

ผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่มีต่อซัลเฟตรีดักชันในระบบถังกรองไร้อากาศ



นางสาวปริญา รัตนา

สถาบันวิทยบริการ

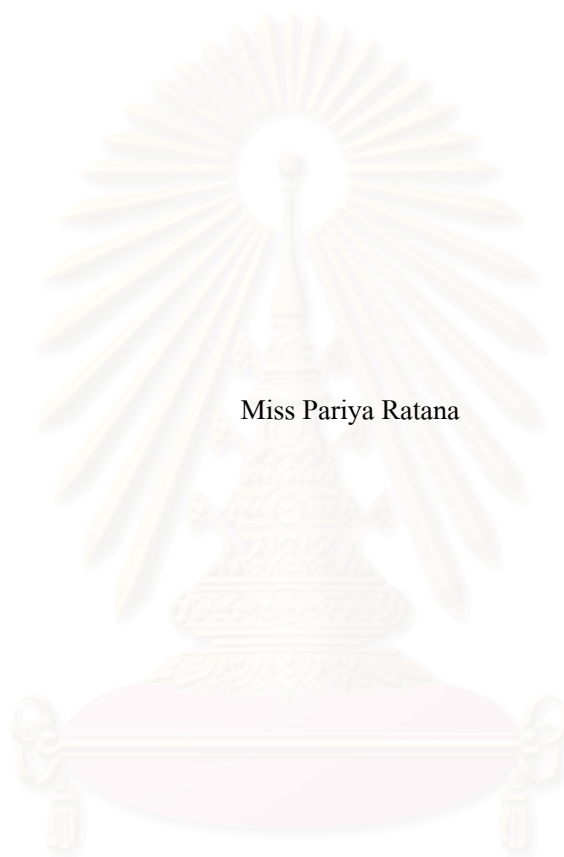
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF COD : SO<sub>4</sub> RATIO ON SULFATE REDUCTION IN ANAEROBIC FILTER



Miss Pariya Ratana

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 2006

Copyright of Chulalongkorn University



ปริญา รัตนา: ผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่มีต่อซัลเฟตรีดักชันในระบบถังกรองไร้อากาศ  
(EFFECT OF COD:SO<sub>4</sub> RATIO ON SULFATE REDUCTION IN ANAEROBIC FILTER)  
อ.ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 175 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย ทำการทดลอง 2 ช่วง การทดลอง โดยแต่ละช่วงการทดลองใช้ถังกรองไร้อากาศจำนวน 3 ถังที่มีลักษณะเหมือนกัน การทดลองช่วงที่ 1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ได้กำหนดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 3 ชุด คือ 5:1, 10:1 และ 15:1 กำหนดให้ความเข้มข้นซัลเฟตที่ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากันทั้ง 3 ถังกรอง ส่วนค่าซีโอดีที่ใช้คือ 450, 900 และ 1,350 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การทดลองช่วงที่ 2 ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสในการเดินระบบ โดยใช้อัตราส่วนที่เพียงพอของซีโอดีต่อซัลเฟตจากการทดลองช่วงที่ 1 และการทดลองช่วงที่ 2 นี้ได้เพิ่มอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตขึ้นอีก 5, 10 และ 15 ตามลำดับ เพื่อความเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีทั้งซัลเฟตและไนเตรทในน้ำเสีย โดยกำหนดให้ความเข้มข้นซัลเฟต 90 มิลลิกรัมต่อลิตรและความเข้มข้นไนเตรท 60 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากันทั้ง 3 ถังกรอง

ผลการทดลองช่วงที่ 1 ซึ่งใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีซัลเฟต พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 90.48, 94.67 และ 93.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 65.96, 65.64 และ 65.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 และ 10:1 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 เป็นอัตราส่วนที่เพียงพอในการกำจัดน้ำเสียที่มีซัลเฟต

ผลการทดลองช่วงที่ 2 ที่ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส ได้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตให้เหมาะสมกับการกำจัดซัลเฟตและไนเตรท โดยนำอัตราส่วนที่เพียงพอจากการทดลองช่วงที่ 1 มาเป็นพื้นฐานแล้วเพิ่มอัตราส่วนซีโอดี ได้อัตราส่วนเท่ากับ 10:1, 15:1 และ 20:1 จากการทดลองพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 87.91, 92.31 และ 94.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 69.40, 70.18 และ 70.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 58.27, 68.42 และ 70.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต ที่ 15:1 และ 20:1 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 เป็นอัตราส่วนที่เพียงพอในการกำจัดน้ำเสียที่มีทั้งซัลเฟตและไนเตรท

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทได้ดี จึงมีความเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทสูง ดังเช่นกรณีศึกษาของน้ำเสียจากโรงงานสแตนเลส

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา



# # 4689104020: MAJOR OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: ANAEROBIC FILTER, SULFATE, NITRATE

PARIYA RATANA: EFFECT OF COD:SO<sub>4</sub> RATIO ON SULFATE REDUCTION IN ANAEROBIC FILTER. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D., 175 pp.

The purpose of this research is to study effect of COD:SO<sub>4</sub> ratios on sulfate reduction using anaerobic filter. There were two sets of experiments with three identical anaerobic filters used in each experiment. Synthetic wastewater was prepared with varying COD:SO<sub>4</sub> ratios at 5:1, 10:1 and 15:1. The sulfate concentration was kept constant at 90 mg/l and the COD concentrations were varied to 450, 900 and 1350 mg/l. The second experiment employed stainless industrial wastewater with COD:SO<sub>4</sub> ratios of the first experiment and increased by 5, 10 and 15 to the ratios for nitrate treatment. The sulfate and nitrate concentrations were set constantly at 90 and 60 mg/l.

The results of the first experiment with synthetic wastewater of COD:SO<sub>4</sub> ratio at 5:1, 10:1 and 15:1 showed 90.48%, 94.67% and 93.97% removal for COD, respectively and 65.96%, 65.64% and 65.95 % for sulfate, respectively. It was found that the results from COD:SO<sub>4</sub> ratios at 5:1 and 10:1 were not significantly different ( $p < 0.05$ ). Therefore, the COD:SO<sub>4</sub> ratio at 5:1 seemed to be sufficient for sulfate treatment.

For the second experiment with stainless industrial wastewater, COD:SO<sub>4</sub> ratios were changed to 10:1, 15: 1 and 20:1 for simultaneous removal sulfate and nitrate treatment. It was found that removal percentages for COD were 87.91%, 92.31% and 94.18%, respectively, for sulfate were 69.40%, 70.18% and 70.20%, respectively, and for nitrate were 58.27%, 68.42% and 70.20%, respectively. The results showed that COD:SO<sub>4</sub> at 15:1 and 20:1 were not significantly different ( $p < 0.05$ ). Thus, we can effectively use COD:SO<sub>4</sub> ratio at 15 :1 for simultaneous in removing sulfate and nitrate removal.

In conclusion, the anaerobic filter was effective sulfate and nitrate. Thus, the anaerobic filter system is a promising sulfate and nitrate treatment system for stainless industrial wastewater.

Field of study..... Environmental Science.....

Student's signature

*Pariya Ratana*

Academic year..... 2006.....

Advisor's signature

*Chavalit Rattal*

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนตรวจแก้วิทยานิพนธ์จนทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทัญญิพย์ ไชยวัฒนศัพท์ อาจารย์ ดร.สุชาติ ชะนะมา และ ดร.ชนินทร์ ทองธรรมชาติ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ โรงแรมบันยันทรี กรุงเทพ ซึ่งเห็นคุณค่างานทางด้านสิ่งแวดล้อม และสนับสนุนทุนในการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ โรงงานเส้นไหมชื่อเอง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการวิจัย และเจ้าหน้าที่ของโรงงานทุกท่านที่ให้การช่วยเหลือในการเก็บเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ขอขอบคุณ คุณสมชาย เจริญสวรรค์ ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสีย และพี่เจ้าหน้าที่ รวมทั้งการขนส่งน้ำเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ นางสาวสกุลรัตน์ พุกกะวาระณะ ที่เอื้อเฟื้อในการใช้เครื่องมือ และความสะดวกในการวิเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์

ขอขอบคุณ นางสาวจันทิมา สกุลพานิชย์ นายบัญชาการ วินัยพานิช นายผดุงศักดิ์ ศรีคำ นางสาวสาวเดือน ทาวธรรมย์ นางสาวกุสุมา เอกสารโรจน์ นางสาวศศิธามนต์ แสงสวัสดิ์ นางสาวชนิดาภา พันธิไชย นางสาวกัลยกร ตั้งอุไรวรรณ นายสุเมธ เลาคำ และ นางสาวกิตติยาน้อยม่วง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ ติดตั้งระบบการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ และการทำงานอื่น ๆ

ขอขอบคุณ ผู้อำนวยการหลักสูตร และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ตลอดจนเพื่อน ๆ น้อง ๆ ทุกคน ที่ได้ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

และสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่สาว ครอบครัวที่อบอุ่นให้ความรัก กำลังใจ สนับสนุน ส่งเสริมการศึกษา และความช่วยเหลือให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จเรื่อยมา จนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	4
2.1.1 กลไกพื้นฐานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย.....	4
2.1.1.1 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน.....	5
2.1.1.2 กระบวนการซัลเฟตรีดักชัน.....	9
2.1.1.3 กระบวนการผลิตมีเทน.....	20
2.2 ระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น.....	29
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น.....	29
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศ.....	30
2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของถังกรองไร้อากาศ.....	33
2.3 สมดุลมวลของซีโอดี ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน ในกระบวนการไร้อากาศ ที่มีซัลเฟตและไนเตรท.....	34
2.3.1 สมดุลมวลซีโอดี.....	34
2.3.2 สมดุลมวลซัลเฟอร์.....	37
2.3.3 สมดุลมวลไนโตรเจน.....	39

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 แผนการทดลอง.....	41
3.1.1 การทดลองช่วงที่ 1.....	41
3.1.2 การทดลองช่วงที่ 2.....	41
3.2 การเตรียมน้ำเสีย.....	42
3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	42
3.2.2 การเตรียมน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส.....	42
3.3 การดำเนินการทดลอง.....	43
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.4.1 ถังกรองไร้อากาศ.....	44
3.4.2 ตัวกลาง.....	44
3.4.3 เครื่องสูบน้ำเสีย.....	47
3.4.4 ถังพักน้ำเสีย.....	47
3.4.5 ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	47
3.4.6 อุปกรณ์วัดก๊าซ.....	47
3.5 การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	47
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	51
4.1 ผลการศึกษา.....	51
4.1.1 ผลการศึกษา การทดลองช่วงที่ 1.....	51
4.1.1.1 พีเอช สภาพต่างทั้งหมด และ กรดไขมันระเหย.....	51
4.1.1.2 อุณหภูมิ.....	56
4.1.1.3 ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลาย และของแข็งทั้งหมด.....	56
4.1.1.4 ไออาร์พี.....	61
4.1.1.5 ซีไอดี.....	61
4.1.1.6 ซัลเฟต.....	61
4.1.1.7 ซัลไฟด์.....	65
4.1.1.8 ก๊าซชีวภาพ.....	67



	หน้า
4.1.2 ผลการศึกษา การทดลองช่วงที่ 2.....	69
4.1.2.1 พีเอช สภาพต่างทั้งหมด และ กรดไขมันระเหย.....	69
4.1.2.2 อุณหภูมิ.....	74
4.1.2.3 ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลาย และของแข็งทั้งหมด.....	74
4.1.2.4 โออาร์พี.....	75
4.1.2.5 ซีไอดี.....	80
4.1.2.6 ซัลเฟต.....	80
4.1.2.7 ซัลไฟด์.....	84
4.1.2.8 ก๊าซชีวภาพ.....	84
4.1.2.9 ไนเตรท.....	85
4.2 การศึกษาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	91
4.2.1 ลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	91
4.2.2 ลักษณะการเกาะตัวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	97
4.2.3 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	98
4.2.4 ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน.....	100
4.3 สมดุลมวลของสารในระบบ.....	101
4.3.1 สมดุลมวลซีไอดี.....	101
4.3.2 สมดุลมวลซัลเฟอร์.....	102
4.3.3 สมดุลมวลไนโตรเจน.....	103
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	104
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	104
5.2 อุปสรรคและข้อเสนอแนะ.....	105
รายการอ้างอิง.....	107
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก.....	112
ภาคผนวก ข.....	129
ภาคผนวก ค.....	148
ภาคผนวก ง.....	157
ภาคผนวก จ.....	161
ภาคผนวก ฉ.....	165
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	175

## สารบัญญัตินำ

ตารางที่	หน้า
2.1 ปฏิบัติการรีดออกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย .....	4
2.2 เปรียบเทียบลักษณะของกระบวนการกำจัดไนเตรทโดยวิธีต่าง ๆ .....	8
2.3 ตัวอย่างปฏิบัติการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ I-SRB และ C-SRB .....	10
2.4 ค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) และแบคทีเรีย สร้างมีเทน .....	12
2.5 กลุ่มสารอาหารที่ใช้ในปฏิบัติการสร้างมีเทน .....	23
2.6 ตัวอย่างแบคทีเรียสร้างมีเทน และสารอาหารที่ใช้ .....	27
2.7 ตัวอย่างผลการคำนวณสมดุลมวลซีโอดี .....	37
2.8 ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลซัลเฟอร์ .....	40
3.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน .....	44
3.2 ตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ .....	49
3.3 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ .....	50
4.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพในการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 1 .....	63
4.2 ซัลเฟตและประสิทธิภาพในการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 1 .....	65
4.3 ซีโอดีและประสิทธิภาพในการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2 .....	82
4.4 ซัลเฟตและประสิทธิภาพในการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2 .....	84
4.5 สัดส่วนของก๊าซ .....	86
4.6 ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2 .....	88
4.7 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นระบบ .....	97
4.8 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 10:1 .....	98
4.9 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 15:1 .....	99
4.10 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 20:1 .....	99
4.11 ความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน .....	100
4.12 ค่า % COD recovery ของการทดลองช่วงที่ 2 .....	101
4.13 เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนของการทดลองช่วงที่ 2 .....	102
4.14 ค่า % sulfur recovery .....	102
4.15 ค่า % nitrogen recovery .....	103

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	7
2.3	15
2.4	17
2.5	17
2.6	18
2.7	19
2.8	24
2.9	38
3.1	45
3.2	46
3.3	46
3.4	48
3.5	48
4.1	52
4.2	53
4.3	55
4.4	57
4.5	58
4.6	59
4.7	60
4.8	62
4.9	63
4.10	65
4.11	66
4.12	67

รูปที่	หน้า
4.13 เปรียบเทียบปริมาณซัลเฟตที่ย่อยสลายได้ทั้ง 3 ถังกรองไร้อากาศ.....	67
4.14 เปรียบเทียบปริมาณการเกิดซัลไฟด์ทั้ง 3 ถังกรองไร้อากาศ.....	67
4.15 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งคาร์บอน.....	68
4.16 ค่าพีเอชของการทดลองช่วงที่ 2 .....	71
4.17 สภาพค่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2.....	72
4.18 กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 2.....	73
4.19 อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 2 .....	76
4.20 ของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 2 .....	77
4.21 ของแข็งละลายของการทดลองช่วงที่ 2.....	78
4.22 ของแข็งทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2 .....	79
4.23 โออาร์พีของการทดลองช่วงที่ 2 .....	80
4.24 ซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2.....	82
4.25 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2 .....	83
4.26 ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 2 .....	86
4.27 ปริมาณก๊าซทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2 .....	86
4.28 ไนเตรทและประสิทธิภาพการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2 .....	88
4.29 เปรียบเทียบซัลเฟต และไนเตรททั้ง 3 ถังกรองไร้อากาศ.....	88
4.30 เปรียบเทียบปริมาณซัลเฟตที่ย่อยสลายทั้ง 3 ถังกรองไร้อากาศ.....	89
4.31 เปรียบเทียบปริมาณการเกิดซัลไฟด์ .....	89
4.32 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซทั้งหมดต่อแหล่งคาร์บอน.....	89
4.33 เปรียบเทียบปริมาณไนเตรทที่ย่อยสลายทั้ง 3 ถังกรองไร้อากาศ.....	90
4.34 ภาพถ่ายเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	92
4.35 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นระบบ...93	93
4.36 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการ ทดลองช่วงที่ 2 ของ ซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 10:1 .....	94
4.37 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการ ทดลองช่วงที่ 2 ของ ซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 15:1 .....	95
4.38 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการ ทดลองช่วงที่ 2 ของ ซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 15:1.....	96

รูปที่	หน้า
4.39 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์เกาะตัวกลาง.....	97
4.40 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ที่ $D_{50}$ .....	99
4.41 ความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนที่ระดับ 0.1, 0.7 และ 1.4 เมตร.....	101



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เมื่อผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และโลหะหนักจากน้ำเสียแล้ว ยังไม่สามารถปล่อยน้ำที่ผ่านการกำจัดน้ำทิ้งได้ทันทีเนื่องจากมีปริมาณของแข็งละลาย (TDS) เกินกว่าค่ามาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 12 พ.ศ. 2525) ของแข็งละลายเหล่านี้สามารถกำจัดได้โดยวิธีการทางเคมี (chemical) หรือการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า (ion exchange) วิธีการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะนำเอาระบบบำบัดทางชีวภาพมาใช้ในการกำจัดเพราะมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า

ของแข็งละลายที่มีอยู่ปะปนกับน้ำจะเป็นพวกซัลเฟต ไนเตรท และคาร์บอนเนต ผู้ทำการศึกษาจึงมุ่งประเด็นมาที่การกำจัดซัลเฟตและไนเตรทในน้ำเสีย ในการกำจัดซัลเฟตและไนเตรททางชีวภาพต้องใช้แบคทีเรียที่อยู่ในสภาวะไร้อากาศ ผู้ทำการศึกษาจึงเลือกเอาระบบถังกรองไร้อากาศมาใช้ในการกำจัดซัลเฟตและไนเตรท ถังกรองไร้อากาศนี้เป็นระบบหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ โดยระบบเพิ่งพัฒนาขึ้นมาเมื่อประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา

ส่วนประกอบของถังกรองไร้อากาศที่สำคัญ คือ ตัวถังที่ทำมาจากอะคริลิกภายในบรรจุด้วยหิน หรือพลาสติก (Plastic Media) เพื่อให้จุลินทรีย์เกาะอาศัย จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศจะย่อยสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และเปลี่ยนสภาพกลายเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนการกำจัดซัลเฟตและไนเตรทในถังกรองไร้อากาศนั้นเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของอิออนที่เรียกว่าซัลเฟตรีดักชันและดีไนตริฟิเคชัน (Sulfate Reduction and Denitrification) ซัลเฟตจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นซัลไฟด์ ไนเตรทจะเปลี่ยนสภาพเป็นไนโตรเจน น้ำเสียจะไหลผ่านเข้าด้านล่าง แล้วไหลผ่านขึ้นออกทางด้านบน (Upflow) ของถังกรอง ลักษณะเช่นนี้ จะทำให้น้ำท่วมถึงสูงตลอดเวลา จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ มีโอกาสหลุดลอยออกมาต่ำ ทำให้มีสารแขวนลอยน้อย น้ำที่ออกมาหลังจากผ่านถังกรองไร้อากาศจึงใส ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีถังตกตะกอน ระบบถังกรองไร้อากาศจึงเหมาะที่จะเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพเพื่อกำจัดซัลเฟตและไนเตรท เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท

การกำจัดซัลเฟตแบบซัลเฟตรีดักชัน และกระบวนการกำจัดไนเตรทแบบดีไนตริฟิเคชัน จำเป็นต้องมีการเติมสารอาหารที่เป็นประเภทพลังงานที่เป็นแหล่งคาร์บอนลงไปในระบบ เพื่อ

เลี้ยงจุลินทรีย์ ดังนั้น ผู้ทำการศึกษาได้ใช้น้ำตาลทรายเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนในการเดินระบบ และในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ รวมทั้งน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่อซัลเฟตรีดักชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดซัลเฟตและไนเตรทในถังกรองไร้อากาศ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ระบบถังกรองไร้อากาศ สำหรับการกำจัดซัลเฟตและไนเตรทในน้ำเสีย โดยทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้น้ำเสียซึ่งสังเคราะห์ขึ้นในการทดลองช่วงที่ 1 และน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส ในการทดลองช่วงที่ 2 มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

การบำบัดน้ำเสียของการทดลองช่วงที่ 1 คือน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 90 วัน โดยมีน้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน ระหว่างการทำทดลองได้มีการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ คือ พีเอช อุณหภูมิ โออาร์พี สภาพต่างทั้งหมด กรดไขมันระเหย ของแข็งแขวนลอยของแข็งทั้งหมด ซัลเฟต ซัลไฟด์ ซีโอดี ก๊าซชีวภาพ ศึกษาเปรียบเทียบระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน โดยแปรค่าอัตราส่วนซีโอดีที่เติมให้ระบบ มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 3 ชุดการทดลอง ดังต่อไปนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ซีโอดี : ซัลเฟต เท่ากับ 5 : 1

ชุดการทดลองที่ 2 ซีโอดี : ซัลเฟต เท่ากับ 10 : 1

ชุดการทดลองที่ 3 ซีโอดี : ซัลเฟต เท่ากับ 15 : 1

และการทดลองช่วงที่ 2 ซึ่งเหมือนกับการทดลองช่วงที่ 1 แต่จะเปลี่ยนจากการใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส ทำการเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 90 วัน โดยมีน้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน ระหว่างการทำทดลองได้มีการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1 และเพิ่มการวิเคราะห์ไนเตรทอีกพารามิเตอร์หนึ่ง เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทจากน้ำเสียโรงงานผลิตสแตนเลส

ถังกรองที่ใช้เป็นถังอะคลิคลิส สูง 2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ใส่พลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 2 เซนติเมตร ลงไปในถังกรองสูง 1.4 เมตร การทดลองครั้งนี้ทำที่ภาชนะอุณหภูมิห้อง โดยกำหนดอัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 24 ลิตรต่อวัน และความเร็วไหลขึ้นในถังกรองเท่ากับ 0.5 เมตรต่อชั่วโมง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงประสิทธิภาพ และความเหมาะสมกับระบบถังกรองไร้อากาศ ในการบำบัด  
ซัลเฟตและไนเตรทในน้ำเสีย

1.4.2 ทราบถึงอัตราส่วนซีโอไลท์ที่เหมาะสมในการบำบัดซัลเฟต โดยใช้ระบบถังกรองไร้อากาศ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment)

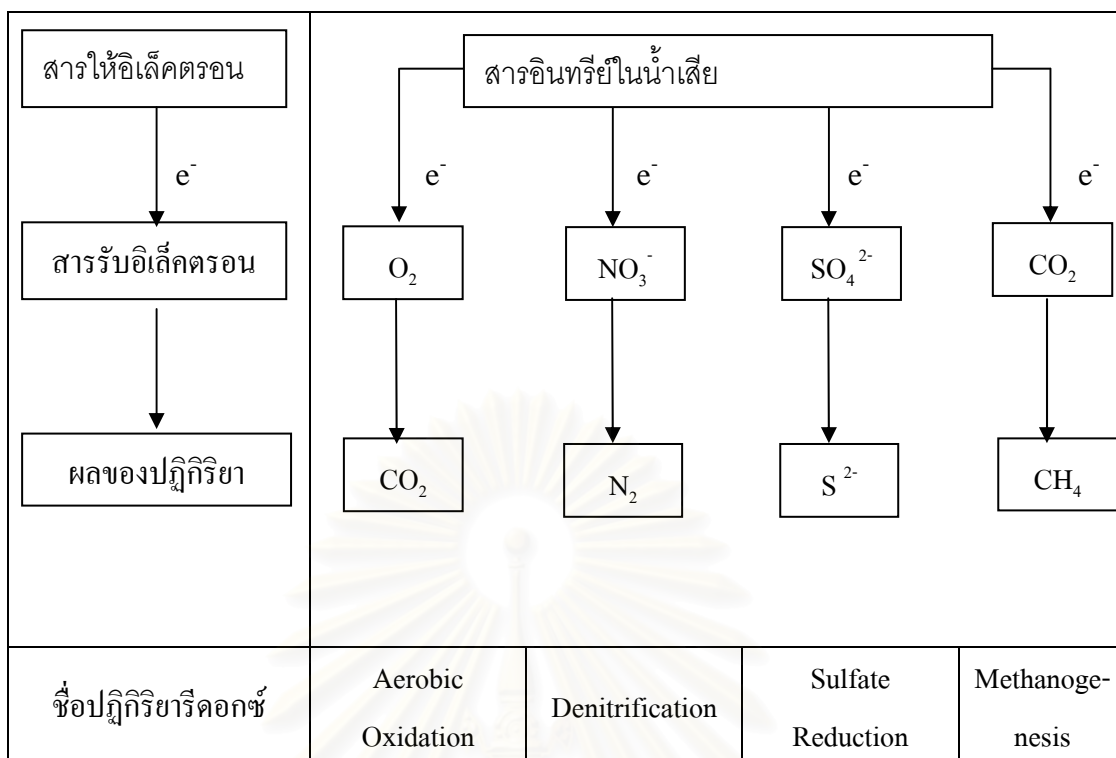
##### 2.1.1 กลไกพื้นฐานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย

กลไกพื้นฐานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย คือ ปฏิกิริยาเคมีที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) และตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ซึ่งก็คือปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) รีดักชัน (Reduction) หรือรีดอกซ์ (Redox)

สารให้อิเล็กตรอนในน้ำเสียจะเป็นสารอินทรีย์ หรือมวลสารในน้ำเสีย ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานให้จุลชีพ ในขณะที่ตัวรับอิเล็กตรอนจะมีหลายชนิด และผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อตัวรับอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ชนิดสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายจะสามารถจำแนกกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ ดังตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 ตัวอย่างเช่นถ้าสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายเป็นออกซิเจน เรียกว่าการออกซิโดซ์แบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Oxidation) ถ้าใช้สารอินทรีย์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจะเรียกว่าการหมัก (Fermentation) และถ้าใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนเรียกว่า ปฏิกิริยาผลิตมีเทน (Methanogenesis) เป็นต้น

##### ตารางที่ 2.1 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย

ลำดับที่	สารรับอิเล็กตรอน	ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น	ชื่อของปฏิกิริยา
1	ออกซิเจน	คาร์บอนไดออกไซด์	Aerobic Oxidation
2	ไนเตรท	ไนโตรเจน	Denitrification
3	ซัลเฟต	ซัลไฟด์	Sulfate Reduction
4	คาร์บอนไดออกไซด์	มีเทน	Methanogenesis
5	สารอินทรีย์	สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กลง	Fermentation



**รูปที่ 2.1** ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

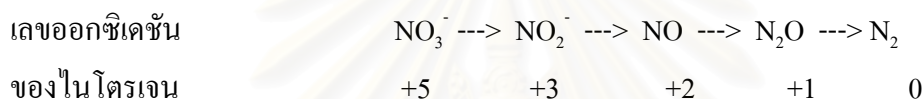
สำหรับในกรณีที่มีสารรับอิเล็กตรอนหลายชนิดในน้ำเสียหนึ่ง ๆ เมื่อพิจารณาเฉพาะปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นหลัก จะสามารถเรียงลำดับปฏิกิริยาตามปริมาณพลังงานที่ได้รับจากมากไปน้อยตามชนิดของสารรับอิเล็กตรอนในกรณีที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดเดียวกันได้ดังนี้ คือ ออกซิเจน, ไนเตรท, ซัลเฟต และคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ และโอกาสจากมากไปน้อยที่ปฏิกิริยาต่าง ๆ จะเกิดขึ้นก็จะเป็นไปตามลำดับดังกล่าวด้วยเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามยังจะต้องพิจารณาปัจจัยด้านอื่น ๆ เช่น ช่วงอุณหภูมิและพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญ เป็นต้น และปัจจัยที่สำคัญอื่น ๆ จึงจะได้ภาพรวมที่แท้จริงของการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย โดยปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์จะมีประโยชน์ในการใช้เป็นแนวทางที่สำคัญในการพิจารณาโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ในเบื้องต้น

### 2.1.1.1 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) คือ การรีดักชันของไนเตรทในสภาวะไร้อากาศ โดยกลุ่ม จุลินทรีย์พวกเฮเทอโรโทรฟิค แฟคัลเททีฟแบคทีเรีย (*Heterotrophic Facultative Bacteria*) เช่น *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas* และ *Spirillum* เป็นต้น โดยไนเตรทจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ รูปแบบของ



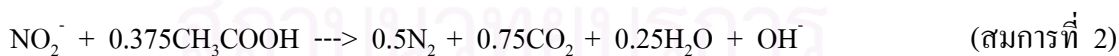
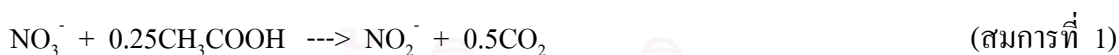
กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเพื่อลดรูป หรือกำจัดไนเตรทออกจากระบบมี 2 ทาง คือ แอสสิมิลาทอรี (Assimilatory) เป็นการรีดักชันไนเตรทไปเป็นแอมโมเนีย ใช้สำหรับการสังเคราะห์เซลล์จุลินทรีย์ รูปแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อระบบบำบัดไม่มีแอมโมเนีย หรือมีไม่พอ ซึ่งขั้นตอนนี้มีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับรูปแบบที่สอง คือ ดิสสิมิลาทอรี (Dissimilatory) เป็นการรีดักชันของไนเตรทโดยเอนไซม์ไปเป็นก๊าซไนโตรเจน วิธีนี้เป็นหลักใหญ่ของกระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพและถือว่าเป็นดีไน-ตริฟิเคชันที่แท้จริง ในรูปแบบนี้การหายใจของจุลินทรีย์จะเป็นแบบแอนอกสิก (Anoxic) คือสถานะที่จุลินทรีย์ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ แต่ใช้ออกซิเจนในสารประกอบไนเตรท จุลินทรีย์ในช่วงนี้ต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนและใช้ในเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมแหล่งคาร์บอนเข้าสู่ระบบ เพื่อใช้สารอินทรีย์ในการลดรูปไนโตรเจนทุกขั้นตอน ตั้งแต่ไนเตรทไปเป็นไนไตรท์ ก๊าซไนตริกออกไซด์ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ไปจนถึงก๊าซไนโตรเจน



ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยมาก จึงถูกปล่อยสู่บรรยากาศได้ง่าย แต่ในบางกรณีอาจเกิดก๊าซระดับกลางคือ ไนตรัสออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) ซึ่งทำให้ไม่สามารถกำจัดไนโตรเจนได้สมบูรณ์

ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric) สำหรับดีไนตริฟิเคชันที่ใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งคาร์บอน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

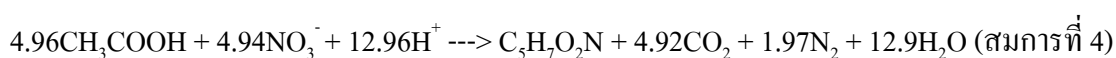
**ขั้นตอนที่ 1 และ ขั้นตอนที่ 2**



**ปฏิกิริยารวม คือ**



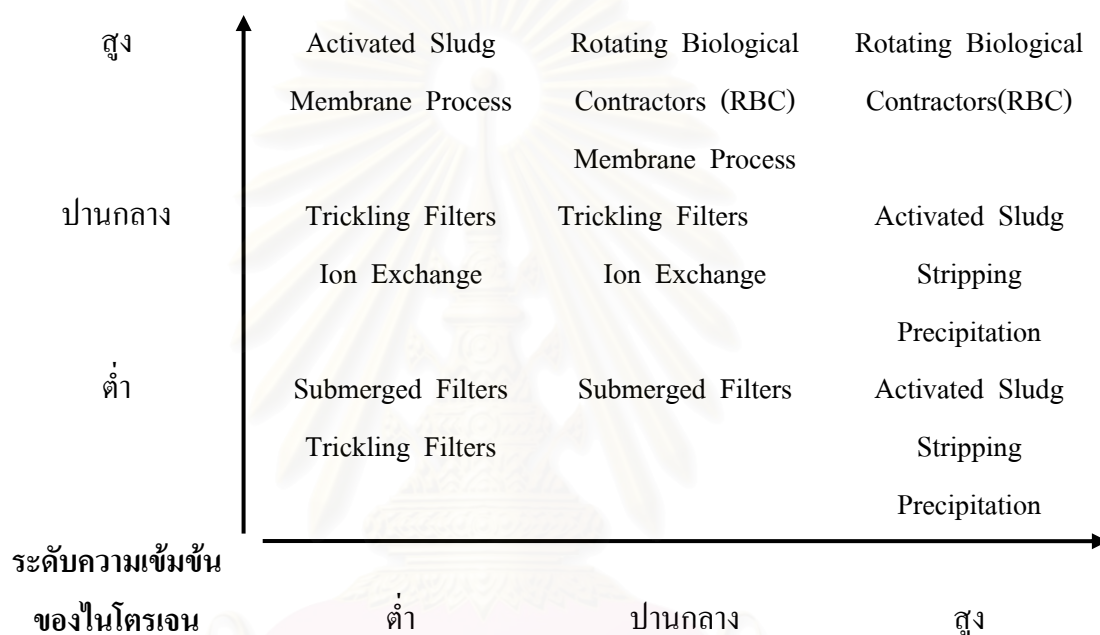
**ปฏิกิริยาเมื่อรวมการสร้างเซลล์ คือ**



จากสมการที่ 1 ถึง 3 สัดส่วนมวลของกรดอะซิติกต่อไนเตรทไนโตรเจนและมวลของกรดอะซิติกต่อไนไตรท์ เพื่อไนโตรเจนที่เกิดดีไนตริฟิเคชันสมบูรณ์ คือ 2.68 และ 1.61

ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดเป็นสัดส่วน COD / NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N และ COD/NO<sub>2</sub>-N จะเท่ากับ 2.86 และ 1.72 ตามลำดับ แต่ปริมาณกรดอะซิดิกที่ต้องเติมลงไปต้องมากกว่าค่านี้เล็กน้อย เนื่องจากแหล่งคาร์บอนส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์

การกำจัดไนเตรทโดยใช้ไนเตรทชีวภาพ เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป เพราะนอกจากจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงแล้ว ยังพบว่า ใ้ใช้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและเดินระบบต่ำกว่าระบบการกำจัดแบบอื่น เมื่อทำการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนต่ำ หรือปานกลาง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและเดินระบบของกระบวนการกำจัดไนโตรเจนแบบต่าง ๆ

การใช้กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเพื่อกำจัดไนเตรทในน้ำเสีย สารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ สำหรับน้ำเสียที่สกปรกมาก หรือมีความเข้มข้นสูง นิยมบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ ในระหว่างการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกย่อยและเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนีย ขั้นตอนต่อไปจะทำการกำจัดสารอินทรีย์ที่เหลือด้วยระบบบำบัดแบบใช้อากาศ แอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรท ทำนองเดียวกับระบบบำบัดแบบใช้อากาศ ขั้นตอนเดียว สารอินทรีย์ไนเตรทจะถูกย่อยและเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียและไนเตรท ดังนั้นระบบบำบัดแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศโดยทั่วไป จะไม่สามารถกำจัดสารประกอบออกไปจากน้ำเสียได้ โดยเหลืออยู่ในรูปไนเตรท จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการเพื่อกำจัดไนเตรทเพิ่มเติม สำหรับดีไนตริฟิเคชันได้รับความนิยมในการกำจัดไนเตรทในน้ำเสีย เนื่องจากออกแบบง่าย และเพิ่มเติมระบบบำบัดได้ดี และการกำจัดไนเตรทพบว่าใช้ค่าใช้จ่ายต่ำ

Smith และคณะ (1972) ศึกษาผลของการใช้ถังกรองดีในตรีพีเคชันขนาด 250 แกลลอน/วัน โดยใช้ตัวกลางขนาดต่าง ๆ กัน พบว่าที่อัตราบรรจุทุกต่อพื้นที่หน้าตัดคงที่ 7 แกลลอน/ตารางฟุต-นาที่ กำจัดไนเตรทได้ 90 % โดยใช้อัตราส่วนเมทานอล/ไนเตรท เท่ากับ 2.5 Contact Time 5 นาที สำหรับทรายหยาบ และอัตราส่วนเมทานอล/ไนเตรท เท่ากับ 2.75 Contact Time 15 นาที สำหรับหินขนาด ¾ นิ้ว

Polprasert และ Park (1986) ศึกษาประสิทธิภาพดีในตรีพีเคชันโดยใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนในถังกรองขนาด 1.44 และ 1.08 ลูกบาศก์เมตร กำจัดไนเตรทได้ 89-98% เมื่อใช้ความเข้มข้นของไนเตรทในช่วง 20-410 มิลลิกรัม/ลิตร (50-550 กรัม/ลูกบาศก์เมตร-วัน) พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลาง 165 และ 131 ตารางเมตร/ลูกบาศก์เมตร ไม่มีความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัด

Hanaki และ Polprasert (1989) ศึกษาประสิทธิภาพดีในตรีพีเคชันในถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร พบว่าอัตราส่วนเมทานอล/ไนเตรท ที่กำจัดไนเตรทและไนไตรท์ได้สมบูรณ์ มีค่าระหว่าง 2.30-2.65 ถ้าอัตราส่วนเมทานอล/ไนเตรท สูงกว่า 2.65 จะทำให้มีการผลิตมีเทนร่วมด้วย

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบลักษณะของกระบวนการกำจัดไนเตรทโดยวิธีต่าง ๆ

ข้อมูล	กระบวนการกำจัด		
	การแลกเปลี่ยนไอออน	ดีในตรีพีเคชัน	รีเวอสออสโมซิส
สถานภาพกระบวนการ	Full Scale	Full Scale	มีการพัฒนาสำหรับ Full Scale แต่ไม่ใช่สำหรับไนเตรทโดยเฉพาะ
ระยะเวลาเริ่มต้นระบบ	นาที่	3 สัปดาห์	นาที่
ควบคุมอัตโนมัติได้	ดี	บางส่วน	ดี
ผลจากอุณหภูมิต่ำ	ไม่มีผล	ต้องไม่ต่ำกว่า 2-6 °C	ไม่มีผล
การกำจัดของเสีย	ต้องมีการกำจัด Regenerant	ต้องกำจัดชีวมวล ซึ่งมีเล็กน้อย	ต้องกำจัดกากของเสีย ที่มี TDS สูง
การบำบัดขั้นต่อไป	จำเป็นต้องมี	จำเป็นต้องมี	ไม่ต้องมี
การเดินระบบ	คงตัว	ต้องดูแลใกล้ชิด	คงตัว
ผลกระทบของคุณภาพน้ำต่อกระบวนการ	มีผลกระทบจากซัลเฟต สารอินทรีย์ และคลอไรด์	มีผลกระทบจากออกซิเจน	มีผลกระทบจากสารอินทรีย์และ TDS

### 2.1.1.2 กระบวนการซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate Reduction)

#### 2.1.1.2.1 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria)

สิ่งมีชีวิตหลายชนิดในธรรมชาติทั่ว ๆ ไป ไม่ว่าจะเป็นพืชชั้นสูง สัตว์ ร่า และเซลล์พวกโพรคาริโอตหลายชนิดสามารถใช้ซัลเฟตเป็นแหล่งซัลเฟอร์ที่ใช้ในการสร้างเซลล์ แต่ความสามารถในการใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจำกัดอยู่แต่ในแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเท่านั้น แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเค็ชขาด (*Desulfovibrio*) ก่อนข้างจะทนต่อออกซิเจน และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางส่วนสามารถรีดิวซ์ไนเตรทเป็นแอมโมเนียได้ด้วย จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียเคโมเฮเทอโรโทรฟ ค้ำรงชีพและเจริญเติบโตโดยได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ลักษณะเด่นของแบคทีเรียกลุ่มนี้คือ ความสามารถในการรีดิวซ์ซัลเฟตทำให้ซัลเฟตเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซัลไฟด์ เนื่องจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนโมเลกุล หรือสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด ในกรณีที่สารให้อิเล็กตรอน คือ ไฮโดรเจนโมเลกุล หรืออะซิเตต ขั้นตอนดังกล่าวนี้จัดเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบ ไร้ออกซิเจน เช่นเดียวกับขั้นตอนการสร้างมีเทนตามปกติ ดังนั้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ ไร้ออกซิเจนที่มีซัลเฟต จึงมักพบแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอยู่ร่วมกับแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทนอยู่เสมอ ในการแบ่งกลุ่มของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตอย่างกว้าง ๆ ตามความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อการค้ำรงชีพและเจริญเติบโต สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ไม่สมบูรณ์ (Incompletely Oxidizing Sulfate Reducing Bacteria ; I-SRB) โดยสารอินทรีย์ที่เหลือจากการย่อยสลายก็คือ อะซิเตต และ แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ (Completely Oxidizing Sulfate Reducing Bacteria ; C-SRB) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถใช้สารอาหารได้หลายชนิด ซึ่งจะแตกต่างกับแบคทีเรียสร้างมีเทนตรงที่สามารถใช้สารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 1 อะตอมได้ แต่ไม่สามารถใช้สารอินทรีย์กลุ่มเมทิลได้ ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่เป็นสารอาหารและปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตแสดง ดังตารางที่ 2.3

เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่ม I-SRB ไร้ออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายสารอินทรีย์และไม่สามารถนำอะซิเตตไปใช้ได้แม้จะเป็นสารอาหารที่มีอยู่เพียงประเภทเดียวก็ตาม มีสาเหตุเนื่องมาจาก I-SRB ขาดกลไกที่เกี่ยวข้องกับการจัดการเอนไซม์บางชนิดที่มีบทบาทต่อการย่อยอะซิเตตนั่นเอง อย่างไรก็ตาม I-SRB อาจใช้อะซิเตตเป็นแหล่งคาร์บอนได้เมื่อสารให้อิเล็กตรอนคือไฮโดรเจน หรือฟอร์มเมต ข้อแตกต่างอีกประการหนึ่งของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตทั้ง 2

กลุ่มนี้คือ แบคทีเรียกลุ่ม I-SRB มีอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วกว่ากลุ่ม C-SRB เมื่ออยู่ในภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่ม

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตหลายชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ด้วยการรีดิวซ์ไนเตรทให้เป็นแอมโมเนียได้ในกรณีที่มีไนเตรท หรือสามารถใช้ไทโอซัลเฟต ( $S_2O_3^{2-}$ ) และซัลเฟอร์ ( $S^0$ ) ได้ด้วย นอกจากนี้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตยังสามารถใช้สารอินทรีย์บางตัวเป็นแหล่งพลังงาน โดยการเกิดการหมักได้ในกรณีที่ไม่มีซัลเฟต หรือตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถหมักไพรูเวตเป็นอะซิเตต คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนได้เมื่อไม่มีซัลเฟต แต่ไม่สามารถหมักแลคเตต หรือเอทานอลได้ เพราะได้พลังงานไม่เพียงพอต่อการดำรงชีพ ดังนั้นในกรณีที่ไม่มีซัลเฟตอยู่แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางส่วนก็ยังมีชีวิตรอดอยู่ได้ แต่พลังงานที่ได้จากการหมักมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ได้จากการรีดิวซ์ซัลเฟต ดังนั้นแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในระบบให้หมักก่อนจึงจะหันไปใช้กระบวนการเฟอร์เมนเตชัน

ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตคือ อุณหภูมิ โดยทั่วไปแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อบริสุทธิ์ จะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในช่วง 30-40 °C การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตค่อนข้างมาก โดยมีรายงานการวิจัยที่พบว่า การเกิดซัลเฟตรีดักชันโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในดินตะกอนน้ำเค็มลดลงระหว่าง 2-3.9 เท่า เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจากช่วงที่เหมาะสม 10 °C (Rintalla และ Lettinga, 1992; Visser, et al., 1993 อ้างถึงใน Visser, 1994)

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ I-SRB และ C-SRB (Widdel, 1988)

ลำดับที่	สารให้อิเล็กตรอน	แบคทีเรีย	ปฏิกิริยา
1	ไฮโดรเจนหรือฟอร์มเมต	I-SRB และ C-SRB	$4H_2 + SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow 4H_2O + HS^-$
2	อะซิเตต	C-SRB	$CH_3COO^- + SO_4^{2-} \rightarrow 2HCO_3^- + HS^-$
3	โพรไพโอเนต	C-SRB I-SRB	$4CH_3CH_2COO^- + 7SO_4^{2-} \rightarrow 12HCO_3^- + 7HS^- + H^+$ $4CH_3CH_2COO^- + 3SO_4^{2-} \rightarrow 4CH_3COO^- + 4HCO_3^- + 3HS^- + H^+$
4	บิวทิเรต	C-SRB I-SRB	$2CH_3(CH_2)_2COO^- + 5SO_4^{2-} \rightarrow 8HCO_3^- + 5HS^- + H^+$ $2CH_3(CH_2)_2COO^- + SO_4^{2-} \rightarrow 4CH_3COO^- + HS^- + H^+$
5	แลคเตต	C-SRB I-SRB	$2CH_3CHOHCOO^- + 3SO_4^{2-} \rightarrow 6HCO_3^- + 3HS^- + H^+$ $2CH_3CHOHCOO^- + SO_4^{2-} \rightarrow 2CH_3COO^- + 2HCO_3^- + HS^- + H^+$
6	เบนโซเอต	C-SRB I-SRB	$4C_6H_5COO^- + 15SO_4^{2-} + 16H_2O \rightarrow 28HCO_3^- + 15HS^- + 9H^+$ $4C_6H_5COO^- + 3SO_4^{2-} + 16H_2O \rightarrow 12CH_3COO^- + 4HCO_3^- + 3HS^- + 9H^+$



ความต้องการเกลือและความทนต่อเกลือ ความต้องการเกลือของแบคทีเรียรีดิคัลเฟตขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแบคทีเรีย ซึ่งแยกเป็นพวกที่ได้จากแหล่งน้ำเค็มหรือน้ำกร่อยกับพวกที่ได้จากแหล่งน้ำจืด แบคทีเรียรีดิคัลเฟตที่ได้จากแหล่งน้ำเค็ม หรือน้ำกร่อยมักต้องการปริมาณเกลือในระดับหนึ่งจึงจะเจริญเติบโตได้ดี และในทางตรงข้าม ถ้านำแบคทีเรียรีดิคัลเฟตกลุ่มนี้มาเลี้ยงในสภาพที่มีความเค็มต่ำ ก็จะได้ผลในทางลบต่อการเจริญเติบโต ชนิดและปริมาณของเกลือสำหรับแบคทีเรียรีดิคัลเฟตจากแหล่งน้ำเค็มที่เหมาะสมคือ โซเดียมคลอไรด์ 20 กรัม/ลิตร นอกเหนือจากเกลือทั้งสองชนิดนี้แล้ว บางสายพันธุ์ยังต้องการแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ 0.5 กรัม/ลิตร ปริมาณความต้องการเกลือจะลดลงสำหรับกลุ่มที่มาจากน้ำกร่อย ส่วนแบคทีเรียรีดิคัลเฟตที่มาจากน้ำจืดอาจถูกยับยั้งการเจริญเติบโตได้ถ้ามีโซเดียมคลอไรด์ในระดับที่เข้มข้นเท่ากับที่มีอยู่ในน้ำทะเล (ปริมาณ 27 กรัม/ลิตร) อย่างไรก็ตามมีรายงานถึงความสามารถในการปรับตัวของแบคทีเรียรีดิคัลเฟตจากแหล่งน้ำจืดบางสายพันธุ์ ซึ่งสามารถทนอยู่ได้ในตัวกลางที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงเท่าในระดับความเข้มข้นในน้ำทะเล และบางพวกจะสามารถปรับตัวให้ได้ทั้งในระดับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 60 กรัม/ลิตร หรือแม้แต่ในสภาพที่ไม่มีโซเดียมคลอไรด์อยู่เลยก็ตาม

พีเอช ช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียรีดิคัลเฟต จะอยู่ในช่วงที่เป็นกลาง คือ ประมาณ 7 และมักถูกยับยั้งเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 6 หรือสูงกว่า 9 อย่างไรก็ตามพบว่าปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ในแหล่งน้ำจากเหมืองแร่ซึ่งมีค่าพีเอชในแหล่งน้ำประมาณ 3-4 แต่เมื่อนำแบคทีเรียซัลเฟตจากแหล่งน้ำนี้มาเพาะเชื้อและทดสอบกลับพบว่า ถูกยับยั้งการเจริญเติบโตเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6 ทำให้เกิดข้อสันนิษฐานว่าแบคทีเรียรีดิคัลเฟตที่อยู่ในแหล่งน้ำของเหมืองแร่อาจมีสภาพทางกายภาพเล็ก ๆ เช่น โพร่ง หรือซอกหินขนาดเล็กมาก ๆ (Microniches) หรือสภาพแวดล้อมในระดับโมเลกุลรอบ ๆ ตัวของแบคทีเรีย (Microenvironment) มีค่าพีเอชที่สูงกว่าพีเอชของทั้งระบบเนื่องจากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน โดยแบคทีเรียรีดิคัลเฟตเป็นปฏิกิริยาที่ใช้โปรตอน หรือไฮโดรเจนไอออน การใช้สารอาหารของแบคทีเรียรีดิคัลเฟตจึงสร้างสภาพต่างให้กับระบบ (ยกเว้นกรณีการเกิดซัลเฟตรีดักชันของสารอาหารที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนมาก ซึ่งจะสร้างสภาพกรดแต่จำนวนแบคทีเรียรีดิคัลเฟตประเภทนี้ก็มีอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่ามาก ซึ่งจะสร้างสภาพกรดแต่จำนวนแบคทีเรียรีดิคัลเฟตสามารถดำรงชีวิตได้แม้พีเอชโดยรวมของระบบจะมีค่าต่ำก็ตาม)

#### 2.1.1.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียกลุ่มต่าง ๆ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีซัลเฟต

ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบไร้ออกซิเจน ขึ้นอยู่กับสารรับอิเล็กตรอน และประเภทของแบคทีเรียในระบบ ในกรณีที่มีซัลเฟตอยู่ในระบบบำบัดแบบ

ไร้ออกซิเจน กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบจะเกิดขึ้นจากการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียสร้างกรด, แบคทีเรียสร้างอะซิเตต, แบคทีเรียสร้างมีเทน และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต โดยเฉพาะแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียสร้างมีเทนจัดเป็นแบคทีเรียที่มีความสำคัญต่อขั้นตอนสุดท้ายในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่มีซัลเฟต โดยแบคทีเรียทั้งสองชนิดต่างก็สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ (Mineralization) นอกจากนี้แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดยังมีความคล้ายคลึงกันในเชิงสรีระวิทยาหลายประการ คือมีลักษณะเป็นแบคทีเรียไร้ออกซิเจนชนิดเด็คขาด มีช่วงอุณหภูมิและพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตคล้ายกัน และมีลักษณะเป็นแบคทีเรียชนิดเคโมเฮเทอโรโทรฟปร่วมกัน ดังนั้นจึงสามารถพบแบคทีเรีย 2 กลุ่มนี้ร่วมกันกระบวนการการบำบัดแบบไร้อากาศที่มีซัลเฟตนอกเหนือไปจากแบคทีเรียสร้างกรดรูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศเมื่อน้ำเสียมีซัลเฟต เนื่องจากแบคทีเรียหลายกลุ่มในระบบใช้สารอาหารประเภทเดียวกัน ในขณะที่แบคทีเรียบางกลุ่มก็ใช้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งเป็นสารอาหาร ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียกลุ่มต่าง ๆ ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนจึงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างซับซ้อน แต่เราพอจะแบ่งความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแบคทีเรียกลุ่มต่าง ๆ ออกได้ดังนี้คือ

กลุ่มที่ 1 การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน (MPN) และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) ในการแย่งใช้ไฮโดรเจนและกรดอะซิติกเป็นสารอาหาร และผลของการแข่งขันเป็นการกำหนดผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศว่าจะเป็นการกำขี้มีเทนหรือซัลไฟด์ การแข่งขันระหว่างแบคทีเรีย 2 กลุ่มนี้จะเป็นการแย่งใช้สารอาหารคือ ไฮโดรเจนและกรดอะซิติก ซึ่งสารอาหารที่สำคัญของแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยประมาณได้ว่า 30% ของซีโอดีที่ถูกย่อยสลายในกระบวนการไร้อากาศ เป็นการย่อยโดยแบคทีเรียที่ใช้กำขี้ไฮโดรเจนเป็นสารอาหาร (Hydrogenotrophic MPB;H-MPB และ Hydrogenotrophic SRB;H-SRB) และอีก 70% เป็นการย่อยโดยแบคทีเรียที่ใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหาร (Acetotrophic MPB;A-MPB และ Acetotrophic SRB; A-SRB) ความสามารถในการแข่งขันระหว่างแบคทีเรีย 2 กลุ่มนี้อาจพิจารณาได้จากคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิก ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) และแบคทีเรียสร้างมีเทน (MPB) (Thauer, et al.,1977)

Reaction	$\Delta G^\circ$ (kJ/react.)
Hydrogen-consuming	
By H-SRB : $4H_2 + SO_4^{2-} + H^+ \rightarrow HS^- + 4H_2O$	-38
By H-SRB : $4H_2 + HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$	-32.7

ตารางที่ 2.4 ค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (SRB) และแบคทีเรียสร้างมีเทน (MPB) (Thauer, et al.,1977) (ต่อ)

Reaction	$\Delta G^\circ$ (kJ/react.)
Acetate-consuming	
By A-SRB : $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HS}^- + 2\text{HCO}_3^-$	-39.5
By A-SRB : $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HS}^- + 2\text{HCO}_3^-$	-28.2

จากตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีความได้เปรียบมากกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน ทั้งที่ใช้ไฮโดรเจนและอะซิเตตเป็นอาหาร เนื่องจากได้ค่า  $\Delta G^\circ$  เป็นลบมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกหลายประการที่ทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตไม่สามารถเอาชนะแบคทีเรียสร้างมีเทนได้โดยเด็ดขาด

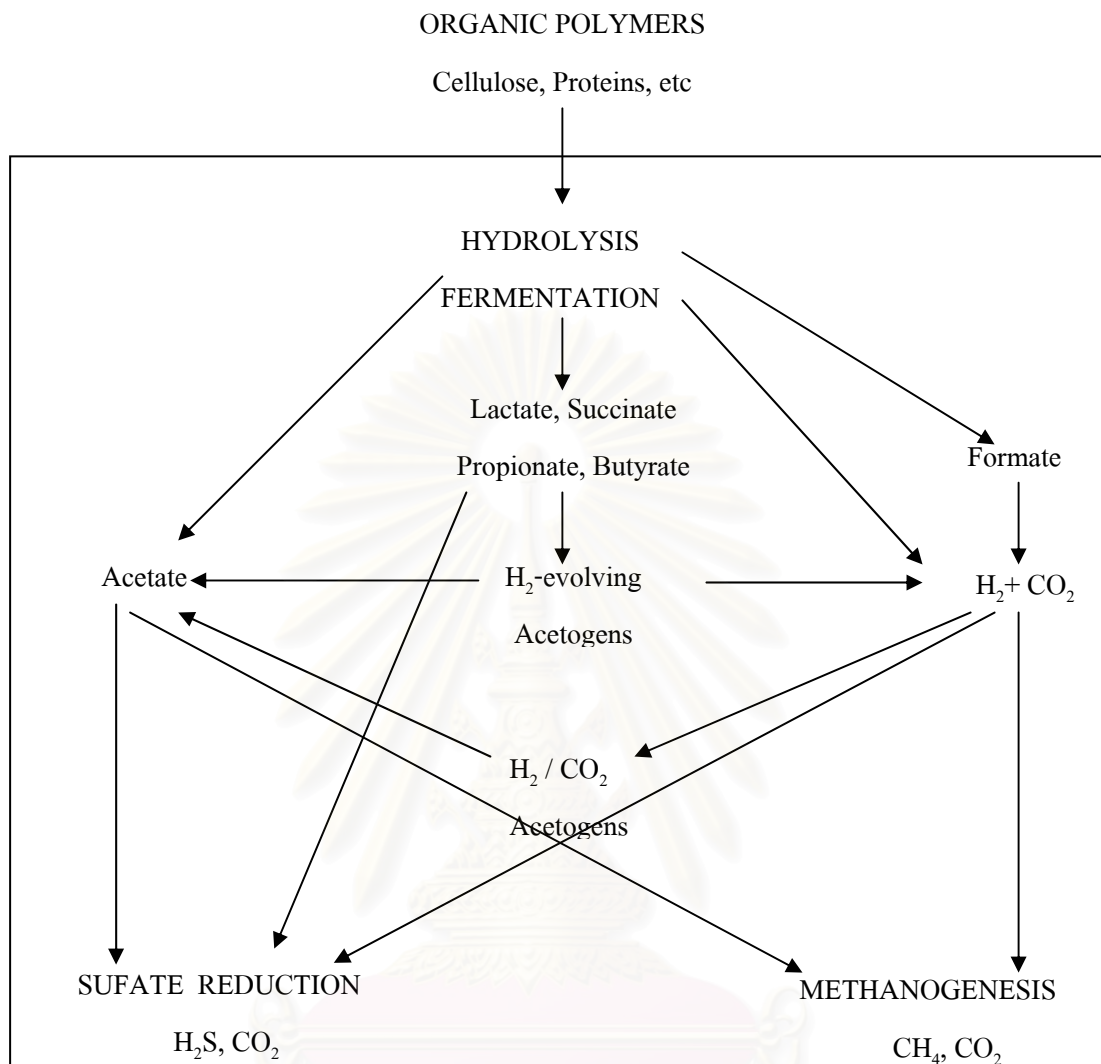
กลุ่มที่ 2 การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก ในการแข่งใช้กรดโพธิโอนิกและกรดบิวทริกเป็นสารอาหาร ถึงแม้ว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีความสามารถในการใช้สารอาหารที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมสูงได้ (*Desulfoarculus* และ *Thermodesulfobacter* ใช้กรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมได้สูงถึง 18 อะตอม) แต่ความสามารถดังกล่าวก็จำกัดอยู่เฉพาะบางสปีชีส์ สารอาหารที่ใช้โดยทั่วไปมีเพียงไฮโดรเจน, แลกเตต และพรูเวต เท่านั้น ส่วนสารอาหารอื่นนอกเหนือจากนี้จะมีข้อจำกัดในการใช้มากขึ้น (Madigan, et al.,1997) การแข่งขันเพื่อแข่งใช้สารอาหารกับแบคทีเรียสร้างอะซิเตตจึงน่าจะเกิดขึ้นค่อนข้างรุนแรงในสารอาหารทั้งสามชนิดนี้ แต่พรูเวตเป็นสารอินทรีย์ที่สําคัญมากในกระบวนการหมัก ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ไม่ใช้ออกซิเจนมีเส้นทางที่หลากหลายมากขึ้นหากมีซัลเฟตอยู่ในระบบด้วย

โดยเส้นทางการย่อยสลายอาจแยกออกได้เป็น 2 เส้นทาง คือ สารอินทรีย์ในระบบถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียสร้างกรด และถูกย่อยสลายต่อกลายเป็นอะซิเตตและไฮโดรเจนผ่านแบคทีเรียสร้างอะซิเตต แล้วจึงถูกแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียสร้างมีเทนย่อยสลายต่อ และ สารอินทรีย์ในระบบถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียสร้างกรด และถูกย่อยต่อโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตโดยตรง ถ้าเป็นพวกที่ย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และซัลไฟด์ แต่ถ้าเป็นพวกที่ย่อยสลายได้ไม่สมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น อะซิเตตกับซัลไฟด์ อะซิเตตที่เกิดขึ้นจะถูกใช้ต่อ โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่สามารถใช้อะซิเตตได้และแบคทีเรียสร้างมีเทน

แต่จนบัดนี้ ความรู้เกี่ยวกับการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างอะซิเตตยังคงมีไม่มากนัก เส้นทางใดจะเป็นเส้นทางที่เกิดขึ้นจริงในระบบบำบัดไร้ออกซิเจนยังคงไม่เป็นที่กระจ่างชัด Visser (1994) สันนิษฐานว่าที่ความเข้มข้น ซัลเฟตสูง แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะเอาชนะแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกได้เนื่องจากมีสมบัติในการเจริญเติบโตที่เหนือกว่า ซึ่งจากผลการทดลองในตะกอนน้ำเค็ม พบว่ากรดไขมันระเหย เช่น โพรไพโอเนต และบิวทิเรตถูกย่อยสลายโดยตรงโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Banat และ Nadwell, 1984 อ้างถึงใน Visser, 1994)

Visser, et al., (1993d) แสดงให้เห็นว่าในถังกรองที่ทำงานภายใต้ภาวะที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตสูง (เท่ากับ 10) การออกซิไดซ์โพรไพโอเนต โดยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียสร้างอะซิเตตกับแบคทีเรียบริโกลไฮโดรเจน จะเป็นเส้นทางหลักในการย่อยสลายโพรไพโอเนต แต่ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่ำมีซัลเฟตมากเกินไป การออกซิไดซ์โพรไพโอเนตโดยตรงโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดเส้นทางในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และเป็นตัวกำหนดว่าแบคทีเรียชนิดใดจะแย่งใช้สารอินทรีย์ได้มากกว่ากัน

อย่างไรก็ตาม ความรู้เกี่ยวกับการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างอะซิเตต และงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับแบคทีเรียทั้งสองชนิดนี้โดยตรงก็ยังมีไม่มากนัก จึงเป็นการยากที่จะระบุอย่างชัดเจนว่าแบคทีเรียชนิดใดจะเป็นแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ แต่สามารถสรุปได้ว่า แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีบทบาทมากขึ้นในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหย ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการหมักเมื่ออัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตมีค่าต่ำ



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการไร้อากาศเมื่อน้ำเสียมีซัลเฟต (Fenchel และ Finly, 1995)

### 2.1.1.2.3 การยับยั้งเนื่องจากสารประกอบซัลเฟอร์

การบำบัดแบบไร้อากาศของน้ำเสียที่มีสารประกอบซัลเฟอร์อาจถูกกีดขวางด้วยปรากฏการณ์ยับยั้ง สาเหตุหลักของการยับยั้งนี้มาจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้แบคทีเรียถูกยับยั้งการทำงาน

การยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียเนื่องจากซัลไฟด์ (Inhibition by Sulfide) การศึกษาส่วนใหญ่เกี่ยวกับความเป็นพิษ เนื่องจากซัลไฟด์เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตมีเทนจากอะซิเตต ซัลไฟด์เป็นสารที่จำเป็นกับแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) Speece (1983) กล่าวว่า ความเข้มข้นซัลไฟด์ 11.5 มิลลิกรัม/ลิตร ของไฮโดรเจนซัลไฟด์ เหมาะสมสำหรับ

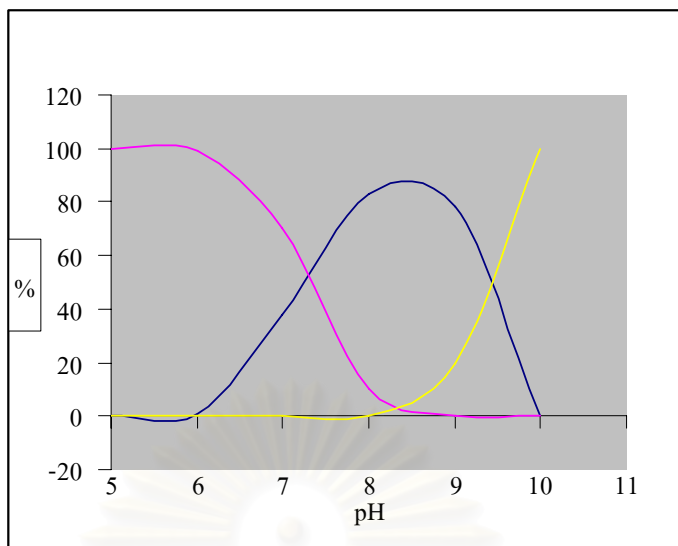


การเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทน และความเข้มข้นสูงสุดของไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวที่ขอมได้มีค่า 145 มิลลิกรัมซัลเฟอร์/ลิตร ซึ่งหมายความว่า กระบวนการไร้อากาศสามารถดำเนินการได้ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในช่วงแคบ ๆ

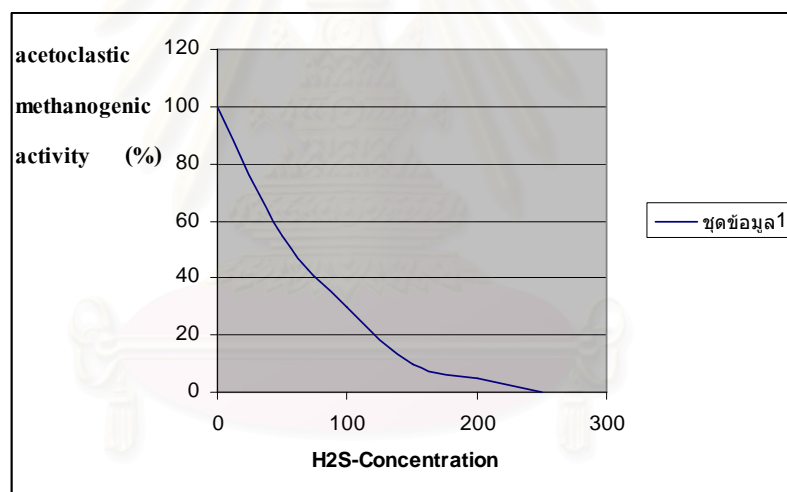
ปัจจัยสำคัญของการยับยั้งเนื่องจากซัลไฟด์จะขึ้นอยู่กับพีเอช ผลของพีเอช ที่มีผลต่อปริมาณซัลไฟด์ในรูปแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.4 เป็นที่ยอมรับว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายที่ไม่แตกตัวเป็นตัวการที่ทำให้เกิดการยับยั้ง โมเลกุลที่ไม่แตกตัวสามารถซึมผ่านผนังเซลล์ได้ง่ายกว่าโมเลกุลที่อยู่ในรูปของไอออน ไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงเป็นพิษมากกว่าซัลไฟด์ในรูปไอออน แต่ในกรณีที่มีความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนสูง ไอออนของซัลไฟด์ก็เป็นพิษต่อเซลล์ได้เช่นเดียวกัน เหตุผลที่ซัลไฟด์เป็นพิษต่อแบคทีเรียนั้น Conn (1987 อ้างถึงใน McCartney และ Oleszkiewicz, 1993) อธิบายว่าเมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์ผ่านเซลล์เมมเบรนเข้าสู่ไซโตพลาสซึมได้ เอนไซม์ภายในเซลล์จะถูกดีเนเจอร์ (Denature) โดยการสร้าง Sulfide และ Disulfide Cross-links ระหว่างลูกโซ่โพลีเปปไทด์ รวมทั้งยังอาจเข้าไปรบกวนการทำงานของโคเอนไซม์เอ และเอ็ม ทำให้โคเอนไซม์ที่สำคัญต่อการใช้สารอาหารไม่ทำงาน แต่กลไกของการยับยั้งที่แท้จริงยังไม่เป็นที่แน่ชัด

แบคทีเรียที่อ่อนไหวต่อไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าแบคทีเรียอื่น ๆ ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ คือ อะซิโตคลาสติกเมทาโนเจน (Acetoclastic Methanogens) การยับยั้งของแบคทีเรียเหล่านี้เกิดขึ้นโดยการสะสมของอะซิเตต เป็นผลให้พีเอชในปฏิกรณ์ต่ำลง ทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ความสามารถในการรอดทนของอะซิโตคลาสติกเมทาโนเจน จึงเป็นตัวจำกัดของวิธีบำบัดแบบไร้อากาศ จากการทดลองของ Kroiss และ Plahl-Wabnegg (1983) ซึ่งให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงกว่า 30 มิลลิกรัมซัลเฟอร์/ลิตร กิจกรรมของอะซิโตคลาสติกเมทาโนเจน ลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นปัญหากับระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีระยะเวลาเก็บกักตะกอน (Sludge Retention Time) ต่ำ เช่นในถังกรองซึ่งมีการกวนอย่างสมบูรณ์และกระบวนการแบบสัมผัส ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 30 มิลลิกรัมซัลเฟอร์/ลิตร ต้องใช้ระยะเวลาเก็บกักตะกอนอย่างต่ำ 21 วัน จึงจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดได้เป็นที่น่าพอใจ

ในระบบหมักแบบอัตราสูง (High-rate Anaerobic Treatment Systems) เช่น ยูเอเอสบีและเครื่องกรองไร้อากาศ มีระยะเวลาเก็บกักตะกอนมากกว่า 50 วัน ตะกอนเมทาโนเจนสามารถรอดทนต่อปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้สูงขึ้น Speece (1983) ซึ่งให้เห็นว่าความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดที่แบคทีเรียได้อยู่ที่ 145 มิลลิกรัมซัลเฟอร์/ลิตร



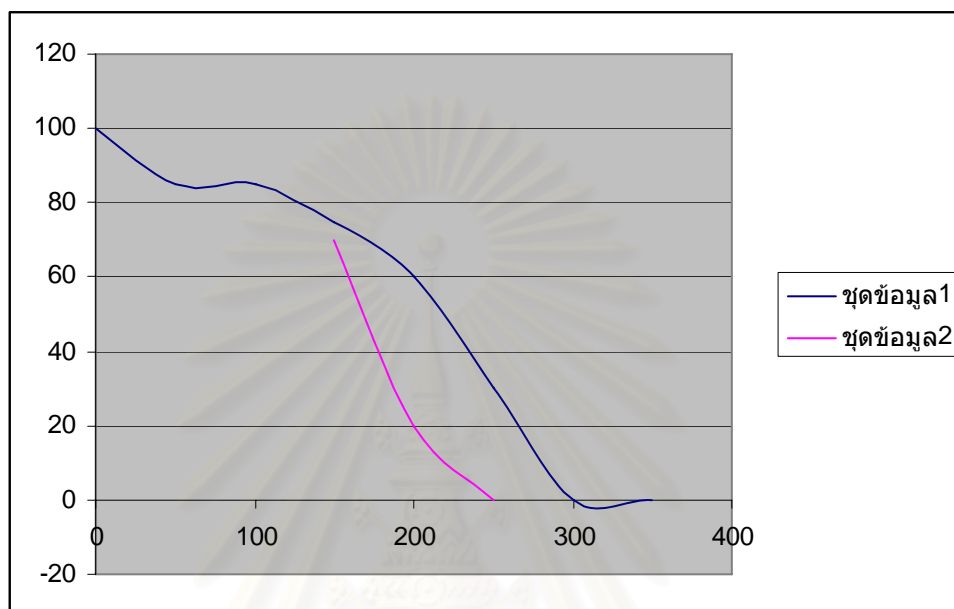
รูปที่ 2.4 ผลของพีเอชต่อสมมูลของ  $H_2S$ ,  $HS^-$  และ  $S^{2-}$  ในสารละลาย  $H_2S$  32 มิลลิกรัม/ลิตร (Sawyer และ McCarty, 1967)



รูปที่ 2.5 การยับยั้งของอะซิโตคลาสติก เมทาโนเจน โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Kroiss และ Plahl-Wabnegg, 1983)

การยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียเนื่องจากซัลไฟด์ (Inhibition by Sulfite) มีการสันนิษฐานว่า ซัลไฟด์ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอย่างมาก แต่จนถึงนี้ความรู้เกี่ยวกับความเป็นพิษของซัลไฟด์มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งในการทดลองแบบแบทช์แสดงให้เห็นว่า ซัลไฟด์ที่ถูกเติมเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด Lag Phase ในการผลิตมีเทนโดยความยาวของ Lag Phase จะขึ้นอยู่กับสัณฐานและสารตั้งต้นที่ถูกใช้ Yang และคณะ (1979) พบว่า lag phase นานถึง 60 ชั่วโมง ในเมทาโนเจนซิสจากอะซิเตต หลังจากการเติม ซัลไฟด์ 25 มิลลิกรัม/ลิตร ให้กับสัณฐานที่ยังไม่ถูกปรับให้คุ้นเคยแล้ว Maaskant และ Hobma (1981) แสดงให้เห็นว่า

การเติมซัลไฟด์ซ้ ๆ กันจะช่วยให้การยับยั้งลดลงเนื่องจากการปรับตัวของสแลคจ์ ซึ่งดูเหมือนว่าการปรับตัวของสแลคจ์จะนำไปสู่การพัฒนาตัวเองของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ให้สามารถรีดิวซ์ซัลไฟด์ได้ ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งให้เห็นถึงอิทธิพลของซัลไฟด์ต่อการปรับตัวของตะกอนเมทาโนเจน ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่กิจกรรมของแบคทีเรียที่ลดลงนั้นมีสาเหตุมาจากซัลไฟด์แทนที่ซัลไฟด์



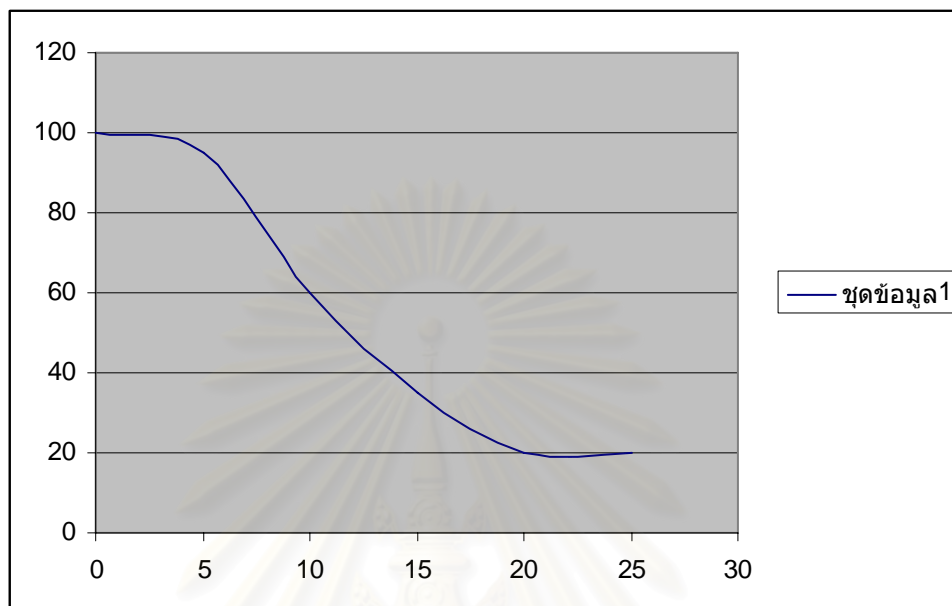
รูปที่ 2.6 การยับยั้งของเมทาโนเจนซิสโดยโซเดียมซัลไฟด์ ข้อมูลจาก Van Bellegem et al., 1979, ข้อมูลจาก Maaskant, 1981

การยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียเนื่องจากซัลเฟต การยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียโดยตรงจากซัลเฟตแทบจะไม่ถูกตรวจพบ จากการทดลองกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต โดย Buswell และคณะ (1949) และโดย McCarty และ McKinney (1961) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการยับยั้งน่าจะมาจากโซเดียมไอออนมากกว่าซัลเฟตไอออน เนื่องจากการตรวจพบว่า ไม่มีความแตกต่างนักระหว่างผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมซัลเฟตต่อ Acetoclastic Methanogens

จากการทดลองของ De Vegt (1985) แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของโซเดียมซัลเฟตต่อกิจกรรมของอะซิโตคลาสติก เมทาโนเจน ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นการทดลองในระยะสั้น (3 วัน) จากกราฟชี้ให้เห็นว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้น เกิดที่ความเข้มข้นโซเดียมซัลเฟตมากกว่า 5 กรัมซัลเฟต/ลิตร

การยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียเนื่องจากอูโรบิวค แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนสามารถถูกยับยั้งได้ถ้ามีความเข้มข้นของอูโรบิวคที่สูงถึงระดับหนึ่ง โซเดียมเป็น

อ็อนบวทที่มีผลกระทบท่อกระบวนกรไร้ออกซิเจนและเป็นอ็อนที่ถูกคึษาอย่างกว้างขวาง ผลกรทลลงจันวนมกตึพิมพ์เก็ยวกับผลกรทบทเนื่องจกโซเดียมที่มีผลต่อกรสร้งมีเทนอย่างไรก็ตม ผลกรทลลงเหล่านึ้แสดงให้เห่นถึงควมขัดแย้งและไม่แน่นอน



รูปที่ 2.7 กรยั้งของอะซิโตคลาสติกเมทาโนเจน โดยโซเดียมซัลเฟต (De Vegt, 1985)

ค่าควมเข้มข้นของโซเดียมที่ให้เกิดกรยั้งกรผลิตมีเทนที่ 50 เปอร์เซนต์ มีค่าตั้งแต่ 6-40 กรัม/ลิตร (De Baere และคณะ, 1976 อ้างถึงใน Visser, 1994) ควมแตกต่างนี้เชื่อว่าเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของสลัดจ์ก่อนที่จะนำมาใช้ในการทลลง ผลกรทบทเนื่องจกการเป็นปฏิปักษ์ หรือกรส่งเสริมกัน (Antagonism or Synergism) ของแบคทีเรียกลุ่มต่าง ๆ ในมวลชีวะ และวิธีการที่ใช้ในการทลสอบ สลัดจ์ที่ชินกับความเข้มข้นของโซเดียมในระดับสูง ดูเหมือนว่าจะไวต่อโซเดียมน้อยกว่าสลัดจ์ที่ยังไม่คุ้นเคย

Rinzema และคณะ (1988 อ้างถึงใน Visser, 1994) สังเกตเห่นว่าการยั้งกรทำงานของแบคทีเรียสร้งมีเทนที่ใช้อะซิเตตที่ 10, 50 และ 100 เปอร์เซนต์ในเม็ดสลัดจ์เกิดขึ้นที่ควมเข้มข้นของโซเดียม 5, 10 และ 14 กรัม/ลิตร ตมลำดับ โดยก่อนที่จะนำสลัดจ์มาใช้ ได้เลี้ยงให้สลัดจ์สัมผัสกับโซเดียมเข้มข้น 13.7 มิลลิกรัม/ลิตร อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 12 สัปดาห์ แสดงให้เห่นว่าสลัดจ์ยังไม่ปรับตัวให้คุ้นเคยกับโซเดียม

Visser (1994) พบว่าเม็ดสลัดจ์ที่ถูกทำให้คุ้นเคยกับโซเดียมเข้มข้น 1.5-2 และ 5.5-6 กรัม/ลิตร กิจกรรมของเม็ดสลัดจ์ที่ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียสร้งมีเทนถูกยั้งที่ควมเข้มข้น

ของโซเดียมมากกว่า 6 กรัม/ลิตร โดยความเข้มข้นที่ทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานที่ 50 เปอร์เซ็นต์ เกิดขึ้นที่ 7-8 กรัม/ลิตร

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่อยู่ในทะเลส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้โซเดียมจำนวนมากในการเจริญเติบโต (Widdle, 1988) ในทางกลับกัน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในน้ำจืด จะถูกยับยั้งเมื่อมีความเข้มข้นโซเดียมสูง โดยVisser (1994) พบว่าเมื่อดัดแปลงที่ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่คุ้นเคยกับโซเดียมในระดับความเข้มข้น 1.5-2 กรัม/ลิตร และ 5.5-6 กรัม/ลิตร กิจกรรมของเมื่อดัดแปลงจะถูกยับยั้งที่ความเข้มข้นของโซเดียมมากกว่า 11 กรัม/ลิตร แต่จนถึงบัดนี้ข้อมูลเกี่ยวกับระดับความเข้มข้นของโซเดียมที่มีผลต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตก็ยังคงมีอยู่ค่อนข้างน้อย

Chiu-Yue Lin และคณะ (2001) ศึกษาผลของความเป็นพิษของสารประกอบซัลเฟอร์ต่อเมื่อดัดแปลงจุลชีพของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ พบว่าระดับความเป็นพิษของสารประกอบซัลเฟอร์ต่อการกำจัดกรดไขมันระเหยมีความไม่แน่นอนดังนี้ ซัลเฟต > ซัลไฟด์ > ซัลไฟท์ แต่บางครั้งก็จะเป็น ซัลเฟต > ซัลไฟท์ > ซัลไฟด์ แต่โดยรวม แอคติวิตีของเมื่อดัดแปลงจุลชีพจะลดลง 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อ มีซัลไฟด์ 34 มิลลิกรัม/ลิตร ซัลไฟท์ 26 มิลลิกรัม/ลิตร และซัลเฟต 20 มิลลิกรัม/ลิตร

### 2.1.1.3 กระบวนการผลิตมีเทน (Methanogenesis)

ในสภาพความเป็นจริงสำหรับการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ตามชนิดสารรับอิเล็กตรอน สิ่งที่สำคัญเบื้องต้นคือการมีสารรับอิเล็กตรอนชนิดนั้น ๆ อยู่ในน้ำเสีย ซึ่งจะเกิดการย่อยสลายต่อไปหรือไม่ โดยทั่วไปสำหรับน้ำเสียที่มีความสกปรกสูง การไม่มีการเติมอากาศให้กับน้ำเสีย จะเป็นการเปิดโอกาสสำหรับการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนโดยสมบูรณ์ ในกรณีของไนเตรทและซัลเฟตก็มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของออกซิเจน นั่นคือถ้าในน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณของสารดังกล่าวอยู่ต่ำ ก็จะเป็นการเปิดโอกาสของปฏิกิริยาทั้งสองในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยสมบูรณ์เช่นเดียวกัน ประเด็นหนึ่งที่แตกต่างระหว่างไนเตรทและซัลเฟต ก็คือโดยทั่วไปในน้ำประปาจะมีซัลเฟตอยู่ปริมาณหนึ่งเสมอ จากการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ดังนั้นในน้ำเสียทั่วไปก็จะพบซัลเฟตได้ไม่ยากนักแต่ก็จะไม่พบในปริมาณสูง ยกเว้นในน้ำเสียจากกิจกรรมที่มีการทิ้งซัลเฟตสูง ขณะที่โอกาสที่จะพบไนเตรทในน้ำประปามีน้อยกว่ามาก และจะเป็นในกรณีที่มิไนเตรทอยู่ในน้ำดิบตั้งแต่ต้น ซึ่งก็จะหลีกเลี่ยงในการใช้แหล่งน้ำดังกล่าวเป็นแหล่งน้ำดิบ เนื่องจากไนเตรทเป็นอันตรายต่อเด็กทารกแม้มีในปริมาณต่ำก็ตาม สำหรับในน้ำเสียดิบโดยทั่วไปมักจะพบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนโตรเจนอินทรีย์และแอมโมเนียไนโตรเจนเท่านั้น โดยในการเปลี่ยนไนโตรเจนทั้งสองรูปดังกล่าว ให้ไปอยู่ในรูปไนเตรทจะต้องผ่านน้ำเสียนั้นเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ และไนเตรทจะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียในรูปก๊าซไนโตรเจนด้วย



ปฏิกิริยาดีในตรีฟิเคชัน ดังนั้นในแหล่งน้ำโดยทั่วไปจะไม่พบไนเตรทในปริมาณสูง ยกเว้นในน้ำเสียจากกิจกรรมที่มีการทิ้งไนเตรทสูงเช่นเดียวกับกรณีของซัลเฟต ขณะที่กรณีของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีความแตกต่างจากสารรับอิเล็กตรอนตัวอื่นที่กล่าวถึงข้างต้น เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรียไร้อากาศประเภทต่าง ๆ ในขั้นตอนการหมักจะเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาตลอดเวลา ซึ่งจะเป็นแหล่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะเกิดขึ้นเองภายในน้ำเสียโดยไม่จำเป็นต้องมีการเติมจากแหล่งภายนอก ทำให้กลไกของการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ในสภาวะไร้อากาศโดยทั่วไปมักจะเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาการผลิตมีเทน

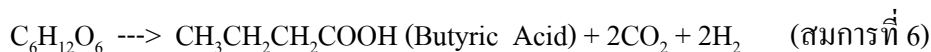
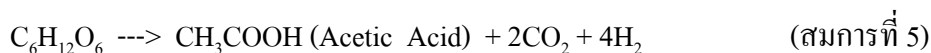
กลไกการผลิตมีเทน ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่มีปริมาณซัลเฟต หรือไนเตรทเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย ขั้นตอนการย่อยสลายในการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเป็นกระบวนการไร้อากาศที่มีผลิตภัณฑ์หลักคือ ก๊าซมีเทน โดยในกรณีที่สารอินทรีย์อยู่ในรูปสารละลาย ขั้นตอนการย่อยสลายสารที่สำคัญจะประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ 4 ขั้นตอนดังนี้คือ

ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนการแตกสารประกอบโมเลกุลใหญ่เช่น โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต เป็นต้น ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล และกรดอะมิโน เป็นต้น จากการทำงานของแบคทีเรียหลายจำพวกซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกแบคทีเรียสร้างกรด โดยแบคทีเรียเหล่านี้ปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์ ซึ่งจะปลดพลังงานกระตุ้นช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เอนไซม์เป็นโปรตีนที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อปฏิกิริยาและสารที่จะทำปฏิกิริยา ดังนั้นเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมานอกเซลล์จึงขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย เช่น แป้งและไกลโคเจนต้องใช้เอนไซม์อะไมเลส (Amylase) ไขมันและไลปิดใช้เอนไซม์ไลเปส (Lipase) และเอสเตอเรส (Esterases) โปรตีนต้องใช้เอนไซม์โปรตีเอส (Protease) ส่วนกรดอะมิโนและไลซีน (Lysine) ต้องใช้เอนไซม์ทริปซิน (Trypsin) เป็นต้น การทำงานของเอนไซม์ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ ดังนั้นการย่อยสลายสารแต่ละชนิดจึงใช้เวลาต่างกัน

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis) ผลผลิตจากขั้นที่ 1 จะได้เป็นสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะมิโน น้ำตาลและกรดไขมัน เป็นต้น แล้วแต่ชนิดของสารอินทรีย์เริ่มต้น ผลผลิตดังกล่าวจะถูกแบคทีเรียกลุ่มเดียวกับขั้นที่ 1 คือพวกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงาน โดยผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) ภายในเซลล์และเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก เป็นต้น ผลผลิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลาย และ ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนในขณะนั้น เช่น การย่อยสลายน้ำตาลเป็นกรดอะซิติก

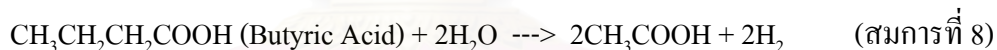
โดยผ่านวิถีชีวเคมีที่เรียกว่า Emdon – Meyerhof Pathway ในกรณีที่ความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนสูงและต่ำเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

#### ความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนต่ำ



ส่วนกรดไขมันชนิดยาว จะเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจน ภายใต้ความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนต่ำ และเปลี่ยนเป็นกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทริกภายใต้สภาวะความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนสูง

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) กรดไขมันระเหยที่ผลิตขึ้นในขั้นที่ 2 จะเป็นอาหารให้แบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนต่อไป แต่เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างมีเทนไม่สามารถที่ใช้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดบิวทริก กรดโพรพิโอนิก เป็นสารอาหารได้ จึงต้องอาศัยแบคทีเรียอะซิโตเจนิก (แบคทีเรียสร้างอะซิเตตและสามารถสร้างไฮโดรเจนได้) ทำการย่อยกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก ดังสมการข้างล่าง จึงจะทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้ได้

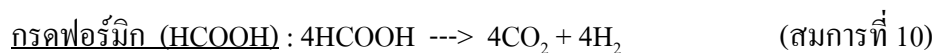
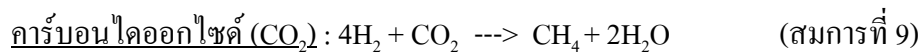


โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนมีค่าต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกได้สภาวะที่มีไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซียลสูงและแบคทีเรียประเภทนี้จะมีส่วนช่วยไม่ให้มีการสะสมตัวของกรดบิวทริกและกรดโพรพิโอนิกในถังปฏิกรณ์ซึ่งเป็นเหตุให้พีเอชลดต่ำลงจนยับยั้งแบคทีเรียสร้างมีเทนได้

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis) ขั้นตอนการสร้างมีเทนเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่มีความสำคัญในการเปลี่ยนความสกปรกในรูปสารอินทรีย์ละลายและก๊าซไฮโดรเจนให้เปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยบทบาทของแบคทีเรียผลิตมีเทน (Methane Producing Bacteria, MPB หรือ Methanogen) จากปฏิกิริยาการสร้างมีเทนซึ่งเป็นปฏิกิริยาการสร้างไร้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาด (Obligate Anaerobic Reaction) ที่มีความเฉพาะเจาะจงในชนิดสารอาหารที่จะสามารถนำมาใช้ได้ โดยแสดงชนิดสารอาหารดังตารางที่ 2.5

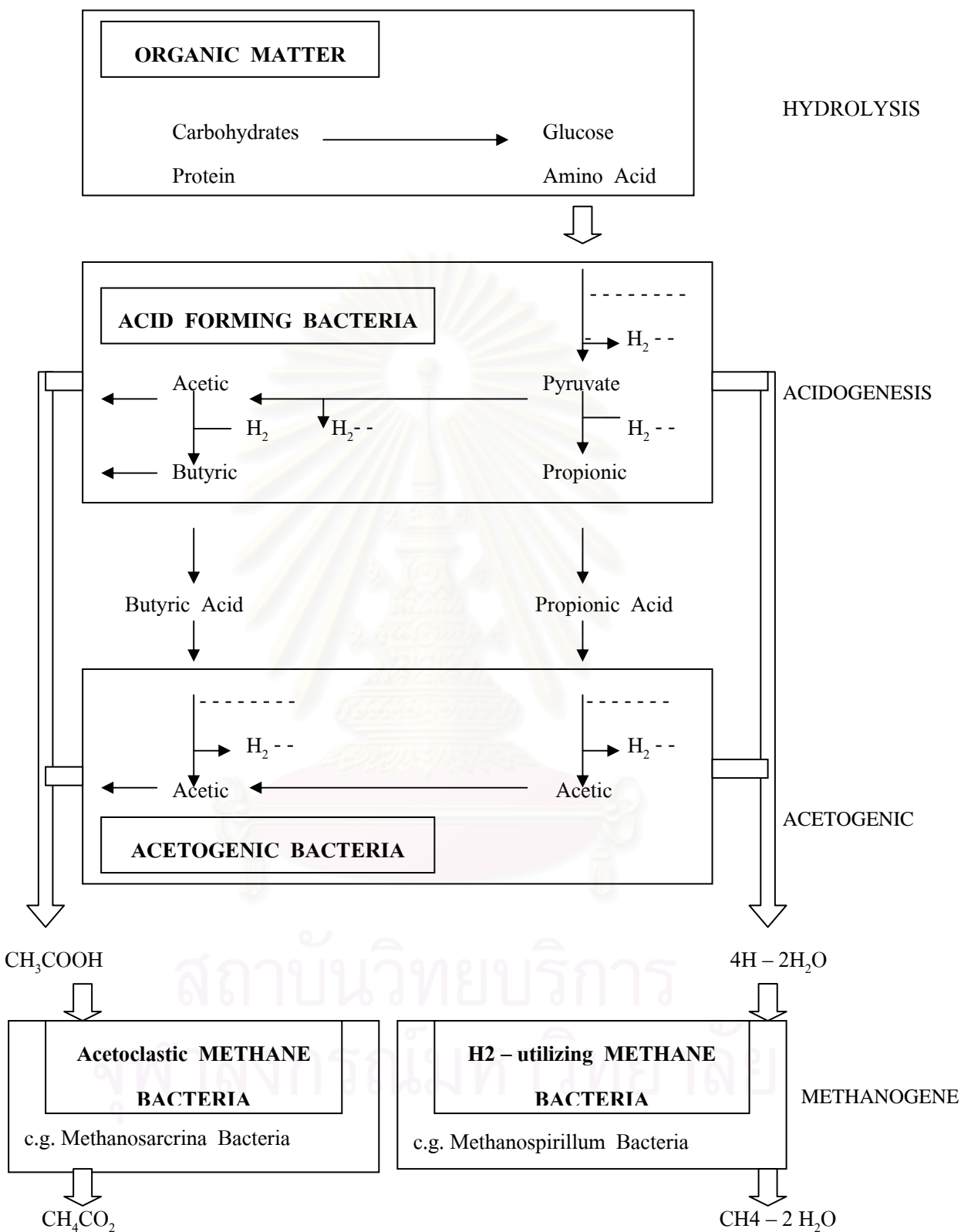
ปฏิกิริยาในการสร้างมีเทนจากกลุ่มสารอาหารจากตารางที่ 2.5 เป็นดังนี้

กลุ่มคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  – type substrates) :



ตารางที่ 2.5 กลุ่มสารอาหารที่ใช้ในปฏิกิริยาการสร้างมีเทน (Brock, Madigan และ Hall, 1988)

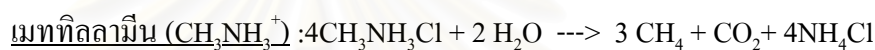
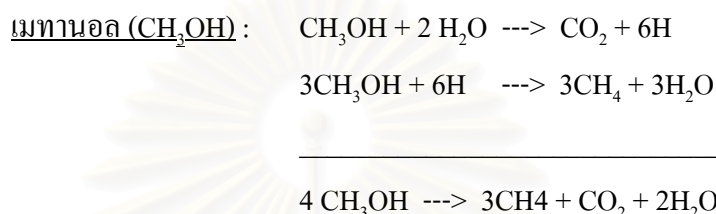
กลุ่มสารอาหาร	สารอาหาร
1. กลุ่มคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ – type Substrates)	คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) กรดฟอร์มิก ( $\text{HCOOH}$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ )
2. กลุ่มสารประกอบที่มีกลุ่มเมทิล ( $-\text{CH}_3$ ) (Methyl Substrates)	เมทานอล ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) เมทิลลามีน ( $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$ ) ไดเมทิลลามีน ( $(\text{CH}_3)_2\text{NH}_3^+$ ) ไตรเมทิลลามีน ( $(\text{CH}_3)_3\text{NH}_3^+$ )
3. กรดอะซิติก (Acetoclastic Substrates)	กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ละลายในกระบวนการไร้อากาศ ที่มีผลิตภัณฑ์หลักคือ ก๊าซมีเทน (Mosey, 1982)

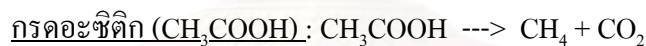
สำหรับปฏิกิริยาสร้างมีเทนที่เกิดจากสารอาหารกลุ่มคาร์บอนไดออกไซด์นี้ ส่วนใหญ่จะมีก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอน ดังนั้นจึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Hydrogenotrophic Reactions และเรียกแบคทีเรียที่ใช้สารอาหารกลุ่มนี้ว่า Hydrogenotrophic Methanogens หรือ Hydrogen Utilizers โดยประมาณว่าร้อยละ 30 ของก๊าซมีเทนที่ถูกสร้างขึ้นจะได้ออกซิเจนผ่านทาง Hydrogenotrophic Reactions

กลุ่มสารประกอบที่มีกลุ่มเมทิล (-CH<sub>3</sub>) (Methyl Substrates)



ก๊าซมีเทนที่ได้จากสารอาหารประเภทนี้จะสร้างจากกลุ่มเมทิลในสารอาหาร ปฏิกิริยาเหล่านี้บางโมเลกุลของสารตั้งต้นจะเป็นสารให้อิเล็กตรอน และถูกออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่บางโมเลกุลจะถูกรีดิวซ์และใช้เป็นสารรับอิเล็กตรอน

กรดอะซิติก (Acetoclastic Substrates)



ก๊าซมีเทนจากสารอาหารประเภทนี้จะสร้างจากกลุ่มเมทิลในโมเลกุลของกรดอะซิติกเช่นกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าเรียกว่า Acetoclastic Reaction เป็นการแยก (Cleavage) กรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะผลิตมีเทนในระบบถึงร้อยละ 70 ของมีเทนที่ได้ทั้งหมด โดยเรียกแบคทีเรียที่ใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหารว่า Acetoclastic Methanogens โดยมี 2 Genera ที่สำคัญคือ *Methanosarcina* และ *Methanotrix*

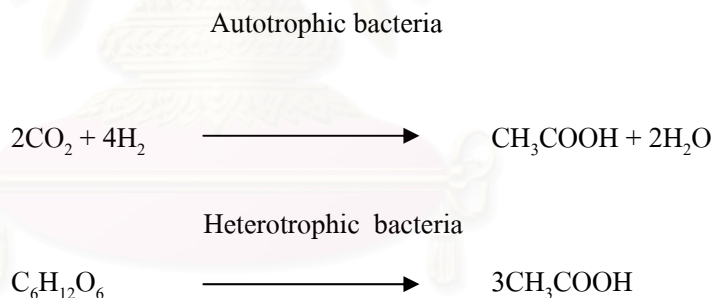
แบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic Bacteria) ในขั้นตอนการสร้างกรดของกระบวนการรีดออกซิเจน กรดจะผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียทั้งพวก Obligate Anaerobes และ Facultative โดยส่วนใหญ่จะผลิตขึ้นด้วยแบคทีเรียพวกแรกมากกว่าเพราะมีจำนวนมากกว่าแบคทีเรียในหลาย ๆ สปีชีส์ของ *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes*, *Escherichia* และ *Aerobacter* เป็นต้น เป็นพวกที่สร้างกรดโดยแบคทีเรีย Obligate anaerobes ที่มีบทบาทสำคัญในการสร้างกรดคือกลุ่ม *Clostridium* เมตาบอลิซึมของแบคทีเรียกลุ่มนี้มีหลายแบบจึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวก โพลีแซคคาไรด์ และ โปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้จึงมีหลายแบบต่าง ๆ



กันออกไป เช่น กรดบิวทริก, กรดอะซิติก, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซไฮโดรเจน, เอทานอล, บิวทานอลและอะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียกลุ่ม *Propionibacteria* ที่ผลิตกรด โพรพิโอนิก และกรดอะซิติกจากกรดแลกติก (Fenchel, 1995 และ Madigan, 1997)

แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) เมื่อผลผลิตจากแบคทีเรียสร้างกรดยังเป็นการสร้างมีเทน ยังไม่สามารถใช้เป็นสารอาหารได้ ซึ่งต้องถูกเปลี่ยนให้เป็นสารโมเลกุลอย่างง่ายก่อน แบคทีเรียสร้างมีเทนจึงจะสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งแบคทีเรียที่สามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก, ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดดังนี้

Homoacetogenic Bacteria เป็นแบคทีเรียที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอน และผลิตกรดอะซิติกขึ้นมา (เป็นปฏิกิริยาการหายใจแบบไร้อากาศ) ผ่านวิถีที่เรียกว่า Acetyl – CoA Pathway แบคทีเรียชนิดนี้ เช่น *Acetobacterium Woodii* และ *Clostridium Aceticum* สามารถเจริญเติบโตทั้งในแบบออโตโทรฟิก (Autotrophic) คือใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอน และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอน เพื่อเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก อีกทั้งเจริญเติบโตเป็นแบบเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic) ก็ได้ โดยการหมักน้ำตาลดั่งสมการข้างล่าง



$\text{H}_2$ -producing Acetogenic Bacteria แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือใช้แอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร แล้วสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนขึ้นมา ซึ่งเป็นสารอาหารที่สำคัญของแบคทีเรียสร้างมีเทน ดังนั้นแบคทีเรียชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญ เพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียประเภทสร้างไฮโดรเจนนี้ จะไม่ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ ซึ่งอาจทำให้พีเอชในระบบลดลงได้จนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน ส่วนไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นมากหากมีการสะสมตัวอยู่ในระบบจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างมันขึ้นมา อย่างไรก็ตามแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถใช้ไฮโดรเจนในการสร้างมีเทนได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียที่สร้างกรดและสร้างมีเทนให้

ประโยชน์ซึ่งกันและกัน คือ แบคทีเรียสร้างกรดสร้างอาหารให้แก่แบคทีเรียสร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียสร้างมีเทนก็ช่วยทำลายก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียสร้างกรด

แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) ในขั้นตอนการสร้างมีเทนแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจะเป็นแบคทีเรียกลุ่มเล็กๆ ของพวก Obligate Anaerobes ซึ่งไม่อาจทนต่อออกซิเจนได้แม้มีเพียงเล็กน้อย แบคทีเรียพวกนี้จะเจริญเติบโตช้าและเลือกชนิดของอาหารมาก โดยส่วนใหญ่จะใช้กรดอะซิติกเป็นสารอาหารในการสร้างมีเทนมากที่สุด เมื่อแบคทีเรียสร้างมีเทนมีความจำเพาะต่อการใช้สารอาหารไม่กี่ชนิด ดังตารางที่ 2.5 แต่แบคทีเรียสร้างกรดสามารถสร้างกรดอินทรีย์ได้หลายชนิด ทำให้แบคทีเรียสร้างไฮโดรเจนมีส่วนสำคัญดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น การเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทนบางชนิดต้องการวิตามิน ซึ่งได้แก่ ไรโบฟลาวิน, แพนโททินิกแอซิด, ไทอามีน, ไบโอติน, และพาราอะมิโนเบโซเอต แบคทีเรียสร้างมีเทนทุกชนิดใช้แอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) เป็นแหล่งไนโตรเจน นอกจากนี้ยังต้องการธาตุอาหารเสริมสร้าง (Trace Element) ในปริมาณเพียงเล็กน้อยแต่ถ้าขาดจะมีผลเสียต่อการเจริญเติบโตที่สำคัญคือ นิกเกิล, เหล็ก, และโคบอลต์ (Brock, Madigan และ Hall, 1988)

แบคทีเรียสร้างมีเทนหลายชนิดได้ถูกค้นพบและสามารถเพาะแยกเชื้อได้ การศึกษาทั้งทางกายภาพและระดับโมเลกุล ทำให้สามารถแยกแบคทีเรียชนิดนี้ได้เป็น 7 กลุ่ม รวมทั้งสิ้น 17 จีนัส (Genus) รูปร่างของแบคทีเรียชนิดนี้มีทั้งที่เป็นแท่ง (ทั้ง Shot rods และ Long Rods), ทรงกลม (Cocci) ที่มีการจัดรูปแบบเซลล์ต่าง ๆ หรือเป็น Plate Shaped รวมทั้งที่เป็นเส้นใย (Filamentous) การคิดสีมีทั้งแกรมลบและแกรมบวก ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างแบคทีเรียสร้างมีเทน และสารอาหารที่ใช้ (Madigan และคณะ, 1997)

Genus	Morphology	Gram reaction	Number Of speeles	Substrates for methanogenesis
Group I				
Methanobacterium	Long rods	+ or -	8	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$ , formate
Methanobrevibacter	Shot rods	+	3	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$ , formate
Methanosphaera	Cocci	+	1	Methanol + $\text{H}_2$ (both needed)
Group II				
Methanothermus	Rods	+	2	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$ : can also reduce $\text{S}^0$
Group III				
Methanococcus	Irregular cocci	-	5	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$ , pyruvate + $\text{CO}_2$ , formate

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างแบคทีเรียสร้างมีเทน และสารอาหารที่ใช้ (Madigan และคณะ, 1997)

Genus	Morphology	Gram reaction	Number Of speeles	Substrates for methanogenesis
Group IV				
Methanomicrobium	Shot rods	-	2	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , formate
Methanogenium	Irregular cocci	-	3	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , formate
Methanospirillum	Spirilla	-	1	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , formate
Methanoplanus	Plate – shaped cells Occurring as thin Plates with sharp Edges	-	2	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , formate
Group V				
Methanosarcina	Large irregular cocci in packels	+	6	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Methanol, methylamines, Acetate
Methanolobus	Irregular cocci in aggregates	-	5	Methanol, methylamines
Methanoculleus	Irregular cocci	-	4	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , alcohol, Formate
Methanohalobium	Irregular cocci halophilic	-	1	Methanol, methylamines :
Methanococcoides	Irregular cocci	-	2	Methanol, methylamines
Methanohalophilus	Irregular cocci halophile	-	3	Methanol, methylamines, methyl sulphides :
Methanotrix (methanosacta)	Long rods to filaments	-	3	Acetate
Group VI				
Methanopyrus	Rods in chains	+	1	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> : hyperthermophil growt at 110 °C
Group VII				
Methanopusculum	Irregular cocci	-	3	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , formate alcohols

## 2.2 ระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Filter)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศแบบเดิมเป็นระบบแบบธรรมดา เช่น บ่อเกรอะ (Septic Tank) บ่อหมักไร้อากาศ (Anaerobic Pond) หรือถังหมักไร้อากาศ (Anaerobic Digester) เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากมีปริมาณจุลินทรีย์จำนวนน้อย แต่เป็นระบบที่ง่ายและสะดวกในการดูแล ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบบำบัดแบบอัตราสูง (High Rate Anaerobic Process) เพื่อแก้ปัญหาการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง แต่ต้องการให้ขนาดของถังกรองเล็กลง โดยการเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ หรือการเก็บกักจุลินทรีย์ให้อยู่ในระบบนานขึ้นด้วยการหมุนเวียนตะกอนจุลินทรีย์มาใช้ใหม่ หรือการหาตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ หรือการควบคุมความเร็วของน้ำเสียที่เข้าถังให้เหมาะสมจนจุลินทรีย์จับตัวเป็นเม็ด ระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีอัตราสูงได้แก่ ถังหมักแบบสัมผัส (Anaerobic Contact Tank) ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Anaerobic Fluidized Bed) ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) ระบบยูเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) และระบบถังกรองไร้อากาศชั้นจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Hybrid Upflow Sludge Blanket Filter : USBF)

### 2.2.1 ลักษณะทั่วไปของถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น

ถังกรองไร้อากาศ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบไม่ใช้อากาศ ประกอบด้วย ตัวถังปิด ภายในบรรจุตัวกลางเพื่อเป็นที่เกาะของจุลินทรีย์ เช่น ก้อนหิน พลาสติก เศษอิฐ เป็นต้น ระหว่างที่น้ำเสียถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของถัง ไหลผ่านตัวกลางและจุลินทรีย์แล้ว น้ำเสียไหลออกจากถังทางด้านบน จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบทั้งที่เกาะที่ผิวกลาง และบางส่วนของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของตัวกลาง จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีทางชีววิทยาแบบไม่ใช้อากาศ โดยส่วนใหญ่จะมีจุลินทรีย์หลุดออกไปจากระบบน้อยมาก เนื่องจากตัวกลางทำหน้าที่กักไว้

ข้อดีของถังกรองไร้อากาศ คือ ไม่ต้องมีขั้นตอนการแยกตะกอน และควบคุมระบบง่ายกว่า แต่จะมีปัญหาในเรื่องการลัดทางของน้ำเสีย (Short Circuit) ถ้าก๊าซที่สะสมภายในตัวถังกรองไร้อากาศรวมตัวกันลอยขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดช่องทางให้น้ำเสียไหลผ่านไปโดยสัมผัสกับจุลินทรีย์ได้น้อย แก้ปัญหาโดยป้อนน้ำเสียให้กระจายเข้าถังกรองไร้อากาศสม่ำเสมอ และต้องมีการล้างตะกอนเมื่อใช้ไปเป็นเวลานาน

Kwong และ Fang (1996) ใช้ระบบยูเอสบี และถังกรองไร้อากาศ แบบไหลขึ้น โดยถัง 2 ถังมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 104 มม. สูง 1000 มม. ขนาด 8.5 ลิตร ต่อแบบขนานกันโดยในถังกรองไร้อากาศ บรรจุด้วยตัวกลางพลาสติก เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. พื้นผิว 235 ม<sup>2</sup>/ม<sup>3</sup> บำบัด

น้ำเสียความเข้มข้นสูงที่มีแป้งข้าวโพดเป็นส่วนผสม และเพิ่มค่าซีไอดีในน้ำเสียจาก 3000 มิลลิกรัม/ลิตร จนถึง 45000 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของค่าภาระอินทรีย์ระหว่าง 3 ถึง 90 กรัมซีไอดี/ลิตร-วัน พบว่าทั้งระบบถังกรองไร้อากาศและยูเอเอสบี สามารถกำจัดซีไอดีไปได้ 96.8% และ 96.9% ตามลำดับขณะที่มีค่าภาระอินทรีย์ระหว่าง 3 ถึง 10 กรัมซีไอดี/ลิตร-วัน สำหรับค่าภาระอินทรีย์ตั้งแต่ 10 ถึง 90 กรัม ซีไอดี/ลิตร-วัน สามารถกำจัดซีไอดีได้เท่ากัน คือ 95.3% แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบยูเอเอสบีและถังกรองไร้อากาศต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

## 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศ

### 2.2.2.1 ตัวกลาง

เนื่องจากตัวกลางมีส่วนช่วยในการกักจุลินทรีย์ไว้ในถังกรอง โดยจุลินทรีย์จะทำหน้าที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลาง ดังนั้นในการสร้างถังกรองเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดำเนินงานสูง ควรจะต้องคำนึงถึงการเลือกใช้วัสดุตัวกลาง ซึ่งหลักในการเลือกตัวกลางมีดังนี้

#### 2.2.2.1.1 พื้นผิววัสดุ

ในช่วงเริ่มต้นระบบ ถ้าใช้ตัวกลางที่มีผิวหยาบให้ จุลินทรีย์สามารถ เกาะติดบนตัวกลางรองรับได้ดีกว่าการใช้ตัวกลางที่มีผิวเรียบ ส่งผลให้เกิดฟิล์มชีวหนากว่า ปริมาณก๊าซที่ผลิตจึงสูงขึ้น

#### 2.2.2.1.2 พื้นผิวต่อปริมาตร

มีผลต่อจำนวนจุลินทรีย์ที่ถูกตรึงอยู่ในตัวกลาง ถ้ามีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ทำให้จุลินทรีย์มีบริเวณที่จะเกาะมากขึ้น เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในถังกรอง ทำให้สามารถเพิ่มอัตราภาระอินทรีย์ได้มากขึ้น

#### 2.2.2.1.3 ปริมาตรช่องว่าง

ในถังกรองแบบมีตัวกลาง นอกจากจุลินทรีย์จะเกาะอยู่บนตัวกลางแล้ว ยังมีจุลินทรีย์อยู่อีกส่วนหนึ่งถูกกักอยู่ระหว่างช่องว่างของตัวกลาง ดังนั้นการมีช่องว่างระหว่างตัวกลางต่อปริมาตรสูง จะมีผลเช่นเดียวกับการที่ตัวกลางมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง แต่ถ้าจุลินทรีย์ที่อยู่ตามช่องว่างของตัวกลางมีมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตัน และเกิดการไหลลัดวงจร ทำให้ปริมาตรที่ใช้งานได้จริงของถังกรองลดลง



#### 2.2.2.1.4 ลักษณะรูปร่างและการเรียงตัวของตัวกลาง

ลักษณะการจัดเรียงตัวของตัวกลางจะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ และยังเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการไหลและการผสมภายในถังกรอง รวมถึงการเกิดฟิล์มชีวะ

Veiga และคณะ (8) ได้ศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศสองระบบ ระบบแรกเป็น AF ซึ่งใช้ตัวกลางชนิดเดียวมีลักษณะเป็นวงแหวน ทำจากโพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride) เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.4 ซม. สูง 1.2 ซม. จัดวางในถังกรองแบบไม่เป็นระเบียบ มีพื้นที่ผิวตัวกลางแต่ละชั้นเท่ากับ 0.3 ตารางเมตร และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) 300 ตารางเมตร / ลูกบาศก์เมตร. ระบบที่สองเป็น DSFF ซึ่งใช้ตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นลอนโพลีไวนิลคลอไรด์ (Corrugated polyvinyl chloride), ตัวกลางมีหนามทำด้วยโพลีสไตลีน (Needle punched polystyrene), ตัวกลางทำด้วยดินเหนียว และวางในถังกรองอย่างเป็นระเบียบ มีพื้นที่ผิวตัวกลางแต่ละชั้นเฉลี่ย 0.07 ตารางเมตร และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) 70 ตารางเมตร / ลูกบาศก์เมตร. บำบัดน้ำเสียปลาตู้พบว่า ระบบ AF สามารถกำจัด COD ได้ร้อยละ 75 ที่อัตราการอินทรีย์ 11-13 กิโลกรัม ซีโอดี / ลูกบาศก์เมตร – วัน มากกว่าระบบ DSFF ซึ่งกำจัด COD ได้ร้อยละ 70 ที่อัตราสารอินทรีย์ 3 กิโลกรัม ซีโอดี / ลูกบาศก์เมตร. – วัน

นอกจากนี้การเลือกตัวกลางควรคำนึงถึง สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก มีน้ำหนักเบา วัสดุมีความแข็งแรงรับน้ำหนักได้ เช่นพลาสติก

#### 2.2.2.2 ความลึกของชั้นกลาง

ถ้าชั้นกลางลึกมาก จะทำให้ประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศเพิ่มขึ้นและยังรักษาประสิทธิภาพการบำบัดให้ได้ดีได้ ในสภาวะที่น้ำเสียไหลเข้าถังกรองไร้อากาศไม่สม่ำเสมอหรือภาระบรรทุกเพิ่มอย่างรวดเร็ว (Shock Load) เนื่องจากมีบริเวณยึดเกาะมากขึ้น ซึ่งจะสามารถเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ได้มากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มความลึกของตัวกลางมากขึ้น จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในเรื่องปริมาณตัวกลางและตัวถังกรองไร้อากาศ รวมทั้งเพิ่มแรงดันสูญเสียภายในตัวกลาง อย่างไรก็ตามพบว่าความลึก 90 ซม. เป็นความลึกที่เพียงพอในการบำบัด (19)

#### 2.2.2.3 ทิศทางการป้อนสารอาหาร

ทิศทางในการป้อนสารอาหารแต่ละแบบมีผลต่อการเริ่มต้นระบบ โดยเฉพาะในส่วนของกระจายตัวของสารอาหารและการกระจายตัวของจุลินทรีย์ภายในถัง ทิศทางการป้อนสารอาหารเข้าสู่ถังกรองนั้นสามารถทำได้หลายทางได้แก่ ทางด้านล่าง (Upflow) ทางด้านบน (Downflow) ของถังกรอง

### 2.2.2.3.1 การป้อนสารอาหารจากทางด้านบน (Downflow)

การกระจายตัวของสารอาหารและจุลินทรีย์ด้านบนจะมาก มีโอกาสที่จุลินทรีย์จะอุดตันระหว่างช่องว่างของตัวกลางมากกว่าการป้อนอาหารทางด้านล่างของถังกรอง เนื่องจากการป้อนสารอาหารด้านบน ทิศทางการไหลของน้ำมีทิศทางเดียวกับการตกตะกอนของจุลินทรีย์ ดังนั้นการป้อนทางด้านล่างจะช่วยทำให้การกระจายตัวของจุลินทรีย์ไปได้ทั่วถังกรองมากกว่าแบบการป้อนทางด้านบน

### 2.2.2.3.2 การป้อนสารอาหารจากทางด้านล่าง (Upflow)

การป้อนสารอาหารจากทางด้านล่าง ใช้ระยะเวลาในการเริ่มต้นระบบสั้นกว่าแบบการป้อนจากด้านบน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะปกติ การผสมกันของของเหลวภายในถังกรองต่ำ เพราะลักษณะการจัดเรียงตัวของตัวกลางเป็นแบบสุ่ม ความเข้มข้นของสารอาหารและสารแขวนลอยขึ้นกับความสูงของถังกรองที่เป็นทางเข้าของน้ำเสียมีปริมาณจุลินทรีย์บนตัวกลางสูง ทำให้กำจัดสารอินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงด้านล่างของถัง

จุฬารักษ์ กำเนิดเพชร (2534) ทำการศึกษาทิศทางการป้อนอาหารเข้าสู่ระบบถังกรองไร้อากาศ มีอัตราการอินทรีย์ 3 กิโลกรัม ซีไอดี / ลูกบาศก์เมตร. – วัน ระยะเวลาพักเก็บ 3 วัน พบว่าถังกรองที่ป้อนอาหารทางด้านล่างและด้านข้างช่วยให้จุลินทรีย์เกาะบนวัสดุตัวกลางกระจายสม่ำเสมอตลอดถังกรอง จุลินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำส่วนใหญ่อยู่บริเวณด้านล่างของถัง ส่วนการป้อนอาหารทางด้านบนทำให้จุลินทรีย์ส่วนใหญ่เกาะอยู่บนตัวกลาง โดยเฉพาะบริเวณใกล้ทางเข้า จุลินทรีย์ที่แขวนลอยมีน้อย สำหรับการป้อนสารอาหารทางด้านล่าง จุลินทรีย์ที่เกาะตัวกลางที่ตำแหน่งกลางถังมีน้อยกว่าด้านล่างของถัง

### 2.2.2.4 เวลาพักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic Retention Time)

เวลาพักเก็บน้ำเสียมีผลต่อการทำปฏิกิริยา เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจะสมบูรณ์ได้ก็ต่อเมื่อ มีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเพียงพอ โดยประสิทธิภาพของระบบถังกรองไร้อากาศจะสูงขึ้นเมื่อเวลาพักเก็บน้ำเสียนานขึ้น แต่เวลาพักเก็บนานทำให้ใช้ปริมาตรของถังกรองไร้อากาศมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงควรเลือกใช้เวลาพักเก็บที่เพียงพอและต้องระวังไม่ให้เวลานานเกินไปในถังกรองไร้อากาศทั่วไป ใช้เวลาพักเก็บน้ำเสีย 1-10 วัน แต่ดีไนตริฟิเคชันใช้เวลาพักเก็บที่สั้นกว่า

### 2.2.2.5 อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate)

ถ้าเพิ่มอัตราบรรทุกสารอินทรีย์ได้มาก ก็จะประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น เพราะหมายถึง สามารถกำจัดได้เร็วขึ้น หรือใช้ปริมาตรถังกรองน้อยลง แต่ในขณะเดียวกันก็อาจทำให้ประสิทธิภาพระบบบำบัดลดลงด้วย

## 2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของถังกรองไร้อากาศ

### 2.2.3.1 ข้อดีของถังกรองไร้อากาศ

2.2.3.1.1 ระบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้การไหลเวียนกลับของตะกอนจุลินทรีย์เข้าสู่ระบบใหม่เพราะจุลินทรีย์จับอยู่บนตัวกรอง ไม่ไหลออกไปกับน้ำทิ้ง

2.2.3.1.2 กากตะกอนหลุดไปกับน้ำเสียน้อย เนื่องจากมีตัวกรองคอยกั้น จึงทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากถังกรองไร้อากาศมีปริมาณสารแขวนลอยต่ำ

2.2.3.1.3 มีความต้องการสารอาหารต่ำ (BOD : N : P เป็น 100 : 1.1 : 1.2) เมื่อเทียบกับการบำบัดแบบใช้อากาศ (BOD : N : P เป็น 100 : 5 : 1) ทำให้มีเซลล์เกิดใหม่น้อย จึงเป็นไปได้สำหรับใช้น้ำบัดน้ำเสียที่มีสารอาหารต่ำ

2.2.3.1.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศแทบจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบถังกรองไร้อากาศ

2.2.3.1.5 ไม่ต้องใช้พลังงานในการเดินระบบ

2.2.3.1.6 มีระยะเวลาเก็บกักตะกอนยาวนาน แต่มีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียน้ำต่ำ

2.2.3.1.7 ได้ก๊าซมีเทนนำมาใช้ประโยชน์

### 2.2.3.2 ข้อเสียของถังกรองไร้อากาศ

2.2.3.2.1 เกิดการอุดตันของถังกรองไร้อากาศ ซึ่งอาจเกิดจากการใช้ถังกรองไร้อากาศเป็นเวลานาน หรือเกิดจากน้ำเสียที่เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศมีปริมาณสารแขวนลอยสูงและมีขนาดใหญ่ วิธีแก้ปัญหาคือล้างตัวกรองโดยปล่อยน้ำออกจากตัวถังกรองไร้อากาศ แล้วฉีดเข้าทางด้านบนของถังกรองไร้อากาศ

2.2.3.2.2 อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ค่อนข้างต่ำ ทำให้การตอบรับการเปลี่ยนแปลงของระบบช้ามากและระบบต้องออกแบบให้ระยะเวลากักเก็บจุลินทรีย์ค่อนข้างนานแม้เมื่อใช้อุณหภูมิสูง ๆ

2.2.3.2.3 มักจะเกิดการลวงจรของน้ำเสีย (Shot Circuiting) เนื่องจากก๊าซที่เกิดขึ้นภายในถังกรองไร้อากาศ ทำให้เกิดช่องทางให้น้ำเสียไหลผ่านไปโดยสัมผัสกับจุลินทรีย์น้อยลง ซึ่งจะลดประสิทธิภาพของระบบถังกรองไร้อากาศ

2.2.3.2.4 ระยะเวลาการเริ่มต้นการใช้งานระบบ (Start-up) ใช้เวลานานกว่าระบบใช้อากาศ

## 2.3 สมดุลมวลของชีโอดี ซัลเฟอร์ และไนโตรเจนในกระบวนการไร้อากาศที่มีซัลเฟต และไนเตรท

### 2.3.1 สมดุลมวลชีโอดี

ความหมายของค่าชีโอดีที่เป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไป คือ ความต้องการออกซิเจนทางเคมีของตัวอย่างน้ำที่นำมาวิเคราะห์ แต่ในอีกความหมายหนึ่งจะหมายถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในระบบโดยจะอยู่ในรูปต่าง ๆ เช่น สารอินทรีย์, ซัลไฟด์อ็อกไซด์ หรือเหล็กเฟอร์รัส เป็นต้น ซึ่งอิเล็กตรอนดังกล่าวสามารถที่จะถ่ายเทจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่งได้ ถ้าได้รับการกระตุ้นจากสารที่มีอำนาจในการออกซิไดส์สูงกว่า โดยในการวัดชีโอดีตามมาตรฐานนิยมที่จะใช้ไดโครเมตเป็นสารออกซิไดส์เพื่อหาค่าชีโอดี สำหรับการบำบัดน้ำเสียมีการไหล หรือถ่ายเทอิเล็กตรอนเช่นเดียวกัน แต่จะมีแบคทีเรียเป็นตัวการที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นอาจพิจารณาได้ว่าปริมาณชีโอดีก็คือปริมาณอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในระบบ และการลดลงของชีโอดีก็คือการเปลี่ยนรูปของอิเล็กตรอนจากเดิมไปสู่แหล่งอื่น (อยู่ในรูปอื่น)

ในกระบวนการไร้ออกซิเจนเมื่อมีซัลเฟตอยู่ในน้ำเสีย ปริมาณชีโอดีจากสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นกรดอินทรีย์ระเหย, ก๊าซมีเทน ซัลไฟด์อ็อกไซด์ บางส่วนของจุลชีพที่เพิ่มขึ้น และอาจมีบางส่วนที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ชนิดเดิมเนื่องจากไม่ถูกย่อยสลาย อย่างไรก็ตามสามารถพิจารณาสมดุลมวลของชีโอดีก่อนและหลังผ่านกระบวนการย่อยสลายได้ดังนี้

$$\text{COD}_{\text{inf}} = \text{COD}_{\text{eff}} + \text{COD}_{\text{accumulated in biomass}} \dots\dots\dots (1)$$

โดย

$$\text{COD}_{\text{inf}} = \text{ค่าชีโอดีทั้งหมดก่อนเข้าระบบ}$$

$$\text{COD}_{\text{eff}} = \text{ค่าชีโอดีทั้งหมดหลังผ่านระบบ}$$

$$\text{COD}_{\text{accumulated in biomass}} = \text{ค่าชีโอดีของมวลจุลชีพที่เพิ่มขึ้นและสะสมในระบบ}$$

และ

$$\text{COD}_{\text{eff}} = \text{organicCOD}_{\text{eff}} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} \dots\dots\dots (2)$$

โดย

$$\text{organicCOD}_{\text{eff}} = \text{ค่าชีโอดีหลังผ่านระบบในรูปอินทรีย์สาร}$$

$$\Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} = \text{ค่าชีโอดีที่ถูกใช้รีดิวซ์ซัลเฟต}$$

และ

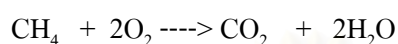
$$\text{organicCOD}_{\text{eff}} = \text{org.COD}_{\text{sol}} + \text{org.COD}_{\text{S}_5} + \text{CH}_4 - \text{COD} \dots\dots\dots (3)$$

โดย

$\text{org.COD}_{\text{sol}} =$  ซีโอดีในรูปกรดอินทรีย์และสารอินทรีย์เริ่มต้นที่ไม่ถูกย่อยสลาย

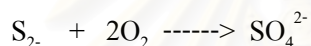
$\text{org.COD}_{55} =$  ซีโอดีในรูปสารอินทรีย์แขวนลอย

โดยค่า  $\text{org.COD}_{\text{sol}}$  และ  $\text{org.COD}_{55}$  เป็นค่าที่วัดได้โดยตรงจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ขณะที่ค่า  $\text{CH}_4\text{-COD}$  และ  $\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{COD}$  ได้ค่าทางอ้อมจากการคำนวณทาง Stoichiometric ดังนี้ คือ



16 มก. 64 มก. 44 มก. 36 มก.

นั่นคือ มีเทน 16 มิลลิกรัม จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจำนวน 64 มิลลิกรัม พอดี หรือ อัตราส่วน 1:4 ดังนั้นมีเทน 1 มิลลิกรัม มีค่าเทียบเท่ากับซีโอดี 4 มิลลิกรัม นั่นเอง สำหรับค่า  $\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{COD}$  สามารถพิจารณาได้จากสมการเคมีดังนี้คือ



32 มก. 64 มก. 96 มก.

นั่นคือซัลไฟด์ 32 มิลลิกรัม จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 64 มิลลิกรัม พอดี และจะได้ ซัลเฟตเท่ากับ 96 มิลลิกรัม หรืออัตราส่วน 1:2:3 ดังนั้นซัลไฟด์ 1 มิลลิกรัม จะมีค่าเทียบเท่ากับซีโอดี 2 มิลลิกรัม หรือซัลเฟตที่ลดลง 3 มิลลิกรัม ต้องใช้ซีโอดีเป็นการให้อิเล็กตรอนจำนวน 2 มิลลิกรัม และสามารถนำมาใช้หาค่าซีโอดีจากซัลเฟตที่ลดลงได้

นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาจากรายการคำนวณข้างต้น อาจเป็นไปได้ว่าที่อัตราส่วนซีโอดี ต่อซัลเฟตของระบบโดยรวมเท่ากับ 2/3 หรือ 0.67 ปริมาณซีโอดีและซัลเฟตในระบบทั้งหมดจะถูก ใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตได้อย่างสมบูรณ์ และถ้าต้องการให้เกิดซัลไฟด์ 1 กิโลกรัม จะต้องใช้ ซัลเฟตและซีโอดีเท่ากับ 3 และ 2 กิโลกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามมีเหตุผลหลายประการ เช่น ความสามารถในการใช้สารอาหารของแบคทีเรีย การแข่งขันใช้ซีโอดีระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน เป็นต้น ที่จะทำให้ผลในทางปฏิบัติแตกต่างไปจากการคำนวณทาง Stoichiometric ได้ สำหรับค่าซีโอดีในบางส่วนของมวลจุลชีพที่เพิ่มขึ้นเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้ แต่สามารถคำนวณได้โดยตั้งสมมติฐานว่าซีโอดีที่ถูกย่อยสลายและไม่สามารถตรวจสอบได้ คือ ซีโอดีที่สะสมอยู่ในมวลจุลชีพ

พิจารณาจากสมการ

$$\text{COD}_{\text{accumulated in biomass}} = \text{COD}_{\text{remove}} - (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD}) \quad (4)$$

โดย



$$\text{COD}_{\text{remove}} = \text{COD}_{\text{inf}} - (\text{org.COD}_{\text{sol}} + \text{org.COD}_{55}) \quad (5)$$

จากสมมติฐานข้างต้นจะทำให้ % Recovery ของซีโอดีเป็น 100% เสมอ เนื่องจากค่าซีโอดีที่หายไปเปลี่ยนไปอยู่ในเซลล์ทั้งหมด โดย %Recovery หมายถึงการเปรียบเทียบสมมูลมวลของซีโอดีภายหลังผ่านระบบกับสมมูลมวลซีโอดีก่อนเข้าระบบ อย่างไรก็ตาม โอกาสที่จะวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ  $\text{COD}_{\text{eff}}$  ให้ถูกต้องทั้งหมด 100% เป็นไปได้ยาก ดังนั้นถ้าพิจารณาว่าค่าซีโอดีที่หายไปและเปลี่ยนเป็นเซลล์ซีพีที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อย (เนื่องจากเป็นระบบแบบไร้อากาศที่มีเวลากักเซลล์ยาวนาน ซึ่งค่า Yield Observed จะต่ำมาก) และตัดทิ้งไปได้โดยไม่ต้องนำมาพิจารณาประโยชน์ที่ได้รับก็จะทำให้สามารถตรวจสอบความน่าเชื่อถือในการทำงานทั้งหมดได้ จากสมมูลมวลซีโอดีที่ถูกสร้างขึ้นมาจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องซึ่งก็คือ % COD Recovery และหาได้จากสมการนี้

$$\% \text{ COD recovery} = (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \text{org.COD}_{\text{sol}} + \text{org.COD}_{55}) / \text{COD}_{\text{inf}} \quad (6)$$

นอกจากนั้น จากสมมูลมวลซีโอดีที่สร้างขึ้นจะทำให้สามารถหาสัดส่วนของซีโอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียผลิตมีเทนได้ โดยเรียกว่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอน (% Electron flow) และสามารถหาได้จากสมการ

$$\% \text{ electron flow MPB} = (\text{CH}_4 - \text{COD}) / ((\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD})) \quad (7)$$

$$\% \text{ electron flow SRB} = (\Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD}) \quad (8)$$

$$\% \text{ electron flow MPB} = [(\Delta\text{NO}_3 - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta\text{NO}_3 - \text{COD})] * 100 \quad (9)$$

และสามารถนำค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนมาใช้ในการเปรียบเทียบการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตกับแบคทีเรียผลิตมีเทนได้ โดยแบคทีเรียชนิดที่มีเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กตรอนมากกว่าหมายถึง เป็นกลุ่มที่โดดเด่น (Predominate) มากกว่าในระบบนั้น ๆ ตารางที่ 2.7 แสดงตัวอย่างของผลการคำนวณสมมูลมวลซีโอดีในงานของ Harada และคณะ (1994) ซึ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียผลิตมีเทนในถังกรองยูเอสบีที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่าง ๆ

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างผลการคำนวณสมดุลมวลซัลไฟด์ (Harada และคณะ, 1994)

Table 1. Recovery of COD and distribution of electrons to methanogenesis and sulfate reduction

Loading rate	eff-SS	eff-sol.	CH <sub>4</sub> gas-COD	CH <sub>4</sub> aq-COD	ΔSO <sub>4</sub> -COD	Recovery	Electro flow (%) (7)		
	(1) (%)	(2) (%)	(3) (%)	(4) (%)	(5) (%)	(6) (%)	SRB	MPB	
<b>Reactor A</b>									
1.0	3.7 (2.2)	11.0 (2.7)	59.1 (6.5)	14.6 (1.5)	4.5 (0.5)	92.8 (5.4)	5.8	94.2	
1.5	2.6 (1.8)	12.7 (4.0)	53.3 (4.4)	12.9 (0.1)	3.8 (0.2)	85.3 (1.6)	5.4	94.6	
2.0	3.7 (0.4)	13.4 (0.6)	54.4 (0.6)	11.5 (0.2)	3.5 (0.8)	86.3 (1.0)	5.0	95.0	
2.5	7.2 (1.5)	15.2 (1.3)	49.5 (1.4)	11.9 (0.3)	3.5 (0.5)	87.1 (0.3)	5.3	94.7	
3.0	4.8 (2.0)	12.7 (2.3)	58.2 (4.3)	11.9 (0.8)	3.5 (0.6)	91.1 (3.6)	4.8	95.3	
Total	4.3 (2.3)	12.4 (2.9)	57.2 (7.3)	12.9 (1.6)	3.8 (0.7)	90.5 (4.7)	5.1	94.9	
<b>Reactor B</b>									
1.0	2.9 (2.1)	11.6 (2.7)	44.7 (10.7)	12.5 (2.6)	20.4 (2.4)	92.0 (6.0)	22.8	77.2	
1.5	3.4 (2.1)	13.5 (2.1)	33.8 (6.8)	14.4 (2.7)	21.1 (1.7)	85.8 (1.2)	30.4	69.9	
2.0	4.7 (0.2)	12.0 (1.8)	42.0 (4.7)	12.3 (0.4)	20.0 (0.8)	90.9 (4.2)	26.9	73.1	
2.5	6.3 (1.9)	12.2 (0.1)	33.0 (0.3)	11.8 (0.3)	23.1 (2.9)	86.3 (0.5)	34.0	66.0	
3.0	4.8 (1.5)	9.5 (1.1)	41.4 (1.7)	11.5 (0.6)	18.9 (1.5)	86.1 (1.0)	26.3	73.7	
Total	4.0 (2.1)	11.6 (2.4)	40.8 (8.8)	12.5 (2.2)	20.4 (2.3)	89.1 (1.0)	27.7	72.3	
<b>Reactor C</b>									
1.0	3.0 (3.1)	15.8 (2.0)	32.4 (5.0)	14.0 (1.9)	29.5 (2.7)	94.4 (7.7)	38.9	61.1	
1.5	4.6 (0.7)	13.4 (1.6)	25.7 (3.9)	12.5 (0.2)	31.0 (2.8)	87.1 (1.0)	44.8	55.2	
2.0	7.3 (1.3)	13.7 (1.6)	17.2 (2.4)	11.4 (0.3)	42.2 (1.4)	91.8 (1.6)	59.6	40.4	
2.5	9.7 (3.1)	11.9 (0.5)	15.0 (1.3)	10.4 (0.1)	38.7 (2.6)	85.7 (5.0)	60.4	39.6	
3.0	6.3 (4.4)	12.4 (2.3)	8.5 (2.7)	8.8 (0.4)	51.6 (4.5)	87.7 (4.1)	74.9	25.1	
Total	5.5 (3.8)	13.9 (2.3)	21.4 (9.7)	12.0 (2.2)	37.9 (8.7)	90.5 (4.7)	53.2	46.8	

1) eff-SS = COD of suspended solids in the effluent; (2) eff-sol = soluble COD in the effluent; (3) CH<sub>4</sub> gas-COD = recovered CH<sub>4</sub>-COD in gas phase; (4) CH<sub>4</sub> aq-COD = dissolved CH<sub>4</sub>-COD in the effluent; (5) ΔSO<sub>4</sub>-COD = COD used for sulfate reduction; (6) recovery = the sum of items from (1)-(5), which represents the COD recovery; and (7) electron flow = electron flows distributed to MPB and to SRB. Loading rate = organic loading rate (kg COD m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>). Figures in parentheses represent standard deviation.

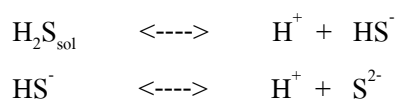
### 2.3.2 สมดุลมวลซัลเฟอร์

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอน โดยรีดิวซ์ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของซัลไฟด์ โดยซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้ในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคก๊าซ (gas phase) และในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่แตกตัว (HS<sup>-</sup> และ S<sup>2-</sup>) และไม่แตกตัว (H<sub>2</sub>S) ที่อยู่ในวัฏภาคของเหลว (liquid phase) รวมทั้งที่ตกตะกอนผลึกกับโลหะหนักเป็นตะกอนผลึกของโลหะซัลไฟด์ โดยสภาวะสมดุลระหว่างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว สามารถอธิบายได้โดย Henry's Law ดังสมการที่ (10) จาก Lawrence, McCartney และ Guerin (1966) (อ้างโดย Isa และคณะ, 1986b)

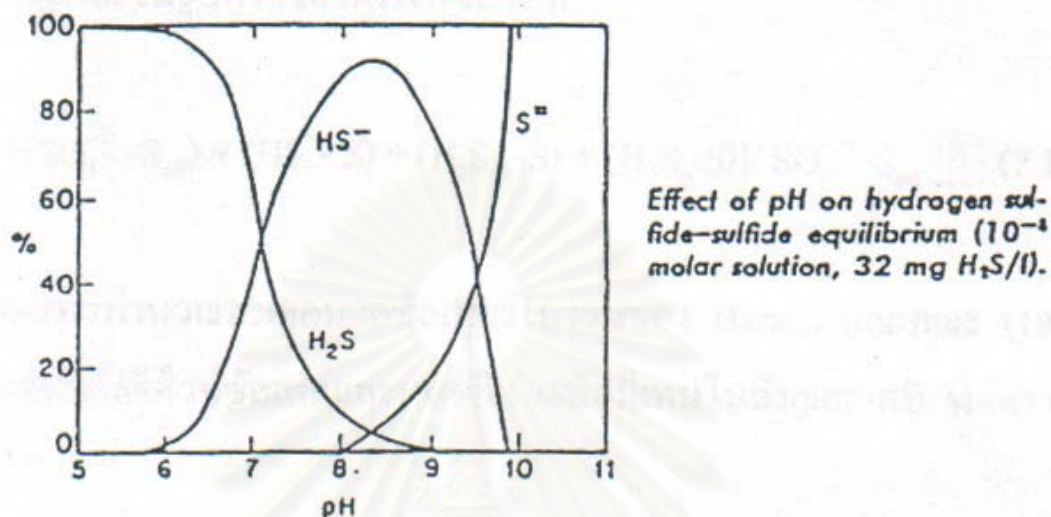
$$[H_2S]_{sol} = \Delta [H_2S]_g \quad (10)$$

โดยค่า  $\Delta$  คือ absorption coefficient

สำหรับ H<sub>2</sub>S<sub>sol</sub> ในวัฏภาคของเหลวซึ่งถือว่าเป็นกรดอ่อน จะแตกตัวตามสมการเคมีดังนี้



อย่างไรก็ตามสำหรับค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไร้อากาศจะอยู่ในช่วงกลางประกอบกับสัดส่วนของ  $S^{2-}$  ในระบบสมดุลของ  $H_2S$ ,  $HS^-$  และ  $S^{2-}$  เมื่อค่าพีเอชน้อยกว่า 9 จะมีค่าน้อยมากดังรูปที่ 2.9



**รูปที่ 2.9** ผลของพีเอชต่อสมดุลของ  $H_2S$ ,  $HS^-$  และ  $S^{2-}$  ในสารละลาย  $H_2S$  , 32 มิลลิกรัม/ลิตร (Sawyer และ McCarty, 1967)

ดังนั้น สมการแตกตัวครั้งที่ 1 ของไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีความสำคัญอย่างมาก และจะนำมาใช้ในการคำนวณหาสมดุลของ ซัลเฟอร์ในระบบ โดยค่าคงที่ของการแตกตัวครั้งที่ 1 ของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่สภาวะสมดุลได้จากสมการ

$$K_1 = [H^+] * [HS^-] / [H_2S_{sol}] \quad (11)$$

โดยค่า  $K_1$  คือค่าคงที่ของการแตกตัวครั้งที่ 1 ของ  $H_2S_{sol}$

ความเข้มข้นของ  $H_2S$  ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวสามารถคำนวณได้จากค่า  $K_1$  ค่าพีเอช และปริมาณซัลไฟด์ละลายน้ำทั้งหมด ตามสมการ (12) โดย Kroiss และ Wabnegg (อ้างโดย Isa และคณะ, 1986a) ดังนี้

$$f = (1 + K_1 / 10^{-pH})^{-1} \quad (12)$$

โดยค่า  $f$  คือ อัตราส่วนระหว่าง  $H_2S$  ละลายน้ำที่ไม่แตกตัวต่อปริมาณซัลไฟด์ละลายน้ำทั้งหมด ดังนั้น สมดุลมวลซัลไฟด์ในระบบหาได้จาก

$$SO_4^{2-}{}_{in} = SO_4^{2-}{}_{eff} + S^{2-} + HS^- + H_2S_{aq} + H_2S_{gas} \quad (13)$$

โดย		
$\text{SO}_4^{2-}$ in	=	ซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตน้ำเข้า
$\text{SO}_4^{2-}$ eff	=	ซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตน้ำออก
$\text{S}^{2-}$	=	ซัลเฟอร์ในรูปซัลไฟด์ไอออน
$\text{HS}^-$	=	ซัลเฟอร์ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่แตกตัว
$\text{H}_2\text{S}_{\text{aq}}$	=	ซัลเฟอร์ในรูปซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว
$\text{H}_2\text{S}_{\text{gas}}$	=	ซัลเฟอร์ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานะก๊าซ

$$\% \text{ sulfur recovery} = [(\text{SO}_4^{2-} \text{ eff} + \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}} + \text{H}_2\text{S}_{\text{gas}})] / \text{SO}_4^{2-} \text{ in}] * 100 \quad (14)$$

### 2.3.3 สมดุลมวลไนโตรเจน

เมื่อแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงใช้ในเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ไนเตรทจะถูกรีดิวซ์และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปไนโตรเจน

สมดุลมวลของไนโตรเจนในระบบหาได้จาก

$$\text{NO}_3^- \text{ in} = \text{NO}_3^- \text{ eff} + \text{NO}_2^- + \text{N}_2\text{O}_{\text{gas}} + \text{N}_2_{\text{gas}} + \text{soluble N}_2_{\text{gas}} \quad (15)$$

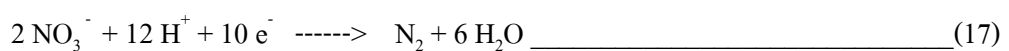
เมื่อ

$\text{NO}_3^- \text{ in}$	=	ไนโตรเจนในรูปไนเตรทที่อยู่ในน้ำเข้า
$\text{NO}_3^- \text{ eff}$	=	ไนโตรเจนในรูปไนเตรทที่อยู่ในน้ำออก
$\text{NO}_2^-$	=	ไนโตรเจนในรูปไนไตรท์
$\text{N}_2\text{O}$	=	ไนโตรเจนในรูปไนตรัสออกไซด์
$\text{N}_2_{\text{gas}}$	=	ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจน
$\text{soluble N}_2_{\text{gas}}$	=	ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจนที่ละลายน้ำ

$$\% \text{ nitrogen recovery} = [(\text{NO}_3^- \text{ eff} + \text{N}_2_{\text{gas}} + \text{soluble N}_2_{\text{gas}}) / \text{NO}_3^- \text{ in}] * 100 \quad (16)$$

โดยไนโตรเจนในรูป  $\text{N}_2\text{O}$  และ  $\text{N}_2\text{O}$  มักไม่พบในระบบของจริงเพราะเป็นรูปของไนโตรเจนที่ไม่เสถียร ซึ่งกระบวนการดีไนตริฟิเคชันรูปของไนโตรเจนก๊าซที่พบมากที่สุดคือก๊าซไนโตรเจน

$\text{N}_2$  (ทั้ง  $\text{N}_2_{\text{gas}}$  และ  $\text{soluble N}_2_{\text{gas}}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 17



$$124 \text{ g} \qquad \qquad 10 \text{ โมล} \qquad \qquad 28 \text{ g}$$



ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลซัลเฟอร์ (Harada และคณะ, 1994)

Table 2. Sulfur balance for Reactors A, B and C

	Loading rate	eff-S (%)			H <sub>2</sub> S gas-S (4) (%)	Recovery (5) (%)
		SO <sub>4</sub> -S (1)	Ionized-S (2)	H <sub>2</sub> S-S (3)		
Reactor A	1.0	9.4 (4.1)	70.4 (17.1)	11.8 (3.8)	1.7 (0.4)	93.1 (11.2)
	1.5	12.2 (1.3)	42.5 (6.5)	24.2 (4.2)	2.0 (0.2)	80.8 (6.0)
	2.0	19.4 (4.5)	44.3 (4.2)	26.1 (4.9)	1.4 (1.0)	90.6 (1.6)
	2.5	14.6 (4.7)	51.0 (6.7)	27.2 (4.9)	2.2 (0.5)	95.0 (3.7)
	3.0	17.7 (6.5)	47.5 (7.3)	29.0 (5.6)	3.1 (0.6)	96.7 (9.6)
	Total	14.0 (6.2)	54.7 (16.0)	21.9 (8.9)	2.3 (0.8)	93.2 (9.6)
Reactor B	1.0	7.6 (4.1)	73.9 (3.8)	9.1 (0.4)	1.2 (0.4)	90.6 (9.1)
	1.5	6.6 (2.4)	66.3 (4.6)	16.5 (5.4)	1.5 (0.4)	91.2 (6.9)
	2.0	5.8 (3.0)	63.0 (2.7)	24.7 (4.7)	1.4 (0.3)	93.7 (6.1)
	2.5	3.9 (0.3)	61.9 (3.2)	23.9 (2.0)	1.6 (0.2)	90.6 (1.3)
	3.0	4.6 (1.7)	66.6 (6.0)	26.1 (9.8)	1.3 (0.4)	98.1 (6.9)
	Total	6.1 (3.2)	66.9 (6.3)	14.4 (9.0)	1.3 (0.5)	98.1 (6.9)
Reactor C	1.0	70.8 (8.3)	18.9 (2.0)	2.1 (0.5)	0.2 (0.1)	92.9 (8.7)
	1.5	61.9 (2.9)	26.3 (2.7)	5.0 (0.7)	0.4 (0.1)	93.5 (5.0)
	2.0	52.7 (4.3)	32.4 (4.9)	9.7 (4.1)	0.4 (0.1)	95.1 (2.5)
	2.5	53.8 (2.7)	29.6 (3.4)	14.0 (0.6)	0.3 (0.0)	98.0 (1.6)
	3.0	36.0 (6.2)	39.4 (11.7)	14.4 (1.5)	0.3 (0.1)	90.0 (5.2)
	Total	57.8 (13.7)	27.5 (9.3)	7.6 (5.4)	0.3 (0.1)	95.5 (6.5)

(1) SO<sub>4</sub>-S = sulfate-S remaining in the effluent; (2) ionized-S = (HS<sup>-</sup>-S + S<sup>2-</sup>-S) in the effluent; (3) H<sub>2</sub>S-S = dissolved H<sub>2</sub>S in the effluent; (4) H<sub>2</sub>S gas-S = gaseous H<sub>2</sub>S-S recovered in biogas and (5) recovery = (SO<sub>4</sub>-S + ionized-S + H<sub>2</sub>S dissol. + H<sub>2</sub>S-S gas) per removed sulfate. Loading rate = organic loading rate (kg COD m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>). Figures in parentheses represent standard deviation.

จากสมการด้านบน จะเห็นได้ว่า ไนโตรเจนที่ลดลง 124 กรัม เกิดจากการรับอิเล็กตรอน 10 โมล กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน 28 กรัม โดย N<sub>2 gas</sub> หารได้จากอัตราการวัดปริมาตรก๊าซที่ได้เป็นจำนวน โมลของก๊าซไนโตรเจนด้วยกฎของก๊าซ ส่วน soluble N<sub>2</sub> จำนวน โดยใช้ทฤษฎีของเฮนรี เช่นเดียวกันกับการคำนวณซีโอดีในรูปของก๊าซมีเทน

โดยน้ำหนักของไนโตรเจน 1 โมล = 28 กรัม

$$K_b = \text{ค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับก๊าซไนโตรเจนที่ } 30^\circ\text{C (โมล/ลิตร)}$$

$$= 6.03 \times 10^{-4}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

การทดลองทำที่ชั้น 17 อาคารมหามฤค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ถังกรองไร้อากาศจำนวน 3 ถังที่มีลักษณะเหมือนกัน ทำการทดลอง 3 ชุดการทดลอง และในแต่ละชุดการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ช่วงการทดลอง คือ

##### 3.1.1 การทดลองช่วงที่ 1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์

###### 3.1.1.1 ตัวแปรอิสระที่กำหนดให้คงที่

3.1.1.1.1 อัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 24 ลิตรต่อวัน ลักษณะไหล

ต่อเนื่อง

3.1.1.1.2 ระดับความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.1.1.1.3 แหล่งคาร์บอนคือน้ำตาลทราย

###### 3.1.1.2 ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา

3.1.1.2.1 อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 3 ชุดการทดลอง 5:1 , 10:1 และ 15:1

3.1.1.2.2 ระดับความเข้มข้นของซีโอดี คือ 450 , 900 และ 1,350 มิลลิกรัม

ต่อลิตร

##### 3.1.2 การทดลองช่วงที่ 2 ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส

###### 3.1.2.1 ตัวแปรอิสระที่กำหนดให้คงที่

3.1.2.1.1 อัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 24 ลิตรต่อวัน ลักษณะไหล

ต่อเนื่อง

3.1.2.1.2 ระดับความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.1.2.1.3 ระดับความเข้มข้นของไนเตรทเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.1.2.1.4 แหล่งคาร์บอนคือน้ำตาลทราย

### 3.1.2.2 ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา

อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 3 ค่า ในการทดลองช่วงที่ 2 นั้นได้จากค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่เพียงพอแล้วจากการทดลองช่วงที่ 1 บวกค่าซีโอดีเพิ่มอีก 5 , 10 และ 15 ตามลำดับ โดยที่ทั้ง 2 ช่วงการทดลองจะดำเนินการทดลองและศึกษาเช่นเดียวกัน คือ วัดและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ โออาร์พี สภาพด่างทั้งหมด กรดไขมันระเหยของแข็งแขวนลอยของแข็งทั้งหมด ซีโอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ ไนเตรท ปริมาณก๊าซทั้งหมด

## 3.2 การเตรียมน้ำเสีย

### 3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 3 ชุดในแต่ละชุดการทดลองจะเติมซัลเฟตให้ได้ความเข้มข้นที่ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณซีโอดีที่ 450 , 900 และ 1,350 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เพื่อให้ได้อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต เป็น 5:1 , 10:1 และ 15:1 โดยใช้ น้ำตาลทรายลงเป็นแหล่งคาร์บอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จะทำวันต่อวัน หลังจากนั้นน้ำเสียสังเคราะห์จะถูกเก็บไว้ในถังพลาสติก ก่อนที่จะนำไปเติมในระบบถังกรองไร้อากาศ เมื่อน้ำเสียในถังพักหมดก็จะนำถังพักน้ำเสียมาล้างทำความสะอาดก่อน แล้วจึงเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ลงในถังพักน้ำเสียที่สะอาดแล้ว ทั้งนี้เพื่อป้องกันปัญหาการหมักที่อาจเกิดขึ้นได้ในถังพักน้ำเสีย ส่วนประกอบของน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ น้ำตาลทราย โซเดียมไบคาร์บอเนต ยูเรีย โปแตสเซียมฟอสเฟต และ โปแตสเซียมซัลเฟต ในอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 350:5:1 โดยเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตให้พอเพียงในการปรับค่าพีเอช

หลังจากเดินระบบการทดลองช่วงที่ 1 แล้วได้อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่เพียงพอ นำมาทำการเดินระบบการทดลองช่วงที่ 2 ซึ่งใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส

### 3.2.2 การเตรียมน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส

น้ำเสียจริงจาก โรงงานผลิตสแตนเลสในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 3 ชุด ตามอัตราส่วน ซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ชุดการทดลองจะเติมซัลเฟตให้ได้ความเข้มข้นที่ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมไนเตรทให้ได้ความเข้มข้นที่ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองช่วงที่ 1 จะได้อัตราส่วนของแหล่งคาร์บอนที่เพียงพอในการเดินระบบ จากนั้นเลือกเอาอัตราส่วนที่เพียงพอ แล้วบวกค่าซีโอดีเพิ่มอีก 5 , 10 และ 15 ตามลำดับ เพื่อเพียงพอสำหรับการกำจัดไนเตรท โดยใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน

การเตรียมน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสในแต่ละวันจะต้องตรวจวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ ของน้ำเสีย ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ โออาร์พี สภาพต่างทั้งหมด กรดไขมันระเหยของแข็งแขวนลอยของแข็งทั้งหมด ซีโอดี ซัลไฟด์ ซัลเฟต ไนเตรท ก่อนที่จะทำการเดินระบบในแต่ละครั้ง

### 3.3 การดำเนินการทดลอง

ทำการติดตั้งถังกรองไร้อากาศที่ริมระเบียงชั้น 17 ตึกมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยถังกรองไร้อากาศจะสูบน้ำเข้าทางด้านล่างของตัวถังจากถังพักน้ำเสีย หลังจากนั้นน้ำจะผ่านชั้นกรองที่มีมีเดียพลาสติกและตะกอนจุลินทรีย์ ไหลออกมาทางด้านบน ลงสู่ถังน้ำทิ้ง ก๊าซชีวภาพจะไหลผ่านอุปกรณ์สามสถานะ(Gas Solid Separator; GSS) ทางด้านบนของตัวถังกรอง ต่อสายเข้าสู่ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ต่ออยู่กับอุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ ดังรูป 3.2 เดินระบบอย่างต่อเนื่องที่อัตราสูบน้ำเสียเข้าสู่ระบบที่ 24 ลิตรต่อวัน โดยระวังไม่ให้น้ำเสียในถังพักน้ำหมดเพราะจะทำให้สูบบ่ออากาศเข้าสู่ระบบได้ ระวังเรื่องแสงแดดที่ส่องผ่านเนื่องจากตัวถังกรอง ที่ทำมาจากอะคริลิกใส ทำให้เกิดตะไคร่น้ำเกาะติดตรงตัวถังถ้าปล่อยไว้ให้ถูกแสงแดด ตะไคร่น้ำจะสังเคราะห์แสงผลิตก๊าซออกซิเจนออกมาในระบบ ซึ่งระบบที่ศึกษานี้ไม่ต้องการออกซิเจน จึงนำพลาสติกสีดำมาคลุมรอบทั้งระบบเพื่อป้องกันการถูกแสงแดด ดังรูป 3.1

การเริ่มต้นระบบ (Start up) ในการทดลอง เริ่มโดยการเติมตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge) ประมาณ 20 กรัมเอ็มแอลวีเอสเอสต่อลิตร ลงไปในถังกรองไร้อากาศที่มีมีเดียพลาสติกอยู่ในถัง 70% ของตัวถังกรอง ได้ทำการติดตั้งให้มีชุดอุปกรณ์เหมือนกันทั้ง 3 ชุด ทำการทดลองในสภาวะเดียวกัน ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ได้มาจากระบบยูเอเอสบีของระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเส้นไหม จากนั้นทำการปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ให้มีความคุ้นเคยกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณความเข้มข้นซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส 350:5:1 เข้าระบบอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดีต่ำก่อน แล้วจึงปรับเพิ่มความเข้มข้นซีโอดีให้ได้เท่ากับ 450 , 900 และ 1,350 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่อัตราสูบน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบ 24 ลิตรต่อวัน เป็นเวลา 30 วัน หลังจากนั้นได้ทำการปรับสภาพตะกอนจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีซัลเฟตโดยค่อยเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟตจนได้ความเข้มข้นที่ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นเดินระบบศึกษาอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตโดยการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยนี้มี 2 ช่วงการทดลอง คือ ช่วงที่ 1 ศึกษาอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่เพียงพอในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบถังกรองไร้อากาศ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนช่วงที่ 2 นำอัตราที่เพียงพอเพิ่มอัตราส่วนซีโอดีอีก 5, 10 และ 15 ตามลำดับ โดยต้องทำการปรับค่าซีโอดีใหม่ เพื่อบำบัดไนเตรทที่มากับน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส เพราะการจะบำบัดไนเตรทต้องใช้แหล่งคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น ก่อนที่จะเติมน้ำ

เสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส ต้องทำการปรับสภาพน้ำเสียให้มีปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟตที่ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร และไนเตรทเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วจึงสามารถเติมน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลส ในถังกรองได้ การทดลองทั้งหมดนี้ใช้ระยะเวลาทดลองรวมทั้งสิ้นประมาณ 10 เดือน ตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบ การทดลองช่วงที่ 1 และการทดลองช่วงที่ 2 (ตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ขั้น ตอน	การดำเนินการทดลอง	พ.ศ. 2549										
		มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
1.	ช่วงเริ่มต้นเดินระบบ	←→										
2.	ช่วงการทดลองที่ 1 ศึกษาหาอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์				←→							
3.	ช่วงการทดลองที่ 2 ศึกษาหาอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานสแตนเลสที่มีทั้งซัลเฟตและไนเตรท							←→				

### 3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.4.1 ถังกรองใรร้อากาศ

ตัวถังกรองใรร้ออากาศทำด้วยอะคริลิกใส รูปทรงกระบอกสูง 2 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.05 เมตร มีปริมาตรประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  ลูกบาศก์เมตร ส่วนตกตะกอนสูง 0.20 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.10 เมตร ทำจากท่อพีวีซี ส่วนอุปกรณ์แยกสามสถานะ (Gas Solid Separator; GSS) จะอยู่ในส่วนตกตะกอน แสดงดังรูป 3.3

#### 3.4.2 ตัวกลาง

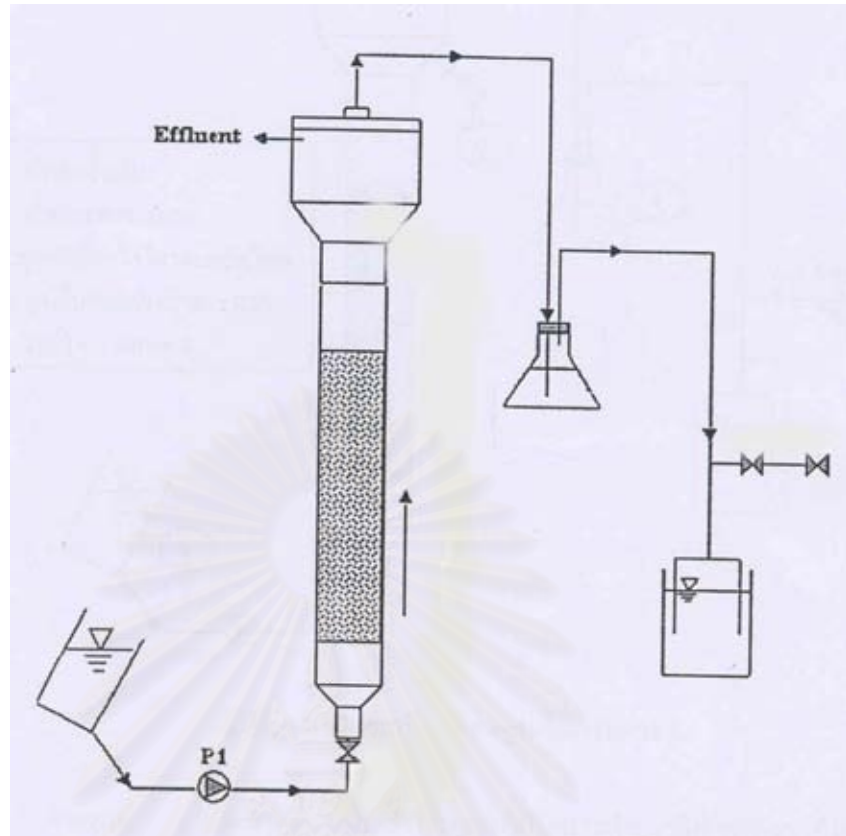
ตัวกลางทำจากพลาสติก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร และยาว 2 เซนติเมตร ข้างในกลวง แสดงดังรูป 3.4



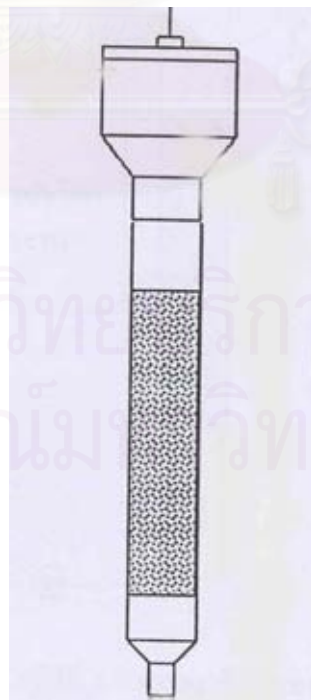


รูปที่ 3.1 ระบบดึงกรองไร้อากาศ





รูปที่ 3.2 ระบบถังกรองไร้อากาศ



รูปที่ 3.3 ตัวถังกรองไร้อากาศ

### 3.4.3 เครื่องสูบน้ำเสีย

ถังกรองไร้อากาศ 1 ชุด ประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำ 1 ตัว น้ำเสียจะถูกสูบเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องจากถังพักน้ำเสียไปยังทางเข้าของตัวถังกรองไร้อากาศที่อยู่ด้านล่างของถังกรอง เครื่องสูบน้ำเสียที่ใช้เป็นแบบ Diaphragm Pump ยี่ห้อ Prominent Diaphragm Metering Pump

### 3.4.4 ถังพักน้ำเสีย

ถังกรองไร้อากาศ 1 ชุด จะประกอบด้วยถังพลาสติกที่มีปริมาตร 66 ลิตร จำนวน 1 ถัง และถังพักน้ำทิ้ง ใช้ถังพลาสติกขนาด 33 ลิตร จำนวน 1 ถัง เพราะฉะนั้นรวมทั้งหมดจำนวน 3 ชุด และถังผสมน้ำ 66 ลิตร จำนวน 1 ถัง

### 3.4.5 ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

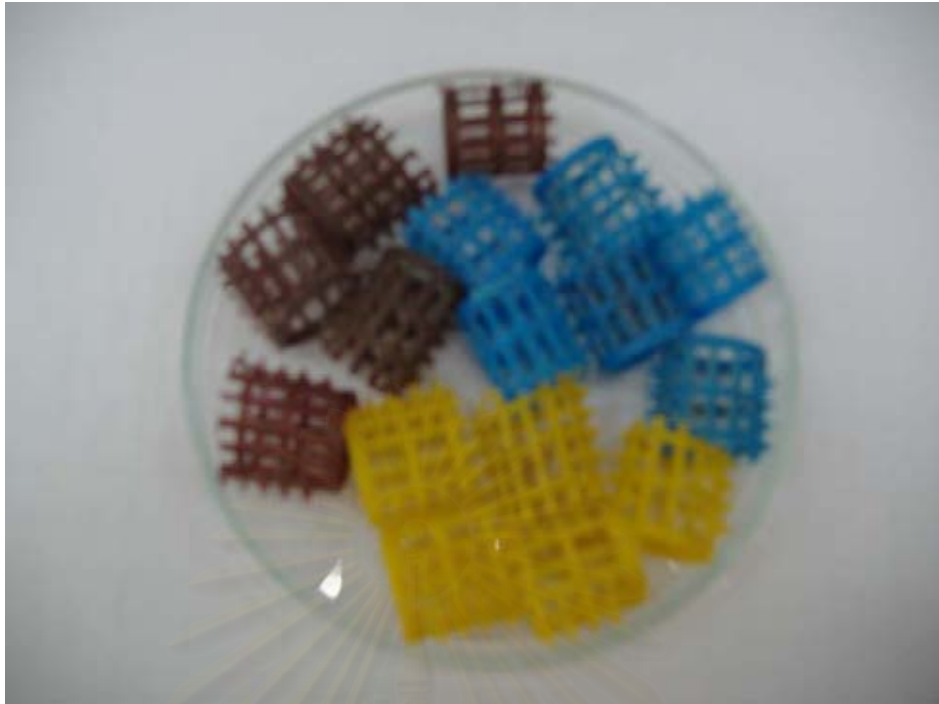
ถังกรองไร้อากาศ 1 ชุด ประกอบด้วยชุดดักไฮโดรเจนซัลไฟด์จำนวน 1 ชุด ประกอบด้วยขวดรูปชมพู่จำนวน 1 ขวด ขนาด 500 มิลลิลิตร ปากขวดปิดด้วยจุกยางสีดำเจาะรู 2 รู สอดท่อแก้วนำก๊าซจำนวน 2 หลอด หลอดยาวให้อยู่ในระดับน้ำที่เต็มซึ่งอะซิเตท เป็นหลอดนำก๊าซเข้า หลอดยาวจะต่อสายต่อกับตัวถังกรองไร้อากาศ ส่วนหลอดสั้นให้อยู่พ้นเหนือน้ำเป็นหลอดนำก๊าซออก และต่อสายท่อไปที่ชุดวัดปริมาณก๊าซอีกทีเพื่อหาปริมาณก๊าซทั้งหมด ดังรูป 3.5

### 3.4.6 อุปกรณ์วัดก๊าซ

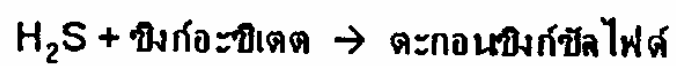
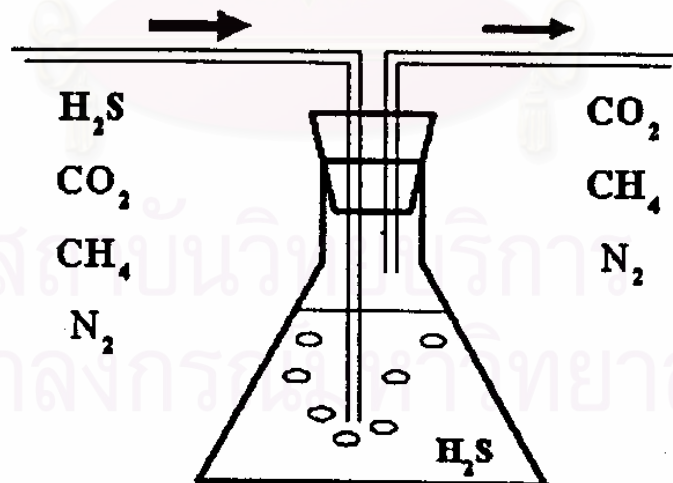
ถังกรองไร้อากาศ 1 ชุด จะประกอบด้วยอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซ 1 ชุด ซึ่งต่อกับท่อนำก๊าซจากระบบถังกรองไร้อากาศทางด้านบน ทำงานโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ ป้องกันการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการปรับน้ำให้ค่าต่ำกว่าพีเอช 3 ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นที่วัดได้จากระบบคือปริมาณก๊าซทั้งหมด (มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและก๊าซอื่น ๆ) ผู้ทำการศึกษาได้ทำการวัดอย่างต่อเนื่อง

## 3.5 การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่าง

การบำบัดน้ำเสีย มีพารามิเตอร์ที่ทำ การวัดและวิเคราะห์ และความถี่ในการเก็บตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 3.2 และวิธีการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.4 ตัวกลางพลาสติก



รูปที่ 3.5 ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	น้ำเข้าระบบ	น้ำออกระบบ	ความถี่ในการวิเคราะห์
พีเอช	X	X	A
อุณหภูมิ	X	X	A
โออาร์พี	-	X	A
ซีโอดี	X	X	B
ซัลเฟต	X	X	B
ซัลไฟด์	X	X	B
ไนเตรท	X	X	B
ของแข็งแขวนลอย	X	X	B
ของแข็งทั้งหมด	X	X	B
สภาพค่าทั้งหมด	X	X	C
กรดไขมันระเหย	X	X	D
ปริมาณก๊าซทั้งหมด	จุดระบายก๊าซ		B
สัดส่วนของก๊าซ	จุดระบายก๊าซ		E
ความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน	ระดับ 0.1, 0.75 และ 1.5 เมตร จากกันถังกรอง		E

- หมายเหตุ :
- A คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์สัปดาห์ละ 3 ครั้ง
  - B คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
  - C คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์สัปดาห์ละ 1 ครั้ง
  - D คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์ทุก 15 วัน
  - E คือ พารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์หลังจากสิ้นสุดการทดลอง

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
พีเอช	pH Meter
อุณหภูมิ	Thermometer
โออาร์พี	ORP Meter
สภาพด่างทั้งหมด	Direct Titration Method
กรดไขมันระเหย	Direct Titration Method
ซีโอดี	Close Reflux
ซัลเฟต	Turbidimetric Method
ซัลไฟด์	Iodometric Method
ไนเตรท	UV (220 nm)
ของแข็งแขวนลอย	Standard Method 2540d
ของแข็งทั้งหมด	Standard Method 2540b
ปริมาณก๊าซทั้งหมด	วัดปริมาณก๊าซแบบแทนที่น้ำ
สัดส่วนของก๊าซ	Gas Chromatography
ความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน	SMA (Specific Methanogenic Activity)



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

#### 4.1 ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ช่วงการทดลอง

##### 4.1.1 ผลการศึกษา การทดลองช่วงที่ 1

การทดลองช่วงที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตในการบำบัดน้ำเสียว่าอัตราส่วนใดมีความเพียงพอในการบำบัดในระบบถังกรองไร้อากาศโดยกำหนดอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 3 ชุด การทดลอง คือ 5:1 , 10:1 และ 15:1 กำหนดให้ความเข้มข้นซัลเฟตที่ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากันทั้ง 3 ถังกรอง ส่วนค่าซีโอดีที่ใช้คือ 450 , 900 และ 1,350 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในการทดลองช่วงที่ 1 นี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยกำหนดอัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 24 ลิตรต่อวัน และความเร็วไหลขึ้นของน้ำในถังกรองเท่ากับ 0.5 เมตรต่อชั่วโมง ได้ใช้เวลาการทดลองทั้งหมด 90 วัน จนระบบอยู่ในสภาวะคงตัว ตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์ มีดังนี้

##### 4.1.1.1 พีเอช สภาพต่างทั้งหมด และ กรดไขมันระเหย

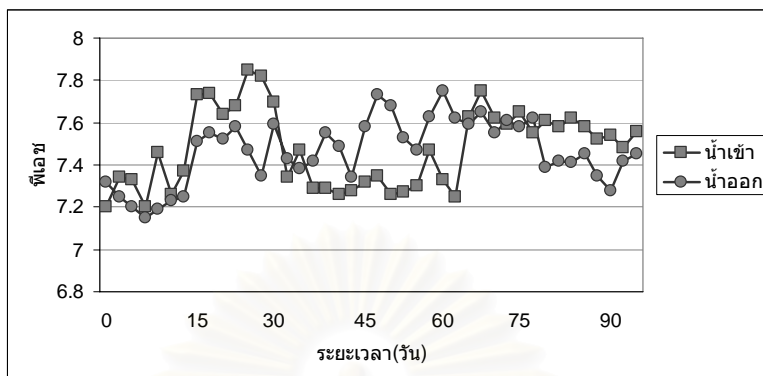
ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต (5:1, 10:1 และ 15:1) ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 7.48 , 7.42 และ 7.38 ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.46 , 7.38 และ 7.46 ตามลำดับ ค่าพีเอชของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดัง รูปที่ 4.1

ค่าพีเอชต่ำในน้ำเสียจะมีปริมาณไฮโดรเจนไอออนอยู่มาก ทำให้ให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตและตายของจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจะขึ้นอยู่กับปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ในระบบ ถ้าระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์พอเพียง จะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะฉะนั้น ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้ โซเดียมไบคาร์บอเนต( $\text{NaHCO}_3$ ) ในการปรับค่าพีเอชน้ำเสีย ซึ่งต้องเติมให้เพียงพอเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมในระบบ

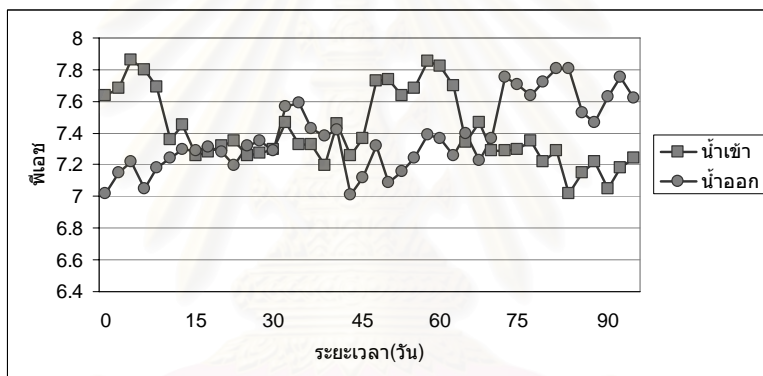
จากผลการทดลอง พบว่า ค่าพีเอชของน้ำเสียอยู่ในช่วง 6.8-8.2 ซึ่งมีค่าที่เป็นกลาง เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

สภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 215.50 , 342.79 และ 455.42 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำ

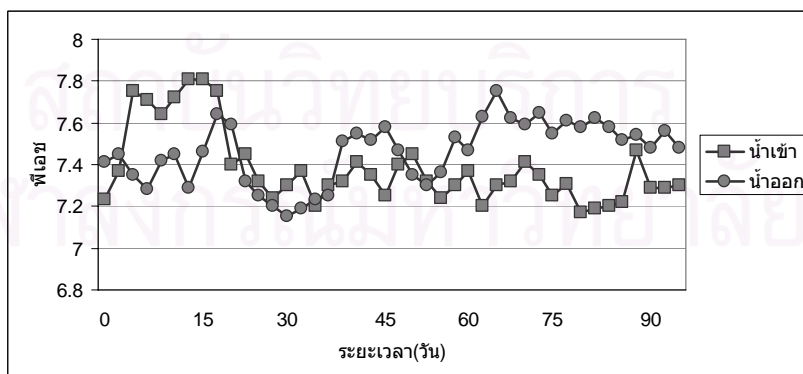
ออกจากระบบมีค่าสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 240 , 351 และ 449 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดัง รูปที่ 4.2



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1

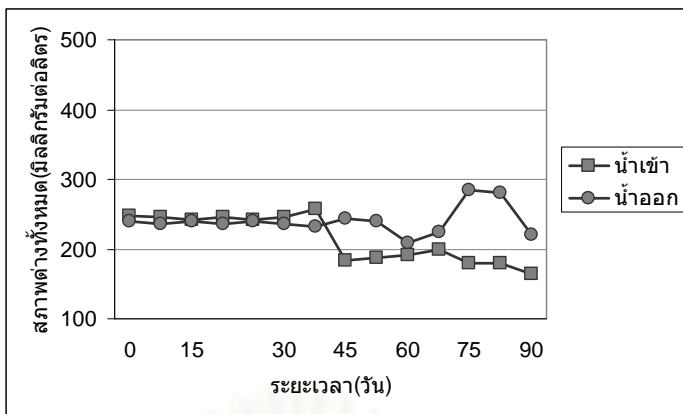


ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

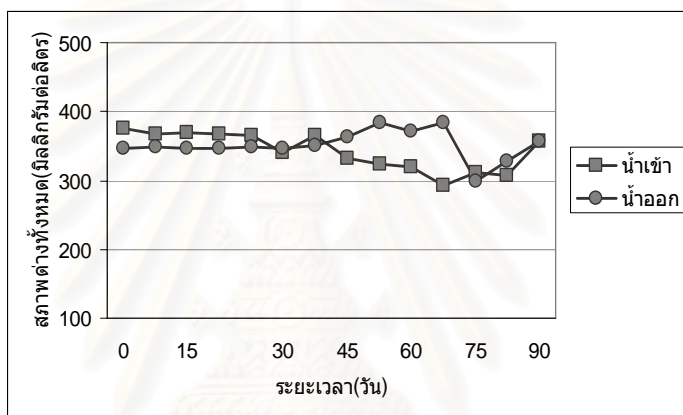


ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

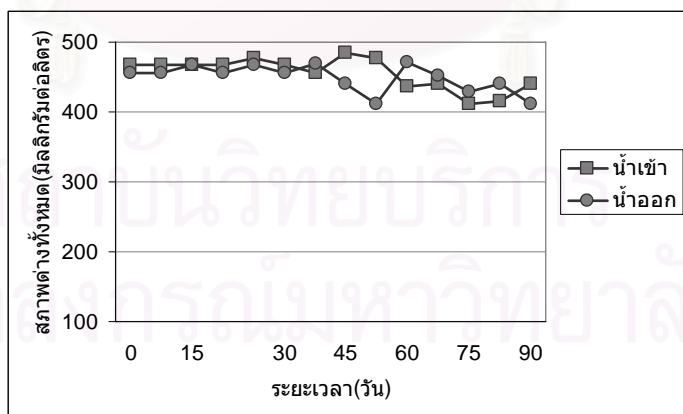
รูปที่ 4.1 ค่าพีเอชตลอดการทดลองช่วงที่ 1



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1



ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

รูปที่ 4.2 ค่าสภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1

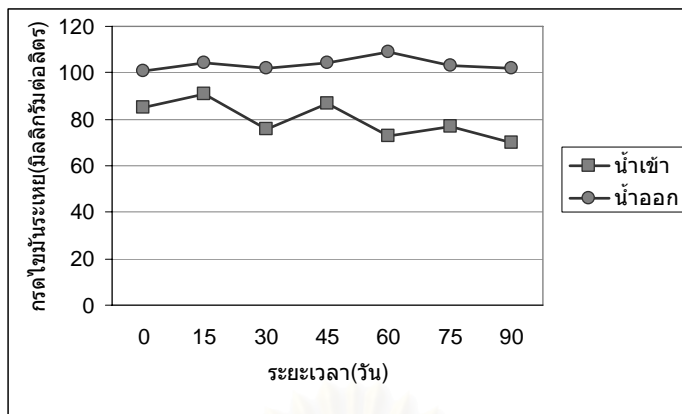
จากผลการทดลองพบว่า สภาพค่าทั้งหมดของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงกัน นำไปวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า น้ำเข้าและน้ำออกจากระบบทั้ง 3 ถังกรองไร้อากาศไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

กระบวนการไร้อากาศที่มีซัลเฟตสามารถผลิตค่าสภาพค่าให้เพิ่มขึ้นในน้ำออกได้ ถึงแม้เป็นน้ำเสียประเภทคาร์โบไฮเดรตก็ตาม แต่จะผลิตค่าสภาพกรดซึ่งมาจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตซึ่งมีการย่อยสลายแบบไม่สมบูรณ์ เกิดอะซิเตตจึงทำให้ค่าพีเอชน้ำออกจากระบบลดลง

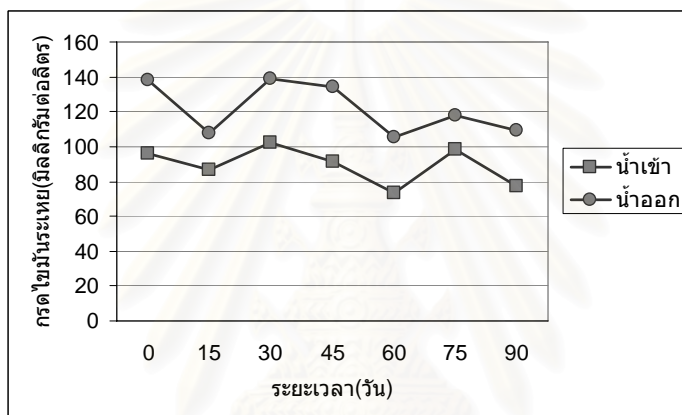
กรดไขมันระเหยของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟตทั้ง 3 ถังกรอง มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 79.86 , 89.14 และ 105.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 103.57 , 121.57 และ 140.43 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดัง รูปที่ 4.3

จากผลการทดลองพบว่า กรดไขมันระเหยของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงกัน กรดไขมันระเหยของน้ำเสียที่เข้าระบบและน้ำเสียที่ออกจากระบบจะบอกถึงการทำงานของ จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน น้ำออกมีค่ามากกว่าน้ำเข้าเนื่องจากจุลินทรีย์สร้างกรดในระบบจะเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันระเหย (Acidogenesis) ซึ่งในระบบควรมีอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่าทั้งหมดน้อยกว่า 0.4 ระบบจึงจะมีกำลังบัฟเฟอร์ทำให้ระบบอยู่ในสถานะที่ดี แต่ถ้าค่ากรดไขมันระเหยต่อสภาพค่าทั้งหมดสูงกว่า 0.4 แสดงว่าระบบล้มเหลว ซึ่งทั้ง 3 ถังกรอง มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่า ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์

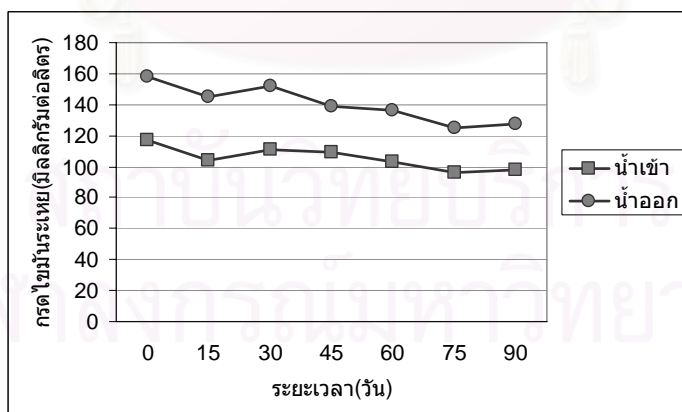
ทั้งพีเอช สภาพค่าทั้งหมดและกรดไขมันระเหยนั้นมีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือเมื่อพีเอชของระบบต่ำลงทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถทำงานได้ผลดี ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยได้พอดี ทำให้ไขมันระเหยเหลือในระบบมาก ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้พีเอชของระบบลดต่ำลง หรือการเติมค่าไม่เพียงพอก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้พีเอช และสภาพค่าทั้งหมด ลดต่ำลง จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำลงหรืออาจตายได้ เพราะฉะนั้นควรตรวจสอบค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการทดลองคือ 6.8-8.2 ซึ่งแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตจะมีค่าพีเอชกลาง คือ 7 จะถูกยับยั้งเมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 6 หรือสูงกว่า 9 และแบคทีเรียสร้างมีเทนจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วง 6.5-8.2 จะถูกยับยั้งเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6.2 ดังนั้นการควบคุมค่าพีเอชจึงเป็นกลไกสำคัญในการควบคุมระบบ



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1



ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

รูปที่ 4.3 ค่ากรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 1



#### 4.1.1.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.30 , 30.30 และ 30.30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 30.38 , 30.52 และ 30.64 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิ ของการทดลอง ช่วงที่ 1 แสดงดัง รูปที่ 4.4

จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิตลอดการทดลองช่วงที่ 1 จะอยู่ในช่วง 29- 31 ซึ่งถือว่าอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม เพราะอุณหภูมิที่เหมาะสมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศควรมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากประเทศไทยเป็นเมืองร้อนจึงไม่มีปัญหาเรื่องอุณหภูมิจากน้ำเสียที่เข้าระบบ ไม่จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิ เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ อยู่แล้ว จากรูป 4.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในระบบใกล้เคียงกันมาก และต่างอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม (Mesophilic) คือ 20-45 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

#### 4.1.1.3 ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลาย และของแข็งทั้งหมด

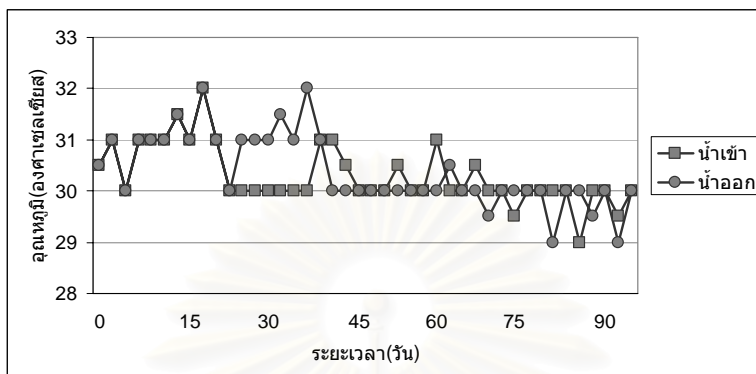
ของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 35.78 , 34.29 และ 30.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 20.56 , 17.84 และ 18.59 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ของแข็งแขวนลอย ของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดัง รูปที่ 4.5

จากผลการทดลองพบว่า ของแข็งแขวนลอยของน้ำที่ออกจากระบบจะมีน้อยกว่า ในน้ำที่เข้าระบบ ตัวเชื้อจุลินทรีย์เกาะอยู่กับมีเดียข้างล่างในระบบถังกรองไร้อากาศจึงทำให้มี ปริมาณของแข็งแขวนลอยน้อย เพราะจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ไม่หลุดลอยออกมา น้ำที่ผ่านออกมาจาก ถังกรองจึงใส

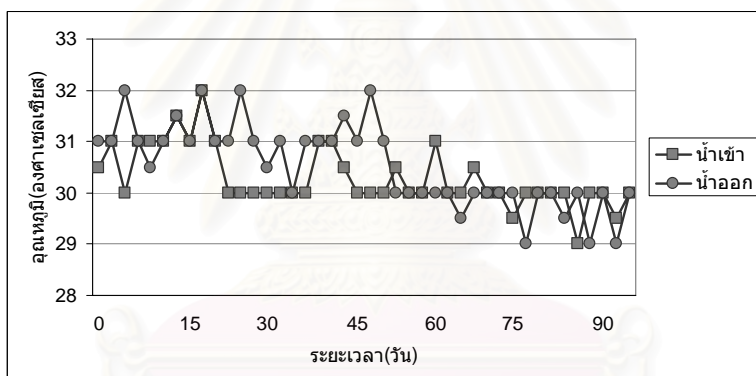
ของแข็งละลายของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1,619.22 , 2,183.28 และ 2,403.93 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วน น้ำออกจากระบบมีค่าของแข็งละลายเฉลี่ยเท่ากับ 741.15 , 957.19 และ 956.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ของแข็งทั้งหมด ของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดัง รูปที่ 4.6

ของแข็งทั้งหมดของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1,655 , 2,217.57 และ 2,462.64 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออก จากระบบมีค่าของแข็งทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 761.71 , 973.79 และ 974.93 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ของแข็งทั้งหมด ของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดัง รูปที่ 4.7

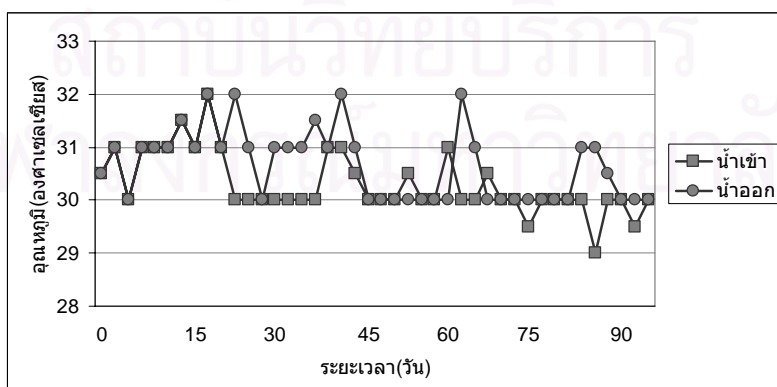
จากผลการทดลองพบว่า ของแข็งละลายและของแข็งทั้งหมด ของน้ำที่ออกจากระบบจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดน้อยกว่าน้ำที่เข้าระบบ เพราะมีการกำจัดซัลเฟตออกจากระบบ จึงทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำออกมีค่าน้อยกว่าน้ำเข้า



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1

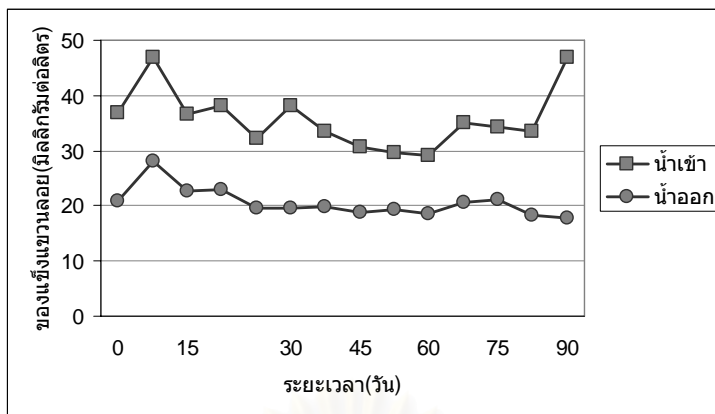


ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

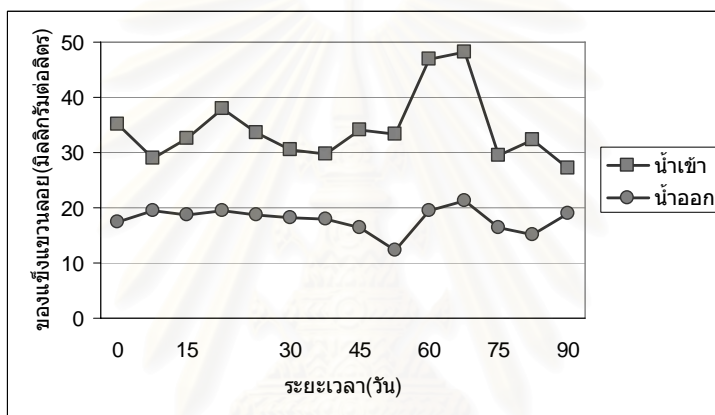


ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

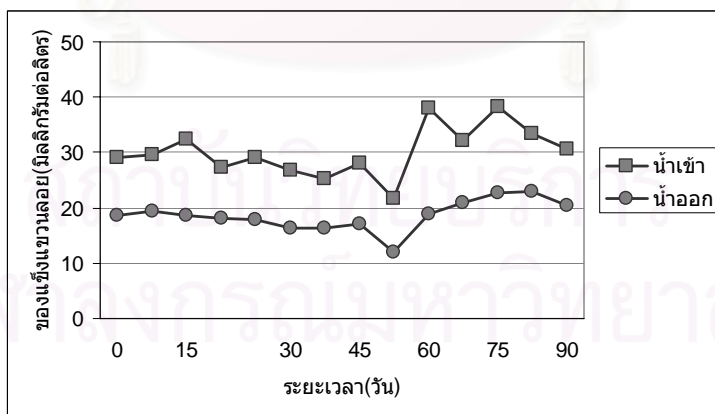
รูปที่ 4.4 อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 1



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1

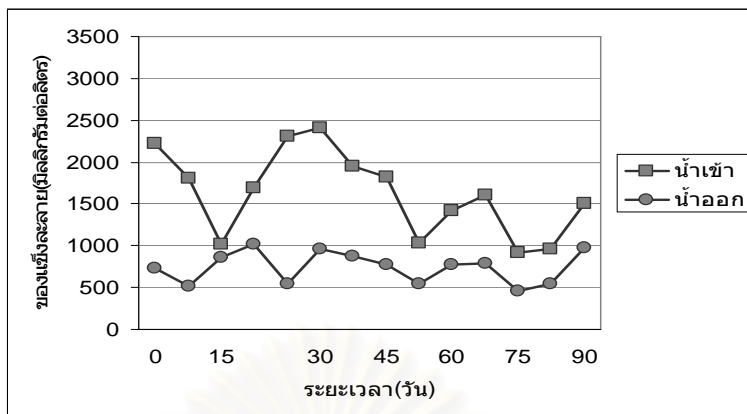


ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

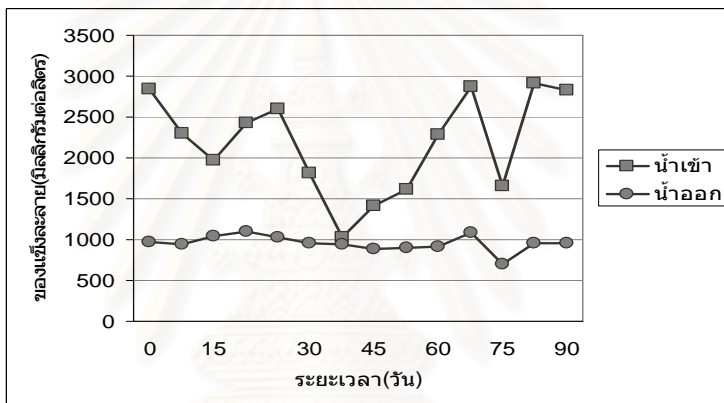


ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

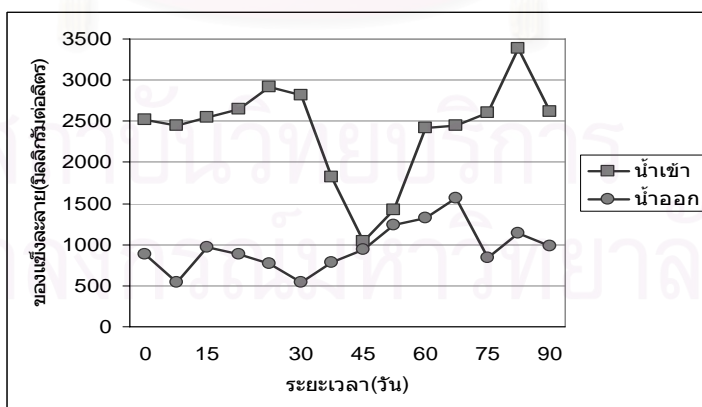
รูปที่ 4.5 ของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 1



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1

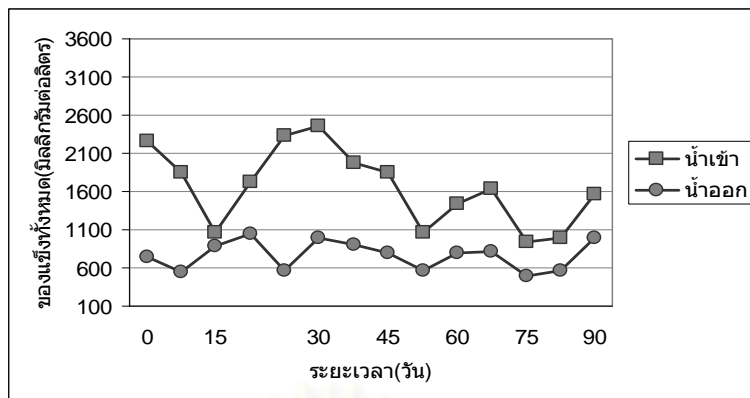


ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

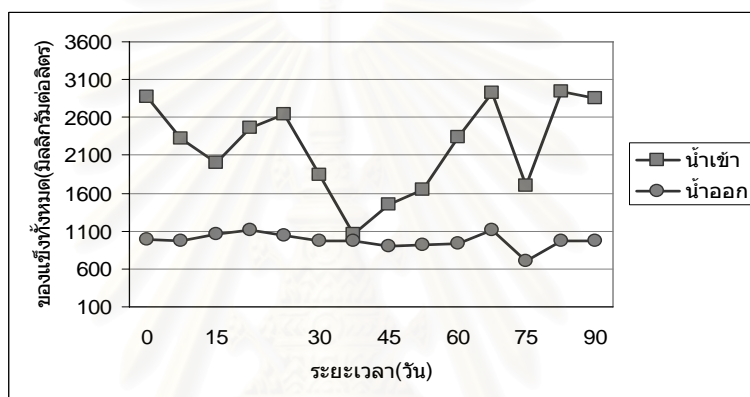


ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

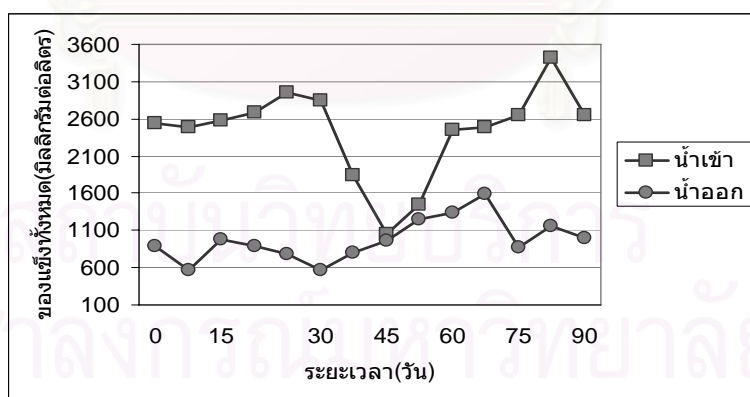
รูปที่ 4.6 ของแข็งละลายของการทดลองช่วงที่ 1



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1



ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

รูปที่ 4.7 ของแข็งทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1



#### 4.1.1.4 โออาร์พี

โออาร์พีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ -287.05 , -287.45 และ -288.119 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โออาร์พีของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.8

จากผลการทดลองพบว่าโออาร์พีทั้ง 3 ถังกรอง อยู่ในช่วง (-259) – (-328) มิลลิโวลต์ แสดงให้เห็นว่าเป็นระบบไร้อากาศ

#### 4.1.1.5 ซีโอดี

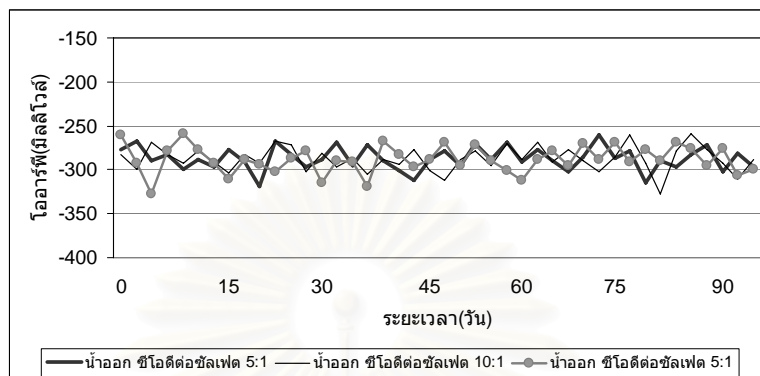
ซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีการควบคุมซีโอดีให้มีความเข้มข้นซีโอดี เท่ากับ 450 , 900 และ 1350 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเท่ากับ 526.71 , 1,003.87 และ 1,409.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากในแต่ละวันมีการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ทุกวัน ทำให้ค่าแตกต่างกัน แต่ก็ได้ค่าเฉลี่ยตามที่ควบคุมไว้ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 49.55 , 51.61 และ 85.16 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 90.48 , 94.67 และ 93.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซีโอดี ของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดัง รูปที่ 4.9

จากผลการทดลองพบว่าซีโอดีในการบำบัดน้ำเสียในช่วงแรกยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ดีนักเพราะจุลินทรีย์กำลังปรับตัวเพื่อย่อยสลายน้ำเสีย แต่พอเวลาผ่านไปจุลินทรีย์เริ่มมีการบำบัดดีขึ้น และเริ่มคงที่จนอยู่ที่สภาวะคงตัวกล่าวคือ ประสิทธิภาพในการบำบัดคงที่ ทั้ง 3 ถังกรอง มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีและใกล้เคียง ดังตารางที่ 4.1

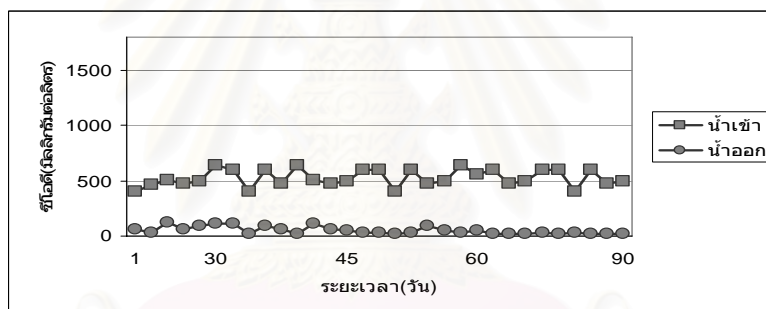
#### 4.1.1.6 ซัลเฟต

ซัลเฟตของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีการควบคุมซัลเฟตให้มีความเข้มข้นซัลเฟต เท่ากับ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ถังปฏิกรณ์มีค่าเท่ากับ 92.17 , 94.14 และ 92.94 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากในแต่ละวันมีการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ทุกวัน ทำให้ค่าแตกต่างกัน แต่ก็ได้ค่าเฉลี่ยประมาณที่ได้ควบคุมไว้ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าซัลเฟต เฉลี่ยเท่ากับ 31.28 , 31.65 และ 31.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 65.96 , 65.64 และ 65.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 1 แสดงดัง รูปที่ 4.10

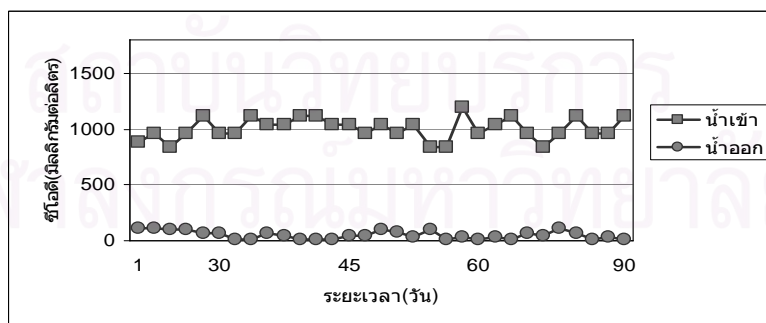
จากผลการทดลองพบว่า ซัลเฟตในการบำบัดน้ำเสียในช่วงแรกยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่มากนักเพราะจุลินทรีย์กำลังปรับตัวเพื่อย่อยสลายน้ำเสีย แต่พอเวลาผ่านไปจุลินทรีย์เริ่มมีการบำบัดดีขึ้น และเริ่มคงที่จนอยู่ที่สภาวะคงตัว ดังตารางที่ 4.2



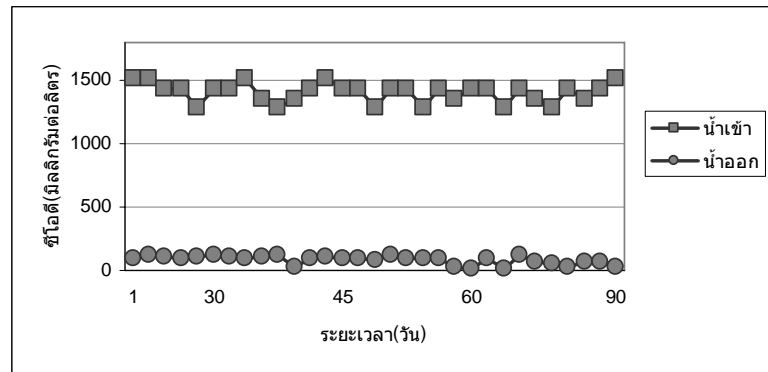
รูปที่ 4.8 โออาร์พีของการทดลองช่วงที่ 1



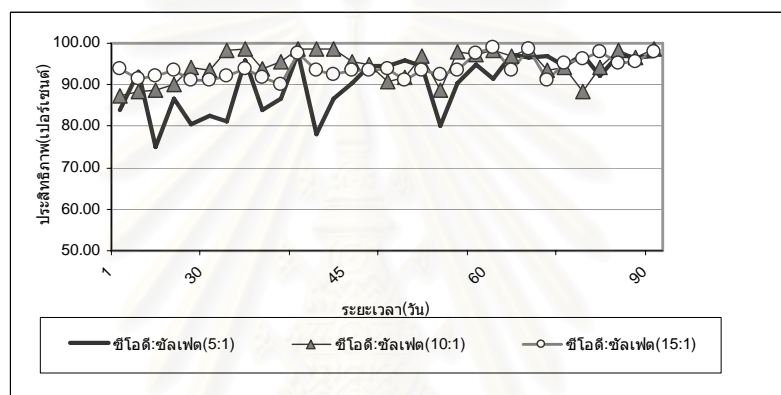
ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1



ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

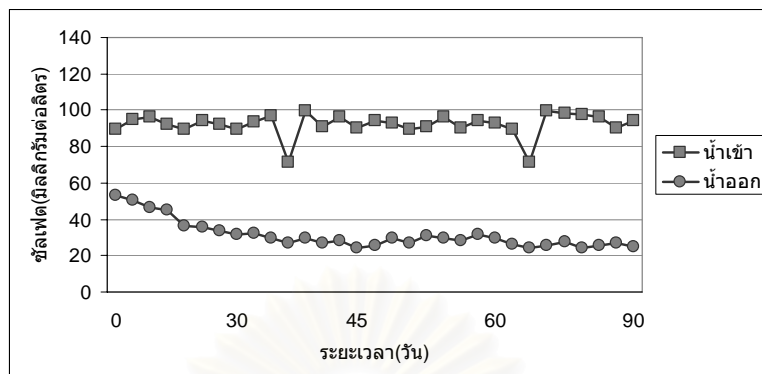


ง. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีทั้ง 3 ถังกรอง

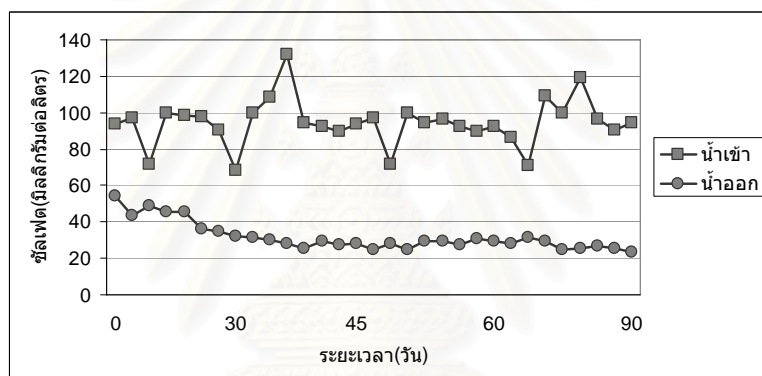
รูปที่ 4.9 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 1

ตารางที่ 4.1 ซีโอดีและประสิทธิภาพในการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 1

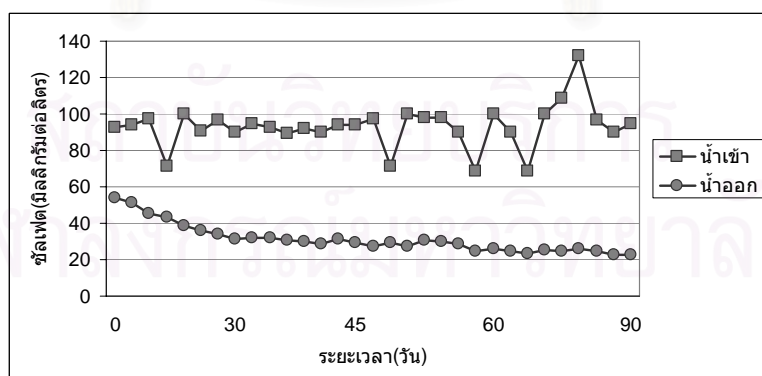
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังกรองที่ 1		ถังกรองที่ 2		ถังกรองที่ 3	
	น้ำ เข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	400	16	840	16	1280	16
ค่าสูงสุด	640	128	1200	112	1520	128
ค่าเฉลี่ย	526.71	49.55	1003.87	51.61	1409.03	85.16
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย	76.23	35.86	97.63	33.99	79.14	35.39
ประสิทธิภาพการกำจัด เฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)		90.48		94.67		93.97



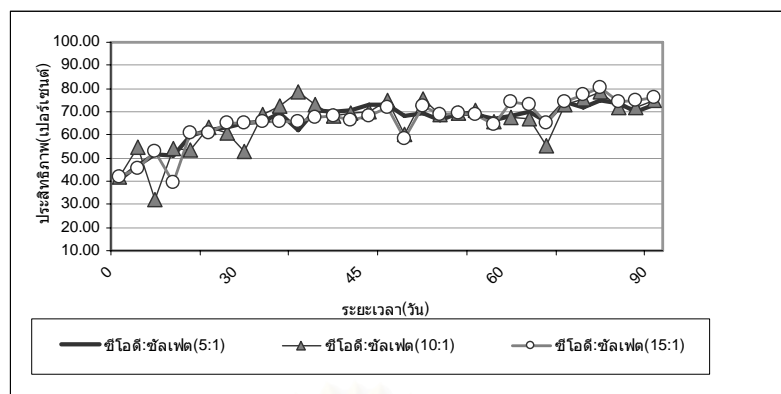
ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1



ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1



ง. ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตทั้ง 3 ถังกรอง

รูปที่ 4.10 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 1

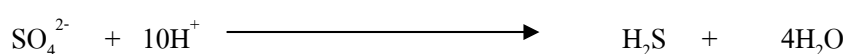
ตารางที่ 4.2 ซัลเฟตและประสิทธิภาพในการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 1

ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังกรองที่ 1		ถังกรองที่ 2		ถังกรองที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	71.37	24.45	68.35	23.65	68.35	22.38
ค่าสูงสุด	99.79	52.92	132.05	54.32	132.05	55.75
ค่าเฉลี่ย	92.17	31.28	94.41	31.65	92.94	31.11
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.41	7.57	12.99	31.65	11.95	7.95
ประสิทธิภาพการกำจัด เฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)		65.96		65.64		65.15

#### 4.1.1.7 ซัลไฟด์

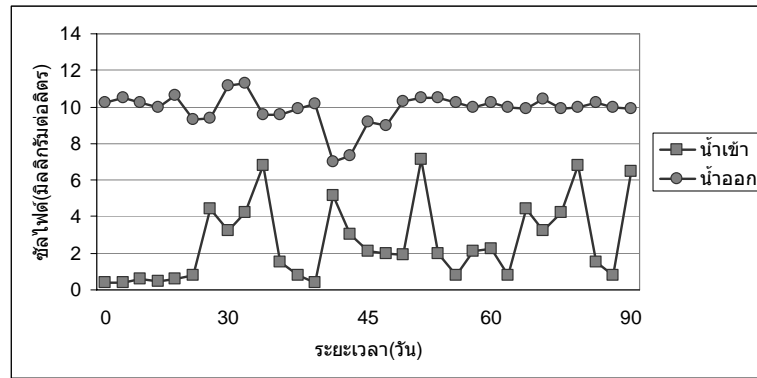
ซัลไฟด์ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรอง มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2.63 , 2.38 และ 2.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าซัลไฟด์ เฉลี่ยเท่ากับ 9.89 , 10.12 และ 13.57 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับแสดงดัง รูปที่ 4.10

จากผลการทดลองพบว่า ซัลไฟด์ของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่ามากกว่าน้ำเข้าระบบ เพราะเกิดปฏิกิริยาของซัลเฟตได้ซัลไฟด์

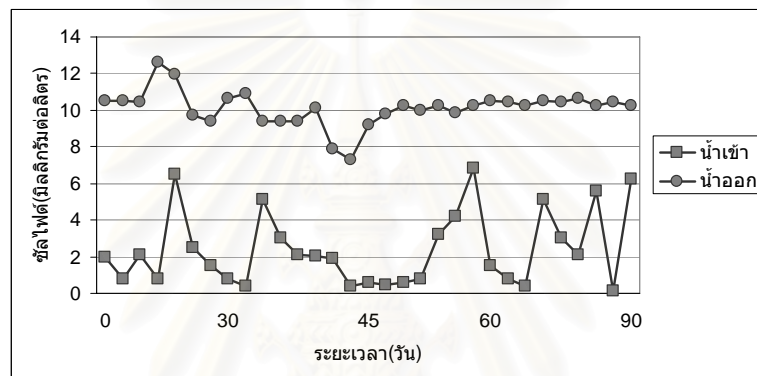


จากรูป 4.10 พบว่าการเกิดซัลไฟด์มีปริมาณใกล้เคียงกัน เพราะว่าการย่อยสลายของซัลเฟตมีปริมาณใกล้เคียงกัน

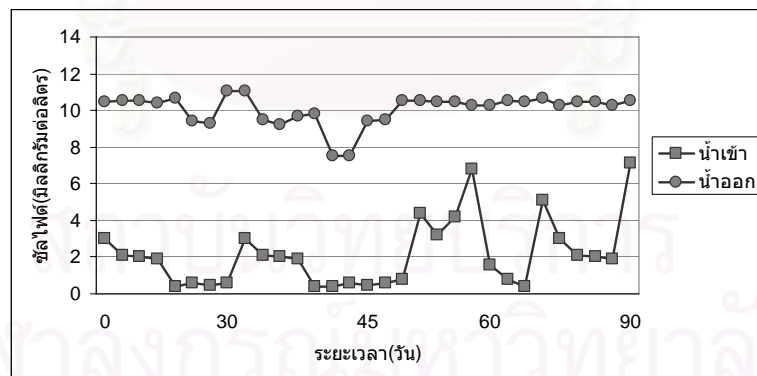




ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1



ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

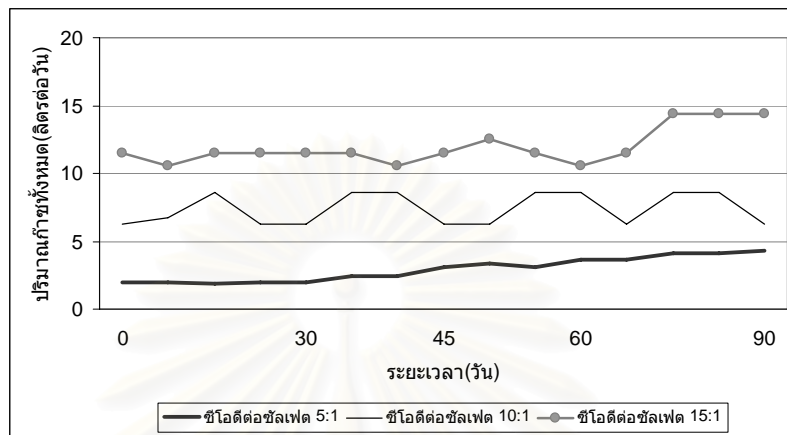


ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

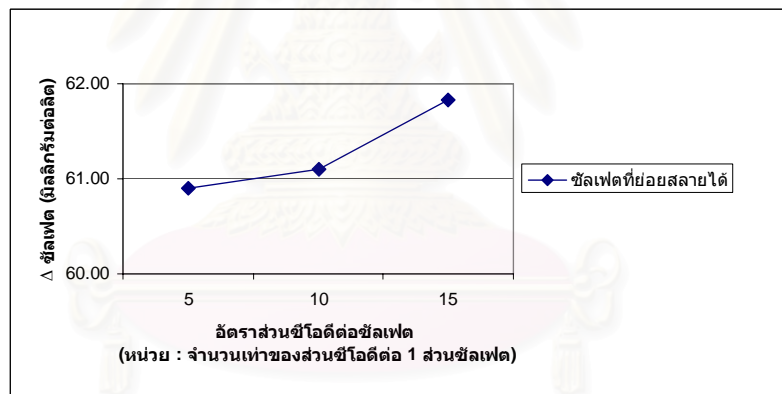
รูปที่ 4.11 ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 1

4.1.1.8 ก๊าซชีวภาพ

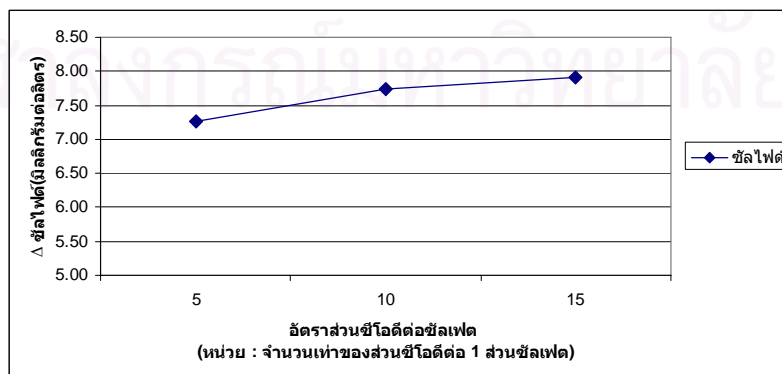
ก๊าซชีวภาพของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรอมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2.91, 7.39 และ 11.97 ลิตร/วัน ตามลำดับ แสดงดัง รูปที่ 4.12



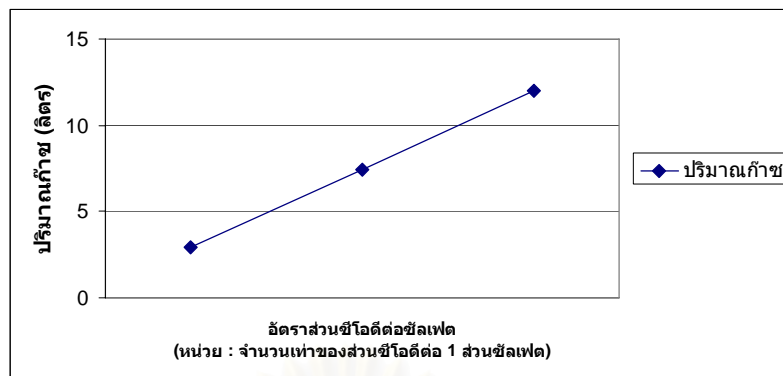
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบปริมาณซัลเฟตที่ย่อยสลายได้ทั้ง 3 ถังกรอในไร้อากาศ



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบปริมาณการเกิดซัลไฟด์ทั้ง 3 ถังกรอในไร้อากาศ



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งคาร์บอน

ปริมาณซิลเฟดที่น้อยสลายทั้ง 3 ถึงกรองมีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 61 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูป 4.13 และปริมาณซิลไฟด์ของทั้ง 3 ถึงกรองไร้อากาศไม่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1 พบว่าปริมาณก๊าซโดยรวมเพิ่มขึ้นเพราะแปรผันโดยตรงกับแหล่งคาร์บอน แหล่งคาร์บอนมากปริมาณก๊าซทั้งหมดก็มากขึ้นตามลำดับ

จากผลการทดลองช่วงที่ 1 ทั้งหมดสรุปได้ว่า ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวที่เหมาะสม โดยที่ค่า พีเอช มีค่าอยู่ระหว่าง 6.8-8.2 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-45 องศาเซลเซียส สภาพต่างทั้งหมดต่อกรดไขมันระเหยอยู่ที่อัตราส่วนน้อยกว่า 0.4 โออาร์พีอยู่ในช่วง (-259) – (-328) มิลลิโวลต์ ซึ่งทำให้เห็นว่าเป็นระบบไร้อากาศ จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของอัตราส่วน 5:1, 10:1 และ 15:1 ไม่แตกต่างกัน ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมีมากกว่า 90% เมื่อการทดลองสิ้นสุดลง และประสิทธิภาพในการบำบัดซิลเฟดทั้ง 3 อัตราส่วนดีเท่า ๆ กันประมาณ 60% รูปที่ 4.13 พบว่าซิลเฟดที่น้อยสลายได้มีค่าใกล้เคียงกัน จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าซิลเฟด ทั้ง 3 ถึงกรองไร้อากาศ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่อัตราส่วน 5:1 มีแหล่งคาร์บอนที่เพียงพอในการใช้บำบัดซิลเฟด และมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ดี ดังนั้นในการทดลองช่วงที่ 2 โดยการใช้ น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่มีทั้งซิลเฟด และไนเตรทจึงได้มีการปรับอัตราส่วนใหม่เพื่อบำบัดไนเตรท จึงเพิ่มอัตราส่วนเป็น 10:1 , 15:1 และ 20:1

#### 4.1.2 ผลการศึกษา การทดลองช่วงที่ 2

การทดลองช่วงที่ 2 ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสในการเดินระบบ ดังนั้น หลังจากได้ผลสรุปอัตราส่วนที่เพียงพอจากการทดลองช่วงที่ 1 ของ ซีโอดีต่อซัลเฟตแล้ว คือ อัตราส่วน 5:1 การทดลองครั้งนี้ได้เพิ่มอัตราส่วน ซีโอดีขึ้นอีก 5 , 10 และ 15 ตามลำดับ เพื่อเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีทั้งซัลเฟตและไนเตรท จึงได้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนใหม่ คือ อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 10:1 , 15:1 และ 20:1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกำหนดให้ความเข้มข้นซัลเฟต คือ 90 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่ากันทั้ง 3 ถังกรองและความเข้มข้นไนเตรท คือ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนค่าซีโอดีที่ใช้คือ 900 , 1,350 และ 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยกำหนดอัตราการสูบน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 24 ลิตรต่อวัน และความเร็วไหลขึ้นในถังกรอง เท่ากับ 0.5 เมตรต่อชั่วโมง ทำการทดลองจนระบบอยู่ในสภาวะคงตัว ตามตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์ ดังนี้

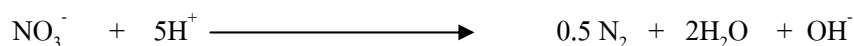
##### 4.1.2.1 พีเอช สภาพต่างทั้งหมด และ กรดไขมันระเหย

ค่าพีเอชของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต (10:1 , 15:1 และ 20:1) ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 7.47 , 7.41 และ 7.415 ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าพีเอชเฉลี่ยเท่ากับ 7.49 , 7.45 และ 7.41 ตามลำดับ ค่าพีเอชของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดัง รูปที่ 4.16

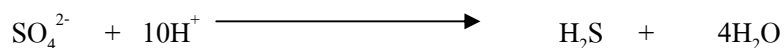
จากผลการทดลอง พบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียจริงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์คือช่วงพีเอชเป็นกลาง 6.8-8.2 ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้ โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ในการปรับพีเอชน้ำเสีย ระบบจึงมีปริมาณบัฟเฟอร์พอเพียงทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สภาพต่างทั้งหมดของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 424.50 , 597.19 และ 560.81 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าสภาพต่างทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 458.38 , 749.94 และ 777.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดัง รูปที่ 4.17

จากผลการทดลองพบว่า สภาพต่างทั้งหมดของน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสูงกว่าน้ำที่เข้าในระบบ สาเหตุที่ทำให้ น้ำออกจากระบบทั้ง 3 ถังกรอง มีค่ามากกว่าน้ำเข้าในระบบ เนื่องมาจากการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นก๊าซไนโตรเจนซึ่งจะมีการนำไฮโดรเจนออกซิเจนไปใช้ในปฏิกิริยาและเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนไฮโดรคาร์บอน ดังสมการ



และการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยพวกแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในกระบวนการซัลเฟตรีดักชันซึ่งจะมีการนำไฮโดรเจนไอออน ไปใช้ในปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ ดังสมการ



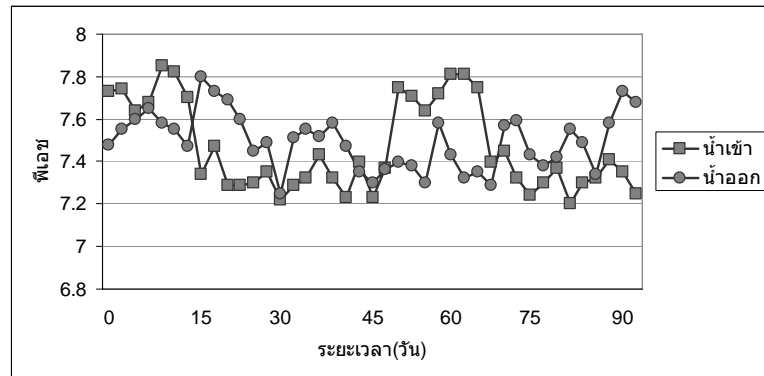
กรดไขมันระเหยของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีไอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรอมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 78.38 , 84.88 และ 104.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหย เฉลี่ยเท่ากับ 105.88 , 119.13 และ 132.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดัง รูปที่ 4.18

จากผลการทดลองพบว่า กรดไขมันระเหยของน้ำที่ออกจากระบบมีค่ามากกว่าน้ำเข้าระบบเนื่องจากจุลินทรีย์สร้างกรดในระบบจะเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันระเหย (Acidogenesis) ซึ่งในระบบควรมีอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างทั้งหมดน้อยกว่า 0.4 ซึ่งทั้ง 3 ถังกรอ มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่า ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์

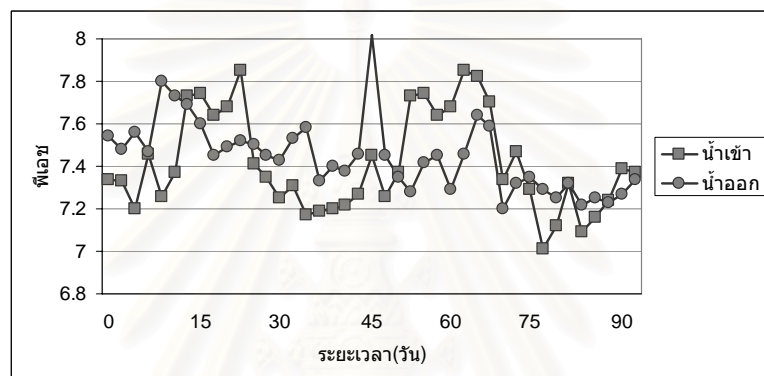
ทั้งพีเอช สภาพค่างทั้งหมดและกรดไขมันระเหยนั้นมีความสัมพันธ์กันเหมือนดังที่กล่าวไว้แล้วในการทดลองช่วงที่ 1 กล่าวคือ การควบคุมค่าพีเอชเป็นกลไกสำคัญในการควบคุมระบบ เมื่อพีเอชของระบบต่ำลงทำให้จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำลงหรืออาจตายได้ ควรตรวจสอบค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการทดลองและเติมด่างให้พอเพียงเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

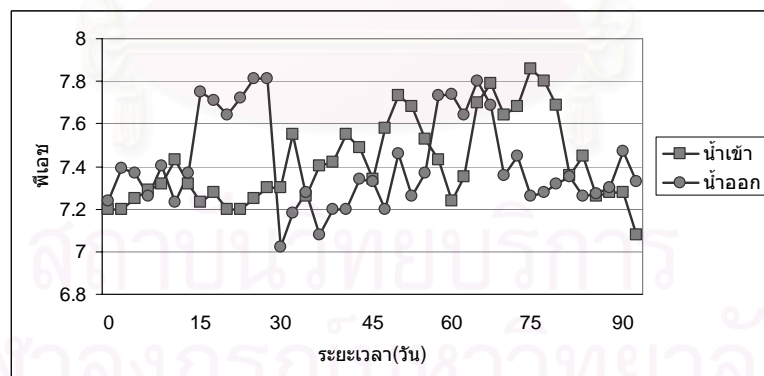




ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

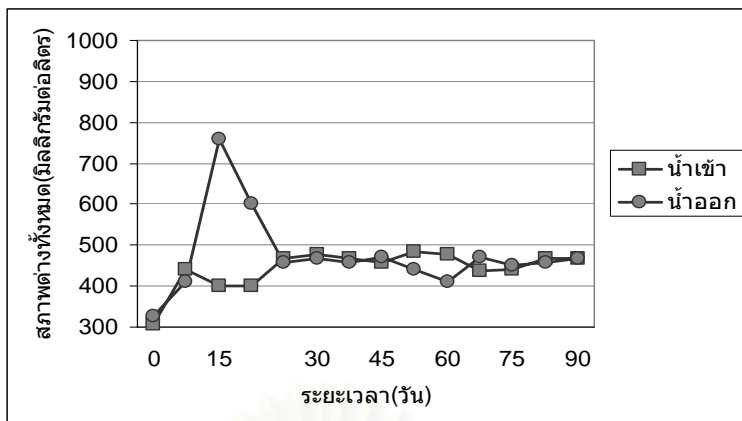


ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

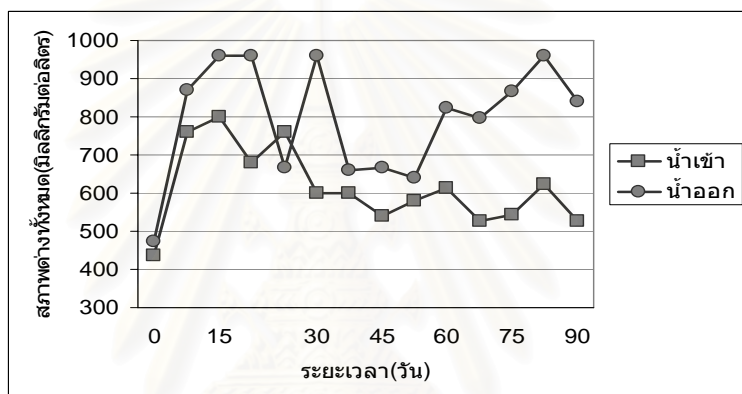


ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

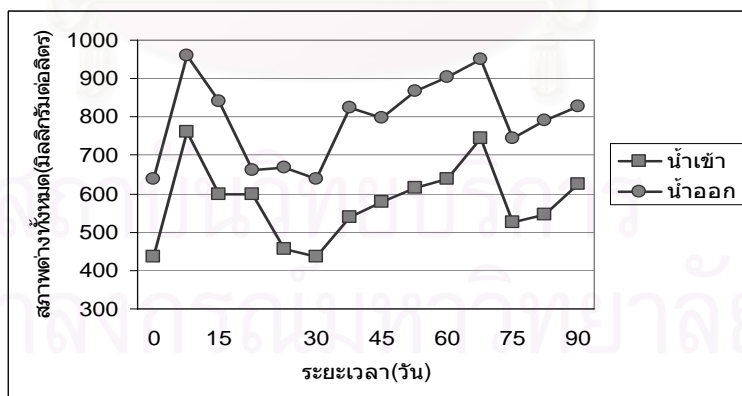
รูปที่ 4.16 ค่าพีเอชของการทดลองช่วงที่ 2



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

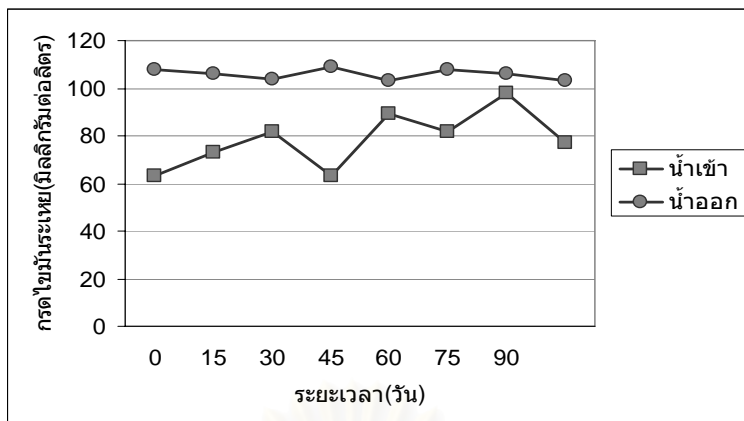


ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

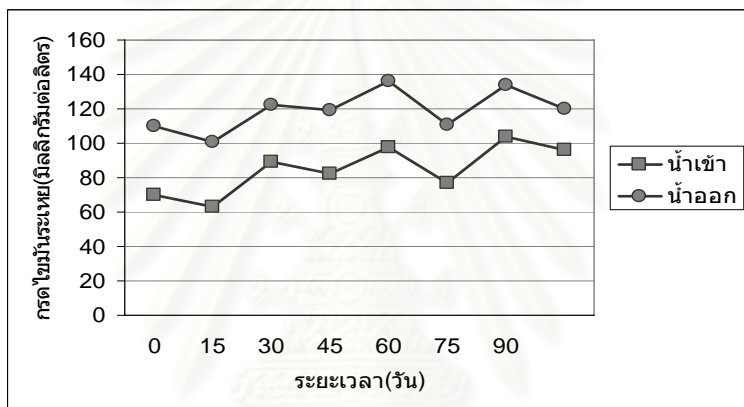


ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

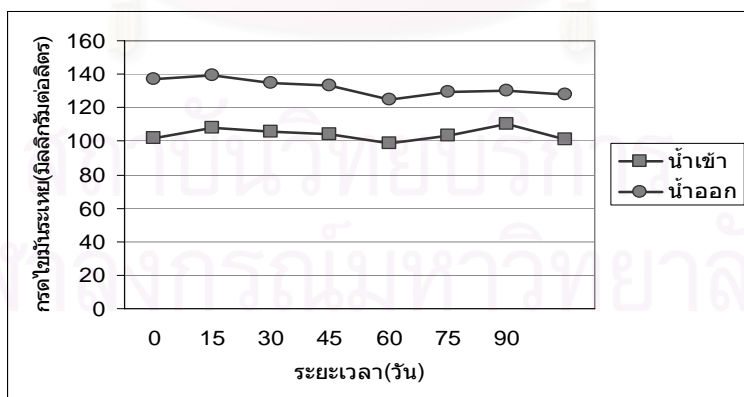
รูปที่ 4.17 สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1



ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

รูปที่ 4.18 ค่าการดําเนินระยะเหยของการทดลองช่วงที่ 2

#### 4.1.2.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีไอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถึงกรงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.85 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 ถึง ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 29.89 , 29.84 และ 29.88 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.19

จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิตลอดการทดลองช่วงที่ 2 จะอยู่ในช่วง 29- 31 ซึ่งถือว่าอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม จากรูป 4.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในระบบใกล้เคียงกันมากเพราะสภาพอุณหภูมิของเมืองไทยไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง และยังอยู่ในพื้นที่เขตร้อน จึงไม่มีปัญหาเรื่องการควบคุมอุณหภูมิเพราะต่างอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

#### 4.1.2.3 ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลาย และของแข็งทั้งหมด

ของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีไอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถึงกรงมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 60.02 , 58.83 และ 60.98 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยเท่ากับ 25.51 , 33.45 และ 30.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ของแข็งแขวนลอย ของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดัง รูปที่ 4.20

จากผลการทดลองพบว่า ของแข็งแขวนลอยของน้ำที่ออกจากระบบจะมีน้อยกว่าในน้ำที่เข้าระบบ ตัวเชื้อจุลินทรีย์เกาะอยู่กับมีเดียข้างล่างในระบบถึงกรงไร้อากาศจึงทำให้มีปริมาณของแข็งแขวนลอยน้อย เพราะจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ไม่หลุดลอยออกมา น้ำที่ผ่านออกมาจากถังกรงจึงใส ถึงแม้ว่าน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสจะมีค่าของแข็งแขวนลอยสูง แต่ในการทำการศึกษานี้มาเจือจางเพื่อควบคุมค่าความเข้มข้นของซัลเฟตและไนเตรท ทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยมีปริมาณที่ต่ำลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองช่วงที่ 1 พบว่า ค่าของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 2 มีค่ามากกว่า ช่วงการทดลองช่วงที่ 1 เนื่องจาก น้ำเสียจริงของโรงงานผลิตสแตนเลส มีทั้งพวก ซัลเฟต และไนเตรท แต่การทดลองช่วงที่ 1 มีซัลเฟตเพียงอย่างเดียว

ของแข็งละลายของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีไอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถึงกรงมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2,340.75 , 2,741.17 และ 2,964.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าของแข็งละลายเฉลี่ยเท่ากับ 856.03 , 992.05 และ 1,136.92 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดัง รูปที่ 4.21

ของแข็งทั้งหมดของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีไอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2,400.77 , 2,800.00 และ 3,025.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าของแข็งทั้งหมดเฉลี่ย เท่ากับ 881.54, 1,023.77 และ 1,167.38 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดัง รูปที่ 4.22

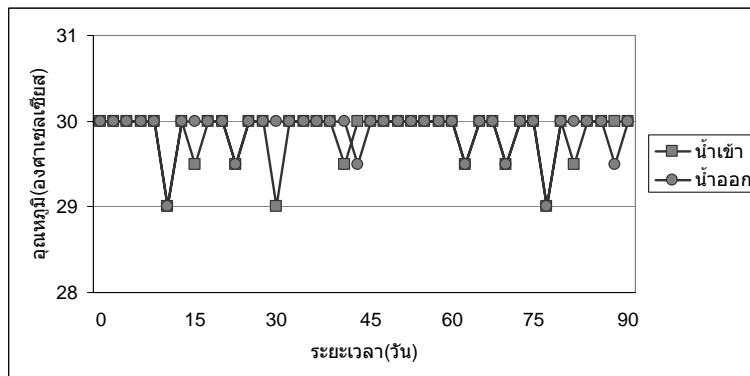
จากผลการทดลองพบว่า ของแข็งละลายและของแข็งทั้งหมด ของน้ำที่ออกจากระบบจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดน้อยกว่าน้ำที่เข้าระบบ เพราะมีการกำจัดซัลเฟตและไนเตรทออกไปจึงเหลือปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำออกน้อยกว่าน้ำเข้า

#### 4.1.2.4 โออาร์พี

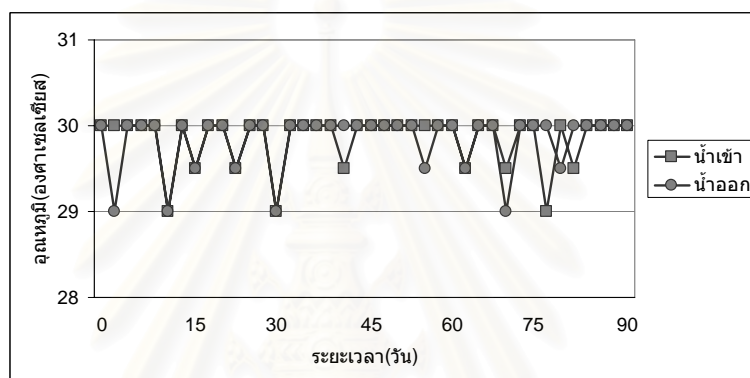
โออาร์พีของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสออกจากระบบที่ใช้ในการทดลองซีไอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ -286.33 , -289.98 และ -286.90 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โออาร์พีของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.23

จากผลการทดลองพบว่าโออาร์พีทั้ง 3 ถังกรอง อยู่ในช่วง (-259) – (-328) มิลลิโวลต์ แสดงให้เห็นว่าเป็นระบบไร้อากาศ

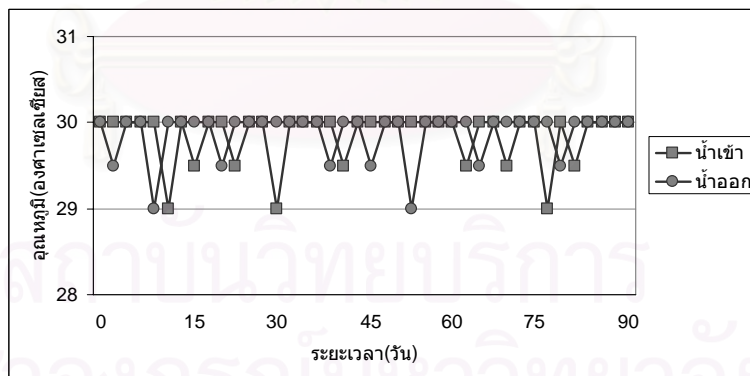




ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

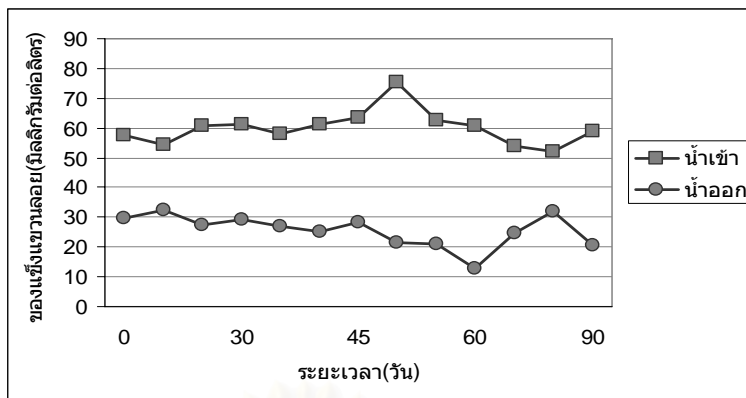


ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

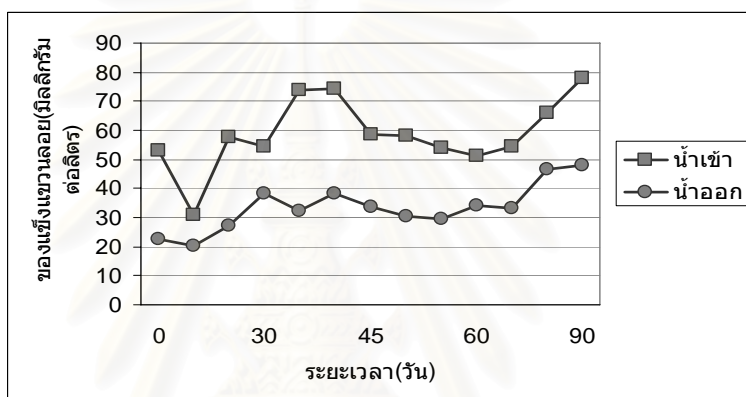


ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

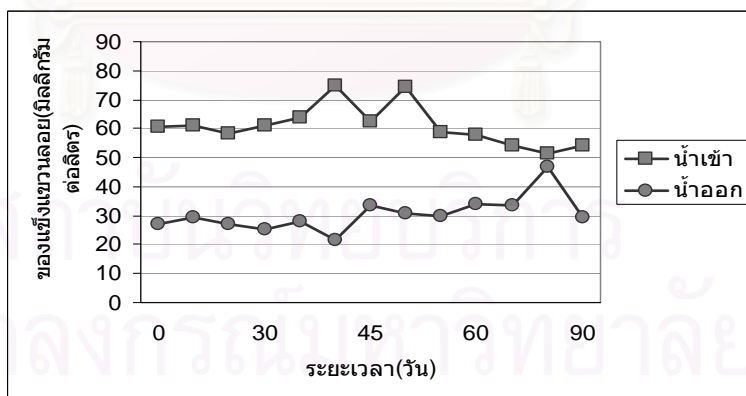
รูปที่ 4.19 อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 2



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

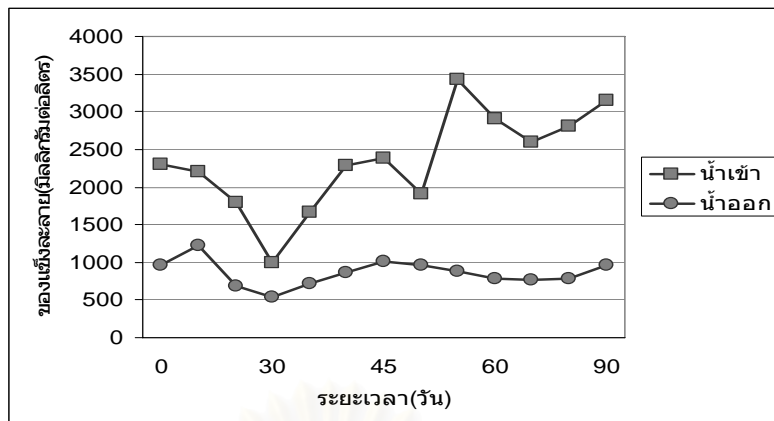


ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

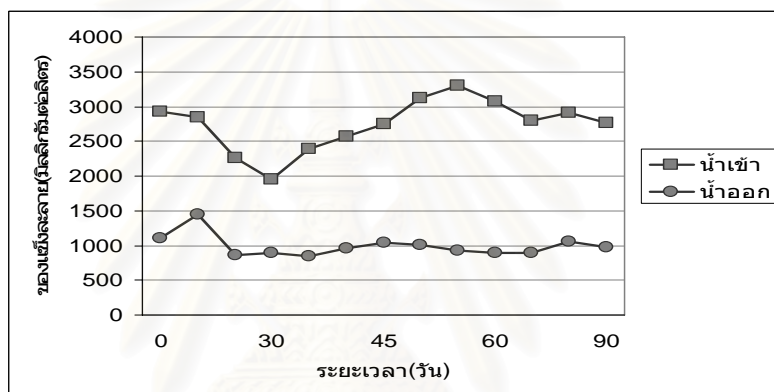


ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

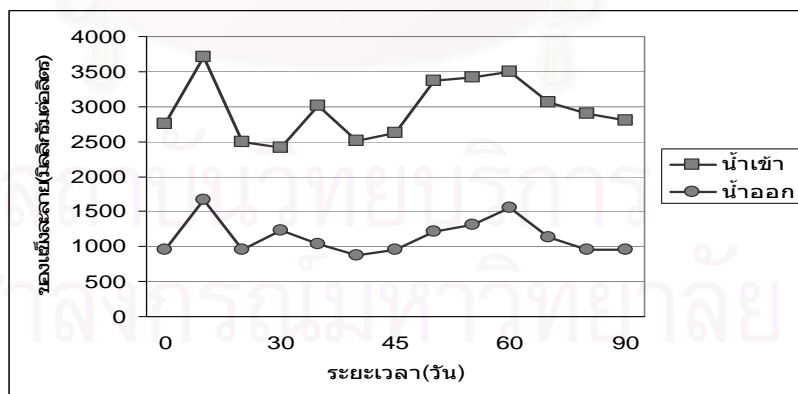
รูปที่ 4.20 ของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 2



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

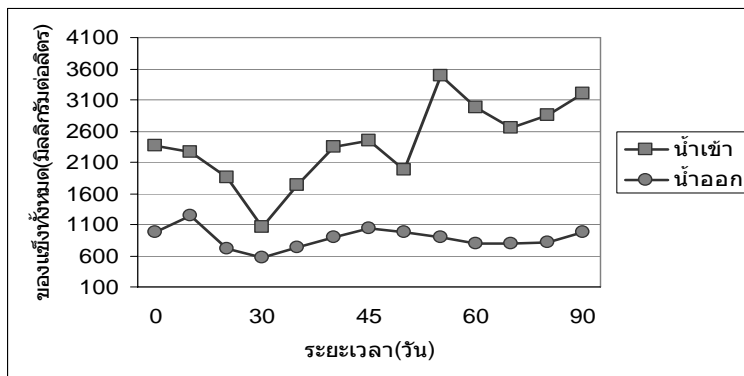


ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

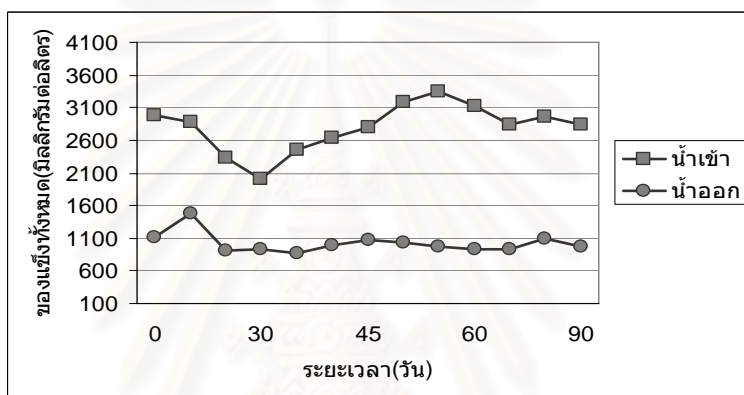


ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

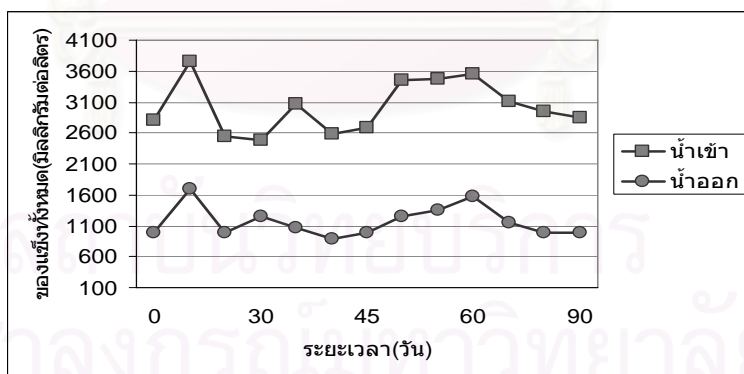
รูปที่ 4.21 ของแข็งละลายของการทดลองช่วงที่ 2



ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1

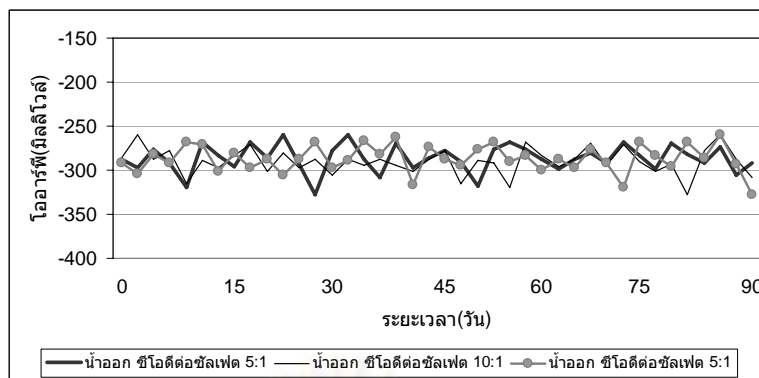


ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1



ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

รูปที่ 4.22 ของแข็งทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2



รูปที่ 4.23 โออาร์พีของการทดลองช่วงที่ 2

#### 4.1.2.5 ซีโอดี

ซีโอดีของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีการควบคุมซีโอดีให้ได้ความเข้มข้นซีโอดี เท่ากับ 900 , 1350 และ 1800 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเท่ากับ 974.81 , 1,404.44 และ 1,869.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากในแต่ละวันมีการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ทุกวัน ทำให้ค่าแตกต่างกัน แต่ก็ได้ค่าเฉลี่ยตามที่ควบคุมไว้ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 116.89 , 106.81 และ 108.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 87.91 , 92.31 และ 94.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซีโอดี ของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดัง รูปที่ 4.24

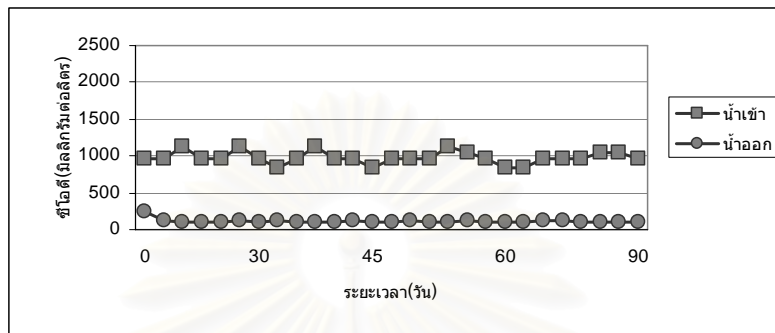
จากผลการทดลองพบว่าซีโอดีใน การบำบัดน้ำเสียในช่วงแรกยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่มากนักเพราะจุลินทรีย์กำลังปรับตัวเพื่อย่อยสลายน้ำเสีย แต่พอเวลาผ่านไปจุลินทรีย์เริ่มมีการบำบัดดีขึ้น และเริ่มคงที่จนอยู่ที่สภาวะคงตัวกล่าวคือ ประสิทธิภาพในการบำบัดคงที่ ทั้ง 3 ถังกรอง มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีและใกล้เคียง (ตารางที่ 4.3)

#### 4.1.2.6 ซัลเฟต

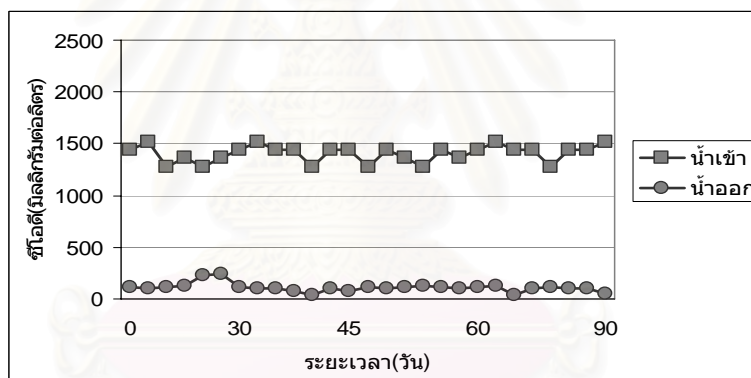
ซัลเฟตของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีการควบคุมซัลเฟตให้ได้ความเข้มข้นซัลเฟต เท่ากับ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ถัง ปรากฏมีค่าเท่ากับ 93.93 , 92.44 และ 91.82 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากในแต่ละวันมีการเจือจางน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสทุกวัน ทำให้ค่าแตกต่างกัน แต่ก็ได้ค่าเฉลี่ยประมาณที่ได้ควบคุมไว้ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าซัลเฟต เฉลี่ยเท่ากับ 28.37 , 27.38 และ 27.38 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 69.40, 70.18 และ 70.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดัง รูปที่ 4.25



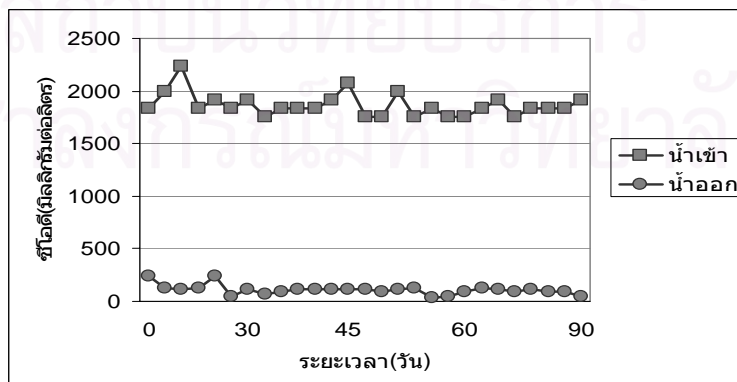
จากผลการทดลองพบว่า ซัลเฟตในการบำบัดน้ำเสียในช่วงแรกยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่มากนักเพราะจุลินทรีย์กำลังปรับตัวเพื่อย่อยสลายน้ำเสีย แต่พอเวลาผ่านไปจุลินทรีย์เริ่มมีการบำบัดดีขึ้น และเริ่มคงที่จนอยู่ที่สภาวะคงตัว (ตารางที่ 4.4)



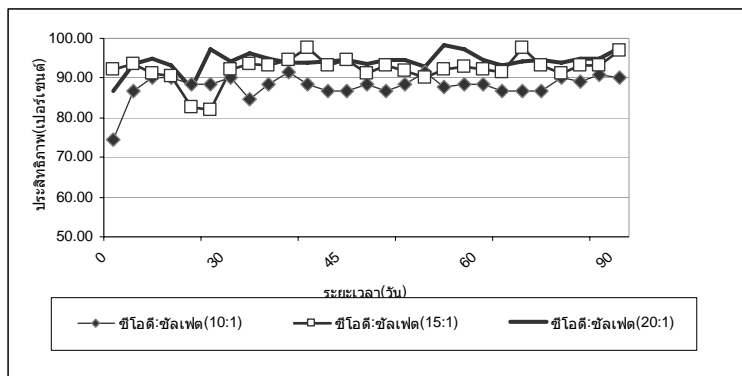
ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1



ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

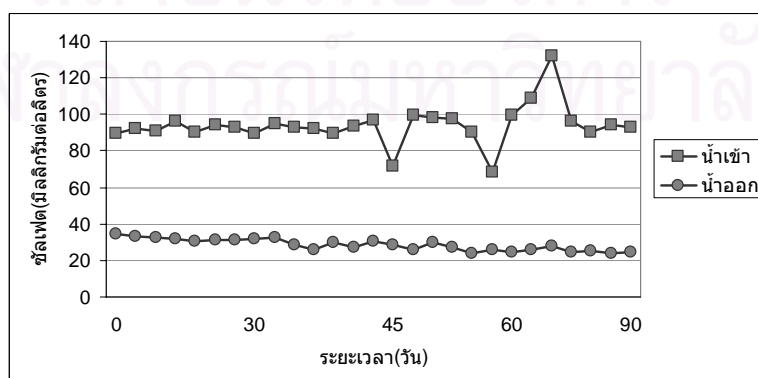


ง. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีทั้ง 3 ถังกรอง

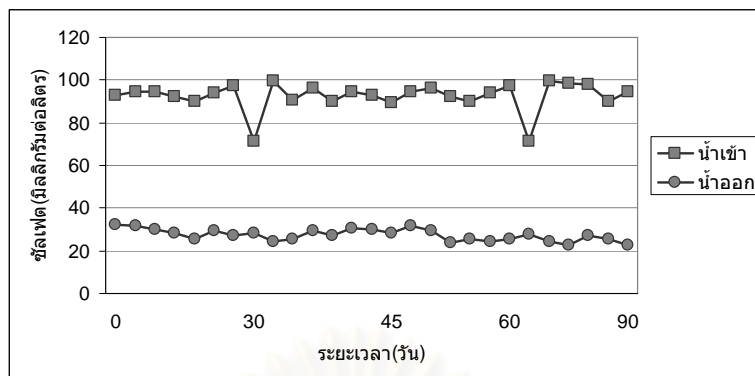
รูปที่ 4.24 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2

ตารางที่ 4.3 ซีโอดีและประสิทธิภาพในการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2

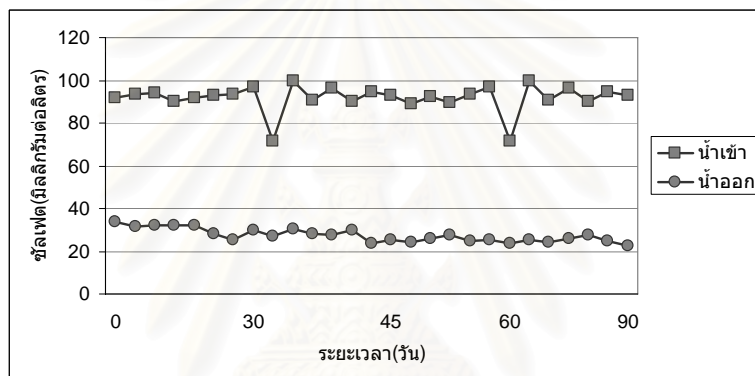
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังกรองที่ 1		ถังกรองที่ 2		ถังกรองที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	840	96	1280	32	1760	32
ค่าสูงสุด	1120	244	1520	244	2240	244
ค่าเฉลี่ย	974.81	116.89	1406.44	106.81	1869.63	108.89
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	81.64	28.33	81.02	44.40	111.27	47.29
ประสิทธิภาพการกำจัด เฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)		87.91		92.31		94.18



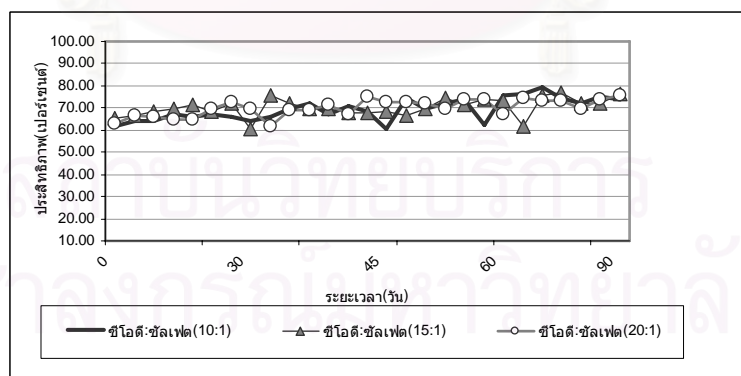
ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1



ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1



ง. ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตทั้ง 3 ถังกรอง

รูปที่ 4.25 ซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2

ตารางที่ 4.4 ซัลเฟตและประสิทธิภาพในการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2

ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังกรองที่ 1		ถังกรองที่ 2		ถังกรองที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	68.35	23.65	71.37	22.50	71.37	22.65
ค่าสูงสุด	132.05	34.26	99.79	32.25	99.79	33.85
ค่าเฉลี่ย	93.93	28.37	92.44	27.38	91.82	27.38
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	10.89	3.26	6.79	2.77	6.55	3.10
ประสิทธิภาพการกำจัด เฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)		69.40		70.18		70.04

#### 4.1.2.7 ซัลไฟด์

ซัลไฟด์ของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2.67 , 2.47 และ 2.58 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าซัลไฟด์ เฉลี่ยเท่ากับ 9.53 , 9.20 และ 9.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดัง รูปที่ 4.26

จากผลการทดลองพบว่า ซัลไฟด์ของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่ามากกว่าเข้าระบบเนื่องจากปฏิกิริยาซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ ดังที่กล่าวมาแล้วในผลการทดลองช่วงที่ 1

#### 4.1.2.8 ก๊าซชีวภาพ

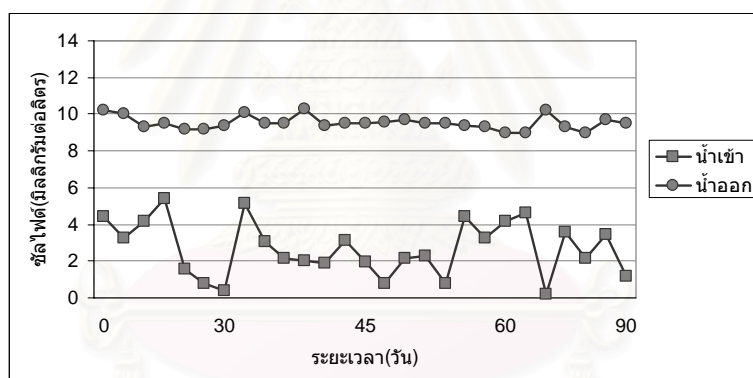
ก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 7.44 , 11.36 และ 14.26 ลิตร/วัน ตามลำดับ แสดงดัง รูปที่ 4.27

จากผลการทดลองจะพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น มีเปอร์เซ็นต์การเกิดก๊าซมีเทนลดลง เพราะ มีการใช้ในรูปแบบของปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนด้วย (ตารางที่ 4.5)

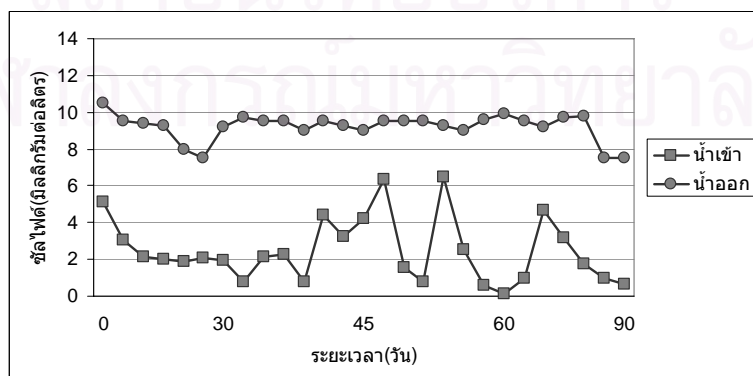
#### 4.1.2.9 ไนเตรท

ไนเตรทของน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสที่ใช้ในการทดลองซีโอดีต่อซัลเฟต ทั้ง 3 ถังกรองมีการควบคุมไนเตรทให้ได้ความเข้มข้นไนเตรทเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ถัง ปฏิกรรมมีค่าเท่ากับ 62.50 , 62.61 และ 62.60 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ เนื่องจากในแต่ละวันเติมน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตสแตนเลสทุกวันและได้ทำการปรับให้น้ำเสียจริงมีค่าความเข้มข้นไนเตรทลดลงมาด้วยการเจือจางด้วยน้ำตามที่ได้ควบคุมไว้ ทำให้ค่าแตกต่างกัน แต่ก็ได้ค่าเฉลี่ยประมาณที่ได้ควบคุมไว้ ส่วนน้ำออกจากระบบมีค่าไนเตรท เฉลี่ยเท่ากับ 26.04 , 19.71 และ 18.64 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดเท่ากับ 58.27 , 68.42 และ 70.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดัง รูปที่ 4.28

จากผลการทดลองจะพบว่า การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตสแตนเลสในช่วงแรกยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ดีนักเพราะจุลินทรีย์กำลังปรับตัวเพื่อย่อยสลายน้ำเสีย แต่พอเวลาผ่านไปจุลินทรีย์เริ่มมีการบำบัดดีขึ้น และเริ่มคงที่จนอยู่ที่สภาวะคงตัว (ตารางที่ 4.6)

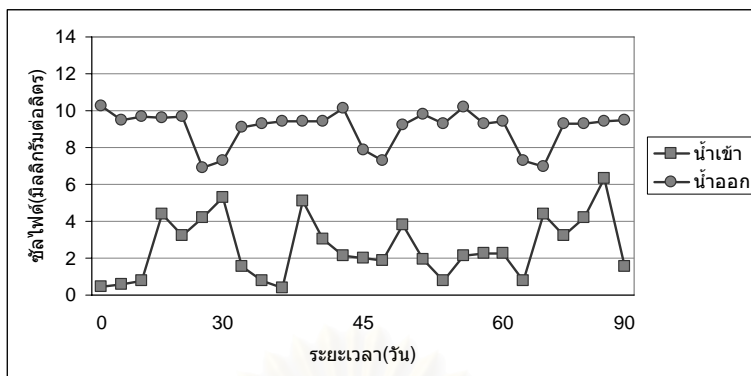


ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



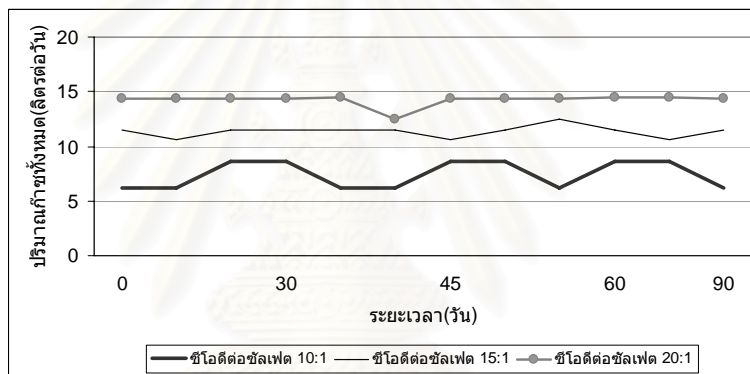
ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1





ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

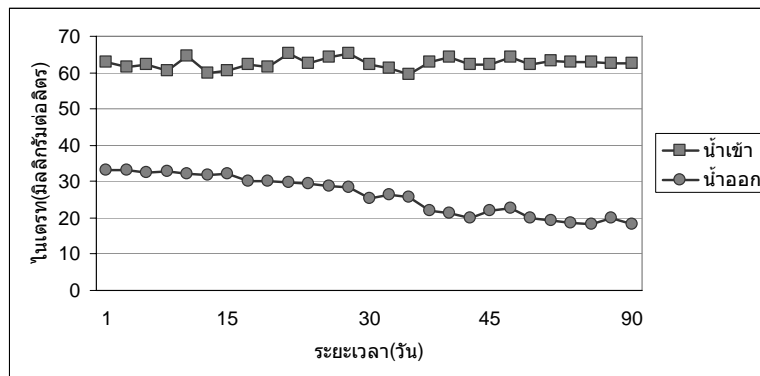
รูปที่ 4.26 ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 2



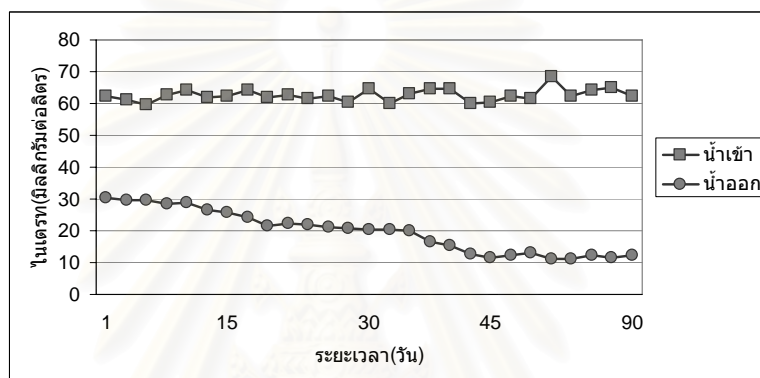
รูปที่ 4.27 ปริมาณก๊าซทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนของก๊าซ

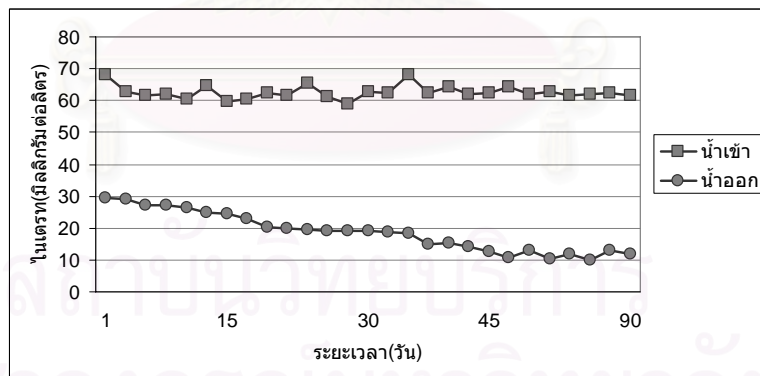
ก๊าซ	ถังกรองที่ 1	ถังกรองที่ 2	ถังกรองที่ 3
มีเทน	80.39	79.24	68.62
ไนโตรเจน	10.87	4.65	4.55



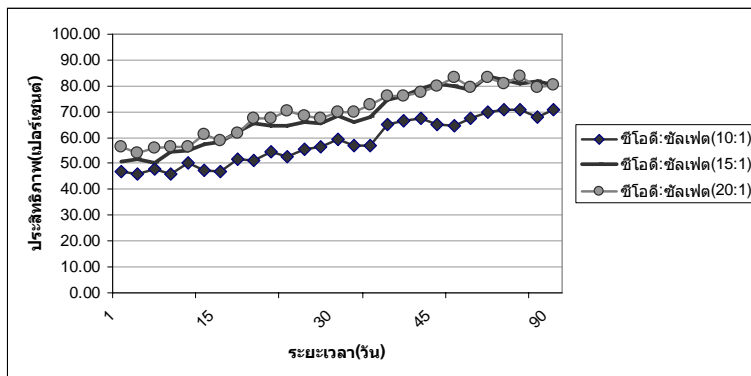
ก. ถังกรองที่ 1 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



ข. ถังกรองที่ 2 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1



ค. ถังกรองที่ 3 ที่มีอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

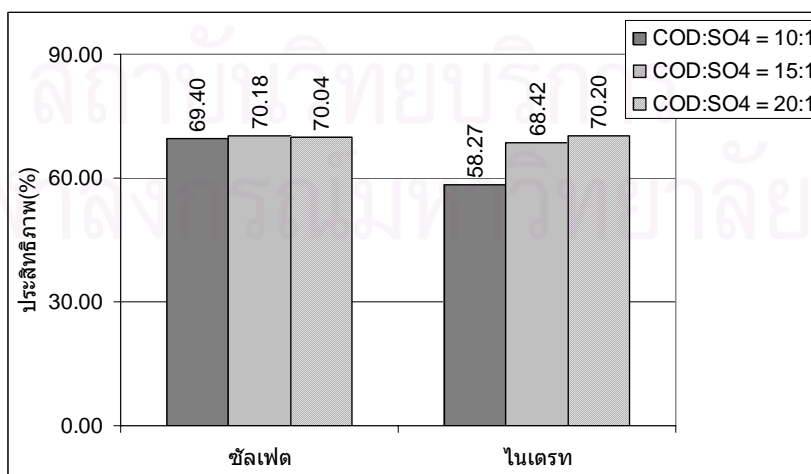


ง. ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรททั้ง 3 ถังกรอง

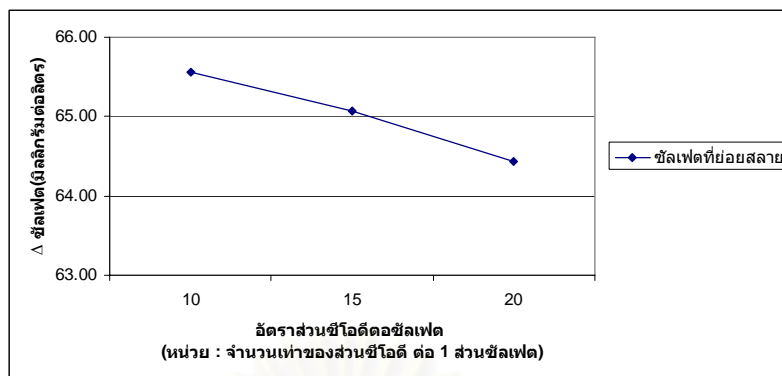
รูปที่ 4.28 ไนเตรทและประสิทธิภาพการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2

ตารางที่ 4.6 ไนเตรทและประสิทธิภาพในการกำจัดของการทดลองช่วงที่ 2

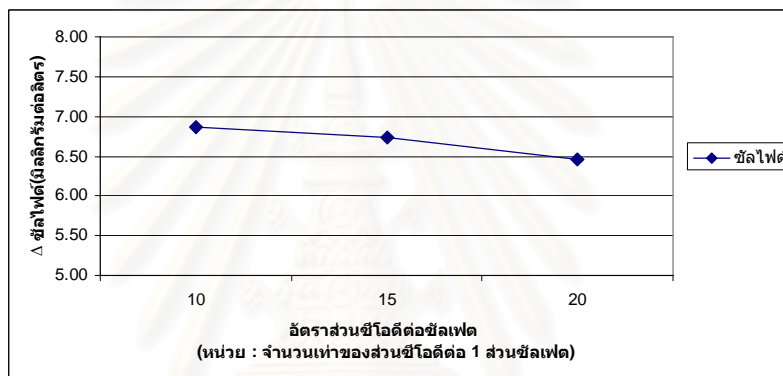
ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ถังกรองที่ 1		ถังกรองที่ 2		ถังกรองที่ 3	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
ค่าต่ำสุด	59.67	18.17	59.58	10.98	58.99	10
ค่าสูงสุด	65.37	33.24	68.54	30.54	68.16	29.51
ค่าเฉลี่ย	62.50	26.04	62.61	19.71	62.60	18.64
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.46	5.42	1.94	6.68	2.09	6.13
ประสิทธิภาพการกำจัด เฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)		58.27		68.42		70.20



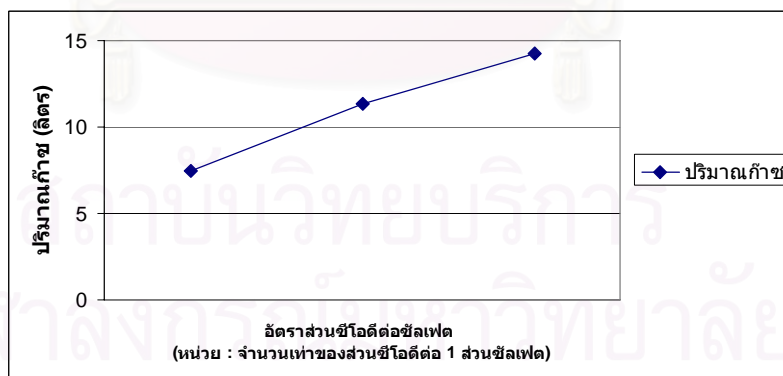
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบ ซัลเฟต และไนเตรททั้ง 3 ถังกรองไร้อากาศ



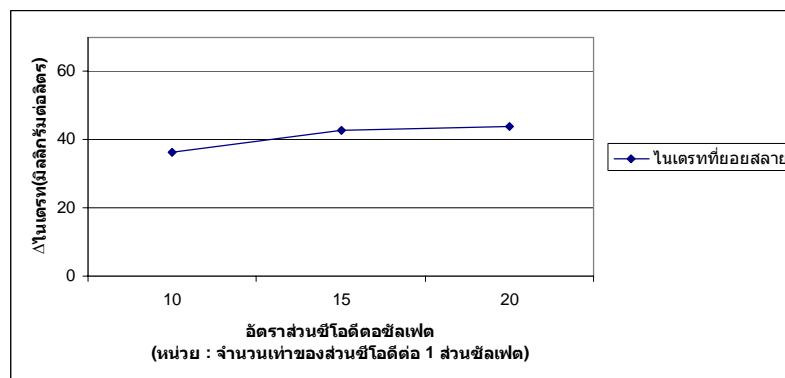
รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบปริมาณชัลเฟตที่ละลายทั้ง 3 ถึงกรองไว้อากาศ



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบปริมาณการเกิดชัลไฟด์



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซทั้งหมดต่อแหล่งคาร์บอน



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนที่ข่อยสลายทั้ง 3 ถึงกรองไร้อากาศ

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด ซัลเฟต ของทั้ง 3 ถึงกรองไร้อากาศมีค่าใกล้เคียงกัน ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต มีค่า 69.40 , 70.18 และ 70.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยปริมาณความแตกต่างของซัลเฟตในแต่ละถึงกรองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.23 รวมทั้งปริมาณการเกิดซัลไฟด์มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ถึง ดังรูปที่ 4.31 ส่วนการกำจัดไนเตรทนั้นประสิทธิภาพของถึงกรองไร้อากาศทั้ง 3 ถึงอยู่ที่ 58.27 , 68.42 และ 70.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าปริมาณไนเตรทที่ข่อยสลายของอัตราส่วนซัลเฟตต่อซีโอดี 15:1 และ 20:1 มีค่าไม่แตกต่างกันดังรูป 4.33 ปริมาณก๊าซทั้งหมดแปรผันโดยตรงต่อแหล่งคาร์บอนพบว่า ปริมาณแหล่งคาร์บอนมากก๊าซทั้งหมดมากขึ้นตามลำดับ ดังรูป 4.32

จากผลการทดลองช่วงที่ 2 ทั้งหมดสรุปได้ว่า ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวที่เหมาะสมโดยที่ค่า พีเอช มีค่าอยู่ระหว่าง 6.8-8.2 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-45 องศาเซลเซียส สภาพค่างทั้งหมดต่อกรดไขมันระเหยอยู่ที่อัตราส่วนน้อยกว่า 0.4 ไออาร์พีอยู่ในช่วง (-259) –(-328) มิลลิโวลต์ ซึ่งทำให้เห็นว่าเป็นระบบไร้อากาศ จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมีประมาณ 90% เมื่อการทดลองสิ้นสุดลง ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟตทั้ง 3 อัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 69-70.5% ดังรูปที่ 4.28 และปริมาณซัลเฟตที่ข่อยสลายมีปริมาณใกล้เคียงกัน ประมาณ 65 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียทั้งซัลเฟตและซีโอดีของอัตราส่วน 10:1 , 15:1 และ 20:1 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และในการบำบัดไนเตรทพบว่า ที่อัตราส่วน 15:1 และ 20:1 มีการบำบัดไนเตรทที่ดีกว่าที่อัตราส่วน 10:1 จากไนเตรทที่ข่อยสลาย จากรูปที่ 4.33 พบว่า ปริมาณไนเตรทที่ข่อยสลายมีปริมาณใกล้เคียงกันที่อัตราส่วน 15:1 และ 20:1 มีปริมาณไนเตรทที่ข่อยสลายมีค่า ประมาณ 42 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการกำจัด 68-70% เมื่อเทียบกับ อัตราส่วน 10:1 ข่อยสลายได้เพียง 38 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการกำจัด 58% ดังจะเห็นจากภาพรวมประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต และไนเตรทแสดงในรูป 4.29 จากข้อมูลดังกล่าวจึงทำให้สรุปได้ว่า ที่อัตราส่วน 15:1 ประสิทธิภาพการ

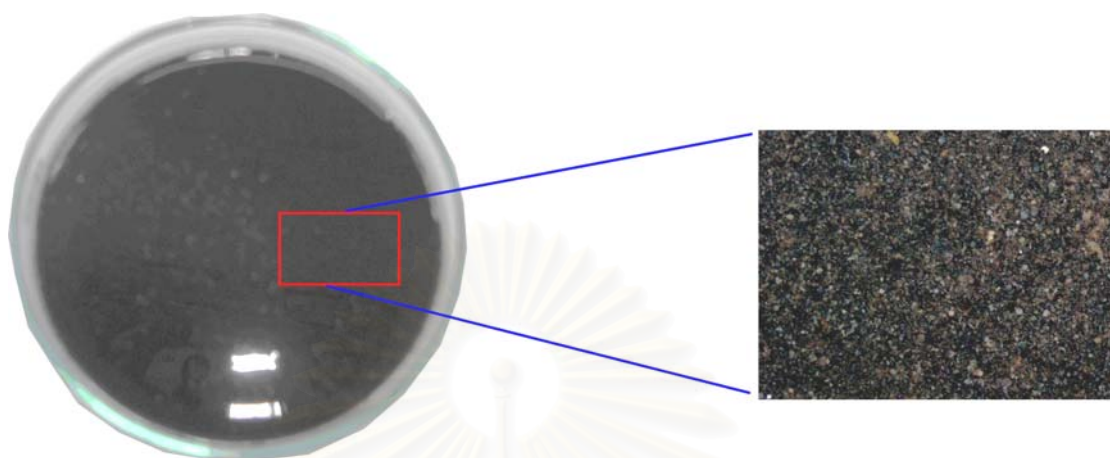
บำบัดทั้งซัลเฟต และไนเตรท ที่สูงเพียงพอ และจากผลการทดลองช่วงที่ 2 พบว่าเกิดการแข่งขันกันระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริตีฟายอิง และแบคทีเรียสร้างมีเทนมีความสามารถแย่งสารอาหารได้มากกว่า เพราะประสิทธิภาพการกำจัดซัลไฟด์สูงกว่า รองลงมาคือแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริตีฟายอิง ตามลำดับ เพราะประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตดีกว่าไนเตรท ซึ่งสอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์การไหลอิเล็กทรอนิกส์ที่อธิบายในหัวข้อ 4.3.3 ต่อไป

## 4.2 การศึกษาเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

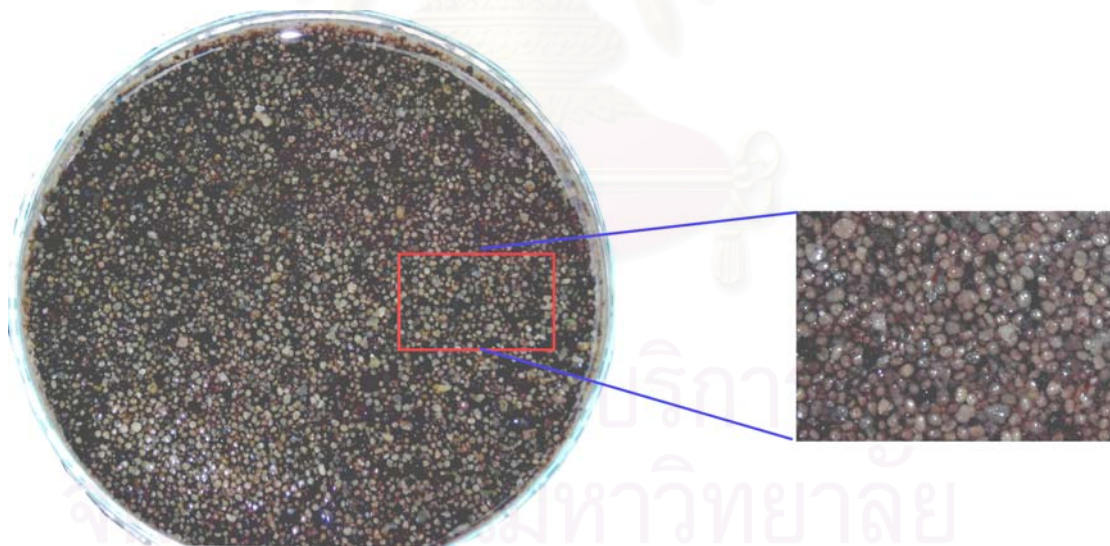
### 4.2.1 ลักษณะของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเริ่มต้นระบบมีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนเล็ก ๆ และเป็นฟล็อกผสมรวมกันอยู่ มีสีน้ำตาลเข้ม ดังรูป 4.34 ก. และเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2 มีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนโตขนาดประมาณ 0.9 มิลลิเมตร มีรูปร่างค่อนข้างกลม เม็ดตะกอนมีสีน้ำตาลเข้มและเม็ดสีดำ ดังรูป 4.34 ข. ตรวจสอบลักษณะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) ในช่วงเริ่มต้นระบบ ดังรูป 4.35 และหลังการทดลองช่วงที่ 2 โดยการสุ่มเลือกเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ เพื่อเป็นตัวแทนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดดังรูป 4.36-4.38



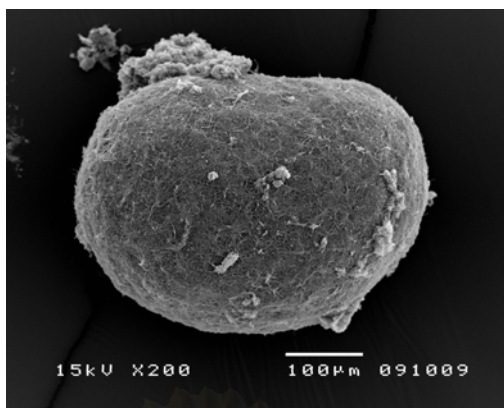


ก. ภาพถ่ายเมมเบรนค้ดตะกอนจุลินทรีย์ก่อนเริ่มระบบ

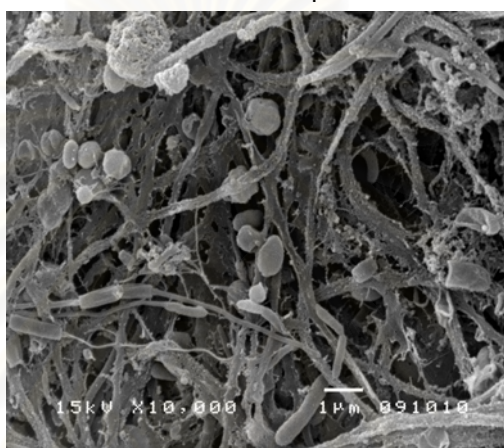


ข. ภาพถ่ายเมมเบรนค้ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2

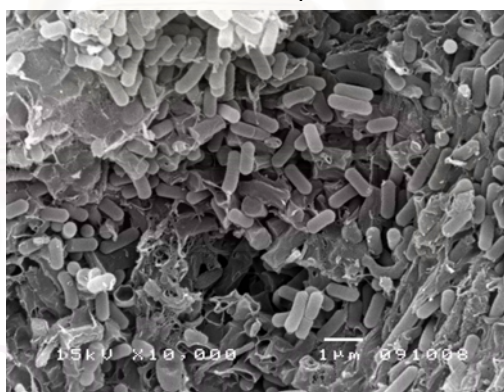
รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายเมมเบรนค้ดตะกอนจุลินทรีย์



ก. บริเวณผิวภายนอกของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 200 เท่า

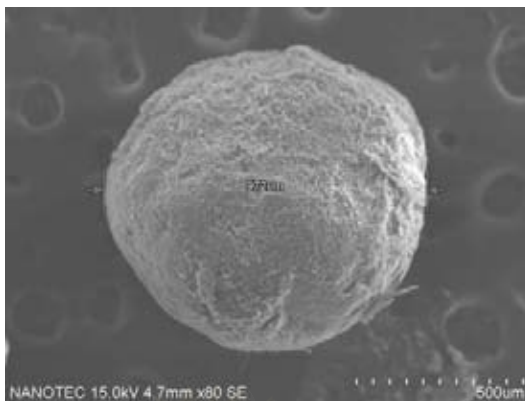


ข. บริเวณผิวภายนอกของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

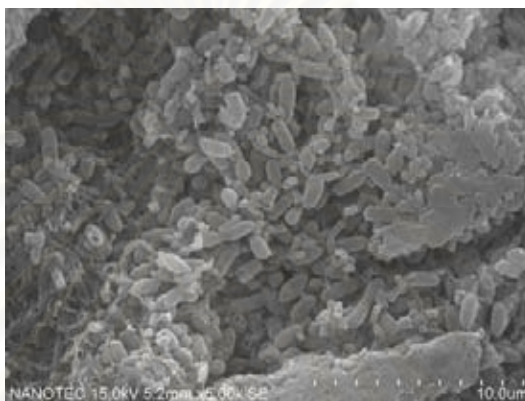


ค. บริเวณผิวภายในของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

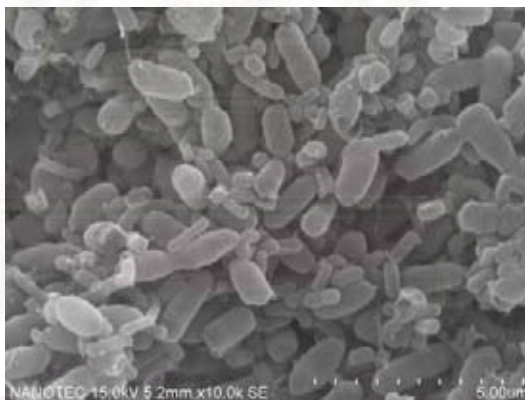
รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) ของเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นระบบ



ก. บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 80 เท่า

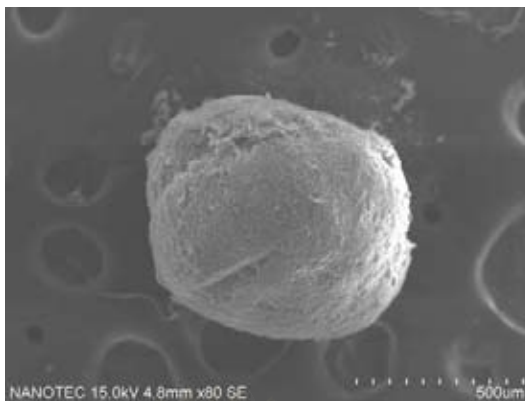


ข. บริเวณผิวภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

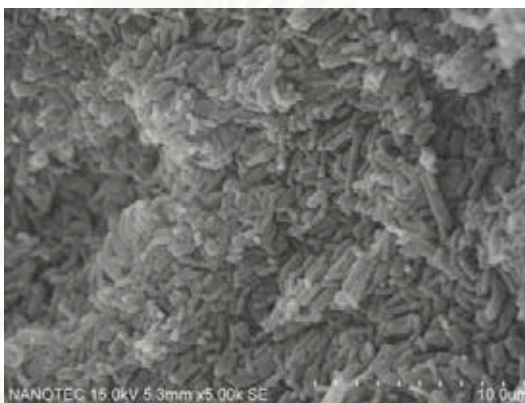


ค. บริเวณผิวภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

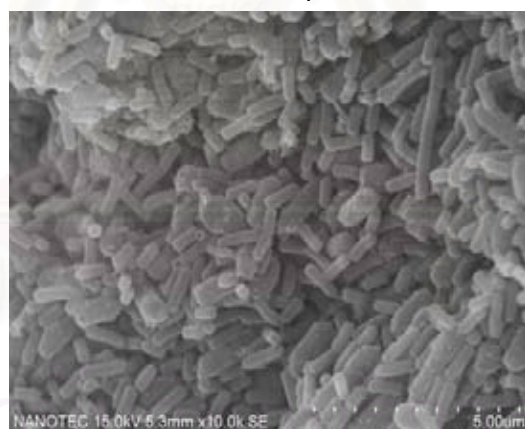
รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลอง  
ช่วงที่ 2 ของ ซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 10:1



ก. บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 80 เท่า



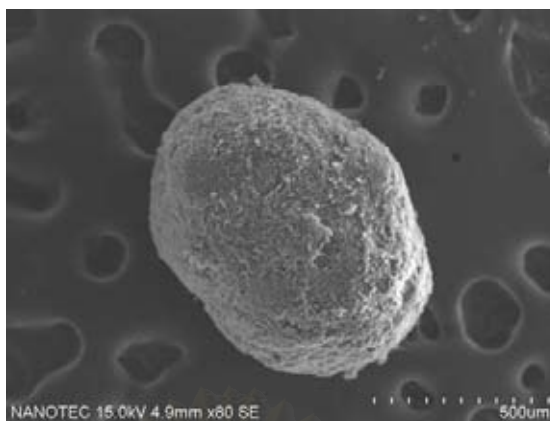
ข. บริเวณผิวภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



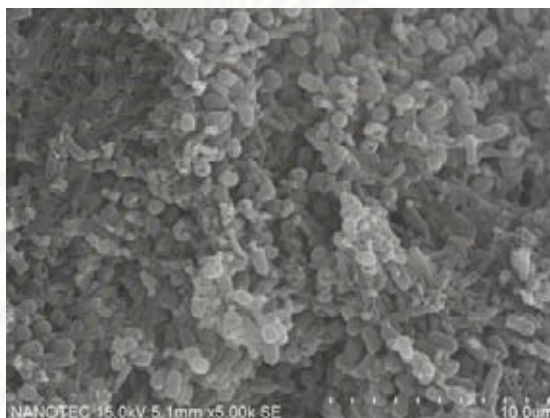
ค. บริเวณผิวภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลอง  
ช่วงที่ 2 ของ ซี โอ ดี ต่อ ซัลเฟต เท่ากับ 15:1

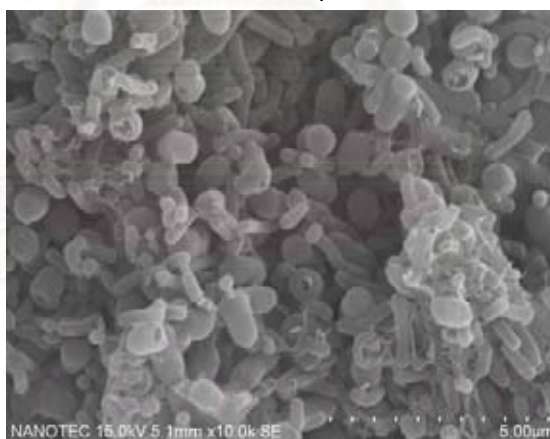




ก. บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 80 เท่า



ข. บริเวณผิวภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



ค. บริเวณผิวภายในของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลอง  
ช่วงที่ 2 ของ ซีไอซีต่อซัลเฟตเท่ากับ 20:1

เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นระบบ รูป 4.35 จะพบว่าลักษณะของเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์เป็นเมื่อดขนาดเล็กประมาณ 0.1 มิลลิเมตร มีรูปร่างทรงกลมหรือทรงรีค่อนข้างสมบูรณ์ ลักษณะบริเวณผิวภายนอกของเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์มีเส้นใยอยู่หนาแน่น ซึ่งต่างจากผิวภายในของเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งพบแบคทีเรียกระจายอยู่เป็นจำนวนมากทั้งแบบแท่งและแบบกลม และมีเส้นใยกระจายอยู่ทั่วไป และ เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์หลังการทดลองช่วงที่ 2 รูป 4.36-4.38 พบว่าขนาดเมื่อดตะกอน จุลินทรีย์ใหญ่ขึ้นมากกว่าเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ที่เริ่มระบบ เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดประมาณ 0.9 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นการสร้างเมื่อดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยโครงสร้างลักษณะภายนอกไม่แตกต่างกับเมื่อดตะกอนที่เริ่มต้นระบบซึ่งมีลักษณะผิวเรียบ เมื่อดทรงกลม หรือทรงรี ปะปนกันไป แต่ส่วนใหญ่จะพบลักษณะเมื่อดทรงกลม ส่วนลักษณะภายในเมื่อดตะกอนมีเส้นใยอยู่เล็กน้อยกระจายอยู่ทั่วไป ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียทั้งแบบกลมและแบบแท่ง

#### 4.2.2 ลักษณะการเกาะตัวของเมื่อดตะกอนจุลินทรีย์

ในถังกรองไร้อากาศ ซึ่งมีตัวกลางมีพื้นผิวทั้งหมด 9.43 ตารางเซนติเมตรต่อ หน่วย และ มวลจุลินทรีย์ที่เกาะตัวกลางต่อมวลของตัวกลาง 0.025 กรัมจุลินทรีย์ต่อกรัมตัวกลาง เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์มีทั้งพวกที่แขวนลอยอยู่ในตัวถังกรองและพวกที่เกาะกับตัวกลาง เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์ที่เกาะกับตัวกลางจะเกาะอยู่โดยรอบทั้งข้างในตัวกลางที่กลวงและพื้นผิวภายนอก ลักษณะภายนอกตะกอนโดยทั่วไปจะกระจายเกาะตัวอยู่ในตัวกลางและพื้นผิวของตัวกลาง เมื่อดตะกอนมีสีดำหรือสีน้ำตาลเข้ม มีความหนาแน่นค่อนข้างมาก ดังรูป 4.39



รูปที่ 4.39 เมื่อดตะกอนจุลินทรีย์เกาะตัวกลาง



### 4.2.3 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

เนื่องจากหลังการทดลองช่วงที่ 2 ขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีขนาดใหญ่ขึ้นมากกว่าขนาดเม็ดจุลินทรีย์เริ่มต้นระบบ ทำการวัดขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์โดยใช้เครื่อง Particle Size Analyzer ในการวิเคราะห์ แต่ในการวัดขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มีข้อจำกัดคือสามารถวัดขนาดเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ได้มากที่สุดเพียง 0.9 มิลลิเมตรได้ ดังนั้นขอบเขตเม็ดตะกอนขนาดใหญ่ที่สุดจึงเท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร และเนื่องจากข้อมูลของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เป็นการกระจายตามขนาดต่าง ๆ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงได้เลือกค่าที่เป็นค่าเฉลี่ยในการทดลองแต่ละชุด โดยเลือกค่า  $D_{10}$   $D_{50}$  และ  $D_{90}$  ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบถังกรองไร้อากาศ เป็นขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ปริมาณ 10, 50 และ 90 เปอร์เซ็นต์ของเม็ดตะกอนทั้งหมด ซึ่งจะทำให้ได้ช่วงข้อมูลที่ครอบคลุมมากกว่าการใช้ค่าเฉลี่ยเพียงค่าเดียว และสามารถติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งแบบเม็ดตะกอนขนาดใหญ่และขนาดเล็กได้อย่างชัดเจน ซึ่งวัดที่ระดับ 0.1 , 0.7 และ 1.4 เมตร ตามลำดับ ซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 10:1 , 15:1 และ 20:1 และเลือก  $D_{50}$  เป็นตัวแทนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมด ซึ่งขนาดที่มีขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบเล็กกว่านี้อยู่ 50 เปอร์เซ็นต์ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมด หรือเท่ากับว่าเป็นขนาดที่เป็นค่ากลางของขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบ โดยหากมีการเปลี่ยนแปลงของค่า  $D_{50}$  เพิ่มขึ้น แสดงว่าขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เป็นขนาดกลางของระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4.7 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นระบบ

การวิเคราะห์	ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์(ไมครอน)		
	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$
เริ่มต้นระบบ	36.18	285.55	638.88

ตารางที่ 4.8 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 10:1

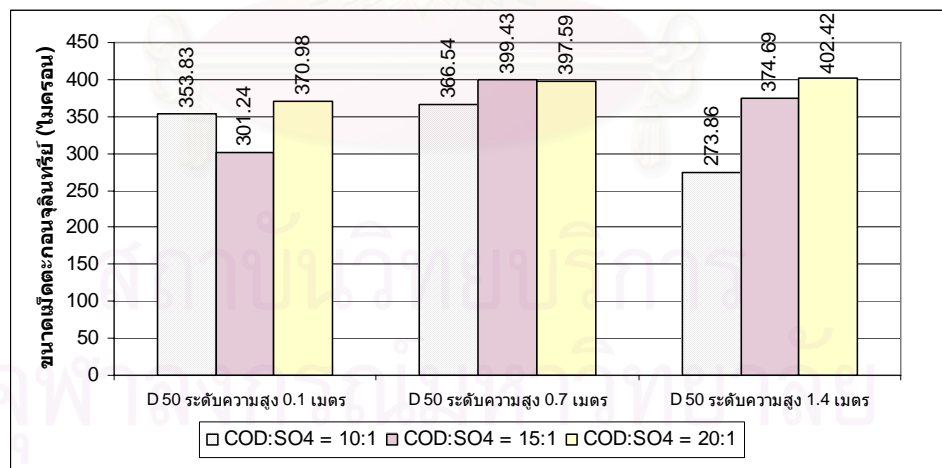
การวิเคราะห์ที่ระดับ	ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์(ไมครอน)		
	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$
ความสูง			
0.1 เมตร	55.46	353.83	668.85
0.7 เมตร	59.21	366.54	676.69
1.4 เมตร	42.37	273.86	602.50

ตารางที่ 4.9 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 15:1

การวิเคราะห์ที่ระดับ ความสูง	ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์(ไมครอน)		
	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>
0.1 เมตร	45.03	301.24	676.05
0.7 เมตร	66.09	399.43	704.84
1.4 เมตร	80.12	374.69	665.95

ตารางที่ 4.10 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 20:1

การวิเคราะห์ที่ระดับ ความสูง	ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์(ไมครอน)		
	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>
0.1 เมตร	56.11	370.98	756.27
0.7 เมตร	68.13	397.59	730.16
1.4 เมตร	66.67	402.42	733.77



รูปที่ 4.40 ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ที่ D<sub>50</sub>

จากตาราง 4.8-4.10 และรูป 4.40 พบว่า เมื่อเทียบตามระดับความสูงระดับความสูง 0.7 เมตร จะมีขนาดเม็ดตะกอนที่ใหญ่กว่าที่ระดับความสูงอื่น ๆ จากค่า D<sub>50</sub> ที่อยู่ประมาณ 400 ไมครอน เพราะน้ำเสียไหลผ่านพื้นผิวสัมผัสดีกว่าทำให้เม็ดได้รับแหล่งคาร์บอนได้มากกว่า และ ที่

อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1 มีขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใหญ่กว่าที่อัตราส่วนอื่น ๆ เพราะมีแหล่งคาร์บอนในปริมาณมากทำให้จุลินทรีย์มีอาหารปริมาณมากและส่งผลให้ขนาดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ใหญ่ขึ้น และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นระบบ พบว่า  $D_{50}$  ของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นระบบมีขนาด 285.55 ไมครอน จากตาราง 4.7 หลังจากทดลองครั้งที่ 2 ขนาดเม็ดตะกอนมีขนาดใหญ่มากขึ้น  $D_{50}$  ของทั้ง 3 ถังกรองใโรอากาศ เท่ากับ 366.54 , 399.43 และ 397.59 ไมครอน (ระดับความสูง 0.7 เมตร) เพราะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ได้รับแหล่งคาร์บอนปริมาณที่เพียงพอถึงแม้จะเกิดการแข่งขันกันแย่งสารอาหารระหว่างแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริฟิเคชัน แบคทีเรียยังสามารถรวมตัวกันสร้างเม็ดตะกอนให้ใหญ่ขึ้นได้

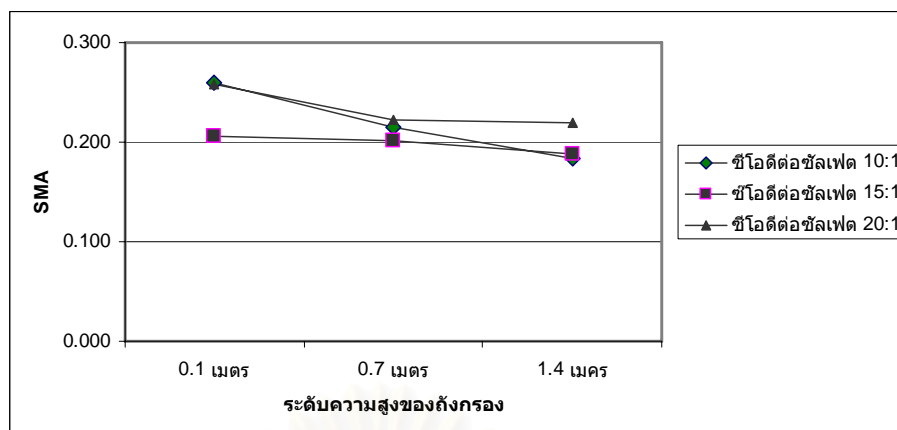
#### 4.2.4 ความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน

ในการทดลองนี้จะทำการหาความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียในการสร้างมีเทนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ความสูงของถังกรองระยะต่าง ๆ คือ 0.10 , 0.70 และ 1.4 เมตร วัดจากก้นถังกรอง คูณกับความสูงในการสร้างมีเทนของจุลินทรีย์ที่ระดับความสูงต่าง ๆ ซึ่งทำการวัดความสามารถในการสร้างมีเทนหลังการทดลองครั้งที่ 2

เมื่อพิจารณาตามความสูงของตัวถังกรองแล้ว พบว่าที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 5.7, 8.1 และ 10.8 กิโลกรัมซีโอดี/ลูกบาศก์เมตร-วัน ที่ระดับ 0.10 เมตรมีความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์ดีที่สุดที่สุด คือ 0.259 , 0.206 และ 0.258 กรัมซีโอดี-มีเทน/กรัมวีเอสเอส-วัน ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.41 เพราะระบบเป็นแบบถังกรองแบบไหลขึ้นสามารถใช้สารอินทรีย์ในการย่อยสลายสร้างมีเทนได้มากกว่าที่ระดับความสูงระดับอื่น

ตารางที่ 4.11 ความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทน

ภาระบรรทุกสารอินทรีย์	SMA (ก.ซีโอดี-มีเทน/ก.วีเอสเอส-วัน)		
	h = 0.10 ม.	h = 0.70 ม.	h = 1. ม.
5.7 ก.ก.ซีโอดี/ลบม.-วัน	0.259	0.215	0.184
8.1 ก.ก.ซีโอดี/ลบม.-วัน	0.206	0.202	0.188
10.8 ก.ก.ซีโอดี/ลบม.-วัน	0.258	0.222	0.219



รูปที่ 4.41 ความสามารถจำเพาะในการสร้างมีเทนที่ระดับ 0.1, 0.7 และ 1.4 เมตร

### 4.3 สมดุลมวลของสารในระบบ

#### 4.3.1 สมดุลมวลซีโอดี

การสมดุลมวลซีโอดี ทำให้ทราบถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยดูจากค่า recovery ของข้อมูลที่ได้ นอกจากนี้ยังมาคำนวณสัดส่วนการใช้ซีโอดีของแบคทีเรียสร้างมีเทน แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิงได้ โดยดูจากเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน

ตารางที่ 4.12 ค่า % COD recovery ของการทดลองช่วงที่ 2

ถังกรอง ซีโอดี:ซัลเฟต	ซีโอดี(mg/l)		ซัลเฟต(mg/l)		ไนเตรท(mg/l)		Gas (l)	%	%
	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก			
10:1	974.81	116.89	93.93	28.37	62.50	26.04	12.12	80.39	89.10
15:1	1406.44	106.81	92.49	27.38	62.61	19.71	14.72	79.24	85.56
20:1	1869.63	108.89	91.82	27.38	62.60	18.64	18.28	68.62	78.18

ตารางที่ 4.12 จากค่า % COD recovery คือ 89.10 , 85.56 และ 78.18 น้อยกว่าความเป็นจริงเพราะไม่สามารถหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์แบคทีเรียได้ และเนื่องจากการกรองตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ซีโอดี ทำให้ค่าซีโอดีที่เกิดจากเซลล์จุลินทรีย์ไม่ได้ถูกวัดไปด้วย ทำให้ขาดหายในส่วนนี้ไป นอกจากนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซอาจรั่วไหลเมื่อเก็บตัวอย่าง ทำให้ไม่สามารถเก็บก๊าซที่เกิดขึ้นทั้งหมด ส่งผลให้ % COD recovery มีค่าน้อย

จากข้อมูลค่าสัดส่วนซีโอดีในรูปมีเทน สัดส่วนซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการซัลเฟตรีดักชันและสัดส่วนซีโอดีที่ถูกใช้ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน นำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอน (% electron flow) ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 เปอร์เซนต์การไหลของอิเล็กตรอนของการทดลองครั้งที่ 2

ถังกรอง ซีโอดี:ซัลเฟต	เปอร์เซนต์การไหลของอิเล็กตรอน		
	แบคทีเรียสร้างมีเทน	แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต	แบคทีเรียดีไนตริฟายอิง
10:1	71	19	10
15:1	72	17	11
20:1	73	16	11

จากตารางที่ 4.9 พบว่าทุกถังกรองไร้อากาศเปอร์เซนต์สัดส่วนการใช้ซีโอดีของแบคทีเรียสร้างมีเทนจะมีค่ามากกว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง นั่นคือแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถแข่งขันแย่งสารอาหารได้มากกว่าที่สุทธองลงมาแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียดีไนตริฟายอิง ตามลำดับ

#### 4.3.2 สมดุลมวลซัลเฟอร์

การสมดุลมวลซัลเฟอร์เพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของข้อมูล และใช้ตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ ของซัลเฟอร์ ไม่รวมซีโอดีที่เข้าระบบ โดยผลการคำนวณค่า % sulfur recovery ของการทดลองครั้งที่ 2 แสดงดังตาราง 4.10

ตารางที่ 4.14 ค่า % sulfur recovery

ถังกรอง ซีโอดี:ซัลเฟต	ซัลเฟต(mg/l)		ซัลไฟด์ทั้งหมด (mg/l)		ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ (mg/l)		% recovery
	เข้า	ออก	รูป ซัลไฟด์	รูป ซัลเฟต	รูป ซัลไฟด์	รูป ซัลเฟต	
10:1	93.93	28.37	9.53	28.05	9.48	0.59	60.69
15:1	92.44	27.38	9.20	27.6	9.38	0.59	60.11
20:1	91.82	27.38	9.03	27.09	9.05	0.57	59.94

จากตาราง 4.14 จากค่า % sulfur recovery คือ 60.69 , 60.11 และ 59.94 น้อยกว่าความเป็นจริงเพราะ ซัลไฟด์ละลายน้ำลดลงเมื่อสัมผัสอากาศทำให้ค่าซัลไฟด์น้ำออกทั้งหมดน้อยกว่าค่าที่เกิดขึ้น และอาจเกิดได้จากซัลเฟอร์อยู่ในรูปตะกอนผลึกโลหะซัลไฟด์ และอีกส่วนอาจจะถูกใช้สะสมอยู่ในเซลล์แบคทีเรีย ส่งผลให้ % sulfur recovery มีค่าน้อย

### 4.3.3 สมดุลมวลไนโตรเจน

การสมดุลมวลไนโตรเจนเพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของข้อมูล และใช้ตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ ของไนโตรเจน ไม่รวมซีโอดีที่เข้าระบบ โดยผลการคำนวณค่า % nitrogen recovery ของการทดลองช่วงที่ 2 แสดงดังตาราง 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่า % nitrogen recovery

ถังกรอง ซีโอดี:ซัลเฟต	ไนเตรท(mg/l)		ก๊าซไนโตรเจน(mg/l)		% nitrogen	% recovery
	เข้า	ออก	รูปไนเตรท	รูปละลายน้ำ		
10:1	62.50	26.04	27.38	8.98	10.87	99.84
15:1	62.61	19.71	14.22	8.98	4.65	68.54
20:1	62.60	18.64	17.29	8.98	4.55	71.74

จากตาราง 4.15 จากค่า % nitrogen recovery คือ 99.84 , 68.54 และ 71.74 น้อยกว่าความเป็นจริง สาเหตุจากการวิเคราะห์ไนโตรเจนในน้ำออกจะวิเคราะห์ไนเตรทไนโตรเจนเท่านั้น ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปสารประกอบอื่น และไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในวัฏจักรก๊าซอาจเกิดการรั่วไหลในขณะเก็บตัวอย่างได้ ทำให้ไนโตรเจนสูญหายไปจากระบบ ส่งผลให้ % nitrogen recovery มีค่าน้อย



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษากาหาราอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตในระบบถังกรองใรร้ออากาศ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีในน้ำเข้า เป็น 3 อัตราส่วน ใช้แบบจำลองถังกรองใรร้ออากาศจำนวน 3 ชุด ได้ข้อสรุปดังนี้

5.1.1 การทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีซัลเฟต โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 5:1 , 10:1 และ 15:1 จากการทดลองพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี เฉลี่ยเท่ากับ 90.48 , 94.67 และ 93.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟต เฉลี่ยเท่ากับ 65.96 , 65.64 และ 65.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 และ 10:1 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 5:1 เป็นอัตราส่วนที่เพียงพอในการกำจัดน้ำเสียที่มีซัลเฟต น้ำเสียที่มีซัลเฟตในระบบใรร้ออากาศ จะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน และ ปฏิกิริยาการสร้างมีเทน ความสามารถเฉพาะตัวของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่มีเหนือกว่าแบคทีเรียผลิตมีเทน แต่ก็ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายประการที่ทำให้แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตไม่สามารถเอาชนะแบคทีเรียสร้างมีเทนได้โดยเด็ดขาด ดังนั้นอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อระบบใรร้ออากาศ เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณซัลเฟตจะสามารถนำมาใช้กับแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมได้

5.1.2 การทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงที่มาจากโรงงานผลิตสแตนเลสโดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตที่เหมาะสมกับการกำจัดซัลเฟตและไนเตรท โดยนำอัตราส่วนที่เพียงพอในการทดลองช่วงที่ 1 มาเป็นพื้นฐานแล้วบวกซีโอดีขึ้นอีก 5 , 10 และ 15 ตามลำดับ เพื่อการกำจัดไนเตรทได้อัตราส่วน เท่ากับ 10:1 , 15:1 และ 20:1 จากการทดลองช่วงที่ 2 นี้ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 87.91 , 92.31 และ 94.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตเฉลี่ยเท่ากับ 69.40 , 70.18 และ 70.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 58.27 , 68.42 และ 70.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 และ 20:1 ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1 เป็นอัตราส่วนที่เพียงพอในการกำจัดน้ำเสียที่มีทั้งซัลเฟตและไนเตรท น้ำเสียที่มีทั้งซัลเฟต

และไนเตรทในระบบไร้อากาศ จะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน และปฏิกิริยาการสร้างมีเทน จะเกิดการแข่งขันการแย่งใช้แบคทีเรียในระบบ จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งคาร์บอนเพิ่มขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการกำจัดทั้งซัลเฟตและไนเตรท

5.1.3 ระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทได้ดีและขนาดเม็ดตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงมีความเหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตและไนเตรทสูงได้ เช่น น้ำเสียจากโรงงานสแตนเลส

## 5.2 อุปสรรค และข้อเสนอแนะ

การศึกษาการหาอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตในระบบถังกรองไร้อากาศ มีอุปสรรคในการทดลอง และข้อเสนอแนะ ดังต่อไปนี้

5.2.1 สาเหตุที่ทำให้ผลการทดลองล้มเหลวในการเริ่มต้นเดินระบบ คือ มีสภาพความเป็นกรดในระบบมากเกินไป ควรจะมีการเติมด่างให้พอเพียงในการใช้ในระบบ ถ้าหากว่าน้ำเสียที่เข้าไปในระบบมีการเติมด่างไม่เพียงพอ มีสภาพก่อนไปทางสภาพกรดแล้ว เชื้อจุลินทรีย์ในระบบจะนำออกซิเจนไปใช้อีกอย่างต่อเนื่องทำให้เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถมีประสิทธิภาพในการบำบัดหรืออาจตายได้ เพราะฉะนั้นควรเติมด่างให้พอเพียง ควรวิเคราะห์ค่าพีเอช สภาพด่างทั้งหมดและกรดไขมันระเหย เพราะพารามิเตอร์ทั้ง 3 นี้ มีความสัมพันธ์กันเมื่อพีเอชของระบบต่ำลงทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถทำงานได้ผลดี ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยได้พอดีทำให้ไขมันระเหยเหลือในระบบมากซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้พีเอชของระบบลดต่ำลง ดังนั้นการควบคุมค่าพีเอชจึงเป็นกลไกสำคัญในการควบคุมระบบ ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการทดลองคือ 6.8-8.2

5.2.2 เนื่องจากถังกรองไร้อากาศมีตัวกลางทำให้เป็นสาเหตุในการอุดตันของก๊าซและทำให้ตัวกลางลอยตัวขึ้นข้างบนจนออกนอกถังกรองไร้อากาศ ถ้าเกิดความดันอากาศภายในตัวถังกรองมาก ๆ จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวได้ ทำให้ต้องเปลี่ยนตัวถังกรองใหม่เพราะไม่สามารถทำการศึกษาต่อได้เนื่องจากมีน้ำรั่วซึมออกมาข้างนอก และอาจมีโอกาที่อากาศจะแทรกซึมเข้าไปในตัวถังกรองได้ ในเรื่องการลัดทางของน้ำเสีย (Short Circuit) ถ้าก๊าซที่สะสมภายในตัวถังกรองรวมตัวกันลอยขึ้น ทำให้เกิดช่องทางให้น้ำเสียไหลผ่านไปโดยโอกาสสัมผัสกับจุลินทรีย์ได้น้อย การแก้ปัญหาทำได้โดยป้อนน้ำเสียให้กระจายเข้าถังกรองสม่ำเสมอ และหาอุปกรณ์ยึดไม่ให้ตัวกลางลอยขึ้นไปข้างบน

5.2.3 ควรระวังไม่ให้อากาศเข้าไปในระบบเพราะเป็นระบบแบบไม่ใช้อากาศ ควรหมั่นตรวจสอบระดับน้ำเสียที่อยู่ในถังพักว่ามีปริมาณน้ำที่เพียงพอ ไม่ควรปล่อยให้ น้ำหมดจนตัวปั๊มสูบน้ำอากาศเข้าในระบบ ทำให้เกิดการแย่งใช้อากาศก่อนซึ่งทำให้ระบบบำบัดมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง

5.2.4 ควรศึกษาหาแหล่งคาร์บอนชนิดอื่นที่มีราคาถูกกว่าการใช้น้ำตาลทราย อาจจะใช้ น้ำเสียซึ่งมาจากโรงงานผลิตผลไม้ซึ่งมีทั้งธาตุอาหารอื่น ๆ เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของ เชื้อจุลินทรีย์ เพราะน้ำตาลทรายมีเฉพาะธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ซึ่งจำเป็นต้องเติม สารเคมีอื่นเป็นอาหารเสริมให้กับเชื้อจุลินทรีย์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- จารุวรรณ สุจินตนารัตน์. 2546. ผลของอัตรากรรมวนเวียนน้ำทิ้งที่มีต่อสมรรถนะของระบบยูเอ-เอสบีที่รับน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จุฬารักษ์ กำเนิดเพชร. 2534. ผลของทิศทางกร่อนป้อนสารอาหารต่อการพัฒนาฟิล์มชีวในถังปฏิกรณ์แบบมีตัวกรองที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ทวีทรัพย์ เกียรติชัยจร. 2545. การใช้ถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นบำบัดน้ำเสียที่มีไนโตรเจนและความเค็มสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธีระ เกรอด. 2539. วิศวกรรมน้ำเสียการบำบัดชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน คัญกุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่มที่ 2, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน คัญกุลเวศม์. 2536. การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมเพลิน คำศรี. 2542. การกำจัดไนเตรทในถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้นที่มีกิจกรรมดีไนตริฟิเคชัน เมธาโนเจนซิส และแอมโมนิฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เสริมพล รัตนสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2524. การกำจัดน้ำเสียทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- อรุษา เศรษฐ์ธีรกิจ. 2542. ผลของความเข้มข้นซีไอดีและซัลเฟตต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

**ภาษาอังกฤษ**

- Brock, T.D., Madigan, M.T. and Hall, R.S. 1988. Biology of microorganisms. 5<sup>th</sup> ed. Englewood cliffs, New Jersey : Practice Hall.
- Buswell, A.M., Pagano, J.F. and Sollo, F.W. 1949. Effect of sodium sulfate and chloride on methane fermentation. Industrial & Engineering Chemistry. 48: 596.
- Chiu-Yue, L., Feng-Yung, C. and Chun-Hao, C. 2001. Toxic Effect of Sulfur Compounds on Anaerobic Biogranule. Journal of Hazardous Materials. 87: 11-21.
- De Vegt, A.L. 1985. Inhibition Phenomena in Anaerobic Treatment of "Acid Water". Internal report. Department of Water Pollution Control. Agricultural University. Wageningen, Netherlands. 1-16.
- Fenchel, T. and Finlay, B.J. 1995. Ecology and Evolution in Anoxic Worlds. Oxford University Press. 276.
- Hanaki, K. and Polprasert, C. 1989. Contribution of Methanogenesis to Denitrification with an Upflow Filter. Journal of Water Pollution Control Federation. 61(9): 1604-1611.
- Harada, H., Uemura, S., and Momonoi, K. 1994. Interaction between sulfate reducing bacteria and methane producing in UASB reactor fed with low strength wastes containing different levels of sulfate. Water Research. 28(2): 355-367.
- Isa, Z., Grusenmeyer, S., and Verstraete, W. 1986. Sulfate reduction relative to methane production in high rate anaerobic digestion: Microbiological aspects. Applied and Environmental Microbiology. 51(3): 580-587.
- Kroiss, H. and Plahl-Wabnegg, F. 1983. Testing method to characterize anaerobic sludge and anaerobic removal of substrates. On Anaerobic Digestion. Boston Technical University of Vienna. Austria. 23.
- Kwong T. S. and Fang H. H. P. 1996. Anaerobic Degradation of Cornstarch in Wastewater in Two Upflow Reactor. Journal of Environmental Engineering. 122: 9-17.
- Maaskant, W. and Hobma, S.W. 1981. The influence of sulfate on anaerobic wastewater treatment. H<sub>2</sub>O. 14(25): 596.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M. and Parker, J. 1997. Brock Biology of microorganisms. 8<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice-Hall. 726.

- McCartney, D.M. and Oleszkiewicz, J.A. 1993. Competition between methanogens and sulfate reducers: effect of COD: sulfate ratio and acclimation. Water Environment Research. 65(5): 655-664.
- McCarty, P.L. and McKinney, R.E. 1961. Salt toxicity in anaerobic digestion. Journal Water Pollution Control Federation. 33(4): 546-560.
- Metcalf & Eddy. 1991. Waste water engineering treatment disposal and reuse. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill. 1334.
- Mosey, F.E. 1982. New Developments in the Anaerobic Treatment of Industrial Wastes. Water Pollution Control. 540-552.
- Polprasert, C. and Park, H.S. 1986. Effluent Denitrification with Anaerobic Filters. Water Research. 20(8): 1015-1021.
- Sawyer, C.N. and McCarty, P.L. 1967. Chemistry for Sanitary Engineers. New York: McGraw-Hill. 518.
- Smith, J.M., Masse, A.N., Feige, W.A., and Kamphake, L.J. 1972. Nitrogen Removal from Municipal Wastewater by Columns Denitrification. Environmental Science & Technology. 6(3): 260-267.
- Speece, R.E. 1983. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. Environmental Science and Technology. 17: 416A.
- Thauer, R.K., Jungermann, K. and Decker, K. 1977. Energy conservation chemotrophic anaerobic bacteria. Bacteriological Review. 41: 100.
- Veiga, M.C., Mendez, R. and Lema, J.M. 1994. Anaerobic filter and DSFF reactor in anaerobic treatment of tuna processing wastewater. Water Science and Technology. 30(12): 425-432.
- Visser, A., Gao Y. and Lettinga, G. 1993. Effects of pH on methanogenesis and sulfate reduction in thermophilic(55°)UASB reactors. Bioresource Technology. 44(2): 113-121.
- Visser, A. 1994. Anaerobic treatment of sulfate containing wastewaters. International Training Course on Anaerobic and Low Cost Treatment of Wastewater and Waste. 10 to 21 October, 1994, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Widdel, F. 1988. Microbiology and ecology of sulfate and sulfur-reducing bacteria. Biology of Anaerobic Microorganisms In Widdel, F. (Ed.). 469-585.



Yang, J., Parkin, G.F. and Speece, R.E. 1979. Recovery of Anaerobic Digestion after Exposure to Toxicants. Final report. Contract No. EC-77-S-02-4391. U.S. Department of Energy. Washington D.C. 1-6.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก  
ผลการทดลองช่วงที่ 1

ตารางที่ ก-1 พีเอชของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	พีเอช					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
31/5/2549	7.20	7.32	7.64	7.02	7.23	7.41
2/6/2549	7.34	7.25	7.68	7.15	7.37	7.45
5/6/2549	7.33	7.20	7.86	7.22	7.75	7.35
7/6/2549	7.20	7.15	7.80	7.05	7.71	7.28
9/6/2549	7.46	7.19	7.69	7.18	7.64	7.42
12/6/2549	7.26	7.23	7.36	7.24	7.72	7.45
14/6/2549	7.37	7.25	7.45	7.30	7.81	7.29
16/6/2549	7.73	7.51	7.26	7.29	7.81	7.46
19/6/2549	7.74	7.55	7.28	7.31	7.75	7.64
21/6/2549	7.64	7.52	7.32	7.28	7.40	7.59
23/6/2549	7.68	7.58	7.35	7.20	7.45	7.32
26/6/2549	7.85	7.47	7.26	7.32	7.32	7.25
28/6/2549	7.82	7.35	7.27	7.35	7.24	7.20
30/6/2549	7.70	7.59	7.30	7.29	7.30	7.15
3/7/2549	7.34	7.43	7.47	7.57	7.37	7.19
5/7/2549	7.47	7.38	7.33	7.59	7.20	7.23
7/7/2549	7.29	7.42	7.33	7.43	7.30	7.25
10/7/2549	7.29	7.55	7.20	7.38	7.32	7.51
12/7/2549	7.26	7.49	7.46	7.42	7.41	7.55
14/7/2549	7.28	7.34	7.26	7.01	7.35	7.52
17/7/2549	7.32	7.58	7.37	7.12	7.25	7.58
19/7/2549	7.35	7.73	7.73	7.32	7.40	7.47

ตารางที่ ก-1 พีเอชของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	พีเอช					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
21/7/2549	7.26	7.68	7.74	7.09	7.45	7.35
24/7/2549	7.27	7.53	7.64	7.16	7.32	7.30
26/7/2549	7.30	7.47	7.68	7.24	7.24	7.36
28/7/2549	7.47	7.63	7.85	7.39	7.30	7.53
31/7/2549	7.33	7.75	7.82	7.37	7.37	7.47
2/8/2549	7.25	7.62	7.70	7.26	7.20	7.63
4/8/2549	7.63	7.59	7.34	7.40	7.30	7.75
7/8/2549	7.75	7.65	7.47	7.23	7.32	7.62
9/8/2549	7.62	7.55	7.29	7.37	7.41	7.59
11/8/2549	7.59	7.61	7.29	7.75	7.35	7.65
14/8/2549	7.65	7.58	7.30	7.71	7.25	7.55
16/8/2549	7.55	7.62	7.35	7.64	7.31	7.61
18/8/2549	7.61	7.39	7.22	7.72	7.17	7.58
21/8/2549	7.58	7.42	7.29	7.81	7.19	7.62
23/8/2549	7.62	7.41	7.02	7.81	7.20	7.58
25/8/2549	7.58	7.45	7.15	7.53	7.22	7.52
28/8/2549	7.52	7.35	7.22	7.47	7.47	7.54
30/8/2549	7.54	7.28	7.05	7.63	7.29	7.48
1/9/2549	7.48	7.42	7.18	7.75	7.29	7.56
4/9/2549	7.56	7.45	7.24	7.62	7.30	7.48
ค่าเฉลี่ย	7.48	7.47	7.42	7.38	7.38	7.46

ตารางที่ ก-2 อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
31/5/2549	30.50	30.50	30.50	31.00	30.50	30.50
2/6/2549	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00
5/6/2549	30.00	30.00	30.00	32.00	30.00	30.00
7/6/2549	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00
9/6/2549	31.00	31.00	31.00	30.50	31.00	31.00
12/6/2549	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00
14/6/2549	31.50	31.50	31.50	31.50	31.50	31.50
16/6/2549	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00
19/6/2549	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
21/6/2549	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00
23/6/2549	30.00	30.00	30.00	31.00	30.00	32.00
26/6/2549	30.00	31.00	30.00	32.00	30.00	31.00
28/6/2549	30.00	31.00	30.00	31.00	30.00	30.00
30/6/2549	30.00	31.00	30.00	30.50	30.00	31.00
3/7/2549	30.00	31.50	30.00	31.00	30.00	31.00
5/7/2549	30.00	31.00	30.00	30.00	30.00	31.00
7/7/2549	30.00	32.00	30.00	31.00	30.00	31.50
10/7/2549	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00
12/7/2549	31.00	30.00	31.00	31.00	31.00	32.00
14/7/2549	30.50	30.00	30.50	31.50	30.50	31.00
17/7/2549	30.00	30.00	30.00	31.00	30.00	30.00
19/7/2549	30.00	30.00	30.00	32.00	30.00	30.00
21/7/2549	30.00	30.00	30.00	31.00	30.00	30.00
24/7/2549	30.50	30.00	30.50	30.00	30.50	30.00

ตารางที่ ก-2 อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
26/7/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
28/7/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
31/7/2549	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	30.00
2/8/2549	30.00	30.50	30.00	30.00	30.00	32.00
4/8/2549	30.00	30.00	30.00	29.50	30.00	31.00
7/8/2549	30.50	30.00	30.50	30.00	30.50	30.00
9/8/2549	30.00	29.50	30.00	30.00	30.00	30.00
11/8/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
14/8/2549	29.50	30.00	29.50	30.00	29.50	30.00
16/8/2549	30.00	30.00	30.00	29.00	30.00	30.00
18/8/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
21/8/2549	30.00	29.00	30.00	30.00	30.00	30.00
23/8/2549	30.00	30.00	30.00	29.50	30.00	31.00
25/8/2549	29.00	30.00	29.00	30.00	29.00	31.00
28/8/2549	30.00	29.50	30.00	29.00	30.00	30.50
30/8/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
1/9/2549	29.50	29.00	29.50	29.00	29.50	30.00
4/9/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
ค่าเฉลี่ย	30.30	30.38	30.30	30.52	30.30	30.64



ตารางที่ ก-3 โออาร์พีของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
31/5/2549	-	-277	-	-283	-	-260
2/6/2549	-	-268	-	-299	-	-293
5/6/2549	-	-290	-	-269	-	-328
7/6/2549	-	-283	-	-282	-	-278
9/6/2549	-	-300	-	-292	-	-259
12/6/2549	-	-288	-	-278	-	-277
14/6/2549	-	-297	-	-291	-	-292
16/6/2549	-	-277	-	-304	-	-310
19/6/2549	-	-291	-	-282	-	-288
21/6/2549	-	-319	-	-292	-	-294
23/6/2549	-	-268	-	-268	-	-302
26/6/2549	-	-283	-	-271	-	-287
28/6/2549	-	-296	-	-302	-	-278
30/6/2549	-	-288	-	-281	-	-315
3/7/2549	-	-269	-	-297	-	-289
5/7/2549	-	-295	-	-287	-	-291
7/7/2549	-	-271	-	-305	-	-319
10/7/2549	-	-290	-	-288	-	-268
12/7/2549	-	-301	-	-294	-	-283
14/7/2549	-	-312	-	-277	-	-296
17/7/2549	-	-288	-	-301	-	-288
19/7/2549	-	-278	-	-312	-	-269
21/7/2549	-	-295	-	-288	-	-295
24/7/2549	-	-270	-	-278	-	-271

ตารางที่ ก-3 โอลาร์พีของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	โอลาร์พี (มิลลิโวลต์)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
26/7/2549	-	-288	-	-295	-	-290
28/7/2549		-269		-270		-301
31/7/2549	-	-291	-	-288	-	-312
2/8/2549	-	-277	-	-269	-	-288
4/8/2549	-	-289	-	-291	-	-278
7/8/2549	-	-302	-	-277	-	-295
9/8/2549	-	-286	-	-289	-	-270
11/8/2549	-	-260	-	-302	-	-288
14/8/2549	-	-287	-	-286	-	-269
16/8/2549	-	-278	-	-260	-	-291
18/8/2549	-	-315	-	-293	-	-277
21/8/2549	-	-289	-	-328	-	-289
23/8/2549	-	-297	-	-278	-	-269
25/8/2549	-	-283	-	-259	-	-276
28/8/2549	-	-271	-	-277	-	-295
30/8/2549	-	-302	-	-292	-	-276
1/9/2549	-	-281	-	-310	-	-307
4/9/2549	-	-297	-	-288	-	-300
ค่าเฉลี่ย	-	-287	-	-287	-	-288

ตารางที่ ก-4 สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
31/5/2549	248	240	376	346	468	456
7/6/2549	246	236	368	348	468	456
14/6/2549	242	240	370	346	468	468
21/6/2549	246	236	368	346	468	456
28/6/2549	242	240	366	348	476	468
5/7/2549	246	236	340	346	468	456
12/7/2549	258	232	366	350	456	470
19/7/2549	184	244	332	364	484	440
26/7/2549	188	240	324	384	476	412
2/8/2549	192	208	320	372	436	472
9/8/2549	200	224	292	384	440	452
16/8/2549	180	284	312	300	412	428
23/8/2549	180	280	308	328	416	440
30/8/2549	165	220	357	357	440	412
ค่าเฉลี่ย	216	240	343	351	455	449

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-5 ของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
31/5/2549	36.80	20.80	35.20	17.40	29.20	18.70
7/6/2549	46.80	28.20	28.90	19.60	29.60	19.40
14/6/2549	36.60	22.60	32.60	18.70	32.30	18.60
21/6/2549	38.10	22.90	38.00	19.40	27.20	18.20
28/6/2549	32.20	19.58	33.50	18.60	29.20	17.90
5/7/2549	38.20	19.60	30.60	18.20	26.90	16.34
12/7/2549	33.50	19.80	29.70	17.90	25.30	16.30
19/7/2549	30.60	18.70	34.20	16.34	28.10	17.20
26/7/2549	29.70	19.40	33.40	12.24	21.60	11.90
2/8/2549	29.00	18.60	46.80	19.50	38.10	18.90
9/8/2549	35.00	20.50	48.10	21.40	32.20	20.80
16/8/2549	34.20	21.10	29.60	16.40	38.20	22.60
23/8/2549	33.40	18.20	32.30	15.20	33.50	22.90
30/8/2549	46.80	17.90	27.20	18.90	30.60	20.50
เฉลี่ย	35.78	20.56	34.29	17.84	30.14	18.59

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-6 ของแข็งละลายของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
31/5/2549	2219.2	729.2	2836.8	966.4	2519.8	877.3
7/6/2549	1809.2	520.8	2295.1	946.3	2450.4	540.6
14/6/2549	1023.4	867.4	1975.4	1045.6	2547.7	968.4
21/6/2549	1685.9	1017.1	2422	1101.4	2652.8	877.8
28/6/2549	2307.8	540.42	2606.5	1021.8	2920.8	771.1
5/7/2549	2411.8	967.4	1819.4	961.1	2823.1	543.66
12/7/2549	1946.5	876.2	1030.3	946.66	1824.7	779.7
19/7/2549	1819.4	770.3	1409.8	884.76	1031.9	945.8
26/7/2549	1030.3	540.6	1610.6	904.5	1422.4	1236.1
2/8/2549	1415	777.4	2289.2	914.6	2411.9	1325.1
9/8/2549	1609	795.5	2867.9	1087.6	2447.8	1563.2
16/8/2549	913.8	462.9	1662.4	696.8	2601.8	845.4
23/8/2549	964.6	541.8	2917.7	960.1	3386.5	1137.1
30/8/2549	1513.2	969.1	2822.8	963	2613.4	977.5
เฉลี่ย	1619.22	741.15	2183.28	957.19	2403.93	956.34

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-7 ของแข็งทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
31/5/2549	2256	750	2872	986	2549	896
7/6/2549	1856	549	2324	965	2480	560
14/6/2549	1060	890	2008	1065	2580	987
21/6/2549	1724	1040	2460	1120	2680	896
28/6/2549	2340	560	2640	1040	2950	789
5/7/2549	2450	987	1850	979	2850	560
12/7/2549	1980	896	1060	963	1850	796
19/7/2549	1850	789	1444	897	1060	963
26/7/2549	1060	560	1644	924	1444	1248
2/8/2549	1444	796	2336	936	2450	1344
9/8/2549	1644	816	2916	1104	2480	1584
16/8/2549	948	484	1692	712	2640	868
23/8/2549	998	560	2950	979	3420	1160
30/8/2549	1560	987	2850	963	2644	998
เฉลี่ย	1655	762	2218	974	2434	975

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก-8 ซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
30/5/2549	400	64	880	112	1520	96
1/6/2549	464	32	960	112	1520	128
6/6/2549	512	128	840	96	1440	112
8/6/2549	480	64	960	96	1440	96
13/6/2549	496	96	1120	64	1280	112
15/6/2549	640	112	960	64	1440	128
20/6/2549	600	112	960	16	1440	112
22/6/2549	400	16	1120	16	1520	96
27/6/2549	600	96	1040	64	1360	112
29/6/2549	480	64	1040	48	1280	128
4/7/2549	640	16	1120	16	1360	32
6/7/2549	512	112	1120	16	1440	96
11/7/2549	480	64	1040	16	1520	112
13/7/2549	496	48	1040	48	1440	96
18/7/2549	600	32	960	48	1440	96
20/7/2549	600	32	1040	96	1280	80
25/7/2549	400	16	960	80	1440	128
27/7/2549	600	32	1040	32	1440	96
1/8/2549	480	96	840	96	1280	96
3/8/2549	496	48	840	16	1440	96
8/8/2549	640	32	1200	32	1360	32
10/8/2549	560	48	960	16	1440	16
15/8/2549	600	16	1040	32	1440	96
17/8/2549	480	16	1120	16	1280	16

ตารางที่ ก-8 ซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
22/8/2549	496	16	960	64	1440	128
24/8/2549	600	32	840	48	1360	64
29/8/2549	600	16	960	112	1280	48
24/8/2549	400	32	1120	64	1440	32
29/8/2549	600	16	960	16	1360	64
31/8/2549	480	16	960	32	1440	64
5/9/2549	496	16	1120	16	1520	32
ค่าเฉลี่ย	527	50	1004	52	1409	85

ตารางที่ ก-9 ซัลไฟต์ในชุดคักก้าซของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	ซัลไฟต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1
31/5/2549	9.98	10.27	10.48
7/6/2549	10.25	9.88	10.25
14/6/2549	10.25	10.53	10.50
21/6/2549	10.48	10.53	10.53
28/6/2549	10.25	10.48	10.53
5/7/2549	9.98	12.64	10.37
12/7/2549	10.64	11.97	10.64
19/7/2549	9.30	9.70	9.40
26/7/2549	9.40	9.40	9.30
2/8/2549	11.18	10.64	11.04
9/8/2549	11.31	10.90	11.04

ตารางที่ ก-9 ซัลไฟด์ในชุดคักก๊าซของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1
16/8/2549	9.60	9.40	9.50
23/8/2549	9.60	9.40	9.20
30/8/2549	9.90	9.40	9.70
6/9/2549	10.20	10.10	9.80
ค่าเฉลี่ย	10.15	10.35	10.15

ตารางที่ ก-10 ก๊าซชีวภาพของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	ก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อวัน)		
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1
31/5/2549	1.92	6.24	11.52
7/6/2549	1.92	6.72	10.56
14/6/2549	1.872	8.64	11.52
21/6/2549	1.92	6.24	11.52
28/6/2549	1.92	6.24	11.52
5/7/2549	2.4	8.64	11.52
12/7/2549	2.4	8.64	10.56
19/7/2549	3.12	6.24	11.52
26/7/2549	3.36	6.24	12.48
2/8/2549	3.12	8.64	11.52
9/8/2549	3.6	8.64	10.56
16/8/2549	3.6	6.24	11.52
23/8/2549	4.08	8.64	14.4
30/8/2549	4.08	8.64	14.4
6/9/2549	4.32	6.24	14.4
ค่าเฉลี่ย	2.91	7.39	11.97

ตารางที่ ก-11 ค่าเฟดของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	ค่าเฟด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
30/5/2549	89.25	52.92	93.75	54.32	92.75	53.75
1/6/2549	94.70	50.40	97.08	43.69	93.75	51.34
6/6/2549	96.48	46.37	71.37	48.65	97.08	45.66
8/6/2549	92.25	45.36	99.79	45.68	71.37	43.25
13/6/2549	89.75	36.29	98.25	45.50	99.79	38.95
15/6/2549	94.56	35.75	97.78	35.95	90.75	35.75
20/6/2549	92.25	33.85	90.12	35.05	96.50	33.85
22/6/2549	89.75	31.35	68.35	32.25	90.25	31.35
27/6/2549	93.75	32.15	99.79	31.45	94.50	32.15
29/6/2549	97.08	29.60	108.67	30.15	92.75	31.86
4/7/2549	71.37	27.20	132.05	28.25	89.25	30.65
6/7/2549	99.79	29.60	94.56	25.60	92.25	29.80
11/7/2549	90.75	27.20	92.25	29.60	89.75	28.35
13/7/2549	96.50	28.35	89.75	27.20	93.75	31.50
18/7/2549	90.25	24.45	93.75	28.35	93.75	29.60
20/7/2549	94.50	25.60	97.08	24.45	97.08	27.20
25/7/2549	92.75	29.60	71.37	28.35	71.37	29.60
27/7/2549	89.25	27.20	99.79	24.45	99.79	27.20
1/8/2549	90.75	30.65	94.70	29.60	98.25	30.65
3/8/2549	96.50	29.80	96.48	29.60	97.78	29.80
8/8/2549	90.25	28.35	92.25	27.20	90.12	28.35
10/8/2549	94.50	31.50	89.75	30.65	68.35	24.45
15/8/2549	92.75	29.60	92.20	29.80	99.79	25.70
17/8/2549	89.25	26.54	86.19	28.35	90.12	24.55

ตารางที่ ก-11 ค่าเฟดของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ค่าเฟด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
22/8/2549	71.37	24.45	70.77	31.50	68.35	23.65
24/8/2549	99.79	25.70	108.87	29.60	99.79	25.60
29/8/2549	98.25	27.55	99.87	24.55	108.67	24.45
24/8/2549	97.78	24.55	118.95	25.60	132.05	25.70
29/8/2549	96.50	25.60	96.50	26.92	96.50	24.55
31/8/2549	90.25	26.92	90.25	25.20	90.25	22.65
5/9/2549	94.50	25.20	94.50	23.65	94.50	22.38
ค่าเฉลี่ย	92.17	31.28	94.41	31.65	92.94	31.11

ตารางที่ ก-12 กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
31/5/2549	85	101	96	138	117	158
14/6/2549	91	104	87	108	104	145
28/6/2549	76	102	102	139	111	152
12/7/2549	87	104	91	134	109	139
26/7/2549	73	109	73	105	103	136
9/8/2549	77	103	98	118	96	125
23/8/2549	70	102	77	109	98	128
ค่าเฉลี่ย	80	104	89	122	105	140

ตารางที่ ก-13 ค่าไฟฟ้ของการทดลองช่วงที่ 1

วัน/เดือน/ปี	ค่าไฟฟ้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
30/5/2549	0.40	10.25	1.95	10.53	3.03	10.50
1/6/2549	0.40	10.48	0.77	10.53	2.12	10.53
6/6/2549	0.62	10.25	2.12	10.48	2.01	10.53
8/6/2549	0.45	9.98	0.80	12.64	1.90	10.37
13/6/2549	0.58	10.64	6.50	11.97	0.40	10.64
15/6/2549	0.80	9.30	2.50	9.70	0.62	9.40
20/6/2549	4.40	9.40	1.54	9.40	0.45	9.30
22/6/2549	3.23	11.18	0.80	10.64	0.58	11.04
27/6/2549	4.20	11.31	0.38	10.90	3.03	11.04
29/6/2549	6.83	9.60	5.12	9.40	2.12	9.50
4/7/2549	1.54	9.60	3.03	9.40	2.01	9.20
6/7/2549	0.80	9.90	2.12	9.40	1.90	9.70
11/7/2549	0.38	10.20	2.01	10.10	0.40	9.80
13/7/2549	5.12	7.00	1.90	7.90	0.40	7.50
18/7/2549	3.03	7.30	0.40	7.30	0.62	7.50
20/7/2549	2.12	9.20	0.62	9.20	0.45	9.40
25/7/2549	2.01	9.00	0.45	9.80	0.58	9.50
27/7/2549	1.90	10.27	0.58	10.25	0.80	10.53
1/8/2549	7.16	10.53	0.80	9.98	4.40	10.53
3/8/2549	1.95	10.48	3.23	10.25	3.23	10.48
8/8/2549	0.77	10.25	4.20	9.88	4.20	10.46
10/8/2549	2.12	9.98	6.83	10.27	6.83	10.25
15/8/2549	2.27	10.25	1.54	10.53	1.54	10.25
17/8/2549	0.80	10.00	0.80	10.48	0.80	10.53



ตารางที่ ก-13 ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 5:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
22/8/2549	4.40	9.90	0.38	10.25	0.38	10.48
24/8/2549	3.23	10.46	5.12	10.53	5.12	10.67
29/8/2549	4.20	9.88	3.03	10.48	3.03	10.25
24/8/2549	6.83	9.98	2.12	10.67	2.12	10.46
29/8/2549	1.54	10.25	5.60	10.25	2.01	10.48
31/8/2549	0.80	10.00	0.15	10.46	1.90	10.27
5/9/2549	6.50	9.90	6.25	10.25	7.16	10.53
ค่าเฉลี่ย	2.63	9.89	2.38	10.12	2.13	10.05

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข  
ผลการทดลองช่วงที่ 2

ตารางที่ ข-1 พีเอชของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	พีเอช					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
25/9/2549	7.73	7.48	7.34	7.54	7.20	7.24
27/9/2549	7.74	7.55	7.33	7.48	7.20	7.39
29/9/2549	7.64	7.60	7.20	7.56	7.25	7.37
2/10/2549	7.68	7.65	7.46	7.47	7.29	7.26
4/10/2549	7.85	7.58	7.26	7.80	7.32	7.40
6/10/2549	7.82	7.55	7.37	7.73	7.43	7.23
9/10/2549	7.70	7.47	7.73	7.69	7.32	7.37
11/10/2549	7.34	7.80	7.74	7.60	7.23	7.75
13/10/2549	7.47	7.73	7.64	7.45	7.28	7.71
16/10/2549	7.29	7.69	7.68	7.49	7.20	7.64
18/10/2549	7.29	7.60	7.85	7.52	7.20	7.72
20/10/2549	7.30	7.45	7.41	7.50	7.25	7.81
23/10/2549	7.35	7.49	7.35	7.45	7.30	7.81
25/10/2549	7.22	7.25	7.25	7.43	7.30	7.02
27/10/2549	7.29	7.51	7.31	7.53	7.55	7.18
30/10/2549	7.32	7.55	7.17	7.58	7.26	7.28
1/11/2549	7.43	7.52	7.19	7.33	7.40	7.08
3/11/2549	7.32	7.58	7.20	7.40	7.42	7.20
6/11/2549	7.23	7.47	7.22	7.38	7.55	7.20
8/11/2549	7.40	7.35	7.27	7.46	7.49	7.34
10/11/2549	7.23	7.30	7.45	8.02	7.34	7.33
13/11/2549	7.37	7.36	7.26	7.45	7.58	7.20

ตารางที่ ข-1 พีเอชของการทดลองช่วงที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	พีเอช					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
15/11/2549	7.75	7.40	7.37	7.35	7.73	7.46
17/11/2549	7.71	7.38	7.73	7.28	7.68	7.26
20/11/2549	7.64	7.30	7.74	7.42	7.53	7.37
22/11/2549	7.72	7.58	7.64	7.45	7.43	7.73
24/11/2549	7.81	7.43	7.68	7.29	7.24	7.74
27/11/2549	7.81	7.32	7.85	7.46	7.35	7.64
29/11/2549	7.75	7.35	7.82	7.64	7.70	7.80
1/12/2549	7.40	7.29	7.70	7.59	7.79	7.69
4/12/2549	7.45	7.57	7.34	7.20	7.64	7.36
6/12/2549	7.32	7.59	7.47	7.32	7.68	7.45
8/12/2549	7.24	7.43	7.29	7.35	7.86	7.26
11/12/2549	7.30	7.38	7.01	7.29	7.80	7.28
13/12/2549	7.37	7.42	7.12	7.25	7.69	7.32
15/12/2549	7.20	7.55	7.32	7.32	7.36	7.35
18/12/2549	7.30	7.49	7.09	7.22	7.45	7.26
20/12/2549	7.32	7.34	7.16	7.25	7.26	7.27
22/12/2549	7.41	7.58	7.24	7.23	7.28	7.30
25/12/2549	7.35	7.73	7.39	7.27	7.28	7.47
27/12/2549	7.25	7.68	7.37	7.34	7.08	7.33
ค่าเฉลี่ย	7.47	7.50	7.41	7.45	7.42	7.41

ตารางที่ ข-2 อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
27/9/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
29/9/2549	30.00	30.00	30.00	29.00	30.00	29.50
2/10/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
4/10/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
6/10/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	29.00
9/10/2549	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	30.00
11/10/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
13/10/2549	29.50	30.00	29.50	29.50	29.50	30.00
16/10/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
18/10/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	29.50
20/10/2549	29.50	29.50	29.50	29.50	29.50	30.00
23/10/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
25/10/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
27/10/2549	29.00	30.00	29.00	29.00	29.00	30.00
30/10/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
1/11/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
3/11/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
6/11/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	29.50
8/11/2549	29.50	30.00	29.50	30.00	29.50	30.00
10/11/2549	30.00	29.50	30.00	30.00	30.00	30.00
13/11/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	29.50
15/11/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
17/11/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
20/11/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	29.00

ตารางที่ ข-2 อุณหภูมิของการทดลองช่วงที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
22/11/2549	30.00	30.00	30.00	29.50	30.00	30.00
24/11/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
27/11/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
29/11/2549	29.50	29.50	29.50	29.50	29.50	30.00
1/12/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	29.50
4/12/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
6/12/2549	29.50	29.50	29.50	29.00	29.50	30.00
8/12/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
11/12/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
13/12/2549	29.00	29.00	29.00	30.00	29.00	30.00
15/12/2549	30.00	30.00	30.00	29.50	30.00	29.50
18/12/2549	29.50	30.00	29.50	30.00	29.50	30.00
20/12/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
22/12/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
25/12/2549	30.00	29.50	30.00	30.00	30.00	30.00
27/12/2549	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
ค่าเฉลี่ย	29.85	29.89	29.85	29.84	29.85	29.88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 โออาร์พีของการทดลองครั้งที่ 2

วัน/เดือน/ปี	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
27/9/2549	-	-288	-	-286	-	-291
29/9/2549	-	-297	-	-260	-	-304
2/10/2549	-	-277	-	-287	-	-282
4/10/2549	-	-291	-	-278	-	-292
6/10/2549	-	-319	-	-315	-	-268
9/10/2549	-	-268	-	-289	-	-271
11/10/2549	-	-283	-	-297	-	-302
13/10/2549	-	-296	-	-283	-	-281
16/10/2549	-	-268	-	-271	-	-297
18/10/2549	-	-286	-	-302	-	-287
20/10/2549	-	-260	-	-281	-	-305
23/10/2549	-	-293	-	-297	-	-288
25/10/2549	-	-328	-	-287	-	-268
27/10/2549	-	-278	-	-305	-	-297
30/10/2549	-	-260	-	-288	-	-289
1/11/2549	-	-287	-	-294	-	-266
3/11/2549	-	-309	-	-288	-	-282
6/11/2549	-	-269	-	-294	-	-262
8/11/2549	-	-297	-	-302	-	-316
10/11/2549	-	-286	-	-287	-	-274
13/11/2549	-	-278	-	-278	-	-288
15/11/2549	-	-290	-	-315	-	-294
17/11/2549	-	-318	-	-289	-	-277
20/11/2549	-	-276	-	-291	-	-268



ตารางที่ ข-3 โออาร์พีของการทดลองครั้งที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	โออาร์พี (มิลลิโวลต์)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
22/11/2549	-	-268	-	-319	-	-290
24/11/2549	-	-276	-	-268	-	-283
27/11/2549	-	-287	-	-283	-	-300
29/11/2549	-	-298	-	-296	-	-288
1/12/2549	-	-287	-	-288	-	-297
4/12/2549	-	-281	-	-269	-	-277
6/12/2549	-	-292	-	-295	-	-291
8/12/2549	-	-268	-	-271	-	-319
11/12/2549	-	-283	-	-290	-	-268
13/12/2549	-	-299	-	-301	-	-283
15/12/2549	-	-269	-	-293	-	-296
18/12/2549	-	-282	-	-328	-	-268
20/12/2549	-	-292	-	-278	-	-286
22/12/2549	-	-273	-	-260	-	-260
25/12/2549	-	-305	-	-287	-	-293
27/12/2549	-	-291	-	-309	-	-328
ค่าเฉลี่ย	-	-286.33	-	-289.98	-	-286.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 สภาพต่างทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
6/9/2549	292	384	484	440	412	654
13/9/2549	312	300	476	412	456	668
20/9/2549	308	328	436	472	436	640
27/9/2549	440	412	760	870	760	960
4/10/2549	400	760	800	960	600	840
11/10/2549	400	600	680	960	600	660
18/10/2549	468	456	760	668	456	668
25/10/2549	476	468	600	960	436	640
1/11/2549	468	456	600	660	540	824
8/11/2549	456	470	540	668	580	798
15/11/2549	484	440	580	640	615	867
22/11/2549	476	412	615	824	640	905
29/11/2549	436	472	527	798	745	950
6/12/2549	440	452	545	867	527	745
13/12/2549	468	456	625	960	545	791
27/12/2549	468	468	527	840	625	826
ค่าเฉลี่ย	425	458	597	750	561	777

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ของแข็งแขวนลอยของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
27/9/2549	57.60	29.60	53.20	22.50	60.80	27.20
4/10/2549	54.40	32.30	30.80	20.50	61.00	29.20
11/10/2549	60.80	27.20	57.60	27.10	58.20	26.90
18/10/2549	61.00	29.20	54.40	38.10	61.00	25.30
25/10/2549	58.20	26.90	74.00	32.20	63.70	28.10
1/11/2549	61.00	25.30	74.40	38.20	74.80	21.60
8/11/2549	63.70	28.10	58.80	33.50	62.50	33.50
15/11/2549	75.50	21.60	58.00	30.60	74.40	30.60
22/11/2549	62.50	21.20	54.00	29.70	58.80	29.70
29/11/2549	60.70	12.80	51.20	34.20	58.00	34.20
6/12/2549	54.00	24.80	54.40	33.40	54.00	33.40
13/12/2549	52.00	32.07	65.80	46.80	51.20	46.80
27/12/2549	58.80	20.50	78.20	48.10	54.40	29.60
เฉลี่ย	60.02	25.51	58.83	33.45	60.98	30.47

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-6 ของแข็งละลายของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
27/9/2549	2306.4	957.4	2922.8	1099.5	2748.2	952.8
4/10/2549	2201.6	1219.7	2841.2	1452.9	3704.2	1666.8
11/10/2549	1795.2	692.8	2266.4	869.9	2490.8	961.1
18/10/2549	999	530.8	1953.6	891.8	2419	1222.7
25/10/2549	1665.8	713.1	2386	841.8	3012.3	1031.9
1/11/2549	2279	864.7	2565.6	952.5	2505.2	874.4
8/11/2549	2386.3	1011.9	2751.2	1034.4	2617.5	953.5
15/11/2549	1904.5	965.4	3122	1010.3	3375.6	1217.4
22/11/2549	3423.5	874.8	3296	928.8	3411.2	1314.3
29/11/2549	2913.3	776.2	3068.8	890.6	3502	1549.8
6/12/2549	2596	771.2	2795.6	889.2	3056	1126.6
13/12/2549	2808	783.93	2904.2	1055.9	2898.8	951.2
27/12/2549	3151.2	966.5	2761.8	979	2795.6	957.4
เฉลี่ย	2306.4	957.4	2922.8	1099.5	2748.2	952.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-7 ของแข็งทั้งหมดของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
27/9/2549	2364	987	2976	1120	2809	980
4/10/2549	2256	1252	2872	1480	3765	1696
11/10/2549	1856	720	2324	908	2549	988
18/10/2549	1060	560	2008	924	2480	1248
25/10/2549	1724	740	2460	880	3076	1060
1/11/2549	2340	890	2640	986	2580	896
8/11/2549	2450	1040	2810	1065	2680	987
15/11/2549	1980	987	3180	1040	3450	1248
22/11/2549	3486	896	3350	963	3470	1344
29/11/2549	2974	789	3120	924	3560	1584
6/12/2549	2650	796	2850	936	3110	1160
13/12/2549	2860	816	2970	1104	2950	998
27/12/2549	3210	987	2840	979	2850	987
เฉลี่ย	2401	882	2800	1024	3025	1167

ตารางที่ ข-8 ซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
26/9/2549	960	244	1440	112	1840	244
28/9/2549	960	128	1520	96	2000	128
3/10/2549	1120	112	1280	112	2240	112
5/10/2549	960	96	1360	128	1840	128
10/10/2549	960	112	1280	224	1920	244
12/10/2549	1120	128	1360	244	1840	48
17/10/2549	960	96	1440	112	1920	112
19/10/2549	840	128	1520	96	1760	64
24/10/2549	960	112	1440	96	1840	96
26/10/2549	1120	96	1440	80	1840	112

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ข-8 ซีโอดีของการทดลองช่วงที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
31/10/2549	960	112	1280	32	1840	114
2/11/2549	960	128	1440	96	1920	114
7/11/2549	840	112	1440	80	2080	112
9/11/2549	960	112	1280	112	1760	112
14/11/2549	960	128	1440	96	1760	96
16/11/2549	960	112	1360	112	2000	112
21/11/2549	1120	96	1280	128	1760	128
23/11/2549	1040	128	1440	112	1840	32
28/11/2549	960	112	1360	96	1760	48
30/11/2549	840	96	1440	112	1760	96
5/12/2549	840	112	1520	128	1840	128
7/12/2549	960	128	1440	32	1920	112
12/12/2549	960	128	1440	96	1760	96
14/12/2549	960	96	1280	112	1840	112
19/12/2549	1040	112	1440	96	1840	96
21/12/2549	1040	96	1440	96	1840	96
26/12/2549	960	96	1520	48	1920	48
ค่าเฉลี่ย	975	117	1404	107	1870	109

ตารางที่ ข-9 ซัลไฟด์ในชุดคักก๊าซของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1
	น้ำเข้า	น้ำเข้า	น้ำเข้า
4/10/2549	10.30	9.00	9.40
11/10/2549	9.40	9.50	9.40
18/10/2549	9.50	9.30	10.10
25/10/2549	9.50	9.00	7.90
1/11/2549	9.60	9.50	7.30
8/11/2549	9.70	9.50	9.20
15/11/2549	9.50	9.50	9.80
22/11/2549	9.50	9.30	9.30
29/11/2549	9.40	9.00	10.20
6/12/2549	9.30	9.60	9.30
13/12/2549	9.00	9.90	9.40
27/12/2549	9.00	9.50	7.30
ค่าเฉลี่ย	9.48	9.38	9.05

ตารางที่ ข-10 ก๊าซชีวภาพของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อวัน)		
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1
	น้ำเข้า	น้ำเข้า	น้ำเข้า
4/10/2549	6.24	11.52	14.4
11/10/2549	6.24	10.56	14.4
18/10/2549	8.64	11.52	14.4
25/10/2549	8.64	11.52	14.4
1/11/2549	6.24	11.52	14.42
8/11/2549	6.24	11.52	12.48

ตารางที่ ข-10 ก๊าซชีวภาพของการทดลองช่วงที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อวัน)		
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1
	น้ำเข้า	น้ำเข้า	น้ำเข้า
15/11/2549	8.64	10.56	14.4
22/11/2549	8.64	11.52	14.4
29/11/2549	6.24	12.48	14.4
6/12/2549	8.64	11.52	14.48
13/12/2549	8.64	10.56	14.48
27/12/2549	6.24	11.52	14.4
ค่าเฉลี่ย	7.44	11.36	14.26

ตารางที่ ข-11 ซัลไฟด์ของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ซัลไฟด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
26/9/2549	4.40	10.25	5.12	10.48	0.45	10.27
28/9/2549	3.23	10.00	3.03	9.50	0.58	9.50
3/10/2549	4.20	9.30	2.12	9.40	0.80	9.70
5/10/2549	5.40	9.50	2.01	9.30	4.40	9.60
10/10/2549	1.54	9.20	1.90	8.00	3.23	9.70
12/10/2549	0.80	9.20	2.10	7.50	4.20	6.90
17/10/2549	0.38	9.40	1.95	9.20	5.30	7.30
19/10/2549	5.12	10.10	0.77	9.70	1.54	9.10
24/10/2549	3.03	9.50	2.12	9.50	0.80	9.30
26/10/2549	2.12	9.50	2.27	9.50	0.38	9.40
31/10/2549	2.01	10.30	0.80	9.00	5.12	9.40
2/11/2549	1.90	9.40	4.40	9.50	3.03	9.40

ตารางที่ ข-11 ค่าไฟฟ้ของการทดลองช่วงที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ค่าไฟฟ้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
7/11/2549	3.10	9.50	3.23	9.30	2.12	10.10
9/11/2549	1.95	9.50	4.20	9.00	2.01	7.90
14/11/2549	0.77	9.60	6.34	9.50	1.90	7.30
16/11/2549	2.12	9.70	1.54	9.50	3.80	9.20
21/11/2549	2.27	9.50	0.80	9.50	1.95	9.80
23/11/2549	0.80	9.50	6.50	9.30	0.77	9.30
28/11/2549	4.40	9.40	2.50	9.00	2.12	10.20
30/11/2549	3.23	9.30	0.56	9.60	2.27	9.30
5/12/2549	4.20	9.00	0.15	9.90	2.27	9.40
7/12/2549	4.60	9.00	0.98	9.50	0.80	7.30
12/12/2549	0.20	10.20	4.67	9.20	4.40	7.00
14/12/2549	3.56	9.30	3.20	9.70	3.23	9.30
19/12/2549	2.15	9.00	1.75	9.80	4.20	9.30
21/12/2549	3.45	9.70	0.98	7.50	6.34	9.40
26/12/2549	1.20	9.50	0.67	7.50	1.54	9.50
ค่าเฉลี่ย	2.67	9.53	2.47	9.20	2.58	9.03

ตารางที่ ข-12 ซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
26/9/2549	89.25	34.26	92.75	32.25	92.00	33.85
28/9/2549	92.25	33.00	94.70	31.45	93.56	31.35
3/10/2549	90.75	32.60	94.56	30.15	94.00	32.15
5/10/2549	96.50	31.90	92.25	28.25	90.00	31.86
10/10/2549	90.25	30.60	89.75	25.60	92.00	32.35
12/10/2549	94.50	30.89	93.75	29.60	92.75	28.25
17/10/2549	92.75	31.31	97.08	27.20	93.75	25.60
19/10/2549	89.25	32.05	71.37	28.35	97.08	29.60
24/10/2549	94.70	32.35	99.79	24.45	71.37	27.20
26/10/2549	93.00	28.25	90.75	25.60	99.79	30.65
31/10/2549	92.25	25.60	96.50	29.60	90.75	28.25
2/11/2549	89.75	29.60	90.25	27.20	96.50	27.60
7/11/2549	93.75	27.20	94.50	30.65	90.25	29.60
9/11/2549	97.08	30.65	92.75	29.80	94.50	23.65
14/11/2549	71.37	28.25	89.25	28.35	92.75	25.60
16/11/2549	99.79	25.60	94.70	31.50	89.25	24.45
21/11/2549	98.25	29.60	96.48	29.60	92.25	25.70
23/11/2549	97.78	27.20	92.25	23.65	89.75	27.55
28/11/2549	90.12	23.65	89.75	25.60	93.75	24.55
30/11/2549	68.35	25.60	93.75	24.45	97.08	25.40
5/12/2549	99.79	24.45	97.08	25.70	71.37	23.65
7/12/2549	108.67	25.70	71.37	27.55	99.79	25.60
12/12/2549	132.05	27.55	99.79	24.55	90.75	24.45
14/12/2549	96.50	24.55	98.25	22.65	96.50	25.70

ตารางที่ ข-12 ซัลเฟตของการทดลองช่วงที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ซัลเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
19/12/2549	90.25	25.40	97.78	27.40	90.25	27.55
21/12/2549	94.50	23.65	90.25	25.50	94.50	24.55
26/12/2549	92.75	24.50	94.50	22.50	92.75	22.65
ค่าเฉลี่ย	93.93	28.37	92.44	27.38	91.82	27.38

ตารางที่ ข-13 กรดไขมันระเหยของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
6/9/2549	63	108	70	110	102	137
20/9/2549	73	106	63	101	108	139
4/10/2549	82	104	89	122	106	135
18/10/2549	63	109	82	119	104	133
1/11/2549	89	103	98	136	99	125
15/11/2549	82	108	77	111	103	129
29/11/2549	98	106	104	134	110	130
13/12/2549	77	103	96	120	101	128
ค่าเฉลี่ย	78	106	85	119	104	132



ตารางที่ ข-14 ไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
26/9/2549	62.84	33.24	62.22	30.54	68.05	29.51
28/9/2549	61.54	33.15	61.24	29.68	62.84	29.01
3/10/2549	62.13	32.45	59.58	29.54	61.54	27.00
5/10/2549	60.46	32.68	62.78	28.64	62.13	27.14
10/10/2549	64.52	31.98	64.14	28.75	60.46	26.34
12/10/2549	59.89	31.65	62.11	26.42	64.52	24.98
17/10/2549	60.54	32.15	62.35	25.81	59.89	24.68
19/10/2549	62.35	30.16	64.15	24.35	60.54	23.15
24/10/2549	61.48	30.03	62.11	21.42	62.35	20.16
26/10/2549	65.37	29.64	62.84	22.12	61.48	20.03
31/10/2549	62.41	29.57	61.54	21.89	65.37	19.45
2/11/2549	64.12	28.67	62.13	21.04	61.24	19.27
7/11/2549	65.10	28.46	60.46	20.87	58.99	19.15
9/11/2549	62.22	25.24	64.52	20.37	62.78	18.98
14/11/2549	61.24	26.42	59.89	20.45	62.22	18.67
16/11/2549	59.67	25.64	62.89	20.11	68.16	18.54
21/11/2549	62.78	21.88	64.43	16.43	62.38	14.86
23/11/2549	64.14	21.33	64.52	15.36	64.14	15.21
28/11/2549	62.11	20.10	59.89	12.58	62.11	13.98
30/11/2549	62.35	21.82	60.54	11.59	62.35	12.50
5/12/2549	64.15	22.66	62.35	12.46	64.15	10.75
7/12/2549	62.11	20.10	61.48	13.24	62.11	12.88
12/12/2549	63.23	19.21	68.54	11.26	62.84	10.50
14/12/2549	62.98	18.46	62.41	10.98	61.54	11.76

ตารางที่ ข-14 ไนเตรทของการทดลองช่วงที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ไนเตรท (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
	COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 10:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 15:1		COD:SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> = 20:1	
	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก	น้ำเข้า	น้ำออก
19/12/2549	62.75	18.36	64.12	12.42	62.13	10.00
21/12/2549	62.48	19.96	65.10	11.69	62.35	12.89
26/12/2549	62.51	18.17	62.22	12.14	61.48	11.96
ค่าเฉลี่ย	62.50	26.04	62.61	19.71	62.60	18.64



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การหาค่าความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (Specific Methanogenic Activity; SMA)

การศึกษาความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทนจากเมล็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ ซึ่งใช้แบบจำลองแบบแบคทีเรีย ใส่มะกอกตะกอนจุลินทรีย์และสารอาหารเพียงครั้งเดียว โดยไม่มีการเติมเข้าไปอีก ทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 35 องศาเซลเซียส

#### อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 1 ชุด ประกอบด้วยขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร สำหรับใส่มะกอกตะกอนจุลินทรีย์ มีจุกยางสำหรับปิดปากขวดซึ่งสอดท่อแก้วนำก๊าซซึ่งต่อกับสายยางซิลิโคน เพื่อนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นผ่านไปยังขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรอีกใบหนึ่ง มีจุกยางสำหรับปิดปากขวดเจาะรูสองรู สอดท่อแก้วนำก๊าซ 2 ท่อ โดยท่อยาวจะจุ่มลงไปในสารละลายในขวด ซึ่งก็คือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นประมาณ 1 นอร์มัล เพื่อดักก๊าซชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากก๊าซมีเทน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ละลายลงไป ส่วนก๊าซมีเทนจะแยกตัวออกมาแล้วเข้าสู่ท่อแก้วนำก๊าซอีกท่อหนึ่งที่ต่อกับสายยางซิลิโคน เพื่อนำก๊าซมีเทนไปยังอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น โดยอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซมีเทนจะใช้บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 2 อัน บรรจุน้ำที่ทราบระดับแน่นอน และใช้สายยางซิลิโคนเชื่อมต่อบิวเรตทั้ง 2 อันเข้าด้วยกันที่บริเวณด้านล่างของบิวเรตให้มีลักษณะคล้ายกับอักษรยู (U) โดยก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะผ่านสายยางซิลิโคนเข้าสู่ด้านล่างของบิวเรตเข้าไปแทนที่น้ำที่อยู่ในบิวเรตทำให้ระดับน้ำด้านล่างหนึ่งของบิวเรตลดลง อ่านระดับน้ำที่ลดลงเทียบกับระดับน้ำเริ่มต้นก็จะทำให้สามารถวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นได้

สารอาหารที่ใช้คือ กรดอะซิติก โดยทำการผสมกันน้ำให้มีค่าซีไอดีประมาณ 2,500 มิลลิลิตรต่อลิตร นำตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสบีมาประมาณ 25 มิลลิลิตร ผสมกับสารอาหารให้ได้ปริมาณรวมเท่ากับ 150 มิลลิลิตร หลังจากผสมสารอาหารกับตะกอนจุลินทรีย์แล้วให้ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) ให้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.2-7.5 นำขวดรูปชมพู่ที่ใส่มะกอกตะกอนจุลินทรีย์ไปวางบนชุดควบคุมอุณหภูมิ ควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าประมาณ 35 องศาเซลเซียส บันทึกปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ ตลอดการทดลอง นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เพื่อหาค่าความชันของกราฟในช่วงที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งช่วงที่กราฟมีความชันมากที่สุดจะเป็นค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน

### สูตรที่ใช้ในการคำนวณหา Specific Methanogenic Activity (SMA)

การหาค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) จะหาในช่วงที่อัตราการเกิดก๊าซมีเทนสูงสุดในระหว่างการทดลอง โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$SMA = R / CF \times V \times VSS$$

- เมื่อ SMA = ค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) หรือความสามารถจำเพาะของแบคทีเรียสร้างมีเทน (g COD-CH<sub>4</sub>/g VSS-day)
- R = อัตราการเกิดก๊าซมีเทน (mL-CH<sub>4</sub>/day) หาได้จากค่าความชันของกราฟ ปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในเวลา
- CF = Conversion Factor (mL-CH<sub>4</sub>/gCOD) ซึ่งหาจากตาราง ค-1
- V = Effective volume ของ Reactor (L)
- VSS = ค่าของแข็งแขวนลอยระเหย (Volatile Suspended Solid) ของตะกอนจุลินทรีย์ (g VSS/L)

ตารางที่ ค-1 ค่า Conversion Factor (CF) ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่า Conversion Factor (CF) (mL-CH <sub>4</sub> /gCOD)
10	363
15	369
20	376
25	382
30	388
35	395
40	401
45	408

### ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Specific Methanogenic Activity (SMA)

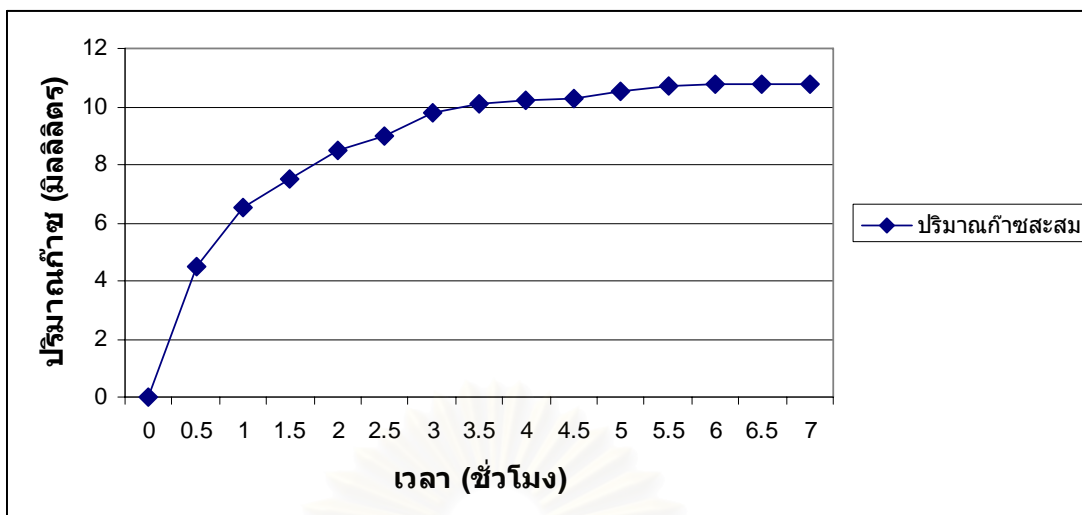
ในที่นี้จะขอคำนวณการหาค่า Specific Methanogenic Activity (SMA) ของตะกอนจุลินทรีย์ก่อนเริ่มต้นเดินระบบเป็นตัวอย่าง โดยเมื่อนำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ไปดำเนินการตาม

วิธีทดลองที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น จะได้ข้อมูลของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ ตลอดจนการทดลอง แสดงดังตารางที่ ค-2

นำข้อมูลที่ได้ในตารางที่ ง-2 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซสะสมกับ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จะได้กราฟดังรูปที่ ค-1

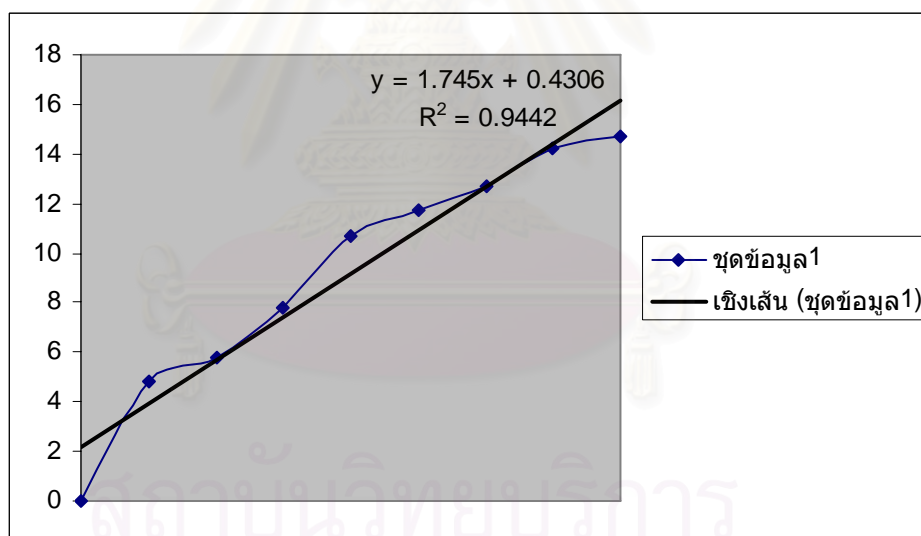
**ตารางที่ ค-2** ข้อมูลดิบของปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นช่วงเวลาต่างๆ ตลอดจนการทดลองของตะกอน จุลินทรีย์ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.0	0.0
0.5	4.8	4.8
1.0	1.0	5.8
1.5	2.0	7.8
2.0	2.9	10.7
2.5	1.0	11.7
3.0	1.0	12.7
3.5	1.5	14.2
4.0	0.5	14.7
4.5	0.1	14.8
5.0	0.3	15.1
5.5	0.1	15.2
6.0	0.1	15.3
6.5	0.1	15.4
7.0	0.1	15.5



รูปที่ ค-1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

นำกราฟที่มีความชันมากที่สุดไปหาค่าความชันจะได้ดังรูปที่ ค-2 ซึ่งค่าความชันที่ได้คือ ค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน



รูปที่ ค-2 ค่าอัตราการเกิดก๊าซมีเทน

จากสูตร	$SMA = R / CF \times V \times VSS$
แทนค่า	$SMA = (1.75 \times 24) / (395 \times 0.225 \times 1.819)$
ดังนั้น	$SMA = 0.259 \text{ gCOD-CH}_4 / \text{gVSS-day}$



ตารางที่ ค-3 ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 5.7 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ( $h = 0.1$  ม.)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.0	0.0
0.5	4.8	4.8
1.0	1.0	5.8
1.5	2.0	7.8
2.0	2.9	10.7
2.5	1.0	11.7
3.0	1.0	12.7
3.5	1.5	14.2
4.0	0.5	14.7
4.5	0.1	14.8
5.0	0.3	15.1
5.5	0.1	15.2
6.0	0.1	15.3
6.5	0.1	15.4
7.0	0.1	15.5

ตารางที่ ค-4 ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนภาวะบรรทุกสารอินทรีย์ 5.7 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ( $h = 0.7$  ม.)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.0	0.0
0.5	4.5	4.5
1.0	2.0	6.5
1.5	1.0	7.5
2.0	1.0	8.5
2.5	0.5	9.0
3.0	0.8	9.8
3.5	0.3	10.1
4.0	0.1	10.2
4.5	0.1	10.3
5.0	0.2	10.5
5.5	0.2	10.7
6.0	0.1	10.8
6.5	0.0	10.8
7.0	0.0	10.8

ตารางที่ ค-5 ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ 5.7 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน (h = 1.4 ม.)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.0	0.0
0.5	4.0	4.0
1.0	1.5	5.5
1.5	1.0	6.5
2.0	0.9	7.4
2.5	0.6	8.0
3.0	0.3	8.3
3.5	0.1	8.4
4.0	0.0	8.4
4.5	0.1	8.5
5.0	0.1	8.6
5.5	0.1	8.7
6.0	0.0	8.7
6.5	0.1	8.8
7.0	0.0	0.0

ตารางที่ ค-6 ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ 8.1 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน (h = 0.1 ม.)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.0	0.0
0.5	4.5	4.5
1.0	2.0	6.5
1.5	2.0	8.5
2.0	1.5	10.0
2.5	1.0	11.0
3.0	1.2	12.2
3.5	1.0	13.2
4.0	0.8	14.0
4.5	0.5	14.5
5.0	0.5	15.0
5.5	0.3	15.3
6.0	0.3	15.6
6.5	0.2	15.8
7.0	0.1	15.9

ตารางที่ ค-7 ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ 8.1 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ( $h = 0.7$  ม.)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.0	0.0
0.5	4.2	4.2
1.0	2.1	6.0
1.5	1.2	7.2
2.0	1.0	8.2
2.5	0.9	9.1
3.0	0.7	9.8
3.5	0.5	10.3
4.0	0.3	10.6
4.5	0.3	10.9
5.0	0.2	11.1
5.5	0.1	11.2
6.0	0.0	11.2
6.5	0.1	11.3
7.0	0.1	11.4

ตารางที่ ค-8 ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ 8.1 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ( $h = 1.4$  ม.)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.0	0.0
0.5	4.0	4.0
1.0	2.0	6.0
1.5	1.6	7.6
2.0	1.0	8.6
2.5	0.5	9.1
3.0	0.2	9.3
3.5	0.1	9.4
4.0	0.0	9.4
4.5	0.1	9.5
5.0	0.1	9.6
5.5	0.0	9.6
6.0	0.0	9.6
6.5	0.1	9.7
7.0	0.1	9.8

ตารางที่ ค-9 ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ 10.8 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ( $h = 0.1$  ม.)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.0	0.0
0.5	5.0	5.0
1.0	3.0	8.0
1.5	2.0	10.0
2.0	1.5	11.5
2.5	1.2	12.7
3.0	1.0	13.7
3.5	0.9	14.6
4.0	0.9	15.5
4.5	0.6	16.1
5.0	0.4	16.5
5.5	0.3	16.8
6.0	0.2	17.0
6.5	0.2	17.2
7.0	0.1	17.3

ตารางที่ ค-10 ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนภาวะบรรทุกลสารอินทรีย์ 10.8 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ( $h = 0.7$  ม.)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.0	0.0
0.5	4.8	4.8
1.0	2.8	7.6
1.5	2.0	9.6
2.0	1.2	10.8
2.5	0.8	11.6
3.0	0.6	12.2
3.5	0.3	12.5
4.0	0.5	13.0
4.5	0.2	13.2
5.0	0.1	13.3
5.5	0.1	13.4
6.0	0.2	13.6
6.5	0.1	13.7
7.0	0.1	13.8

ตารางที่ ค-11 ข้อมูลปริมาณก๊าซมีเทนจากระบบรอกสารอินทรีย์ 10.8 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน (h = 1.4 ม.)

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (มิลลิลิตร)
0.0	0.0	0.0
0.5	4.5	4.5
1.0	2.2	6.7
1.5	1.6	8.3
2.0	1.0	9.3
2.5	0.8	10.1
3.0	0.6	10.7
3.5	0.4	11.1
4.0	0.2	11.3
4.5	0.1	11.4
5.0	0.1	11.5
5.5	0.0	11.5
6.0	0.1	11.6
6.5	0.1	11.7
7.0	0.0	11.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ง**  
**สมมูลมวลของซีไอดี ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน**

**สมมูลมวลซีไอดี**

$$\% \text{ COD recovery} = [(\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3^-\text{-COD} + \text{CH}_4\text{-COD}_{\text{sl}} + \text{CH}_4\text{-COD}_{\text{g}}) / \text{COD}_{\text{inf}}] \times 100$$

$\text{COD}_{\text{inf}}$  = ค่าซีไอดีทั้งหมดก่อนเข้าระบบ

$\text{COD}_{\text{eff}}$  = ค่าซีไอดีทั้งหมดหลังผ่านระบบ

$\text{CH}_4\text{-COD}_{\text{sl}}$  = ซีไอดีในรูปกรดอินทรีย์และสารอินทรีย์เริ่มต้นที่ไม่ถูกย่อยสลาย

$\text{CH}_4\text{-COD}_{\text{g}}$  = ซีไอดีในรูปก๊าซ

$\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD}$  = ค่าซีไอดีที่ถูกใช้รีดิวซ์ซัลเฟต

$\Delta\text{NO}_3^-\text{-COD}$  = ค่าซีไอดีที่ถูกใช้รีดิวซ์ไนเตรท

**ตัวอย่างการคำนวณสมมูลซีไอดี**

ซีไอดีเข้า 974.81 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซีไอดีออก 116.89 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซัลเฟตเข้า 93.93 มิลลิกรัมต่อลิตร

ซัลเฟตออก 28.37 มิลลิกรัมต่อลิตร

ไนเตรทเข้า 62.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ไนเตรทออก 26.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณก๊าซทั้งหมดต่อวัน 8600 มิลลิลิตร

% มีเทน 80.39

$$\% \text{ COD recovery} = [(\text{CH}_4\text{-COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} + \Delta\text{NO}_3^-\text{-COD} + \text{CH}_4\text{-COD}_{\text{sl}} + \text{CH}_4\text{-COD}_{\text{g}}) / \text{COD}_{\text{inf}}] \times 100$$

$$\text{CH}_4\text{-COD}_{\text{g}} = (\text{total gas volum} \times \% \text{CH}_4 / 24.86) \times 16 \times 4 / Q$$

$$= (8600 \times 0.8039 / 24.86) \times 16 \times 4 / 24$$

$$= 776.09 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซีไอดี}$$

$$\text{CH}_4\text{-COD}_{\text{sl}} = K_{\text{hCH}_4} \times \text{patial pressure of CH}_4 \times 16000 \times 4$$

$$= 12.4 \times 10^{-4} \times 0.7532 \times 16000 \times 4$$

$$= 59.77 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซีไอดี}$$



$$\begin{aligned}\Delta\text{SO}_4^{2-}\text{-COD} &= (\text{SO}_4^{2-}\text{เข้า} - \text{SO}_4^{2-}\text{ออก}) \times 2/3 \\ & \text{(ซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซัลไฟด์ 2/3 มิลลิกรัม)} \\ &= (93.93 - 28.37) \times 2/3 \\ &= 43.71 \quad \text{มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลไฟด์}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\text{NO}_3^- \text{-COD} &= (\text{NO}_3^- \text{เข้า} - \text{NO}_3^- \text{ออก}) \times 2/3.1 \\ & \text{(ไนเตรตที่ถูกรีดิวซ์ 1 มิลลิกรัม ต้องใช้ซัลไฟด์ 2/3.1 มิลลิกรัม)} \\ &= (62.50 - 26.04) \times 2/3.1 \\ &= 23.52 \quad \text{มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลไฟด์}\end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}\% \text{ COD recovery} &= [(116.89 + 776.09 + 59.77 + 43.71 + 23.52) / 974.81] \times 100 \\ &= 89.10\end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลของอิเล็กตรอน

$$\% \text{ electron flow MPB} = [(\text{CH}_4 - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta\text{NO}_3^- - \text{COD})] \times 100$$

$$\% \text{ electron flow SRB} = [(\Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta\text{NO}_3^- - \text{COD})] \times 100$$

$$\% \text{ electron flow DNB} = [(\Delta\text{NO}_3^- - \text{COD}) / (\text{CH}_4 - \text{COD} + \Delta\text{SO}_4^{2-} - \text{COD} + \Delta\text{NO}_3^- - \text{COD})] \times 100$$

$$\begin{aligned}\% \text{ electron flow MPB} &= [(776.09 + 59.77) / (776.09 + 59.77) + 43.71 + 23.52] \times 100 \\ &= 72\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{ electron flow SRB} &= [43.71 / (776.09 + 59.77) + 43.71 + 23.52] \times 100 \\ &= 17\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{ electron flow DNB} &= [23.52 / (776.09 + 59.77) + 43.71 + 23.52] \times 100 \\ &= 11\end{aligned}$$

สมมูลมวลซัลเฟอร์

$$\% \text{ sulfur recovery} = [(\text{SO}_4^{2-} \text{ eff} + \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}} + \text{H}_2\text{S}_{\text{gas}}) / \text{SO}_4^{2-} \text{ in}] \times 100$$

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ in} = \text{ซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตน้ำเข้า}$$

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ eff} = \text{ซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตน้ำออก}$$

$S^{2-}$	=	ซัลเฟอร์ในรูปซัลไฟด์ไอออน
$HS^-$	=	ซัลเฟอร์ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำที่แตกตัว
$H_2S_{aq}$	=	ซัลเฟอร์ในรูปซัลไฟด์ละลายน้ำที่ไม่แตกตัว
$H_2S_{gas}$	=	ซัลเฟอร์ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานะก๊าซ
ซัลเฟตน้ำเข้า	93.93	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลเฟตน้ำออก	28.37	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลไฟด์น้ำออกทั้งหมด	9.53	มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลไฟด์
ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ	9.48	มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลไฟด์

$$\% \text{ sulfur recovery} = [(\text{SO}_4^{2-}{}_{\text{eff}} + \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}} + \text{H}_2\text{S}_{\text{gas}})] / \text{SO}_4^{2-}{}_{\text{in}}] \times 100$$

โดย  $\text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}_{\text{aq}}$  คือ ปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด

$$\begin{aligned} \text{ซัลไฟด์ทั้งหมด} &= 9.53 \times 3 \text{ (ซัลไฟด์ 1 กรัม มาจาก ซัลเฟต 3 กรัม)} \\ &= 28.05 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลเฟต} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ซัลไฟด์ในรูปก๊าซ} &= \text{ก๊าซซัลไฟด์} \times \text{ปริมาตรชุดดักก๊าซ} \times 3/Q \\ &= 9.48 \times 0.5 \times 3/24 \\ &= 0.59 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปซัลเฟต} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \% \text{ sulfur recovery} &= [(28.37 + 28.05 + 0.59)/93.93] \times 100 \\ &= 60.69\% \end{aligned}$$

สมดุลมวลไนโตรเจน

$$\% \text{ nitrogen recovery} = [(\text{NO}_3^-{}_{\text{eff}} + \text{N}_2_{\text{gas}} + \text{soluble N}_2_{\text{gas}}) / \text{NO}_3^-{}_{\text{in}}] \times 100$$

$\text{NO}_3^-{}_{\text{in}}$	=	ไนโตรเจนในรูปไนเตรทที่อยู่ในน้ำเข้า
$\text{NO}_3^-{}_{\text{eff}}$	=	ไนโตรเจนในรูปไนเตรทที่อยู่น้ำออก
$\text{NO}_2^-$	=	ไนโตรเจนในรูปไนไตรท์
$\text{N}_2\text{O}$	=	ไนโตรเจนในรูปไนตรัสออกไซด์
$\text{N}_2_{\text{gas}}$	=	ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจน
$\text{soluble N}_2_{\text{gas}}$	=	ไนโตรเจนในรูปก๊าซไนโตรเจนที่ละลายน้ำ

$$\text{ไนเตรทเข้า} \quad 62.50 \quad \text{มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

$$\text{ไนเตรทออก} \quad 26.04 \quad \text{มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ก๊าซทั้งหมดต่อวัน                    8600    มิลลิลิตร  
 สัดส่วนของก๊าซไนโตรเจน            10.87    เปอร์เซ็นต์

$$\% \text{ nitrogen recovery} = [(\text{NO}_3^- \text{ eff} + \text{N}_{2 \text{ gas}} + \text{soluble N}_{2 \text{ gas}}) / \text{NO}_3^- \text{ in}] \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{N}_{2 \text{ gas}} &= (\text{total gas volum} \times \% \text{ N}_2 / 24.86) \times 28 \times 124 / 28 / Q \\ &= (8600 \times .1087 / 24.86) \times 28 \times 124 / 28 / 24 \\ &= 27.38 \text{ มิลลิกกรัมต่อลิตรในรูปแบบไนเตรท} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{soluble N}_{2 \text{ gas}} &= K_{\text{hN}_4} \times \text{patial pressure of N}_2 \times 28000 \times 124 / 28 \\ &= 6.03 \times 10^{-4} \times 0.1201 \times 28000 \times 124 / 28 \\ &= 8.98 \text{ มิลลิกกรัมต่อลิตรในรูปแบบไนเตรท} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \% \text{ nitrogen recovery} &= [(26.04 + 27.38 + 8.98) / 62.50] \times 100 \\ &= 99.84 \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ  
การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ



ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University  
Phya Thai Rd., Patumwan, Bangkok 10330, THAILAND  
Tel: (662) 2185324, 2185328-30 Fax: (662) 2555831 E-mail: chemtech@sc.chula.ac.th

26 มกราคม 2550

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

เรื่อง รายงานผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในตัวอย่ง GAS


ชนิดตัวอย่าง : GAS  
หน่วยงาน : ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ผู้ส่งตัวอย่าง : นางสาวปริญญ รัตนา

วิธีการเตรียมตัวอย่าง และทดสอบ :


ทดสอบตามเครื่องมือและสภาวะดังนี้


Instrument : GAS CHROMATOGRAPH MODEL GC-2014 ยี่ห้อ Shimadzu  
Carrier gas : Helium flow rate: 25 ml/min  
Injector Temperature : 90 °C  
Column : Molecular sieve 2 m x 1/8" ID  
Temperature program set at 60 °C for 5.00 min, 10 °C/ min From 60 to 150 °C  
Detector : TCD at 250 °C  
Injection Volume : 1 ml

ลำดับ	Sample	% Nitrogen	% Methane
1	1	10.87	80.39
2	2	4.65	79.24
3	3	4.55	68.62

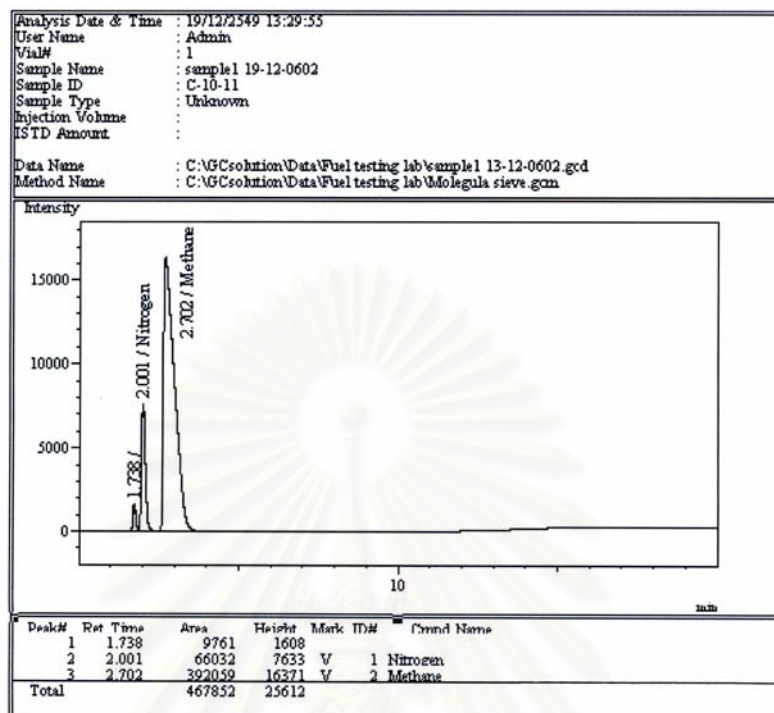
  
(นางสาวคาวใจ นากาน)  
ผู้วิเคราะห์

ขอรับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

  
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประสานสารกิจ)  
หัวหน้าภาควิชาเคมีเทคนิค  
26 มกราคม 2550

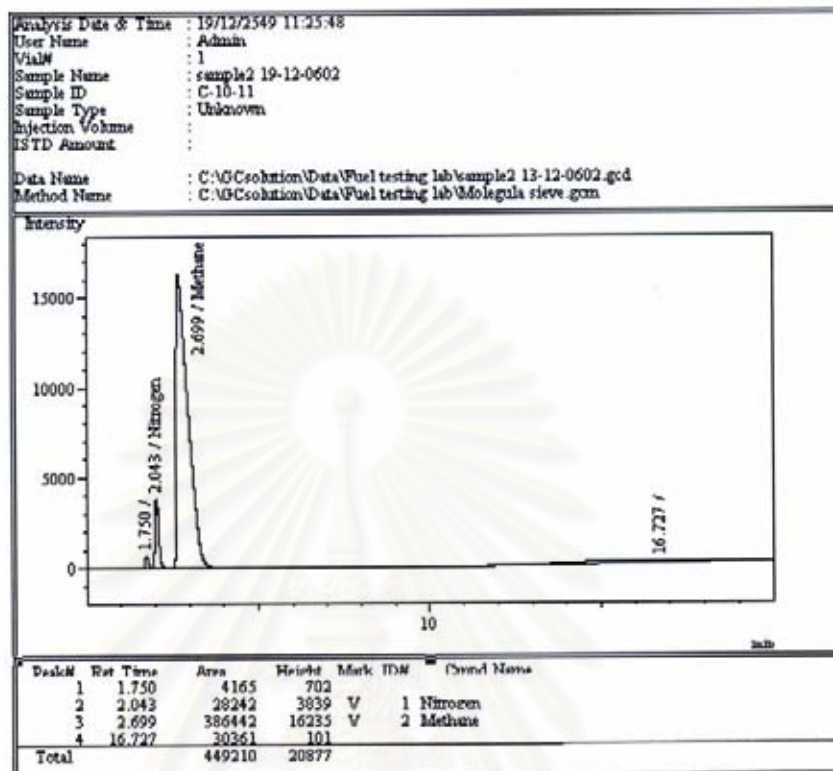
  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)  
หัวหน้าห้องปฏิบัติการ EXTRACTION  
26 มกราคม 2550

รูปที่ จ-1 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ของระบบกรองไร้อากาศ  
ซีโอไซด์ต่อซัลเฟต 10:1, 15:1 และ 20:1 ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ จ-2 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ของระบบกรองไร้อากาศ  
 ซีโอดีต่อซีลเฟต 10:1

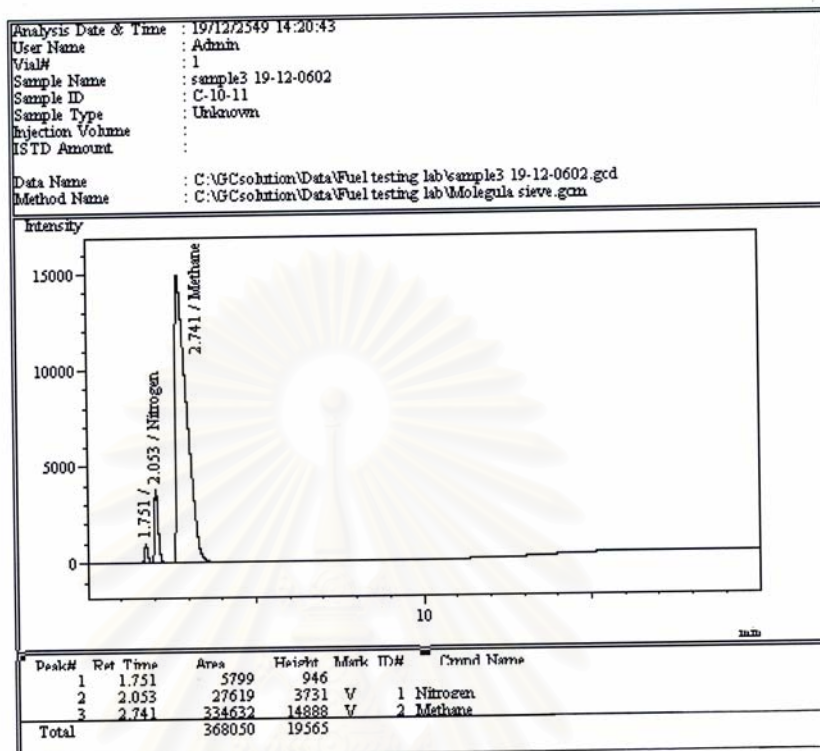


สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ จ-3 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ของระบบกรองไร้อากาศ

ซีไอดีต่อซัลเฟต 15:1



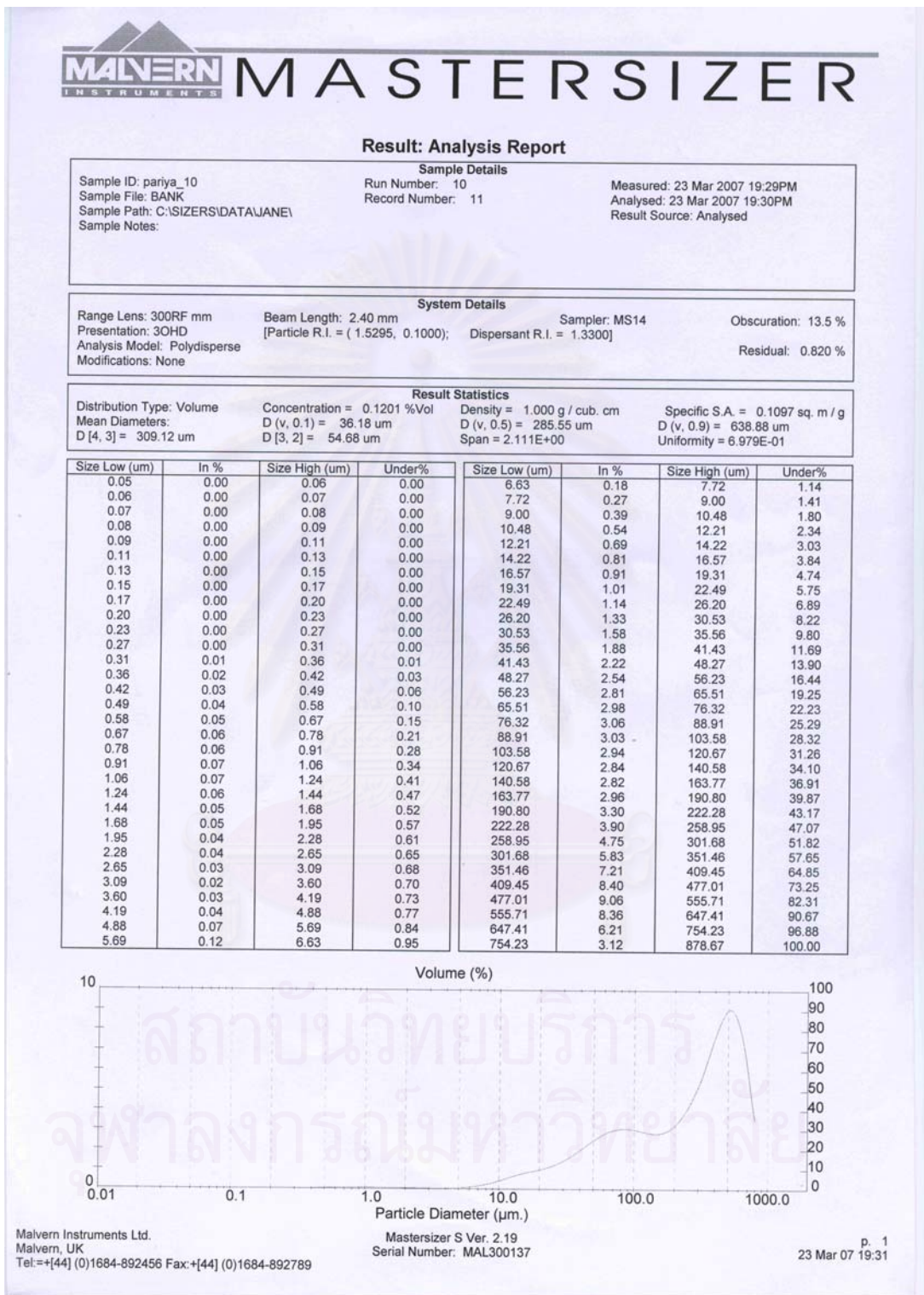


สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

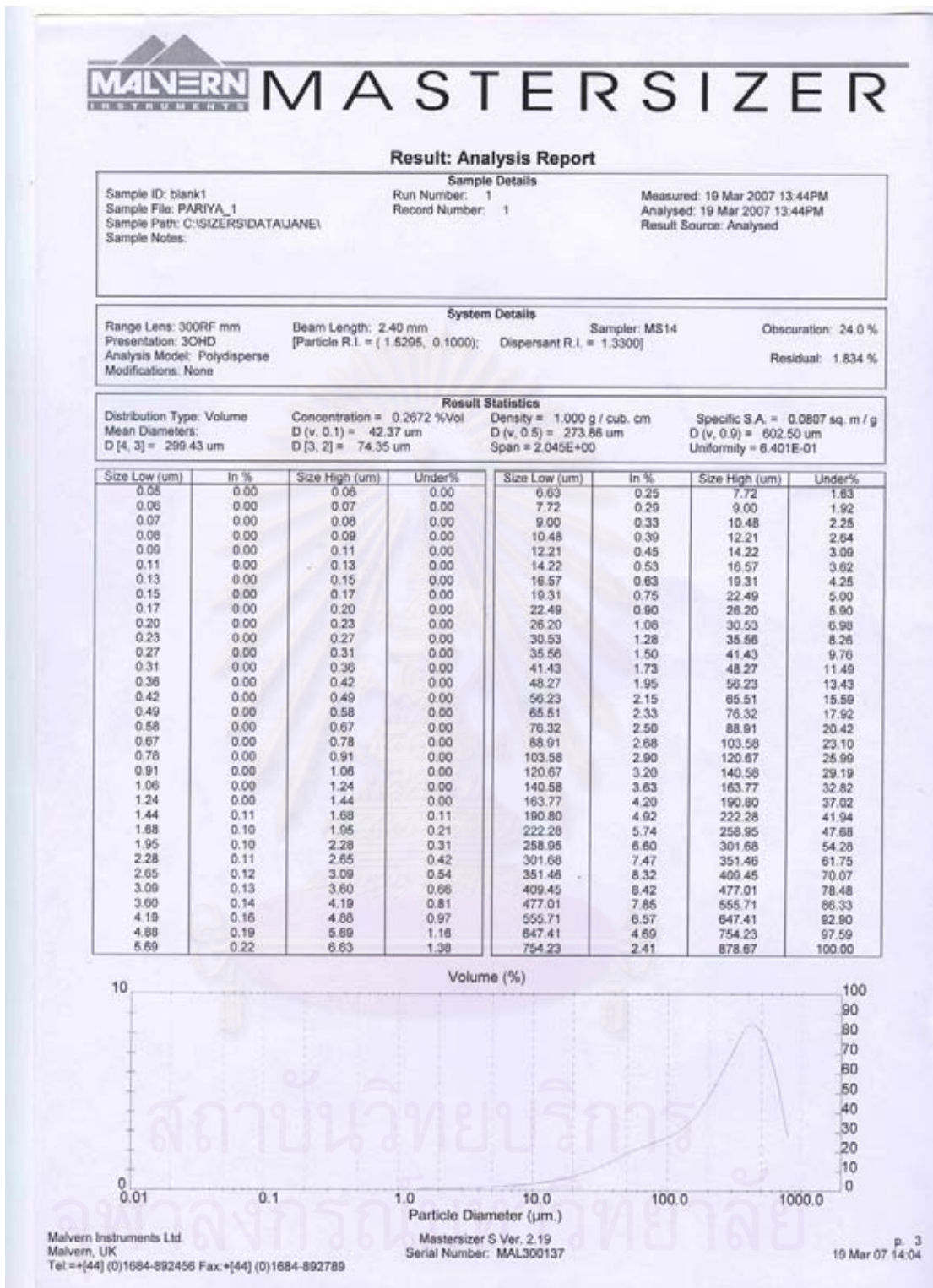
รูปที่ จ-3 การวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ของระบบกรองไร้อากาศ

ซีไอดีต่อซัลเฟต 20:1

ภาคผนวก จ  
การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

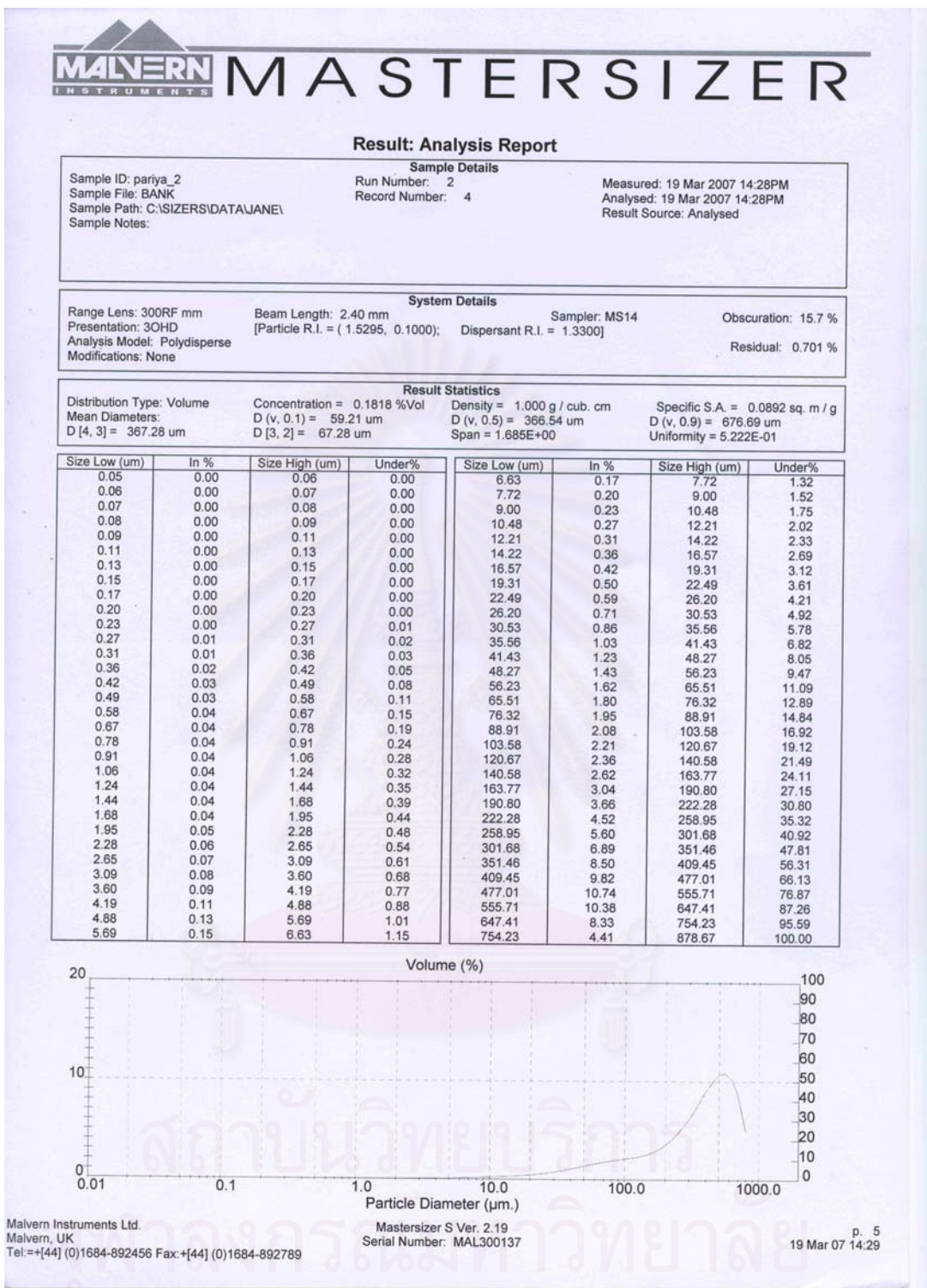


รูปที่ จ-1 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนก่อนเริ่มต้นระบบ



รูปที่ ๑-2 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนที่ระดับ 0.1 เมตร ของซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1





รูปที่ ๓-3 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนที่ระดับ 0.7 เมตร ของซีโอติต่อซัลเฟต 10:1

# MALVERN INSTRUMENTS MASTERSIZER

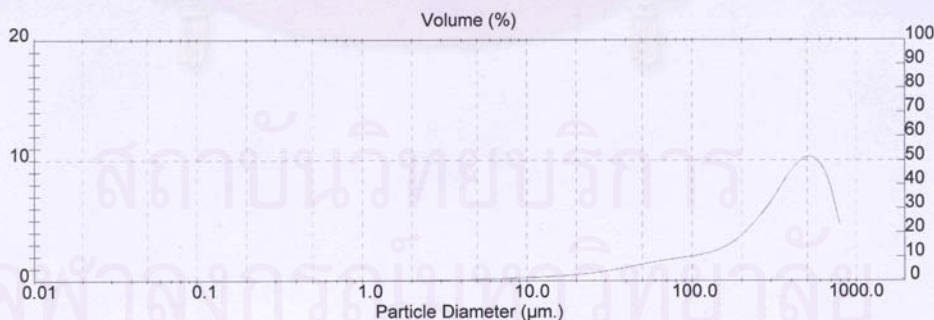
## Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: pariya_3	Run Number: 3	Measured: 19 Mar 2007 14:50PM
Sample File: BANK	Record Number: 5	Analysed: 19 Mar 2007 14:50PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\JANE\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 15.8 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.838 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1666 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0976 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 55.46 um	D (v, 0.5) = 353.83 um	D (v, 0.9) = 668.85 um
D [4, 3] = 358.78 um	D [3, 2] = 61.47 um	Span = 1.734E+00	Uniformity = 5.346E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.20	7.72	1.56
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.24	9.00	1.79
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.27	10.48	2.06
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.31	12.21	2.37
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.35	14.22	2.73
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.40	16.57	3.13
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.47	19.31	3.60
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.54	22.49	4.14
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.64	26.20	4.78
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.76	30.53	5.53
0.23	0.01	0.27	0.01	30.53	0.90	35.56	6.43
0.27	0.01	0.31	0.02	35.56	1.06	41.43	7.49
0.31	0.02	0.36	0.03	41.43	1.23	48.27	8.72
0.36	0.02	0.42	0.06	48.27	1.41	56.23	10.13
0.42	0.03	0.49	0.09	56.23	1.58	65.51	11.71
0.49	0.04	0.58	0.12	65.51	1.73	76.32	13.44
0.58	0.04	0.67	0.17	76.32	1.86	88.91	15.31
0.67	0.05	0.78	0.21	88.91	1.99	103.58	17.30
0.78	0.05	0.91	0.26	103.58	2.14	120.67	19.44
0.91	0.05	1.06	0.31	120.67	2.35	140.58	21.79
1.06	0.05	1.24	0.35	140.58	2.69	163.77	24.48
1.24	0.05	1.44	0.40	163.77	3.20	190.80	27.68
1.44	0.05	1.68	0.44	190.80	3.91	222.28	31.59
1.68	0.05	1.95	0.50	222.28	4.85	258.95	36.43
1.95	0.06	2.28	0.55	258.95	5.97	301.68	42.40
2.28	0.07	2.65	0.62	301.68	7.24	351.46	49.64
2.65	0.08	3.09	0.70	351.46	8.72	409.45	58.36
3.09	0.09	3.60	0.79	409.45	9.77	477.01	68.14
3.60	0.11	4.19	0.90	477.01	10.30	555.71	78.43
4.19	0.13	4.88	1.03	555.71	9.69	647.41	88.12
4.88	0.15	5.69	1.18	647.41	7.70	754.23	95.82
5.69	0.18	6.63	1.35	754.23	4.18	878.67	100.00



Malvern Instruments Ltd.  
 Malvern, UK  
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.19  
 Serial Number: MAL300137

p. 6  
 19 Mar 07 14:51

รูปที่ ๓-4 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนที่ระดับ 1.4 เมตร ของซีโอดีต่อซัลเฟต 10:1



# MALVERN INSTRUMENTS MASTERSIZER

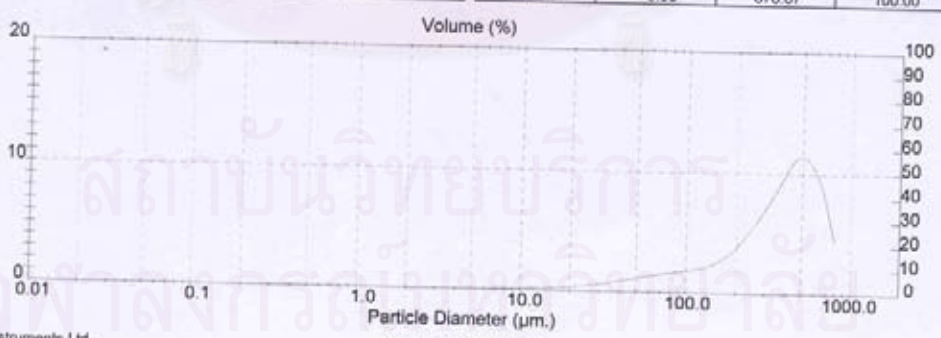
## Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: pariya_4	Run Number: 4	Measured: 19 Mar 2007 15:10PM
Sample File: BANK	Record Number: 6	Analysed: 19 Mar 2007 15:10PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\JANE\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 12.5 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 2.284 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

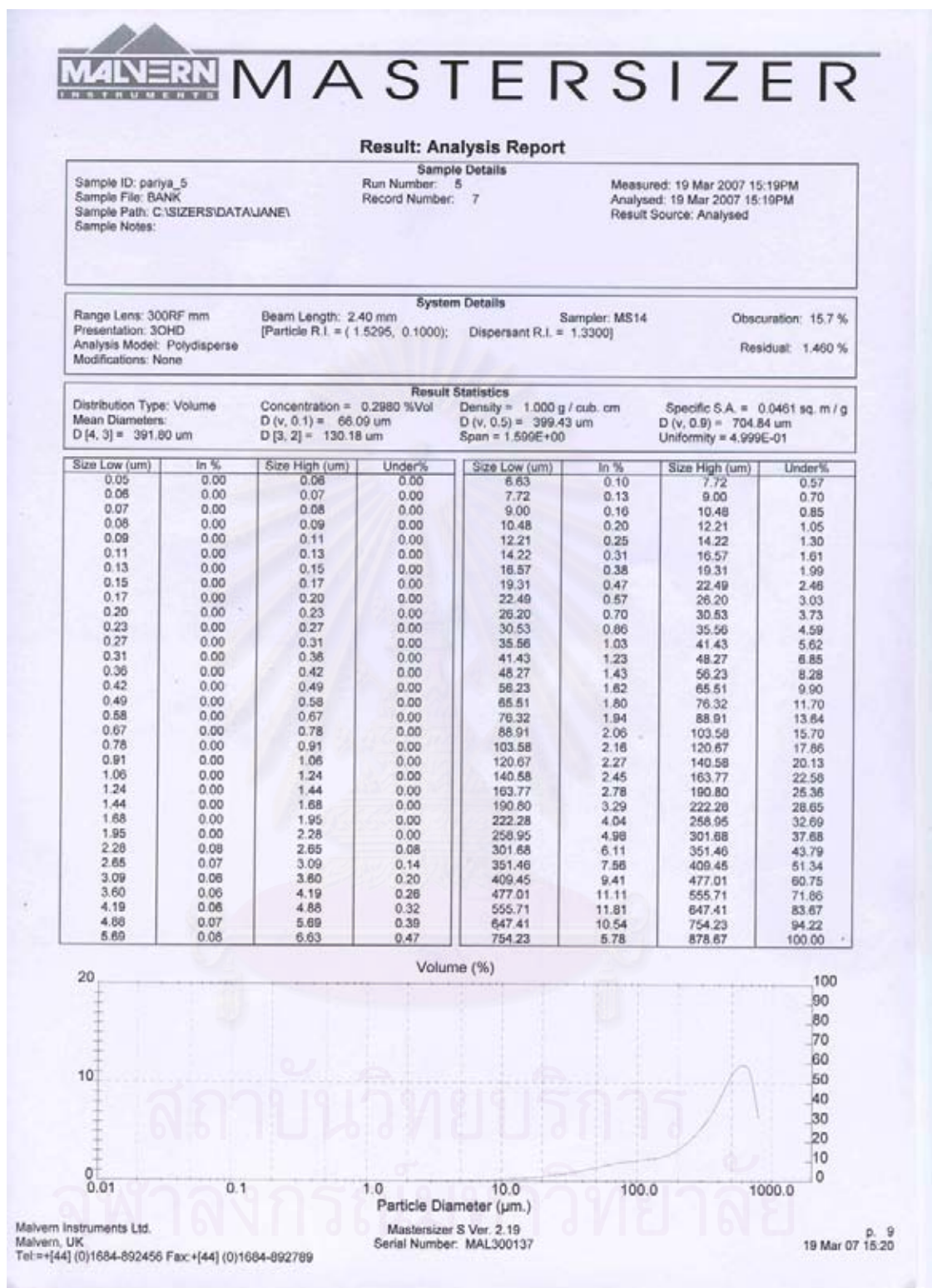
Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.2821 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0386 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 80.12 um	D (v, 0.5) = 374.89 um	D (v, 0.9) = 665.95 um
D [4, 3] = 376.52 um	D [3, 2] = 155.63 um	Span = 1.564E+00	Uniformity = 4.712E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.07	7.72	0.29
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.09	9.00	0.38
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.11	10.48	0.49
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.14	12.21	0.64
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.18	14.22	0.82
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.23	16.57	1.05
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.29	19.31	1.34
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.36	22.49	1.70
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.45	26.20	2.15
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.57	30.53	2.71
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.70	35.58	3.42
0.27	0.00	0.31	0.00	35.58	0.86	41.43	4.28
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	1.04	48.27	5.32
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	1.22	56.23	6.54
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	1.39	65.51	7.93
0.49	0.00	0.56	0.00	65.51	1.55	76.32	9.48
0.56	0.00	0.67	0.00	76.32	1.68	88.91	11.18
0.67	0.00	0.78	0.00	88.91	1.80	103.58	12.96
0.78	0.00	0.91	0.00	103.58	1.95	120.67	14.91
0.91	0.00	1.06	0.00	120.67	2.18	140.58	17.09
1.06	0.00	1.24	0.00	140.58	2.56	163.77	19.65
1.24	0.00	1.44	0.00	163.77	3.15	190.80	22.80
1.44	0.00	1.66	0.00	190.80	4.00	222.28	26.81
1.66	0.00	1.95	0.00	222.28	5.11	258.95	31.91
1.95	0.02	2.29	0.02	258.95	6.42	301.68	38.34
2.29	0.02	2.65	0.04	301.68	7.89	351.46	46.22
2.65	0.02	3.09	0.07	351.46	9.49	409.45	55.72
3.09	0.02	3.60	0.09	409.45	11.05	477.01	66.76
3.60	0.02	4.19	0.11	477.01	11.34	555.71	78.10
4.19	0.03	4.88	0.14	555.71	10.23	647.41	89.33
4.88	0.04	5.69	0.18	647.41	7.89	754.23	96.02
5.69	0.05	6.63	0.23	754.23	3.98	878.67	100.00



รูปที่ ๑-5 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนที่ระดับ 0.1 เมตร ของซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1





รูปที่ ๓-6 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนที่ระดับ 0.7 เมตร ของซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1

# MALVERN INSTRUMENTS MASTERSIZER

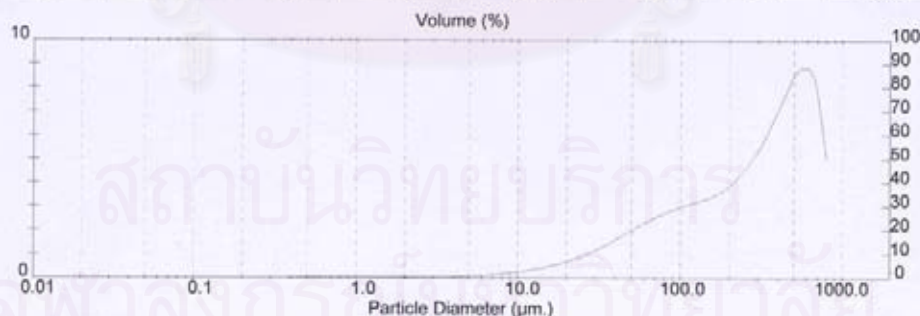
## Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: pariya_6	Run Number: 6	Measured: 19 Mar 2007 15:29PM
Sample File: BANK	Record Number: 8	Analysed: 19 Mar 2007 15:29PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\JANE\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: M514	Obscuration: 18.1 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.597 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1796 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.1029 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 45.03 um	D (v, 0.5) = 301.24 um	D (v, 0.9) = 676.05 um
D [4, 3] = 331.29 um	D [3, 2] = 58.30 um	Span = 2.095E+00	Uniformity = 6.760E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.16	7.72	1.29
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.20	9.00	1.49
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.25	10.48	1.74
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.31	12.21	2.06
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.39	14.22	2.45
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.49	16.57	2.93
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.60	19.31	3.53
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.73	22.49	4.26
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.89	26.20	5.15
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	1.07	30.53	6.22
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	1.29	35.56	7.51
0.27	0.01	0.31	0.01	35.56	1.54	41.43	9.05
0.31	0.01	0.36	0.02	41.43	1.80	48.27	10.85
0.36	0.02	0.42	0.04	48.27	2.08	56.23	12.91
0.42	0.03	0.49	0.07	56.23	2.32	65.51	15.23
0.49	0.04	0.58	0.11	65.51	2.55	76.32	17.77
0.58	0.05	0.67	0.16	76.32	2.75	88.91	20.52
0.67	0.06	0.78	0.22	88.91	2.93	103.56	23.45
0.78	0.06	0.91	0.29	103.56	3.08	120.67	26.53
0.91	0.06	1.05	0.35	120.67	3.21	140.58	29.73
1.06	0.06	1.24	0.41	140.58	3.36	163.77	33.09
1.24	0.06	1.44	0.46	163.77	3.59	190.80	36.68
1.44	0.08	1.68	0.51	190.80	3.93	222.28	40.61
1.68	0.05	1.95	0.56	222.28	4.42	258.05	45.03
1.95	0.05	2.26	0.61	258.05	5.02	301.68	50.05
2.26	0.05	2.65	0.66	301.68	5.74	351.46	55.79
2.65	0.05	3.09	0.71	351.46	6.70	409.45	62.50
3.09	0.06	3.60	0.76	409.45	7.67	477.01	70.17
3.60	0.07	4.19	0.83	477.01	8.59	555.71	78.76
4.19	0.08	4.88	0.91	555.71	8.81	647.41	87.57
4.88	0.10	5.69	1.01	647.41	7.80	754.23	95.37
5.69	0.12	6.63	1.13	754.23	4.63	876.67	100.00



Malvern Instruments Ltd  
 Malvern, UK  
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892769

Mastersizer S Ver. 2.19  
 Serial Number: MAL300137

p. 10  
 19 Mar 07 15:30

รูปที่ ๗-7 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนที่ระดับ 1.4 เมตร ของซีโอดีต่อซัลเฟต 15:1



# MALVERN INSTRUMENTS MASTERSIZER

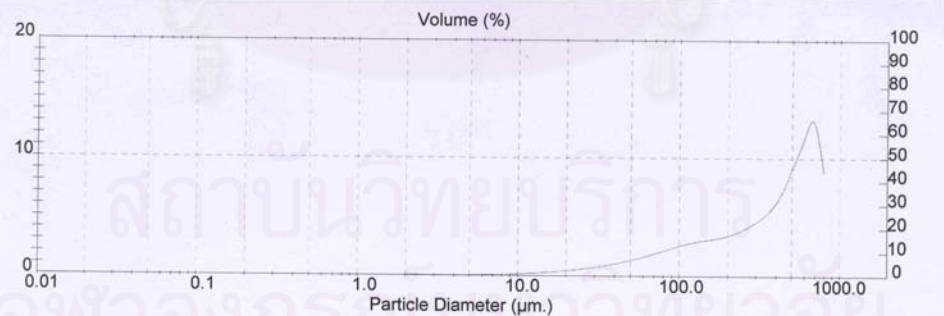
## Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: pariya_7	Run Number: 7	Measured: 19 Mar 2007 15:37PM
Sample File: BANK	Record Number: 9	Analysed: 19 Mar 2007 15:38PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\JANE\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 13.0 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 1.305 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.2391 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0470 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 66.67 um	D (v, 0.5) = 402.42 um	D (v, 0.9) = 733.77 um
D [4, 3] = 398.74 um	D [3, 2] = 127.70 um	Span = 1.658E+00	Uniformity = 5.439E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.09	7.72	0.53
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.12	9.00	0.65
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.15	10.48	0.81
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.20	12.21	1.01
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.25	14.22	1.26
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.32	16.57	1.58
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.39	19.31	1.97
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.48	22.49	2.46
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.58	26.20	3.04
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.70	30.53	3.74
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.83	35.56	4.57
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	1.00	41.43	5.57
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	1.19	48.27	6.75
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	1.40	56.23	8.15
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	1.64	65.51	9.79
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	1.91	76.32	11.71
0.58	0.00	0.67	0.00	76.32	2.20	88.91	13.91
0.67	0.00	0.78	0.00	88.91	2.48	103.58	16.39
0.78	0.00	0.91	0.00	103.58	2.74	120.67	19.13
0.91	0.00	1.06	0.00	120.67	2.94	140.58	22.07
1.06	0.00	1.24	0.00	140.58	3.08	163.77	25.16
1.24	0.00	1.44	0.00	163.77	3.24	190.80	28.40
1.44	0.00	1.68	0.00	190.80	3.47	222.28	31.86
1.68	0.00	1.95	0.00	222.28	3.83	258.95	35.70
1.95	0.07	2.28	0.07	258.95	4.30	301.68	40.00
2.28	0.05	2.65	0.12	301.68	4.90	351.46	44.90
2.65	0.05	3.09	0.17	351.46	5.81	409.45	50.71
3.09	0.05	3.60	0.22	409.45	7.25	477.01	57.97
3.60	0.05	4.19	0.26	477.01	9.43	555.71	67.40
4.19	0.05	4.88	0.31	555.71	11.77	647.41	79.17
4.88	0.06	5.69	0.37	647.41	12.88	754.23	92.05
5.69	0.07	6.63	0.44	754.23	7.95	878.67	100.00



รูปที่ ๘-๘ การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนที่ระดับ 0.1 เมตร ของซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

# MALVERN INSTRUMENTS MASTERSIZER

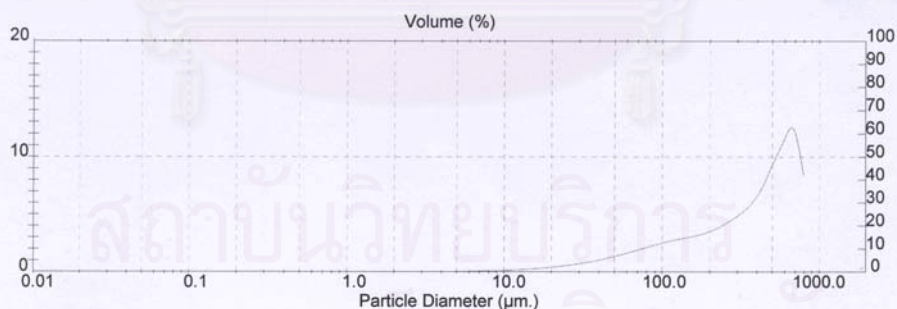
## Result: Analysis Report

Sample Details		
Sample ID: pariya_8	Run Number: 8	Measured: 19 Mar 2007 15:46PM
Sample File: BANK	Record Number: 10	Analysed: 19 Mar 2007 15:46PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\JANE\		Result Source: Analysed
Sample Notes:		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS14	Obscuration: 13.6 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 1.243 %
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.2072 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0670 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 68.13 um	D (v, 0.5) = 397.59 um	D (v, 0.9) = 730.16 um
D [4, 3] = 396.40 um	D [3, 2] = 89.58 um	Span = 1.665E+00	Uniformity = 5.402E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.07	7.72	0.61
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.10	9.00	0.71
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.13	10.48	0.84
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.17	12.21	1.01
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.22	14.22	1.23
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.28	16.57	1.52
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.36	19.31	1.88
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.44	22.49	2.32
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.54	26.20	2.86
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.66	30.53	3.53
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.81	35.56	4.33
0.27	0.01	0.31	0.01	35.56	0.98	41.43	5.31
0.31	0.01	0.36	0.02	41.43	1.18	48.27	6.48
0.36	0.02	0.42	0.04	48.27	1.40	56.23	7.89
0.42	0.02	0.49	0.06	56.23	1.65	65.51	9.53
0.49	0.03	0.58	0.08	65.51	1.91	76.32	11.44
0.58	0.03	0.67	0.11	76.32	2.17	88.91	13.62
0.67	0.03	0.78	0.14	88.91	2.43	103.58	16.05
0.78	0.03	0.91	0.17	103.58	2.66	120.67	18.71
0.91	0.03	1.06	0.20	120.67	2.85	140.58	21.56
1.06	0.03	1.24	0.23	140.58	3.02	163.77	24.58
1.24	0.02	1.44	0.25	163.77	3.24	190.80	27.83
1.44	0.02	1.68	0.27	190.80	3.55	222.28	31.38
1.68	0.02	1.95	0.29	222.28	4.00	258.95	35.37
1.95	0.02	2.28	0.31	258.95	4.54	301.68	39.92
2.28	0.02	2.65	0.33	301.68	5.20	351.46	45.12
2.65	0.02	3.09	0.35	351.46	6.16	409.45	51.28
3.09	0.02	3.60	0.37	409.45	7.63	477.01	58.90
3.60	0.03	4.19	0.40	477.01	9.67	555.71	68.57
4.19	0.03	4.88	0.43	555.71	11.57	647.41	80.13
4.88	0.04	5.69	0.48	647.41	12.18	754.23	92.31
5.69	0.06	6.63	0.53	754.23	7.69	878.67	100.00



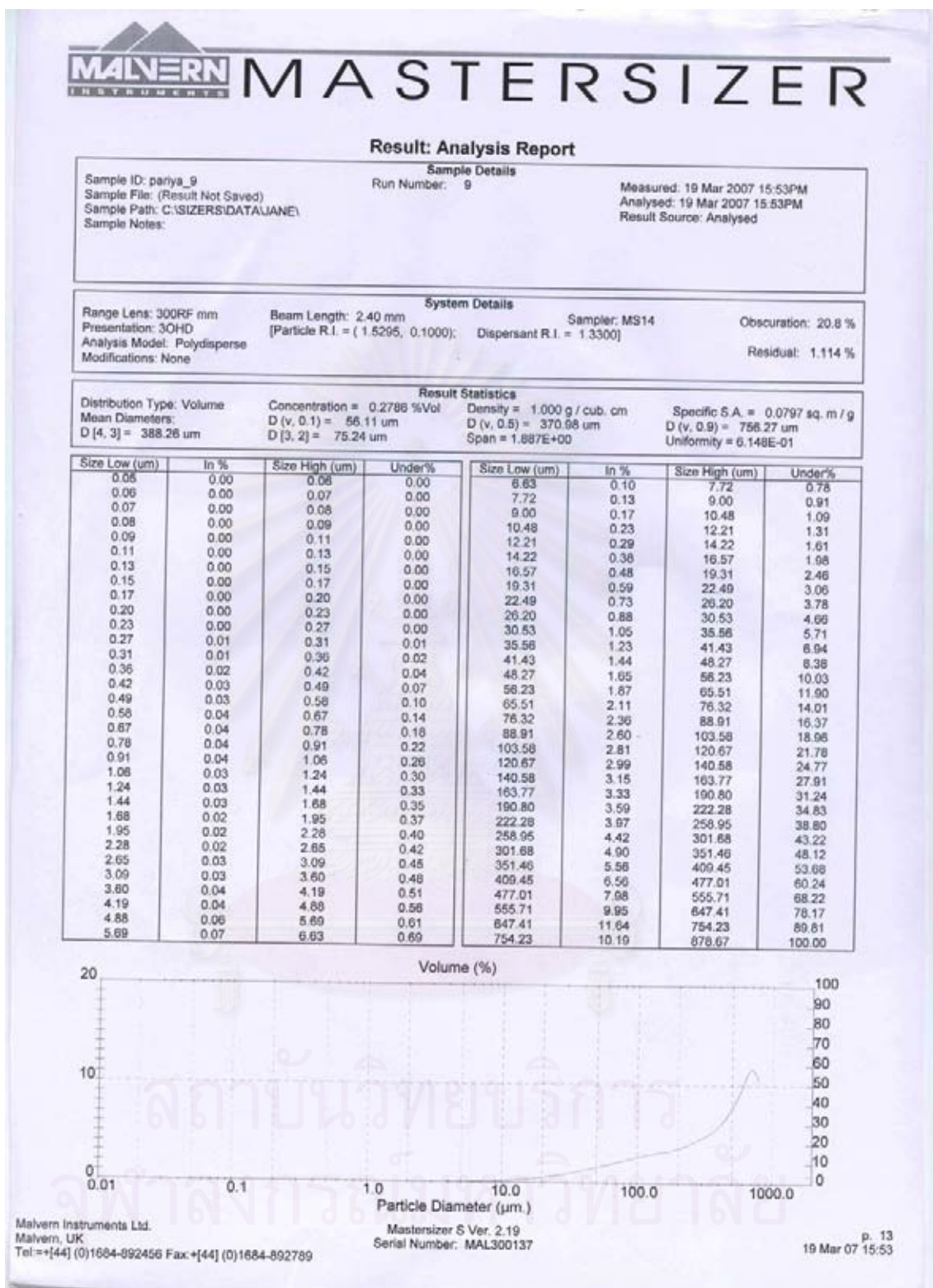
Malvern Instruments Ltd.  
 Malvern, UK  
 Tel: +[44] (0)1684-892456 Fax: +[44] (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.19  
 Serial Number: MAL300137

p. 12  
 19 Mar 07 15:46

รูปที่ ๑-๑ การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนที่ระดับ 0.7 เมตร ของซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1





รูปที่ ๑-10 การกระจายขนาดของเม็ดตะกอนที่ระดับ 1.4 เมตร ของซีโอดีต่อซัลเฟต 20:1

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปริญญา รัตนา เกิดเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2523 ที่ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนขอนแก่นวิทยายน ปีการศึกษา 2541 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2545 และ ปัจจุบันได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท ที่สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย