# ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสีย้อมรีแอกทีฟชนิดอาโซโดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกซึ่งมีและไม่มีสารอาหารที่ส่งเสริมกระบวนการอีบีพีอาร์

นายโกมล เอี่ยมเสมอ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-437-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I18814578

# COLOR REMOVAL EFFICIENCY OF AN AZO-REACTIVE DYE BY AN ANAEROBIC-AEROBIC SBR PROCESS WITH AND WITHOUT EBPR PROMOTING SUBSTRATES

Mr. Komol Iamsamer

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
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic year 1998

ISBN 974-331-437-7

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสีย้อมรีแอกทีฟชนิดอาโซโดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก ซึ่งมีและไม่มีสารอาหารที่ส่งเสริมกระบวนการอีบีพีอาร์ |
| โดย | นายไกมล เอื้อมเสมอ |
| ภาควิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ศาสตราจารย์ ดร.ชงชัย พรรณสวัสดิ์ |

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
( ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
( รองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ )

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
( ศาสตราจารย์ ดร. ชงชัย พรรณสวัสดิ์ )

.....กรรมการ
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลกาฤทธิ์ )

.....กรรมการ
( อาจารย์ ชัยพร ภู่ประเสริฐ )

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ไกมล เอี่ยมเสมอ : ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสีย้อมรีแอกทีฟชนิดอาโซโดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกซึ่งมีและไม่มีสารอาหารที่ส่งเสริมกระบวนการอีบีพีอาร์ (COLOR REMOVAL EFFICIENCY OF AN AZO-REACTIVE DYE BY AN ANAEROBIC-AEROBIC SBR PROCESS WITH AND WITHOUT EBPR PROMOTING SUBSTRATES) อ. ที่ปรึกษา : ศ. ดร.ชงชัย พรรณสวัสดิ์ , 198 หน้า. ISBN 974-331-437-7.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟชนิดอาโซโดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก ซึ่งใช้ถังปฏิกิริยาขนาด 12 ลิตร มีอัตราส่วนน้ำที่เติม($V_f$)ต่อน้ำที่ค้างถัง($V_r$) เท่ากับ 2 : 1 และมีช่วงเวลาแอนแอโรบิก, แอโรบิก และจมตัวเท่ากับ 18, 5 และ 1 ช.ม. ตามลำดับ ในการทดลองได้มีการใช้สารอาหารที่ส่งเสริมและไม่ส่งเสริมการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ(EBPR) โดยมีการแปรผันนิวเทรียนต์บรอท+โซเดียมอะซิเทต(ในรูปซีโอดี)ที่ 500+0, 350+150, 250+250 และ 0+500 มก./ล. เพื่อเป็นสารอาหารที่ส่งเสริมการโตของ PAOs และมีการใช้กลูโคสที่ 500 มก./ล.ซีโอดี(การทดลองชุด G1) เพื่อเป็นสารอาหารที่ส่งเสริมการโตของ GAOs ทั้งนี้ในโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเข้าเท่ากับ 50 และ 15 มก./ล. ตามลำดับ (COD : N : P = 100 : 10 : 3) นอกจากนี้ในการทดลองที่ใช้กลูโคสเป็นสารอาหารนั้นยังมีการแปรผันในโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเข้าให้เท่ากับ 25 และ 5 มก./ล. ตามลำดับ(การทดลองชุด G2)(COD : N : P = 100 : 5 : 1)เพื่อให้แน่ใจว่าไม่เกิดเป็นกระบวนการอีบีพีอาร์และส่งเสริมให้เกิด GAOs ขึ้นในระบบ และมีการแปรผันช่วงเวลาแอนแอโรบิก, แอโรบิก และจมตัวให้เท่ากับ 6, 5 และ 1 ช.ม.(การทดลองชุด G3) เพื่อศึกษาผลของช่วงเวลาแอนแอโรบิกที่มีต่อระบบ โดยทุกชุดทดลองใช้สี Remazol Black B ที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. และควบคุมอายุสลัดจ์เท่ากับ 8 วัน

เมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัวพบว่าการทดลองชุดนิวเทรียนต์บรอท+โซเดียมอะซิเทตที่ 500+0, 350+150, 250+250 และ 0+500 และการทดลองชุด G1, G2 และ G3 มีประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับร้อยละ 73.3, 71.7, 71.4, 70.6, 67.8, 66.3 และ 63.1 ในหน่วย SU และเท่ากับร้อยละ 76.7, 73.4, 73.0, 69.0, 66.2, 64.4 และ 59.0 ในหน่วย ADMI ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงว่าชนิดของสารอาหารและเวลาแอนแอโรบิกมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบ กล่าวคือการใช้นิวเทรียนต์บรอท+โซเดียมอะซิเทตให้ผลดีกว่าการใช้กลูโคสเล็กน้อย และที่เวลาแอนแอโรบิกนานกว่า(18 vs 6 ช.ม.)ระบบมีการลดสีที่ดีกว่า แต่ประสิทธิภาพของ PAOs และ GAOs ในการกำจัดสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อนึ่งประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทุกชุดทดลองมีค่าสูงโดยอยู่ระหว่างร้อยละ 91.7 – 97.3 ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นเท่ากับร้อยละ 97.6, 96.3, 96.6, 42.6, 92.6, 90.7 และ 95.6 ตามลำดับ โดยที่ในการทดลองชุด 0+500 นั้น การลดสารคาร์บอนอินทรีย์ในขั้นตอนแอนแอโรบิกทำได้ไม่ดีเท่าชุดอื่น จึงมีสารคาร์บอนอินทรีย์เหลือไปเข้าขั้นตอนแอโรบิกมาก ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันขึ้น ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 99.3, 100, 78.7, 45.9, 67.7, 98.1 และ 38.7 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีกับประเภทสารอาหาร, ความเข้มข้นของสารอาหารและธาตุอาหาร และสอดคล้องกับช่วงเวลาแอนแอโรบิกที่ทดลอง

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

## C817921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORD: COLOR REMOVAL / EBPR / REACTIVE DYES / TEXTILE

KOMOL IAMSAMER : COLOR REMOVAL EFFICIENCY OF AN AZO-REACTIVE DYE BY AN ANAEROBIC-AEROBIC SBR PROCESS WITH AND WITHOUT EBPR PROMOTING SUBSTRATES. THESIS ADVISOR : PROF. THONGCHAI PANSWAD, Ph.D. 198 pp. ISBN 974-331-437-7.

This reseach was to study the color removal efficiency of a 12 l anaerobic-aerobic SBR process treating an azo-reactive dye. The ratio of influent ($V_f$) to remaining volume ($V_r$) was 2 : 1. The anaerobic, aerobic and settling times were set at 18, 5 and 1 hr, respectively. The EBPR promoting and non-promoting substrates were used, i.e., nutrient broth + sodium acetate (in term of COD) at 500+0, 350+150, 250+250 and 0+500, as PAOs promoting substrate, and glucose (500 mg/l COD, Experiment G1), as GAOs promoting substrate. The nitrogen and phosphorus in influent were 50 mg-N/l and 15 mg-P/l, respectively. Besides, nitrogen and phosphorus in influent were also varied to be 25 mg-N/l and 5 mg-P/l (Experiment G2) (COD:N:P = 100:5:1) in order to inhibit EBPR and promote GAOs in the system. The anaerobic, aerobic and settling times were also varied to be 6, 5 and 1 hr (Experiment G3) in order to observe the effect of the anaerobic time. Remazol Black B dye at 10 mg/l concentration was used in all experiments. The sludge age of the system was controlled at 8 days.

At steady state, the efficiency of color removal for the cases of nutrient broth + sodium acetate at 500+0, 350+150, 250+250 and 0+500 and experiment G1, G2 and G3 was 73.3, 71.7, 71.4, 70.6, 67.8, 66.3 and 63.1 % in terms of SU and 76.7, 73.4, 73.0, 69.0, 66.2, 64.4 and 59.0 % in term of ADMI, respectively. It showed that different substrates and anaerobic time had effects on the degree of color removal. The experiment using nutrient broth + sodium acetate as substrates was better in decolorisation than those with glucose. Long anaerobic time (18 vs 6 hr) was better for the color reduction. But the color removal efficiencies of PAOs and GAOs were not different. The high COD removal efficiency was in the range of 91.7 – 97.3 % for all experiments. The efficiency of TKN removal was 97.6, 96.3, 96.6, 42.6, 92.6, 90.7 and 95.6 %, respectively. In the experiment 0+500, the organic carbon removal efficiency in anaerobic stage was not as good as other cases. So high residual organic carbon was presence in the beginning of the aerobic stage and nitrification could not occur. The efficiency of phosphorus removal was 99.3, 100, 78.7, 45.9, 67.7, 98.1 and 38.7 %, respectively, which was in line with the theory of substrates, concentration of substrates and nutrients and anaerobic time.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พรรณสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้การดูแลเอาใจใส่ เสียสละเวลาและแรงกาย ในการให้คำปรึกษาและแนะนำในเรื่องต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นแง่คิดในทางวิชาการ หรือ แง่คิดในด้านการทำงานในอนาคต แก่ผู้วิจัย ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนอุดหนุนในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ดร.สุชาติ ชะนะมา และ ดร.รัฐ พิชญางกูร ที่คอยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณนุชดา นุชประยูร ที่คอยช่วยเป็นกำลังกายและกำลังใจที่ดีตลอดมาจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้แล้วเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ เป็นอย่างสูงที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษาและให้ทุกอย่างแก่ผู้วิจัยมาตลอดโดยไม่รู้จักเหน็ดเหนื่อย และขอมอบคุณความดีและประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แก่ครอบครัวผู้วิจัย

# สารบัญ


หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ ..... 1

1.1 ความเป็นมา ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ ..... 3

1.3 ขอบเขตการศึกษา ..... 3

บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร ..... 4

2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ ..... 4

2.1.1 ความเป็นมาของระบบเอสบีอาร์ ..... 4

2.1.2 หลักการทำงานของระบบเอสบีอาร์ ..... 4

2.1.3 ข้อดี-ข้อเสียของระบบเอสบีอาร์ ..... 6

2.2 ไนโตรเจน ..... 7

2.2.1 วัฏจักรไนโตรเจน ..... 7

2.2.2 ผลต่อสิ่งแวดล้อม ..... 8

2.2.3 วิธีการกำจัดไนโตรเจน ..... 10

2.2.4 การแปลงรูปของไนโตรเจนในการบำบัดทางชีวภาพ ..... 12

2.2.5 กระบวนการไนทริฟิเคชัน ..... 13

2.2.6 กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ..... 24

หน้า

2.3 ฟอสฟอรัส ..... 30
2.3.1วัฏจักรฟอสฟอรัส ..... 30
2.3.2 ผลต่อสิ่งแวดล้อม ..... 31
2.3.3 วิธีการกำจัดฟอสฟอรัส ..... 31
2.3.4 หลักการพื้นฐานการกำจัดฟอสฟอรัส ..... 33
2.4 สีย้อม ..... 39
2.4.1 การเกิดสีของสีย้อม ..... 40
2.4.2 การจำแนกสีย้อม ..... 41
2.4.3 ปัจจัยที่ทำให้สีย้อมติดเส้นใย ..... 48
2.4.4 สีย้อมรีแอกทีฟ ..... 49
2.5 การบำบัดน้ำเสียสี ..... 55
2.5.1 กระบวนการบำบัดทางฟิสิกโคเคมิคัล ..... 55
2.5.2 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ..... 57
2.5.3 การศึกษาที่ผ่านมา ..... 60

บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย ..... 71
3.1 แผนการทดลอง ..... 71
3.2 การเริ่มเดินระบบ ..... 72
3.3 น้ำเสียสังเคราะห์ ..... 73
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ ..... 74
3.5 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ ..... 77

บทที่ 4 ผลการทดลอง ..... 80
4.1 ผลการทดลองโดยทั่วไป ..... 82
4.1.1 อุณหภูมิ ..... 82
4.1.2 ออกซิเจนละลาย ..... 82
4.1.3 โออาร์พี ..... 94
4.1.4 พีเอช ..... 94

หน้า

4.1.5 สภาพด่าง ..... 99
4.1.6 เอ็มแอลเอสเอส, เอ็มแอลวีเอสเอส และของแข็งแขวนลอย ..... 102
4.1.7 เอสวี 30 และเอสวีไอ ..... 105
4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ..... 107
4.2.1 ผลของสารอาหารต่อการกำจัดซีโอดี ..... 107
4.2.2 ผลของเวลาแอนแอโรบิกต่อการกำจัดซีโอดี ..... 110
4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็น ..... 111
4.3.1 ผลของสารอาหารต่อการกำจัดทีเคเอ็น ..... 111
4.3.2 ผลของเวลาแอนแอโรบิกต่อการกำจัดทีเคเอ็น ..... 114
4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส ..... 115
4.4.1 ผลของสารอาหารต่อการกำจัดฟอสฟอรัส ..... 115
4.4.2 ผลของเวลาแอนแอโรบิกต่อการกำจัดฟอสฟอรัส ..... 122
4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดสี ..... 123
4.5.1 ผลของสารอาหารต่อการกำจัดสี ..... 129
4.5.2 ผลของเวลาแอนแอโรบิกต่อการกำจัดสี ..... 134

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ ..... 135
5.1 สรุปผลการทดลอง ..... 135
5.2 ข้อเสนอแนะ ..... 136

รายการอ้างอิง ..... 138
ภาคผนวก ..... 146
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง ..... 147
ภาคผนวก ข ผลการทดลองยืนยันชุดทดลองNB+NaAcที่ 0+500 ..... 191
ภาคผนวก ค การเพาะเชื้อ PAOs ..... 193
ภาคผนวก ง การคำนวณปริมาณสารที่เติมในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ..... 194
ภาคผนวก จ บันทึกการทดลอง ..... 196
ประวัติผู้เขียน ..... 198

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง

หน้า


ตารางที่ 2.1 ผลของกระบวนการบำบัดแบบต่างๆ ต่อสารประกอบไนโตรเจน ..... 11
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบทางเลือกระบบไนทริฟิเคชัน ..... 15
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไนทริฟายเออร์และอัตราส่วนบีโอดี/ทีเคเอ็น 16
ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ทางไคเนติกส์สำหรับกระบวนการไนทริฟิเคชันแบบแขวนลอย ..... 18
ตารางที่ 2.5 สารประกอบอินทรีย์ที่ยับยั้งปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน ..... 23
ตารางที่ 2.6 การออกแบบโดยทั่วไปสำหรับกระบวนการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ..... 38
ตารางที่ 2.7 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี ..... 42
ตารางที่ 2.8 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน ..... 46
ตารางที่ 2.9 เปอร์เซนต์โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟที่แบ่งตามโทนสี ..... 51
ตารางที่ 2.10 กลุ่มรีแอกทีฟที่สำคัญ ..... 53
ตารางที่ 2.11 แบกทีเรียในลำไส้ที่พบเอนไซม์ azoreductase ..... 58
ตารางที่ 2.12 รายชื่อแบกทีเรียในงานวิจัยต่างๆ ที่สามารถลดสีได้ ..... 59
ตารางที่ 2.13 ผลการกำจัดสีรีแอทีฟด้วยระบบไร้อากาศ ..... 65
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของแต่ละชุดทดลอง ..... 72
ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างและความถี่การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ..... 77
ตารางที่ 3.3 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ..... 78
ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด ..... 81
ตารางที่ 4.2 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ในช่วงสถานะคงตัวของชุด
NB+NaAc = 500+0 ..... 83
ตารางที่ 4.3 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ในช่วงสถานะคงตัวของชุด
NB+NaAc = 350+150 ..... 84
ตารางที่ 4.4 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ในช่วงสถานะคงตัวของชุด
NB+NaAc = 250+250 ..... 85
ตารางที่ 4.5 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ในช่วงสถานะคงตัวของชุด
NB+NaAc = 0+500 ..... 86
ตารางที่ 4.6 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ในช่วงสถานะคงตัวของชุด G1 ..... 87

หน้า

ตารางที่ 4.7 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ในช่วงสถานะคงตัวของชุด G2 ..... 88
ตารางที่ 4.8 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ในช่วงสถานะคงตัวของชุด G3 ..... 89
ตารางที่ 4.9 การสร้างและการใช้สภาพด่างในขั้นตอนแอนแอโรบิกและแอโรบิก ช่วงสถานะคงตัว ..... 99
ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยทีเคเอ็น(กรอง)ช่วงสถานะคงตัว ..... 111
ตารางที่ 4.11 ค่าฟอสฟอรัสเฉลี่ยช่วงสถานะคงตัว ..... 115
ตารางที่ 4.12 ชนิดของแบกทีเรียในแต่ละชุดทดลอง ..... 123
ตารางที่ 4.13 ค่าความเข้มสีเฉลี่ยช่วงสถานะคงตัว ..... 129
ตารางที่ 4.14 สรุปการกำจัดสีของ PAOs และ GAOs ..... 134

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป


หน้า

รูปที่ 2.1 การทำงานของกระบวนการเอสบีอาร์โดยทั่วไป ..... 5
รูปที่ 2.2 การทำงานของกระบวนการเอสบีอาร์ที่ใช้กำจัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และสารคาร์บอนอินทรีย์ ..... 6
รูปที่ 2.3 วัฏจักรไนโตรเจน ..... 9
รูปที่ 2.4 การแปลงรูปของไนโตรเจนในกระบวนการชีวภาพ ..... 13
รูปที่ 2.5 ผลของพีเอชต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน ..... 20
รูปที่ 2.6 ผลของพีเอชต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน ..... 20
รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน ..... 22
รูปที่ 2.8 ผลของพีเอชต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ..... 28
รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ..... 29
รูปที่ 2.10 วัฏจักรฟอสฟอรัส ..... 31
รูปที่ 2.11 กลไกการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบชีวภาพแบบจับใช้อย่างฟุ่มเฟือย ..... 34
รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสและบีโอดีที่เกิดขึ้นในระบบกำจัดฟอสฟอรัส ..... 35
รูปที่ 2.13 ความต้องการบีโอดีเพื่อกำจัดฟอสฟอรัส 1 มก. ที่เวลากักเชฉณ์เฉลี่ยต่างๆ ..... 36
รูปที่ 2.14 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี ..... 43
รูปที่ 2.15 สมบัติของสีย้อม ..... 48
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution ..... 52
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Addition ..... 52
รูปที่ 2.18 กลไกการรับอิเล็กทรอนของสีย้อมอาโซภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก ..... 60
รูปที่ 2.19 การแตกโครงสร้างของสี C.I. Reactive Red 141 ..... 66
รูปที่ 2.20 การย่อยสลายสีที่สมบูรณ์โดยกระบวนการทางชีวภาพของ ADS ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก ..... 70
รูปที่ 3.1 ตำแหน่งที่เจาะรูข้างถังปฏิกิริยา ..... 74
รูปที่ 3.2 เครื่องมือในการทดลองสำหรับกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก 75
รูปที่ 4.1 อุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละชุดทดลอง ..... 90

หน้า

รูปที่ 4.2 ออกซิเจนละลายในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละชุดทดลอง ..... 92
รูปที่ 4.3 โพรไฟล์ของออกซิเจนละลายในแต่ละชุดทดลอง ..... 93
รูปที่ 4.4 โออาร์พีในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละชุดทดลอง ..... 95
รูปที่ 4.5 โพรไฟล์โออาร์พีในแต่ละชุดทดลอง ..... 96
รูปที่ 4.6 พีเอชในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละชุดทดลอง ..... 97
รูปที่ 4.7 สภาพด่างในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละชุดทดลอง ..... 100
รูปที่ 4.8 เอ็มแอลเอสเอสและเอ็มแอลวีเอสเอสช่วงท้ายแอโรบิกของแต่ละชุดทดลอง..... 103
รูปที่ 4.9 ของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งของแต่ละชุดทดลอง..... 106
รูปที่ 4.10 เอสวี 30 ช่วงท้ายแอโรบิกของแต่ละชุดทดลอง..... 106
รูปที่ 4.11 ซีโอดีในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละชุดทดลอง ..... 108
รูปที่ 4.12 โพรไฟล์การกำจัดซีโอดีในแต่ละชุดทดลอง..... 109
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบในแต่ละชุดทดลอง ..... 110
รูปที่ 4.14 ทีเคเอ็นในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละชุดทดลอง ..... 112
รูปที่ 4.15 โพรไฟล์การกำจัดทีเคเอ็นในแต่ละชุดทดลอง ..... 113
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นของระบบในแต่ละชุดทดลอง..... 114
รูปที่ 4.17 ฟอสฟอรัสในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละชุดทดลอง..... 116
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสของระบบในแต่ละชุดทดลอง..... 117
รูปที่ 4.19 ร้อยละของฟอสฟอรัสในเซลล์ในแต่ละชุดทดลอง ..... 119
รูปที่ 4.20 โพรไฟล์การกำจัดฟอสฟอรัสในแต่ละชุดทดลอง..... 119
รูปที่ 4.21 โพรไฟล์พีเอชเอในแต่ละชุดทดลอง..... 121
รูปที่ 4.22 ปริมาณพีเอชเอช่วงปลายแอนแอโรบิกของแต่ละชุดทดลอง..... 121
รูปที่ 4.23 คุณฟอสฟอรัส..... 122
รูปที่ 4.24 ความเข้มสีในหน่วย SU ในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละชุดทดลอง..... 124
รูปที่ 4.25 ความเข้มสีในหน่วย ADMI ในช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละชุดทดลอง..... 126
รูปที่ 4.26 โพรไฟล์การกำจัดสีในหน่วย SU ในแต่ละชุดทดลอง ..... 128
รูปที่ 4.27 โพรไฟล์การกำจัดสีในหน่วย ADMI ในแต่ละชุดทดลอง..... 128
รูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพการกำจัดสีของระบบในหน่วย SU และ ADMIในแต่ละชุดทดลอง . 128

# สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง ..... 80
ภาพที่ 4.2 สีในขั้นตอนต่างๆ ของชุดทดลอง NB+NaAc ที่ 500+0 ..... 130
ภาพที่ 4.3 สีในขั้นตอนต่างๆ ของชุดทดลอง NB+NaAc ที่ 350+150 ..... 131
ภาพที่ 4.4 สีในขั้นตอนต่างๆ ของชุดทดลอง NB+NaAc ที่ 250+250 ..... 131
ภาพที่ 4.5 สีในขั้นตอนต่างๆ ของชุดทดลอง NB+NaAc ที่ 0+500 ..... 132
ภาพที่ 4.6 สีในขั้นตอนต่างๆ ของชุดทดลอง G1 ..... 132
ภาพที่ 4.7 สีในขั้นตอนต่างๆ ของชุดทดลอง G2 ..... 133
ภาพที่ 4.8 สีในขั้นตอนต่างๆ ของชุดทดลอง G3 ..... 133

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย