# การกำจัดไนเตรตจากน้ำด้วยกระบวนการออโตโทรฟิก ดีไนตริฟิเคชันในถังกรองชัลเฟอร์-หินปูน

นาย กิตติ เกษตรธรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2535

ISBN 974-582-054-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018474 1147200003

# Nitrate Removal From Water Using Autotrophic Denitrification Process In A Sulfur - Limestone Filter

Mr. KITTI KASATETHAM

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Environmental Engineering

Graduate School

Chulalongkron University

1992

ISBN 974-582-054-7

| | |
|---|---|
| **หัวข้อวิทยานิพนธ์** | การกำจัดไนเตรตจากน้ำด้วยกระบวนการออโตโทรฟิก ดีไนตริฟิเคชันในถังกรองทัลเฟอร์-หินปูน |
| **โดย** | นาย กิตติ เกษตรธรรม |
| **ภาควิชา** | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| **อาจารย์ที่ปรึกษา** | รองศาสตรจารย์ ดร.มั่นสิน ตัลทุลเวศม์ |

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

**คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์**

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตรจารย์ ดร.ธีระ เกรอต)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ พรประภา)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

กิตติ เกษตรธรรม : การกำจัดไนเตรตจากน้ำด้วยกระบวนการออโตโทรฟิกดีไนตริฟิเคชันในถังกรองซัลเฟอร์ - หินปูน (NITRATE REMOVAL FROM WATER USING AUTOTROPHIC DENITRIFICATION PROCESS IN A SULFUR - LIMESTONE FILTER) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 167 หน้า.ISBN 974-582-054-7

ความมุ่งหมายของการศึกษาวิจัยนี้ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ถังกรองเอดี เพื่อกำจัดไนเตรตจากน้ำด้วยกระบวนการออโตโทรฟิกดีไนตริฟิเคชัน โดยทำการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นมาจากสารโปแตสเซียมไนเตรต และสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิด Thiobacillus denitrificans กำหนดให้ความเข้มข้นของไนเตรตที่ใช้ในการวิจัยประมาณ 25,50 และ 75 มก.ไนโตรเจน/ล. และกำหนดระยะเวลากักเก็บน้ำของถังเอดี 2 ระดับ คือ 10 และ 20 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่า กระบวนการออโตโทรฟิกดีไนตริฟิเคชันในถังกรองเอดี มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตจากน้ำได้ 100% ภายใต้ทุกสภาวะการทดลองตามที่กำหนด แต่การกำจัดไนเตรตจากน้ำด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้ มีข้อเสียคือ ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณซัลเฟตและความกระด้างในน้ำ จากผลการทดลองสรุปได้ว่ามีประมาณซัลเฟตเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 7.32 มก./ล. ต่อปริมาณไนเตรตที่ถูกกำจัด 1 มก.ไนโตรเจน/ล. และมีการเพิ่มปริมาณความกระด้างให้แก่น้ำที่ผ่านระบบฯ จากผลการทดลองพบว่า มีปริมาณความกระด้างของน้ำเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 5.97 มก./ล. ต่อปริมาณไนเตรตที่ถูกกำจัด 1 มก.ไนโตรเจน/ล. นอกจากนี้ ยังพบว่ากระบวนการออโตโทรฟิกดีไนตริฟิเคชัน ต้องการฟอสเฟตประมาณ 0.004 มก./ล. ต่อปริมาณไนเตรตที่ถูกกำจัด 1 มก.ไนโตรเจน/ล.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต กิตติ เกษตรธรรม
สาขาวิชา วิศวกรรมสุขาภิบาล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

## C116619 : MAJOR SANITARY ENGINEERING
KEY WORD: NITRATE REMOVAL / AUTOTROPHIC DENITRIFICATION

KITTI KASATETHAM : NITRATE REMOVAL FROM WATER USING AUTOTROPHIC DENTRIFICATION PROCESS IN A SULFUR-LIMESTONE FILTER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. MUNSIN TUNTOOLAVEST, Ph.D. 167 PP. ISBN 974-582-054-7

The purpose of this study is to utilize Autotrophic Denitrification Filter for nitrate removal from water by using autotrophic denitrification process. The synthetic raw water was prepared from Potassium Nitrate and other necessary mineral nutrients for the growth of Thiobacillus denitrificans. The nitrate concentration of raw water was varied at 3 levels, i.e. 25,50 and 75 mg N/l and hydraulic retention time was varied at 2 levels, i.e. 10 and 20 hour respectively.

The results showned that the autotrophic denitrification process in A.D. filter could remove 100% of nitrate from the water under all experimental conditions. However, this process had few disadvantages since it increased the sulfate and hardness content of the treated water. From the experiments, approx 7.32 mg/l of sulfate and 5.79 mg/l of hardness were increased for very 1 mg N/l of nitrate being removed. It was also found that this process required approx 0.004 mg/l of phosphate for every 1 mg N/l of nitrate being removed.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต กิตติ กสธรรม

สาขาวิชา วิศวกรรมสุขาภิบาล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ด้วยความเคารพอย่างสูง ที่ท่านได้กรุณาให้คำชี้แนะแนวทางในการวิจัย อีกทั้งอบรมสั่งสอนให้เกิดวิจารณญาณในเชิงวิชาการและความใฝ่รู้ อันเป็นผลให้งานวิจัยนี้ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านด้วยความเคารพอย่างสูง ที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิทยาการต่าง ๆ และได้ให้ความอนุเคราะห์แก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และบริษัท SAN.E. 68 รวมทั้งพนักงานในบริษัท SAN.E.68 ทุกท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงแด่ บิดา-มารดา และขอขอบคุณน้องชายทั้งสองคน ที่สนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา และขอขอบพระคุณมาก ๆ สำหรับคุณวัลลภรณ์ ทรัพย์สำรวม ในความกรุณาของพี่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการเขียนงานวิจัย และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มา ณ ที่นี้ด้วย

คุณความดีอันพึงมีจากงานวิจัยครั้งนี้ ขอมอบแด่บิดา-มารดา และคณาจารย์ทุกท่าน

สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญเรื่อง..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญรูป..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 บทนำ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎี..... 5

2.1 สารประกอบไนโตรเจนและวัฏจักรไนโตรเจน..... 5

2.2 ชนิดของสารประกอบไนโตรเจนที่มีอยู่ในน้ำเสีย..... 6

2.3 เมตาบอลิซึ่มของสารประกอบอนินทรีย์..... 7

2.3.1 สารประกอบอนินทรีย์กำมะถัน..... 8

2.3.2 สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน..... 12

2.4 กระบวนการดีไนติรฟิเคชั่น..... 13

2.4.1 เฮ็ทเทอโรโทรฟิกดีไนซิฟิเคชั่น..... 15

2.4.2 ออโตโทรฟิกดีไนตริฟิเคชั่น..... 15

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ ออโตโทรฟิกดีไนตริฟิเคชั่น..... 17

2.5.1 แหล่งคาร์บอน..... 17

สารบัญ(ต่อ)

หน้า


2.5.2 พีเอช..... 18

2.5.3 อุณหภูมิ..... 18

2.5.4 ออกซิเจนละลายน้ำ..... 19

2.6 หลักการทำงานของเครื่องกรองเอดี..... 19

2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องกรองเอดี..... 20

2.7.1 ชนิดและคุณสมบัติของตัวกลาง..... 20

2.7.2 ระยะเวลากักเก็บน้ำ..... 20

2.8 การศึกษาที่ผ่านมา..... 22

บทที่ 3 แผนงานและการดำเนินการวิจัย..... 25

3.1 แผนการวิจัย..... 25

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย..... 26

3.3 การเตรียมน้ำดิบสังเคราะห์..... 27

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย..... 30

3.4.1 เครื่องกรองเอดี (Autotrophic Denitrification Filter)..... 30

3.4.2 เครื่องสูบน้ำ..... 31

3.4.3 ตัวกลาง..... 33

3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ..... 33

3.5.1 การเก็บตัวอย่างน้ำ..... 33

3.5.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ..... 34

3.5.3 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำและความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำ.... 35

สารบัญ(ต่อ)

หน้า


บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 37

4.1 การเริ่มต้นระบบ (strat up)..... 37

4.2 การเสนอผลการวิจัย..... 38

4.2.1 ค่าพีเอช (pH)..... 39

4.2.2 ระดับดีโอ (DO)..... 48

4.2.3 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)..... 57

4.2.4 ค่าความกระด้าง (Hardaness)..... 66

4.2.5 ค่าความขุ่น (Turbidity)..... 75

4.2.6 ค่าปริมาณฟอสเฟตรวม (Total Phosphate)..... 84

4.2.7 ค่าปริมาณซัลเฟต (Sulfate)..... 92

4.2.8 ไนเตรต..... 101

4.2.9 ไนโตรต์..... 110

4.3 การวิจารณ์ผลการวิจัย..... 119

4.3.1 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต..... 119

4.3.2 การเปรียบเทียบปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณไนเตรตที่ถูกกำจัด..... 122

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงของสภาพความเป็นด่างในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการออโตโทรฟิกดีไนตริฟิเคชั่น..... 124

4.3.4 การเปรียบเทียบปริมาณความกระด้างของน้ำที่เพิ่มกับปริมาณไนเตรตที่ถูกกำจัด..... 126

4.3.5 การเปรียบเทียบปริมาณฟอสเฟตที่ถูกใช้ไปกับปริมาณไนเตรตที่ถูกกำจัด..... 129

4.3.6 การเปรียบเทียบปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณไนเตรตโหลดดิ้ง..... 131


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.7 การเปรียบเทียบปริมาณความกระด้างของน้ำที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณไนเตรตโหลดดิ้ง..... 135

4.3.8 การเปรียบเทียบปริมาณฟอสเฟตที่ลดลงกับปริมาณไนเตรตโหลดดิ้ง..... 138

4.3.9 การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามต่าง ๆ ที่ตำแหน่งน้ำเข้าถังกรองฯและน้ำที่ออกจากถังกรองเอดีกับระยะเวลากักเก็บน้ำ. 141

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 144

เอกสารอ้างอิง..... 147

ภาคผนวก..... 152

ประวัติผู้เขียน..... 167

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า


ตารางที่ 1.1 ข้อมูลปริมาณสารไนเตรตที่สูงเกินมาตรฐานในจังหวัดมหาสารคาม พ.ศ. 2520-2532..... 2

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่กำหนดเป็นแผนการวิจัย..... 27

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไนเตรต 25 มก./ล. 28

ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไนเตรต 50 มก./ล. 29

ตารางที่ 3.4 ส่วนประกอบของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นไนเตรต 75 มก./ล. 30

ตารางที่ 3.5 แสดงตัวแปรเปลี่ยนตามที่วิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์..... 36

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของพีเอชในน้ำดิบ น้ำออกจากระบบฯ และน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตร จากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 46

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของระดับดีโอในน้ำดิบ และน้ำออกจากถังกรองเอดี..... 55

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยปริมาณความเป็นด่างรวมในน้ำดิบเข้าระบบฯ น้ำออกจากระบบฯ และน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 64

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยความกระด้างของน้ำในน้ำดิบเข้าระบบฯ น้ำออกจากระบบฯ และน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตร จากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา 73

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยของค่าความขุ่นในน้ำดิบเข้าระบบฯ, น้ำออกจากระบบฯ และน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตร..... 82

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสเฟตในน้ำดิบเข้าระบบฯ, น้ำออกจากระบบฯ และน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 90

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยปริมาณซัลเฟตในน้ำเสียเข้าระบบฯ, น้ำออกจากระบบฯ และน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 99

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยปริมาณไนเตรตในน้ำดิบเข้าระบบฯ น้ำออกจากระบบฯ และน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยของค่าปริมาณไนไตรต์ในน้ำดิบเข้าระบบถังกรองเอดี, ค่าปริมาณไนไตรต์ของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตร จากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าปริมาณไนไตรต์ในน้ำออกจากถังกรองเอดี..... 111

ตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณไนเตรตไหลดตั้งกับประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต ด้วยกระบวนการออโตโทรฟิกดีไนตริฟิเคชั่น ที่บริเวณน้ำออกจากถังกรองเอดี และที่บริเวณน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตร จากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 120

ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นต่อไนเตรตที่ถูกกำจัด ที่ตำแหน่งน้ำออกจากถังกรองเอดีและที่ตำแหน่งน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตร จากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 123

ตารางที่ 4.12 แสดงปริมาณความเป็นด่างที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งน้ำออกจากถังกรองเอดี และที่ตำแหน่งน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตร จากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 125

ตารางที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความกระด้างที่เพิ่มขึ้นต่อปริมาณไนเตรตที่ถูกกำจัดที่ตำแหน่งน้ำออกจากระบบถังกรองเอดีและที่ตำแหน่งน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 128

ตารางที่ 4.14 แสดงปริมาณซัลเฟตที่ลดลงหรือถูกใช้ไปต่อปริมาณไนเตรตที่ถูกกำจัดที่ตำแหน่งน้ำออกจากระบบถังกรองเอดีและตำแหน่งน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตร จากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 130

ตารางที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณไนเตรตไหลดตั้งกับปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งน้ำออกจาระบบถังกรองเอดีและตำแหน่งน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตร จากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 134

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณไนเตรตไหลดดิ้งกับปริมาณความกระด้างที่เพิ่มขึ้นของน้ำที่ตำแหน่งน้ำออกจากระบบถังกรองเอดีและที่ระยะความสูง 0.9 เมตร จากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 137
ตารางที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบไนเตรตไหลดดิ้งกับปริมาณฟอสเฟตที่ถูกใช้ไปของน้ำที่ตำแหน่งน้ำออกถังกรองเอดีและตำแหน่งน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตร จากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมา..... 140
ตารางที่ 4.18 แสดงค่าปริมาณของตัวแปรตามต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ ที่ตำแหน่งน้ำดิบสังเคราะห์เข้าระบบฯ..... 142
ตารางที่ 4.19 แสดงค่าปริมาณของตัวแปรตามต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ที่ตำแหน่งน้ำออกจากระบบฯ..... 143

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป

หน้า


รูปที่ 2.1 วัฏจักรของไนโตรเจน (Nitrogen cycle)..... 5

รูปที่ 2.2 วัฏจักรกำมะถัน..... 9

รูปที่ 2.3 รีดักชั่นของไธโอซัลเฟตโดย Thiobacillus denitrificans ที่เจริญในสภาพไร้ออกซิเจน..... 10

รูปที่ 2.4 Bicohemistry of Chemoautotrophic Sulfur Oxidation.... 12

รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยารีดักชั่นของไนเตรต..... 13

รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลากักเก็บน้ำ (ชม.) กับ ปริมาณไนเตรตในน้ำออกจากระบบฯ (มก./ล.as N.) ที่ขนาดอนุภาคของซัลเฟอร์ต่างๆ กัน..... 21

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของเครื่องกรองเอดี ขนาดต้นแบบ (Pilot Scale) ที่ใช้ในการวิจัย..... 32

รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องกรองเครื่องกรองเอดี ขนาดต้นแบบ (Pilot Scale)และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย..... 33

รูปที่ 4.1 แสดงระดับพีเอชของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ระดับพีเอชของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและระดับพีเอชของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(a))..... 40

รูปที่ 4.2 แสดงระดับพีเอชของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ระดับพีเอชของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและระดับพีเอชของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(b))..... 41

รูปที่ 4.3 แสดงระดับพีเอชของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ระดับพีเอชของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและระดับพีเอชของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(a))..... 42

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า


รูปที่ 4.4 แสดงระดับพีเอชของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ระดับพีเอชของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและระดับพีเอชของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(b))..... 43

รูปที่ 4.5 แสดงระดับพีเอชของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ระดับพีเอชของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและระดับพีเอชของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(a))..... 44

รูปที่ 4.6 แสดงระดับพีเอชของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ระดับพีเอชของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและระดับพีเอชของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(b))..... 45

รูปที่ 4.7 แสดงระดับดีโอของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดีและระดับดีโอของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(a))..... 49

รูปที่ 4.8 แสดงระดับดีโอของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดีและระดับดีโอของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(b))..... 50

รูปที่ 4.9 แสดงระดับดีโอของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดีและระดับดีโอของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(a))..... 51

รูปที่ 4.10 แสดงระดับดีโอของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดีและระดับดีโอของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(b))..... 52

รูปที่ 4.11 แสดงระดับดีโอของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดีและระดับดีโอของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(a))..... 53

รูปที่ 4.12 แสดงระดับดีโอของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดีและระดับดีโอของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(b))..... 54

รูปที่ 4.13 แสดงค่าความเป็นด่างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความเป็นด่างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความเป็นด่างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(a))..... 58

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า


รูปที่ 4.14 แสดงค่าความเป็นด่างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความเป็นด่างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความเป็นด่างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(b)).... 59

รูปที่ 4.15 แสดงค่าความเป็นด่างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความเป็นด่างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความเป็นด่างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(a)).... 60

รูปที่ 4.16 แสดงค่าความเป็นด่างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความเป็นด่างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความเป็นด่างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(b)).... 61

รูปที่ 4.17 แสดงค่าความเป็นด่างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความเป็นด่างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความเป็นด่างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(a)).... 62

รูปที่ 4.18 แสดงค่าความเป็นด่างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความเป็นด่างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความเป็นด่างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(b)).... 63

รูปที่ 4.19 แสดงค่าความกระด้างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความกระด้างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความกระด้างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(a)).... 67

รูปที่ 4.20 แสดงค่าความกระด้างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความกระด้างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความกระด้างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(b)).... 68

รูปที่ 4.21 แสดงค่าความกระด้างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความกระด้างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความกระด้างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(a)).... 69

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า


รูปที่ 4.22 แสดงค่าความกระด้างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความกระด้างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความกระด้างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(b))..... 70

รูปที่ 4.23 แสดงค่าความกระด้างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความกระด้างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความกระด้างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(a))..... 71

รูปที่ 4.24 แสดงค่าความกระด้างของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความกระด้างของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความกระด้างของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(b))..... 72

รูปที่ 4.25 แสดงค่าความขุ่นของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความขุ่นของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความขุ่นของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(a))..... 76

รูปที่ 4.26 แสดงค่าความขุ่นของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความขุ่นของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความขุ่นของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(b))..... 77

รูปที่ 4.27 แสดงค่าความขุ่นของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความขุ่นของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความขุ่นของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(a))..... 78

รูปที่ 4.28 แสดงค่าความขุ่นของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความขุ่นของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความขุ่นของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(b))..... 79

รูปที่ 4.29 แสดงค่าความขุ่นของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความขุ่นของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความขุ่นของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(a))..... 80

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า


รูปที่ 4.30 แสดงค่าความขุ่นของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ค่าความขุ่นของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและค่าความขุ่นของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(b)).:..... 81

รูปที่ 4.31 แสดงปริมาณฟอสเฟตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณฟอสเฟตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(a))..  86

รูปที่ 4.32 แสดงปริมาณฟอสเฟตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณฟอสเฟตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(b))..  87

รูปที่ 4.33 แสดงปริมาณฟอสเฟตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณฟอสเฟตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(a))..... 88

รูปที่ 4.34 แสดงปริมาณฟอสเฟตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณฟอสเฟตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(b))..  89

รูปที่ 4.35 แสดงปริมาณซัลเฟตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณซัลเฟตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณซัลเฟตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(a))..... 93

รูปที่ 4.36 แสดงปริมาณซัลเฟตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณซัลเฟตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณซัลเฟตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(b))..... 94

รูปที่ 4.37 แสดงปริมาณซัลเฟตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณซัลเฟตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณซัลเฟตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(a))..... 95

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า


รูปที่ 4.38 แสดงปริมาณซัลเฟตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณซัลเฟตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณซัลเฟตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(b))..... 96

รูปที่ 4.39 แสดงปริมาณซัลเฟตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณซัลเฟตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณซัลเฟตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(a))..... 97

รูปที่ 4.40 แสดงปริมาณซัลเฟตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณซัลเฟตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณซัลเฟตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(b))..... 98

รูปที่ 4.41 แสดงปริมาณไนเตรตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนเตรตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนเตรตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(a)).. 102

รูปที่ 4.42 แสดงปริมาณไนเตรตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนเตรตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนเตรตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(b)).. 103

รูปที่ 4.43 แสดงปริมาณไนเตรตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนเตรตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนเตรตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(a))..... 104

รูปที่ 4.44 แสดงปริมาณไนเตรตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนเตรตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนเตรตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(b))..... 105

รูปที่ 4.45 แสดงปริมาณไนเตรตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนเตรตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนเตรตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(a))..... 106

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า


รูปที่ 4.46 แสดงปริมาณไนเตรตของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนเตรตของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนเตรตของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(b))..... 107

รูปที่ 4.47 แสดงปริมาณไนไตรต์ของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนไตรต์ของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนไตรต์ของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(a))..... 113

รูปที่ 4.48 แสดงปริมาณไนไตรต์ของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนไตรต์ของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนไตรต์ของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 1(b))..... 114

รูปที่ 4.49 แสดงปริมาณไนไตรต์ของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนไตรต์ของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนไตรต์ของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(a))..... 115

รูปที่ 4.50 แสดงปริมาณไนไตรต์ของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนไตรต์ของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนไตรต์ของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 2(b))..... 116

รูปที่ 4.51 แสดงปริมาณไนไตรต์ของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนไตรต์ของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนไตรต์ของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(a))..... 117

รูปที่ 4.52 แสดงปริมาณไนไตรต์ของน้ำเสียเข้าถังกรองเอดี,ปริมาณไนไตรต์ของน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและปริมาณไนไตรต์ของน้ำทิ้งจากถังกรองฯ (การทดลองชุดที่ 3(b))..... 118

รูปที่ 4.53 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตกับปริมาณไนเตรตโหลดดิ้ง ที่ตำแหน่งน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯ ขึ้นมาและที่ตำแหน่งน้ำทิ้งจากถังกรองฯ..... 121

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.54 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณไนเตรตโหลดดิ้ง ที่ตำแหน่งน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและที่ตำแหน่งน้ำทิ้งจากถังกรองฯ..... 133

รูปที่ 4.55 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความกระด้างที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณไนเตรตโหลดดิ้งที่ตำแหน่งน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและที่ตำแหน่งน้ำทิ้งจากถังกรองฯ..... 136

รูปที่ 4.56 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณฟอสเฟตที่ถูกใช้กับปริมาณไนเตรตโหลดดิ้ง ที่ตำแหน่งน้ำที่ระยะความสูง 0.9 เมตรจากด้านล่างของถังกรองฯขึ้นมาและที่ตำแหน่งน้ำทิ้งจากถังกรองฯ..... 139

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย