

ผลของความเข้มข้นซีไอดี และซัลเฟตต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน



นายอุรธา เศรษฐีธีรกิจ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

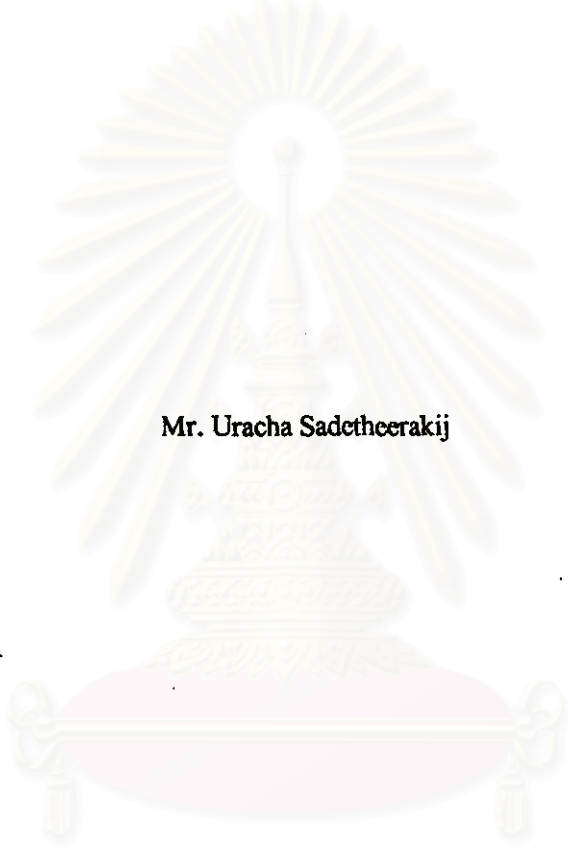
ISBN 974-334-584-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

16 ต.ค. 2545

I19195916

**EFFECTS OF COD AND SULFATE CONCENTRATIONS  
ON SULFATE REDUCTION LEVEL**



**Mr. Uracha Sadetheerakij**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

**Department of Environmental Engineering**

**Faculty of Engineering**

**Chulalongkorn University**


**Acedemic Year 1999**

**ISBN 974-334-584-1**

หัวข้อวิทยานิพนธ์      ผลของความเข้มข้นซีไอที และซัลเฟตต่อระดับการเกิดซัลเฟตริกชัน  
โดย                              อรุษา เศรษฐธีรภัก  
ภาควิชา                        วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา            รองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน ตันจุลเวศม์


---

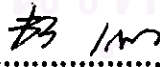
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ  
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

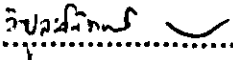
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปิยะญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ พรประภา)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.มั่นสิน ตันจุลเวศม์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอด)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ วิบูลย์ลักษณะ พึ่งรัมย์)

อุรธา เศรษฐธีรวิกิจ : ผลของความเข้มข้นซีไอดี และซัลเฟตต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน  
(Effects of COD and Sulfate Concentrations on Sulfate Reduction Level)  
อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. มั่นสิน คัมพุดเวกรม; 271 หน้า, ISBN 974-334-584-1

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นซีไอดีและซัลเฟตที่มีต่อระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน และเพื่อประเมินปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากระบบไร้อากาศ การวิจัยใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสในระดับห้องปฏิบัติการจำนวน 3 ถังที่เหมือนกัน แยกป้อนด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีน้ำคาลทรายและไฮเดียมซัลเฟตเป็นแหล่งคาร์บอนอินทรีย์และแหล่งซัลเฟต ตามลำดับ โคอไซไฮเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารบัฟเฟอร์ในทุกการทดลอง เชื้อแบคทีเรียไร้อากาศเริ่มต้นมีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-3 มม. การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด ตามค่าอัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตคือ 4 และ 2 ในแต่ละอัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตใช้ความเข้มข้นซีไอดี 5 ค่า คือ 400, 600, 800, 1000 และ 1,200 มก./ล.

ผลการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 4 พบว่า ประสิทธิภาพการเกิดซัลเฟตรีดักชันเท่ากับ 86.8, 89.3, 92.0, 91.9 และ 92.7% และอัตราส่วนซัลไฟด์น้ำออกต่อซัลเฟตน้ำเข้าเท่ากับ 0.264, 0.258, 0.268, 0.266 และ 0.259 สำหรับความเข้มข้นซีไอดี 400, 600, 800, 1000 และ 1200 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 2 พบว่าประสิทธิภาพการเกิดซัลเฟตรีดักชันเท่ากับ 91.1, 93.5, 94.3, 95.1 และ 95.1 % และอัตราส่วนซัลไฟด์น้ำออกต่อซัลเฟตน้ำเข้าเท่ากับ 0.264, 0.273, 0.275, 0.262 และ 0.270 สำหรับความเข้มข้นซีไอดี 400, 600, 800, 1000 และ 1200 มก./ล. ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีละลายมีค่าสูงมากกว่า 95 % ในทุกๆ การทดลอง โดยค่าเฉลี่ยสัดส่วนการใช้ซีไอดีระหว่างแบคทีเรียผลิตมีเทนและแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต มีค่าเท่ากับ 82.0%MPB/18.0%SRB และ 62.9%MPB/37.1%SRB ที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 4 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มบทบาทมากขึ้นของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต โดยที่ไม่เกิดผลยับยั้งจากพิษของซัลไฟด์ ไม่มีผลกระทบต่อระบบในการกำจัดสารอินทรีย์ละลาย

สรุปได้ว่า การแปรค่าความเข้มข้นซีไอดีและซัลเฟตเพิ่มขึ้นในขอบเขตที่ใช้ในงานวิจัย ทำให้ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันเพิ่มขึ้น แต่มีน้อยสำคัญน้อย เนื่องจากค่าที่ได้อยู่ในช่วงสูงระหว่าง 86.8-95.1% นอกจากนี้ สามารถสร้างสมการประเมินความเข้มข้นซัลไฟด์จากระบบไร้อากาศที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตมากกว่า 2 ได้ ดังนี้ คือ

$$\text{ความเข้มข้นซัลไฟด์น้ำออก (มก./ล.)} = 0.265 \times \text{ความเข้มข้นซัลเฟตน้ำเข้า (มก./ล.)}$$

ภาควิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม \_\_\_\_\_  
ภาควิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม \_\_\_\_\_  
ปีการศึกษา \_\_\_\_\_ 2542 \_\_\_\_\_

ลายมือชื่อนิติกร \_\_\_\_\_ อ.ดร. ปรียา ปรียา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

##3972533721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: SULFATE REDUCTION/ SULFIDE ESTIMATION

URACHA SADETHEERAKIJ : EFFECTS OF COD AND SULFATE CONCENTRATIONS ON  
SULFATE REDUCTION LEVEL. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. MUNSIN TUNTOOLAVEST.

Ph.D. 271 pp. ISBN 974-334-584-1

The purposes of this study were to investigate the effects of COD and sulfate concentrations on sulfate reduction level and to estimate the concentration of effluent sulfide from anaerobic process. Three separately identical laboratory scale UASB reactors were fed with a synthetic wastewater which was made from sucrose and sodium sulfate as organic carbon and sulfate source respectively. In all experiments, sodium bicarbonate was used as a buffering chemical. All reactors were seeded with 1-3 mm. diameter granulated anaerobic sludge. There were two sets of experiments in this study at ratio of COD/sulfate 4 and 2. In each ratio, five levels of 400, 600, 800, 1000 and 1200 mg COD/l were applied.

At the ratio COD/sulfate of 4 experiment, the sulfate reduction efficiencies were 86.8, 89.3, 92.0, 91.9 and 92.7% and effluent sulfide/influent sulfate ratios were 0.264, 0.258, 0.268, 0.266 and 0.259 for COD concentrations of 400, 600, 800, 1000 and 1200 mg/l respectively. At the ratio COD/sulfate of 2 experiment, the sulfate reduction efficiencies were 91.1, 93.5, 94.3, 95.1 and 95.1% and effluent sulfide/influent sulfate ratios were 0.264, 0.273, 0.275, 0.262 and 0.270 for COD concentrations of 400, 600, 800, 1000 and 1200 mg/l respectively. The soluble organic COD removal efficiencies were over 95 % in all experiments and % electron flow between methane producing bacteria and sulfate reducing bacteria were 82.0%MPB/18.0%SRB and 62.9%MPB/37.1%SRB for COD/sulfate ratio of 4 and 2 respectively. It showed that if there was no toxic effect from sulfide, the increased role of SRB would not affect soluble organic removal efficiencies of the system

In conclusion, the variation of COD and sulfate concentration in this study did not significantly affect the fairly high sulfate reduction efficiencies in the range of 86.6-95.1 %. Moreover, the empirical equation for estimation of sulfide concentration from anaerobic process at the COD/sulfate ratio over 2 was obtained as follows :

$$\text{Effluent sulfide (mg/l)} = 0.265 \times \text{Influent sulfate (mg/l)}$$

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิติกร อนุชา ศรีสวัสดิ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ธีร...

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มันติน คัมจุลเวศม์ เป็นอย่างสูงในฐานะที่ท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นครูผู้ให้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมการผลิตน้ำดี และการบำบัดน้ำเสีย เป็นผู้ให้แนวคิดทางทฤษฎีและแบบอย่างการปฏิบัติจริง ตั้งสอนให้รู้จักการกำหนดกรอบความคิด การวางแผนการทำงาน และแนวทางในการทำงาน ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหา ทั้งในช่วงการทำการทดลอง และในการเขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัทแซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียส์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ถึงปฏิกรณ์ยูเอเอสบี, เชื้อจุลินทรีย์และสารเคมีสำหรับการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ และช่วยแก้ไขให้วิทยานิพนธ์นี้มีข้อบกพร่องน้อยลง รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้เขียน

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย และมูลนิธิชิน โสภณพานิช ที่ให้ทุนอุดหนุนส่วนหนึ่งเพื่อใช้ในการงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่อรรถ (อรรถฤทธิ์ รื่นเรืองใจ) ถ้าไม่ได้พี่ ไม่รู้จะมีใครคิดและทำอุปกรณ์วิจัยแปลกๆ อย่างที่ผมและเพื่อนๆ หลายคนจำเป็นต้องใช้ได้

ขอขอบคุณเพื่อน, พี่และน้องนิสิตปริญญาตรี และโทรวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ทำให้กำลังใจ และ ช่วยเหลือซึ่งกันและกัน อย่างอบอุ่น

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้เขียนที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลืออย่างอดทน ขอบคุณพี่สาวทั้งสอง ขอบคุณลูกน้ำที่ช่วยพิมพ์งานให้ และขอให้คุณความดีอันเกิดจากงานวิจัยนี้เกิดแต่ บิคา มารคา ผู้สนับสนุนการศึกษาของบุตรตลอดมา

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	จ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	9
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	9
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและแนวความคิด.....</b>	<b>10</b>
2.1 กลไกพื้นฐานในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย.....	10
2.2 การย่อยสารอินทรีย์แบบไร้อากาศที่ผลิตมีเทน.....	11
2.2.1 กลไกการผลิตมีเทน.....	12
2.2.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับระบบไร้อากาศที่ผลิตก๊าซมีเทน.....	17
2.2.2.1 แบคทีเรียสร้างกรด.....	17
2.2.2.2 แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก.....	18
2.2.2.3 แบคทีเรียสร้างมีเทน.....	19
2.3 ระบบยูเอเอสบี.....	21
2.3.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี.....	21
2.3.2 ลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี.....	22
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลกับการทำงานของระบบยูเอเอสบี.....	24
2.3.3.1 ปัจจัยเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมของจุลินทรีย์.....	24
2.3.3.2 ปัจจัยที่ใช้ควบคุมการทำงานของจุลินทรีย์.....	29
2.4 การย่อยสารอินทรีย์แบบไร้อากาศแบบซัลเฟตรีดักชัน.....	30
2.4.1 วัฏจักรซัลเฟอร์ทางชีวภาพ.....	30

2.4.2	แบคทีเรียรีควิวซ์ซัลเฟต .....	33
2.4.3	แบคทีเรียรีควิวซ์ซัลเฟอร์.....	38
2.4.4	ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ในกระบวนการไร้อากาศที่มีซัลเฟต.....	38
2.4.4.1	การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีควิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียผลิตมีเทน.....	40
2.4.4.2	การแข่งขันระหว่างแบคทีเรียรีควิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างอะซิเตด.....	49
2.4.5	ความเป็นพิษจากสารต่างๆ ในกระบวนการ ไร้อากาศที่มีซัลเฟต.....	52
2.4.5.1	ความเป็นพิษจากซัลไฟด์.....	52
2.4.5.2	ความเป็นพิษจากซัลไฟด์ .....	55
2.4.5.3	การยับยั้งจากอิมูนบวก.....	55
2.4.6	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ .....	56
2.5	สมดุลมวลซีโอไซด์และซัลเฟอร์ในกระบวนการ ไร้อากาศที่มีซัลเฟต.....	57
2.5.1	ทฤษฎีสมดุลมวลซีโอไซด์.....	57
2.5.2	ทฤษฎีสมดุลมวลซัลเฟอร์.....	60
2.6	การศึกษาที่ผ่านมา.....	63
2.6.1	ความสัมพันธ์ในเชิงการใช้สารอาหาร.....	63
2.6.2	การเกิดเป็นเม็ดสตัคค์.....	66
2.6.3	ความเป็นพิษเนื่องจากซัลไฟด์.....	67
2.6.4	การบำบัดโลหะหนัก.....	68
<b>บทที่ 3</b>	<b>การวางแผนการวิจัย.....</b>	<b>69</b>
3.1	แผนการทดลอง.....	69
3.2	การตั้งคราะห์และเตรียมน้ำเสีย.....	72
3.2.1	การตั้งคราะห์น้ำเสีย.....	72
3.2.2	การเตรียมน้ำเสีย.....	74
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	74
3.3.1	ถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบยูเอเอสบี .....	74
3.3.2	ชุดเครื่องกวน .....	76
3.3.3	ถังพักน้ำเสียป้อนเข้าระบบ .....	79
3.3.4	เครื่องสูบน้ำแบบรีดสาย .....	79
3.3.5	ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	79



3.3.6 ชุดคักก๊าซแบบแทนที่น้ำ.....	80
3.3.7 อุปกรณ์การวัดปริมาตร ก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์.....	82
3.4 การเดินระบบและการควบคุมระบบ.....	85
3.4.1 การเดินระบบ.....	85
3.4.2 ตะกอนเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น.....	87
3.4.3 การควบคุมระบบ.....	87
3.4.3.1 การควบคุมอัตราไหลน้ำเสียป้อนเข้าระบบ.....	87
3.4.3.2 การควบคุมลักษณะน้ำเสีย.....	88
3.4.3.3 การควบคุมสภาพแวดล้อมทางกายภาพ.....	88
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ และก๊าซ.....	89
3.5.1 การเก็บตัวอย่างน้ำและก๊าซ.....	89
3.5.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....	90
3.5.3 การวัดและวิเคราะห์ก๊าซ.....	90
3.6 เทคนิคเฉพาะในการวิเคราะห์พารามิเตอร์บางชนิด.....	92
3.6.1 การวิเคราะห์ซีไอดี ไດ์ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	92
3.6.2 วิธีการวัดค่าสภาพค่างทั้งหมด และกรดไขมันระเหย.....	93
3.6.3 การวัดซัลไฟด์ละลายน้ำโดยตรง.....	93
3.6.4 การวัดซัลเฟต.....	94
3.6.5 แนวคิดการวัดปริมาณ ก๊าซมีเทน , คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์....	95
3.6.6 การวัดปริมาณ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	97
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....</b>	<b>98</b>
4.1 การดำเนินการวิจัย.....	98
4.2 ผลการทดลองของแต่ละถังปฏิกรณ์.....	105
4.2.1 ถังปฏิกรณ์หมายเลข 1.....	105
4.2.2 ถังปฏิกรณ์หมายเลข 2.....	110
4.2.3 ถังปฏิกรณ์หมายเลข 3.....	116
4.3 อธิปไตยของระดับความเข้มข้นซีไอดีและซัลเฟตต่อระบบยูเอเอสบี.....	122
4.3.1 ซีไอดี.....	123
4.3.2 ซัลเฟต, เปอร์เซ็นต์ซัลเฟตรีดักชัน และซัลไฟด์.....	134

4.3.3 ปริมาตรก๊าซชีวภาพ, อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ และความดันพาร์เซิลก๊าซชีวภาพ.....	146
4.3.4 สภาพค่างทั้งหมด, กรดไขมันระเหย และพีเอช.....	157
4.3.5 ไออาร์พี.....	185
4.4 สมดุลมวลซีโอดีและซัลเฟอร์จากผลการทดลอง .....	190
4.4.1 สมดุลมวลซีโอดี.....	190
4.4.2 สมดุลมวลซัลเฟอร์.....	202
4.5 การประเมินปริมาณซัลไฟด์ที่จะเกิดในระบบบำบัดไร้อากาศ.....	211
4.6 การคำนวณค่ากรดไขมันระเหยจากค่าซีโอดีนำออกของระบบบำบัดไร้อากาศ.....	215
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	218
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	218
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม.....	219
<b>บทที่ 6</b> ความสำคัญของงานวิจัยในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	220
รายการอ้างอิง.....	221
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก ผลการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1.....	226
ภาคผนวก ข ผลการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2.....	236
ภาคผนวก ค ผลการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3.....	249
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ.....	262
<b>ประวัติผู้วิจัย.....</b>	<b>271</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปฏิบัติการวัดออกซิเจนในการนำบักน้ำเสีย.....	11
2.2 กลุ่มสารอาหารที่ใช้ในปฏิกิริยาการสร้างมีเทน .....	16
2.3 ตัวอย่างแบคทีเรียสร้างมีเทน และสารอาหารที่ใช้ .....	20
2.4 ผลของแอมโมเนียและแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อระบบไร้อากาศ .....	28
2.5 ระดับเลขออกซิเดชันของตัวอย่างชนิดธาตุซัลเฟอร์และสารประกอบของธาตุซัลเฟอร์ .....	30
2.6 Genera ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่แบ่งเป็น 2 กลุ่ม.....	34
2.7 ตัวอย่างปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอาหารของ I-SRB และ C-SRB .....	34
2.8 ค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้จากการใช้สารอาหาร โดย SRB และ MPB .....	40
2.9 ค่าพารามิเตอร์ไคเนติกของ A-SRB และ A-MPB บางสายพันธุ์ เมื่อใช้ซอร์บิเตดเป็นสารอาหาร ...	44
2.10 ค่า $K_s$ - $SO_4^{2-}$ ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตบางสายพันธุ์ .....	47
2.11 อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตที่มีการศึกษาหรืออ้างอิง.....	48
2.12 ความเข้มข้นของ ( $H_2S_{(aq)}$ ) และ (Total Sulfide) ที่ยับยั้ง A-MPB ได้ 50% .....	53
2.13 ตัวอย่างผลการคำนวณสมมูลมวลซีไอดี .....	60
2.14 ตัวอย่างผลการคำนวณสมมูลมวลซัลเฟอร์ .....	62
3.1 แผนการทดลอง.....	70
3.2 ระดับความเข้มข้นซีไอดี และซัลเฟตในแต่ละชุดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 1.....	71
3.3 ระดับความเข้มข้นซีไอดี และซัลเฟตในแต่ละชุดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 2.....	71
3.4 ระดับความเข้มข้นซีไอดี และซัลเฟตในแต่ละชุดการทดลองของถังปฏิกรณ์ที่ 3.....	71
3.5 สูตรน้ำเสียตั้งเคราะห์แต่ละชุดการทดลอง .....	73
3.6 ตัดส่วนในการเติมค่าสภาพต่าง ธาตุอาหารหลักและรองที่เลือกเติม.....	73
3.7 ลักษณะของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลอง.....	76
3.8 แผนการเก็บตัวอย่าง และวิธี/เครื่องมือวิเคราะห์.....	91
4.1 สรุปลำดับการทดลอง.....	102
4.2 ตารางเวลาการทดลอง.....	103
4.3 สรุปข้อมูลตัวแปรต่างๆของถังปฏิกรณ์ที่ 1 .....	106
4.4 สรุปข้อมูลตัวแปรต่างๆของถังปฏิกรณ์ที่ 2.....	111
4.5 สรุปข้อมูลตัวแปรต่างๆของถังปฏิกรณ์ที่ 3.....	117
4.6 การจัดกลุ่มวิเคราะห์ผลตามค่าอัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต.....	122

4.7	ค่าซีไอคือน้ำเสียเข้าและออกจากระบบ.....	124
4.8	ค่าการบรรทุกสารอินทรีย์และประสิทธิภาพการกำจัดซีไอ.....	129
4.9	สรุปผลการทดลองค่าซัลเฟตและซัลไฟด์.....	134
4.10	ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดซัลเฟอร์ออกจากวัฏภาคน้ำ.....	145
4.11	ปริมาณก๊าซทั้งหมด, อัตราการเกิดก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน และค่าความดันพาร์เซียด.....	146
4.12	ค่าสภาพค่างทั้งหมด, อัตราส่วนค่าสภาพค่างทั้งหมดต่อซีไอ และเปอร์เซ็นต์การเพิ่มค่าสภาพค่างทั้งหมด.....	158
4.13	ข้อมูลค่าสภาพค่างทั้งหมด, ค่าซีไอที่ละลาย และค่าซัลไฟด์ละลายในรูปแบบแก๊ส.....	162
4.14	ค่าสภาพค่างน้ำออกทั้งหมด แยกชนิดแต่ละประเภท.....	162
4.15	อัตราส่วนระหว่าง $\text{CH}_3\text{COO}^- / \text{CH}_3\text{COOH}$ และ $\text{HCO}_3^- / \text{H}_2\text{CO}_3^*$ ที่ pH 7, 6.5 และ 6.0.....	165
4.16	การคำนวณค่าสภาพกรด และค่าสภาพค่าง เมื่อผ่านขั้น 100% acidification .....	167
4.17	แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ค่าสภาพกรด และค่าสภาพค่าง จากการย่อย สารอาหาร โดย MPB และ SRB .....	169
4.18	การคำนวณการเปลี่ยนแปลง ค่าสภาพกรด และค่าสภาพค่าง ในขั้น mineralization.....	172
4.19	สรุปค่าสภาพกรดและค่าสภาพค่างทั้งในขั้น acidification และ mineralization.....	173
4.20	ข้อมูลค่ากรดไขมันระเหย และ อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพค่างทั้งหมด.....	175
4.21	การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนสภาพค่าง ไบคาร์บอเนตจากการไตเตรทในช่วงพีเอช 5.75 จนถึง 4.3 ค่สภาพค่างทั้งหมด จากการไตเตรทจากพีเอชเริ่มต้น 6.8 จนถึง 4.3.....	179
4.22	ข้อมูลค่าพีเอช.....	181
4.23	สรุปการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพกรดและค่าสภาพค่าง ทั้งในขั้นacidificationและmineralization.....	183
4.24	สรุปข้อมูลค่าไออาร์พี.....	185
4.25	ค่าเฉลี่ยไออาร์พี และปริมาณซัลไฟด์น้ำออก.....	189
4.26	ข้อมูลค่าการแปรรูปซีไอและผลรวมสมมูลมวลซีไอที่อัตราส่วนซีไอต่อซัลเฟต 4.....	193
4.27	ข้อมูลค่าการแปรรูปซีไอและผลรวมสมมูลมวลซีไอที่อัตราส่วนซีไอต่อซัลเฟต 2.....	194
4.28	ข้อมูลสัดส่วนการใช้ซีไอระหว่างแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียผลิตมีเทน.....	199
4.29	ข้อมูลการแปรรูปของสารประกอบซัลเฟอร์ และผลรวมเปอร์เซ็นต์สมมูลมวลซัลเฟอร์ ที่อัตราส่วนซีไอต่อซัลเฟต 4.....	205
4.30	ข้อมูลการแปรรูปของสารประกอบซัลเฟอร์ และผลรวมเปอร์เซ็นต์สมมูลมวลซัลเฟอร์ ที่อัตราส่วนซีไอต่อซัลเฟต 2.....	206

- 4.31 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายไม่แตกตัว, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายแตกตัว  
และความเข้มข้นซัลไฟด์ละลายทั้งหมด..... 209
- 4.32 ค่าซัลไฟด์ละลายทั้งหมดและค่าซัลเฟตจากรายงานวิจัยของ Harada และคณะ ,(1994) ..... 212
- 4.33 ค่าซัลไฟด์ละลายทั้งหมดและค่าซัลเฟตจากผลการวิจัยนี้..... 213
- 4.34 ค่ากรดไขมันระเหยจากการคำนวณด้วยค่าซีไอดีละลาย..... 216



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 บทบาทอันหลากหลายของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในธรรมชาติและอุตสาหกรรม .....	2
1.2 ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสารต่างๆทางเคมีของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	5
1.3 รูปแบบดังปฏิกรณ์ที่ป้อนน้ำเสียป้อนโลหะหนักเข้าดังปฏิกรณ์ที่มีเชื้อแบคทีเรียโดยตรง.....	7
1.4 รูปแบบระบบดังปฏิกรณ์ที่มีการแยกส่วนการผลิตซัลไฟด์ และการเกิดตะกอนผลึกโลหะหนักซัลไฟด์ .....	8
2.1 ปฏิกริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย.....	10
2.2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ละลายในกระบวนการไร้อากาศ ที่มีผลิตภัณฑ์หลัก คือ ก๊าซมีเทน .....	13
2.3 ลักษณะรูปร่างต่างๆ ของอุปกรณ์ GSS และอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบยูเอเอสบี .....	23
2.4 วัฏจักรซัลเฟอร์ทางชีวภาพ.....	31
2.5 การย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการไร้ออกซิเจนที่มีซัลเฟตในน้ำเสีย .....	39
2.6 อัตราการเจริญเติบโตของ H-SRB และ H-MPB ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนต่าง ๆ .....	42
2.7 ผลของความเข้มข้นซัลเฟตในระบบต่ออัตราการเจริญเติบโตของ A-MPB และ A-SRB.....	46
2.8 อิทธิพลของ อัตราส่วนซีโอไซด์ต่อซัลเฟอร์ ต่อ pathway การย่อยชีวรีด.....	51
2.9 ผลของพีเอชต่อสมบัติของ $H_2S$ , $HS^-$ และ $S^{2-}$ ในสารละลาย $H_2S$ , 32 มก./ล. ....	61
3.1 ลักษณะและรายละเอียดของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลอง.....	75
3.2 ลักษณะและรายละเอียดของแกนไบอวุ้นและไบอวุ้นภายใน ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี.....	77
3.3 ลักษณะของชุดขับเคลื่อนเครื่องกวนติดตั้งภายนอก ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี.....	78
3.4 ลักษณะและรายละเอียดของชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	80
3.5 ชุดดักก๊าซแบบแทนที่น้ำ.....	81
3.6 ลักษณะและการทำงานของระบบท่อและวาล์วกำหนดทิศทางไหลก๊าซ .....	84
3.7 การติดตั้งถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 ชุดและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ทดลองจริง.....	86
3.8 ชุดเก็บตัวอย่างน้ำและการวัดก๊าซ.....	89
3.9 การติดตั้งชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และชุดดักก๊าซแบบแทนที่น้ำที่ใช้ในการทดลองจริง.....	96
4.1 ค่าตัวแปรผลการทำงานของระบบที่สำคัญต่อการทดลองถังปฏิกรณ์ที่ 1.....	107
4.2 ค่าตัวแปรผลการทำงานของระบบที่สำคัญต่อการทดลองถังปฏิกรณ์ที่ 2.....	113
4.3 ค่าตัวแปรผลการทำงานของระบบที่สำคัญต่อการทดลองถังปฏิกรณ์ที่ 3.....	119
4.4 ค่าซีโอไซด์ต่อการทดลองที่อัตราส่วนซีโอไซด์ต่อซัลเฟต 4.....	125

4.5	ค่าซีไอดีตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 2.....	126
4.6	ค่าเฉลี่ยซีไอดีน้ำออก ตามระดับความเข้มข้นซีไอดีควบคุม.....	127
4.7	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 4.....	130
4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 2.....	131
4.9	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีตามระดับความเข้มข้นซีไอดีควบคุม.....	132
4.10	ค่าซัลเฟตและซัลไฟด์ตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 4.....	135
4.11	ค่าซัลเฟตและซัลไฟด์ตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 2.....	136
4.12	ค่าเปอร์เซ็นต์ซัลเฟตรีดักชันตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 4.....	137
4.13	ค่าเปอร์เซ็นต์ซัลเฟตรีดักชันตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 2.....	138
4.14	ค่าเฉลี่ยซัลเฟตน้ำออกตามระดับความเข้มข้นซีไอดีควบคุม.....	140
4.15	แนวโน้มของระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันเมื่อความเข้มข้นซีไอดีและซัลเฟตเพิ่มขึ้น.....	142
4.16	แนวโน้มของความเข้มข้นซัลไฟด์ทั้งหมดเมื่อความเข้มข้นซีไอดีและซัลเฟตเพิ่มขึ้น.....	142
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นซัลเฟตน้ำเข้าและความเข้มข้นซัลไฟด์ทั้งหมดน้ำออก.....	144
4.18	ค่าปริมาตรก๊าซทั้งหมด และอัตราการเกิดก๊าซทั้งหมดตลอดการทดลองที่สภาวะมาตรฐาน ที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 4.....	147
4.19	ค่าปริมาตรก๊าซทั้งหมด และอัตราการเกิดก๊าซทั้งหมดตลอดการทดลองที่สภาวะมาตรฐาน ที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 2.....	148
4.20	ค่าเฉลี่ยปริมาตรก๊าซทั้งหมด และอัตราการเกิดก๊าซทั้งหมดที่สภาวะมาตรฐาน .....	149
4.21	ค่าความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์ และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 4.....	152
4.22	ค่าความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์ และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 2.....	153
4.23	ค่าเฉลี่ยความดันพาร์เชียลของก๊าซมีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์ และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ .....	154
4.24	ค่าสภาพค้างทั้งหมดและกรดไขมันระเหยตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 4.....	159
4.25	ค่าสภาพค้างทั้งหมดและกรดไขมันระเหยตลอดการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 2.....	160
4.26	ค่าเฉลี่ยสภาพค้างทั้งหมดน้ำเข้าและน้ำออกตามระดับความเข้มข้นซีไอดี.....	163
4.27	ค่าพีเอช และ อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพค้างทั้งหมดตลอดการทดลอง ที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 4.....	176
4.28	ค่าพีเอช และ อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพค้างทั้งหมดตลอดการทดลอง ที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 2.....	177

4.29	ค่าเฉลี่ยที่เอชน้ำเข้า และน้ำออกตามระดับความเข้มข้นซีโอดีควบคุม.....	182
4.30	ค่าไออาร์ที่ลดการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 4.....	186
4.31	ค่าไออาร์ที่ลดการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 2.....	187
4.32	ค่าเฉลี่ยไออาร์ที่น้ำออก ตามระดับความเข้มข้นซีโอดีควบคุม.....	188
4.33	เปอร์เซ็นต์การแปรรูปค่าซีโอดี และผลรวมลดการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 4.....	191
4.34	เปอร์เซ็นต์การแปรรูปค่าซีโอดี และผลรวมลดการทดลองที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 2.....	192
4.35	ค่าเฉลี่ยการแปรรูปซีโอดี และค่ารวมสมมูลมวลซีโอดีที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 4.....	195
4.36	ค่าเฉลี่ยการแปรรูปซีโอดี และค่ารวมสมมูลมวลซีโอดีที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 2.....	195
4.37	สัดส่วนการใช้ซีโอดีระหว่าง MPB และSRB ลดการทดลอง ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 4...	197
4.38	สัดส่วนการใช้ซีโอดีระหว่าง MPB และSRB ลดการทดลอง ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 2...	198
4.39	ค่าเฉลี่ยสัดส่วนการใช้ซีโอดีระหว่างแบคทีเรียผลิตมีเทน และแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	200
4.40	เปอร์เซ็นต์การแปรรูปสารประกอบซัลเฟอร์ และผลรวมสมมูลมวลซัลเฟอร์ ลดการทดลอง ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 4.....	203
4.41	เปอร์เซ็นต์การแปรรูปสารประกอบซัลเฟอร์ และผลรวมสมมูลมวลซัลเฟอร์ ลดการทดลอง ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 2.....	204
4.42	ค่าเฉลี่ยการแปรรูปสารประกอบของซัลเฟอร์และค่ารวมสมมูลมวลซัลเฟอร์ ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 4.....	207
4.43	ค่าเฉลี่ยการแปรรูปสารประกอบของซัลเฟอร์และค่ารวมสมมูลมวลซัลเฟอร์ ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต 2.....	207