


การบำบัดน้ำเสียจากศูนย์การค้าด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีเมมเบรนแบบจมตัว
ร่วมกับคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์



นางสาว ปรียานุช แสนโคตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

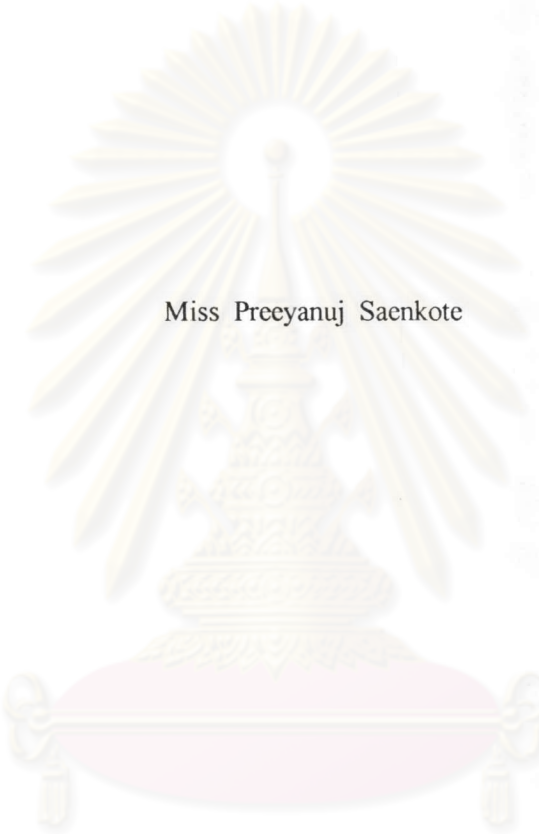
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2524-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEPARTMENT STORE WASTEWATER TREATMENT BY SUBMERGED MEMBRANE
BIOREACTOR COMBINED WITH IRON OXIDE-COATED SAND COLUMN



Miss Preeyanuj Saenkote

ศูนย์วิทยทรัพยากร
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 2002

ISBN 974-17-2524-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียจากศูนย์การค้าด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีเมมเบรนแบบ
จมตัวร่วมกับคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

โดย

นางสาว ปรียานุช แสนโคตร

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

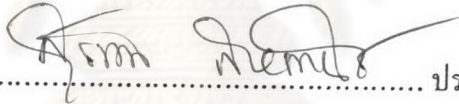
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

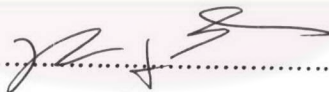


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



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



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชเรศ ศรีสถิตย์)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชา ขาวเขียว)

ปริยานุช แสนโคตร : การบำบัดน้ำเสียจากศูนย์การค้าด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีเมมเบรนแบบจมตัวร่วมกับคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ (Department Store Wastewater Treatment by Submerged Membrane Bioreactor Combined with Iron Oxide-Coated Sand Column) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 129 หน้า. ISBN 974-17-2524-8.

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากศูนย์การค้าด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีเมมเบรนแบบจมตัวร่วมกับคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยศึกษาความคงตัวของระบบ ประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษและคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด

ระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียว โดยการเติมอากาศเป็นช่วงๆเพื่อสร้างสภาวะสลับระหว่างแอโรบิกและแอนน็อกซิก ประสิทธิภาพของระบบมีความคงตัวสูง เมื่อไม่ควบคุมค่าอายุสลัดจ์ เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเฉลี่ย 94-98% และปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเฉลี่ย 80-93% โดยมีอัตราส่วนซีโอดีต่อทีเคเอ็นในน้ำเสีย 7.5-25.2 ผลต่างการสะสมเพิ่มของค่าทีเคเอ็นและไนโตรเจนช่วงแอนน็อกซิก-แอโรบิกจากการถูกจำกัดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันตามลำดับจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบเล็กน้อยขึ้นอยู่กับรอบเวลาการเติมอากาศ โดยรอบเวลาการเติมอากาศ 150 นาทีมีประสิทธิภาพสูงกว่ารอบเวลา 120 นาทีเล็กน้อย และเมื่อควบคุมอายุสลัดจ์ 50 วัน ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน โดยยังคงมีประสิทธิภาพสูงกว่า 92%

ระบบสามารถกำจัดความขุ่นและของแข็งแขวนลอยได้กว่า 99% กำจัดไนโตรเจน 80-93% และซีโอดี 97% ตลอดทุกการทดลอง มีค่าสีในน้ำออก 0.99 SU. และไม่พบพีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่เพื่อการอุปโภคตามแนวทางมาตรฐานเบื้องต้นของประเทศญี่ปุ่น

ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีเมมเบรนแบบจมตัวสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้เพียง 30% เมื่อไม่ควบคุมค่าอายุสลัดจ์ และเมื่อควบคุมอายุสลัดจ์ 50 วัน สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ 53% คอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ใช้ร่วมกับระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีเมมเบรนแบบจมตัวเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสที่เหลือในน้ำทิ้ง โดยเมื่อใช้เป็นคอลัมน์ต่อเนื่องสองคอลัมน์มีประสิทธิภาพกว่า 80% สามารถกำจัดฟอสฟอรัสเฉลี่ย 0.72 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส/กรัมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิติศ..... ๕ ธันวาคม ๒๕๖๕
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2545.....

4270413321: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: SMBR / IRON OXIDE-COATED SAND / INTERMITTENT AERATION

PREEYANUJ SAENKOTE : THESIS TITLE. (DEPARTMENT STORE WASTEWATER TREATMENT BY SUBMERGED MEMBRANE BIOREACTOR COMBINED WITH IRON-OXIDE COATED SAND). THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHAWALIT RATTANATAMSKUL, Ph.D., 129 pp. ISBN

This research studied the efficiency of Submerged Membrane Bioreactor (SMBR) combined with Iron-Oxide Coated Sand system for treatment of Department store wastewater. The experiment investigated the stability of the membrane process, the treatment efficiency and the quality of treated water.

The system can remove the organic and nitrogen in single reactor. The intermittent aeration is applied to make possible switching between the aerobic and anoxic condition. The efficiency of nitrification when sludge age is infinite is 94-98% and denitrification efficiency is 80-93% COD/TKN ratio varied from 7.5-25.2. The accumulated differential of TKN and NO_3 in anoxic and aerobic period resulted from nitrification and denitrification reaction-limited respectively, would slightly affect the efficiency of the system, depending on the aeration period. Intermittent aeration period 150 minute gives slightly better result of nitrogen removal than 120 minute. When operate with sludge age for 50 days the nitrogen removal efficiency had not affected that still high as 92%.

The system can remove higher than 99% of turbidity and SS, 80-93% of nitrogen and 97% of COD through the experiment. Treated water has the average color intensity of 0.99 SU and fecal coliform bacteria is not detectable. The quality of treated water is reached the standard quality of reclaimed water for nonportable uses of guideline for standard of water quality of Japan.

The SMBR system can remove phosphorus only 30% when sludge age is infinite and can remove up to 53% when keep sludge age 50 days. Iron-Oxide coated sand 2 columns in series are use for removal phosphorus that remain in treated water from SMBR system. The efficiency of series column is about 80% that have capacity 0.72 mg.P/g.coated sand

Department :.....Environmental Engineering..

Student's signature.....

Preeyanuj Saenkote

Field of study :.....Environmental Engineering..

Advisor's signature.....

Chawalit Rattanatamskul

Academic year :.....2002.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำในเรื่องต่างๆตลอดจนกรุณาช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณบุคลากรแผนกสาขาภิบาลและดับเพลิง ฝ่ายวิศวกรรมอาคารมานูญครอง เซ็นเตอร์ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่บริเวณระบบบำบัดน้ำเสีย และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆอย่างเต็มที่

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบุคคลในครอบครัวทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกด้านแก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และน้องทุกคนที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือ และห่วงใยซึ่งกันและกันตลอดการทำงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 น้ำเสีย.....	3
2.1.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย.....	3
2.1.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอาคารสูง.....	3
2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ Activated sludge.....	5
2.2.1 องค์ประกอบในการทำงานของระบบเอ เอส.....	5
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบเอ เอส.....	6
2.3 การกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสีย.....	7
2.3.1 กระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ.....	7
2.3.2 กระบวนการไนตริฟิเคชัน.....	7
2.3.3 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน.....	9
2.3.4 ปฏิกริยาเอสเอ็นดี.....	10
2.3.5 การประยุกต์กระบวนการเอ เอส ในการกำจัดไนโตรเจน.....	11
2.4 กระบวนการเมมเบรน.....	13
2.4.1 เมมเบรนเทคโนโลยี.....	13
2.4.2 โมดูลชนิดต่างๆในกระบวนการเมมเบรน.....	14
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเมมเบรน.....	18

	หน้า
2.4.4 การประยุกต์ใช้เมมเบรนในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ	18
2.5 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนแบบจมตัว SMBR	20
2.5.1 หลักการของระบบ SMBR	20
2.5.2 การทำงานของระบบ SMBR	20
2.5.3 ปัจจัยทางเทคนิคที่มีผลต่อการทำงานของระบบ SMBR	22
2.6 การกำจัดฟอสฟอรัส	23
2.7 การคูดัดผิว	23
2.8 ไฮดรอสโหลออกไซด์	25
2.8.1 การเกิดไฮดรอสเหล็ก	25
2.8.2 พื้นผิวไฮดรอสออกไซด์	26
2.8.3 คุณสมบัติของไฮดรอสเฟอริกออกไซด์	26
2.8.4 การคูดัดผิวของสารอนินทรีย์บนผิวสัมผัสของแข็งและของเหลว	27
2.8.5 การคูดัดผิวของไอออนบวกบนไฮดรอสโหลออกไซด์	27
2.8.6 การคูดัดผิวของไอออนลบบนไฮดรอสเฟอริกออกไซด์	28
2.8.7 Surface Complexation Model	29
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย	35
3.1 แผนการวิจัย	35
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	35
3.3 ส่วนประกอบและการควบคุมการทำงานของระบบ SMBR	37
3.3.1 ระบบจ่ายน้ำเข้าและนำน้ำออกจากถังปฏิกรณ์	37
3.3.2 การทำงานของถังปฏิกรณ์	38
3.4 ตัวแปรในการทดลอง	38
3.4.1 ตัวแปรอิสระ	38
3.4.2 ตัวแปรคงที่	38
3.4.3 ตัวแปรตาม	39
3.5 ขั้นตอนและการดำเนินการวิจัย	39
3.6 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์	43

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	44
4.1 ลักษณะน้ำเสียจากอาคาร.....	44
4.2 ผลของค่าฟลักซ์ ความเข้มข้นสลักจ์จุลชีพต่อสถานะคงตัว.....	45
4.2.1 ค่าฟลักซ์.....	45
4.2.2 ความเข้มข้นของสลักจ์จุลชีพในถังปฏิกรณ์และสลักจ์สะสมผิวหน้าเมมเบรน.....	45
4.3 ผลของตัวแปรในการทดลองต่อการทำงานของไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน.....	46
4.3.1 ผลของค่าอายุตะกอนและความเข้มข้นสลักจ์จุลชีพในถังปฏิกรณ์.....	48
4.3.2 ผลของการเติมอากาศ ฉีดพ่นอากาศ ป้อนหมุนเวียนน้ำ.....	50
4.4 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ SMBR.....	52
4.4.1 อุณหภูมิ.....	52
4.4.2 ออกซิเจนละลาย.....	53
4.4.3 พีเอช.....	54
4.4.4 การกำจัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่น.....	54
4.4.5 การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีไอดี.....	60
4.4.6 การกำจัดไนโตรเจนของระบบ SMBR.....	61
4.4.7 สมดุลมวลของไนโตรเจนทั้งหมด.....	63
4.4.8 ผลของรอบเวลาการเติมอากาศเป็นช่วงๆต่อการกำจัดไนโตรเจน.....	65
4.4.9 ผลวิเคราะห์ค่าทีเคเอ็น ไนเตรท ไนไตรท์ ในน้ำทิ้งครบรอบการทำงาน.....	66
4.4.10 ผลของการควบคุมอายุสลักจ์ต่อการกำจัดไนโตรเจน.....	74
4.4.11 การเกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดีในฟ্লอค.....	77
4.4.12 จลนศาสตร์การออกแบบระบบ SMBR.....	78
4.5 การกำจัดฟอสฟอรัสของระบบ SMBR.....	80
4.6 การกำจัดฟอสฟอรัสโดยคอลลิมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	83
4.6.1 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสที่อัตราไหลต่างๆ.....	83
4.6.2 ความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	83
4.7 คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบ SMBR.....	86
4.7.1 มาตรฐานคุณภาพการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่.....	86
4.7.2 คุณภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบ SMBR.....	88
4.8 การประเมินต้นทุนการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ SMBR.....	90

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการวิจัย	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	94
รายการอ้างอิง	95
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง	100
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analysis)	119
ภาคผนวก ค ผลวิเคราะห์ X-Ray fluorescence spectrometer	121
ภาคผนวก ง การวัดค่าความดันความเร็วในท่อลม	123
ภาคผนวก จ รายละเอียดถึงปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน	125
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	129



 ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียจากอาคารประเภทต่างๆในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล.....	4
ตารางที่ 2.2 แสดงค่า Specific surface area และ exchange capacity ของสารดูดติดผิวต่าง ๆ	28
ตารางที่ 3.1 รูปแบบการทำงานของระบบ SMBR.....	38
ตารางที่ 3.2 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินการทดลองระบบ SMBR	40
ตารางที่ 3.3 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินการทดลองคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์	42
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์.....	43
ตารางที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียจากกลุ่มอาคารศูนย์การค้ามาบุญครอง.....	45
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์แรงดันในการกรองและความเข้มข้นสัจจุลชีพ	48
ตารางที่ 4.3 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ ออกซิเจนละลายน้ำ และพีเอช ระหว่างการทดลอง	54
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการกำจัดของแข็งแขวนลอยและความขุ่นการทดลองที่ 1-3.....	57
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีการทดลองที่ 1-3.....	60
ตารางที่ 4.6 สรุปผลการกำจัดไนโตรเจนที่สภาวะคงตัวเฉลี่ยการทดลองที่ 1 และ 2	66
ตารางที่ 4.7 สรุปผลการกำจัดไนโตรเจนที่สภาวะคงตัวเฉลี่ยการทดลองที่ 3	74
ตารางที่ 4.8 ปริมาณของอนุภาคขนาดต่างๆในระบบ SMBR	77
ตารางที่ 4.9 ความลึกของออกซิเจนที่ซึมเข้าฟลોકการทดลองที่ 3.....	78
ตารางที่ 4.10 อัตราการกำจัดซีโอดี ในตรีพีเคชั่น ดีไนตรีพีเคชั่น และการใช้ออกซิเจนของจุลชีพ.....	79
ตารางที่ 4.11 สมดุลมวลฟอสฟอรัสที่สภาวะคงตัวเฉลี่ยแต่ละการทดลอง	81
ตารางที่ 4.12 สรุปค่าเฉลี่ยตัวแปรต่างๆจากการทดลอง.....	83
ตารางที่ 4.13 แนวทางการกำหนดคุณภาพน้ำขั้นต้นในการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่.....	87
ตารางที่ 4.14 ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำที่นำกลับมาใช้ภายในอาคารของประเทศญี่ปุ่น	87
ตารางที่ 4.15 คุณภาพน้ำทิ้งเฉลี่ยที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบ SMBR และคอลัมน์ ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์	88
ตารางที่ 4.16 รายการประเมินต้นทุนการประกอบสร้างชุดทดลองระบบ SMBR.....	90
ตารางที่ 4.17 การคำนวณและผลการประเมินค่าใช้จ่ายการบำบัดน้ำเสียต่อหน่วยปริมาตร	91

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ลักษณะฟลอคที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเอ็นดี.....	10
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างกระบวนการกำจัดไนโตรเจนแบบรวม.....	12
รูปที่ 2.3	ชนิดของเมมเบรนและช่วงขนาดอนุภาคสารต่างๆที่สามารถกักแยกได้.....	14
รูปที่ 2.4	Tubular Membrane Module.....	15
รูปที่ 2.5	Spiral Wound Membrane Module.....	15
รูปที่ 2.6	Plate and Frame Module.....	16
รูปที่ 2.7	ลักษณะผิวของเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง.....	16
รูปที่ 2.8	Hollow Fiber Membrane Module (Pressure Vessel).....	17
รูปที่ 2.9	Hollow Fiber Membrane Module (No Pressure Vessel) แบบติดตั้งจมใต้น้ำ.....	17
รูปที่ 2.10	Dead End Filtration และ Cross Flow Filtration.....	19
รูปที่ 2.11	การประยุกต์ใช้งาน MF/UF Membrane ในการบำบัดน้ำเสีย.....	21
รูปที่ 2.12	รูปตัดพื้นผิวโลหะออกไซด์.....	26
รูปที่ 2.13	การดูดติดผิวบนสารประกอบของไอออนประจุลบ.....	28
รูปที่ 2.14	รูปจินตนาการที่ชี้ให้เห็นถึงการลดลงของศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับระยะทาง ที่ห่างจากพื้นผิวใน Triple layer model.....	29
รูปที่ 2.15 ก	Surface Complex ของอออนบนพื้นผิวไฮดรอกไซด์.....	30
รูปที่ 2.15 ข	แบบจำลองพื้นผิวไฮดรอกไซด์ แสดงรูปการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ที่พื้นผิว inner-sphere complex, outer-sphere complex และ the diffuse layer.....	30
รูปที่ 4.1 ก	ความเข้มข้นสัณฐานจุลชีพในถังปฏิกรณ์การทดลองที่ 1.....	47
รูปที่ 4.1 ข	ความเข้มข้นสัณฐานจุลชีพในถังปฏิกรณ์การทดลองที่ 2.....	47
รูปที่ 4.1 ค	ความเข้มข้นสัณฐานจุลชีพในถังปฏิกรณ์การทดลองที่ 3.....	47
รูปที่ 4.2 ก	ค่าฟลักซ์และความดันสูญเสยรวมของไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนการทดลองที่ 1.....	49
รูปที่ 4.2 ข	ค่าฟลักซ์และความดันสูญเสยรวมของไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนการทดลองที่ 2.....	49
รูปที่ 4.2 ค	ค่าฟลักซ์และความดันสูญเสยรวมของไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนการทดลองที่ 3.....	49
รูปที่ 4.3 ก	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและออกซิเจนละลายน้ำช่วงแอโรบิกในถังปฏิกรณ์ การทดลองที่ 1.....	55
รูปที่ 4.3 ข	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและออกซิเจนละลายน้ำช่วงแอโรบิกในถังปฏิกรณ์ การทดลองที่ 2.....	55

รูปที่ 4.3 ค การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและออกซิเจนละลายน้ำช่วงแอโรบิกในถังปฏิกรณ์ การทดลองที่ 3	55
รูปที่ 4.4 ก พีเอชในน้ำเสีย ถึงปฏิกรณ์ และน้ำทิ้งการทดลองที่ 1.....	56
รูปที่ 4.4 ข พีเอชในน้ำเสีย ถึงปฏิกรณ์ และน้ำทิ้งการทดลองที่ 2.....	56
รูปที่ 4.4 ค พีเอชในน้ำเสีย ถึงปฏิกรณ์ และน้ำทิ้งการทดลองที่ 3.....	56
รูปที่ 4.5 ก ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยการทดลองที่ 1	58
รูปที่ 4.5 ข ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยการทดลองที่ 2	58
รูปที่ 4.5 ค ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยการทดลองที่ 3	58
รูปที่ 4.6 ก ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นการทดลองที่ 1	59
รูปที่ 4.6 ข ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นการทดลองที่ 2.....	59
รูปที่ 4.6 ค ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นการทดลองที่ 3	59
รูปที่ 4.7 ก ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์การทดลองที่ 1.....	62
รูปที่ 4.7 ข ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์การทดลองที่ 2.....	62
รูปที่ 4.7 ค ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์การทดลองที่ 3.....	62
รูปที่ 4.8 ก ประสิทธิภาพปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันการทดลองที่ 1	67
รูปที่ 4.8 ข ประสิทธิภาพปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันการทดลองที่ 2	67
รูปที่ 4.9 ก สัดส่วนมวลของทีเคเอ็นภายในเซลล์จุลชีพการทดลองที่ 1	68
รูปที่ 4.9 ข สัดส่วนมวลของทีเคเอ็นภายในเซลล์จุลชีพการทดลองที่ 2	68
รูปที่ 4.10 ก ประสิทธิภาพปฏิกิริยาคีโนตริฟิเคชันและการกำจัดไนโตรเจนรวมการทดลองที่ 1 ..	69
รูปที่ 4.10 ข ประสิทธิภาพปฏิกิริยาคีโนตริฟิเคชันและการกำจัดไนโตรเจนรวมการทดลองที่ 2 ..	69
รูปที่ 4.11 ก อัตราส่วนซีโอไซด์ต่อไนโตรเจนการทดลองที่ 1	70
รูปที่ 4.11 ข อัตราส่วนซีโอไซด์ต่อไนโตรเจนการทดลองที่ 2.....	70
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน การทดลองที่ 1 และ 2.....	71
รูปที่ 4.13 ก การเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีครบรอบการทำงานการทดลองที่ 1.....	72
รูปที่ 4.13 ข การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายน้ำครบรอบการทำงานการทดลองที่ 1	72
รูปที่ 4.13 ค ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าทีเคเอ็นและไนเตรทในน้ำทิ้งครบรอบการทำงาน การทดลองที่ 1	72
รูปที่ 4.14 ก การเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีครบรอบการทำงานการทดลองที่ 2.....	73
รูปที่ 4.14 ข การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายน้ำครบรอบการทำงานการทดลองที่ 2.....	73

รูปที่ 4.14 ค ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าที่เคเอ็นและไนเตรทในน้ำทิ้งครบรอบการทำงาน การทดลองที่ 2	73
รูปที่ 4.15 ก ประสิทธิภาพปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันการทดลองที่ 3	75
รูปที่ 4.15 ข ประสิทธิภาพปฏิกิริยาคีไนตริฟิเคชันและการกำจัดไนโตรเจนรวมการทดลองที่ 3 ...	75
รูปที่ 4.15 ค อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนการทดลองที่ 3.....	75
รูปที่ 4.16 ก การเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีครบรอบการทำงานการทดลองที่ 3.....	76
รูปที่ 4.16 ข การเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายน้ำครบรอบการทำงานการทดลองที่ 3.....	76
รูปที่ 4.16 ค ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าที่เคเอ็นและไนเตรทในน้ำทิ้งครบรอบการทำงาน การทดลองที่ 3	76
รูปที่ 4.17 สัดส่วนสภาวะแอนน็อกซิกต่อสภาวะการเติมออกซิเจนในฟล็อก.....	78
รูปที่ 4.18 แนวโน้มสัดส่วนจุลชีพไนตริไฟอิง์ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อที่เคเอ็นในน้ำเสียต่างๆ	80
รูปที่ 4.19 ก ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบ SMBR การทดลองที่ 1	82
รูปที่ 4.19 ข ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบ SMBR การทดลองที่ 2	82
รูปที่ 4.19 ค ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบ SMBR การทดลองที่ 3	82
รูปที่ 4.20 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ออกจากคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่อัตราการกรอง 0.39 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.....	84
รูปที่ 4.21 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ออกจากคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่อัตราการกรอง 0.58 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม.....	84
รูปที่ 4.22 การสะสมของปริมาณฟอสฟอรัสในคอลัมน์ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์	85
รูปที่ 4.23 ความสามารถในการกำจัดฟอสฟอรัสของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	85