้ม ประกอบไปด้วยตะกอนจุลินทรีย์ขนาดเล็กสำหรับค่าของแข็งแขวนลอยระเหยของเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยประมาณ 75,500±2,450 มิลลิกรัมต่อลิตร



### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลองในครั้งนี้คือถังปฏิกรณ์กวนผสม โดยถังปฏิกรณ์กวนผสมที่ใช้ในการทดลองผลิตจากท่อพีวีซีที่บดแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ปิดส่วนบนและส่วนล่างของถังด้วยแผ่นอะคริลิกใสยึดติดด้วยน็อตและสกรู ลักษณะของถังปฏิกรณ์กวนผสมประกอบด้วย ท่อน้ำเสียเข้าระบบ ท่อน้ำออกจากระบบ และท่อสำหรับเก็บแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ ในส่วนของใบพัดสำหรับกวนน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมติดตั้งใบกวนแบบใบพาย (paddle) ขนาด  $6.4 \times 6.4$  เซนติเมตร จำนวน 2 ใบ ตำแหน่งที่ติดตั้งใบพัดสำหรับกวนน้ำเสียทำให้สามารถแบ่งถังปฏิกรณ์กวนผสมออกได้เป็น 2 แบบ คือ การติดตั้งใบพัดสำหรับกวนน้ำเสียในแนวนอน โดยเชื่อมต่อกับส่วนของใบพัดและก้านใบพัดสำหรับกวนกับมอเตอร์ในแนวตั้ง และการติดตั้งใบพัดสำหรับกวนน้ำเสียในแนวตั้ง โดยเชื่อมต่อกับส่วนของใบพัดและก้านใบพัดสำหรับกวนกับมอเตอร์ในแนวนอน ลักษณะของถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน แสดงดังรูปที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ลักษณะของถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน

สำหรับมอเตอร์ที่ใช้เชื่อมต่อกับใบกวนสำหรับกวนน้ำเสียภายในถังปฏิกรณ์กวนผสม การทดลองครั้งนี้ใช้มอเตอร์ขนาดเล็กโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 แอมแปร์ 12 โวลต์ ซึ่งในที่นี้ใช้ตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้า (Adapter) เป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์

เพื่อนำมาใช้กับมอเตอร์ดังกล่าว ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เลือกใช้กับถังปฏิกรณ์เพื่อให้ได้ความลาดชันความเร็วต่างๆที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.19

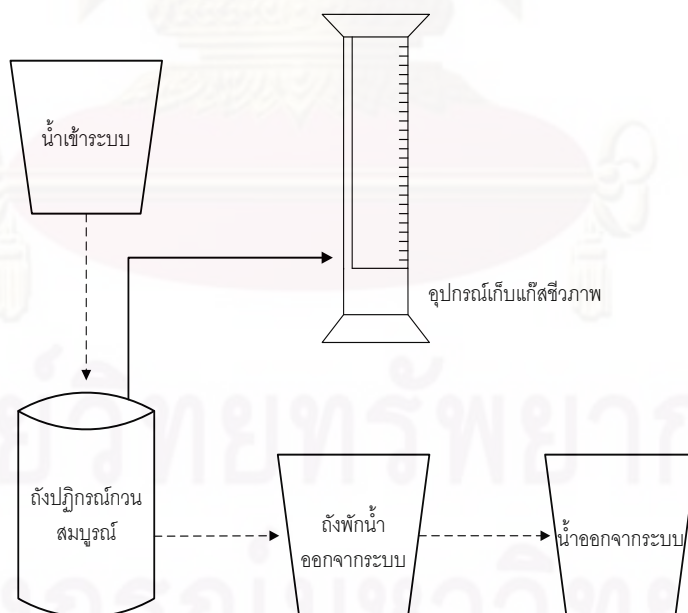
### 3.4 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)
- 2) เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Mettler toledo
- 3) ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert
- 4) อ่างน้ำร้อน (Water bath) ยี่ห้อ Memmert
- 5) เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler loledo รุ่น AB-204-S
- 6) เครื่องชั่งแบบหยาบ 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Precisa รุ่น BJ 1000 C
- 7) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gaschromatography) คอลัมล์ม Molecular sieve 13X
- 8) ตู้ดูดความชื้น (Dessicator)
- 8) กรวยแยก (Separation funnel)
- 9) หลอดซีโอดี (COD tube)
- 10) หลอดเก็บแก๊ส (Vacuum tube)
- 11) ไมโครบิวเรต (Micro buret)
- 12) ปิเปต (Pipet)
- 13) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask)
- 14) ปีกเกอร์ (Beaker)
- 15) ขวดแก้วใส่ตัวอย่าง (Media Bottle)
- 16) ขวดวัดปริมาตร (Volume metric flask)
- 17) ขวดกรองดูด (Suction flask)
- 18) กรวยบุชเนอร์ (Buchner)
- 19) อ่างน้ำร้อน (Water bath) ยี่ห้อ Memmert
- 20) กระบอกตวง (Cylinder)
- 21) อินดิเคเตอร์เฟอร์โรอิน (Ferroun indicator)
- 22) สารละลายโปแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate)
- 23) สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate)
- 24) เฮกเซน (Hexane)
- 26) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid)
- 27) สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium Sulfate)

### 3.5 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.5.1 แผนผังการทำงานของระบบ

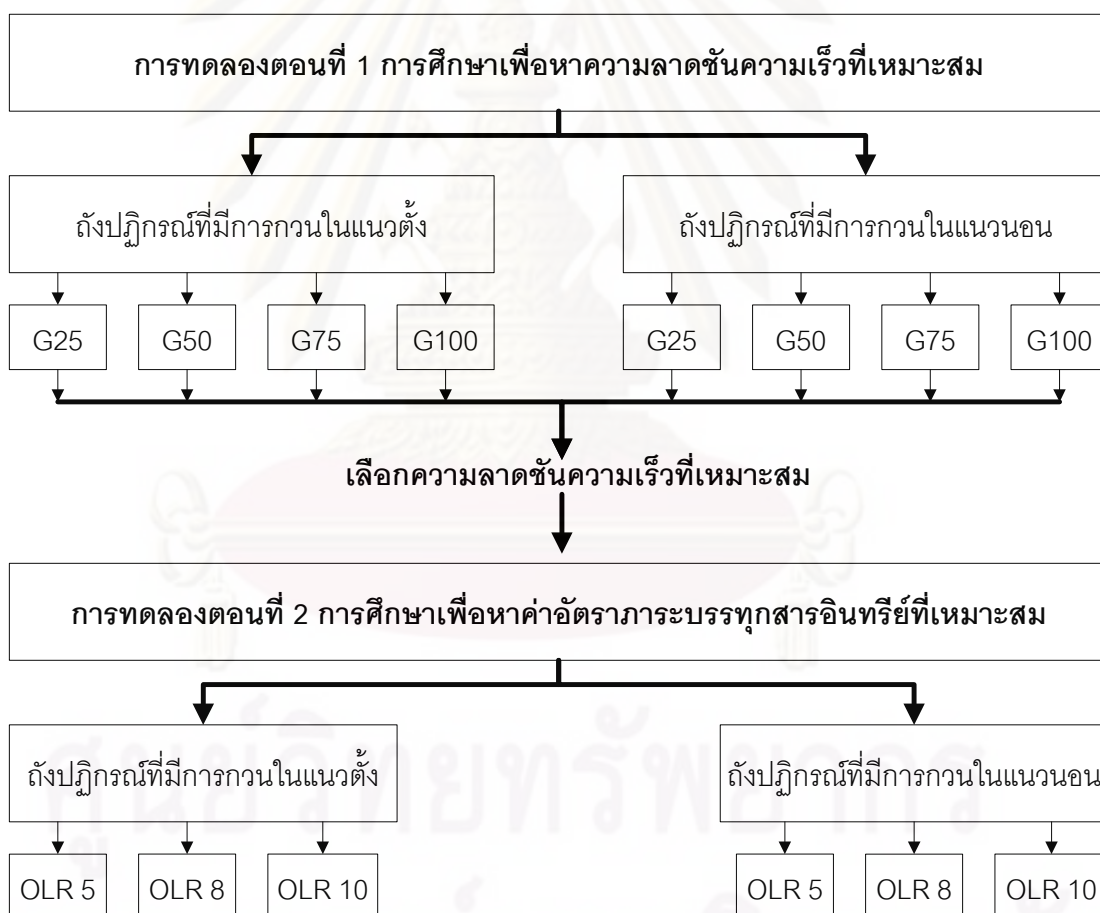
การทำงานของถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนสำหรับการย่อยสลายแบบไร้อากาศในการทดลองครั้งนี้ เริ่มต้นจากการเตรียมน้ำเสียและป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบทางด้านบนของถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุน หลังจากทีน้ำเสียเข้าสู่ระบบแล้วก็จะถูกกวนผสมอย่างรวดเร็วด้วยใบพัด น้ำเสียที่ผสมผสมกับเชื้อจุลินทรีย์อย่างดีจะเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยกระบวนการย่อยสลายทั้ง 4 ขั้นตอนจะเกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ ภายหลังจากสิ้นสุดของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศทั้ง 4 แล้ว ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศดังกล่าว จะเกิดแก๊สชีวภาพขึ้น โดยแก๊สชีวภาพที่ได้จะไม่ละลายน้ำและลอยออกมาทางท่อทางด้านบนเข้าสู่อุปกรณ์สำหรับเก็บแก๊สชีวภาพต่อไป และก่อนเก็บน้ำเสียที่ออกจากระบบก็จะทำการปิดมอเตอร์ในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนนาน 3 ชั่วโมง เพื่อเป็นการลดการสูญเสียเชื้อจุลินทรีย์ออกจากระบบ และเมื่อครบ 3 ชั่วโมงแล้ว น้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วจะไหลออกทางท่อน้ำออก เข้าสู่ถังพักน้ำที่ออกจากระบบและเมื่อตกตะกอน เรียบร้อยแล้วน้ำเสียดังกล่าวก็จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำที่ออกจากระบบต่อไป และเมื่อปล่อยน้ำเสียออกจากระบบแล้วก็จะเติมน้ำเสียเข้าไปใหม่และเริ่มเปิดมอเตอร์ให้ทำงานอีกครั้งต่อไปทุกๆวันที่ทำการทดลอง สำหรับแผนผังการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสบีอาร์สำหรับการบำบัดน้ำเสียในการทดลองนี้ แสดงดังรูปที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แผนผังการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสบีอาร์

### 3.5.2 แผนการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการทดลอง 2 ขั้นตอน โดยการทดลองในแต่ละขั้นตอน การทดลองจะแบ่งแยกออกจากกันอย่างชัดเจน สำหรับในขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมสำหรับถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีระนาบของการกวนแตกต่างกันทั้งสองแบบ ซึ่งภายหลังจากได้ค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมสำหรับถังปฏิกรณ์กวนผสมแต่ละแบบแล้ว จะเลือกค่าความลาดชันความเร็วดังกล่าวมาใช้ทดลองในขั้นตอนที่ 2 และในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการทดลองเพื่อหาอัตราภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีระนาบของการกวนแตกต่างกันทั้งสองแบบ สำหรับแผนการดำเนินการทดลอง แสดงดังภาพที่ 3.4 โดยในการทดลองทั้งสองขั้นตอนนี้จะมีการวิเคราะห์ตัวแปรตามเหมือนกัน ชนิดของตัวแปรตามหรือพารามิเตอร์ ความถี่และวิธีการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 3.2



ภาพที่ 3.4 แผนการดำเนินการทดลอง

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ ความถี่ และวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรตาม (APHA: American Public Health Association, 1992)

ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์ตัวแปรตาม	จุดเก็บตัวอย่าง		
		น้ำเข้า	น้ำออก	ก๊าซ
พีเอช	pH meter	A	A	-
อุณหภูมิ	Thermometer	A	A	-
สภาพต่าง	Direct titration Method	B	B	-
กรดไขมันระเหย	Direct titration Method	B	B	-
ของแข็งแขวนลอย	Total Suspended Solid Dried at 103-105°C	B	B	-
ซีโอดี	Closed reflux , Titration Method	B	B	-
น้ำมันและไขมัน	Partition Gravimetric Method	B	B	-
แก๊สชีวภาพ	วัดปริมาณแก๊สแบบแทนที่น้ำ	-	-	A
สัดส่วนแก๊สมีเทน	Gas Chromatography	-	-	C

หมายเหตุ: A คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์ทุกวัน  
 B คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์ 2 วันต่อครั้ง  
 C คือ พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์เมื่อเดินระบบจนคงที่

### 3.5.3 วิธีการทดลอง

การเริ่มต้นเดินระบบจะต้องทำการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการดำเนินการทดลองและทำการทดสอบความพร้อมของอุปกรณ์ต่างๆ โดยเฉพาะรอยรั่วของถังปฏิกรณ์กวนผสมบวม ทดสอบโดยการใช้น้ำสบู่และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญสำหรับการทดลอง คือการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนใบกวนเพื่อกวนน้ำเสียในถังปฏิกรณ์กวนผสมบวม เมื่อตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์เสร็จแล้วก็เริ่มต้นทำการทดลอง โดยการตวงเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ให้มีปริมาณคิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของน้ำภายในระบบทั้งหมด จากนั้นปิดฝาถังปฏิกรณ์และเชื่อมต่อดังเติมน้ำเข้าระบบกับถังปฏิกรณ์โดยใช้สายยาง เริ่มเปิดสวิทช์ให้ระบบทำงาน โดยเริ่มการกวนในถังปฏิกรณ์เพื่อสร้างความคุ้นเคยแก่สภาวะแวดล้อมให้แก่จุลินทรีย์ภายในระบบ จากนั้นเริ่มเติมน้ำเสียที่มีความเข้มข้นเดียวกับการทดลองจริงแต่เติมในปริมาณวันละ 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรน้ำในระบบทั้งหมดจนครบปริมาตรตามที่ต้องการ หลังจากมีน้ำเสียภายในระบบครบปริมาตรตามที่ต้องการแล้วจึงเริ่มระบายน้ำเสียออกในปริมาณตามที่กำหนด

หลังจากระบายน้ำออกจากระบบแล้ว ก็ทำการเติมน้ำเข้าสู่ระบบในปริมาณเท่ากับน้ำที่ระบายออกจากระบบต่อไป โดยทำการระบายน้ำออกและเติมน้ำเข้าวันต่อวัน สำหรับขั้นตอนการทำงานของระบบและขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 คือทำการทดลอง 2 ขั้นตอน สำหรับตอนที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อหาค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมสำหรับถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ์ เมื่อได้ค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมแล้วจะนำค่าดังกล่าวมาใช้สำหรับการทดลองในขั้นตอนที่ 2 คือการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อไป สำหรับรายละเอียดของการทดลองในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

### 3.5.3.1 การทดลองตอนที่ 1

การศึกษาเพื่อหาค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสม สำหรับการทดลองในขั้นตอนนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลองย่อย คือการทดลองในถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ์ที่มีระนาบของการกวนในแนวนอนและการทดลองในถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ์ที่มีระนาบของการกวนในแนวตั้ง โดยในแต่ละชุดการทดลองมีรายละเอียดและขั้นตอนที่คล้ายกัน คือ การศึกษาผลของตัวแปรต้นคือความลาดชันความเร็วที่ 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที โดยควบคุมตัวแปรในการทดลองคือ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ให้เป็น 12 กรัมซีไอต่อลิตรต่อวัน ซึ่งคิดเป็นความเข้มข้นของค่าซีไอดีเริ่มต้นประมาณ 87,500 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบและออกจากระบบคิดเป็น 1 ลิตรต่อวัน คิดเป็นค่าระยะเวลาที่กักทางชลศาสตร์ประมาณ 7.2 วัน ศึกษาตัวแปรตามคือปริมาณซีไอดี ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ พีเอช กรดระเหย สภาพต่าง ปริมาณไขมันและน้ำมันและอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ เริ่มต้นการทดลองโดยปรับน้ำเสียเข้าสู่ระบบให้มีค่าพีเอชประมาณ 7 และเริ่มต้นเดินระบบโดยการปรับให้ความลาดชันความเร็วภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ์ทั้ง 2 แบบให้เป็น 25 ต่อวินาที สำหรับขั้นตอนการเดินระบบจะมีลำดับขั้นตอนในการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 3.3 วิเคราะห์ผลการทดลองหรือตัวแปรตามดังตารางที่ 3.2 ทำการทดลองเดินระบบจนระบบคงที่โดยใช้เวลาประมาณ 30 วัน หลังจากระบบคงที่แล้วก็เปลี่ยนความลาดชันความเร็วภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ์จาก 25 เป็น 50 75 และ 100 ต่อวินาที ตามลำดับ

### 3.5.3.2 การทดลองตอนที่ 2

การศึกษาเพื่อหาค่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม การทดลองในขั้นตอนนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลองย่อยอีกเช่นกัน คือการทดลองในถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ์ที่มีระนาบของการกวนในแนวนอนและการทดลองในถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ์ที่มีระนาบของการกวนในแนวตั้ง โดยในแต่ละชุดการทดลองมีรายละเอียดและขั้นตอนที่คล้ายกัน คือการศึกษาผลของตัวแปรต้นคืออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ 5 8 และ 10 กรัมซีไอต่อลิตรต่อวัน ซึ่งคิดเป็นค่าซีไอดีน้ำเข้าระบบประมาณ 36,350 58,160 และ 72,700 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตามลำดับ โดยมีอัตราการป้อนน้ำเข้าสู่ระบบและน้ำออกจากระบบเป็น 1 ลิตรต่อวัน คิดเป็นค่าระยะเวลาที่กักพักทางชลศาสตร์ประมาณ 7.2 วัน โดยควบคุมตัวแปรในการทดลองคือ ค่าความลาดชันความเร็ว ซึ่งนำค่าที่ได้จากการทดลองในตอนที่ 1 มาใช้ในขั้นตอนนี้ วิเคราะห์ตัวแปรตามคือ ปริมาณซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ พีเอช กรดระเหย สภาพต่าง ปริมาณไขมันและน้ำมันและอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ เริ่มต้นการทดลองโดยปรับน้ำเสียเข้าสู่ระบบให้มีค่าพีเอชประมาณ 7 และเริ่มต้นทดลองโดยการปรับให้ค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ทั้ง 2 แบบให้มีค่าเป็นเป็น 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน และเริ่มต้นเดินระบบโดยมีลำดับขั้นตอนในการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 3.3 วิเคราะห์ผลการทดลองหรือตัวแปรตามดังตารางที่ 3.2 ทำการทดลองเดินระบบจนระบบคงที่โดยใช้เวลาประมาณ 30 วัน หลังจากระบบคงที่แล้วก็เปลี่ยนแปลงค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ทั้ง 2 แบบจาก 5 เป็น 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ

### 3.5.4 วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำและแก๊สชีวภาพ

#### 3.5.4.1 ค่าสภาพต่างและกรดไขมันระเหย

ถ้าตัวอย่างน้ำเสียที่ต้องการวิเคราะห์มีสารแขวนลอยอยู่ในปริมาณมากให้ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิห้องหรือเซนตริฟิวจ์เพื่อแยกตะกอนออกนาน 5 นาที ก่อนแล้วจึงนำส่วนที่เป็นสารละลายส่วนใสมาใช้เพื่อวิเคราะห์ค่าสภาพต่างและกรดไขมันระเหย ประมาณ 50 มิลลิลิตร วัดพีเอชของตัวอย่างน้ำเสีย และหาค่าความเป็นด่างทั้งหมดโดยไตเตรตตัวอย่างน้ำเสียกับสารละลายมาตรฐาน  $H_2SO_4$  0.05 N จนกระทั่งพีเอชเป็น 4 จดปริมาณกรดที่ใช้ไตเตรตไปสมมุติให้เป็น  $V_1$  เพื่อนำไปคำนวณความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำ แล้วไตเตรตต่อจนพีเอชเป็น 3.5 จากนั้นจึงนำไปต้มเพื่อไล่  $CO_2$  โดยนำตัวอย่างน้ำมาต้มให้เดือดเบาๆประมาณ 3 นาที แล้วจึงวางทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับที่อุณหภูมิห้อง เมื่อตัวอย่างมีอุณหภูมิลดลงแล้วจึงไตเตรตตัวอย่างน้ำเสียที่ต้มเพื่อไล่  $CO_2$  แล้วด้วยสารละลาย มาตรฐาน NaOH 0.05 N จนพีเอชของน้ำเสียที่ใช้ทดลองเป็น 4 แล้วไตเตรตต่อจนพีเอชของน้ำเสียที่ใช้ทดลองเป็น 7 จดปริมาณด่าง NaOH ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่างน้ำเสียจากพีเอช 4 ถึงเอช 7 สมมุติให้เป็น  $V_3$  เพื่อนำไปคำนวณค่าสภาพต่างจากกรดไขมันระเหยต่อไปตามสมการ (3.1) และ (3.2) และเมื่อได้ค่าสภาพต่างแล้วก็สามารถคำนวณหาปริมาณของกรดไขมันระเหยได้ตามสมการที่ (3.3) และ (3.4)

$$\text{ค่าสภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{V_1 \times N \times 50,000}{V_2} \quad \dots\dots (3.1)$$

$$\text{ค่าสภาพต่างจากกรดระเหยง่าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{V_3 \times N \times 50,000}{V_2} \quad \dots\dots (3.2)$$

- โดยที่  $V_1$  = ปริมาณ  $H_2SO_4$  ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่างจนมีพีเอชเป็น 4 (มิลลิลิตร)  
 $V_2$  = ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (มิลลิลิตร)  
 $V_3$  = ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่างพีเอชจาก 4 เป็น 7 (มิลลิลิตร)  
 $N$  = ความเข้มข้น NaOH ที่ใช้ในการทดลอง (นอร์มอล)

การคำนวณหาค่ากรดระเหยตามสมการ (3.3) และ (3.4)

กรณีที่ 1 ถ้าสภาพต่างจากกรดระเหยมากกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร ..... (3.3)  
 กรดระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร) = ค่าสภาพต่าง  $\times$  1.5

กรณีที่ 2 ถ้าสภาพต่างจากกรดระเหยน้อยกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร ..... (3.4)  
 กรดระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร) = ค่าสภาพต่าง  $\times$  1.0

### 3.5.4.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายน้ำ

นำกระดาษกรอง GF/C ไปอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง จากนั้นชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่อบเรียบร้อยแล้ว สมมุติให้มีน้ำหนัก A กรัม ต่อชุดเครื่องมือสำหรับกรองดูด ใช้ปากคีบหยิบกระดาษกรองวางบนกรวยบุษเนอริ์เปิดเครื่องดูดสุญญากาศและล้างกระดาษกรองและเปิดเครื่องดูดจนกระดาษแห้ง ทิ้งน้ำล้างกระดาษกรองและเติมน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ประมาณ 20 มิลลิลิตร เปิดเครื่องดูดสุญญากาศจนน้ำแห้งและล้างประมาณ 2 ครั้ง เปิดเครื่องดูดสุญญากาศจนกระดาษแห้ง เก็บส่วนกระดาษไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำกระดาษกรองที่ได้มาวางทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องและนำไปชั่งน้ำหนักสมมุติให้น้ำหนักกระดาษกรองและของแข็งหนักเป็น B กรัม จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณของแข็งแขวนลอยดังสมการ (3.5)

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A) \times 10^6}{V} \quad \dots\dots (3.5)$$

- โดยที่  $A$  = น้ำหนักกระดาษกรอง (กรัม)  
 $B$  = น้ำหนักของแข็งบวกกระดาษกรอง (กรัม)  
 $V$  = ปริมาณของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (มิลลิลิตร)



### 3.5.4.3 ซีไอทีวีรีฟลักซ์แบบปิด

เตรียมน้ำตัวอย่างโดยเจือจางให้มีความเข้มข้นลดลง จากนั้นเตรียมหลอดซีไอทีวีที่มีขนาด  $16 \times 100$  มิลลิเมตร ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 2.5 มิลลิเมตรใส่หลอดซีไอทีวีเติมสารละลายมาตรฐาน  $K_2Cr_2O_7$  เข้มข้น 0.1 N ปริมาตร 1.5 มิลลิเมตร จากนั้นเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3.5 มิลลิเมตร ปิดฝาและนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง นำออกมาและวางทิ้งไว้ให้เย็น ถ่ายสารละลายใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิเมตร ล้างหลอดซีไอทีวีด้วยน้ำกลั่นและถ่ายน้ำล้างมาใส่รวมกับตัวอย่าง หยดสารละลายเฟอร์โรอินลงไป 2 หยด ไตเตรตสารละลายในขวดรูปชมพู่ด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS เข้มข้น 0.05 N ที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีไปเป็นสีน้ำตาลแดง จดปริมาตรที่ได้เพื่อนำไปคำนวณค่าซีไอทีวี ทำการทดลองกับแบบลค์เช่นเดียวกับตัวอย่างโดยเปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นน้ำกลั่นและไม่ต้องเจือจางน้ำ จดปริมาตรที่ใช้ไทเทรตแบบลค์เพื่อนำไปคำนวณค่าซีไอทีวีของน้ำตัวอย่างจากสมการ (3.6)

$$\text{ซีไอทีวี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A - B) \times N \times 8,000}{V} \quad \dots\dots (3.6)$$

โดยที่	A	=	ปริมาณของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรตแบบลค์ (มิลลิเมตร)
	B	=	ปริมาณของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่างน้ำเสีย (มิลลิเมตร)
	N	=	ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)
	V	=	ปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (มิลลิเมตร)

### 3.5.4.4 น้ำมันและไขมันโดยวิธีสกัดด้วยกรวยแยก

เตรียมน้ำตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิเมตรใส่ในบีกเกอร์ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นจนพีเอชของน้ำน้อยกว่า 2 เทน้ำตัวอย่างจากบีกเกอร์ใส่กรวยแยก เติมเอทเธอร์จำนวน 20 มิลลิเมตร เขย่าแรงประมาณ 2 นาที เปิดฝากรวยแยกและวางทิ้งไว้จนสารละลายแยกชั้น โดยชั้นเอทเธอร์อยู่บนส่วนตัวอย่างน้ำเสียอยู่ส่วนล่าง ถ่ายตัวอย่างน้ำเสียออกใส่บีกเกอร์เดิมเพื่อนำมาสกัดซ้ำอีกส่วนชั้นเอทเธอร์ที่มีส่วนของน้ำมันและไขมันละลายอยู่ ถ่ายสารละลายดังกล่าวผ่านกรวยแยกที่มีโซเดียมซัลเฟตวางอยู่บนกระดาษกรองและรองรับสารละลายที่ผ่านกระดาษกรองด้วยถ่วงกระเบื้องที่แห้งและชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้ว ทำการสกัดซ้ำโดยเทน้ำที่สกัดแล้วในครั้งแรกใส่กรวยแยก เติมเอทเธอร์ 15 มิลลิเมตร เขย่าสารละลายนาน 2 นาทีวางทิ้งไว้ให้สารละลายในกรวยแยกแยกชั้นและทำการถ่ายสารละลายออกเช่นเดียวกับขั้นตอนแรก จากนั้นนำสารละลายไขมันและน้ำมันที่สกัดได้ซึ่งผสมอยู่ในชั้นเอทเธอร์ไประเหยเอทเธอร์ออกบนเตาระเหยที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จนของเหลวระเหยออกหมด นำออกจากเตาระเหยและวางไว้ที่

อุณหภูมิห้องจนอุณหภูมิคงที่เท่าอุณหภูมิห้อง นำไปชั่งน้ำหนักและนำไปคำนวณหาปริมาณไขมัน และน้ำมันตามสมการที่ (3.7)

$$\text{ปริมาณไขมันและน้ำมัน (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{(B - A) \times 10^5}{V} \quad \dots\dots (3.7)$$

โดยที่ A = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องก่อนถ่ายสารละลายลงไป (กรัม)  
 B = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องหลังระเหยเอทเธอร์ออกหมดแล้ว (กรัม)  
 V = ปริมาณของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (มิลลิลิตร)

#### 3.5.4.5 ปริมาณแก๊สชีวภาพโดยวิธีแทนที่น้ำ

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์วัดโดยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ โดยเตรียมอุปกรณ์วัดแก๊สชีวภาพโดยใช้กระบอกตวงขนาด 1000 มิลลิลิตร และ 500 มิลลิลิตร ประกอบเข้ากัน จากนั้นเตรียมน้ำที่ใช้ในการวัดแก๊สชีวภาพโดยปรับให้พีเอชของน้ำเป็น 2 จากนั้นเติมน้ำที่ปรับ พีเอชแล้วลงในกระบอกตวงและนำสายยางที่ต่อกับชุดอุปกรณ์เก็บแก๊สไปต่อกับถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์และสังเกตระดับน้ำภายในกระบอกตวงด้านในว่ามีระดับเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเท่าไร ซึ่งระดับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปคือปริมาตรของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นและจะไปดันน้ำให้ออกไปจากกระบอกตวงนั่นเอง

#### 3.5.4.6 สัดส่วนแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ

สัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพวิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-TCD (GC-14B Shimadzu)) คอลัมล์ม Molecular sieve 13X โดยเก็บตัวอย่างแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ด้วยหลอดเก็บแก๊สแบบสุญญากาศ จากนั้นนำแก๊สตัวอย่างที่เก็บได้ไปฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี คำนวณสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพจากโครมาโทแกรมที่ได้เปรียบเทียบกับพื้นที่ของความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐาน ดังสมการที่ (3.8)

$$\text{สัดส่วนแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ (\%)} = \frac{30A}{761332} \quad \dots\dots (3.8)$$

โดยที่ A = คือพื้นที่โครมาโทแกรมมีเทนของแก๊สตัวอย่าง

หมายเหตุ แก๊สมีเทนมาตรฐาน 30% มีพื้นที่โครมาโทแกรมคิดเป็น 761332

### 3.6 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ

การประเมินประสิทธิภาพของระบบในการทดลองครั้งนี้จะประเมินจาก 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ การประเมินจากสภาวะความสมบูรณ์ของระบบโดยเปรียบเทียบจากค่าสัดส่วนของกรดระเหยง่ายต่อสภาพต่างและเปรียบเทียบความสามารถในการรักษาพีเอชของระบบ การประเมินประสิทธิภาพจากประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษโดยในที่นี้จะประเมินจากความสามารถในการกำจัดซีโอดี กำจัดของแข็งแขวนลอยและการกำจัดไขมันและน้ำมันโดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.9) (3.10) และ (3.8) และสุดท้ายคือการประเมินในส่วนของผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจากระบบโดยวัดจากปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพและการดูสัดส่วนของแก๊สมีเทนภายในแก๊สชีวภาพ

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (\%)} = \frac{(A - B) \times 100}{A} \quad \dots\dots (3.9)$$

โดยที่  $A$  = ปริมาณซีโอดีในน้ำเสียเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $B$  = ปริมาณซีโอดีในน้ำเสียที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย (\%)} = \frac{(A - B) \times 100}{A} \quad \dots\dots (3.10)$$

โดยที่  $A$  = ปริมาณของแข็งแขวนลอยน้ำเสียเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $B$  = ปริมาณของแข็งแขวนลอยน้ำเสียที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน (\%)} = \frac{(A - B) \times 100}{A} \quad \dots\dots (3.11)$$

โดยที่  $A$  = ปริมาณไขมันและน้ำมันในน้ำเสียเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $B$  = ปริมาณไขมันและน้ำมันในน้ำเสียที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

สำหรับความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษที่ความลาดชันความเร็วและอัตราการระบวรทุกสารอินทรีย์ต่างๆเปรียบเทียบโดยใช้ค่าสถิติ F-Test และเปรียบเทียบความแตกต่างแบบหลายทางโดยใช้สถิติแบบ LSD ซึ่งคำนวณโดยใช้คำสั่ง One-Way-ANOVA ส่วนความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวอนเปรียบเทียบโดยใช้ค่าสถิติ T-Test คำนวณโดยใช้คำสั่ง Independent –Sample T Test

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

สำหรับการพิจารณาผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลองในครั้งนี้จะแบ่งส่วนของการแสดงผลการทดลองในแต่ละขั้นตอนออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ประกอบด้วยส่วนที่ 1 คือการพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ได้แก่การพิจารณาสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างในน้ำที่ออกจากระบบควบคู่กับการพิจารณาพีเอชของน้ำที่ออกจากระบบ ส่วนที่ 2 คือการพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษของระบบ ได้แก่ ประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมัน ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบ โดยนอกเหนือจากดูประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษแล้วยังดูผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นคือปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบและสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบอีกด้วย สำหรับลำดับของการแสดงผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลองจะแสดงตามลำดับขั้นตอนของการทดลองซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่

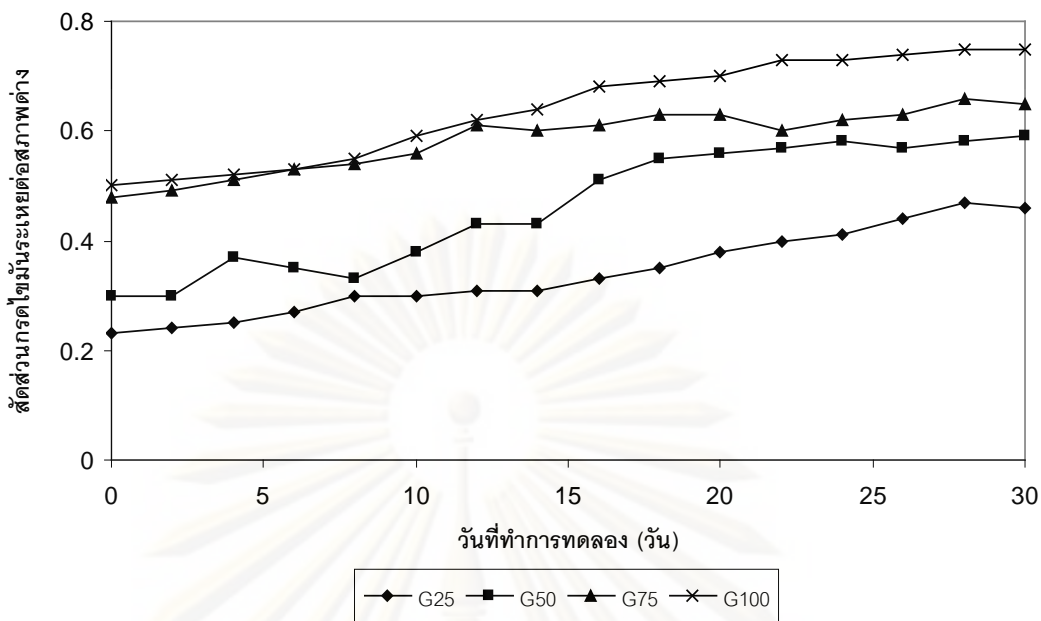
ตอนที่ 1 การทดลองเพื่อหาค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสม

ตอนที่ 2 การทดลองเพื่อหาค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม

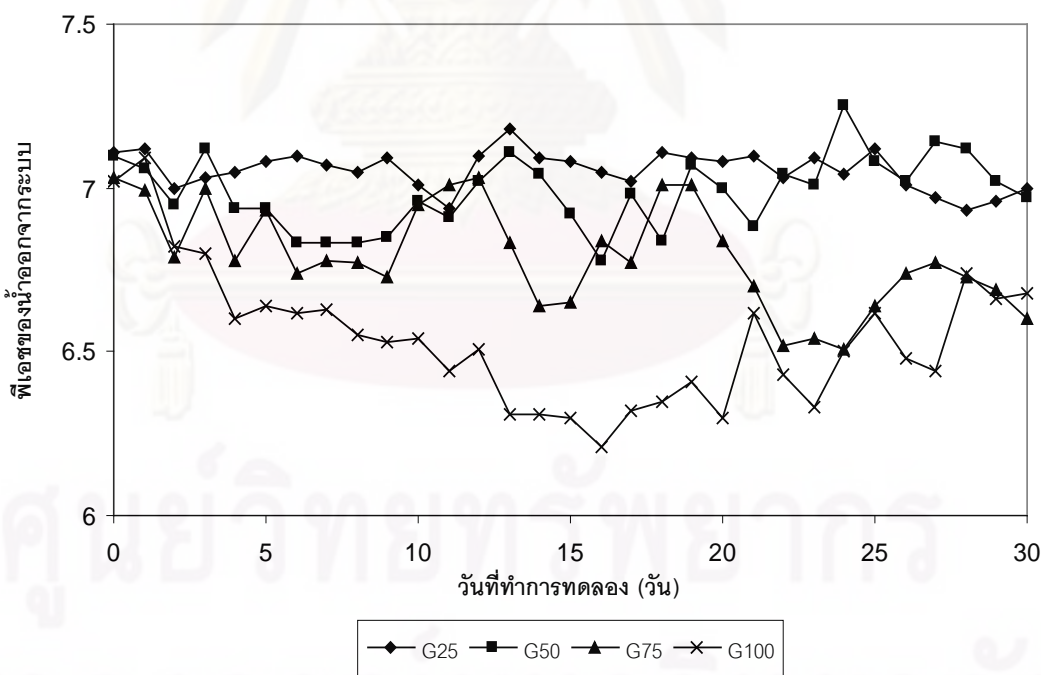
#### 4.1 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองตอนที่ 1 การศึกษาเพื่อหาค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสม

##### 4.1.1 ผลของความลาดชันความเร็วต่อสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างและสภาพการปรับพีเอชของระบบ

สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างและพีเอชของระบบ เป็นค่าที่ใช้พิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบ ค่าดังกล่าวมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ สำหรับแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอชมากที่สุด โดยการเกิดแก๊สชีวภาพจะเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอช 6.8-7.2 พีเอชที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 7.0 โดยกรดไขมันระเหยส่วนเกินที่ถูกนำไปใช้สร้างแก๊สชีวภาพไม่ทัน จะถูกสะสมในปริมาณต่างที่มีอยู่ภายในระบบ หากสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างอยู่ในสัดส่วนที่พอเหมาะจะทำให้ พีเอชอยู่ในระดับที่เหมาะสม การทำงานของแบคทีเรียจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยหากอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างภายในระบบมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูงปรับลดกรดไขมันระเหยได้ดี และหากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบัฟเฟอร์ของระบบมีค่าต่ำมาก พีเอชของระบบสามารถที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็วในช่วงนี้ สำหรับสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างและการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำที่ออกจากระบบในถึงปฏิกรณ์กวนผสมบูรณที่มีการกวนในแนวตั้งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



ภาพที่ 4.1 สัดส่วนของกรวดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



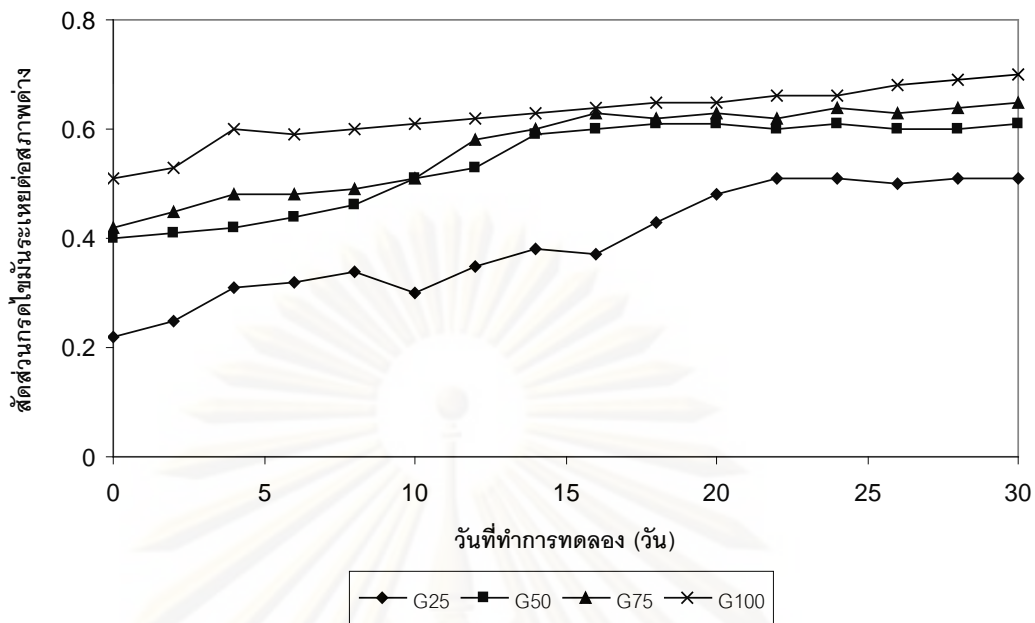
ภาพที่ 4.2 พีเอชของน้ำออกจากระบบกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง

จากการทดลองเดินระบบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งพบว่า สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง ที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที ซึ่งมีความเร็วรอบเป็น 40 80 120 และ 160 รอบต่อนาที มีค่าเฉลี่ยเป็น  $0.34 \pm 0.08$   $0.46 \pm 0.11$   $0.58 \pm 0.06$  และ  $0.64 \pm 0.09$  ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ค่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างค่อยๆเพิ่มขึ้นตามวันที่ทำการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากในตอนแรกก่อนเติมน้ำเสียปริมาณจริงคือ 1 ลิตรต่อวัน ได้ค่อยๆเติมน้ำเสียปริมาณวันละ 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของน้ำในถังปฏิกรณ์ทั้งหมด จนครบปริมาตรตามที่ต้องการจึงเริ่มเก็บน้ำที่ออกจากระบบและเริ่มเติมน้ำในปริมาณจริงๆคือ 1 ลิตรต่อวัน ดังนั้นจึงทำให้ในช่วงวันแรกๆของการทดลอง สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างมีค่าไม่สูงมาก แต่เมื่อทำการทดลองไปเรื่อยๆพบว่าที่ทุกๆความลาดชันความเร็ว สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่ความลาดชันความเร็วสูงสุดคือ 100 ต่อวินาที มีสัดส่วนของกรดไขมันต่อสภาพต่างเข้าใกล้ 0.8 มากที่สุด พีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบจึงลดต่ำสุด ส่วนที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 และ 75 ต่อวินาที พบว่าเป็นไปในลักษณะเดียวกันคือมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของสัดส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างแต่อัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าต่ำกว่าที่ความลาดชันความเร็ว 100 ต่อวินาที และการเพิ่มขึ้นของค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างดังกล่าวจะเริ่มคงที่หลังจากวันที่ 20 ของการทดลอง โดยที่ความลาดชันความเร็ว 25 ต่อวินาทีจะคงที่ที่สัดส่วนประมาณ 0.46 และที่ความลาดชันความเร็ว 50 75 และ 100 ต่อวินาทีจะคงที่ที่สัดส่วนประมาณ 0.59 0.65 และ 0.75 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากพบว่า ที่ความลาดชันความเร็วสูงสุดคือ 100 ต่อวินาที พีเอชของน้ำเสียที่ออกจาก ระบบโดยเฉลี่ยต่ำสุดเป็น  $6.54 \pm 0.21$  และจะค่อยๆลดต่ำลงตั้งแต่วันที่แรกทำการทดลองและลดต่ำสุดเป็น 6.21 ในช่วงวันที่ 16 ของการทดลอง ส่วนที่ความลาดชันความเร็ว 75 ต่อวินาที พบว่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยเป็น  $6.79 \pm 0.22$  และค่าพีเอชลดต่ำลงอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 20 โดยมีพีเอชต่ำสุดในวันที่ 24 ของการทดลองคือ 6.51 ส่วนที่ความลาดชันความเร็ว 25 และ 50 ต่อวินาทีพบว่า พีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงกันเฉลี่ยเป็น  $7.05 \pm 0.06$  และ  $6.99 \pm 0.11$  ตามลำดับ

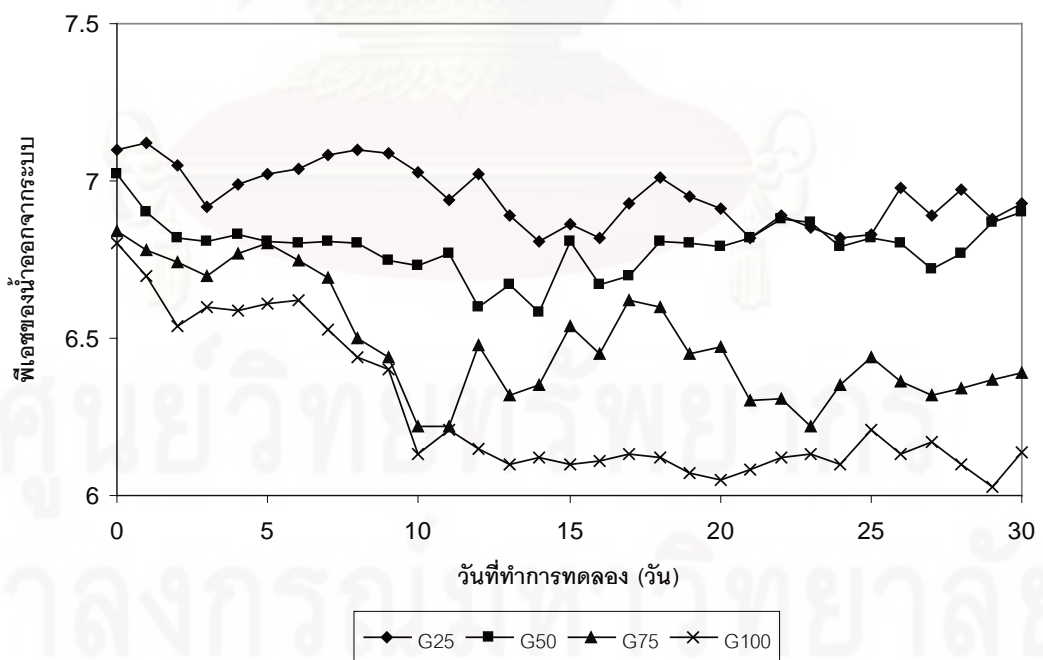
ส่วนผลการทดลองเดินระบบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอน เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างและพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที มีค่าเฉลี่ยของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างเป็น  $0.39 \pm 0.10$   $0.54 \pm 0.08$   $0.57 \pm 0.08$  และ  $0.63 \pm 0.05$  ตามลำดับ โดยแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างในตอนเริ่มต้นทดลองเป็นไปในลักษณะเดียวกับการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง คือในช่วงแรกยังมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีการเติมน้ำเสียในปริมาณที่น้อยกว่าตอนเดินระบบจริงๆดังที่ได้อธิบายไปแล้วใน

ตอนต้น จากนั้นสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นที่ทุกๆความลาดชัน ความเร็วและหลังวันที่ 20 ของการทดลองพบว่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างในถัง ปฏิกรณ์กวนสมบูรณที่มีการกวนในแนวนอนค่อนข้างคงที่ โดยที่ความลาดชันความเร็วสูงสุดคือ 100 ต่อวินาที สัดส่วนดังกล่าวจะคงที่ที่ระดับสูงสุดคือประมาณ 0.70 ส่วนที่ความลาดชันความเร็วต่ำลงเป็น 75 50 และ 25 ต่อวินาที พบว่าคงที่ที่สัดส่วนประมาณ 0.65 0.61 และ 0.51 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบพบว่า ที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที ระดับของพีเอชเฉลี่ยของน้ำเสียที่ออกจากระบบเป็น  $6.95 \pm 0.10$   $6.79 \pm 0.90$   $6.49 \pm 0.19$  และ  $6.27 \pm 0.23$  ตามลำดับ โดยที่ความลาดชันความเร็วสูงสุดคือ 100 ต่อวินาที พบว่าพีเอชของน้ำเสียลดต่ำลงเรื่อยๆตั้งแต่วันที่ทำการทดลองจนเริ่มคงที่ประมาณวันที่ 10 ของการทดลอง โดยพีเอชที่ลดต่ำลงที่สุดอยู่ที่ 6.10 ซึ่งอยู่ในช่วงวันที่ 28 ของการทดลอง ส่วนที่ความลาดชันความเร็ว 75 ต่อวินาที พบว่าพีเอชลดต่ำสุดเป็น 6.22 อยู่ในช่วงวันที่ 11- 12 และวันที่ 23 ของการทดลอง ส่วนที่ความลาดชันความเร็วต่ำลงเป็น 25 และ 50 ต่อวินาที พบว่าพีเอชของน้ำเสียตลอดการทดลองทุกวันมีค่าสูงกว่า 6.5

จากการพิจารณาสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างประกอบกับพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบของถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณที่มีการกวนทั้งในแนวตั้งและแนวนอนเปรียบเทียบกับ เพื่อพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบนั้น พบว่า ที่ความลาดชันความเร็วต่ำกว่า คือ 25 และ 50 ต่อวินาที ระบบจะมีเสถียรภาพสูงคือมีพีเอชน้ำออกจากระบบสูงกว่าที่ความลาดชันความเร็วสูงๆ คือ 75 และ 100 ต่อวินาที เนื่องจากในระบบที่มีความปั่นป่วนสูงมีความเป็นไปได้ว่าจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ประกอบกับเชื้อจุลินทรีย์บางส่วนหลุดออกจากระบบ เป็นผลให้เกิดความไม่สมดุลกันของแบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหยและแบคทีเรียสร้างมีเทน (McMahon และคณะ, 2001) ซึ่งจะใช้กรดไขมันระเหยดังกล่าวมาเป็นสารตั้งต้น ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ที่ความลาดชันความเร็ว 75 และ 100 ต่อวินาที ระบบจะเกิดการสะสมความเป็นกรดไขมันระเหยมากขึ้น จนสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างเข้าใกล้ 0.8 ซึ่งทำให้พีเอชของระบบลดต่ำลงอย่างรวดเร็วและต่ำกว่า 6.5 เนื่องจากระบบมีกำลังปั๊มเฟออร์ไม่เพียงพอที่จะสะเทินกรดได้ โดยพีเอชที่ลดต่ำลงจะมีผลทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถเจริญเติบโตและทำงานได้ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้การเดินระบบบำบัดน้ำเสียล้มเหลวลงในที่สุด ส่วนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ คือ 25 และ 50 ต่อวินาทีพบว่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างตลอดการทดลองมีค่าต่ำคือใกล้เคียง 0.4 ซึ่งถือว่าระบบมีกำลังของปั๊มเฟออร์เพียงพอคือสามารถสะเทินกรดไขมันระเหยทำให้ให้พีเอชของระบบไม่ต่ำลงมากนักจนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน ทำให้แบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนทำงานอยู่ได้ ระบบจึงสามารถดำเนินต่อไปได้ ดังนั้นที่ความลาดชันความเร็ว 25 และ 50 นี้ จึงถือว่าระบบมีเสถียรภาพเพียงพอที่จะเดินระบบต่อไปได้



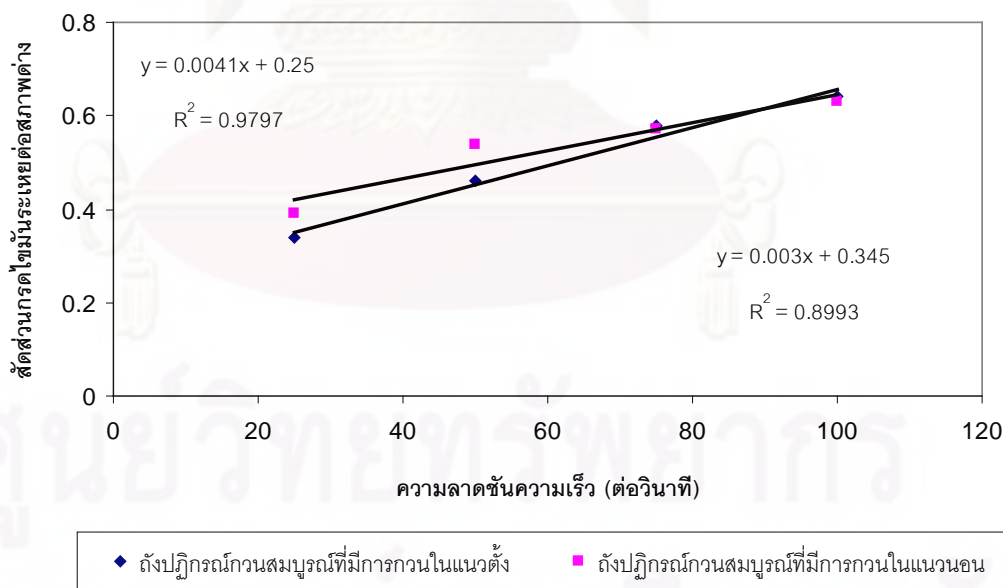
ภาพที่ 4.3 สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน



ภาพที่ 4.4 พีเอชของน้ำออกจากระบบกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณที่มีการกวนในแนวนอน



จากผลการทดลองพิจารณาสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างพบว่า เมื่อความลาดชันความเร็วภายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์เพิ่มขึ้น พบว่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างเพิ่มขึ้นตามความลาดชันความเร็ว เนื่องจากความลาดชันความเร็วที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบคทีเรียบางกลุ่มโดยเฉพาะแบคทีเรียที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม เช่น แบคทีเรียที่สร้างแก๊สมีเทนและแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์กรดไพรูวิกให้กลายเป็นกรดอะซิติกถูกทำลาย ทำให้สัดส่วนของกรดไขมันระเหยประเภทกรดไพรูวิกเพิ่มขึ้นจนเกิดการสะสมในถังปฏิกรณ์ (de Bok และคณะ, 2004) นอกจากนี้แล้วความลาดชันความเร็วหรือความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ยังส่งผลให้จุลินทรีย์บางส่วนหลุดออกจากระบบ ซึ่งจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ภายในถังพบว่ามีความลดลงเล็กน้อยจากตอนเริ่มต้นทดลอง ดังนั้นเมื่อการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยให้กลายเป็นแก๊สมีเทนเกิดขึ้นได้น้อยลง จึงทำให้เกิดการสะสมกรดไขมันระเหยขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ จึงมีผลทำให้สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างสูงขึ้น และเมื่อนำค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างและความลาดชันความเร็วมาเขียนความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอนสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ  $y = 0.0082x + 0.13$  และ  $y = 0.0058x + 0.28$  ตามลำดับ

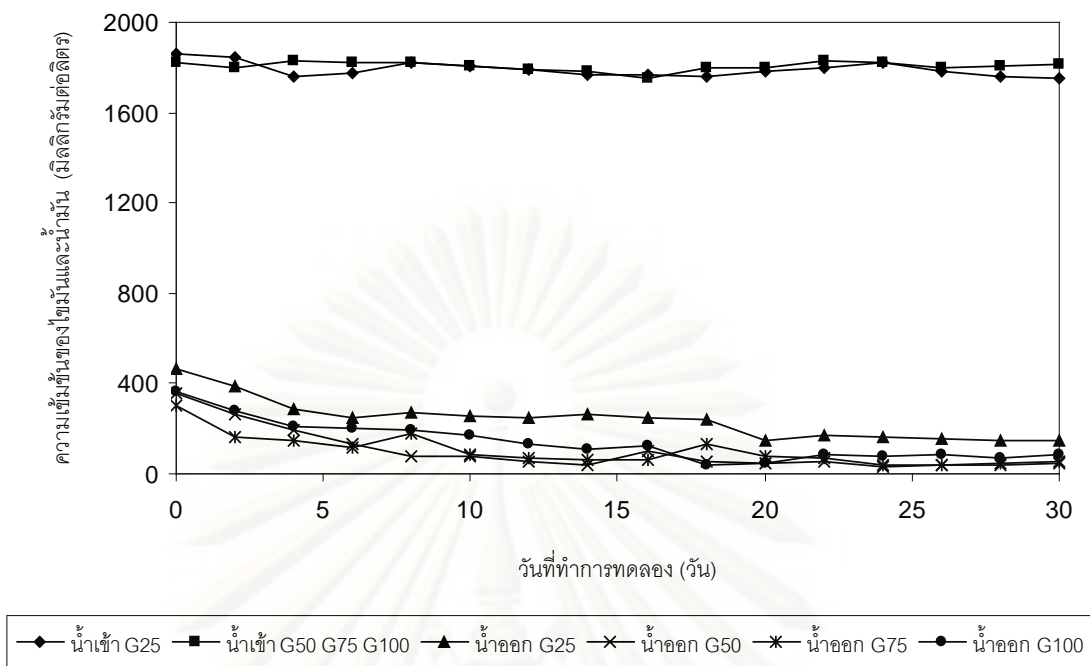


ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับความลาดชันความเร็วในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน

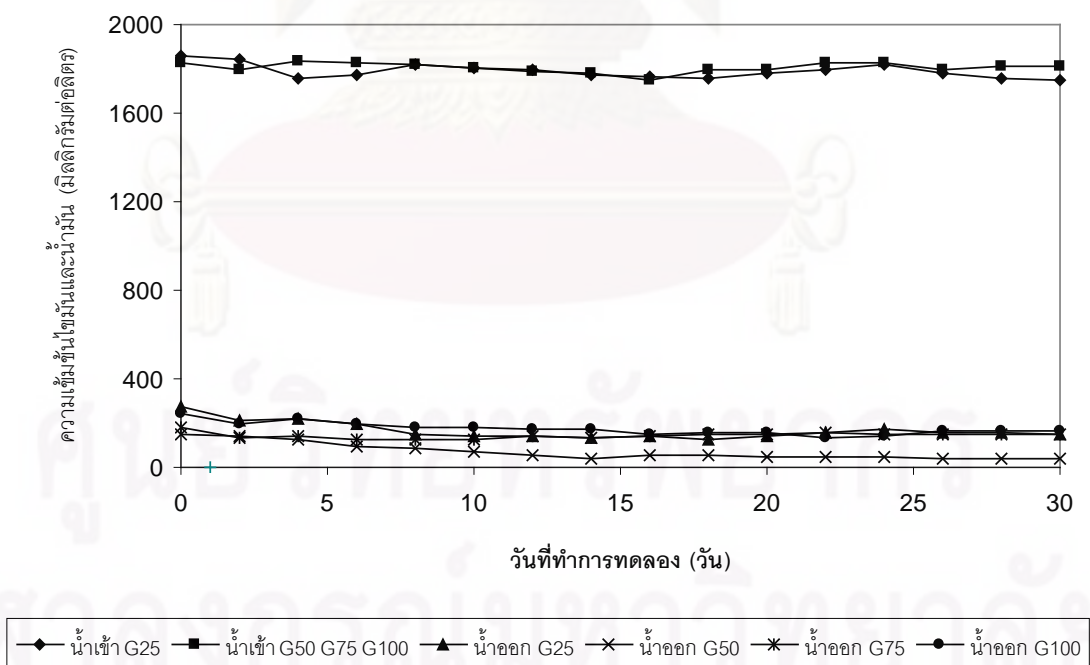
#### 4.1.2 ผลของความลาดชันความเร็วต่อการกำจัดไขมันและน้ำมัน

สำหรับความเข้มข้นของไขมันและน้ำมันในน้ำเข้าและออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนที่มีการกวนในแนวตั้ง และแนวนอนแสดงดังรูปที่ 4.6 4.7 4.8 และ 4.9 สำหรับถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนที่มีการกวนในแนวตั้ง พบว่าที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันเฉลี่ย  $86.59 \pm 4.71$   $94.48 \pm 5.13$   $94.36 \pm 3.80$  และ  $92.16 \pm 4.90$  เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยความลาดชันความเร็วที่สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันได้สูงสุดคือที่ 50 ต่อวินาที ในวันที่ 24 ของการทดลองสามารถกำจัดได้  $94.48$  เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลที่ได้โดยใช้สถิติพบว่าที่ความลาดชันความเร็ว 25 ต่อวินาที มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันต่ำกว่าที่กลุ่มความลาดชันความเร็ว 50 75 และ 100 ต่อวินาที ซึ่งถือว่า มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปริมาณไขมันและน้ำมันโดยเฉลี่ยในน้ำที่เข้าและออกจากระบบแสดงดังตารางที่ 4.1 ส่วนการกำจัดไขมันที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนที่มีการกวนในแนวนอน พบว่าที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันเฉลี่ย  $90.98 \pm 2.33$   $96.19 \pm 2.10$   $91.71 \pm 1.03$  และ  $90.18 \pm 1.74$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยความลาดชันความเร็วที่สามารถกำจัดไขมันได้สูงสุดคือที่ 50 ต่อวินาที ในวันที่ 28 ของการทดลองสามารถกำจัดได้  $98.05$  เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลที่ได้โดยใช้สถิติพบว่าที่ความลาดชันความเร็วกลุ่ม 50 และ 75 ต่อวินาที ซึ่งมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน นั้นมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันได้สูงกว่ากลุ่ม 25 และ 100 ต่อวินาที ซึ่งถือว่า มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปริมาณของไขมันและน้ำมันโดยเฉลี่ยในน้ำที่เข้าและออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดแสดงดังตารางที่ 4.1

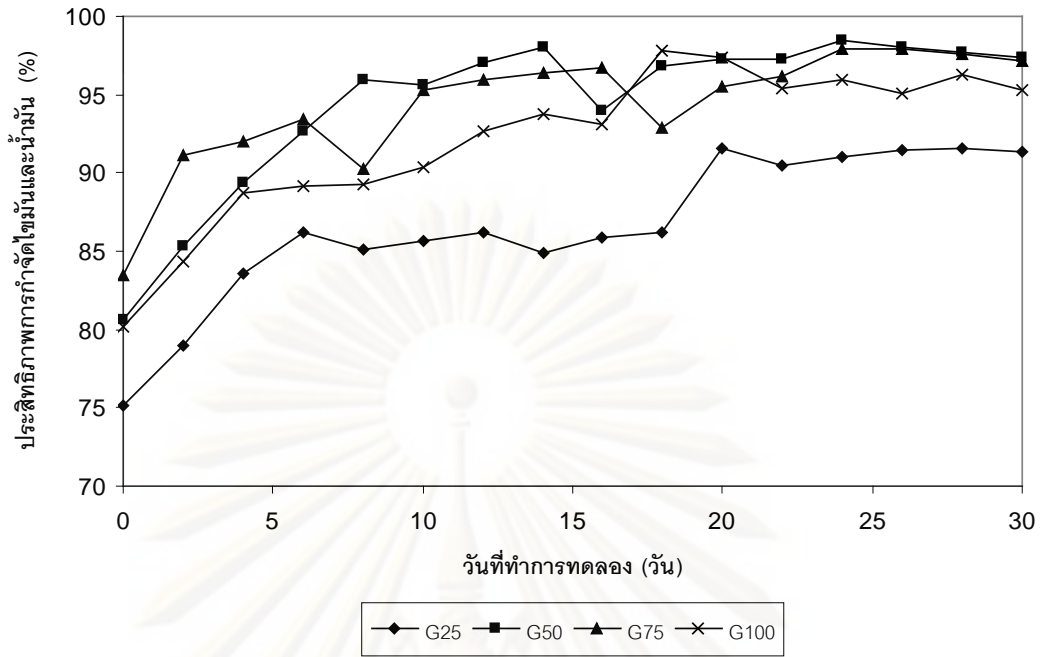
จากการพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนที่มีการกวนทั้งในแนวนอนและแนวตั้งที่ทำการทดลองในครั้งนี้ เปรียบเทียบกับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยระบบบำบัดอื่นๆ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนทั้งที่มีการกวนในแนวนอนและแนวตั้งมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ทำการทดลองโดยใช้โดยระบบบำบัดแบบ UASB และ UFAF (Ronnachai Chaisri และคณะ, 2006) ทั้งนี้เป็นเพราะการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนเป็นระบบบำบัดที่มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสของน้ำเสียและเชื้อจุลินทรีย์มากและนานกว่าระบบอื่นๆ ดังนั้นจึงทำให้การใช้ถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนมี ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันได้สูงกว่าการใช้ระบบอื่นๆ



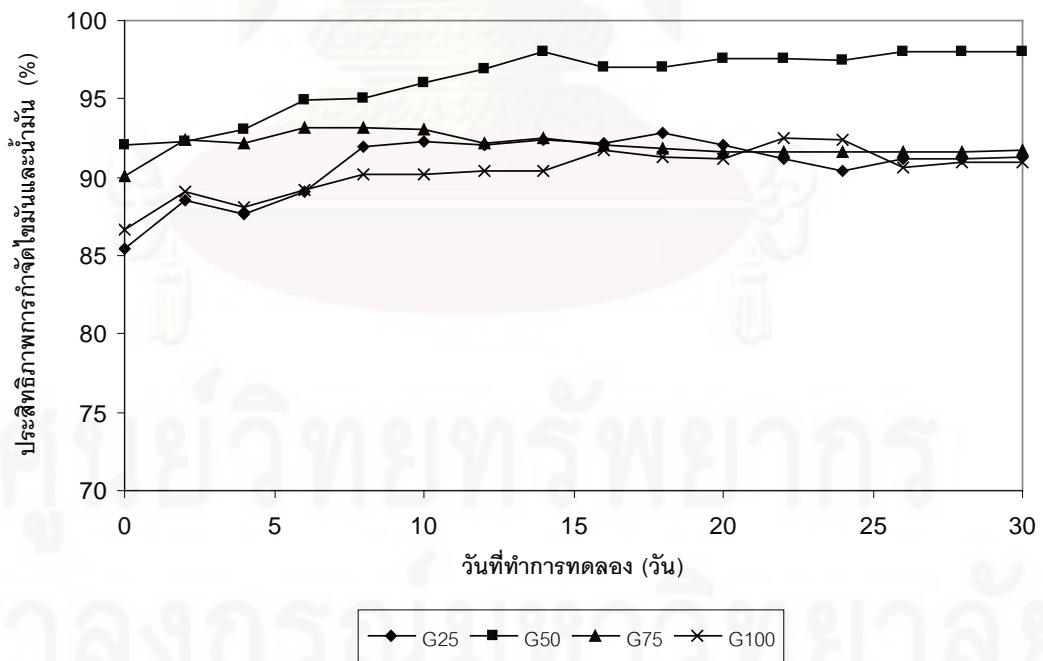
ภาพที่ 4.6 ความเข้มข้นของไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ ในถึงปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



ภาพที่ 4.7 ความเข้มข้นของไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ ในถึงปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน



ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



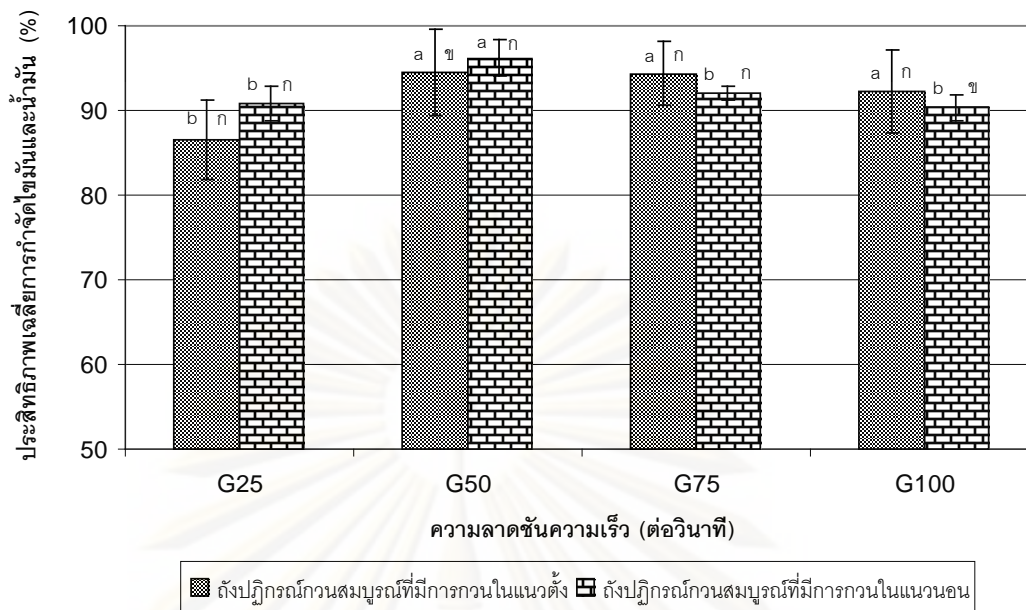
ภาพที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน

ตารางที่ 4.1 ปริมาณเฉลี่ยของไขมันและน้ำมันในน้ำที่เข้าระบบและน้ำที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของระบบที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ

ความลาดชัน ความเร็วในถัง ปฏิกรณ์(ต่อวินาที)	ค่าปริมาณไขมันและน้ำมัน		ประสิทธิภาพเฉลี่ย การกำจัดไขมันและ น้ำมัน(%)
	น้ำเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
ถึงกวนแนวตั้ง			
G25	1,786.07±27.85	321.90±113.75	<sup>b</sup> 86.59±4.71 <sup>n</sup>
G50	1,805.53±21.22	83.12±66.92	<sup>a</sup> 94.48±5.13 <sup>n</sup>
G75	1,805.53±21.22	84.09±49.58	<sup>a</sup> 94.36±3.80 <sup>n</sup>
G100	1,805.53±21.22	127.21±69.85	<sup>a</sup> 92.16±4.90 <sup>n</sup>
ถึงกวนแนวนอน			
G25	1,786.07±27.85	154.64±33.97	<sup>b</sup> 90.73±2.05 <sup>n</sup>
G50	1,805.53±21.22	63.94±33.67	<sup>a</sup> 96.19±2.11 <sup>n</sup>
G75	1,805.53±21.22	147.66±17.88	<sup>a</sup> 92.03±0.67 <sup>n</sup>
G100	1,805.53±21.22	173.03±27.94	<sup>b</sup> 90.37±1.53 <sup>n</sup>

หมายเหตุ - อักษรมุมบนซ้ายมือที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความลาดชันความเร็ว  
- อักษรมุมบนขวามือที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลว

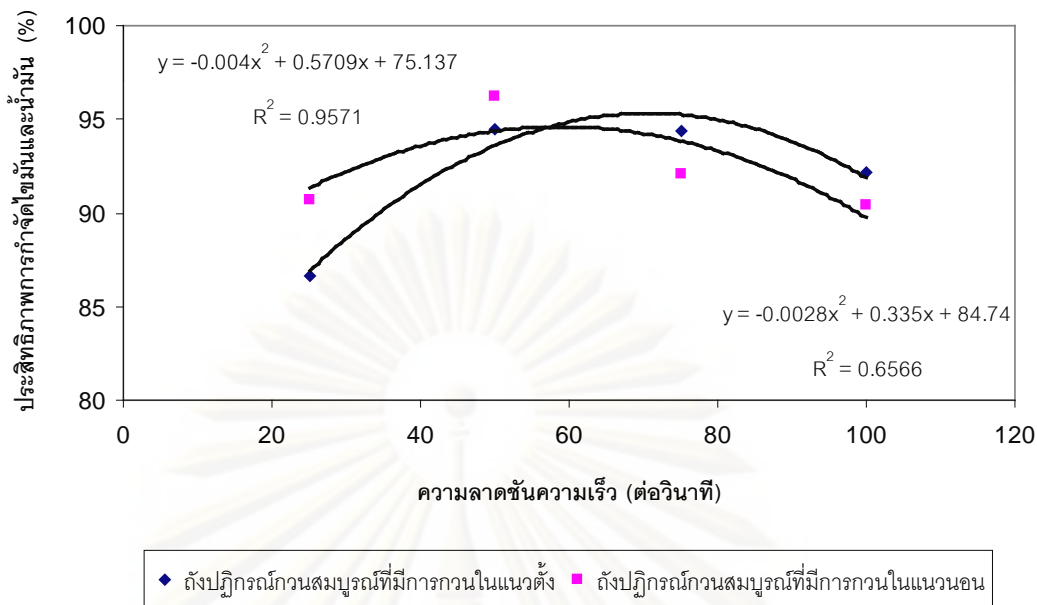
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันในถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์ที่มีแนวระนาบการกวนแตกต่างกันคือการกวนในแนวตั้งและแนวนอน โดยป้อนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากันเข้าสู่ระบบคือมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 12 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน สำหรับผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดไขมันและน้ำมันเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่ความลาดชันความเร็วเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยเมื่อจับคู่เปรียบเทียบผลของแนวระนาบของการกวนของเหลวภายในถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ความลาดชันความเร็วเท่ากัน โดยใช้สถิติพบว่า ที่ความลาดชันความเร็ว 25 และ 75 ต่อวินาที แนวระนาบของการกวนทั้งสองมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันไม่แตกต่างกัน ส่วนที่ความลาดชันความเร็ว 50 ต่อวินาที พบว่าการกวนในแนวนอนมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงกว่าการกวนในแนวตั้ง ส่วนที่ความลาดชันความเร็ว 100 ต่อวินาที พบว่าการกวนในแนวตั้งมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงกว่าการกวนในแนวนอนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



หมายเหตุ - อักษรบนกราฟซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความลาดชันความเร็ว  
- อักษรบนกราฟขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลว

ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดไขมันและน้ำมันเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ

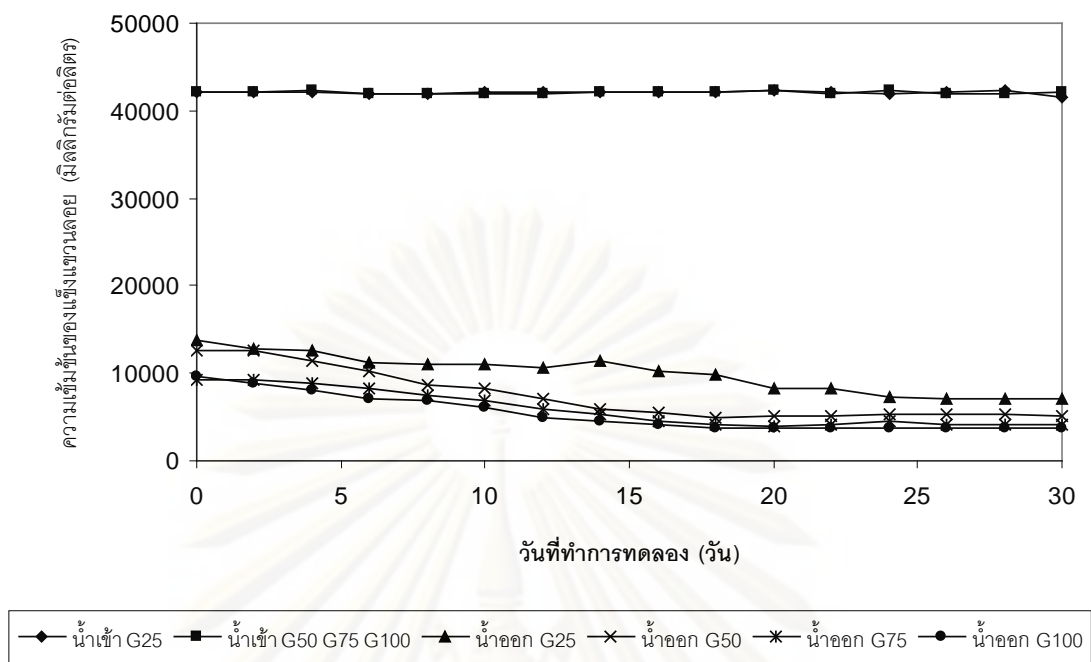
จากผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ปัจจัยหนึ่งที่มีผลให้การกำจัดไขมันและน้ำมันสำหรับการทดลองในครั้งนี้เกิดขึ้นได้ค่อนข้างสูงคือ การปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยสารละลายเบส โซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าไขมันและน้ำมันส่วนหนึ่งที่มีอยู่ในน้ำเสียเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป ได้เป็นสารประกอบจำพวกสบู่ซึ่งทำให้ปริมาณไขมันและน้ำมันลดลงได้ และเมื่อนำประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่ได้มาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์กับความลาดชันความเร็วที่ทำการทดลอง พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นกราฟพาราโบลาว่าสามารถแสดงดังรูปที่ 4.11 โดยในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งได้สมการความสัมพันธ์คือ  $y = -0.004x^2 + 0.570x + 75.137$  ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอนได้สมการความสัมพันธ์คือ  $y = -0.0028x^2 + 0.335x + 84.74$  จากสมการที่ได้เมื่หาคำนวณหาจุดสูงสุดของกราฟเพื่อวิเคราะห์หาค่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมและประสิทธิภาพที่กำจัดไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นได้สูงสุด พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมที่สุดคือ 71 ต่อวินาที สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันได้สูงสุด 95.50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวนอนพบว่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมที่สุดคือ 60 ต่อวินาที สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันได้สูงสุด 94.76 เปอร์เซ็นต์



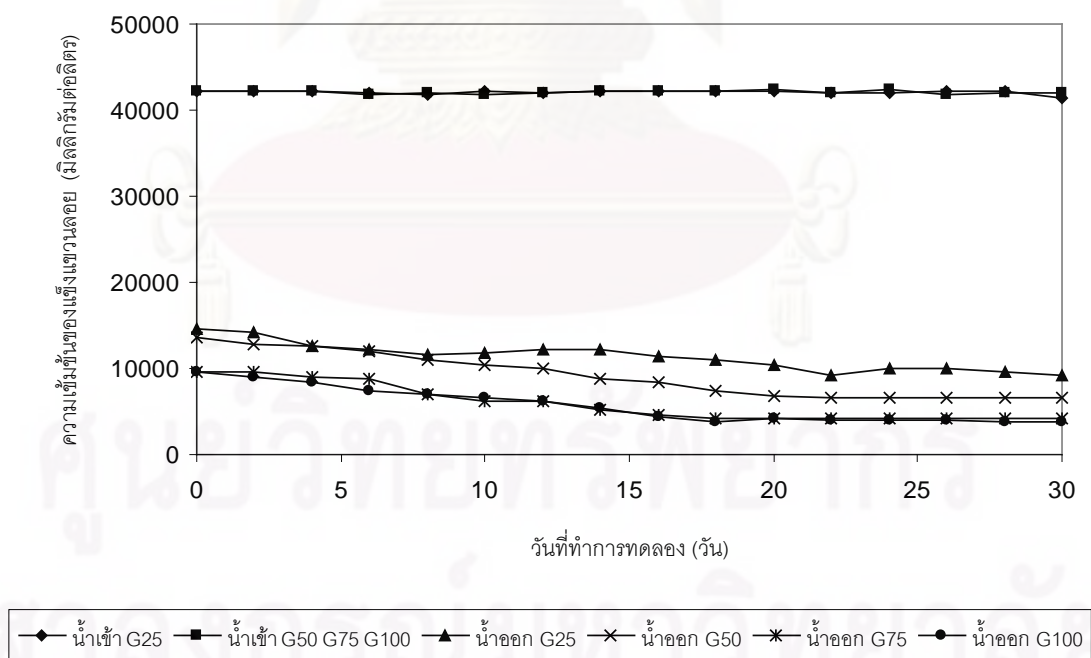
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันกับความลาดชันความเร็วในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน

#### 4.1.3 ผลของความลาดชันความเร็วต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอย

ผลการทดลองการกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนแสดงดังรูปที่ 4.12 4.13 4.14 และ 4.10 โดยในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง ที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย  $76.31 \pm 5.20$   $82.48 \pm 6.72$   $85.84 \pm 4.89$  และ  $87.17 \pm 4.90$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยที่ความลาดชันความเร็ว 100 ต่อวินาที ในวันที่ 25 ของการทดลองมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 91.31 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลโดยใช้สถิติพบว่าที่ความลาดชันความเร็วกลุ่ม 75 และ 100 ต่อวินาที ซึ่งมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมีประสิทธิภาพสูงสุดรองลงมาคือที่ 50 และ 25 ต่อวินาทีตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวนอนพบว่าที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย  $72.95 \pm 3.85$   $78.15 \pm 6.12$   $85.84 \pm 5.17$  และ  $86.41 \pm 4.93$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยที่ความลาดชันความเร็ว 100 ต่อวินาที ในวันที่ 25 ของการทดลอง มีประสิทธิภาพการกำจัดแขวนลอยได้สูงสุดคือ 91.11 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลโดยใช้สถิติพบว่าได้ผลเช่นเดียวกับในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง สำหรับปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำเข้าและออกจากระบบโดยเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.2

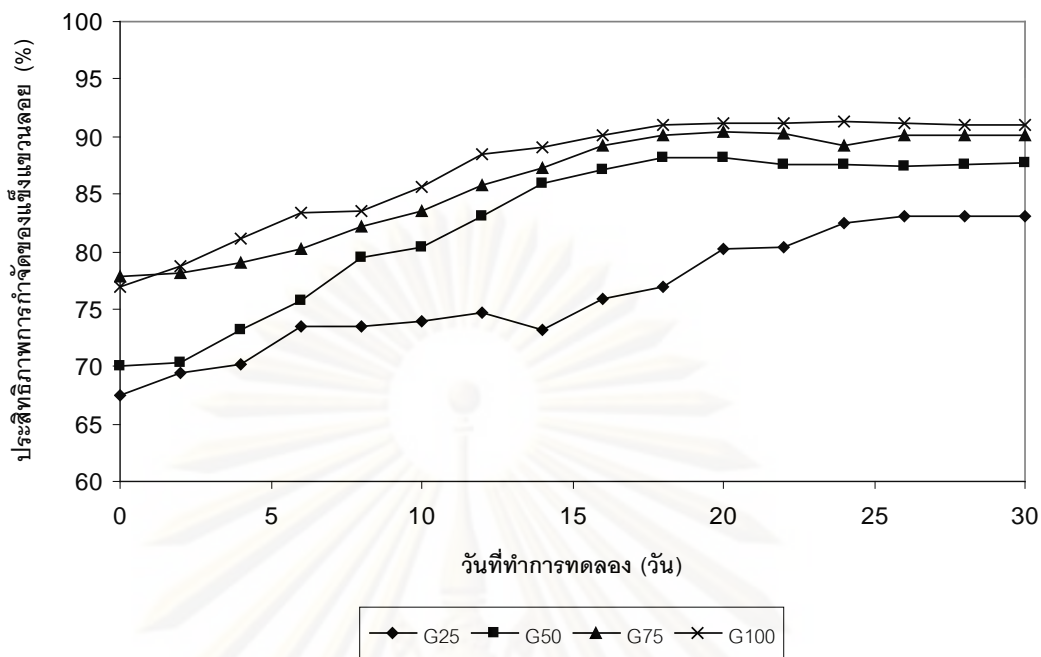


ภาพที่ 4.12 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง

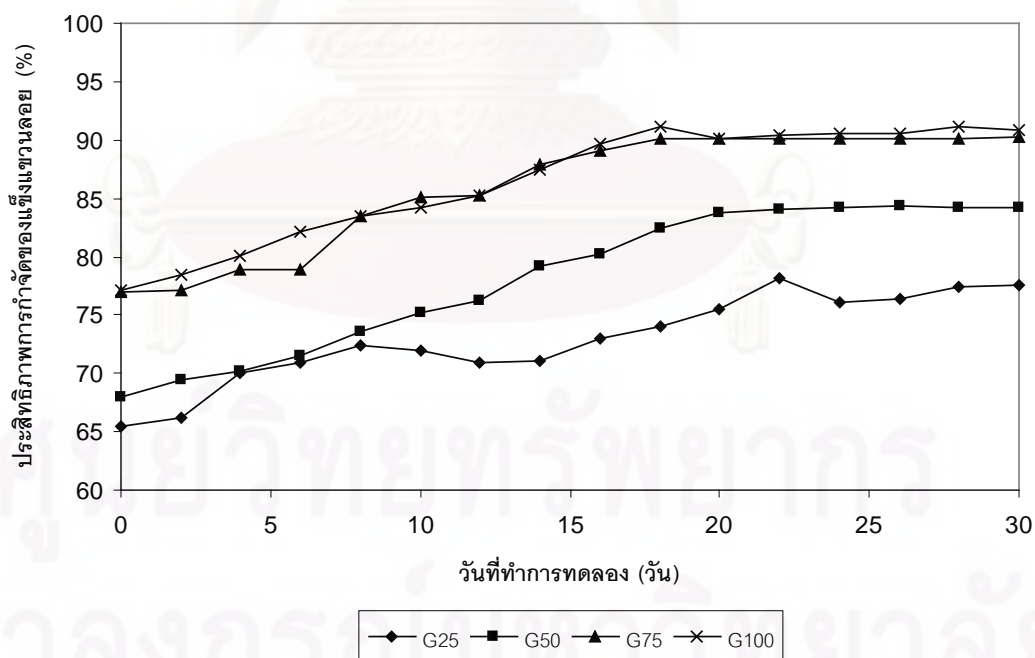


ภาพที่ 4.13 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ ในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน





ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



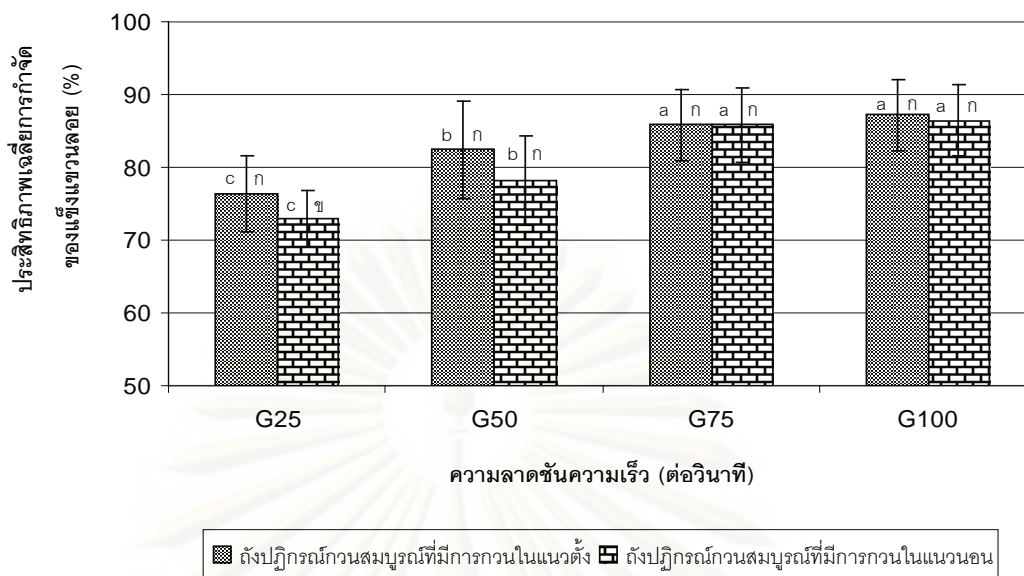
ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน

ตารางที่ 4.2 ปริมาณเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยในน้ำที่เข้าระบบและน้ำที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของระบบที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ

ความลาดชัน ความเร็วในถัง ปฏิกรณ์(ต่อวินาที)	ปริมาณเฉลี่ยของแข็งแขวนลอย		ประสิทธิภาพเฉลี่ย การกำจัดของแข็ง แขวนลอย(%)
	น้ำเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
ถึงกวนแนวตั้ง			
G25	42,091.13±192.19	9,729.61±2,030.67	<sup>c</sup> 76.31±5.20 <sup>n</sup>
G50	42,076.93±149.24	7,023.43±2,547.44	<sup>b</sup> 82.48±6.72 <sup>n</sup>
G75	42,076.93±149.24	5,736.45±1,917.46	<sup>a</sup> 85.84±4.89 <sup>n</sup>
G100	42,076.93±149.24	5,112.85±1,792.73	<sup>a</sup> 87.17±4.90 <sup>n</sup>
ถึงกวนแนวนอน			
G25	42,091.13±192.19	11,178.48±1,447.29	<sup>c</sup> 72.95±3.85 <sup>n</sup>
G50	42,076.93±149.24	8,905.36±2,381.29	<sup>b</sup> 78.15±6.12 <sup>n</sup>
G75	42,076.93±149.24	5,709.00±2,005.93	<sup>a</sup> 85.84±5.17 <sup>n</sup>
G100	42,076.93±149.24	5,458.06±1,854.83	<sup>a</sup> 86.41±4.93 <sup>n</sup>

หมายเหตุ - อักษรมุมบนซ้ายมือที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความลาดชันความเร็ว  
- อักษรมุมบนขวามือที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลว

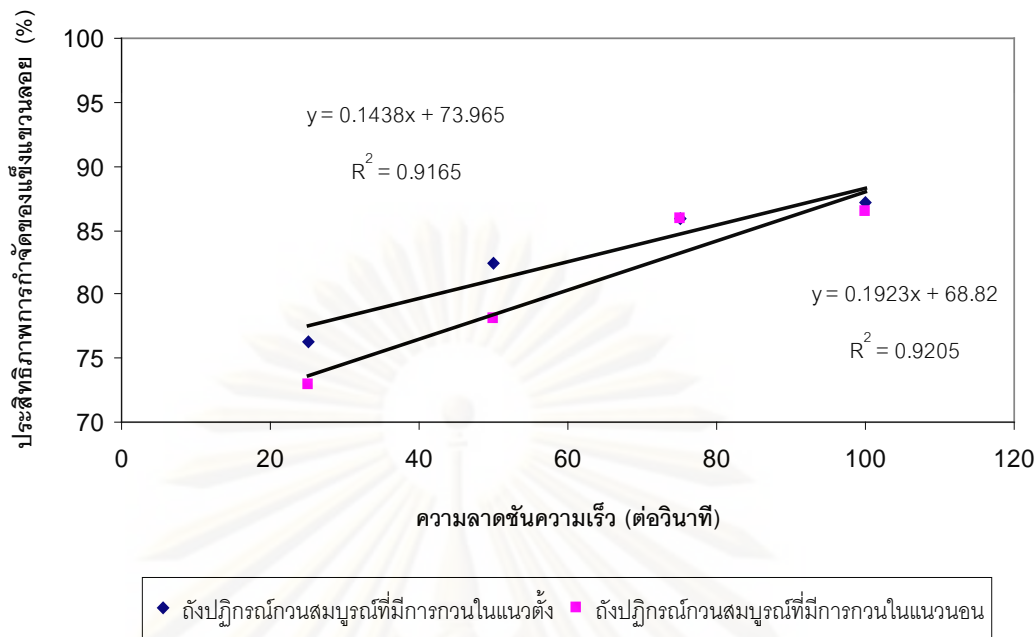
จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ความลาดชันความเร็วต่างๆพบว่า ทั้งในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน เมื่อความลาดชันความเร็วเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นตามความลาดชันความเร็วเช่นกัน โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Karim และคณะ (2005) และ Ndegwa และคณะ (2008) นั่นคือเมื่อภายในถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดเท่ากันมีความปั่นป่วนหรือการผสมผสานของเหลวอย่างรุนแรงขึ้นพบว่าสามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดได้สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณที่มีแนวระนาบการกวนแตกต่างกันคือการกวนในแนวตั้งและการกวนในแนวนอน ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของแข็งแขวนลอยแสดงดังรูปที่ 4.16 โดยเมื่อจับคู่เปรียบเทียบผลของแนวระนาบของการกวนต่อประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งที่ความลาดชันความเร็วเท่ากันโดยใช้สถิติพบว่าที่ความลาดชันความเร็ว 25 วินาที การกวนในแนวตั้งมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่าการกวนในแนวนอน ส่วนที่ 50 75 และ 100 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



**หมายเหตุ** - อักษรบนกราฟซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความลาดชันความเร็ว  
- อักษรบนกราฟขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลว

**ภาพที่ 4.16** ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของแข็งแขวนลอยเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวน สมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ

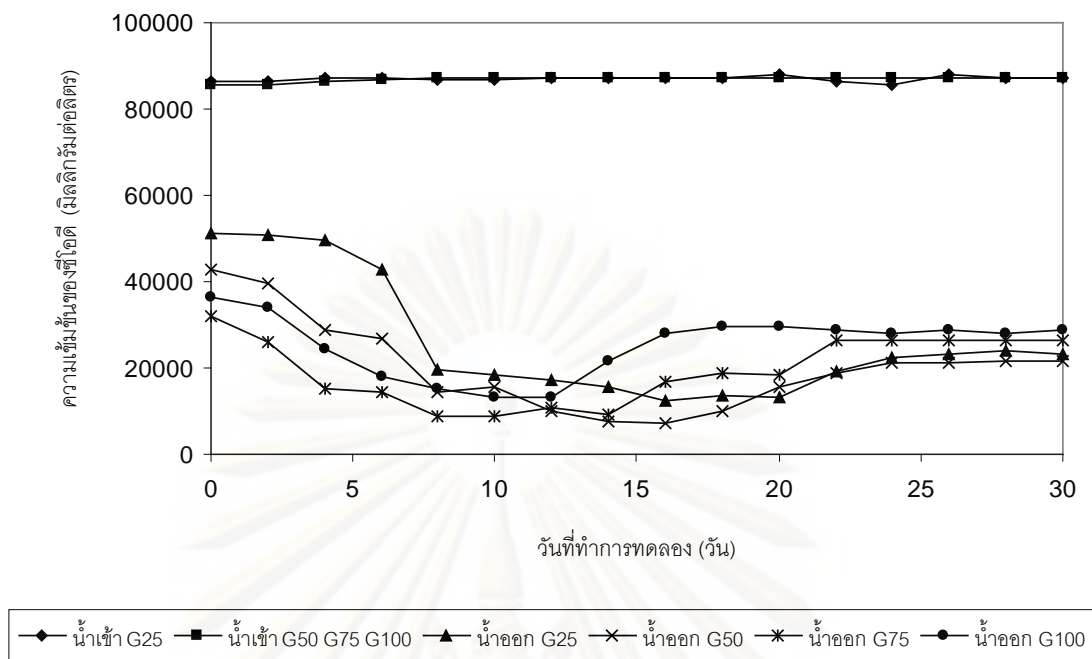
จากผลการทดลองในส่วนประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ความลาดชันความเร็วต่างๆดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นคือ เมื่อเพิ่มความลาดชันความเร็วพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นตามความลาดชันความเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ใช้ใบกวนแบบใบพายสำหรับกวนน้ำเสีย เพื่อให้เกิดการผสมผสานระหว่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองกับเชื้อจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ โดยความลาดชันความเร็วที่เพิ่มขึ้นมีส่วนทำให้เกิดแรงเฉือน (Shear force) ขึ้นระหว่างน้ำเสียที่ใช้ในการบำบัดกับใบกวนที่ใช้ในการกวนน้ำเสีย โดยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับความลาดชันความเร็วภายในถังปฏิกรณ์ (Sanchez Perez และคณะ, 2006) แรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นมีส่วนทำให้ของแข็งแขวนลอยอนุภาคใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียแตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆมากขึ้น เมื่ออนุภาคที่ใหญ่ๆเหล่านี้แตกออกเป็นอนุภาคเล็กๆก็จะทำให้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ภายในระบบย่อยแบบไร้อากาศสามารถสลายได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น เมื่อนำประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีแนวระนาบการกวนทั้งสองแบบกับความลาดชันความเร็วมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ พบว่า ได้ความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 4.17 โดยในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้คือ  $y = 0.1438x + 73.965$  ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนน้ำเสียในแนวนอนสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้คือคือ  $y = 0.192x + 68.82$



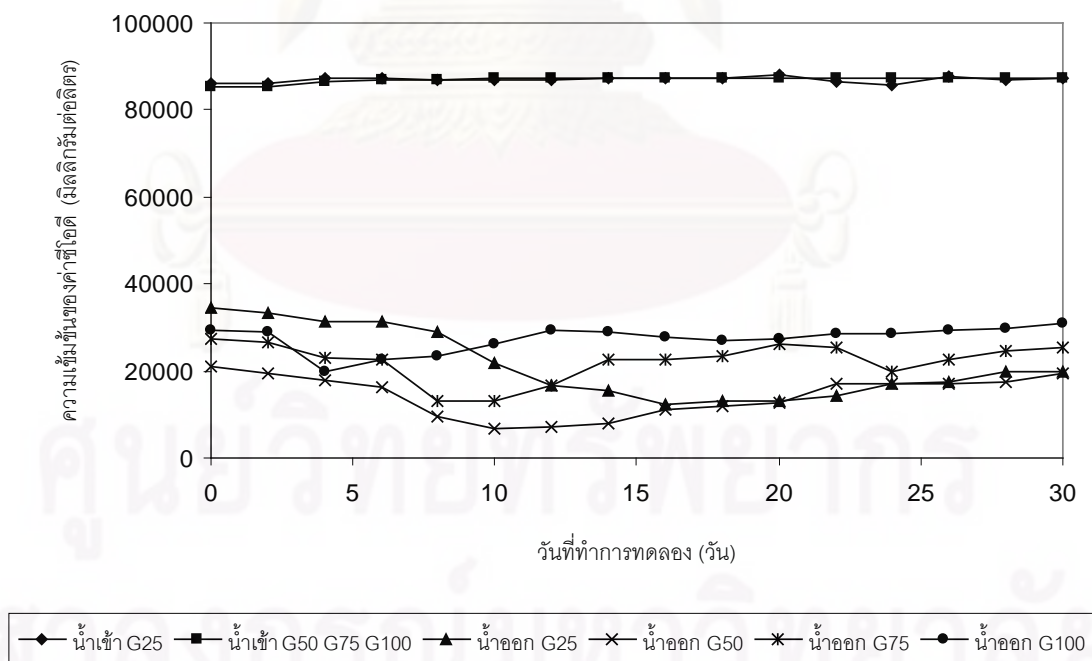
ภาพที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยกับความลาดชันความเร็วในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน

#### 4.1.4 ผลของความลาดชันความเร็วต่อการกำจัดซีโอดี

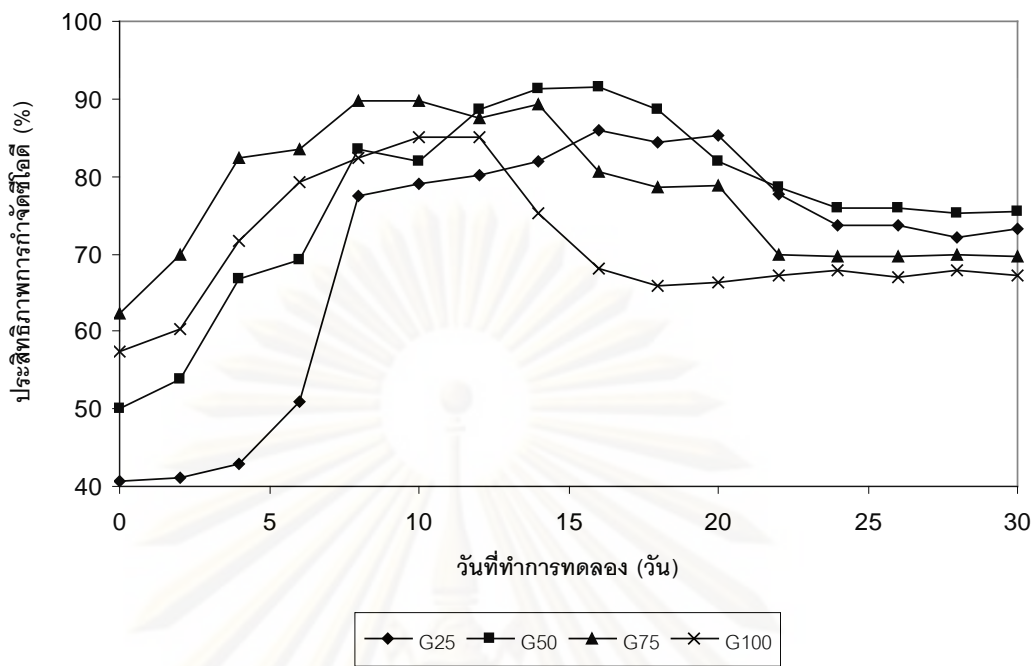
ผลการทดลองการกำจัดซีโอดีด้วยถังปฏิกรณ์กวนผสมในแนวตั้งและแนวนอน แสดงดังรูปที่ 4.18 4.19 4.20 และ 4.21 โดยในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้ง พบว่า ที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ย เป็น  $70.01 \pm 16.67$   $76.00 \pm 12.29$   $77.56 \pm 8.96$  และ  $70.85 \pm 8.26$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยที่ ความลาดชันความเร็ว 50 ต่อวินาที ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเป็น 91.55 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อ เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลโดยใช้สถิติพบว่าที่ทุกๆความลาดชันความเร็วที่ใช้ในการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความ เชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอนพบว่า ที่ความลาด ชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเป็น  $75.56 \pm 9.21$   $81.75 \pm 7.03$   $74.45 \pm 5.17$  และ  $68.56 \pm 3.43$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยที่ความลาดชันความเร็ว 50 ต่อวินาที วันที่ 10 ของการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุดคือ 92.04 เปอร์เซ็นต์ และ เมื่อเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลโดยใช้สถิติพบว่าที่ความลาดชัน ความเร็ว 50 ต่อวินาทีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดรองลงมาคือที่ 25 และ 75 ต่อวินาที ซึ่งมีประสิทธิภาพ ไม่แตกต่างกันส่วนที่ 100 ต่อวินาที มีประสิทธิภาพต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปริมาณซีโอดีเฉลี่ยในน้ำเสียที่เข้าและออกจากระบบแสดงดังตาราง 4.3



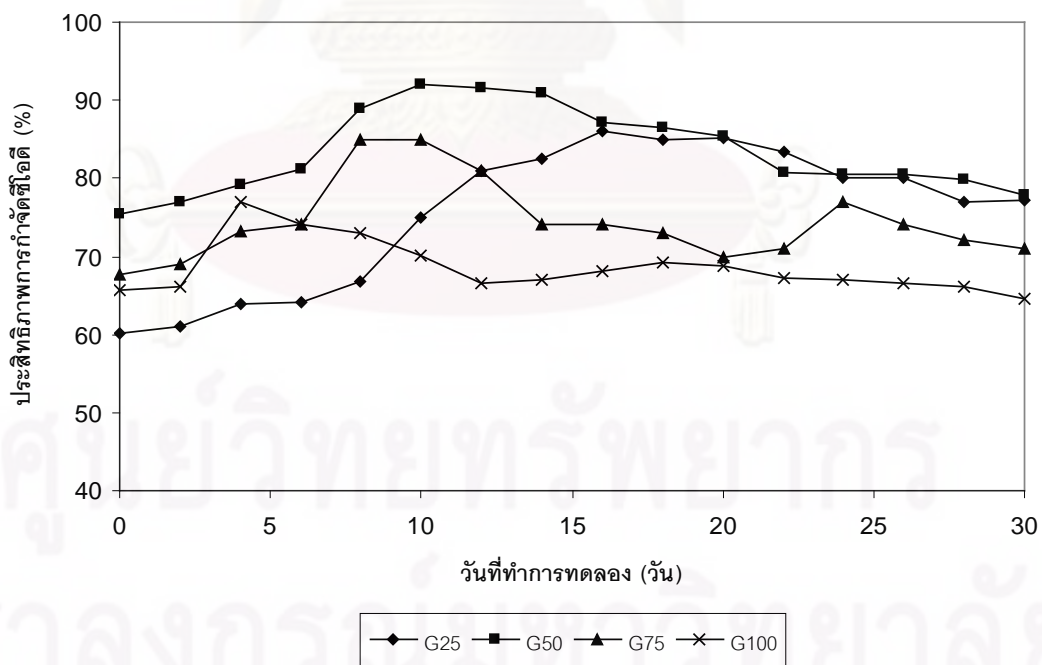
ภาพที่ 4.18 ความเข้มข้นของค่าซีโอดีกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



ภาพที่ 4.19 ความเข้มข้นของค่าซีโอดีกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน



ภาพที่ 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



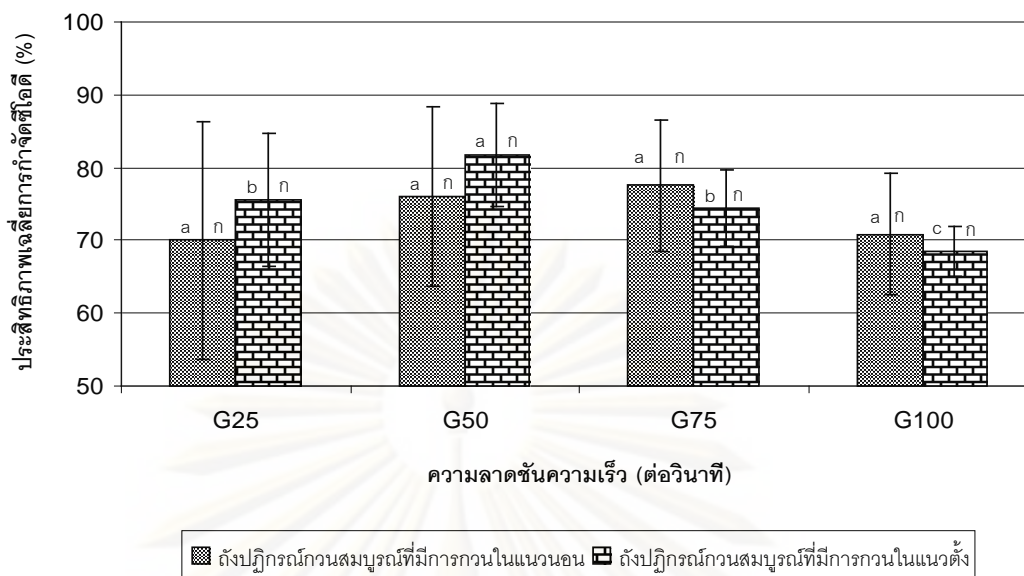
ภาพที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน

ตารางที่ 4.3 ปริมาณเฉลี่ยของค่าซีไอดีในน้ำที่เข้าระบบและน้ำที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีของระบบที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ

ความลาดชัน ความเร็วในถัง ปฏิกรณ์(ต่อวินาที)	ปริมาณเฉลี่ยค่าซีไอดี		ประสิทธิภาพเฉลี่ย การกำจัดซีไอดีของ ระบบ(%)
	น้ำเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
ถังกวนแนวตั้ง			
G25	87,022.13±579.63	22,483.21±14,074.35	<sup>a</sup> 70.01±16.67 <sup>n</sup>
G50	87,024.17±490.84	19,314.93±9,155.40	<sup>a</sup> 76.00±12.29 <sup>n</sup>
G75	87,024.17±490.84	17,384.29±6,784.78	<sup>a</sup> 77.56±8.96 <sup>n</sup>
G100	87,024,17±490.84	24,351.57±6,705.65	<sup>a</sup> 70.85±8.26 <sup>n</sup>
ถังกวนแนวนอน			
G25	87,022.13±579.63	20,360.04±7,381.97	<sup>b</sup> 75.56±9.21 <sup>n</sup>
G50	87,024.17±490.84	15,503.14±6,140.10	<sup>a</sup> 81.75±7.03 <sup>n</sup>
G75	87,024.17±490.84	21,837,37±4,336.09	<sup>b</sup> 74.45±5.17 <sup>n</sup>
G100	87,024,17±490.84	27,201.16±3,051.00	<sup>c</sup> 68.56±3.43 <sup>n</sup>

หมายเหตุ - อักษรมุมบนซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความลาดชันความเร็ว  
- อักษรมุมบนขวามือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ระหว่างแนวการกวนของเหลวในถัง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกับผลการทดลองด้วยระบบอื่นๆที่ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเช่นเดียวกันพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีโดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณทั้งที่กวนในแนวตั้งและแนวนอนยกเว้นที่ความลาดชันความเร็ว 50 ต่อวินาทีในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีได้ต่ำกว่าการทดลองโดยใช้ระบบผสม HUSB และ UASB (จิรวรรณ ออตยกุล, 2549) ทั้งนี้เนื่องจากในระบบการบำบัดน้ำเสียแบบผสมหรือแบบสองขั้นตอนนี้ถือเป็นการทำงานแบบ 2 เฟส ทำให้สามารถควบคุมพีเอชในกระบวนการสร้างแก๊สมีเทนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ดีกว่า ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีได้สูงกว่าแบบเฟสเดียว และเมื่อนำประสิทธิภาพของการกำจัดซีไอดีของถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณที่มีการกวนในแนวนอนและแนวตั้งมาเปรียบเทียบกันแสดงดังรูปที่ 4.22 โดยเมื่อจับคู่เปรียบเทียบผลของแนวระนาบของการกวนต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่ความลาดชันความเร็วเท่ากันโดยใช้สถิติพบว่าที่ทุกๆ ความลาดชันความเร็วที่ใช้ในการทดลองถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

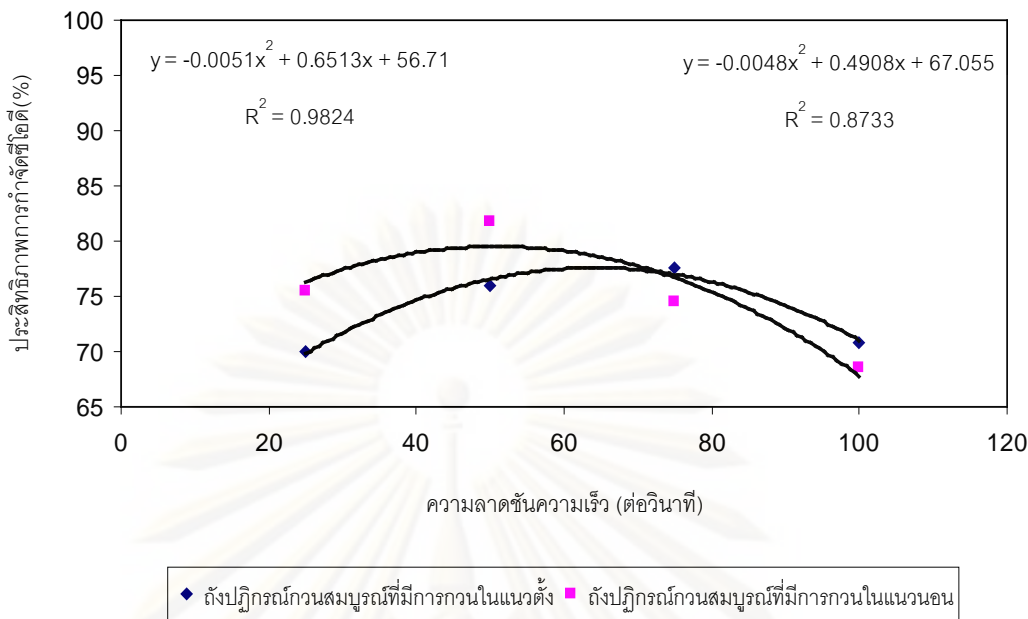


**หมายเหตุ** - อักษรบนกราฟซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความลาดชันความเร็ว  
- อักษรบนกราฟขวามือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลว

**ภาพที่ 4.22** ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดค่าซีโอดีเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวอนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ

จากผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ความลาดชันความเร็วต่างๆปัจจัยหนึ่งที่มีผลให้การกำจัดซีโอดีสำหรับการทดลองในครั้งนี้คือการกวน เนื่องจากการกวนน้ำเสียให้สัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์ทำให้การย่อยสลายเกิดได้ทั่วถึงขึ้น แต่การกวนในระดับที่สูงเกินไปส่งผลลบต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างแก๊สมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียให้กลายเป็นแก๊สมีเทนปลดปล่อยออกจากระบบ ดังนั้นเมื่อแบคทีเรียดังกล่าวลดจำนวนลงการกำจัดซีโอดีก็ย่อมเกิดต่ำลงเช่นกัน และเมื่อนำประสิทธิภาพของการกำจัดซีโอดีที่ได้มาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์กับความลาดชันความเร็วที่ พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นกราฟพาราโบลาคว่ำ สามารถแสดงดังรูปที่ 4.23 โดยในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งได้สมการความสัมพันธ์ คือ  $y = -0.0051x^2 + 0.6513x + 56.71$  ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวอนได้สมการความสัมพันธ์คือ  $y = -0.0048x^2 + 0.4906x + 67.055$  จากสมการเมื่อคำนวณหาจุดสูงสุดของกราฟเพื่อหาความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมและประสิทธิภาพที่สามารถกำจัดซีโอดีที่เกิดขึ้นได้สูงสุด พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมที่สุดคือ 63 ต่อวินาที สามารถกำจัดซีโอดีสูงสุด 77.49 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวอนพบว่าความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมที่สุดคือ 51 ต่อวินาที สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันได้สูงสุด 79.54 เปอร์เซ็นต์

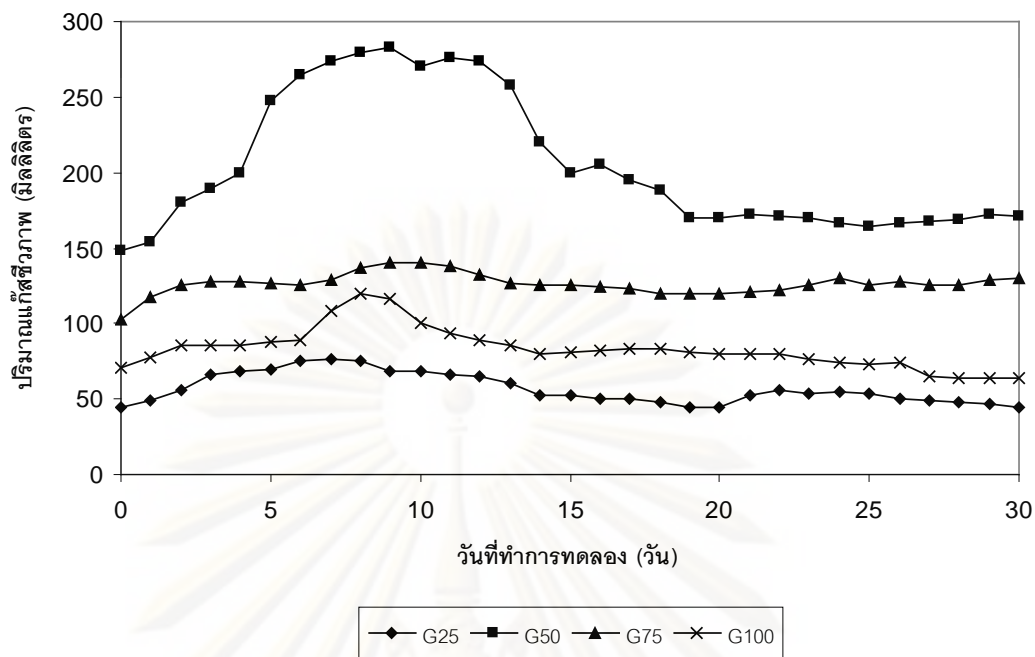




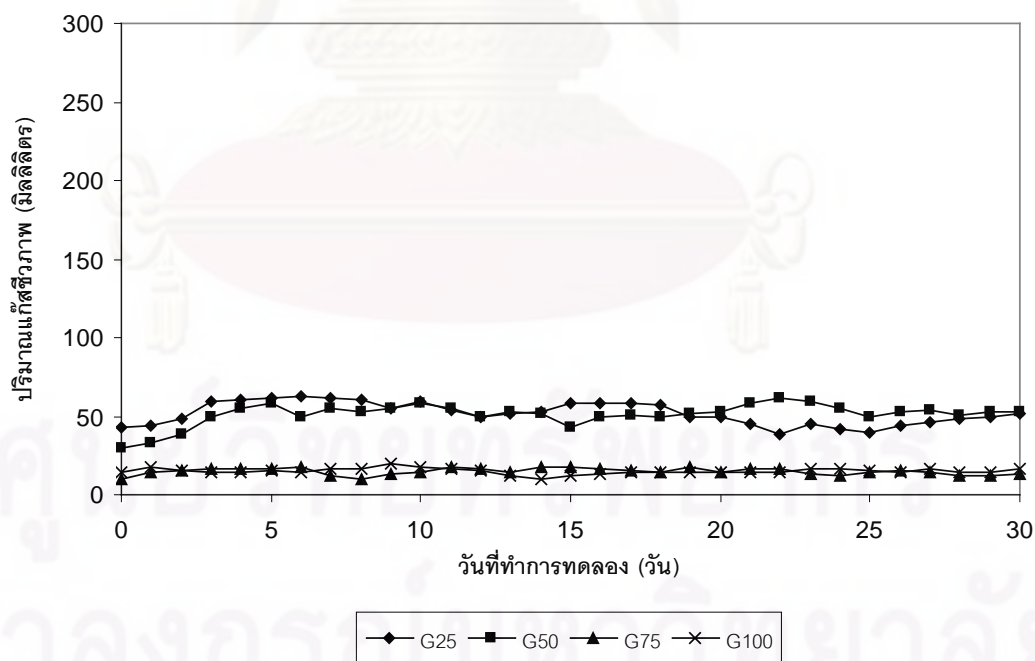
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของประสิทธิผลการกำจัดซีไอดีกับความลาดชันความเร็วในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน

#### 4.1.5 ผลของความลาดชันความเร็วต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ

สำหรับปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้จากการทดลองเดินระบบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอน แสดงดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 สำหรับในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งพบว่าที่ความลาดชันความเร็วเป็น 50 ต่อวินาที สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุดในวันที่ 10 ของการทดลองโดยสามารถผลิตได้ 283 มิลลิลิตรต่อวันและเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลโดยใช้สถิติพบว่า ที่ความลาดชันความเร็ว 50 ต่อวินาที สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุดรองลงมาคือที่ความลาดชันความเร็ว 75 100 และ 25 ต่อวินาทีตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอนพบว่าปริมาณแก๊สชีวภาพที่สามารถผลิตได้สูงสุดคือปริมาณ 62 มิลลิลิตรต่อวัน โดยเกิดขึ้นในวันที่ 7 ของการทดลองและเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูลโดยใช้สถิติพบว่า ที่ความลาดชันความเร็วกลุ่ม 25 และ 50 ต่อวินาทีซึ่งสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ปริมาณไม่แตกต่างกันสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากกว่าที่ความลาดชันความเร็วกลุ่ม 75 และ 100 ต่อวินาทีซึ่งผลิตแก๊สชีวภาพได้ปริมาณไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปริมาณแก๊สชีวภาพโดยเฉลี่ยที่ความลาดชันความเร็วต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.24 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



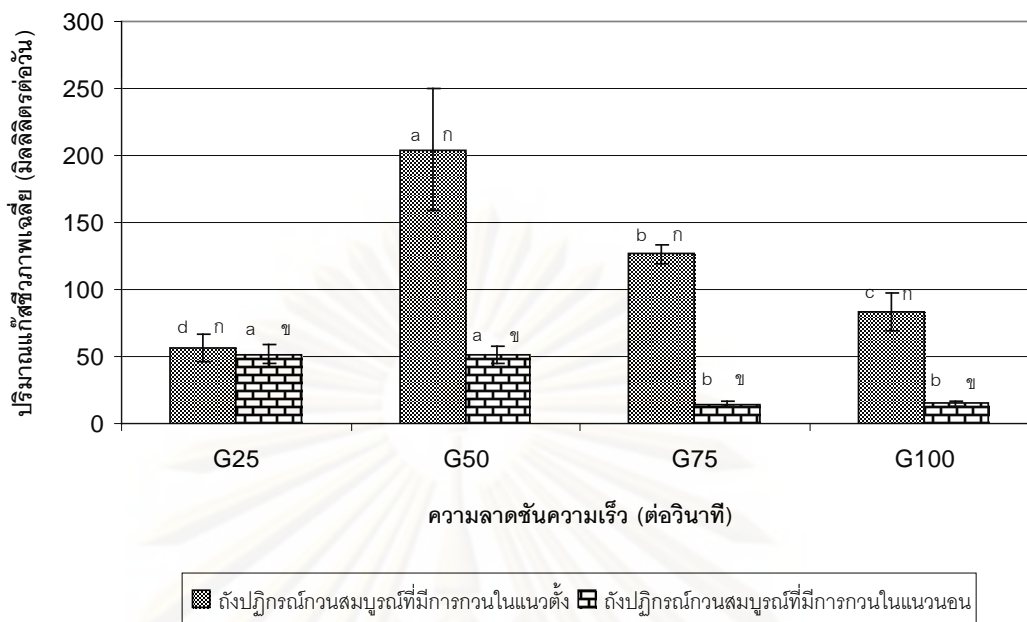
ภาพที่ 4.25 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นกับวันที่ทำการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน

ตารางที่ 4.4 ปริมาณเฉลี่ยของแก๊สชีวภาพที่ระบบสามารถผลิตได้ตลอดการทดลองที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ

ความลาดชันความเร็วในถังปฏิกรณ์กวน สมบูรณ์(ต่อวินาที)	ปริมาณแก๊สชีวภาพเฉลี่ย (มิลลิลิตรต่อวัน)
ถังกวนแนวตั้ง	
G25	<sup>d</sup> 56.77±10.07 <sup>n</sup>
G50	<sup>a</sup> 204.39±45.35 <sup>n</sup>
G75	<sup>b</sup> 126.45±7.09 <sup>n</sup>
G100	<sup>c</sup> 83.13±13.61 <sup>n</sup>
ถังกวนแนวนอน	
G25	<sup>a</sup> 51.74±7.09 <sup>n</sup>
G50	<sup>a</sup> 51.32±6.84 <sup>n</sup>
G75	<sup>b</sup> 14.61±2.28 <sup>n</sup>
G100	<sup>b</sup> 14.84±1.98 <sup>n</sup>

หมายเหตุ - อักษรมุมบนซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความลาดชันความเร็ว  
- อักษรมุมบนขวามือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลวในถัง

สำหรับปริมาณแก๊สชีวภาพที่สามารถผลิตได้นั้นเมื่อนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับปริมาณซีไอดีที่ถูกกำจัดตั้งสมการที่ 2.10 ถือว่ามีค่าน้อยกว่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียโดยการใช้ออกซิเจนในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ในครั้งนี้ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมีไขมันและน้ำมันละลายอยู่ในปริมาณมาก ประกอบกับมีของแข็งแขวนลอยปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง เมื่อมีการปรับสภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งกลายเป็นสารประกอบจำพวกสบู่ขึ้น และเมื่อน้ำเสียดังกล่าวเข้าสู่ถังปฏิกรณ์และกวนน้ำเสียด้วยใบพัดจะทำให้เกิดฟองโดยฟองที่เกิดขึ้นจะแข็งตัวเคลือบที่ผิวหน้าของถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ทำให้แก๊สชีวภาพที่ระบบสามารถผลิตได้ถูกปลดปล่อยออกมาได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น เมื่อนำปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีแนวระนาบการกวนทั้งสองแบบมาเปรียบเทียบกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.26 โดยเมื่อจับคู่เปรียบเทียบผลของแนวระนาบของการกวนต่อปริมาณแก๊สชีวภาพที่ระบบสามารถผลิตได้ที่ความลาดชันความเร็วเท่ากันโดยใช้สถิติพบว่าที่ทุกๆความลาดชันความเร็วที่ใช้ในการทดลอง ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงกว่าถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

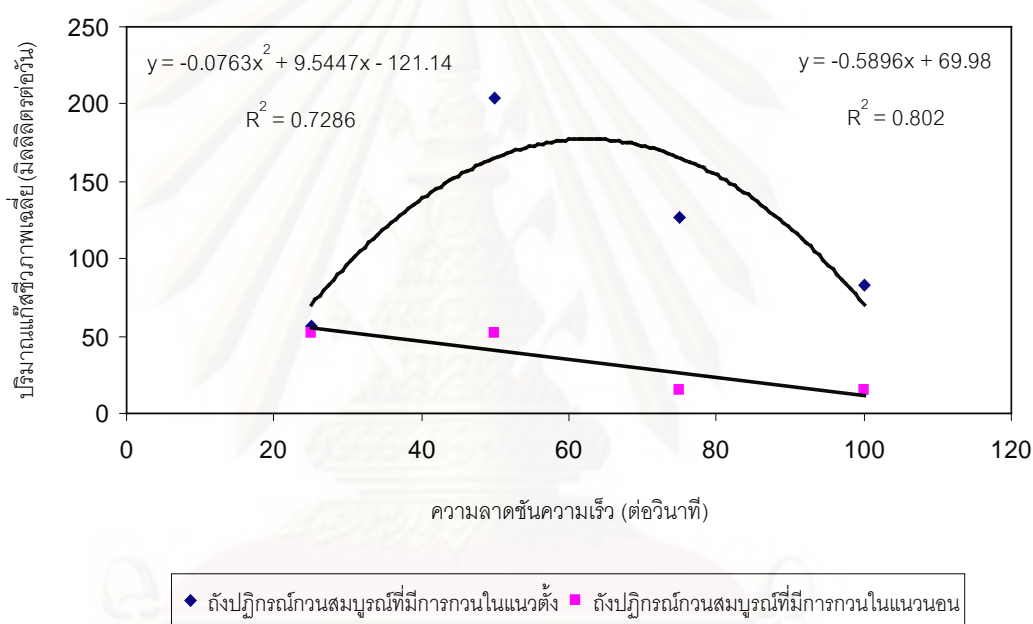


**หมายเหตุ** - อักษรบนกราฟซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความลาดชันความเร็ว  
- อักษรบนกราฟขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลว

**ภาพที่ 4.26** ประสิทธิภาพเฉลี่ยปริมาณแก๊สชีวภาพเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนผสมรูปที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ

สำหรับปริมาณแก๊สชีวภาพที่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังปฏิกรณ์กวนผสมรูปสามารถผลิตได้ในครั้งนี้พบว่า ในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงกว่าในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอนที่ทุกๆความลาดชันความเร็ว ดังที่ได้เปรียบเทียบโดยใช้สถิติไปแล้ว เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้กับปริมาณของฟองและความหนาแน่นของสบู่อะไรก็ตามที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์กวนผสมรูปพบว่า มีความสัมพันธ์กัน โดยในถังปฏิกรณ์กวนผสมรูปที่มีการกวนในแนวตั้ง พบว่าปริมาณฟองและคราบสบู่ที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของถังมีปริมาณน้อยกว่าในถังปฏิกรณ์กวนผสมรูปที่มีการกวนในแนวนอน เนื่องจากการกวนในแนวตั้งทิศทางของการหมุนของใบกวนจะเป็นแบบหมุนขึ้นบนและลงล่าง ในตำแหน่งของการหมุนขึ้นด้านบนของใบกวนซึ่งอยู่ใกล้บริเวณผิวหน้าของถังปฏิกรณ์มากกว่าการกวนในแนวนอน สามารถทำลายฟองและคราบสบู่ที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของถังปฏิกรณ์กวนผสมรูปได้ และเมื่อความลาดชันความเร็วเพิ่มขึ้นพบว่าปริมาณฟองและคราบสบู่เกิดเพิ่มขึ้นตามความลาดชันความเร็ว แสดงว่ามีสารอินทรีย์ส่วนหนึ่งกลายเป็นสารประกอบจำพวกสบู่แทนที่จะเป็นแก๊สมีเทน นอกจากนี้แล้วฟองและคราบสบู่ดังกล่าวมีส่วนทำให้ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์กวนผสมรูปถูกปลดปล่อยออกมาน้อยลง (Gomec, 2006) นอกจากนี้ปัจจัยของปริมาณฟองและคราบสบู่ที่เกิดขึ้นที่ผิวของถังปฏิกรณ์

กวนสมบรูณ์ที่มีส่วนทำให้เกิดก๊าซชีวภาพเกิดได้น้อยลงแล้ว การกวนอย่างต่อเนื่องภายในถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์ก็มีส่วนทำให้การผลิตแก๊สมีเทนเกิดได้น้อยลงเช่นกัน (Karim และคณะ, 2005) เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นกับความลาดชันความเร็วภายในถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 4.27 สำหรับถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งพบว่าได้ความสัมพันธ์เป็นกราฟพาราโบลาคว่ำที่สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ คือ  $y = -0.0763x^2 + 9.544x - 121.14$  ส่วนในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอนพบว่าได้ความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้คือ  $y = -0.5896x + 69.98$

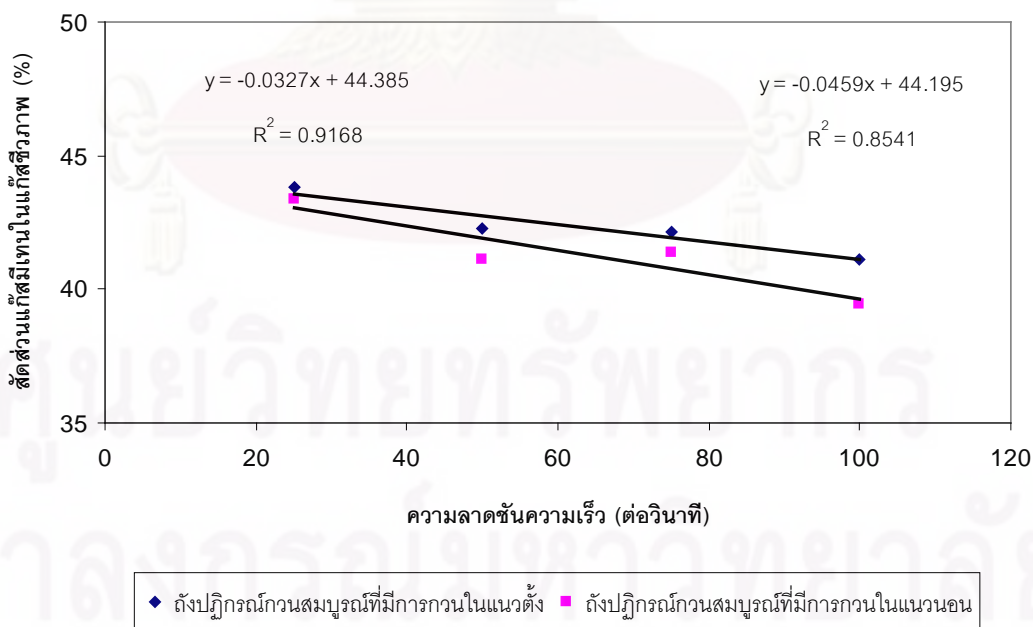


ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของปริมาณแก๊สชีวภาพเฉลี่ยกับความลาดชันความเร็วในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน

#### 4.1.6 ผลของความลาดชันความเร็วต่อสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ

ผลการทดลองสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งพบว่าที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาที สัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพเป็น 43.79 42.30 42.16 และ 41.11 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนภายในถังปฏิกรณ์กวนสมบรูณ์ที่มีการกวนในแนวนอนพบว่าที่ความลาดชันความเร็ว 25 50 75 และ 100 ต่อวินาทีมี สัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพเป็น 43.36 41.42 41.38 และ 39.45 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพทั้งในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนใน

แนวตั้งและแนวนอนพบว่า ค่าที่ได้สอดคล้องกับพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบ โดยที่ความลาดชันความเร็ว 25 และ 50 พีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบตลอดการทดลองมีค่าสูงกว่า 6.5 ซึ่งที่พีเอชดังกล่าวถือว่าแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ส่วนที่ความลาดชันความเร็วสูงขึ้นไปพบว่ามีบางช่วงของการทดลองที่พีเอชของระบบลดต่ำกว่า 6.5 ซึ่งถือว่าที่พีเอชดังกล่าวแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ดังนั้นสัดส่วนแก๊สมีเทนที่ได้จึงต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่สมบูรณ์พบว่าค่าสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพที่ได้มีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากผลของการเพิ่มความลาดชันความเร็วที่มากขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างสูงขึ้น จนทำให้บีโพรของระบบต่ำลงเป็นสาเหตุให้พีเอชของระบบลดต่ำลงจนถึงจุดที่แบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนไม่สามารถเจริญเติบโตอยู่ได้ส่งผลให้สัดส่วนแก๊สมีเทนที่ได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้แล้วการกวนอย่างต่อเนื่องและตลอดเวลายังส่งผลให้สัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพลดน้อยลงได้อีกด้วย (Chaoui และRichard, 2008) และเมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพกับความลาดชันความเร็วแสดงดังรูปที่ 4.28 พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งได้กราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง สมการแสดงความสัมพันธ์คือ  $y = -0.0327x + 44.385$  ส่วนในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีการกวนในแนวนอนพบว่ากราฟความสัมพันธ์ที่ได้เป็นกราฟเส้นตรงเช่นกัน สมการแสดงความสัมพันธ์ คือ  $y = -0.0459x + 44.195$



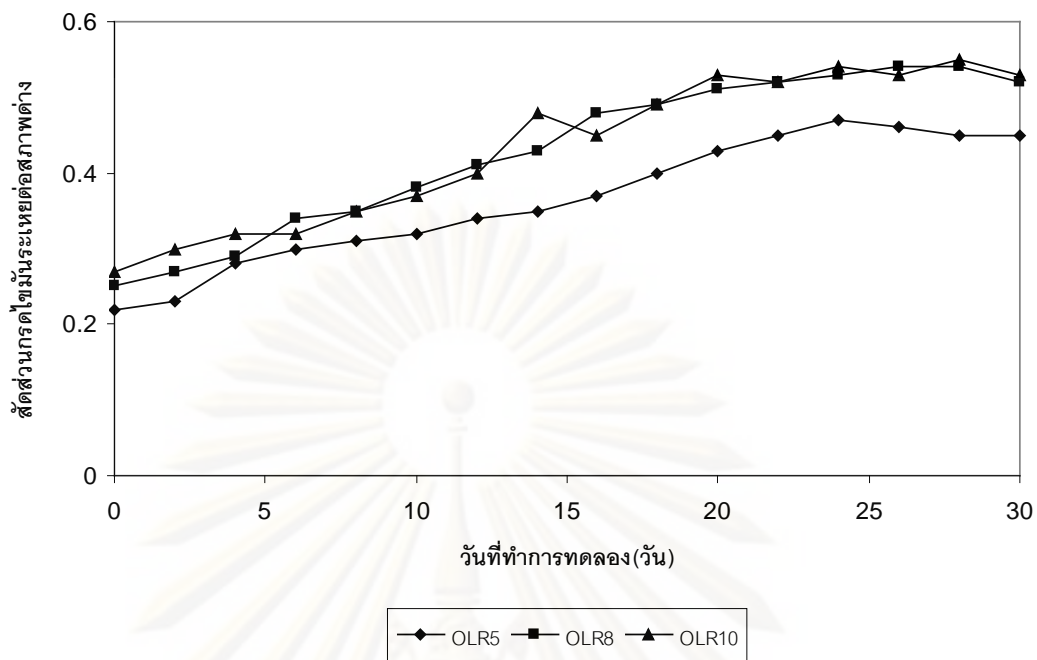
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์สัดส่วนแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพกับความลาดชันความเร็วในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอน

## 4.2 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองตอนที่ 2 การศึกษาเพื่อหาค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม

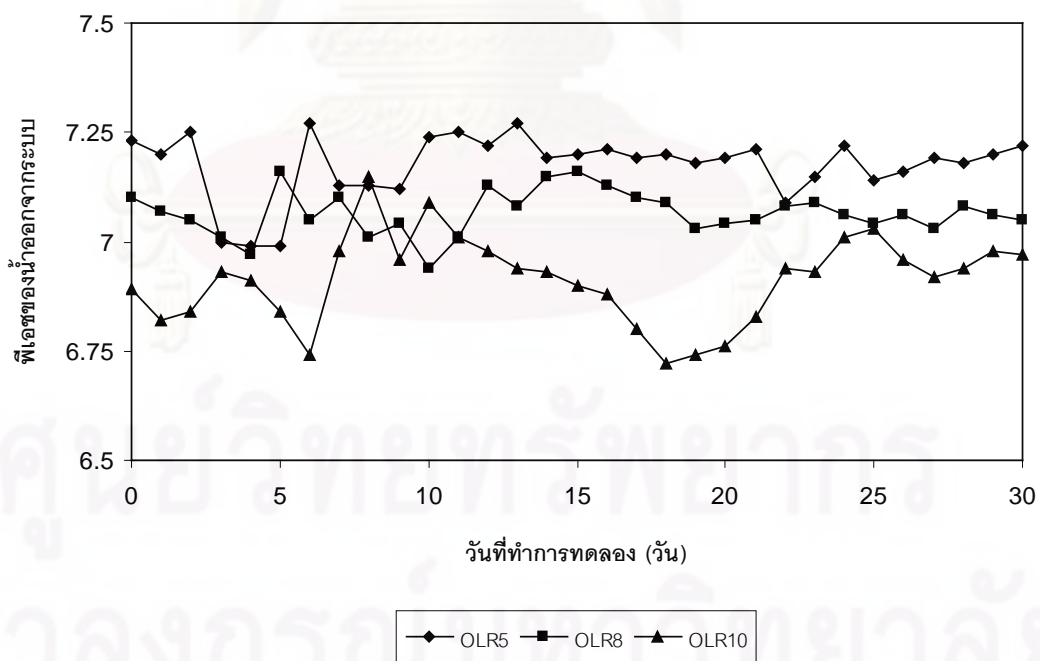
### 4.2.1 ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างและสภาพการปรับพีเอชของระบบ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในผลการทดลองตอนที่ 1 สำหรับความสำคัญของสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับพีเอชของน้ำเสีย ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างและพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งแสดงได้ดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 โดยทั้งสามอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีแนวโน้มของสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างค่อยเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ในวันที่ 20 ของการทดลอง โดยพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันมีสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างโดยเฉลี่ยต่ำสุดคือ  $0.37 \pm 0.08$  รองลงมาคือที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน คิดเป็น  $0.44 \pm 0.09$   $0.45 \pm 0.09$  ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาพีเอชของน้ำที่ออกจากระบบพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันมีพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบเป็น  $7.17 \pm 0.07$   $7.06 \pm 0.05$  และ  $6.91 \pm 0.10$  ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างและพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอนแสดงดังรูปที่ 4.31 และ 4.32 โดยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันมีสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างเป็น  $0.37 \pm 0.06$   $0.37 \pm 0.06$  และ  $0.41 \pm 0.06$  ตามลำดับ ส่วนพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีค่าเป็น  $7.35 \pm 0.03$   $7.28 \pm 0.04$  และ  $7.23 \pm 0.03$  ตามลำดับ

จะเห็นว่าในการทดลองตอนที่ 2 นี้ ทั้งในถัง ปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้ง และแนวนอนมีสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างต่ำกว่า 0.8 แสดงว่าระบบมีกำลังบำบัดพอเพียงพอในการในด้านทานการลดลงของพีเอช โดยจะเห็นว่าพีเอชของระบบตลอดการทดลองสูงกว่า 6.5 แสดงว่าเมื่อลดอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ลงจาก 12 เป็น 10 8 และ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน บัฟเฟอร์ของระบบทำงานได้ดีขึ้นดีขึ้น โดยระดับของพีเอชที่สูงกว่า 6.5 นี้ จะส่งผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดในส่วนของการผลิตแก๊สมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนเกิดขึ้นได้ดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนพบว่า ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เดียวกันถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอนมีสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้ง ส่งผลให้น้ำเสียที่ออกจากระบบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอน มีพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบสูงกว่าในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งที่ทุกๆอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

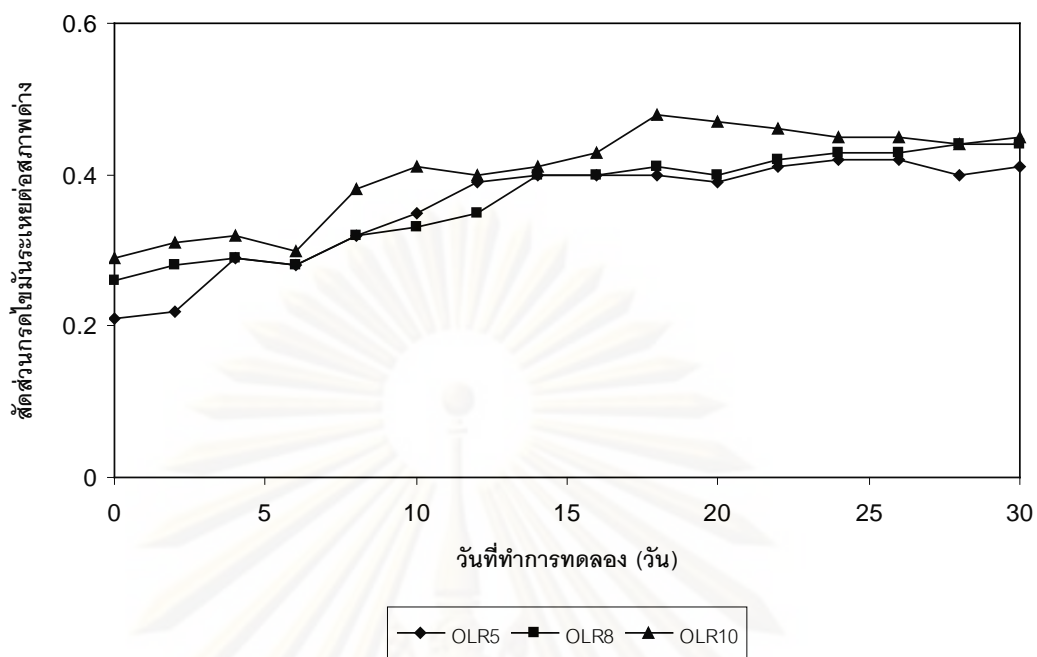


ภาพที่ 4.29 สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับวันที่ทำการทดลองที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง

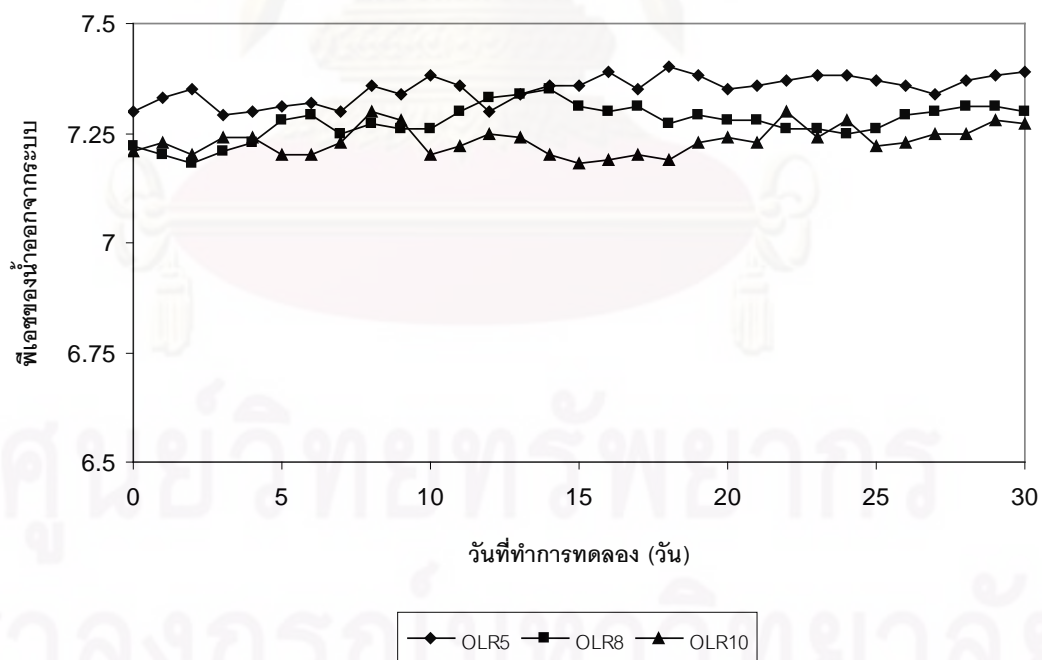


ภาพที่ 4.30 พีเอชของน้ำออกจากระบบกับวันที่ทำการทดลองที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง





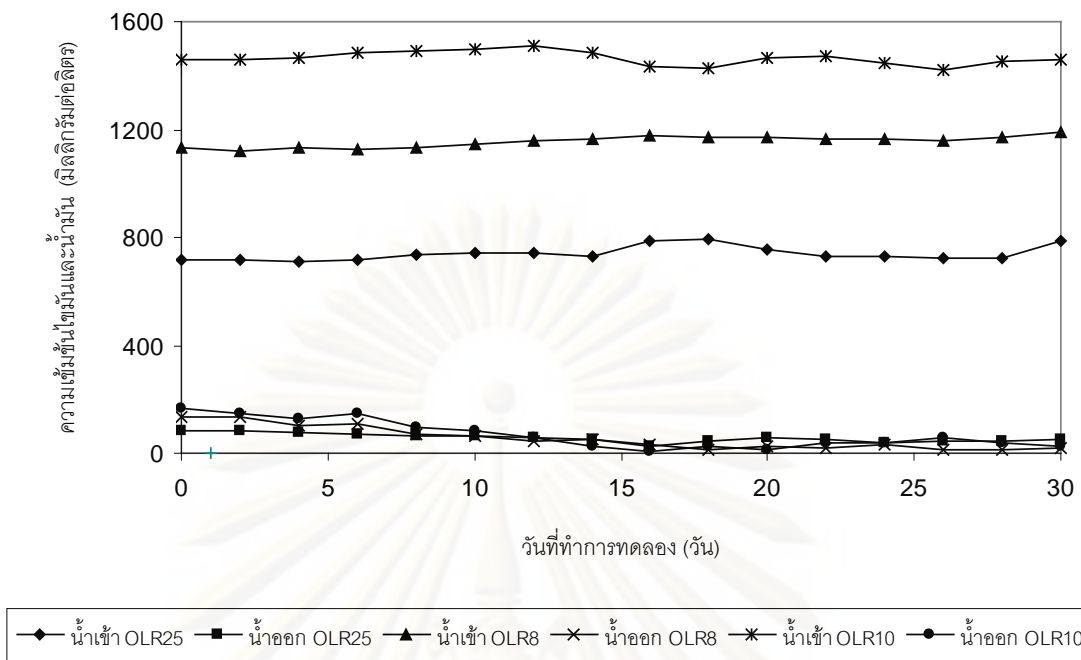
ภาพที่ 4.31 สัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน



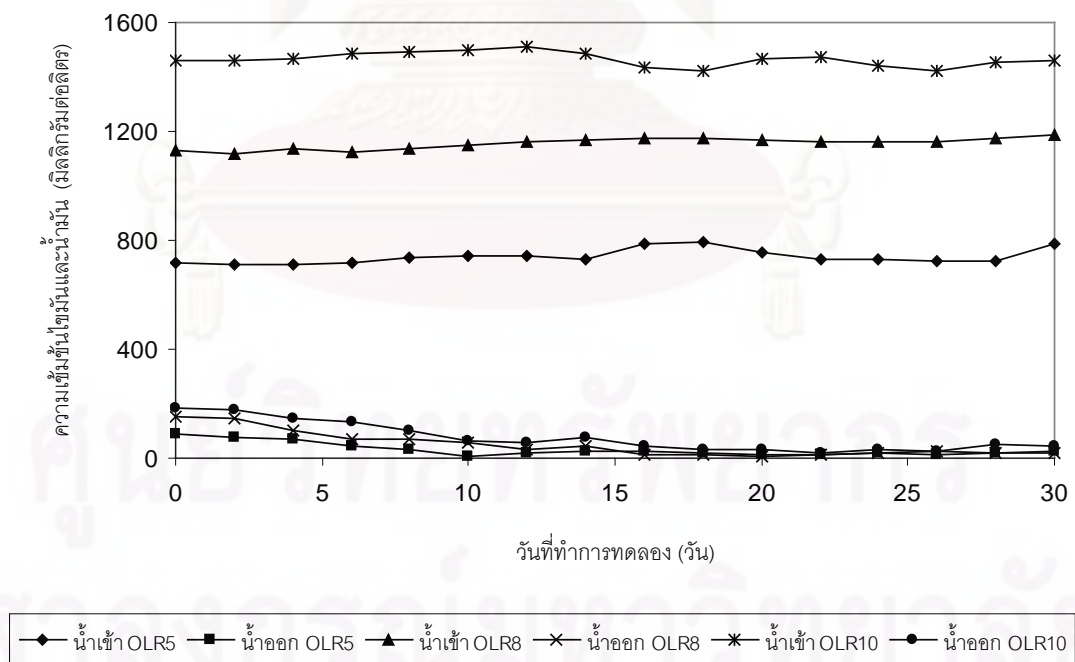
ภาพที่ 4.32 พีเอชของน้ำที่ออกจากระบบกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน

#### 4.2.2 ผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อการกำจัดไขมันและน้ำมัน

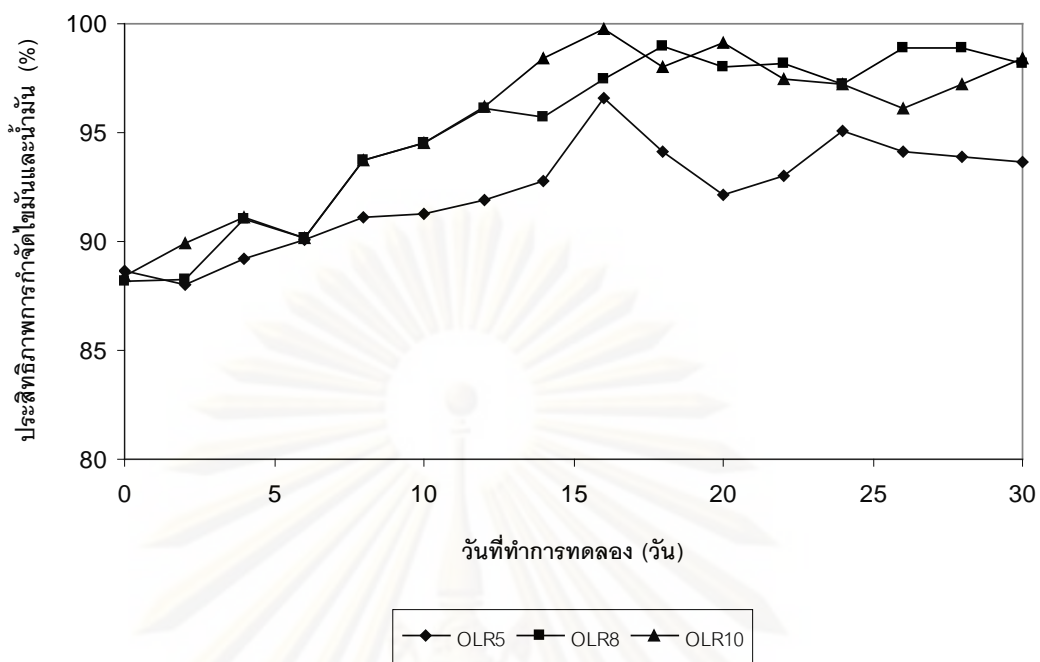
ผลการทดลองความเข้มข้นของไขมันและน้ำมันในน้ำที่เข้าและออกจากระบบ และประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์แสดงดังรูปที่ 4.33 4.34 4.35 และ 4.36 สำหรับในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งพบว่า วันที่ 16 ของการทดลองที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันได้สูงสุดคือ 99.77 เปอร์เซ็นต์ เมื่อระบบคงที่พบว่าที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดไขมันและน้ำมันเป็น  $92.23 \pm 2.41$   $95.22 \pm 3.84$  และ  $95.37 \pm 3.64$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆโดยใช้สถิติพบว่า ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันต่ำกว่าที่ 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน ซึ่งมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอนพบว่า วันที่ 20 ของการทดลองที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เป็น 8 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันได้สูงสุดคือ 99.22 เปอร์เซ็นต์ เมื่อระบบคงที่แล้วพบว่าที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันเฉลี่ยเป็น  $95.64 \pm 3.50$   $95.68 \pm 4.19$  และ  $94.84 \pm 3.77$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆโดยใช้สถิติพบว่า ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณไขมันและน้ำมันในน้ำเข้าและออกจากระบบแสดงดังตารางที่ 4.5 สำหรับประสิทธิภาพกำจัดไขมันและน้ำมันในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่ตั้งที่กล่าวไว้แล้วในผลการทดลองตอนที่ 1 นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรบับัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มระบบอื่นๆ พบว่าที่ทุกๆอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงกว่า เนื่องจากการทดลองครั้งนี้มีการกวนผสมน้ำเสียกับเชื้อจุลินทรีย์อย่างเหมาะสม ประกอบกับไขมันส่วนหนึ่งหายไปในช่วงขั้นตอนการปรับพีเอช เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไขมันในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอนและแนวตั้งที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เดียวกัน แสดงดังรูป 4.37 โดยใช้สถิติพบว่าที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน การกวนในแนวนอนมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงกว่าการกวนในแนวตั้ง ส่วนที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน พบว่าการกวนในแนวนอนและแนวตั้งในถังปฏิกรณ์กวนผสมมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



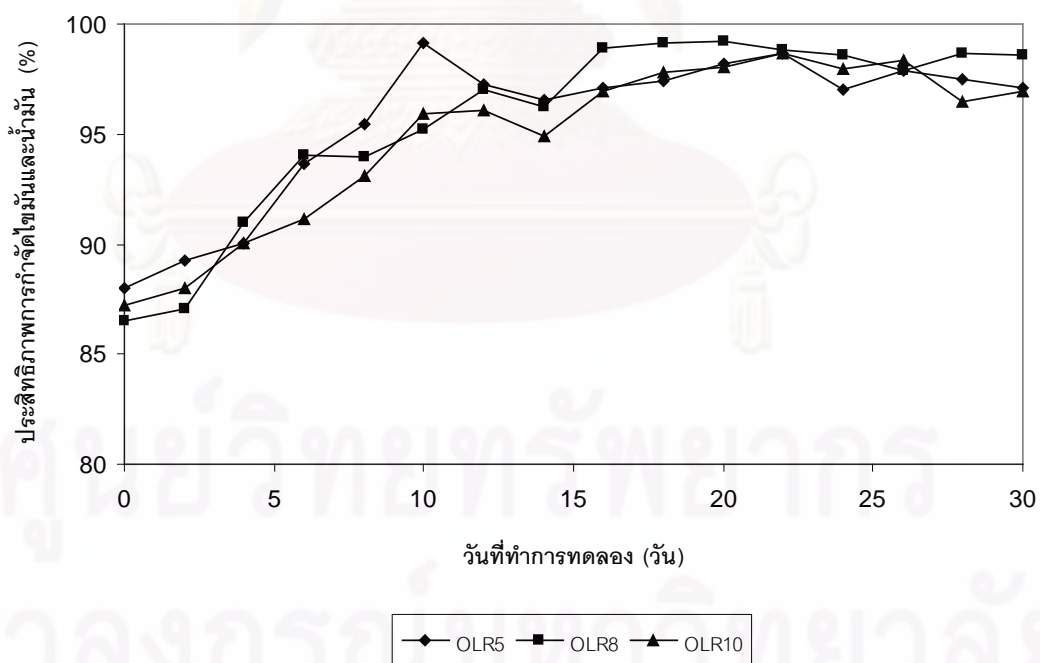
ภาพที่ 4.33 ความเข้มข้นไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



ภาพที่ 4.34 ความเข้มข้นไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน



ภาพที่ 4.35 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง

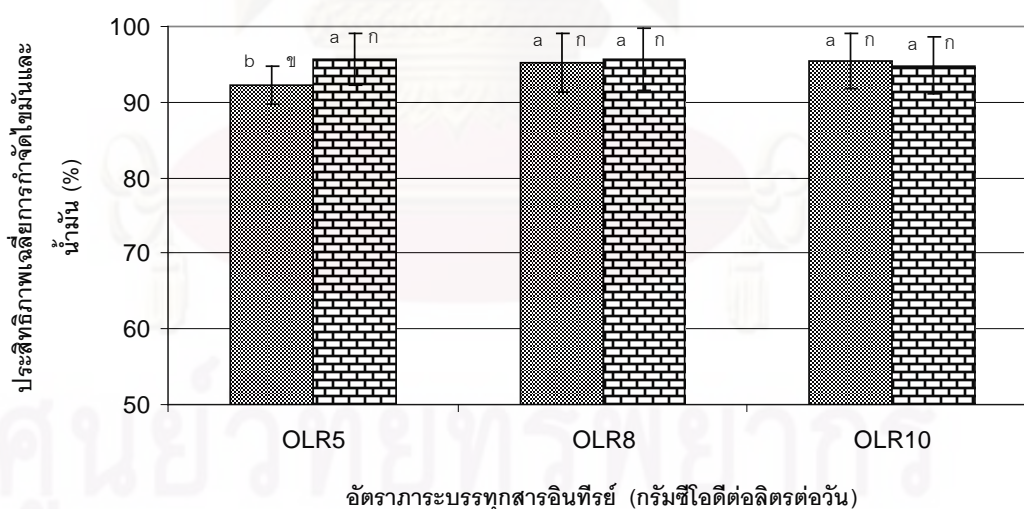


ภาพที่ 4.36 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน

ตารางที่ 4.5 ปริมาณเฉลี่ยของไขมันและน้ำมันในน้ำที่เข้าระบบและน้ำที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์(กรัมซีไอต่อลิตรต่อวัน)	ปริมาณเฉลี่ยไขมันและน้ำมัน		ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดไขมันและน้ำมัน(%)
	น้ำเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
ถึงกวนแนวตั้ง			
OLR5	741.73±27.52	55.50±15.85	<sup>b</sup> 92.23±2.41 <sup>¶</sup>
OLR8	1,157.27±20.13	49.28±38.75	<sup>a</sup> 95.22±3.84 <sup>¶</sup>
OLR10	1,465.07±26.28	61.34±47.98	<sup>a</sup> 95.37±3.64 <sup>¶</sup>
ถึงกวนแนวนอน			
OLR5	741.73±27.52	23.82±19.04	<sup>a</sup> 95.64±3.50 <sup>¶</sup>
OLR8	1,157.27±20.13	42.31±39.53	<sup>a</sup> 95.68±4.19 <sup>¶</sup>
OLR10	1,465.07±26.28	68.38±48.56	<sup>a</sup> 94.84±3.77 <sup>¶</sup>

หมายเหตุ - อักษรซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์  
- อักษรขวามือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลว



ถึงกวนแนวตั้ง (Solid) ถึงกวนแนวนอน (Hatched)

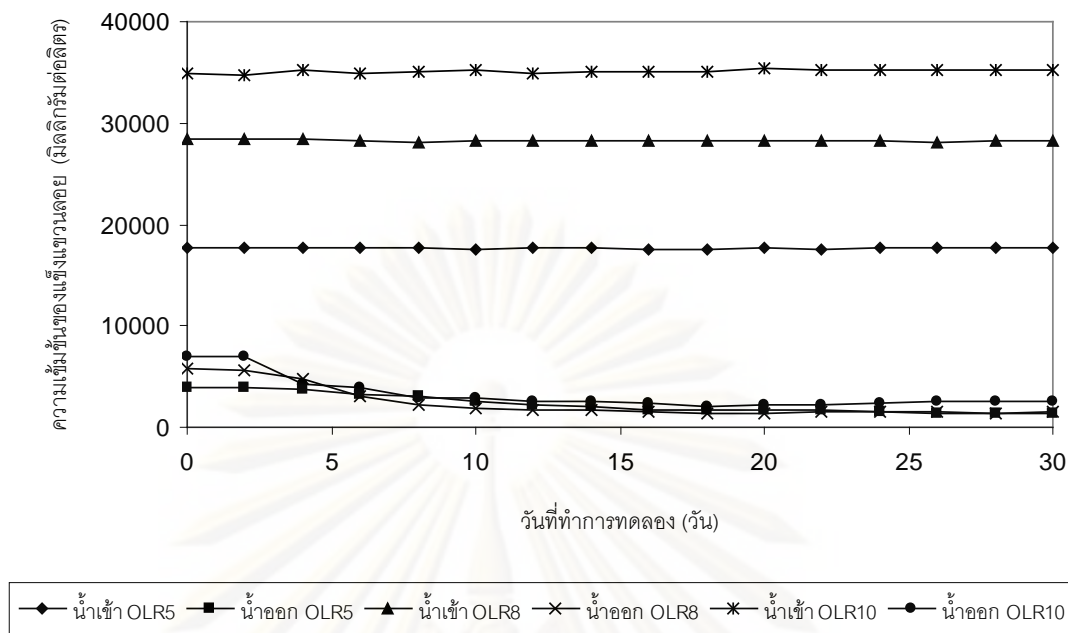
หมายเหตุ - อักษรซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์  
- อักษรขวามือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลว

ภาพที่ 4.37 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดไขมันและน้ำมันเปรียบเทียบในถึงปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

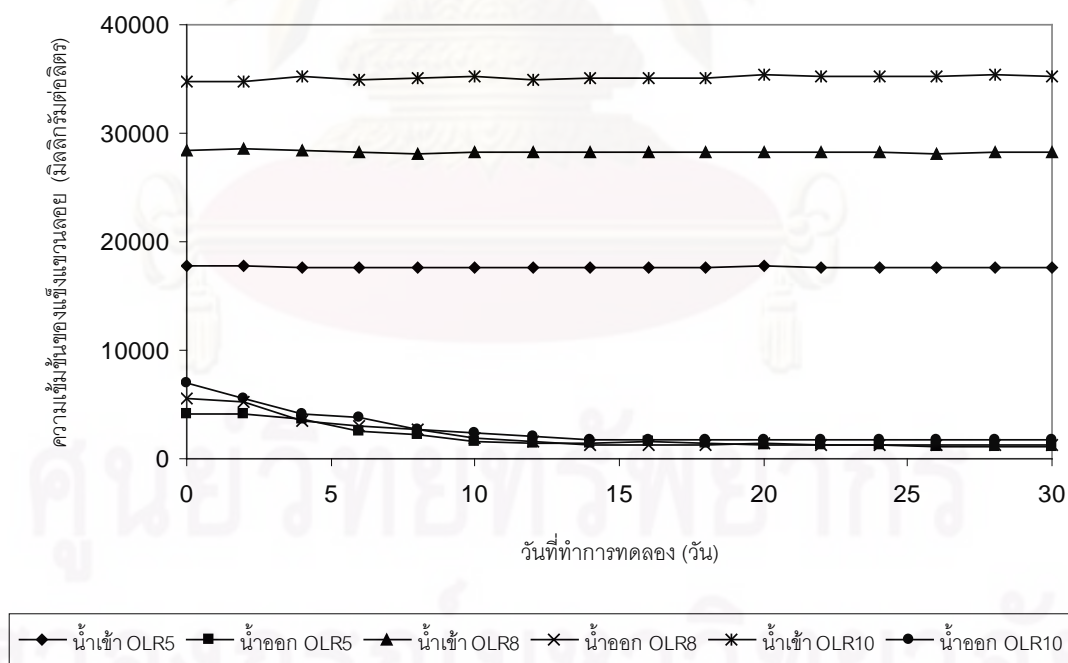
#### 4.2.3 ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อการกำจัดของแข็งแขวนลอย

สำหรับผลการทดลองการกำจัดของแข็งแขวนลอยภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมบวมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในน้ำเข้าและออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยแสดงดังรูปที่ 4.38 4.39 4.40 และ 4.41 โดยภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมบวมที่มีการกวนในแนวตั้งพบว่าในวันที่ 18 ของการทดลองที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 8 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยสูงสุดคือ 95.12 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเป็น  $86.87 \pm 5.21$   $91.48 \pm 5.45$  และ  $90.82 \pm 4.52$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆโดยใช้สถิติพบว่า ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยต่ำกว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันซึ่งมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมบวมที่มีการกวนในแนวนอนพบว่าในวันที่ 14 ของการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยได้สูงสุดคือ 95.67 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเป็น  $88.97 \pm 5.95$   $92.18 \pm 5.09$  และ  $92.30 \pm 4.60$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองโดยใช้สถิติพบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยในน้ำที่เข้าและออกจากระบบแสดงดัง ตารางที่ 4.6

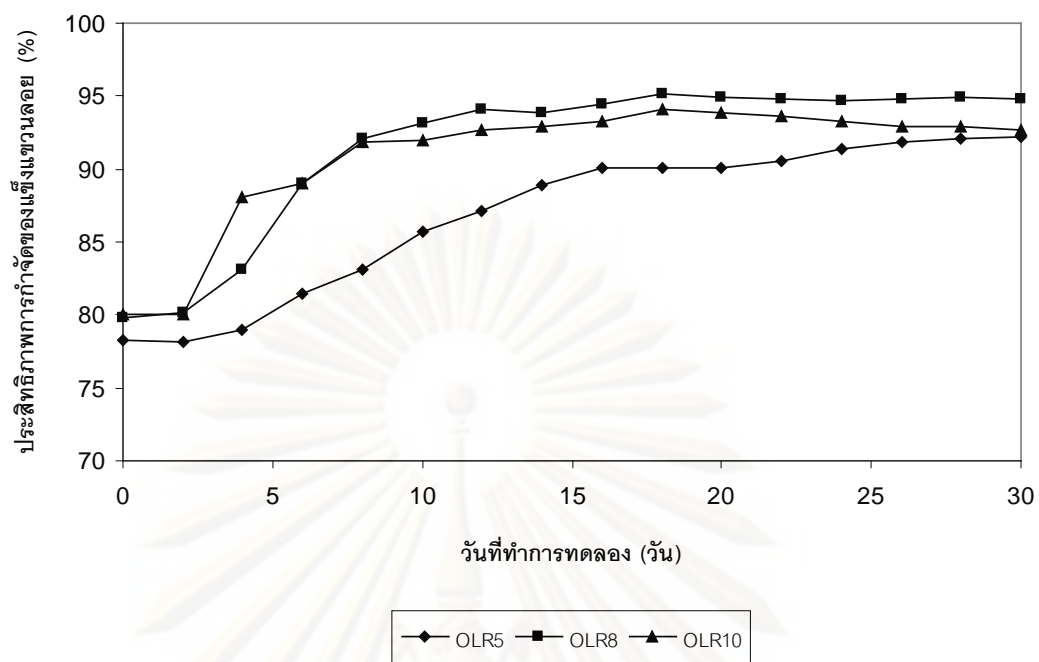
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในการทดลองครั้งนี้กับผลการทดลองในระบบอื่นๆ โดยใช้น้ำเสียในการทดลองชนิดเดียวกัน พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ เป็น 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันเท่ากัน การบำบัดโดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนผสมบวมที่มีความลาดชันความเร็วมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยได้สูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยระเหยในการทดลองโดยใช้กระบวนการไร้อากาศแบบสองขั้นตอน (จิรวรรณ ออตยกุล, 2549) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกรณ์กวนผสมบวมในแนวตั้งและแนวนอนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เดียวกันแสดงดังรูป 4.42 โดยใช้สถิติพบว่า ที่ทุกๆอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ที่ใช้ในการทดลองการกวนในแนวตั้งและการกวนในแนวนอน มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



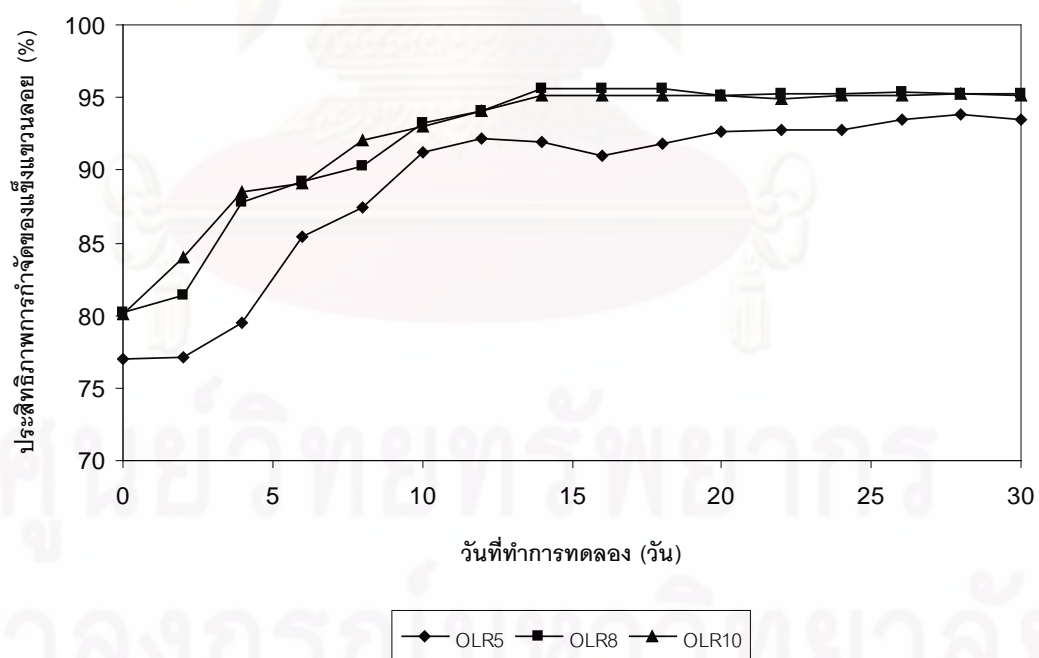
ภาพที่ 4.38 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



ภาพที่ 4.39 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน



ภาพที่ 4.40 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



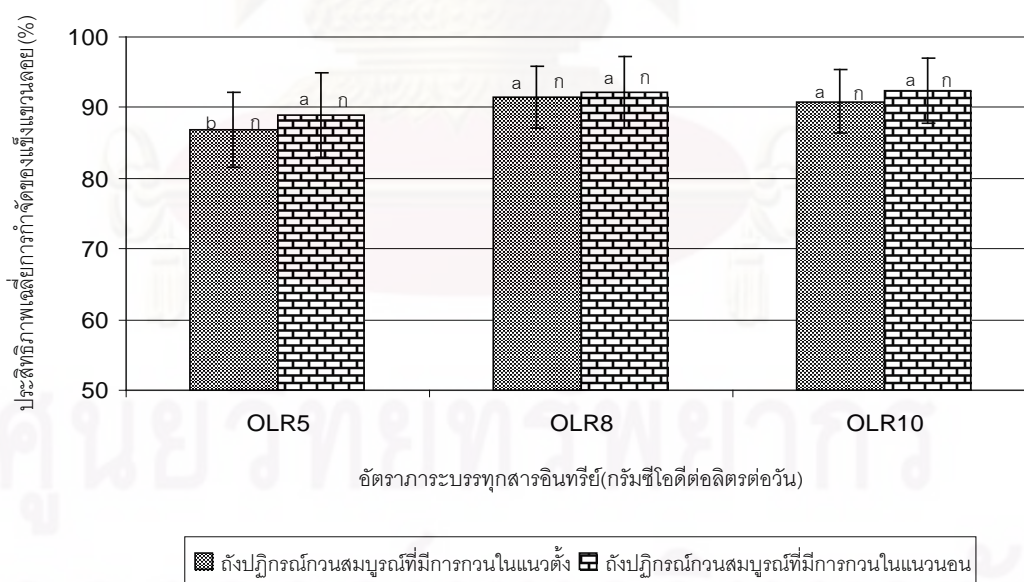
ภาพที่ 4.41 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน



ตารางที่ 4.6 ปริมาณเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยในน้ำที่เข้าระบบและน้ำที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กรัมซีไอต่อลิตรต่อวัน)	ปริมาณเฉลี่ยของแข็งแขวนลอย		ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของแข็งแขวนลอย (%)
	น้ำเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
ถึงกวนแนวตั้ง			
OLR5	17,643.80±45.97	2,215.18±854.97	<sup>b</sup> 86.87±5.21 <sup>n</sup>
OLR8	28,248.60±97.24	2,192.13±1,322.92	<sup>a</sup> 91.48±5.45 <sup>n</sup>
OLR10	35,801.80±2,250.19	3,015.50±1,241.86	<sup>a</sup> 90.82±4.52 <sup>n</sup>
ถึงกวนแนวนอน			
OLR5	17,643.80±45.97	1,805.78±920.54	<sup>a</sup> 88.97±5.95 <sup>n</sup>
OLR8	28,248.60±97.24	2,006.28±1,229.60	<sup>a</sup> 92.18±5.09 <sup>n</sup>
OLR10	35,801.80±2,250.19	2,542.17±1,442.54	<sup>a</sup> 92.30±4.60 <sup>n</sup>

หมายเหตุ - อักษรซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์  
- อักษรขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลวในถัง



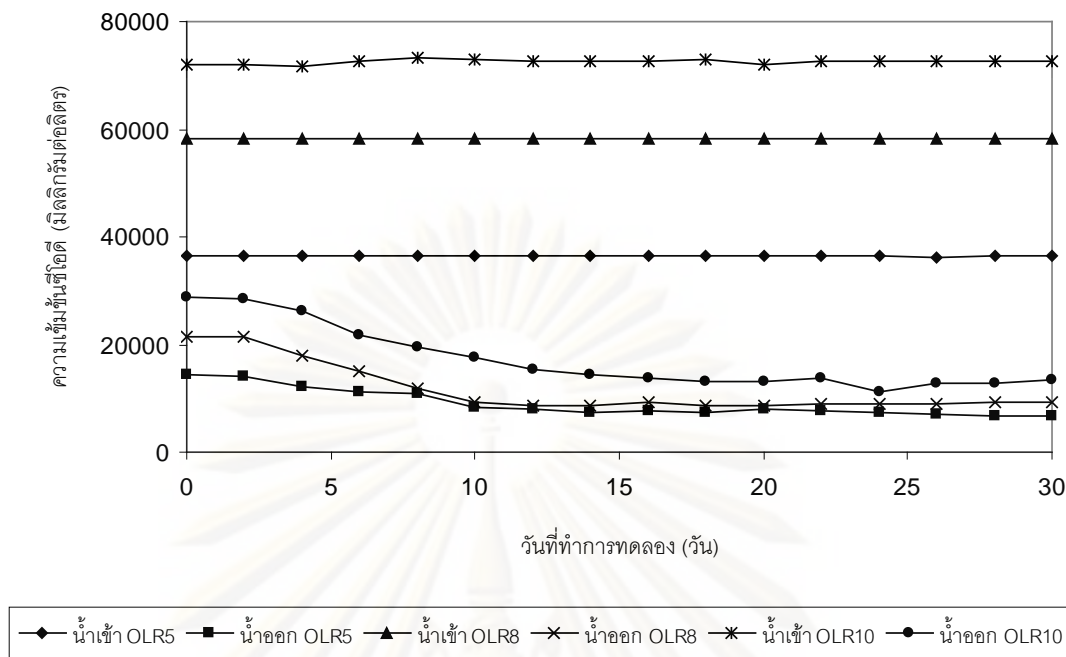
หมายเหตุ - อักษรซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์  
- อักษรขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลว

ภาพที่ 4.42 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดของแข็งแขวนลอยเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

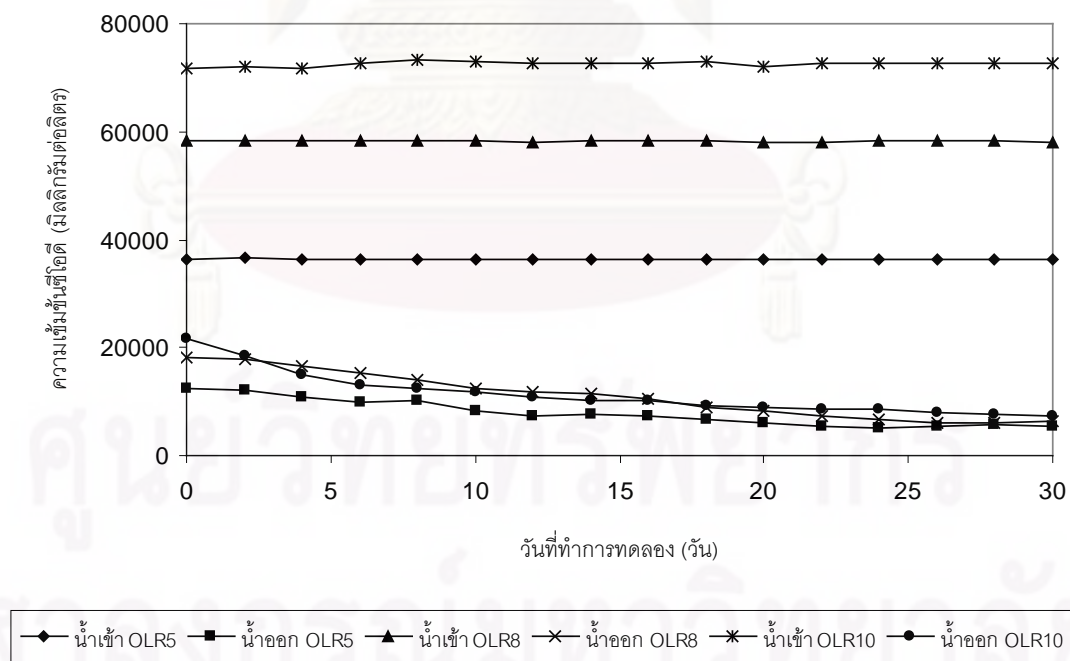
#### 4.2.4 ผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อการกำจัดซีโอดี

สำหรับผลการทดลองการกำจัดซีโอดีภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ความเข้มข้นซีโอดีในน้ำเข้าและออกจากระบบและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีแสดงดังรูปที่ 4.43 4.44 4.45 และ 4.46 โดยในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งพบว่าวันที่ 30 ของการทดลองที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เป็น 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุดคือ 88.61 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีเฉลี่ยที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเป็น  $75.08 \pm 7.19$   $78.33 \pm 7.54$  และ  $80.71 \pm 6.76$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆโดยใช้สถิติพบว่า ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ทั้งที่ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวอนพบว่าเป็นวันที่ 30 ของการทดลองที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้สูงสุดคือ 89.89 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเป็น  $78.43 \pm 6.90$   $80.87 \pm 7.26$  และ  $84.31 \pm 5.63$  เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของถังแขวนลอยที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆโดยใช้สถิติพบว่า ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์กลุ่ม 5 กับ 8 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันและกลุ่ม 8 กับ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไม่แตกต่างกัน ส่วนที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีต่ำกว่าที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปริมาณซีโอดีในน้ำที่เข้าและออกจากระบบแสดงดังตารางที่ 4.7

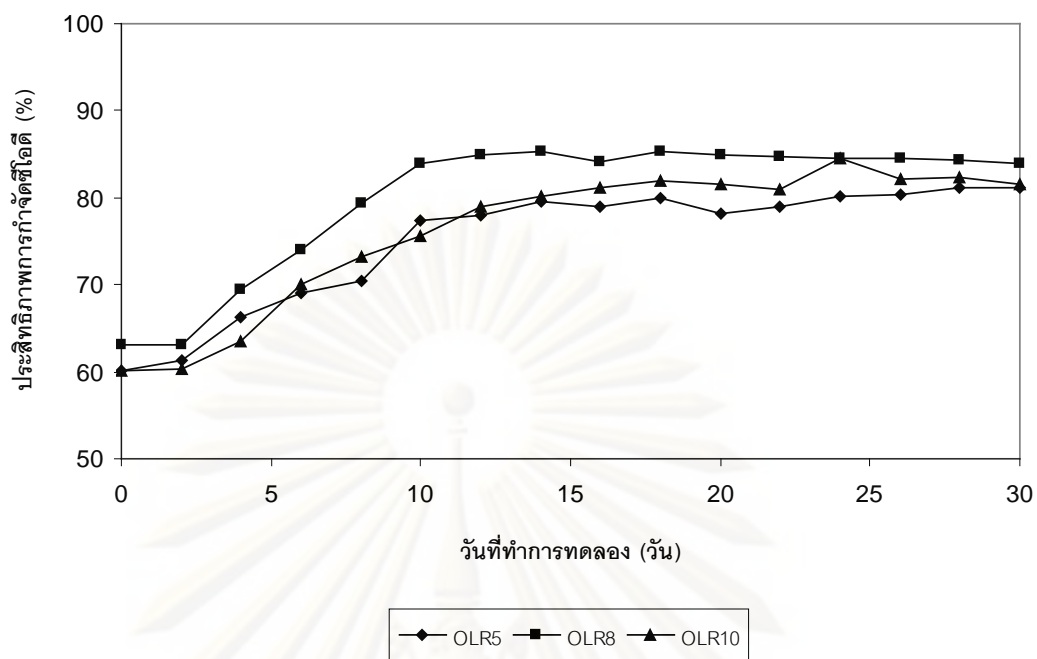
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในการทดลองครั้งนี้กับผลการทดลองในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเดียวกันคือถังปฏิกรณ์กวนผสมและน้ำเสียชนิดเดียวกันคือน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Wanna Choorit และ Pornpan Wisarnwan, 2007) พบว่าผลการทดลองในครั้งนี้ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่ำกว่าและความลาดชันความเร็ว 50 ต่อวินาที มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้สูงกว่าในทุกๆชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในถังปฏิกรณ์กวนผสมในแนวอนและแนวตั้งที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เดียวกันแสดงดังรูป 4.47 โดยใช้สถิติ พบว่าที่ทุกๆอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ ที่ใช้ในการทดลองการกวนในแนวตั้งและการกวนในแนวอนมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



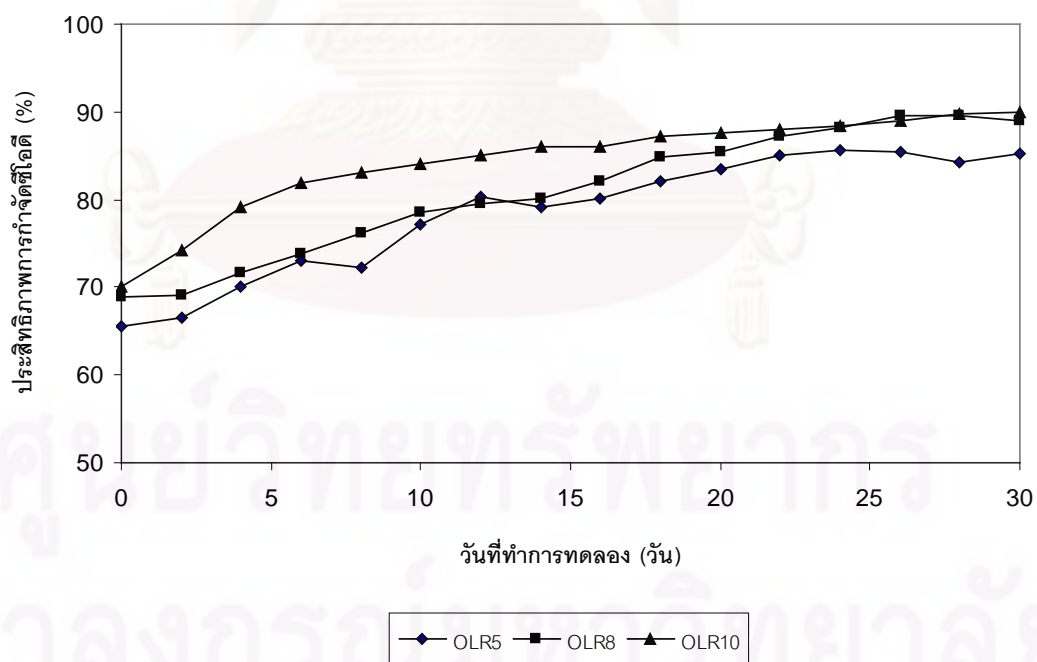
ภาพที่ 4.43 ความเข้มข้นซีไอดีกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง



ภาพที่ 4.44 ความเข้มข้นซีไอดีกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน



ภาพที่ 4.45 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง

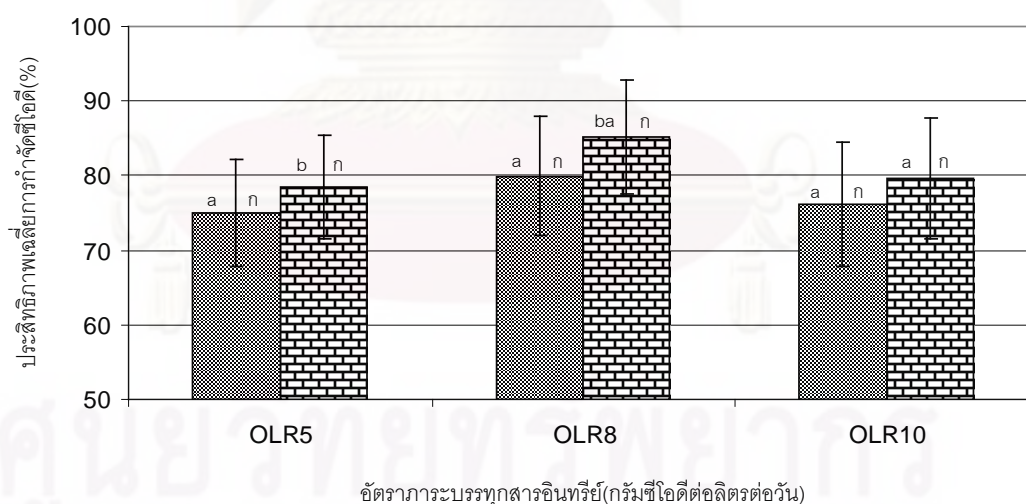


ภาพที่ 4.46 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน

ตารางที่ 4.7 ปริมาณเฉลี่ยของค่าซีไอดีในน้ำที่เข้าระบบและน้ำที่ออกจากระบบและประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดค่าซีไอดีของระบบที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์(กรัมซีไอดีต่อลิตรต่อวัน)	ปริมาณเฉลี่ยค่าซีไอดี		ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดค่าซีไอดี (%)
	น้ำเข้าระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำออกระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
ถึงกวนแนวตั้ง			
OLR5	36,391±58.77	8,710.22±2,268.48	<sup>a</sup> 75.08±7.19 <sup>n</sup>
OLR8	58,196±46.20	12,861.64±4,424.44	<sup>a</sup> 78.33±7.54 <sup>n</sup>
OLR10	72,618±394.20	13,962.96±5,068.14	<sup>a</sup> 80.71±6.76 <sup>n</sup>
ถึงกวนแนวนอน			
OLR5	36,391±58.77	7,541.03±2266.36	<sup>b</sup> 78.43±6.90 <sup>n</sup>
OLR8	58,196±46.20	10,673.98±3,931.79	<sup>ba</sup> 80.87±7.26 <sup>n</sup>
OLR10	72,618±394.20	10,693.20±3,068.47	<sup>a</sup> 84.31±5.63 <sup>n</sup>

หมายเหตุ - อักษรซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์  
- อักษรขวามือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลวในถัง



ถึงปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้ง ถึงปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอน

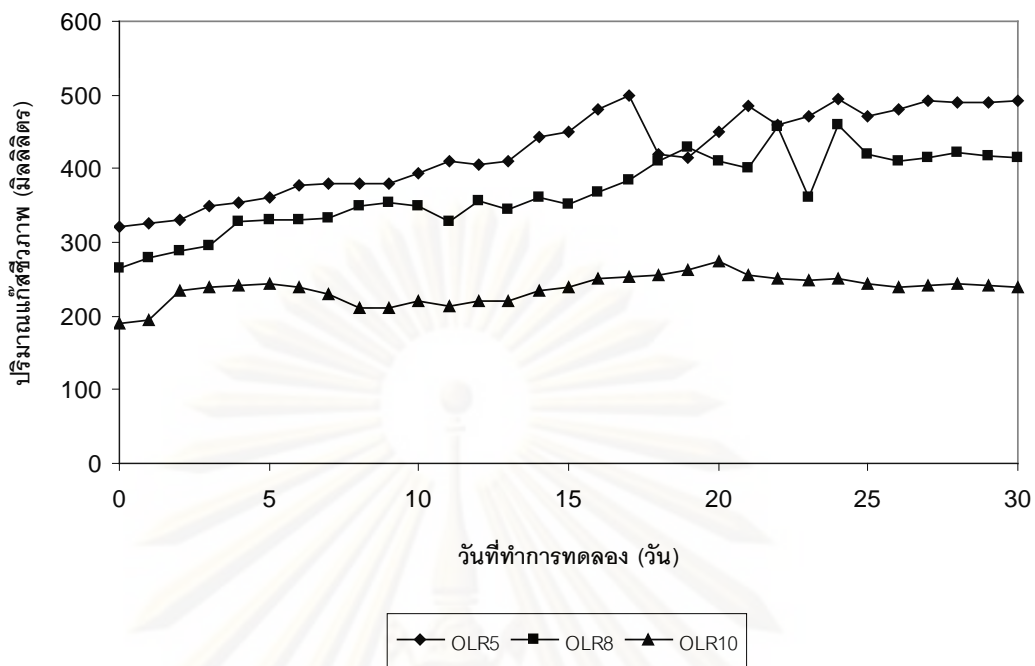
หมายเหตุ - อักษรซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์  
- อักษรขวามือที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลวในถัง

ภาพที่ 4.47 ประสิทธิภาพเฉลี่ยการกำจัดซีไอดีเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

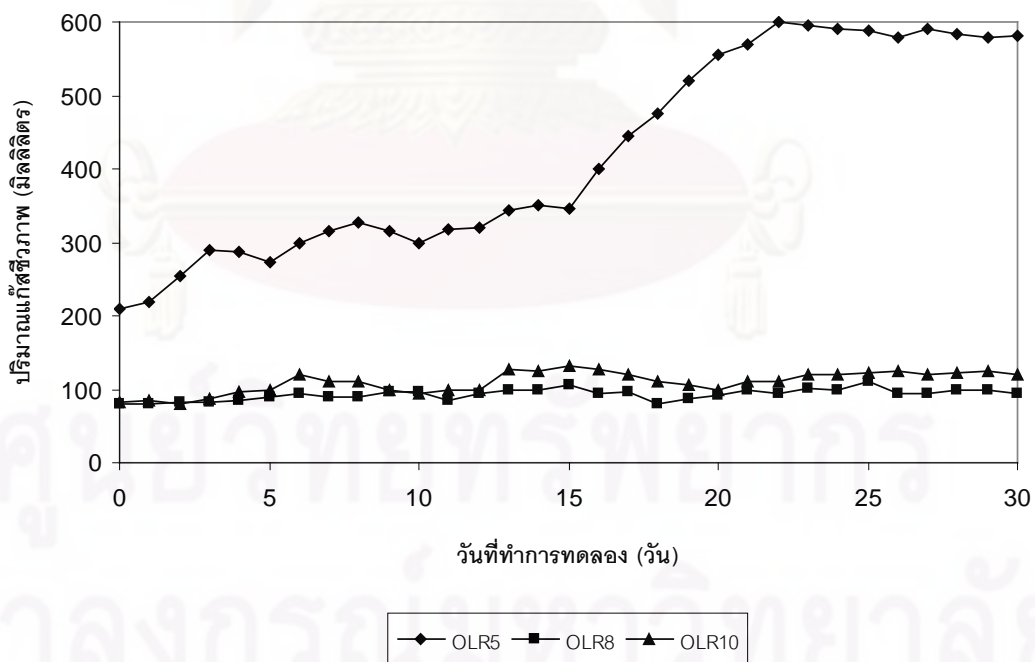
#### 4.2.5 ผลของอัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ

สำหรับปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้จากการเดินระบบโดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์แสดงดังรูปที่ 4.48 และ 4.49 โดยในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนที่มีการกวนในแนวตั้งพบว่า วันที่ 24 ของการทดลอง ที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุดคือ 460 มิลลิลิตรต่อวัน ส่วนปริมาณแก๊สชีวภาพโดยเฉลี่ยตลอดการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันมีปริมาตรเฉลี่ยเป็น  $424.4 \pm 57.6$   $368.5 \pm 51.2$  และ  $236.4 \pm 18.9$  มิลลิลิตรต่อวันตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ต่างๆ โดยใช้สถิติพบว่า ที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนที่มีการกวนในแนวนอนพบว่าในวันที่ 22 ของการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์เป็น 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุดคือ 600 มิลลิลิตรต่อวัน ส่วนปริมาณแก๊สชีวภาพโดยเฉลี่ยตลอดการทดลองที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีปริมาณเฉลี่ยเป็น  $420.1 \pm 138.0$   $93.0 \pm 7.4$  และ  $109.7 \pm 14.6$  มิลลิลิตรต่อวันตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ต่างๆ โดยใช้สถิติพบว่า ที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงกว่าที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันซึ่งมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปริมาณแก๊สชีวภาพที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.8

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพในการทดลองครั้งนี้กับผลการทดลองในตอนที่ 1 พบว่า ปริมาณแก๊สที่ได้เพิ่มขึ้นในทุกๆถังปฏิกรณ์ทั้งที่ลดอัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ลง ทั้งนี้เนื่องจากการลดปริมาณสารอินทรีย์ลง เป็นผลให้ปริมาณฟองที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เกิดน้อยลงการเกิดคราบสบู่ที่ผิวด้านบนของถังปฏิกรณ์เกิดน้อยลง ทำให้แก๊สที่ระบบผลิตได้ถูกปลดปล่อยออกมามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนในแนวนอนและแนวตั้งที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์เดียวกันแสดงดังรูป 4.50 โดยใช้สถิติ พบว่าที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์ 5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน ถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้ไม่แตกต่างกัน ส่วนที่อัตราภาวะบรรจุสารอินทรีย์สูงขึ้นเป็น 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน พบว่าในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้งมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงกว่าในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุนที่มีการกวนในแนวนอนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.48 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่กับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรทุสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวตั้ง

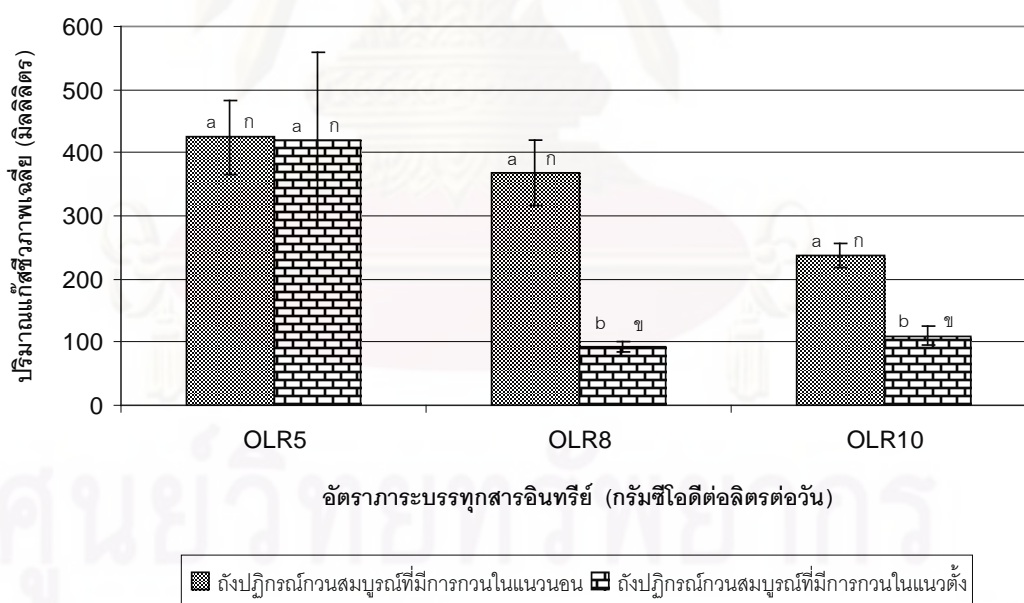


ภาพที่ 4.49 ปริมาณแก๊สชีวภาพกับวันที่ทำการทดลองที่อัตราภาวะบรรทุสารอินทรีย์ต่างๆในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนในแนวนอน

ตารางที่ 4.8 ปริมาณเฉลี่ยของแก๊สชีวภาพที่ระบบสามารถผลิตได้ตลอดการทดลองที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์ (กรัมซีไอต่อลิตรต่อวัน)	ปริมาณแก๊สชีวภาพเฉลี่ย(มิลลิลิตร)
ถึงกวนแนวตั้ง	
OLR5	<sup>a</sup> 424.4±57.6 <sup>n</sup>
OLR8	<sup>a</sup> 368.5±51.2 <sup>n</sup>
OLR10	<sup>a</sup> 236.4±18.9 <sup>n</sup>
ถึงกวนแนวนอน	
OLR5	<sup>a</sup> 420.1±138.0 <sup>n</sup>
OLR8	<sup>b</sup> 93.0±7.4 <sup>ข</sup>
OLR10	<sup>b</sup> 109.7±14.6 <sup>ข</sup>

หมายเหตุ - อักษรซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอัตรากระบรทุกสารอินทรีย์  
- อักษรขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่าง แนวการกวนของเหลวในถัง



หมายเหตุ - อักษรซ้ายมือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอัตรากระบรทุกสารอินทรีย์  
- อักษรขวามือที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างแนวการกวนของเหลว

ภาพที่ 4.50 ปริมาณแก๊สชีวภาพเฉลี่ยเปรียบเทียบในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณที่มีการกวนในแนวตั้งและแนวนอนที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ



#### 4.2.6 ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในผลการทดลองตอนที่ 1 ว่าสัดส่วนแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ผลการวิเคราะห์ปริมาณสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวันมีสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพเป็น 51.71 45.62 และ 44.07 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวอนพบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5 8 และ 10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน มีสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพเป็น 48.65 46.02 และ 44.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากผลการทดลองทั้งในตอนที่ 1 และตอนที่ 2 พบว่าปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้มีค่าไม่สอดคล้องกับปริมาณสารมลพิษที่ลดลงในระบบ ส่วนสัดส่วนแก๊สมีเทนที่ได้พบว่ามีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ส่วนหนึ่งเนื่องจากการทดลองครั้งนี้ใช้ถังปฏิกรณ์กวนผสม กวนน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยการกวนอย่างต่อเนื่องภายในระบบจะมีผลทำให้ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากระบบมีค่าน้อยลง (Chaoui และ Richard, 2008) ประกอบกับในการทดลองครั้งนี้ใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง มีของแข็งเจือปนอยู่ในปริมาณมาก น้ำเสียนี้น้ำมันและไขมันเป็นองค์ประกอบ ดังที่ได้กล่าวมาบ้างแล้วในตอนต้นว่า การปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งกลายเป็นสารประกอบจำพวกสบู่ขึ้นและเมื่อกวนน้ำเสียเหล่านี้จะทำให้เกิดฟองลอยปกคลุมอยู่ที่ผิวหน้าถังปฏิกรณ์กลายเป็นคราบสบู่ โดยคราบสบู่เหล่านี้ยังมีส่วนทำให้แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นภายในระบบถูกปลดปล่อยออกมาน้อยกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้แล้วฟองและคราบสบู่ที่เกิดที่ผิวของระบบบำบัดน้ำเสียมีส่วนทำให้กระบวนการสร้างแก๊สมีเทนเกิดได้น้อยลง (Gomec, 2006) โดยเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองที่ได้ทั้งในการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 ผลที่ได้พบว่าปริมาณฟองและคราบสบู่ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์กวนผสมมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้จากการเดินระบบ โดยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เดียวกันในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีความลาดชันความเร็วสูงจะมีฟองและคราบสบู่เกิดขึ้นมากกว่าในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีความลาดชันความเร็วต่ำ และในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีความลาดชันความเร็วเท่ากัน แต่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างกันพบว่า ถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงกว่าจะมีปริมาณของฟองและคราบสบู่มากกว่าในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำกว่า ส่วนที่ความลาดชันความเร็วและอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เดียวกัน พบว่าการกวนในแนวตั้งของถังปฏิกรณ์กวนผสมไม่มีปริมาณฟองและคราบสบู่เกิดขึ้นมากกว่าการกวนในแนวอนของถังปฏิกรณ์กวนผสม

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองการศึกษาผลของความลาดชันความเร็วและอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ถังปฏิกรณ์หมุนผสม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง คือ 50 ต่อวินาที เนื่องจากที่ความลาดชันความเร็วดังกล่าวมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน ของแข็งแขวนลอยและค่าซีไอดีได้สูงสุดหลังระบบคงที่แล้ว โดยเมื่อเพิ่มความลาดชันความเร็วสูงขึ้นพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยสูงขึ้นจนสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างเข้าใกล้ 0.8 ส่งผลให้ระบบมีพีเอชลดต่ำลงจนแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนไม่สามารถเจริญเติบโตอยู่ได้ สำหรับแก๊สชีวภาพและสัดส่วนแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพที่ได้ พบว่ามีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ผลเนื่องจากการกวนอย่างต่อเนื่องและในการกวนของเหลวทำให้เกิดฟองและสารอินทรีย์ส่วนหนึ่งกลายเป็นคราบสบู่อยู่ที่ผิวของระบบซึ่งจะขัดขวางการปลดปล่อยแก๊สชีวภาพออกมาทำให้ปริมาณที่ได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น

2. อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียสำหรับการทดลอง คือ 10 กรัมซีไอดีต่อลิตรต่อวัน เนื่องจากที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ดังกล่าว ระบบมีสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างไม่เกิน 0.8 ทำให้รักษาระดับพีเอชของระบบให้อยู่ในช่วงที่แบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนสามารถเจริญเติบโตอยู่ได้ ประกอบกับที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ดังกล่าว มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน ของแข็งแขวนลอยและค่าซีไอดีได้สูงสุด โดยเมื่อปรับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ลดลงพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน ของแข็งแขวนลอยและการกำจัดซีไอดีมีค่าต่ำลงและไม่แตกต่างกัน ส่วนปริมาณแก๊สชีวภาพและสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพพบว่า มีค่าสูงกว่าการทดลองตอนที่ 1 และเมื่อลดอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ลงปริมาณแก๊สชีวภาพและสัดส่วนแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณฟองและคราบสบู่ที่ผิวของถังปฏิกรณ์หมุนผสมลดลงทำให้ปล่อยแก๊สออกมาเพิ่มขึ้น

3. แนวระนาบการกวนของเหลวสำหรับการบำบัดน้ำเสียในถังปฏิกรณ์หมุนผสมเมื่อพิจารณาที่ความลาดชันความเร็วและที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เหมาะสม พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน ของแข็งแขวนลอยและการกำจัดซีไอดีได้ไม่แตกต่างกัน สำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพและสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ พบว่าการกวนในแนวตั้งจะเกิดฟองและคราบสบู่จากการกวนน้อยกว่าจึงสามารถผลิตแก๊สชีวภาพและมีสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพสูงกว่าในถังปฏิกรณ์หมุนผสมที่มีการกวนในแนวอน

## ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีไขมันเจือปนอยู่ ด้วยถังปฏิกรณ์กวนผสมคือการเกิดฟองและไขที่ผิวของถังปฏิกรณ์กวนผสม ทำให้ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้ไม่สัมพันธ์กับการลดลงของซีโอดี ดังนั้นจึงอาจปรับปรุงถังปฏิกรณ์กวนผสม โดยเพิ่มการติดตั้งใบพัดที่ผิวน้ำสำหรับกวาดฟองและไขออกหรือเพิ่มระบบการกำจัดฟองและไขที่ผิวของระบบบำบัดน้ำเสีย

2. เนื่องจากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 มีปัญหาการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยอย่างรวดเร็วทำให้พีเอชของระบบลดลงจนแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทนไม่สามารถเจริญเติบโตอยู่ได้ ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปควรมีการศึกษาแบบแยกเฟส เป็น 2 เฟส คือขั้นตอนการสร้างกรดและการสร้างแก๊สมีเทนและหาความลาดชันความเร็วที่เหมาะสมสำหรับแต่ละเฟสต่อไป

3. สำหรับการกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยถังปฏิกรณ์กวนผสม ซึ่งเกิดขึ้นสูงกว่าระบบอื่นๆ พบว่ามีของแข็งส่วนหนึ่งตกตะกอนอยู่ที่ก้นถังปฏิกรณ์ ซึ่งในการเดินระบบจริงที่มีขนาดของถังปฏิกรณ์ใหญ่ขึ้นอาจทำให้ถังปฏิกรณ์ต้นจนเกิดปัญหาขึ้นได้ ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการนำตะกอนส่วนเกินออกจากระบบและนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

4. สำหรับการทดลองครั้งนี้เดินระบบในช่วงการทำงานของแบคทีเรียแบบมีไซฟิสิกซ์ ดังนั้นจึงควรทำการทดลองเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีความลาดชันความเร็วต่างๆ เปรียบเทียบกับช่วงการทำงานของแบคทีเรียแบบเทอร์โมฟิลิกต่อไป

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- จิรวรรณ ออตยะกุล. 2549. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการแบบไร้อากาศสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี. 2551. กระบวนการบำบัดน้ำทางวิศวกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มิสเตอร์ก็อปปี (ประเทศไทย).
- ผาสุข กุลวนิชย์, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และอรรณู หันพงศ์กิตติกุล. 2534. โครงการแปรรูปผลิตภัณฑ์และพัฒนาด้านการตลาดของโรงบีบน้ำมันปาล์ม. วารสารสงขลานครินทร์ 12(2): 78-91.
- พูนสุข ประเสีฐสรพร, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และอรรณู หันพงศ์กิตติกุล. 2533. น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วารสารสงขลานครินทร์ 12:169-176.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 2, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2549. ระบบบำบัดน้ำเสีย การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ปัญหา. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป.
- สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2546. ระบบการผลิตแก๊สชีวภาพแบบ Completely Stirred Tank Reactor (CSTR). วารสารนโยบายพลังงาน 61:36-41.
- สำนักประชาสัมพันธ์ กระทรวงพลังงาน. 2550. ทิศทางพลังงานไทย. กรุงเทพมหานคร: Capital P.
- อรรณู หันพงศ์กิตติกุล, พูนสุข ประเสีฐสรพร, กัลยา ศรีสุวรรณ, เสาวลักษณ์ จิตบรรเจิดกุล และ วีรศักดิ์ ทองลิ้มปี. 2537. การศึกษาวิธีการแยกน้ำมันในน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. เอกสารประกอบการประชุมสัมมนา การลดการสูญเสียน้ำมันในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม, 96. สุราษฎร์ธานี: โรงแรมสยามธานี สุราษฎร์ธานี.
- อารีย์ กังแฮ. 2536. การผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซลาลเนสจากวัสดุเหลือทิ้งโรงงานน้ำมันปาล์ม โดยเชื้อ *Aspergillus niger* ATCC 6275. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อุตสาหกรรม กระทรวง กรมโรงงานอุตสาหกรรม สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. 2540. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม. (ม.ป.ท.)

ภาษาอังกฤษ.

- American Public Health Association. 1992. American water work Association and Water Pollution Control Federation, 18<sup>th</sup> ed. New York : APHA.
- Anjan, K.K., and Kalia-Shiv, S.P. 2001. Effect of mixing digested slurry on the rate of biogas production from dairy manure in batch fermenter. Energy sources 23: 711-715.
- Arthur, C. 1999. Digester mixing systems Can you properly mix with too little power?. Division of McNish Corporation. [Online]. Available from: <http://www.walker-process.com/papers/DIGMIX.pdf>. [2008, June 15]
- Chaisri, P., Boonsawang, P., Prasertsan, P., and Chaiprapat, S. 2007. Effect of organic loading rate on methane and volatile fatty acids productions from anaerobic treatment of palm oil mill effluent in UASB and UFAF reactors. Journal of Songklanakarin Sci Technol 2:331-323.
- Chaoui, H., and Richard, T. 2008. Effect of mixing frequency on biogas yield in anaerobic digesters. American Society of Agricultural and Biological. [Online]. Availablefrom : <http://www.asae.frymulti.com/abstrac.asp>. [2009, August 14].
- Choorit, W., and Wisarnwan, P. 2007. Effect of temperature on the anaerobic digestion of palm oil mill effluent. Electronic Journal of Biotechnology Vol,10 No, 3: 376-385.
- De Bok, F.A.M., Pluge, C.M., Stams, A.J.M. 2004. Interapecies electron transfer in methanogenic propionate degrading consortia. Water Research 38: 1368-1375.
- Gomec, C. Y. 2006. Behavior of the Anaerobic CSTR in the Presence of Scum During Primary Sludge Digestion and the Role of pH. Journal of Environmental Science and Health Part A, 41: 1117-1127.
- Hashimoto, A.G., Roman, L., and Hruska, U.S. 2004. Effect of mixing duration and vacuum on methane production rate from beef cattle. Biotechnology and Bioengineering Vol.24 Issue1:9-23.
- Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L., and Angelidakia, I. 2008. Effect of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies. Bioresource Technology 99: 4919-4928.

- Karim, K., Klasson, K.T., Hoffmann, R., Drescher, R.S., Depaol, D.W., and Al-Dahhan, M.H. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing. Bioresource Technology 96: 1607-1612.
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, T., and Al-Dahhan, M.H. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing. Bioresource Technology 96: 1771-1781.
- Kim, M., Ahn, Y.H., and Speece, R.E. 2002. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digester: mesophilic vs. thermophilic. Water Research 38: 3645-3650.
- Kugelman, I.G., and Chin, K.K. 1971. Toxicity synergism and antagonism in anaerobic waste treatment process. Washington DC: American Chemical Society.
- Loehr, R.C. 1974. Agreculture waste management: Problems, Process and Approaches. New York: Academic press.
- Macarty, O. 1964. Anaerobic waste treatment fundamental. Journal of Public work. Vol 9:95, 10: 107-112.
- Mcmahon, K.D., Stroot, P.G., Mackie, R.I., and Raskin, L. 2001. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing condition –II: Microbial population dynamics. Water Research 35:1871-1827.
- Metcalf and Eddy. 2004. Waste water engineering treatment and reuse, 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
- Mignone, A.N. 2005. Biological inhibition/Toxicity control in municipal anaerobic digestion facilities. [Online]. Available from: [http://www.awpca.net/Biological Inhibition](http://www.awpca.net/Biological%20Inhibition). [2005, July 10]
- Nagatsuta-cho, M., and Yokohama, L. 1999. Steady state performance in palm oil mill waste water treatment by a modified anaerobic baffled reactor. Appl Biotechnol Chem 81:1-6
- Najafpour, G.D., Zinatizadeh, A.A.L., Mohamed, A.R., Hasniin Isa, M., Nasrollahzadeh, H. 2006. High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. Process Biochemistry 41: 370-379.

- Ndegwa, P.M., Halmilton, D.W., Lalman, J.A., and Cumba, H.J. 2008. Effect of cycle-frequency and temperature on the performance of anaerobic sequencing batch reactor (ASBRs) treating swine waste. Bioresource Technology 99: 1972-1980.
- Pedocchi, F., and Piedra-Cveva, I. 2005. Camp and Stein's Velocity Gradient Formalization. Journal of Environmental Engineering October: 1369-1376.
- Polprasert, C. 1996. Organic waste recycling technology and management. England: John Wiley & Sons.
- Rincon, B., Borja, R., Gonzalez, J.M., Portillo, M.C., and Saiz-Jimenez, C. 2008. Influence of organic loading rate and hydraulic retention time on the performance, stability and microbial communities of one-stage anaerobic digestion of two-phase olive mill solid residue. Biochemical Engineering Journal 40: 253-261.
- Sanchez Perez, J.A., Rodriguez Porcel, E.M., Casas Lopez, J.L., Fernandez Sevilla, J.M., Chisti, Y. 2006. Shear rate in stirred tank and bubble column bioreactor. Chemical Engineering Journal 124: 1-5.
- Yacop, S., Shirai, Y., Ali-Hassan, M., Wakisaka, M., and Subash, S. 2006. Start-up of semi-commercial closed anaerobic digesters for palm oil mill effluent treatment. Process Biochemistry 41: 962-964.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

การคำนวณเกี่ยวกับความลาดชันความเร็ว  
ปริมาตรของถังปฏิกรณ์กวนผสม

$$V = \pi r^2 h$$

โดยที่	$V$	คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์กวนผสม
	$\pi$	คือ 3.14
	$r$	คือ รัศมีของถังปฏิกรณ์กวนผสม = 10.5 เซนติเมตร
	$h$	คือ ความสูงของถังปฏิกรณ์กวนผสม = 21 เซนติเมตร

แทนค่า

$$V = 3.14 \times (10.5)^2 \times 21$$
$$V = 7,269.88 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$
$$V = 7.27 \text{ ลิตร}$$
$$V = 7.27 \times 10^{-3} \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

กำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในการกวนเพื่อให้ได้ความลาดชันความเร็วต่างๆ

$$P = G^2 \mu V$$

โดยที่	$P$	คือ กำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในการกวนของเหลว
	$G$	คือ ความลาดชันความเร็ว (ต่อวินาที)
	$\mu$	คือ ความหนืดพลวัตน์ของของเหลว = $0.798 \times 10^{-3}$ นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร
	$V$	คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์กวนผสม = $7.27 \times 10^{-3}$ ลูกบาศก์เมตร

แทนค่า ให้  $G = 25$

$$P = 25^2 \times 0.79 \times 10^{-3} \times 7.27 \times 10^{-3}$$
$$P = 3.62 \times 10^{-3} \text{ นิวตันเมตรต่อวินาที}$$

ให้  $G = 50$

$$P = 50^2 \times 0.79 \times 10^{-3} \times 7.27 \times 10^{-3}$$
$$P = 14.50 \times 10^{-3} \text{ นิวตันเมตรต่อวินาที}$$

$$\begin{aligned} \text{ให้ } G = 75 & \quad P = 75^2 \times 0.79 \times 10^{-3} \times 7.27 \times 10^{-3} \\ & \quad P = 32.63 \times 10^{-3} \text{ นิวตันเมตรต่อวินาที} \\ \text{ให้ } G = 100 & \quad P = 100^2 \times 0.79 \times 10^{-3} \times 7.27 \times 10^{-3} \\ & \quad P = 58.01 \times 10^{-3} \text{ นิวตันเมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้กวนของเหลวเพื่อให้ได้กำลังต่าง ๆ

$$n^2 = \frac{P}{K_L D_i^3 \mu}$$

โดยที่  $n$  คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์  
 $P$  คือ กำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในการกวนของเหลว  
 $K_L$  คือ ค่าคงที่ = 43.0  
 $D_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน = 6.4 เซนติเมตร  
 $\mu$  คือ ความหนืดพลวัตน์ของของเหลว

$$\text{แทนค่า ให้ } P = 3.62 \times 10^{-3} \quad n^2 = \frac{3.62 \times 10^{-3}}{43.0 \times 6.4 \times 10^{-5} \times 0.798 \times 10^{-3}}$$

$$\eta^2 = 1652$$

$$\eta = 40.65 \text{ รอบ}$$

$$\text{ให้ } P = 14.50 \times 10^{-3} \quad n^2 = \frac{14.50 \times 10^{-3}}{43.0 \times 6.4 \times 10^{-5} \times 0.798 \times 10^{-3}}$$

$$\eta^2 = 6,6212$$

$$\eta = 81.36 \text{ รอบ}$$

$$\text{ให้ } P = 32.63 \times 10^{-3} \quad n^2 = \frac{32.63 \times 10^{-3}}{43.0 \times 6.4 \times 10^{-5} \times 0.798 \times 10^{-3}}$$

$$\eta^2 = 14,899$$

$$\eta = 122.06 \text{ รอบ}$$

$$\text{ให้ } P = 58.01 \times 10^{-3} \quad n^2 = \frac{58.01 \times 10^{-3}}{43.0 \times 6.4 \times 10^{-5} \times 0.798 \times 10^{-3}}$$

$$\eta^2 = 26,488$$

$$\eta = 162.75 \text{ รอบ}$$

## ภาคผนวก ข

การคำนวณเกี่ยวกับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์  
ระยะเวลาที่กักพักทางชลศาสตร์

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

โดยที่  $HRT$  คือ ระยะเวลาที่กักพักทางชลศาสตร์ กำหนดเป็น 7.2 วัน

$V$  คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์กวนผสม = 7.27 ลิตร

$Q$  คือ ปริมาณน้ำที่เข้าออกระบบ

แทนค่า

$$Q = \frac{7.27}{7.20}$$

$$Q = 1 \text{ ลิตรต่อวัน}$$

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

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

โดยที่  $OLR$  คือ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

$Q$  คือ อัตราน้ำเข้าและออกระบบ = 1 ลิตรต่อวัน

$COD$  คือ ความเข้มข้นของซีโอดี

$V$  คือ ปริมาตรของถังปฏิกรณ์กวนผสม

แทนค่า ให้  $OLR = 12$   $COD = \frac{12 \times 7.27 \times 1000}{1}$

$$COD = 87,240 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ให้  $OLR = 10$   $COD = \frac{10 \times 7.27 \times 1000}{1}$

$$COD = 72,700 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ให้  $OLR = 8$   $COD = \frac{8 \times 7.27 \times 1000}{1}$

$$COD = 58,160 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

แทนค่า ให้  $OLR = 5$

$$COD = \frac{5 \times 7.27 \times 1000}{1}$$

$COD = 36,350$  มิลลิกรัมต่อลิตร

การเจือจางน้ำเสียเพื่อให้มีความเข้มข้นซีโอดีต่างๆ

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

โดยที่  $C_1$  คือ ความเข้มข้นของซีโอดีก่อนเจือจาง = 105,753 มิลลิกรัมต่อลิตร

$V_1$  คือ ปริมาตรของน้ำก่อนเจือจางที่ต้องนำมาเพื่อเจือจาง

$C_2$  คือ ความเข้มข้นของซีโอดีหลังเจือจาง

$V_2$  คือ ปริมาตรของน้ำที่ต้องการใช้น้ำหลังเจือจาง

แทนค่า ตอนที่ 1 ที่  $OLR$  12 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน ต้องการ 8 ลิตร

$$V_1 = \frac{87,240 \times 8}{105,753}$$

$$V_1 = 5.00 \text{ ลิตร}$$

แทนค่า ตอนที่ 2 ที่  $OLR$  10 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน ต้องการ 2 ลิตร

$$V_1 = \frac{2 \times 72,700}{105,753}$$

$$V_1 = 1.37 \text{ ลิตร}$$

ที่  $OLR$  8 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน ต้องการ 2 ลิตร

$$V_1 = \frac{2 \times 58,160}{105,753}$$

$$V_1 = 1.10 \text{ ลิตร}$$

ที่  $OLR$  5 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน ต้องการ 2 ลิตร

$$V_1 = \frac{2 \times 36,350}{105,753}$$

$$V_1 = 0.69 \text{ ลิตร}$$

## ภาคผนวก ค

รูปอุปกรณ์บางส่วนและน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดในการทดลองครั้งนี้



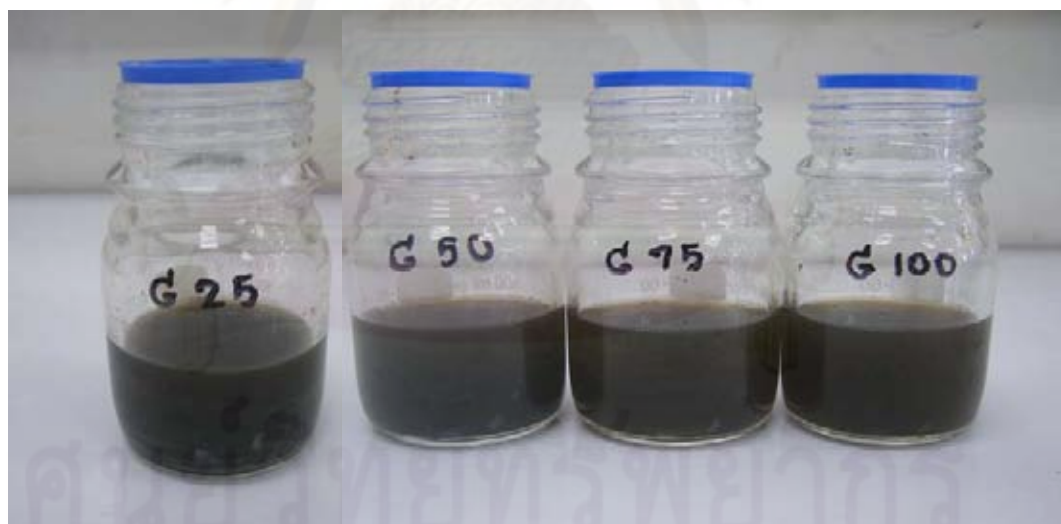
ภาพที่ ผ.1 ไบโกลนแบบไบพายที่ใช้กวนน้ำเสียในถังปฏิกรณ์กวนผสมหมุน



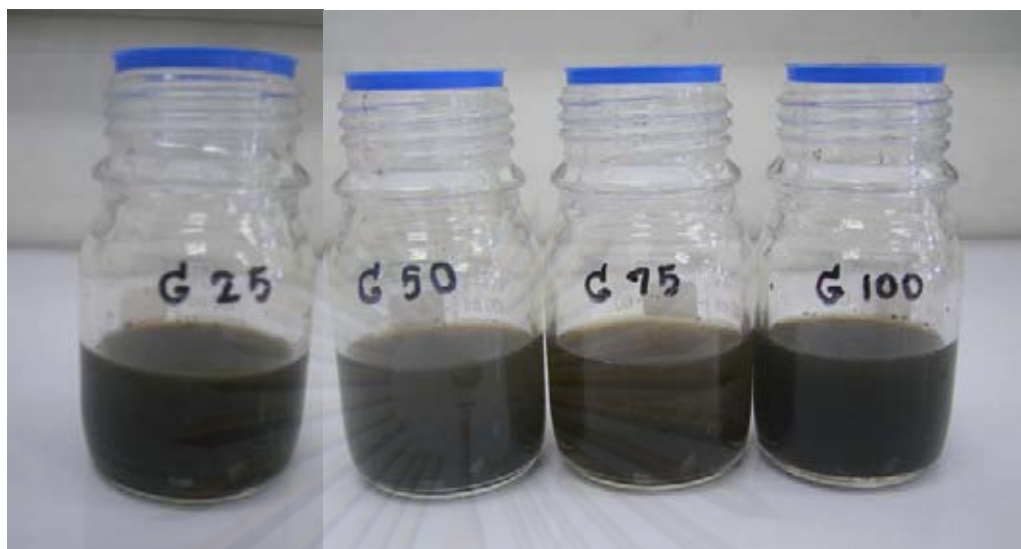
ภาพที่ ผ.2 ตำแหน่งของการวางอุปกรณ์ต่างๆในการทดลอง



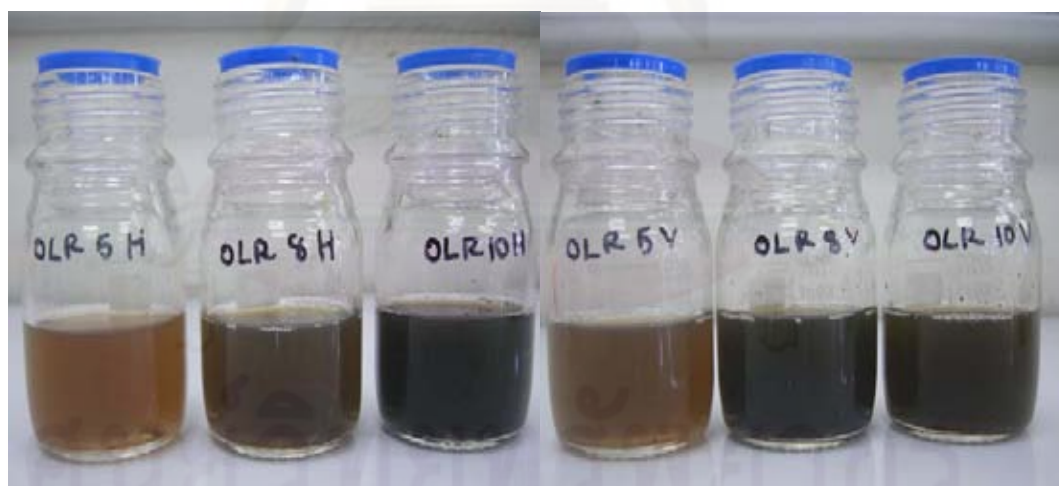
ภาพที่ ผ.3 ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ



ภาพที่ ผ.4 ลักษณะน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวตั้งที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ



ภาพที่ ๕.5 ลักษณะน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอนที่ความลาดชันความเร็วต่างๆ



ภาพที่ ๕.6 ลักษณะน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์กวนผสมที่มีการกวนในแนวนอนและแนวตั้งที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณนทพงศ์ จันทมาศ เกิดเมื่อ วันที่ 26 พฤษภาคม 2525 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จากภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2549 เข้าศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2550 เคยได้รับทุนการศึกษาประเภทเรียนดีจากสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2550

นำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานในการประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 2 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เรื่อง ผลของความลาดชันความเร็วต่อการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้ถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย