

การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟต  
และชนิดของแหล่งคาร์บอน



นายอนุดร เปียงแก้ว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

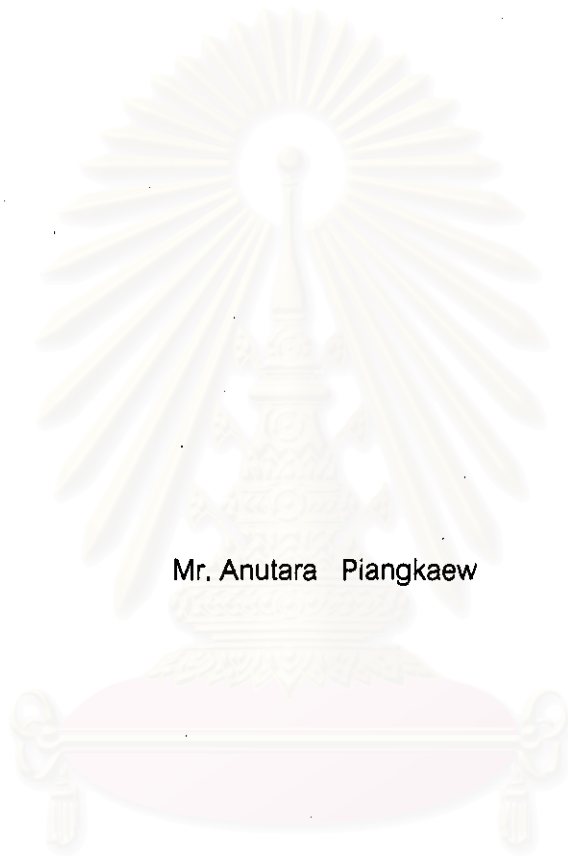
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-534-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTROLLING THE LEVEL OF SULFATE REDUCTION  
BY THE AMOUNT OF SULFATE AND TYPE OF CARBON SOURCES



Mr. Anutara Piangkaew

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

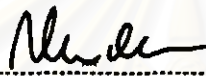
Academic Year 1999

ISBN 974-334-534-5

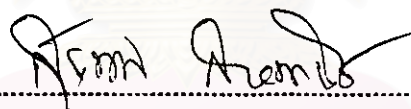
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟตและชนิดของ  
   แหล่งคาร์บอน  
โดย                              นายอนุตร เบียงแก้ว  
ภาควิชา                        วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา            รองศาสตราจารย์ ดร.มันสิน ดันทุลเวศม์


---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สายพานิช)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.มันสิน ดันทุลเวศม์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ บุญยง โฉ่วงศ์วัฒน์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

อนุตร เบียงแก้ว: การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟตและชนิดของแหล่งคาร์บอน (CONTROLLING THE LEVEL OF SULFATE REDUCTION BY THE AMOUNT OF SULFATE AND TYPE OF CARBON SOURCES) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. มั่นสิน ดันตุลเวศม์, 278 หน้า. ISBN 974-334-534-5

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณซัลเฟตและชนิดของแหล่งคาร์บอนด้วยระบบยูเอเอสบี การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดละ 3 การทดลอง โดยการทดลองชุดที่ 1 ใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน ส่วนการทดลองที่ 2 ใช้อะซิเตดเป็นแหล่งคาร์บอน แต่ละชุดการทดลองใช้ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีขนาดเดียวกัน ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นซัลเฟตในน้ำเสียเป็น 42, 84 และ 840 มก./ล. คิดเป็นอัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 12, 6 และ 0.6 ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นซีไอดีคงที่เท่ากับ 500 มก./ล. ในอัตราไหล 8 ล./วัน

จากการศึกษาพบว่า ในการทดลองที่ 1 ซึ่งใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีซีไอดีเท่ากับ 500 มก./ล. และใช้ซัลเฟตเข้มข้น 3 ระดับ คือ 42, 84 และ 840 มก./ล. จะได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเป็นร้อยละ 89.4, 92.3 และ 89.5 มก./ล. ตามลำดับ ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันคิดเป็นร้อยละ 90, 87 และ 86 ปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 13, 24 และ 176 มก./ล. ตามลำดับ ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้เท่ากับ 1,005 888 และ 101 มล./วัน ตามลำดับ ปริมาณแบคทีเรียสร้างมีเทนต่อแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็น 1:0.47, 1:0.62 และ 1:1.37 ตามลำดับ ส่วนในการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้อะซิเตดเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ซัลเฟตเหมือนกับการทดลองที่ 1 ปรากฏว่าได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีคิดเป็นร้อยละ 96.8, 96.7 และ 93.5 ตามลำดับ ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันคิดเป็นร้อยละ 80, 82 และ 72 ตามลำดับ ปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 11.5, 22 และ 200 มก./ล. ตามลำดับ ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้เท่ากับ 1,350 1,254 และ 0 มล./วัน ตามลำดับ ผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่ออัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 6 และ 12 ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันมีค่าเท่ากับ 87% และ 90% ตามลำดับ สำหรับแหล่งคาร์บอนที่เป็นน้ำตาลทราย จะเห็นได้ว่าระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันมีค่าไม่ต่างกับการทดลองที่ใช้อะซิเตดเป็นแหล่งคาร์บอนมากนัก เพราะมีซีไอดีอยู่ในระบบมากเกินไป ในขณะที่มีซัลเฟตอยู่อย่างจำกัด ซัลเฟตในระบบจึงถูกรีดิวซ์เกือบทั้งหมดในเปอร์เซ็นต์ที่ใกล้เคียงกัน จึงอาจสรุปได้ว่า เมื่ออัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตมีค่ามากกว่า 6 ซัลเฟตรีดักชันน่าจะเกิดได้อย่างเต็มที่ และซัลเฟตไม่เป็นปัจจัยกำหนดระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันในทางตรงข้าม เมื่ออัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6 ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันมีค่าเท่ากับ 86% และ 72% สำหรับแหล่งคาร์บอนที่เป็นน้ำตาลทรายและอะซิเตดตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันมีค่าลดลง เพราะในระบบมีซัลเฟตอยู่มากเกินไปในขณะที่มีซีไอดีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นความเข้มข้นของซีไอดีจึงเป็นตัวควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน ในทางกลับกัน อาจกล่าวได้ว่าเมื่ออัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟตน้อยกว่า 0.6 ซัลเฟตจะเป็นตัวกำหนดระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชัน

นอกจากนี้ ที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 12 และ 6 ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกว่า การใช้อะซิเตดเป็นแหล่งคาร์บอนทำให้ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันลดต่ำลงเมื่อเทียบกับการทดลองที่ใช้น้ำตาลทราย เนื่องจากซีไอดีที่ใช้รีดิวซ์ซัลเฟตส่วนหนึ่งมาจากกรดอนทรีย์และไฮโดรเจนจากกระบวนการเฟอร์เมนเตชันซึ่งไม่มีในการทดลองที่ใช้อะซิเตด ผลการทดลองที่อัตราส่วนซีไอดีต่อซัลเฟต 0.6 ยังแสดงให้เห็นว่าการใช้อะซิเตดเป็นแหล่งคาร์บอน กลับทำให้ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันสูงขึ้น เพราะแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียบริโกลไฮโดรเจนใช้ซีไอดีส่วนหนึ่งในระบบเมื่อใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน แต่การใช้อะซิเตดทำให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มหมดบทบาทลง ซีไอดีส่วนนี้จึงถูกใช้ในการรีดิวซ์ซัลเฟตแทนเพราะมีซัลเฟตในระบบมากเกินไป ระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันจึงสูงขึ้น

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต อนุตร เบียงแก้ว  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ม.ร.ว. ดันตุลเวศม์

# # 3972346721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: SULFATE REDUCTION / SULFATE REDUCING BACTERIA / CARBON SOURCE

ANUTARA PIANGKAEW : CONTROLLING THE LEVEL OF SULFATE REDUCTION BY  
THE AMOUNT OF SULFATE AND TYPE OF CARBON SOURCES. THESIS ADVISOR:


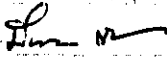
ASSO. PROF. MUNSIN TUNTOOLAVEST. Ph.D. 278 pp. ISBN 974-334-534-5

The purpose of this research was to investigate the role of sulfate concentration and type of carbon source in controlling the sulfate reduction level in UASB system. The research has 2 parts, each part contain 3 experiments. The first part used sugar as carbon source whilst the second part used acetate. The same size of UASB reactors in both parts were used to feed 8 liters of synthetic wastewater having constant COD concentration of 500 mg/l. Three levels of sulfate concentration, i.e., 42, 84 and 840 mg/l, were studied.

It was found in the first part that using sugar as carbon source having COD concentration of 500 mg/l and three levels of sulfate concentration, i.e., 42, 84 and 840 mg/l, the efficiency of COD removal were 89.4%, 92.3% and 89.5% respectively. The levels of sulfate reduction were 90%, 87% and 66%, and the effluent sulfide concentrations were 13, 24 and 176 mg/l respectively. The produced gas quantities were 1,005, 886 and 101 ml/day, and the ratios of methane producing bacteria:sulfate reducing bacteria were 1:0.47, 1:0.62 and 1:1.37 respectively. In the second part, using acetate as carbon source and the same levels of sulfate concentration, the efficiency of COD removal were 96.8%, 96.7% and 93.5%, and the levels of sulfate reduction were 80%, 82% and 72% respectively. The effluent sulfide concentrations were 11.5, 22 and 200 mg/l, and the produced gas quantities were 1,350, 1,254 and 0 ml/day respectively. According to the experiment, it was shown that when using sugar as the carbon source, sulfate reduction levels would be 87% and 90% at COD:sulfate ratios of 6 and 12, respectively. The results were not much different when using acetate as the carbon source because there was excessive COD but limiting sulfate in the system. Therefore, almost the entire sulfate was reduced to nearly the same extent. It maybe concluded that when COD:sulfate ratio was higher than 6, maximum sulfate reduction could be expected and sulfate concentration would never limit the reduction reaction. On the contrary, when the COD:sulfate ratio was 0.6, sulfate reduction levels were 66% and 72% when using sugar and acetate as carbon source respectively. This showed that the sulfate reduction was decreased due to excessive sulfate as well as limited COD in the system. Therefore, COD concentration controlled the sulfate reduction level. On the other hand, the COD:sulfate ratio less than 0.6 sulfate would determine the levels of sulfate reduction.

Moreover, at the COD:sulfate ratio of 12 and 6, the result showed that when using acetate as carbon source, the level of sulfate reduction was decreased compared with using sugar. Since some portion of COD used to reduce sulfate came from the volatile fatty acid and fermented hydrogen, which was not found in the acetate experiment. On the contrary, at the COD:sulfate of 0.6, the result showed that when using acetate as carbon source, sulfate reduction level was increased. Since the acid forming bacteria and the bacteria utilized hydrogen used a part of COD when using sugar as carbon source. But when using acetate, the role of both groups of bacteria was limited. Therefore, this part of COD was used to reduce sulfate instead, consequently excessive sulfate increased sulfate reduction.

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต   
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

## กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของบุคคลต่าง ๆ หลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณคุณต่อผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.มันสิน ตัณฑุลเวศม์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด อีกทั้งยังเอาใจใส่ดูแลติดตามการวิจัยอย่างใกล้ชิดเสมอตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ เ่งพิพัฒน์ อาจารย์ประจำภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะวิธีการต่าง ๆ และให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้เพาะเชื้อแบคทีเรีย

อาจารย์วิบูลลักษณ์ วิสุทธิศักดิ์ และคุณอนันต์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการชีววิทยา ที่ให้คำปรึกษา อนุเคราะห์เครื่องมือและสารเคมี อีกทั้งยังช่วยเหลือในการเพาะเชื้อแบคทีเรีย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและให้กำลังใจ

คุณจันทวรรณ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการปริภูมิศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ช่วยอบรมสั่งสอนและให้ความรู้

บริษัท แชน อี. 68 แล็บ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ดังปฏิกรณ์ และสารเคมีตลอดการวิจัย

มูลนิธิชิน โสภณพานิช และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนการวิจัย คุณอรรรอดุณี รื่นใจใจ ที่ช่วยให้คำปรึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องกวนแม่เหล็ก อีกทั้งยังช่วยซ่อมแซมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่บกพร่องเสียหายอยู่เสมอ

คุณโสภา ชินเวชกิจวานิชย์ ที่ช่วยให้คำปรึกษา ค้นหาข้อมูลและให้ยืมหนังสืออ้างอิงหลายเล่ม

คุณเมณีนทรา สีรานนท์ ที่ช่วยค้นหาข้อมูลในการเขียนวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำ ให้ความรักและกำลังใจตลอดมาในการศึกษาเล่าเรียนและการทำวิทยานิพนธ์

คุณกาญจนา ต่วนเทศและคุณอริวัตร จิระวิยาเวช ที่ช่วยวิเคราะห์โลหะหนักนิกเกิล

พี่เต๋า, พี่มินน้อย, พี่อาร์ท, พี่จุ่ม, พี่ตัง, พี่วิทย์, พี่ธรรม, พี่เนี้ยว, พี่ปิง, ยุทธ, หนึ่ง, ปอม, ดิก, ปรีชาวิทย์, บั๊อม, เนี้ยว, ผิง, ทิพย์, ลิ่ง, เบก, พี่ ๆ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ช่วยให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจให้ตลอดการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 แนวคิดในการควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยปริมาณ ซัลเฟตและชนิดของสารอาหาร.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	4
2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน.....	4
2.1.1 กลไกพื้นฐานของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน.....	4
2.1.2 ขั้นตอนการทำงานของแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ ในกระบวนการ บำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน.....	7
2.2 ระบบยูเอเอสบี.....	14
2.2.1 ความเป็นมาของระบบยูเอเอสบี.....	17
2.2.2 ลักษณะของระบบยูเอเอสบี.....	18
2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของระบบยูเอเอสบี.....	19
2.3 แบคทีเรียสร้างมีเทน.....	20
2.3.1 ลักษณะทั่วไป.....	20
2.3.2 ชีวิตเคมีของแบคทีเรียสร้างมีเทน.....	23
2.3.3 ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลการทำงาน ของแบคทีเรียสร้างมีเทน.....	29
2.4 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ลักษณะทั่วไป.....	36
2.4.2 ชื่อเคมีของแบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	45
2.4.3 ปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลการทำงานของ แบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	54
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแบกทีเรียกลุ่มต่าง ๆ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในน้ำเสียที่มีซัลเฟต.....	55
2.5.1 การแข่งขันระหว่างแบกทีเรียสร้างอะซิเตตและ แบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	56
2.5.2 การแข่งขันระหว่างแบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบกทีเรียสร้างมีเทน ในการแย่งใช้ไฮโดรเจน.....	60
2.5.3 การแข่งขันระหว่างแบกทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและ แบกทีเรียสร้างมีเทนในการแย่งใช้อะซิเตต.....	67
2.6 ความเป็นพิษเนื่องจากสารประกอบซัลเฟอร์ที่ถูกออกซิไดส์ระหว่าง การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน.....	77
2.6.1 การยับยั้งการทำงานของแบกทีเรียเนื่องจากซัลไฟด์.....	77
2.6.2 การยับยั้งเนื่องจากซัลไฟด์.....	85
2.6.3 การยับยั้งเนื่องจากอิมูนบวก.....	86
2.7 สมดุลมวลของซีโอไซด์และซัลเฟอร์ในกระบวนการไร้ออกซิเจน เมื่อมีซัลเฟตอยู่ในน้ำเสีย.....	87
2.7.1 สมดุลมวลของซีโอไซด์.....	87
2.7.2 สมดุลมวลของซัลเฟอร์.....	91
2.8 การควบคุมระดับการเกิดซัลเฟตรีดักชันด้วยการเติมซัลเฟต.....	92
2.9 การศึกษาที่ผ่านมา.....	96
2.9.1 ความเข้มข้นและชนิดของสารอาหารที่มีผลต่อ ระบบบำบัดไร้ออกซิเจน.....	96
2.9.2 การใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนในการกำจัดโลหะหนัก.....	104
บทที่ 3 การวางแผนการวิจัย.....	107



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 แผนการทดลอง.....	107
3.2 การเตรียมน้ำเสีย.....	108
3.2.1 ส่วนประกอบของน้ำเสีย.....	108
3.2.2 วิธีการเตรียมน้ำเสีย.....	110
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	112
3.3.1 ถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี.....	112
3.3.2 ชุดเครื่องกวน.....	114
3.3.3 อุปกรณ์ป้อนน้ำเสีย.....	118
3.3.4 อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ.....	118
3.3.5 ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	120
3.4 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	123
3.4.1 จุดเก็บตัวอย่าง.....	123
3.4.2 วิธีการเก็บตัวอย่าง.....	125
3.4.3 เทคนิคในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	126
3.5 การนับจำนวนแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจน.....	133
3.5.1 จุดประสงค์.....	133
3.5.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	133
3.5.3 สารเคมี.....	133
3.5.4 วิธีการทดลอง.....	141
3.6 การใช้สมมูลมวลของซีโอดีและซัลเฟอร์ทำนายการเปลี่ยนแปลง มวลสารในระบบ.....	151
3.6.1 สมมติฐานเบื้องต้น.....	152
3.6.2 การใช้ซีโอดีในระบบโดยแบคทีเรียดีท็อกซ์ซัลเฟตและ แบคทีเรียสร้างมีเทน.....	153
3.6.3 การละลายน้ำของก๊าซชีวภาพ.....	154
3.6.4 การคำนวณเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงมวลสารในระบบ.....	156

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	169
4.1 ผลการทดลอง.....	169
4.1.1 การทดลองที่ 1.....	170
4.1.2 การทดลองที่ 2.....	185
4.2 สมดุลมวลของสารในระบบ.....	196
4.2.1 สมดุลมวลของซีโอดี.....	196
4.2.2 สมดุลมวลของซิลเฟออร์.....	201
4.3 ผลของชนิดสารอาหารและความเข้มข้นซิลเฟตที่เปลี่ยนแปลง.....	204
4.3.1 อุณหภูมิ.....	204
4.3.2 สัดส่วนการใช้ซีโอดี.....	204
4.3.3 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี.....	209
4.3.4 ซิลเฟตและซิลไฟด์.....	210
4.3.5 พีเอชและสภาพต่าง.....	221
4.3.6 การผลิตก๊าซ.....	237
4.3.7 ของแข็งแขวนลอย.....	245
4.3.8 ไออาร์พี.....	247
4.3.9 ปริมาณแบคทีเรีย.....	249
4.3.10 ลักษณะการเกาะตัวของเม็ดแบคทีเรีย.....	250
4.4 การควบคุมระดับการเกิดซิลเฟตรีดักชัน.....	251
4.5 การกำจัดโลหะหนัก.....	253
4.6 แนวทางการประยุกต์ใช้.....	255
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	258
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	258
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม.....	259
รายการอ้างอิง.....	260
ภาคผนวก.....	265
ประวัติผู้เขียน.....	280

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางอาหารที่แบกที่เรียสร้างมีเทนนำไปใช้ได้.....	20
ตารางที่ 2.2 แบกที่เรียสร้างมีเทนจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ และสมบัติในระดับโมเลกุล.....	22
ตารางที่ 2.3 ผลของแอมโมเนียในโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน.....	34
ตารางที่ 2.4 ไฮโดรเจนซัลไฟด์และความเข้มข้นของซัลไฟด์ทั้งหมดที่ทำให้เกิด การยับยั้งการผลิตมีเทนจากกรดอะซิติกที่ 50 เปอร์เซ็นต์.....	35
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ I-SRB และ C-SRB.....	37
ตารางที่ 2.6 ลักษณะสมบัติของแบกที่เรียรีดิวิวัลเฟต.....	38
ตารางที่ 2.7 ลักษณะสมบัติของแบกที่เรียรีดิวิวัลเฟตที่ได้รับการแยกประเภทแล้ว.....	40
ตารางที่ 2.8 ค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแบกที่เรียที่บริโภคไฮโดรเจน.....	60
ตารางที่ 2.9 ค่าพารามิเตอร์ทางโคเนติกสำหรับการใช้ไฮโดรเจนโดยแบกที่เรีย รีดิวิวัลเฟตและแบกที่เรียสร้างมีเทน.....	64
ตารางที่ 2.10 ค่ายึดตัวของแบกที่เรียรีดิวิวัลเฟต, แบกที่เรียรีดิวิวัลเฟอร์ และแบกที่เรียสร้างมีเทนในการใช้ไฮโดรเจน.....	65
ตารางที่ 2.11 ค่าพลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแบกที่เรียรีดิวิวัลเฟต และแบกที่เรียสร้างมีเทนที่บริโภคอะซิเตต.....	67
ตารางที่ 2.12 ค่าพารามิเตอร์ทางโคเนติกของแบกที่เรียรีดิวิวัลเฟตและ แบกที่เรียสร้างมีเทนที่ใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร.....	68
ตารางที่ 2.13 ผลการวิจัยของการใช้ถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูง.....	69
ตารางที่ 2.14 ผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตต่อการแข่งขันของ แบกที่เรียสร้างมีเทนและแบกที่เรียรีดิวิวัลเฟต ในงานวิจัยต่าง ๆ.....	73
ตารางที่ 2.15 ความชอบซัลเฟต (sulfate affinity, $K_{so_4}$ ) ของแบกที่เรียรีดิวิวัลเฟต.....	74
ตารางที่ 2.16 สัดส่วนการใช้ซีโอดีของแบกที่เรียรีดิวิวัลเฟตและแบกที่เรียสร้างมีเทน.....	76
ตารางที่ 2.17 ระดับความเข้มข้นของซัลไฟด์ ที่เป็นพิษต่อแบกที่เรีย.....	83
ตารางที่ 2.18 เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนของแบกที่เรียรีดิวิวัลเฟตและ แบกที่เรียสร้างมีเทนในถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนที่มีอัตราการทำน้ำบาดสูง.....	93
ตารางที่ 2.19 สมดุลยมวลของซีโอดีที่สภาวะคงตัวจากงานของ Mizuno.....	94

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 2.20 เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกใช้โดยแบททีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบททีเรียสร้างมีเทนในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี.....	95
ตารางที่ 3.1 แผนการทดลอง.....	108
ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบของน้ำเสีย.....	109
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของสารต่าง ๆ ที่เติมคิดเทียบกับซีโอดี.....	110
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดการเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	124
ตารางที่ 3.5 มวลสารที่เปลี่ยนไปจากการใช้ซีโอดีโดยแบททีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบททีเรียสร้างมีเทน.....	154
ตารางที่ 3.6 ค่าคงที่ $K_n$ ของก๊าซต่าง ๆ.....	155
ตารางที่ 3.7 มวลสารที่เปลี่ยนไปจากการใช้ซีโอดีโดยแบททีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบททีเรียสร้างมีเทน เมื่อไฮโดรเจนในระบบมีมากกว่าซีโอดี ที่ถูกใช้โดยแบททีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	158
ตารางที่ 3.8 มวลสารที่เปลี่ยนไปจากการใช้ซีโอดีโดยแบททีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบททีเรียสร้างมีเทน เมื่อไฮโดรเจนในระบบมีน้อยกว่าซีโอดี ที่ถูกใช้โดยแบททีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	159
ตารางที่ 4.1 ขั้นตอนของการทำวิจัย.....	170
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองที่ 1.....	183
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองที่ 1 ซึ่งทำการทดลองเพิ่มเติม.....	184
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองที่ 2.....	196
ตารางที่ 4.5 ค่า % recovery ในการทดลองที่ 1 ซึ่งใช้น้ำตาลทรายเป็นสารอาหาร.....	199
ตารางที่ 4.6 ค่า % recovery ในการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้อะซิเตตเป็นสารอาหาร.....	200
ตารางที่ 4.7 ค่า % recovery ของซัลเฟอริในการทดลองที่ 1 ซึ่งใช้น้ำตาลทราย เป็นสารอาหาร.....	202
ตารางที่ 4.8 ค่า % recovery ของซัลเฟอริในการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้อะซิเตต เป็นสารอาหาร.....	203
ตารางที่ 4.9 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ในรูปแบบต่าง ๆ.....	219
ตารางที่ 4.10 สาเหตุที่ทำให้พีเอชและสภาพต่างในการทดลองที่ 1 และ 2 ต่างกัน.....	229

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างซิลเฟตและซิลไฟด์ในงานวิจัยต่าง ๆ.....	252
ตารางที่ 4.22 ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำออก.....	254



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ปฏิกริยารีดอกซ์ในการนำบัดน้ำเสีย.....	5
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในบ่อน้ำตามสภาพธรรมชาติ.....	7
รูปที่ 2.3 ภาพจำลองการทำงานของเอนไซม์.....	9
รูปที่ 2.4 กลไกการขนส่งกลูโคสเข้าสู่เซลล์ด้วยกระบวนการ group translocation ผ่านระบบ phosphotransferase.....	10
รูปที่ 2.5 การขนส่งอิออนต่างๆ เข้าสู่เซลล์ผ่านกลไก active transport.....	11
รูปที่ 2.6 วิถีไกลโคไลซิส.....	13
รูปที่ 2.7 ปฏิกริยาการสร้างกรดไขมันระเหยภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนต่ำและสูง.....	15
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของแบคทีเรียกลุ่มต่าง ๆ ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนอย่างคร่าว ๆ.....	16
รูปที่ 2.9 รูปร่างของเซลล์ของแบคทีเรียสร้างมีเทน.....	21
รูปที่ 2.10 โคเอนไซม์ของแบคทีเรียสร้างมีเทน.....	24
รูปที่ 2.11 วิถีการสร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์.....	25
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างวิถีทางชีวเคมีของกระบวนการชีวสังเคราะห์และกระบวนการสงวนพลังงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน.....	26
รูปที่ 2.13 วิถีทางชีวเคมีของกระบวนการชีวสังเคราะห์และกระบวนการสงวนพลังงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนที่ใช้เมทานอล.....	27
รูปที่ 2.14 วิถีทางชีวเคมีของกระบวนการชีวสังเคราะห์และกระบวนการสงวนพลังงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนที่บริโภคะซิเตด.....	28
รูปที่ 2.15 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์.....	30
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างภาพถ่ายของแบคทีเรียรีดิทซ์ซัลเฟต.....	43
รูปที่ 2.17 วิถีทางชีวเคมีของแบคทีเรียรีดิทซ์ซัลเฟต.....	45
รูปที่ 2.18 สมมติฐานการรีดิทซ์ซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ผ่านสารอินเทอร์มีเดียทต่าง ๆ โดยแบคทีเรียรีดิทซ์ซัลเฟต.....	47
รูปที่ 2.19 การใช้ไฮโดรเจนเป็นสารอาหารโดยแบคทีเรียรีดิทซ์ซัลเฟต.....	49
รูปที่ 2.20 วัฏจักรกรดซิตริก.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 กลไกการออกซิไดส์อะซิเตตเป็นคาร์บอนไดออกไซด์โดยแบคทีเรีย รีดิวซ์ซัลเฟตที่ใช้วัฏจักรกรดซิตริก.....	51
รูปที่ 2.22 กระบวนการ substrate-level phosphorylation ที่เกิดขึ้น ในการเปลี่ยนอะซิติกโคเอเป็นอะซิเตต.....	52
รูปที่ 2.23 Acetyl-CoA pathway.....	53
รูปที่ 2.24 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรีย สร้างมีเทนที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนต่าง ๆ กัน.....	66
รูปที่ 2.25 ความเข้มข้นของซัลเฟตที่มีผลต่ออัตราส่วนระหว่างการเจริญเติบโตของ แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทนในการย่อยสลายอะซิเตต ที่ความเข้มข้นของซัลเฟตต่าง ๆ กัน.....	74
รูปที่ 2.26 ผลของพีเอชต่อสมมูลย์ $H_2S$ , $HS^-$ และ $S^{2-}$ ในสารละลาย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 32 มก./ล.....	79
รูปที่ 2.27 ปริมาณโพธิโอเนตที่ถูกกำจัดที่ระดับความเข้มข้นซัลไฟด์ค่าต่าง ๆ ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่เลี้ยงด้วยโพธิโอเนตและซัลเฟต.....	81
รูปที่ 3.1 รายละเอียดของถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลอง.....	113
รูปที่ 3.2 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์แยก 3 สถานะ.....	114
รูปที่ 3.3 รายละเอียดของชุดเครื่องกวน.....	115
รูปที่ 3.4 ใบกวนและวงแหวนพีวีซี.....	116
รูปที่ 3.5 ชุดรับของเครื่องกวนแม่เหล็ก.....	117
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์เก็บและวัดปริมาตรก๊าซแบบแทนทีน้ำ.....	119
รูปที่ 3.7 ชุดดักก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	121
รูปที่ 3.8 รายละเอียดของชุดเก็บตัวอย่างน้ำ.....	123
รูปที่ 3.9 การเก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์.....	126
รูปที่ 3.10 การกำจัดซัลไฟด์ในน้ำเสียด้วยการปรับพีเอชและการเขย่าสร้างความเป็นปวน.....	128
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากเครื่อง GC.....	129
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างกราฟจากเครื่อง GC ที่ซ้อนทับกัน.....	130
รูปที่ 3.13 กราฟมาตรฐานของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากเครื่อง GC.....	132

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย.....	134
รูปที่ 3.15 เครื่องเคลื่อนบ้วนด้วยเทคนิคของฮังเกต.....	134
รูปที่ 3.16 ท่อทองแดงสำหรับดูดก๊าซออกซิเจน.....	135
รูปที่ 3.17 การบรรจุสารอาหารลงขวดปลอดเชื้อด้วยการกรองผ่านเยื่อกรอง.....	138
รูปที่ 3.18 การเก็บตัวอย่างสไลด์จากถังปฏิกรณ์.....	138
รูปที่ 3.19 การบรรจุสารอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวลงหลอดทนความดัน.....	144
รูปที่ 3.20 การใส่อากาศออกจากหลอดอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจน.....	145
รูปที่ 3.21 การปิดหลอดอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยจุกยาง.....	146
รูปที่ 3.22 การปิดหลอดอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยฝาอะลูมิเนียม.....	147
รูปที่ 3.23 การเคลือบสารอาหารเลี้ยงเชื้อแข็งเข้ากับผิวในของหลอดอาหาร ด้วยเทคนิคของฮังเกต.....	149
รูปที่ 3.24 วิธีการเติมสารอาหารที่เป็นก๊าซ.....	149
รูปที่ 3.25 วิธีการนับโคโลนีของแบคทีเรีย.....	150
รูปที่ 3.26 การเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นอะซิเตต.....	152
รูปที่ 3.27 การละลายน้ำของก๊าซและการแตกตัวของก๊าซละลายน้ำ.....	155
รูปที่ 3.28 สัดส่วนการใช้ซีไอดีของแบคทีเรียริติวซ์ซิลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน เมื่อไฮโดรเจนในระบบมีมากกว่าซีไอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียริติวซ์ซิลเฟต.....	158
รูปที่ 3.29 สัดส่วนการใช้ซีไอดีของแบคทีเรียริติวซ์ซิลเฟตและแบคทีเรียสร้างมีเทน เมื่อไฮโดรเจนในระบบมีน้อยกว่าซีไอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียริติวซ์ซิลเฟต.....	159
รูปที่ 4.1 พีเอชและสภาพต่างในการทดลองที่ 1.....	172
รูปที่ 4.2 ซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีในการทดลองที่ 1.....	173
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นซิลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดซิลเฟตในการทดลองที่ 1.....	175
รูปที่ 4.4 ซิลไฟด์น้ำออกในการทดลองที่ 1.....	177
รูปที่ 4.5 ค่าไออาร์พีในถังปฏิกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองที่ 1.....	178
รูปที่ 4.6 ปริมาณก๊าซในแต่ละวันในการทดลองที่ 1.....	180
รูปที่ 4.7 ปริมาณของแข็งแขวนลอยและของแข็งทั้งหมดในการทดลองที่ 1.....	181
รูปที่ 4.8 พีเอชและสภาพต่างในการทดลองที่ 2.....	186



## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 ซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีในการทดลองที่ 2.....	188
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นซัลเฟตและประสิทธิภาพการกำจัดซัลเฟตในการทดลองที่ 2.....	189
รูปที่ 4.11 ซัลไฟด์น้ำออกในการทดลองที่ 2.....	190
รูปที่ 4.12 ค่าไออาร์พีในถังปฏิกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองที่ 2.....	192
รูปที่ 4.13 ปริมาณก๊าซในแต่ละวันในการทดลองที่ 2.....	193
รูปที่ 4.14 ปริมาณของแข็งแขวนลอยและของแข็งทั้งหมดในการทดลองที่ 2.....	194
รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การไหลของอิเล็กตรอนที่แต่ละความเข้มข้นของซัลเฟต และสารอาหาร.....	205
รูปที่ 4.16 ค่าซีไอดีที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ.....	209
รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ.....	210
รูปที่ 4.18 ปริมาณซัลเฟตที่ถูกรีดิวซ์ที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ.....	211
รูปที่ 4.19 ปริมาณซัลเฟตในน้ำออกที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ.....	212
รูปที่ 4.20 การขนส่งซัลเฟตเข้าสู่เซลล์.....	213
รูปที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์ซัลเฟตรีดักชันที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ.....	215
รูปที่ 4.22 ซัลไฟด์ทั้งหมดในน้ำออกที่ความเข้มข้นของซัลเฟตต่าง ๆ.....	217
รูปที่ 4.23 ซัลไฟด์ในรูปต่าง ๆ ที่แต่ละความเข้มข้นซัลเฟต.....	220
รูปที่ 4.24 เปอร์เซ็นต์ซัลไฟด์ในรูปต่าง ๆ ที่แต่ละความเข้มข้นซัลเฟตหนึ่ง ๆ.....	220
รูปที่ 4.25 สภาพต่างในน้ำเสียและน้ำออกที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ.....	222
รูปที่ 4.26 พีเอชในน้ำเสียและน้ำออกที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ.....	222
รูปที่ 4.27 สัดส่วนการใช้สารอาหารในกรณีที่ซีไอดีจากไฮโดรเจนมากกว่า ซีไอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	232
รูปที่ 4.28 สัดส่วนการใช้สารอาหารในกรณีที่ซีไอดีจากไฮโดรเจนน้อยกว่า ซีไอดีที่ถูกใช้โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต.....	233
รูปที่ 4.29 ปริมาตรก๊าซทั้งหมดต่อวันที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 4กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน.....	238
รูปที่ 4.30 อัตราการผลิตก๊าซที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ.....	242
รูปที่ 4.31 สัดส่วนของก๊าซที่ความเข้มข้นซัลเฟตต่าง ๆ.....	243

### สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.32 ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซิลเฟตต่าง ๆ.....	245
รูปที่ 4.33 ของแข็งทั้งหมดที่ความเข้มข้นซิลเฟตต่าง ๆ.....	247
รูปที่ 4.34 ค่าไออาร์พีที่ความเข้มข้นซิลเฟตต่าง ๆ.....	248
รูปที่ 4.35 ปริมาณแบกที่เรียกที่ความเข้มข้นซิลเฟตต่าง ๆ.....	250



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย