การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน

นางสาว ธาริณี วัฒนเดชาชาญ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545
ISBN 974-17-2671-6
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21049440

REACTIVE DYE REMOVAL USING HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND

Miss.Tarinee Wattanadachachan

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 974-17-2671-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน
โดย	นางสาว ธาริณี วัฒนเดชาชาญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สายพานิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธาริณี วัฒนเดชาชาญ : การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน. (REACTIVE DYE REMOVAL USING HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND) อ. ที่ปรึกษา : รศ.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 179 หน้า. ISBN 974-17-2671-6.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอนที่ปลูกต้นธูปฤาษีในตัวกลางทราย เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนสีย้อมต่อสารอาหารร่วม,ระยะเวลาเก็บกักและรูปแบบการปลูกพืชที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี โดยปรับเปลี่ยนตัวแปรในการทดลองดังนี้ 1).อัตราส่วนสีย้อมต่อน้ำตาลในรูปซีโอดี 3 ค่า คือ 1:0 1:5 และ 1:10 2).ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียที่เหมาะสมในบึงประดิษฐ์ 3 ค่า คือ 3 วัน 5 วัน และ 7 วัน และ 3) รูปแบบการปลูกพืช 2 แบบคือ เต็มบึงและครึ่งบึง นอกจากนี้ยังได้ทดลองศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของบึงประดิษฐ์ที่สภาวะที่เหมาะสมมาทดลองใช้น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วย จากผลการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์สีแดง (C.I.Reactive Red 180) ความเข้มข้น 100 มก./ล. พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีคือที่อัตราส่วนสีย้อมต่อน้ำตาลเท่ากับ 1:5, ที่เวลาเก็บกักน้ำ 5 วัน และปลูกพืชเต็มบึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีเท่ากับร้อยละ 82 และ 83 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถกำจัด บีโอดี ทีเคเอ็น เท่ากับร้อยละ 99 และ 89 ตามลำดับ และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารอาหารและเวลาเก็บกักประสิทธิภาพการกำจัดสีจะสูงขึ้นเล็กน้อย จากผลการทดลองน้ำเสียจริงกำหนดให้มีระยะเวลาเก็บกัก 7 วัน และปลูกพืชเต็มบึง พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดสี,ซีโอดีและทีเคเอ็นได้ดีเท่ากับร้อยละ 61 65 และ 72 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต...ธาริณี วัฒนเดชาชาญ...
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา...อรทัย ชวาลภาฤทธิ์...
ปีการศึกษา 2545

##4370339721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORDS : CONSTRUCTED WETLAND / REACTIVE DYE/ DECOLORIZATION

TARINEE WATTANADACHACHAN : REACTIVE DYE REMOVAL USING HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND.THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. ORRATHAI CHAVALPARIT,179 pp. ISBN 974-17-2671-6

The objective of this research was to study the feasibility of reactive dye removal in waste water by using horizontal subsurface flow constructed wetland planted with *Typha Angustifolia* in gravel bed. This research investigated the influence of ratio of reactive dye to carbon source , retention time and plant growing pattern. Ratio of reactive dye to carbon source in the form of COD was varied at 1:0 1:5 and 1:10. Retention time was varied at 3,5 and 7 days while plant growing pattern was varied at half unit and full unit. In addition, the research studied the removal efficiency of dye at optimum for real application to treat wastewater from Textile Dye Industry. The results revealed that, the optimal removal efficiencies of dye and COD in synthetic waste water which was prepared at concentration of 100 mg/l. red reactive dye were achieved at 82% and 83%, respectively at dye to sucrose ratio at 1:5 and retention time at 5 day. In addition removal efficiencies of BOD and TKN were achieved at 99% and 89%, respectively. The result showed that removal efficiency of dye slightly increased when the ratio of dye to nutrient and retention time increased too. The result from treating real wastewater from textile factory showed that removal efficiencies of dye , COD and TKN were achieved at 61%, 65% and 72%, respectively.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Environmental Engineering Student 's signature Tarinee Wattanadachachan

Field of study : Environmental Engineering Advisor 's signature Orathai Chavalparit

Academic year : 2002

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทาง รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุรพล สายพานิช ผศ.ดร.เชาวลิต รัตนธรรมสกุล และ อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ ที่ช่วยชี้แนะแนวทางทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้วิจัย

ขอขอบคุณเจ้าที่ห้องปฏิบัติการและธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณกองทุนเพื่อการศึกษามูลนิธิชิน โสภณพนิช และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนให้ทุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ทวี ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องไมโครโตรม

ขอขอบคุณ คุณ วิทูรย์ อึ้งประเสริฐ และคุณ กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ รวมถึงพี่ๆ น้อง ๆ และเพื่อน ๆ ทุกท่านที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และพี่ของผู้วิจัย ซึ่งสนับสนุนและให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ฎ
สารบัญรูป.....ฑ
สารบัญภาพ.....ณ
บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความเป็นมา.....1
1.2 วัตถุประสงค์.....2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4
2.1 บึงประดิษฐ์.....4
2.1.1 ประเภทของบึงประดิษฐ์.....4
2.1.2 องค์ประกอบของบึงประดิษฐ์.....7
2.1.2.1 พืช.....7
2.1.2.2 จุลินทรีย์.....12
2.1.2.3 น้ำ.....12
2.1.2.4 ชั้นของตัวกลาง.....12
2.1.3 กลไกการบำบัดในบึงประดิษฐ์.....13
2.1.3.1 การกำจัดของแข็งที่ตกตะกอนได้และของแข็งแขวนลอย.....14
2.1.3.2 การกำจัดสารอินทรีย์.....14
2.1.3.3 การกำจัดไนโตรเจน.....14
2.1.3.4 การกำจัดฟอสฟอรัส.....15
2.1.3.5 การกำจัดเชื้อโรค.....15
2.1.3.6 การกำจัดโลหะหนัก.....15
2.1.3.7 การกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยยาก.....15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.4 เกณฑ์ในการออกแบบบึงประดิษฐ์.....16
2.1.4.1 อัตราภาระสารอินทรีย์.....16
2.1.4.2 เวลากักเก็บน้ำ.....16
2.2 การมองเห็นสี.....17
2.3 สีย้อม.....17
2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม.....17
2.3.2 การเกิดของสีย้อม.....18
2.3.3 การจำแนกสีย้อม.....19
2.3.4 สีย้อมรีแอกทีฟ.....27
2.3.4.1 ประวัติของสีรีแอกทีฟ.....27
2.3.4.2 คุณสมบัติของสีรีแอกทีฟ.....27
2.3.4.3 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ.....28
2.3.4.4 กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี.....28
2.3.4.5 กลุ่มรีแอกทีฟ.....29
2.3.5 การกำจัดสีในน้ำเสียโรงฟอกย้อม.....30
2.3.5.1 การกำจัดสีโดยวิธีทางกายภาพ.....31
2.3.5.2 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางเคมี.....33
2.3.5.3 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางชีวภาพ.....34
2.3.5.4 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในการกำจัดสีย้อมแบบแอนแอโรบิก.....36
2.4 งานวิจัยที่ผ่านมา.....40
2.4.1 งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้บึงประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสีย.....40
2.4.2 งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการลดสีย้อม.....41
บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย.....48
3.1 แผนการทดลอง.....48
3.2 ตัวแปรที่ศึกษา.....52
3.2.1 ตัวแปรต้น.....52
3.2.2 ตัวแปรกำหนด.....52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3 ตัวแปรตาม.....52
3.3 น้ำเสีย.....52
3.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....52
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....53
3.4.1 ถังเก็บน้ำเสียสังเคราะห์และถังรองน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว.....54
3.4.2 บึงประดิษฐ์.....54
3.4.3 จุดเก็บตัวอย่าง.....55
3.4.4 ตัวกลาง.....56
3.4.5 พืช.....56
3.4.6 ทางน้ำเข้า และออก.....56
3.4.7 เครื่องสูบน้ำ.....57
3.5 การเก็บตัวอย่างน้ำเสียและการวิเคราะห์.....57
3.5.1 จุดเก็บตัวอย่าง.....57
3.5.2 จุดเก็บตัวอย่าง พารามิเตอร์ และความถี่ในการวิเคราะห์.....57
3.5.3 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....58
3.5.4 การวัดสี.....58
3.6 การเก็บตัวอย่างทรายและการวิเคราะห์.....59
3.7 การศึกษารากของพืช.....59
3.8 น้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง.....59
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....61
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำในระบบ.....63
4.1.1 อุณหภูมิและสภาพภูมิอากาศ.....63
4.1.2 การสูญเสียน้ำในระบบ.....63
4.1.3 พีเอช.....66
4.1.4 ออกซิเจนละลายน้ำ.....70
4.1.5 ของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหย.....74
4.1.6 มวลจุลินทรีย์บนวัสดุตัวกลางทราย.....80

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.7 ซีโอดี.....84
4.1.8 บีโอดี.....91
4.1.8.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีและซีโอดี.....93
4.1.8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกำจัดสารอินทรีย์กับภาระบรรทุกสารอินทรีย์.....96
4.1.8.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกำจัดสารอินทรีย์กับภาระบรรทุกทางชลศาสตร์.....97
4.1.9 ทีเคเอ็น.....98
4.1.10 คาร์บอนอินทรีย์รวม.....103
4.1.11 สีเอสยูและเอดีเอ็มไอ.....108
4.1.11.1 ผลของปริมาณสารอาหารร่วมต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี 108
4.1.11.2 ผลของระยะเวลาเก็บกักในระบบกับประสิทธิภาพการกำจัดสี.....119
4.1.11.3 ผลของพืชในระบบต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี.....122
4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดของระบบบึงประดิษฐ์.....125
4.2.1 อัตราส่วนสีต่อสารอาหารต่อสมรรถนะของระบบบึงประดิษฐ์.....125
4.2.2 ระยะเวลาเก็บกักต่อสมรรถนะของระบบบึงประดิษฐ์.....125
4.2.3 ผลของพืชต่อสมรรถนะของระบบบึงประดิษฐ์.....127
4.3 การศึกษาการกลไกหลักในการกำจัดสีในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน.....127
4.4 บึงประดิษฐ์ที่แนะนำสำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....128
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....129
5.1 สรุปผลการทดลอง.....129
5.2 ข้อเสนอแนะ.....130
รายการอ้างอิง.....131
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก.ข้อมูลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ.....136

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข.การคำนวณอัตราการไหล และภาระบรรทุกชลศาสตร์ของระบบ.....153
ภาคผนวก ค.การคำนวณปริมาณสารอาหารที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....154
ภาคผนวก ง. การคำนวณภาระบรรทุกบีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบบึงประดิษฐ์.....156
ภาคผนวก จ.วิธีการตรวจสอบการลัดวงจรของบึงประดิษฐ์.....157
ภาคผนวก ฉ. การหาปริมาณสารอาหารร่วมที่มีปริมาณมากเกินพอต่อการลดสี.....160
ภาคผนวก ช. การศึกษาการดูดซับสีในตัวกลางทรายด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ FTIR.....161
ภาคผนวก ซ. การศึกษาการดูดซับสีในรากพืชด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์.....163
ภาคผนวก ฌ.ผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างด้วยเครื่อง HPLC.....166
ภาคผนวก ญ.ผลการวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer.....175
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....179

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 หน้าที่ของพืชน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพืช.....8
ตารางที่ 2.2 อัตราการจับใช้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของพืชบางชนิดและความเข้มข้นใน
เนื้อเยื่อพืช.....9
ตารางที่ 2.3 รายชื่อพืชน้ำที่สามารถใช้ในบึงประดิษฐ์.....11
ตารางที่ 2.4 กลไกการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำเสียโดย.....13
ตารางที่ 2.5 เกณฑ์ในการออกแบบบึงประดิษฐ์.....16
ตารางที่ 2.6 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี.....22
ตารางที่ 2.7 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน.....25
ตารางที่ 2.8 เปอร์เซ็นต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์
ในสีรีแอกทีฟแบ่งตามโทนสีต่างๆ.....29
ตารางที่ 3.1 แผนการทดลอง.....50
ตารางที่ 3.2 ปริมาณความต้องการสารต่างๆ ในแต่ละการทดลอง.....53
ตารางที่ 3.3 จุดเก็บตัวอย่าง พารามิเตอร์ และความถี่ในการวิเคราะห์.....57
ตารางที่ 3.4 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสีย.....58
ตารางที่ 3.5 ค่าเฉลี่ยลักษณะน้ำเสียจริงก่อนการทดลอง.....60
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สภาวะคงตัวของการทดลองชุดต่าง ๆ.....62
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยอัตราการสูญเสียน้ำของชุดการทดลองต่าง ๆ.....65
ตารางที่ 4.3 ค่าพีเอชเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของชุดการทดลองต่าง ๆ.....66
ตารางที่ 4.4 ค่าออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวตามระยะทาง
ของชุดการทดลองต่าง ๆ.....70
ตารางที่ 4.5 ของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของ
ชุดการทดลองต่าง ๆ.....74
ตารางที่ 4.6 ปริมาณจุลินทรีย์รวมในระบบของชุดการทดลองต่าง ๆ.....80
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยซีโอดีของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบที่สภาวะคงตัวของชุดการ

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ทดลองต่าง ๆ.....84
ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยบีโอดีของน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบที่สภาวะคงตัวของชุดการ
ทดลองต่าง ๆ.....91
ตารางที่ 4.9 ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ชุดการทดลองต่าง ๆ.....96
ตารางที่ 4.10 ค่าภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ที่ชุดการทดลองต่าง ๆ.....97
ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยทีเคเอ็นที่สภาวะคงตัวของชุดการทดลองต่าง ๆ.....98
ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยที่โอซีและทีไอซีที่สภาวะคงตัวของชุดการทดลองต่าง ๆ.....104
ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยของสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอของทุกชุดการทดลองต่าง ๆ.....109
ตารางที่ 4.14 บึงประดิษฐ์ที่แนะนำสำหรับบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.....128

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างสี C.I.Reactive Red 180.....3
รูปที่ 2.1 บึงประดิษฐ์ประเภทน้ำไหลเหนือผิวดิน.....5
รูปที่ 2.2 บึงประดิษฐ์ประเภทน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวนอน.....6
รูปที่ 2.3 บึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวดินในแนวดิ่ง.....7
รูปที่ 2.4 การถ่ายเทออกซิเจนผ่านบริเวณรากพืช.....8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสีย้อม.....23
รูปที่ 2.6 การขนส่งอิเลกตรอนผ่านโคเอนไซม์ NAD.....38
รูปที่ 3.1 ลักษณะของหน่วยทดลอง.....49
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการวิจัย.....51
รูปที่ 3.3 การติดตั้งเครื่องมือในแต่ละหน่วยการทดลอง.....53
รูปที่ 3.4 มิติของบึงประดิษฐ์ ภาพตัดด้านบน.....54
รูปที่ 3.5 มิติของบึงประดิษฐ์ ภาพตัดด้านข้าง.....54
รูปที่ 3.6 มิติของบึงประดิษฐ์ ภาพตัดด้านหน้า.....55
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของพืชในระบบ.....56
รูปที่ 4.1 อุณหภูมิของชุดการทดลองต่าง ๆ.....64
รูปที่ 4.2 พีเอชของชุดการทดลองต่าง ๆ.....67
รูปที่ 4.3 โพรไฟล์พีเอชของชุดการทดลองต่าง ๆ.....69
รูปที่ 4.4 ออกซิเจนละลายน้ำในตัวกลางทรายที่ระยะทาง 1 และ 2 เมตร
ในระบบของชุดการทดลองต่าง ๆ.....71
รูปที่ 4.5 โพรไฟล์ออกซิเจนละลายน้ำของชุดการทดลองต่าง ๆ.....73
รูปที่ 4.6 ของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยในน้ำทิ้งของชุดการทดลองต่าง ๆ.....75
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยและของแข็งแขวนลอยระเหยของ
ชุดการทดลองต่าง ๆ.....79
รูปที่ 4.8 ปริมาณจุลินทรีย์ในระบบของชุดการทดลองต่าง ๆ.....81
รูปที่ 4.9 อัตราส่วนระหว่างมวลจุลินทรีย์ต่อพื้นที่รับน้ำกับภาระบรรทุกสารอินทรีย์.....82
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจุลินทรีย์ในระบบต่อพื้นที่กับ
ภาระบรรทุกทางชลศาสตร์.....83

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.11 ซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองต่าง ๆ.....86
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองต่าง ๆ.....88
รูปที่ 4.13 โพรไฟล์ซีโอดีของชุดการทดลองต่าง ๆ.....90
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีและซีโอดีย่อยสลายยาก.....95
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกำจัดสารอินทรีย์กับภาระบรรทุกสารอินทรีย์.....96
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกำจัดสารอินทรีย์กับภาระบรรทุกทางชลศาสตร์.....97
รูปที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยทีเคเอ็นของชุดการทดลองต่าง ๆ.....99
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นของชุดการทดลองต่าง ๆ.....101
รูปที่ 4.19 โพรไฟล์คาร์บอนอินทรีย์รวมและคาร์บอนอินทรีย์รวมของชุดการทดลองต่าง ๆ....105
รูปที่ 4.20 ความเข้มสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 1.1.....110
รูปที่ 4.21 ความเข้มสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 1.2.....110
รูปที่ 4.22 ความเข้มสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 1.3.....111
รูปที่ 4.23 ความเข้มสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 2.1.....111
รูปที่ 4.24 ความเข้มสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 2.2.....112
รูปที่ 4.25 ความเข้มสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอของชุดการทดลองที่ 2.3.....112
รูปที่ 4.26 ความเข้มสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอของชุดควบคุม.....113
รูปที่ 4.27 ความเข้มสีในหน่วยเอสยูและเอดีเอ็มไอของชุดการทดลองน้ำเสียจริง.....113
รูปที่ 4.28 โพรไฟล์สีของชุดการทดลองที่ 1.1, 1.2 และ 1.3.....114
รูปที่ 4.29 โพรไฟล์สีของชุดการทดลองที่ 2.1, 2.2 และ 2.3.....114
รูปที่ 4.30 โพรไฟล์สีของชุดการทดลองที่ 1.2, 2.2 และ2.4.....115
รูปที่ 4.31 โพรไฟล์สีของชุดการทดลองน้ำเสียจริง.....115
รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของชุดการทดลองต่าง ๆ.....116
รูปที่ 4.33 อัตราส่วนสีต่อสารอาหารต่อสมรรถนะของระบบบึงประดิษฐ์.....126
รูปที่ 4.34 ระยะเวลาเก็บกักต่อสมรรถนะของระบบบึงประดิษฐ์.....126
รูปที่ 4.35 ผลของพืชต่อสมรรถนะของระบบบึงประดิษฐ์.....126

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 3.1 บึงประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลอง.....55
ภาพที่ 4.1 โทนสีตามระยะทางของชุดการทดลองที่ 1.1.....117
ภาพที่ 4.2 โทนสีตามระยะทางของชุดการทดลองที่ 1.2.....117
ภาพที่ 4.3 โทนสีตามระยะทางของชุดการทดลองที่ 1.3.....118
ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบโทนสีน้ำเข้า-น้ำออก ของชุดการทดลองที่ 1.1, 1.2 และ1.3.....118
ภาพที่ 4.5 โทนสีตามระยะทางของชุดการทดลองที่ 2.1.....120
ภาพที่ 4.6 โทนสีตามระยะทางของชุดการทดลองที่ 2.2.....120
ภาพที่ 4.7 โทนสีตามระยะทางของชุดการทดลองที่ 2.3.....121
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบโทนสีน้ำเข้า-น้ำออก ของชุดการทดลองที่ 2.1, 2.2 และ2.3.....121
ภาพที่ 4.9 โทนสีตามระยะทางของชุดการทดลองที่ 2.4.....123
ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบโทนสีน้ำเข้า-น้ำออก ของชุดการทดลองที่ 1.1, 2.2 และ2.4.....123
ภาพที่ 4.11 โทนสีตามระยะทางของทุกชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์.....124
ภาพที่ 4.12 โทนสีตามระยะทางของชุดการทดลองที่ 3.1.....124

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย