ประสิทธิภาพการบำบัดสีทางชีวภาพโดยระบบไร้อากาศ-เติมอากาศต่อความเข้มข้น
และชนิดของสีอะโซ

นางสาวนภาจรี แสงสิงห์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFICIENCY OF ANAEROBIC – AEROBIC BIOLOGICAL COLOR REMOVAL ON CONCENTRATIONS AND TYPES OF AZO DYES

Miss Napajaree Sangsing

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพการบำบัดสีทางชีวภาพโดยระบบไร้อากาศ-เติมอากาศต่อความเข้มข้นและชนิดของสีอะโซ
โดย	นางสาวนภาจรี แสงสิงห์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน)

....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่ประเสริฐ)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ขจรศักดิ์ โกศลมนตรี)

นภาจรี แสงสิงห์ : ประสิทธิภาพการบำบัดสีทางชีวภาพโดยระบบไร้อากาศ-เติมอากาศต่อความเข้มข้นและชนิดของสีอะโซ (EFFICIENCY OF ANAEROBIC – AEROBIC BIOLOGICAL COLOR REMOVAL ON CONCENTRATIONS AND TYPES OF AZO DYES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. ศรัณย์ เตชะเสน, 103 หน้า.

สีย้อมชนิดรีแอกทีฟ (Reactive dyes) เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมาก แต่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยระบบเติมอากาศได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟที่มีหมู่พันธะพันอะโซ (Azo bond) จำนวน 1 และ 2 พันธะ โดยใช้สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 (Reactive violet 5; RV5) และสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Reactive black 5; RB5) ตามลำดับ ระบบบำบัดที่ใช้คือ ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter; AF) ต่อเนื่องด้วยระบบโปรยกรอง (Trickling filter; TF) ที่ดูแลง่ายและค่าบำรุงรักษาต่ำ การทดลองใช้น้ำตาลทรายเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน ให้ค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์คงที่ที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและควบคุมพีเอชในระบบถังกรองไร้อากาศให้มีค่า 6.5-8.5 โดยความเข้มข้นของสีย้อมที่ใช้ทดลองมีค่า 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประเมินประสิทธิภาพการบำบัดด้วยค่าความเข้มสีและซีโอดีในน้ำทิ้ง

ผลการศึกษาพบว่า สีย้อมลดลงในขั้นการบำบัดแบบไร้อากาศ การเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมทั้งสองชนิดไม่มีผลต่อประสิทธิภาพบำบัดสีของระบบ AF ประสิทธิภาพการบำบัดสีค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองโดยมีค่าร้อยละ 97±0.8 สำหรับสี RV5 และร้อยละ 78.6±0.71 สำหรับสี RB 5 และพบว่าการลดลงของสีย้อมในระบบ AF เป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยมีค่า k_1 คือ 5.62 และ 4.13 ต่อวัน สำหรับสี RV 5 และสี RB 5 ตามลำดับ ระบบ AF ยังสามารถบำบัดค่าซีโอดีถึงร้อยละ 93.1±5.1 และ93.9±3.99 ตามลำดับ การบำบัดสี RV5 ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรอง พบว่า ค่าความเข้มสีในน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 31.4 จากความเข้มสีของน้ำที่ออกจากระบบอากาศ ส่วนการทดลองเปลี่ยนชนิดของแหล่งพลังงานจากน้ำตาลเป็นแป้งมันสำปะหลังพบว่าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

ปีการศึกษา 2556

5370263921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : MONOAZO / DIAZO / TRICKLING FILTER / DECOLORIZATION

NAPAJAREE SANGSING: EFFICIENCY OF ANAEROBIC – AEROBIC BIOLOGICAL COLOR REMOVAL ON CONCENTRATIONS AND TYPES OF AZO DYES. ADVISOR : ASST. PROF. SARUN TEJASE, Ph.D., 103 pp.

This research studied the effectiveness of decolorization and degradation of Reactive dyes, Reactive violet 5 (RV5) and Reactive Black B (RB5) by lab-scale Anaerobic Filter (AF)/Trickling Filter (TF). Both AF and TF reactors had a diameter of 0.2 m. and media height of 1.0 m., fully packed with random flow plastic media. Continuous flow rate was applied at 0.5 l/hr. The effective volume of AF is 24 liters, resulting in a hydraulic retention time (HRT) of 48 hr. Effluent from AF flowed continuously to TF with an additional recycle rate of 60 l/hr. Simulated textile wastewater used dye with concentrations of 10, 25, 50, 100 and 200 mg/l. Glucose was used as a co-substrate at a concentration of 1,000 mgCOD/l. System efficiencies were investigated by COD removal and color removal, measured color units as mg/l and ADMI.

The result of this study show that increasing the concentration of dyes, both RV5 and RV5, have no effect on color and COD removal of AF. The decolorizations of AF relatively by 97% and 78.6% for both RV5 and RB5, respectively. Decolorization rate of both RV5 and RB5 are follow 1^{st}-order kinetic with a rate constant (k_1) of 5.62 and 4.13 per day, respectively. Not only color remove occur mainly in AF but also COD removed, by 93.1% and 93.9%, respectively. From the experimental of RV5 note that- Aeration makes the color concentration of TF effluence is increasing from AF effluence, the concentration is significantly rising about 31.4% because of autoxidation reaction. Moreover, types of energy source between sugar and starch have no effect on decolorization and degradation.

Department : Environmental Engineering Student's Signature ....

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature ....

Academic Year : 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากบุคคลและองค์กรหลายฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอแสดงความขอบคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ มีรายนามดังต่อไปนี้

แสดงความขอบคุณแด่ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์และแนวทางในการทดลอง ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี

แสดงความขอบคุณแด่ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิต ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่ประเสริฐ และ ดร.ขจรศักดิ์ โกศลมนตรี ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

แสดงความขอบคุณแด่ คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องธุรการและเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ในทุกด้าน ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงาน

แสดงความขอบคุณแด่ คุณบัญชา บุญอนันต์วงศ์ ผู้ให้คำปรึกษาและแนะนำสำหรับการเริ่มการทดลอง รวมไปถึงการแนะนำข้อมูลและวิธีการเบื้องต้นสำหรับการทดลอง

แสดงความขอบคุณแด่องค์กรเอกชนที่ให้การสนับสนุนและอนุเคราะห์อุปกรณ์ สารแคมี รวมไปถึงหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง มีรายนามดังต่อไปนี้ บริษัท อควา คอร์เปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ผู้สนับสนุนตัวกลางพลาสติก บริษัท Dystar Thai Co.,Ltd จำกัด ผู้สนับสนุนสีย้อมรีแอกทีฟใช้ในการทดลองและบริษัท แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด ผู้ให้ความอนุเคราะห์หัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจาก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่คอยผลักดันและสนับสนุนทั้งกำลังใจ กำลังกายและกำลังทรัพย์ ตั้งแต่เริ่มต้นเรียนรู้จนประสบผลความสำเร็จ และยังคงสนับสนุนลูกคนนี้ตลอดไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ญ

สารบัญภาพ .... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 สีย้อม 5

2.1.1 ประวัติของสีย้อม 5

2.1.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม 5

2.1.3 สีรีแอกทีฟ 8

2.2 ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม 9

2.3 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม 11

2.3.1 การบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) 11

2.3.2 การบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) 12

2.4 การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) 14

2.4.1 การบำบัดแบบใช้อากาศ (Aerobic treatment) 14

2.4.2 การบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic treatment) 15

2.4.3 ซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate reduction) 18

2.4.4 ไนเตรทรีดักชัน (Nitrate reduction) 19

2.4.5 จลนพลศาสตร์ของการลดสี (Kinetics of decolourisation) 19

2.4.6 ธาตุอาหารเสริม (Nutrients) 20

หน้า

2.5 การบำบัดร่วมแบบไร้อากาศและใช้อากาศ (Combined Anaerobic-Aerobic treatment) 21
2.6 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดแบบฟิล์มชีวภาพ 25
2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 30
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 30
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ 30
3.1.2 สารเคมี 30
3.2 แผนการทดลอง 31
3.2.1 สีย้อม 31
3.2.2 น้ำเสียสังเคราะห์ 32
3.2.3 ถังปฏิกิริยา 32
3.2.4 วิธีวิเคราะห์และค่าพารามิเตอร์ 34
3.3 การดำเนินงานวิจัย 37
3.3.1 การทดลองตอนที่ 1 37
4.3.3 การทดลองตอนที่ 2 39
4.3.1 การทดลองตอนที่ 3 41
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 43
4.1 การเริ่มต้นระบบ 43
4.2 ผลกระทบจากชนิดและความเข้มข้นสีย้อมต่อประสิทธิภาพการบำบัด 43
4.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ 43
4.2.2 การบำบัดสีย้อมไดอะโซ 46
4.2.2.1 ผลการทดลอง 46
4.2.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัด 51
4.2.2.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม 52
4.2.2.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี 56
4.2.3 การบำบัดสีย้อมโมโนอะโซ 58
4.2.3.1 ผลการทดลอง 58
4.2.3.2 ประสิทธิภาพการบำบัด 63

หน้า

4.2.3.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม 63
4.2.3.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี 64
4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟในเมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานแทนน้ำตาลทราย 66
4.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์ 66
4.3.2 ผลการทดลอง 66
4.3.3 ประสิทธิภาพการบำบัด 68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 69
5.1 สรุปผลการวิจัย 69
5.2 ข้อเสนอแนะ 70
5.3 ข้อเสนอแนะเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ 70
รายการอ้างอิง 71
ภาคผนวก 78
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง 79
ภาคผนวก ข รายการคำนวณ 91
ภาคผนวก ค กราฟมาตรฐาน 99
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 103

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 โครงสร้างทางเคมีของโครโมฟอร์และออกโซโครมของสีย้อม 7
2.2 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์..10
2.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม
ด้วยกระบวนการทางเคมีและกายภาพ 6
2.4 ธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ 20
2.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยการบำบัดร่วม
แบบไร้อากาศและใช้อากาศ...14
3.1 การตรวจวิเคราะห์และความถี่ของการเก็บตัวอย่าง...35
3.2 พารามิเตอร์ของการทดลอง 36
4.1 สมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ ของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างๆ 44
4.2 สมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ต่างๆ 44
ก-1 ผลการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน……..………......……80
ก-2 พีเอชและปริมาณของแข็งแขวนลอยจากการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5
ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน…….…………………..……………………………….…………..83
ก-3 ผลการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน……………………85
ก-4 พีเอชและปริมาณของแข็งแขวนลอยจากการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5
ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน……..…………………………………………………………………87
ก-5 ผลการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสี100 มก/ล เมื่อใช้แป้งมัน
สำปะหลังเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน ที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 1,000 มก/ล....................89
ก-6 พีเอชและปริมาณของแข็งแขวนลอยจากการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5
ที่ความเข้มข้นสี100 มก/ล เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานที่ความ
เข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 1,000 มก/ล...90
ข-1 ตารางการคำนวณค่า CIE Tristimulus ในการคำนวณหาหน่วยสีเอดีเอมไอ....................... .98

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 รูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแบบต่าง ๆ 16

2.2 การบำบัดสีอะโซและสารอะโรเมติกเอมีนภายใต้ ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ
กับระบบใช้อากาศ 22

3.1 โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอกทีฟ ไวโอเล็ต 5 31

3.2 โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 32

3.3 แบบถังปฏิกิริยาไร้อากาศแบบมีตัวกลางและถังปฏิกิริยาโปรยกรอง 33

3.4 ตัวกลางพลาสติกรุ่น R-190 Random Flow Media 34

3.5 ขั้นตอนการทดลองตอนที่ 1 38

3.6 ขั้นตอนการทดลองตอนที่ 2 40

3.7 ขั้นตอนการทดลองตอนที่ 3 42

4.1 ความเข้มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร 45

4.2 ความเข้มของสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร 45

4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการทดลองด้วยสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อม
10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดระยะเวลา 156 วัน 47

4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่างๆ
เมื่อวัดความเข้มสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร 53

4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่างๆ
เมื่อวัดความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ 53

4.6 แสดงโครงสร้างของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 และสารประกอบอะโรมาติก
เมื่อพันธะอะโซสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ 55

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เทียบกับ
ค่าความเข้มสีในน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศที่สภาวะคงที่ 56

4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศ ต่อด้วยระบบโปรยกรอ
งที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่างๆ 57

4.9 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการทดลองด้วยสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้น
สีย้อม 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดระยะเวลา 97 วัน 59

ภาพที่ หน้า

4.10 ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศและน้ำทิ้งจากระบบโปรยกรอง ที่สภาวะคงที่เทียบกับน้ำกลั่น 60

4.11 แสดงโครงสร้างของสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และสารประกอบอะโรมาติก เมื่อพันธะอะโซสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ 61

4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดสีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ในหน่วยเอดีเอมไอ ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่างๆ 63

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เทียบกับ ค่าความเข้มสีในน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศที่สภาวะคงที่....64

4.14 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ต่างๆ 65

4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 โดยแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงาน 67

ค-1 ปริมาณน้ำตาลทรายเทียบกับค่าซีโอดี.... 100

ค-2 ปริมาณแป้งมันสำปะหลังเทียบกับค่าซีโอดี 100

ค-3 ปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนเทียบกับค่าซีโอดี.... 100

ค-4 ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสี ที่ความยาวคลื่นแสง 597 นาโนเมตร....101

ค-5 ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 เทียบกับค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ.... .101

ค-6 ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสี ที่ความยาวคลื่นแสง 559 นาโนเมตร....102

ค-7 ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เทียบกับค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ....102

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สีย้อมรีแอกทีฟได้รับความนิยมและมีการใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมฟอกย้อมและสิ่งทอ อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องหนัง อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์และอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น ทำให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีดังกล่าวในปริมาณมาก ซึ่งน้ำเสียนี้จะไม่สลายไปเองตามธรรมชาติและยากต่อการบำบัดด้วยระบบชีวภาพทั่วไป เมื่อน้ำเสียถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอาจก่อปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพตามมา การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนสีย้อมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon adsorption) การออกซิเดชันด้วยสารเคมี (Chemical Oxidation) การกรองด้วยเมมเบรน (Membrane Technology) เป็นต้น วิธีการบำบัดเหล่านี้มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูง แต่ค่าอุปกรณ์ ค่าดำเนินการและการดูแลรักษาก็ต้องใช้ต้นทุนสูงเช่นกัน ดังนั้นการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) จึงได้รับการศึกษาและพัฒนาเพื่อบำบัดน้ำเสียสีย้อมมาอย่างต่อเนื่อง (Forgacs, Cserhti และ Oros, 2004)

การบำบัดสีสังเคราะห์ด้วยวิธีทางชีวภาพเป็นวิธีที่ต้นทุนต่ำ เทคโนโลยีและอุปกรณ์สามารถหาได้ง่าย และประสิทธิภาพในการบำบัดเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งเห็นได้จากงานวิจัยและบทความที่เกี่ยวข้องได้รับการเผยแพร่อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบำบัดสีย้อมด้วยวิธีทางชีวภาพแบบไร้อากาศได้รับความสนใจในการศึกษาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากระบบไร้อากาศสามารถลดสีย้อมในน้ำเสียได้ (Van der Zee และ Villaverde, 2005)

สีย้อมเป็นผลผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียม มีสารประกอบจำพวกอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic) และอะโรเมติก (Aromatic) เป็นส่วนประกอบ โครงสร้างเคมีของสีย้อมสลายด้วยกลไกของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศและเกิดการสะสมของสารประกอบของอะโรเมติกในระบบ ซึ่งสารนี้หลายชนิดมีสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง (Chung และ Cerniglia, 1992) มีการรายงานว่าสารประกอบอะโรเมติกสามารถสลายได้ภายใต้สภาวะใช้อากาศ (Sponza และ IsIk, 2005)

การพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมสังเคราะห์ เพื่อพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ บัญชา บุญอนันต์วงศ์ (2554) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 โดยใช้ระบบไร้อากาศแบบมีตัวกลาง (Anaerobic Filter) และระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) พบว่าระบบสามารถลดสีและบำบัดค่าซีโอดีย่อยสลายยากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยค่าซีโอดีที่เหมาะสมต่อการบำบัดควรอยู่ในช่วง 500 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่การทดลองนี้ทำการทดลองกับสีย้อมเพียงประเภทเดียวและใช้ความเข้มข้นสีย้อมเพียงค่าเดียว

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่ความเข้มข้นต่างๆ และอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟ เมื่อโครงสร้างเคมีของสีย้อมที่ใช้ศึกษาประกอบด้วยหมู่อะโซ 1 หมู่ และหมู่อะโซ 2 หมู่ รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเปลี่ยนแหล่งของพลังงานจากน้ำตาลทรายเป็นแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโดยใช้ระบบบำบัดต่อเนื่องจากงานวิจัยของ บัญชา บุญอนันต์วงศ์ (2554)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างเคมีประกอบด้วยพันธะอะโซ 1 หมู่ และ 2 หมู่ ที่ความเข้มข้นสีต่างๆ ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง
2. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงาน ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการและบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ระบบที่ใช้คือ ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) และระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) ระดับห้องปฏิบัติการ
3. สีสังเคราะห์ที่ใช้ ได้แก่ สีรีแอกทีฟไวโอเล็ท 5 (Reactive Violet 5) และสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5) ของบริษัท Dystar Thai Co.,Ltd จำกัด เพื่อเป็นตัวแทนของสีย้อมมีหมู่พันธะอะโซ 1 หมู่ และ 2 หมู่ ตามลำดับ
4. ใช้น้ำตาลทรายขาวและแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานให้แก่จุลินทรีย์ในระบบบำบัด
5. พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดคือ ซีโอดีกรอง (Soluble Chemical Oxygen Demand, sCOD) พีเอช (pH) สารของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS) และค่าความเข้มสี โดยวัดสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) และหน่วยเอดีเอมไอ (American Dye Manufacturers Institute color units, ADMI)
6. การวัดสีในหน่วยเอดีเอมไอเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน EPA เลขที่ 110.1 แล้วคำนวณตามวิธีของ Allen และคณะ (1973) ซึ่งใช้โปรแกรม Quick Basic ช่วยในการคำนวณ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบประสิทธิภาพของการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีในน้ำเสียที่ความเข้มข้นของสีย้อมต่าง ๆ เมื่อสีย้อมมีจำนวนหมู่พันธะอะโซ 1 หมู่ และ 2 หมู่

2. สามารถทราบถึงอัตราการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟทั้ง 2 ชนิด ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ

3. ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพการบำบัด เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นมีค่าเปลี่ยนไป

4. ทราบประสิทธิภาพของการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีในน้ำเสีย เมื่อเปลี่ยนชนิดของแหล่งพลังงานจากน้ำตาลทรายขาวเป็นแป้งมันสำปะหลัง

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

2.1.1 ประวัติของสีย้อม

สีย้อม (Dyestuff) คือสารไฮโดรคาร์บอนที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน แล้วเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ สีย้อมถูกผลิตให้มีหลากหลายชนิดเพื่อให้ความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน สำหรับกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของวัตถุ โดยสร้างโครงร่างผลึกกับวัตถุนั้นด้วยพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนท์ (Covalent bond) สีที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นเกิดจากสีย้อมดูดกลืนพลังงานสเปคตรัมของแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน ซึ่งความยาวคลื่นที่มนุษย์สามารถมองเห็นอยู่ในช่วงระหว่าง 400-700 นาโนเมตร ซึ่งกลุ่มอะตอมภายในโครงสร้างโมเลกุลของสีประกอบไปด้วย กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีนี้ เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophores) และมีกลุ่มอะตอมที่ทำให้สีมีความเข้มหรืออ่อน รวมถึงทำให้สีเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดี เรียกว่า ออกโซโครม (Auxochromes)

2.1.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม

การจำแนกประเภทของสีย้อมจัดทำขึ้นโดยองค์กรที่มีชื่อว่า The Society of Dyers and the American Association of Textile Chemists and Colorists การจำแนกครั้งแรกเมื่อปีคริสต์ศักราช 1924 ดัชนีสี (Color Index, C.I.) มีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องนำมาพิจารณา เช่น ลักษณะโครงสร้างเคมีของสี วิธีการใช้งานของสี เป็นต้น ดัชนีสีจะปรับปรุงรายชื่อทุก 3 เดือน ปัจจุบันมีการจำแนกดัชนีสีมากกว่า 13,000 ดัชนี ภายใต้ชื่อการค้าที่แตกต่างกันไป กว่า 27,000 ชื่อ

1) การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งาน (บุษรา ประชุมญาติ, 2545)

1) สีดีสเพอร์ส (Disperse Dyes) ใช้ย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีย้อมนี้ไม่ละลายน้ำจึงเป็นอนุภาคคอลลอยด์กระจายอยู่ในน้ำซึ่งต้องใช้สารพา (Carrier) ช่วยให้สีเข้าไปทำปฏิกิริยาในเส้นใย

2) สีเอสิด (Acids Dyes) ใช้ย้อมเส้นใยในน้ำย้อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจาง สามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ เช่น ปอ ป่าน และโพลีเอมายด์ เป็นต้น ตัวสีย้อมเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกำมะถัน

3) สีย้อมอะโซอิค (Azoic Dyes) สีย้อมกลุ่มนี้ใช้กับเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีชนิดนี้จะไม่ละลายน้ำ

4) สีย้อมเบสิค (Basic Dyes) นิยมใช้ย้อมขนสัตว์ และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด ย้อมติดเส้นใยของเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย ซึ่งบางครั้งจะเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่า สีแคดไอออน ย้อมติดเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย

5) สีย้อมไดเรกท์ (Direct Dyes) สีย้อมไดเรกท์บางชนิดเรียกว่าสีย้อมฝ้าย เพราะเป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่สามารถย้อมติดใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องเติมสารช่วยย้อม แต่ในปัจจุบันการย้อมด้วยสีไดเรกท์นี้จะใช้เกลือช่วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมในกลุ่มนี้มีโทนสี คุณสมบัติการย้อม ความคงทน ราคาแตกต่างกันมาก ถ้าเป็นสีที่คงทนมาก โครงสร้างก็จะซับซ้อนมาก ราคาทุนก็จะสูงตามไปด้วย

6) สีย้อมมอแดนท์ (Modant Dyes) ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เมื่อสีก่อตัวขึ้นบนผ้าแล้วจะนำมาย้อมทับด้วยเกลือโลหะซึ่งจะมีความคงทนมากกว่าผ้าที่ไม่ย้อมทับด้วยเกลือโลหะ

7) สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes) ใช้ย้อมฝ้ายโดยเฉพาะ ตัวสีย้อมชนิดนี้ราคาถูก แต่สีที่ย้อมแล้วจะไม่ค่อยสดใส ตามปกติตัวสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่ โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ ทำให้สีสามารถละลายน้ำได้ดี

8) สีย้อมแวต (Vat Dyes) นิยมใช้กับเส้นใยเซลลูโลส โดยเฉพาะเส้นใยฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ ไม่ละลายน้ำ ต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาทำให้ละลาย เช่นเดียวกับสีย้อมชนิดซัลเฟอร์ สีแวตเมื่อถูกรีดิวซ์จะมีสีครามและมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมเข้าไปในเส้นใย และเมื่อถูกอากาศจะถูกออกซิไดซ์ให้กลับกลายเป็นสีแวตที่ไม่ละลายน้ำอย่างเดิม

9) สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dyes): ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายได้ในน้ำ ประจุของสีเป็นประจุลบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะติดแน่นกับเส้นใย

10)สีย้อมโลหะ (Metalic Dyes) เป็นสีย้อมอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ มีประจุลบ ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

11) สีย้อมโอเนียม (Oniukm Dyes) สีชนิดนี้นิยมใช้พิมพ์ผ้ามากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสีที่สามารถทำให้ละลายได้ในน้ำ รูปแบบการย้อมคล้ายกับสีแวต

2) การจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

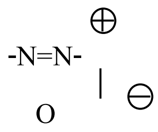
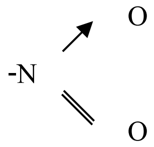
สามารถแบ่งสีย้อมได้เป็น 2 ชนิด ชนิดหนึ่งละลายน้ำได้เรียกว่า สีย้อม (Dyes) อีกชนิดหนึ่งไม่ละลายน้ำเรียกว่า ปิกเมนต์ (Pigments)

3) การจำแนกตามลักษณะทางเคมี

โครโมฟอร์ (Chromophores) เป็นกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อมที่ทำให้สีปรากฏออกมาทำให้ ตามนุษย์ปกติมองเห็นเนื่องจากกลุ่มอะตอมนี้จะเป็นตัวดูดกลืนแถบสีขาวไว้บางแถบและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

ออกโซโครม (Auxochromes) เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใย ถ้าโมเลกุลที่ไม่มีกลุ่มอะตอมออกโซโครมนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใยซึ่งเรียกว่า โครมาเจน (Chromagen) โดยทั้งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ออกโซโครมและโครมาเจนเป็นส่วนสำคัญในการแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของโครโมฟอร์และออกโซโครมของสีย้อม

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม	หมู่พันธะเคมี	ชื่อพันธะ
Chromophores	-N=N-	Azo
	>C=S	Thio
	-N=O	Nitroso
		Azoxy
		Nitro
	-C=N-	Azomethine
	>C=O	Carbonyl
	>C=C<	Ethenyl
Auxochromes	$-NH_2$	Amino
	$-NHCH_3$	Methylamino
	$-NH(CH_3)_2$	Dimethyl amino
	$-SO_3H$	Sulphonic acid
	-OH	Hydroxy
	-COOH	Carboxylic acid
	-CL	Chloro
	$-CH_3$	Methyl

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของโครโมฟอร์และออกโซโครมของสีย้อม (ต่อ)

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม	หมู่พันธะเคมี	ชื่อพันธะ
	$-OCH_3$	Methoxy
	-CN	Cyano
	$-COCH_3$	Acetyl
	$-CONH_2$	Amido

2.1.3 สีรีแอกทีฟ

สีรีแอกทีฟ (Reactive dye) เป็นสีย้อมที่แบ่งตามลักษณะการใช้งาน ได้รับการพัฒนาและคิดค้นผลิตขึ้นในปีคริสต์ศักราช 1956 โดยพบว่าถ้าทำให้สีมีหมู่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยพันธะโควาเลนท์ สามารถย้อมบนขนสัตว์ ไหม ไนลอน เซลลูโลสได้ การใช้งานสีรีแอกทีฟจำเป็นต้องมีการเติมเกลือเพื่อช่วยในการย้อม เพราะปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีเมื่ออยู่ในสภาวะด่างสูง สีรีแอกทีฟเป็นสีที่ย้อมง่ายและสามารถย้อมได้ด้วยกระบวนการย้อมหลายวิธี พร้อมทั้งส่งเสริมให้ผ้าที่ผ่านกระบวนการย้อมมีความคงทนต่อการซักล้างสูง มีความสว่างสดใสมากโดยเฉพาะเมื่อเทียบกับสีไดเรกท์หรือสีแวต และยังมีสีสันให้เลือกมากมาย ในด้านราคาก็ไม่แพงจนเกินไป (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2547) สีรีแอกทีฟได้รับความนิยมมาก มีปริมาณการใช้งานประมาณร้อยละ 60 - 80 ของสีทั้งหมดที่ใช้ รองลงมา คือ สีเอสิดและสีไดเรกซ์ (Franciscon และคณะ, 2009)

โครงสร้างเคมีของสีรีแอกทีฟ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน เขียนเป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่าย คือ

S – D – T – X

D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสีและสร้างการยึดเกาะกับเส้นใยเซลลูโลส

X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซีของเส้นใยเซลลูโลส

T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive system กับโครโมฟอร์

S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงและเป็นกลุ่มที่อยู่ติดกับโครโมฟอร์ (โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิก ($-SO_2Na$) อาจมี 1 กลุ่มหรือมากกว่า)

สีย้อมรีแอกทีฟหมู่อะโซ สำหรับสีย้อมชนิดนี้จะมีโครงสร้างโครโมฟอร์ของโมเลกุลเป็นอะโซ (-N=N-) ซึ่งได้แก่สัญลักษณ์กลุ่ม D หรือ Chromophoric group ในโครงสร้างเคมีของสีรีแอกทีฟในหัวข้อ 3.2.1 ส่วนกลุ่ม Reactive system (X) Bridging group (T) หรือ Solubilising group (S) ในโครงสร้างจะเป็นหมู่ใดก็ได้

พันธะอะโซ (Azo Bond) คือ กลุ่มอะตอมไนโตรเจนสร้างพันธะคู่ต่อกัน (-N=N-) ในโครงสร้างสีอาจมีพันธะอะโซ 1 กลุ่มหรือมากกว่า ประเภทของสีย้อมที่มีพันธะอะโซเป็นโครโมฟอร์ ได้แก่ (บุษรา ประชุมญาติ, 2545)

1. Monoazo dyes ประกอบด้วยโครโมฟอร์อะโซเพียง 1 กลุ่ม

2. Diazo หรือ Biazo dyes มีโครโมฟอร์อะโซ 2 กลุ่ม

3. Triazo dyes มีโครโมฟอร์อะโซ 3 กลุ่ม

4. Polyazo dyes ประกอบด้วยโครโมฟอร์อะโซตั้งแต่ 4 กลุ่มขึ้นไป

5. Mordant azo dyes คือ กลุ่มอะโซที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทำหน้าที่เป็นมอร์แดนท์หรือตัวช่วยเพิ่มการยึดเกาะ

6. Stilbene azo dyes ประกอบด้วยอะโซหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ซึ่งให้สีเหลืองหรือส้มสามารถย้อมได้รวดเร็วและมีการยึดเกาะที่ดีสำหรับเส้นใยฝ้าย

7. Pyrazolone azo dyes เป็นสีย้อมอะโซที่มีหมู่ไพราซอลในโครงสร้าง

2.2 ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสียสีย้อมมากที่สุด โดยเฉพาะในขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมและพิมพ์ โดยเฉลี่ยในการผลิตผลิตภัณฑ์สิ่งทอน้ำหนัก 1 กิโลกรัม จำเป็นต้องใช้น้ำประมาณ 0.16 ลูกบาศก์เมตร ยิ่งไปกว่านั้น อุตสาหกรรมฟอกย้อมจำเป็นต้องใช้สารเคมีจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีสารเคมีเจือปนอยู่ค่อนข้างสูงซึ่งหากไม่มีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำภายนอก จะก่อให้เกิดผลกระทบอย่างมากต่อชุมชน สิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศได้ (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2547)

ปริมาณและสมบัติของน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานแต่ละแห่งแตกต่างกัน ซึ่งลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตมักจะมีค่าซีโอดีสูงแต่มีค่าบีโอดีต่ำ ค่าของแข็งละลายน้ำสูงและสีของน้ำเสียมีสีย้อมรวมอยู่ด้วย ทำให้เกิดความน่ารังเกียจและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การสำรวจเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างน้ำเสียใช้วิธีจ้วงตัก (Grab Sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย โดยค่าที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรกในรูปของค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นพีเอช (pH) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และ ค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวนข้อมูล (แหล่ง)
	pH	BOD (มก./ล.)	COD (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	สี (Pt Co)	
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าถัก	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้า/อื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

(ที่มา: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542 อ้างถึงใน บัญชา บุญอนันต์วงศ์, 2554)

น้ำจากกระบวนการฟอกย้อมอาจมีความเข้มข้นของสีอยู่ระหว่าง 10-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นด่างสูง ค่าซีโอดีสูง ปริมาณสารอินทรีย์และสารเคมีตกค้างอยู่ในน้ำจำนวนมาก สีย้อมถูกปรับปรุงโครงสร้างเคมีเพื่อความคงทนต่อสภาวะทั่วไป จึงเกิดการย่อยสลายได้ยาก (O'Neill และคณะ, 1999) ส่วนผลกระทบของน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมสามารถก่อให้เกิดผลกระทบได้มากมาย เช่น ทำให้ทัศนียภาพของแหล่งน้ำเสียไป แสงแดดไม่สามารถส่องผ่านลงไปในน้ำเนื่องจากสีย้อมดูดกลืนคลื่นแสงไว้ เป็นผลให้อัตราการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำลดลง ปริมาณออกซิเจนในน้ำมีค่าลดลง ส่งผลให้เกิดสภาพความเป็นพิษเฉียบพลันต่อสัตว์น้ำ และอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงกระจายไปทั่วโลก (Saratale และคณะ, 2011)

สำหรับประเทศไทย ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้สีของน้ำทิ้งต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) ดังนั้นก่อนปล่อยน้ำเสียออกจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นเสียก่อน แต่สมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการเปลี่ยนแปลงในตัวเองอยู่ตลอดเวลา ถ้าเลือกใช้ระบบบำบัดที่ไม่เหมาะสม นอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายแล้ว น้ำทิ้งก็จะมีค่าไม่ผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งในปัจจุบันหน่วยงานของรัฐบาลเริ่มมีความพยายามที่จะผลักดันให้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของสีในหน่วย ADMI เพื่อใช้ควบคุมสีที่ปนเปื้อนมาในน้ำเสียก่อนปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีของประเทศไทยที่ให้ความตระหนักถึงเรื่องสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากยิ่งขึ้น

2.3 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

การบำบัดน้ำเสียสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อมสามารถสามารถแยกกระบวนการบำบัดออกได้เป็น การบำบัดทางเคมี การบำบัดทางกายภาพและการบำบัดทางชีวภาพ

2.3.1 การบำบัดทางเคมี (Chemical treatment)

การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment) เป็นเทคนิคใหม่ที่นำมาใช้ โดยปฏิกิริยาออกซิไดซ์ที่หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อมด้วยโอโซน ส่งผลให้โครงสร้างสีย้อมถูกย่อยสลาย และยังรวมไปถึงสามารถออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ในน้ำทิ้งได้ เพราะโอโซนมีสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ข้อดีของวิธีนี้ คือไม่เพิ่มปริมาณน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์จากกระบวนการบำบัด สามารถกำจัดสีย้อมไปพร้อมกับสารอินทรีย์ในขั้นตอนเดียว ต้องการพื้นที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์น้อยและเป็นวิธีที่ไม่มีอันตราย เพราะไม่ต้องใช้สารเคมีที่มีความไวสูงต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่สามารถบำบัดสีดิสเพอร์สและสีย้อมชนิดที่ไม่ละลายน้ำ ค่าใช้จ่ายสูง และอาจเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่มีความเป็นพิษมากกว่าสารประกอบเดิม (Tehrani-Bagha, Mahmoodi และ Menger, 2010)

ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton's Oxidation) สารเคมีเฟนตันนั้นประกอบด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับเฟอรัสไอออน (Fe_2^{+}) ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ($HO^{\cdot}$) ในสภาวะที่มีความเป็นกรด อนุมูลไฮดรอกซิลสามารถออกซิไดซ์สารประกอบต่างๆ ในน้ำทิ้งได้ค่อนข้างสูง อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ง่ายต่อการติดตั้ง อุณหภูมิไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัด สามารถบำบัดได้ทั้งสีชนิดที่ละลายและไม่ละลายน้ำ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำได้อีกด้วย (Solozhenko, Soboleva และ Goncharuk, 1995) แต่วิธีนี้ทำให้มีตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมาก (จันทิมา ชั่งสิริพร และคณะ, 2551)

อิเล็กโทรเคมิคอลออกซิเดชัน (Electro chemical oxidation) มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สูง ซึ่งการบำบัดด้วยไฟฟ้าใช้หลักการออกซิเดชัน-รีดักชันของสารอินทรีย์กับประจุไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างจากวิธีการบำบัดอื่นๆ ที่เน้นการทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสีหรือใช้กลไกการดูดซับสีย้อมไว้ ประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งข้อเสียของการบำบัดด้วยวิธีนี้คือ มีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในอัตราสูงมาก อีกทั้งผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาคือ สารประกอบคลอรีนและโลหะหนัก (Gupta และ Suhas, 2009)

2.3.2 การบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment)

การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นการดูดซับสารต่างๆ ให้ติดอยู่ที่พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยสามารถดูดซับได้ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เช่น ฟีนอล สารฆ่าแมลง สารประกอบคลอรีน สารประกอบอินทรีย์ที่เป็นเหตุของกลิ่นและรสในน้ำ เป็นต้น การเลือกสารดูดซับ (Adsorbent) ต้องคำนึงถึงสมบัติของสารดูดซับต่อมลสารที่ต้องการดูดซับว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อกันได้หรือไม่ และต้องสามารถนำกลับสารดูดซับมาใช้ซ้ำได้ (Regeneration) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีย้อมได้หลายชนิด (Saratale และคณะ, 2011) แต่ข้อจำกัดของถ่านกัมมันต์ คือ เมื่อผ่านการใช้งานและผ่านการเวียนกลับมาใช้ซ้ำจะทำให้ความสามารถของการดูดซับลดลง จึงต้องมีการเปลี่ยนหรือเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ ขึ้นส่งผลให้ต้นทุนการบำบัดสูงขึ้น ต้องบำบัดสารเคมีและน้ำเสียที่เกิดขึ้น (Gupta และ Suhas, 2009)

การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) สามารถกำจัดสีย้อมที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ได้ดี กระบวนการบำบัดจะเติมสารเคมีบางชนิด เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)^3$) เพื่อสร้างตะกอน แล้วตามด้วยการรวมตะกอนและตกตะกอนลงมา หรือผ่านเข้าสู่ถังกวาดตะกอนถ้าตะกอนมีลักษณะไม่จมตัว ซึ่งน้ำที่ผ่านการแยกตะกอนออกแล้วจะต้องเข้าไปสู่ระบบกรองเป็นขั้นตอนสุดท้าย ข้อดีของวิธีนี้ คือ สามารถกำจัดสีย้อมได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสี แต่ข้อเสีย คือ มีขั้นตอนต่อกันหลายขั้นตอน ต้องมีกระบวนการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นต่อไป และต้องใช้สารเคมีช่วยในการสร้างตะกอนส่งผลให้ต้นทุนการบำบัดสูงขึ้น (Golob, Vinder และ Simonic, 2005.)

เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane Technology) นิยมใช้ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มและการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งประสิทธิภาพของการบำบัดก็จะแตกต่างกัน โดยประสิทธิภาพของการกรองด้วยไมโครฟิลเตรชัน(Microfiltration)มีค่าไม่สูงนัก เพราะเมมเบรนมีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ เมื่อเทียบกับโมเลกุลของสีย้อม อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) มีประสิทธิภาพการกรองที่ดีและเหมาะสำหรับการบำบัดสีที่ไม่ละลายน้ำหรือพิกเมนต์ (Pigment) ข้อเสียคือ เม็ดสีจะสะสมและอุดตันบริเวณรูพรุนของแผ่นเมมเบรน จึงต้องทำการล้างเมมเบรนด้วยแรงดันซึ่งต้องพลังงานสูง อีกทั้งการกรองด้วยเมมแบรนทำงานได้ดีที่พีเอชเป็นกลาง (Amini และคณะ, 2011) แต่น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีค่าอยู่ในช่วงของความเป็นด่างที่สูง ส่วนกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมสูงและนิยมใช้มากที่สุด เพราะสามารถกำจัดสีย้อมและเกลือของกรดอ่อนออกจากน้ำเสียได้ดี อีกทั้งสามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ซ้ำในกระบวนการอื่นๆ ได้ แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ เมมเบรนที่ใช้มีราคาแพง และการกรองต้องเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีแรงดันสูง (Gupta และ Suhas, 2009)

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมด้วยกระบวนการทางเคมีและกายภาพ

กระบวนการทางเคมี/กายภาพ	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน	ไม่เพิ่มปริมาณของน้ำเสีย กำจัดสีย้อมและสารอินทรีย์ในขั้นตอนเดียว การติดตั้งเครื่องมือไม่ซับซ้อน ใช้พื้นที่น้อย	ความสามารถในการลดค่าซีโอดีต่ำ	Tehrani-Bagha และคณะ (2010)
ปฏิกิริยาเฟนตัน	อุปกรณ์ติดตั้งง่าย อุณหภูมิไม่มีผลต่อประสิทธิภาพ สามารถเพิ่มความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำ	เกิดตะกอนปริมาณมาก	Solozhenko และคณะ (1995) จันทิมา ชั่งสิริพร และคณะ (2551)
อิเล็กโทรเคมิคอลออกซิเดชัน	ประสิทธิภาพสูง อุปกรณ์ไม่ใหญ่มาก	ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับขั้วไฟฟ้าที่ใช้ และเสียค่าไฟฟ้าสูง เกิดสารประกอบคลอรีนและโลหะหนัก	Gupta และ Suhas (2009)
การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	สามารถดูดซับสีย้อมได้หลายชนิด	ถ่านกัมมันต์เสื่อมสภาพ ต้องบำบัดสารเคมีและน้ำเสีย	Gupta และ Suhas (2009) Saratale และคณะ (2011)
การตกตะกอนด้วยสารเคมี	ตกตะกอนโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ ไม่เกิดสารประกอบที่เป็นพิษ	ต้องกำจัดตะกอนที่เกิด ต้องใช้สารเคมีช่วยสร้างตะกอน	Golob และคณะ (2005)
เทคโนโลยีเมมเบรน	สามารถกำจัดสีและเกลือของกรดอ่อน นำน้ำกลับไปใช้ซ้ำได้	เยื่อกรองอุดตัน และราคาแพง ทำงานภายใต้แรงดันสูง	Gupta และ Suhas (2009)

2.4 การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment)

กระบวนการนี้เป็นการบำบัดที่ต้นทุนไม่สูง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถบำบัดสีย้อมได้หลายชนิด (Tony, Goyal และ Khanna, 2009) แต่ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพจะต้องให้ความสำคัญกับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ พีเอช ความเข้มข้นและชนิดของสีย้อม แหล่งไนโตรเจน สารรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) และสารให้อิเล็กตรอน (Electron donor) เพราะปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของจุลินทรีย์ในระบบ (Saratale และคณะ, 2011) ซึ่งการบำบัดสีย้อมด้วยวิธีทางเคมีและทางกายภาพอาจมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมดีกว่า แต่ในขณะเดียวกันเทคโนโลยีเหล่านั้นก็ต้องมีค่าใช้จ่ายที่สูงเช่นกัน และนอกจากนั้นในบางกระบวนการยังต้องมีขั้นตอนการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นมาใหม่อีกด้วย (Bafana และคณะ, 2008)

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ต้องอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradable organic compound) โดยจุลินทรีย์เหล่านี้จะใช้สารอินทรีย์เป็นอาหารและสารตั้งต้นในการดำรงชีวิต การเจริญเติบโต และการสังเคราะห์เซลล์ใหม่ และผลผลิตที่เกิดขึ้นคือก๊าซชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำ (H_2O) ก๊าซมีเทน (CH_4) และอื่นๆ แล้วแต่ว่าเป็นการบำบัดด้วยจุลินทรีย์ชนิดใด เป็นต้น และมีสารที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพหลงเหลืออยู่ (Non biodegradable residual)

การบำบัดทางชีวภาพ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามชนิดของจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ การบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศหรือใช้ออกซิเจน (Aerobic treatment) และการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศหรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic treatment)

2.4.1 การบำบัดแบบใช้อากาศ (Aerobic treatment)

ระบบบำบัดแบบใช้อากาศเป็นการบำบัดน้ำเสียที่ใช้จุลินทรีย์กลุ่มใช้อากาศ (Aerobic bacteria) ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งภายหลังการบำบัดจะมีสารอินทรีย์คงเหลือในระบบปริมาณความเข้มข้นต่ำมาก และจะเกิดเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ในปริมาณสูงมาก ปกติแล้วสีย้อมไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการเอเอสแบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge; AS) (Vandevivere, Bianchi และ Verstraete, 1998) ทั้งนี้ก็เป็นเพราะออกซิเจนนั้นมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนที่ดีกว่าสีอะโซ (Dos Santos, Cervantes และ Lier, 2007.) แต่ในบางกรณีสีย้อมอะโซสามารถบำบัดได้ภายใต้ระบบแบบใช้ออกซิเจน โดยจากการศึกษาของ Chen และคณะ (2002) พบว่าระบบบำบัดแบบเอเอสสามารถบำบัดสีย้อมได้เมื่อมีการเติมธาตุอาหารที่มีความจำเพาะต่อจุลินทรีย์

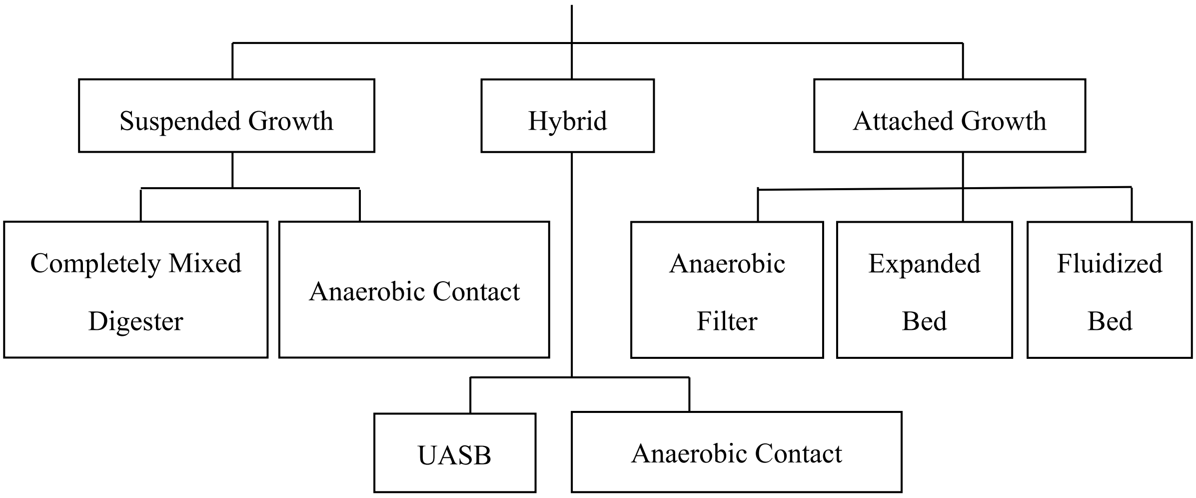
ในระบบ กลไกการย่อยสลายสีย้อมที่เกิดขึ้นในระบบเติมอากาศนั้นมีลักษณะเช่นเดียวกันกับกลไกที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ แต่ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและสารอินทรีย์ของระบบจะลดเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียเพิ่มสูงมากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร และนอกจากนี้แล้วยังมีการศึกษาความสามารถของจุลินทรีย์แต่ละชนิดต่อการบำบัดสีย้อม ซึ่งก็พบว่ามีจุลินทรีย์อยู่หลายชนิดสามารถสร้างเอนไซม์ขึ้นมาเพื่อบำบัดสีย้อมอะโซภายใต้สภาวะใช้อากาศได้ เช่น เอนไซม์โมโนอ็อกซิเจนเนส (Mono-oxygenase) และไดออกซิเจนเนส (Di-oxygenase) ซึ่งเอนไซม์นี้จะเข้าไปทำลายพันธะภายของวงแหวนอะโรเมติก ส่งผลให้แตกตัวออกจากโครงสร้างของสีย้อม แต่ก็เป็นจุลินทรีย์เพียงส่วนน้อยเท่านั้น (Ola และคณะ, 2010) และนอกจากนั้นยังมีจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่งที่สามารถเจริญเติบโตได้ด้วยการใช้สีย้อมอะโซเป็นแหล่งพลังงาน โดยการสลายพันธะอะโซ ทำให้เกิดเป็นสารประกอบอะโรเมติกเอมีน จากนั้นจึงสังเคราะห์พลังงานจากสารประกอบนี้ (Saratale และคณะ, 2011) และจากการศึกษาของ Kodam และคณะ (2004) พบว่า จุลินทรีย์ *KMK 48* (ซึ่งยังไม่สามารถระบุสายพันธุ์ชัดเจนได้) สามารถสังเคราะห์โมเลกุลของสีย้อมเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนสำหรับการเจริญของเซลล์ได้

2.4.2 การบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic treatment)

การบำบัดแบบไร้อากาศเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายหลายกลุ่มในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ 80-90 จะถูกย่อยสลายแล้วเปลี่ยนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่ภายหลังการบำบัดจะยังคงมีปริมาณของสารอินทรีย์คงหลงเหลืออยู่ในระบบในปริมาณที่ค่อนข้างสูง สำหรับการบำบัดแบบไร้อากาศนั้นจะมีปริมาณของเซลล์จุลินทรีย์ใหม่ที่เกิดขึ้นมาในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบใช้อากาศ โดยรูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ตามลักษณะของจุลินทรีย์ในระบบ ดังภาพที่ 2.1

ระบบจุลินทรีย์แขวนลอย (Suspended growth) คือ ระบบที่จุลินทรีย์มีลักษณะแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย ต้องมีการกวนให้จุลินทรีย์ผสมกับน้ำเสียภายในถังปฏิกิริยา และจำเป็นต้องมีถังตกตะกอนเพื่อแยกน้ำที่ผ่านการบำบัดและจุลินทรีย์ออกจากกัน รวมถึงมีการเวียนเชื้อจุลินทรีย์กลับเข้าสู่ถังปฏิกิริยาอีกครั้ง

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ



ภาพที่ 2.1 รูปแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศแบบต่าง ๆ
(ที่มา : แซน.อี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์, 2546)

ระบบการเติบโตแบบเกาะติด (Attached Growth) เป็นระบบที่จุลินทรีย์เติบโตบนตัวกลาง โดยมีลักษณะการเจริญเป็นเมือกบางๆ เรียกว่า ฟิล์มชีวภาพ หรือไบโอฟิล์ม (Biofilm) ซึ่งปัญหาของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ คือมีการตกตะกอนที่ไม่ดีจึงมีการหลุดออกจากระบบไปพร้อมกับน้ำที่ผ่านการบำบัด ดังนั้นการทำให้จุลินทรีย์เกาะติดอยู่กับตัวกลางจึงช่วยลดการหลุดของจุลินทรีย์ออกไปจากระบบ

ระบบแบบผสม (Hybrid) เป็นการนำข้อดีของแต่ละระบบมาใช้ลดข้อเสียซึ่งกันและกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดให้สูงขึ้น

การบำบัดน้ำเสียเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชัน-รีดักชัน มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารให้อิเล็กตรอนและสารรับอิเล็กตรอน แล้วเกิดพลังงานขึ้นจำนวนหนึ่ง สารอินทรีย์หรือมลสารในน้ำเสียทำหน้าที่เป็นสารให้อิเล็กตรอน และสารอื่นในน้ำเป็นสารรับอิเล็กตรอน พลังงานที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้เพื่อสร้างเซลล์ใหม่และอีกส่วนสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน

กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (Complex Organic) ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เกินกว่าจุลินทรีย์จะสามารถดูดซึมเข้าเซลล์ได้ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก โดยจุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลซิง (Hydrolysing bacteria) จะผลิตเอนไซม์แล้วปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) เพื่อให้จุลินทรีย์สามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ได้ เช่น ย่อยสลายโปรตีนให้กลายเป็นกรดอะมิโน ย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตให้กลายเป็นกลูโคสย่อยสลายไขมันให้กลายเป็นกรดไขมัน เป็นต้น ซึ่ง

ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ การสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) เป็นปฏิกิริยาการสร้างกรด (Acidogenesis) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้สารอินทรีย์โมเลกุลเล็กหรือกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid; VFA) เช่น กรดอะมิโน กลูโคส กรดไขมัน เป็นต้น เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์โดยผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) ผลผลิตที่ได้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดวาเลอริก และกรดแลคติก เป็นต้น โดยมีสัดส่วนของกรดอะซิติกสูงที่สุด นอกจากนั้นแล้วยังสามารถพบผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ปนออกมาอีกด้วย ซึ่งได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้าภายในระบบเกิดปฏิกิริยาการสร้างกรดในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงและส่งผลกระทบต่อการดำรงชีพของจุลินทรีย์กลุ่มอื่นๆ ในระบบ

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) เป็นปฏิกิริยาย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากขั้นตอนของปฏิกิริยาการสร้างกรดให้เป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน โดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนิก (Acetogenic bacteria) หรือจุลินทรีย์สร้างกรดอะซิติก เป็นขั้นตอนสำคัญของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยระบบไร้อากาศ เนื่องจากในขั้นตอนของการสร้างมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogens) มีความจำเพาะเจาะจงในการใช้สารอาหารสูงมาก จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดอะซิติกที่ผลิตไฮโดรเจนนี้จะช่วยไม่ให้เกิดการสะสมตัวของกรดโพรไพโอนิกและกรดบิวทิริกในถังปฏิกิริยา มีผลให้ค่าพีเอช ลดลง ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน

ขั้นตอนที่ 4 ปฏิกิริยาการสร้างมีเทน (Methanogenesis) เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดแรก คือ จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic bacteria) โดยได้คาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์และได้พลังงานจากไฮโดรเจน ชนิดที่สอง คือ จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากกรดอะเซติก (acetotrophic bacteria) ซึ่งใช้อะเซเตดเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนเหล่านี้มีอัตราการเจริญเติบโตช้าและมีความจำเพาะต่อชนิดอาหารมาก คือ สามารถใช้สารโมเลกุลเล็กที่มีคาร์บอนเพียง 1 ถึง 2 คาร์บอนเท่านั้น เช่น เมทานอล กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก รวมถึงก๊าซไฮโดรเจน

ส่วนกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมขึ้นไป จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ ทำให้มีสารตกค้างอยู่ในระบบจำนวนมาก เป็นเหตุผลที่ทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

แบบไร้อากาศไม่สามารถลดค่าซีโอดีของน้ำเสียให้มีค่าต่ำเท่ากับกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศได้ นอกจากนี้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมีความว่องไวต่อสภาวะแวดล้อมมาก ไม่สามารถทนต่อออกซิเจนแม้ปริมาณเพียงเล็กน้อยได้ สามารถเติบโตดีเมื่ออยู่ในช่วงพีเอช 6.8 ถึง 7.2 (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2548) ดังนั้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจึงขึ้นอยู่กับการทำงานของจุลินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและขั้นตอนการสร้างกรด

สีย้อมสามารถถูกบำบัดได้ดีในสภาวะไร้อากาศ โดยจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันบริเวณพันธะอะโซ แล้วสลายกลายเป็นสารประกอบอะโรเมติกเอมีน (Aromatic amine) ซึ่งจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศไม่สามารถบำบัดสารชนิดนี้ได้ สำหรับอิเล็กตรอนนั้นอาจมาจากเซลล์ของจุลินทรีย์โดยตรงหรือจากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน เพราะซัลเฟตสามารถใช้เป็นสารให้อิเล็กตรอนได้ ภายใต้สภาวะไร้อากาศ อีกทั้งจุลินทรีย์ในระบบต้องการแหล่งพลังงานอื่นเพื่อการเจริญเติบโตด้วย เช่น กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids, VFAs) หรือ กลูโคส (Sen และ Demirer, 2003)

2.4.3 ซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate reduction)

การบำบัดน้ำเสียที่มีซัลเฟต ซัลไฟต์ ไธโอซัลเฟตหรือสารประกอบซัลเฟตอยู่ด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้น จะเกิดปฏิกิริยาขึ้น 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาสร้างมีเทนและปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน โดยปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันจะเกิดจากจุลินทรีย์กลุ่มรีดิวซิงซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria, SRB) ซึ่งจะใช้ไฮโดรเจนหรืออะซิเตทเป็นสารให้อิเล็กตรอน และจะใช้ซัลเฟต ซัลไฟต์ ไธโอซัลเฟตหรือสารประกอบซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอน สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะให้ค่าพลังงานมากกว่าปฏิกิริยาสร้างมีเทน

Albuquerque และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันต่อการบำบัดสีรีแอกทีฟอะโซ ด้วยระบบเอสบีอาร์ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อทำการเติมสารไดโซเดียมโมลิบเดท (Disodium- molybdate; Na_2MoO_4 $2HO_2$) เพื่อยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มซัลเฟตรีดิวซิงแล้ว ประสิทธิภาพการลดสีของระบบมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ประสิทธิภาพการบำบัดสีมีค่าลดลงจากร้อยละ 90 เหลือเพียงร้อยละ 15 แต่ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และเมื่อหยุดเติมสารยับยั้ง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบกลับสู่มีค่าการบำบัดสีย้อมสูงเหมือนที่ไม่มีการเติมสารยับยัง และนอกจากนั้นผลการศึกษายังพบว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กเฟอรัสไปเป็นเหล็กเฟอริก ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$) สามารถเป็นปฏิกิริยารับส่งอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของธาตุอาหารหลักไปยังสีย้อมอะโซได้

2.4.4 ไนเตรทรีดักชัน (Nitrate reduction)

ไนเตรทรีดักชัน เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนจากแอมโมเนียให้กลายเป็นไนเตรท ไนไตรท์และไนโตรเจน ตามลำดับ สำหรับในระบบบำบัดแบบใช้อากาศ ไนเตรทมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีรองมาจากออกซิเจน (Van der Zee and Villaverde, 2005) จุลินทรีย์กลุ่มที่บำบัดสารชนิดนี้จะใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งจากการศึกษาของ Li และ Bishop (2002) พบว่าเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของสีย้อมสูงขึ้น อัตราการบำบัดแอมโมเนียของระบบมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสีย้อมอาจมีผลต่อออโทโทรฟิกกลุ่มไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (Autotrophic nitrifying bacteria) มากกว่ากว่าแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic bacteria)

Panswad และ Luangdilok (2000) ศึกษาการบำบัดสีย้อมไดอะโซด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เมื่อในน้ำเสียมีไนเตรทรวมอยู่ด้วย พบว่าอัตราการบำบัดสีมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับน้ำเสียที่ไม่มีไนเตรท โดยสีย้อมจะทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอน แต่เมื่อมีไนเตรทอยู่ในระบบแล้ว ไนเตรทจะมีความความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าพันธะอะโซ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมมีค่าลดลง ซึ่งจากการศึกษาของ Farabegoli และคณะ (2010) แนะนำว่า เมื่อพบว่าน้ำเสียมีไนเตรทรวมอยู่ด้วย จะต้องมีการเพิ่มอัตราส่วนของซีโอดีต่อความเข้มข้นสีย้อมให้มีค่าสูงขึ้น เพื่อให้มีปริมาณของสารให้อิเล็กตรอนเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ

2.4.5 จลนพลศาสตร์ของการลดสี (Kinetics of decolourisation)

งานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับการบำบัดสีอะโซด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ พบว่า การลดลงของสีย้อมอะโซเกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First order) คือ การลดลงของสีย้อมขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ซึ่งการบำบัดจะคงที่สำหรับสีย้อมชนิดโมโน ส่วนสีย้อมชนิดไดอะโซและโพลีอะโซ การบำบัดจะเกิดขึ้นได้เร็วในช่วงแรกแล้วเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการบำบัดจะมีค่าลดลง (Van der Zee F.P., 2002) แต่ทั้งนี้อันดับของปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นแตกต่างกันออกไปซึ่งจะขึ้นอยู่กับการควบคุมสภาวะของระบบต่างกัน (Lourenco, Novais และ Pinheiro, 2006)

การบำบัดสีย้อมด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ พบว่า การลดสีจะเกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้ โดยแสดงดังสมการที่ 1 เมื่อไม่มีการคำนึงถึงอัตราการเกิดและตายของเซลล์จุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Isik และ Sponza, 2005; Lourenco และคณะ, 2006; Koupaie, Moghaddam และ Hashemi,, 2012)

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V} \times S_0 - \frac{Q}{V}S - k_1 S \qquad 1)$$

โดยที่สภาวะคงที่ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น (-dS/dt) ถือว่ามีค่าน้อยมาก ดังนั้น จึงสามารถจัดสมการใหม่ได้ แสดงดังสมการที่ 2

$$\frac{S_0 - S}{\theta_H} = k_1 s \qquad 2)$$

เมื่อ S_0 , S คือ ค่าความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้นและและที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

θ_H คือ ระยะเวลากักเก็บ (วัน)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (ต่อวัน)

จากการศึกษาของ Bafana และคณะ (2008) การบำบัดสีย้อมที่ความเข้มข้นสีย้อมมีค่าตั้งแต่ 25-250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สีไดเร็กท์แบล็ค 38 (Direct Black 38) มีพันอะโซ 3 พันธะ ด้วยจุลินทรีย์ *E. gallinarum* พบว่าอัตราการบำบัดสีเป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero order)

แต่จาการศึกษาของ Sponza และ IsIk (2004) โดยใช้สีไดเร็กท์แบล็ค 38 ด้วยระบบยูเอเอสบี (UASB) ที่ความเข้มข้นสีย้อม 200-800 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า อัตราการบำบัดสีเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง (Second order) ส่วนที่ความเข้มข้นสี 1,600-3,200 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการบำบัดสีเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

เมื่อสีย้อมเข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ น้ำทิ้งที่ผ่านระบบออกมาจะมีค่าความเข้มสีลดลงอย่างมาก แต่เมื่อน้ำทิ้งเหล่านั้นออกมาสู่สภาวะที่มีออกซิเจนและแสงแล้วกลับพบว่า ค่าความเข้มสีในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ของโครโมฟอร์ของสีย้อมกับอะโรเมติกเอมีน หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชัน (Auto oxidation) ของสารอะโรเมติกเอมีนทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Moosvi และ Madamwar, 2007) หรืออาจเกิดจากการสลายสารประกอบอะโรเมติกเอมีนด้วยเอนไซม์ของจุลินทรีย์บางชนิดในระบบบำบัดใช้ออกซิเจน (Sheth และ Dave, 2010)

2.4.6 ธาตุอาหารเสริม (Nutrients)

ธาตุอาหารเสริมที่สำคัญ ได้แก่ ธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัส อัตราส่วนซีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส ที่เหมาะสม คือ 100 : 2 : 0.3 หากธาตุอาหารเสริมในระบบมีไม่เพียงพอ ส่งผลให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังมีธาตุอาหารอื่นๆ ที่จุลินทรีย์ต้องการในปริมาณน้อย แต่ถ้าขาดไปก็จะส่งผลให้จุลินทรีย์ทำงานได้ไม่เต็มที่ ในน้ำเสียโดยทั่วไปจะพบธาตุเหล่านี้ในปริมาณเพียงพอต่อการเติบโตของจุลินทรีย์อยู่แล้ว แต่สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเป็นพิษหรือสารประกอบย่อยสลายยากอยู่ด้วย จึงมีความจำเป็นที่ต้องเติมธาตุอาหารเสริมลงไป โดยปริมาณธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

สารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)	สารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)
NH_4Cl	400	$MnCl_2$•$4H_2O$	0.5
$MgSO_4$•$7H_2O$	400	NH_4VO_3	0.5
KCl	400	$CuCl_2$•$2H_2O$	0.5
Na_2S•$9H_2O$	300	$ZnCl_2$	0.5
$CaCl_2$•$2H_2O$	50	$AlCl_3$•$6H_2O$	0.5
$(NH_4)_2HPO_4$	80	$NaMoO_4$•$2H_2O$	0.5
$FeCl_2$•$4H_2O$	40	H_3BO_3	0.5
$CoCl_2$•$6H_2O$	10	$NiCl_2$•$6H_2O$	0.5
KI	10	$NaWO_4$•$2H_2O$	0.5
$(NaPO_3)_6$	10	Na_2SeO_3	0.5
Cysteine	10	$NaHCO_3$	6000

(ที่มา : Speece , 1996)

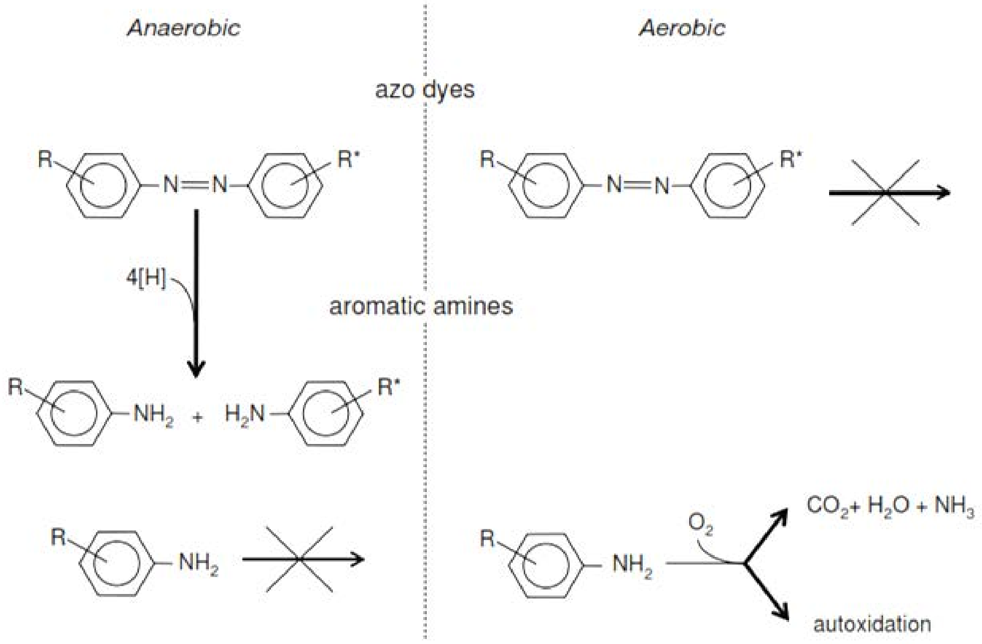
Nosheen และคณะ (2010) ศึกษาอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟ โดยการเติมไนโตรเจนและคาร์บอนลงในน้ำเสีย พบว่าการเติมธาตุคาร์บอนลงในน้ำเสีย สามารถเพิ่มเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ให้สูงขึ้นได้ การลดสีเกิดได้มากขึ้น แต่ถ้าเพิ่มธาตุคาร์บอนในปริมาณที่สูงเกินไป จะเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยในระบบ ส่งผลให้พีเอชของระบบลดลงอยู่ในสภาพที่เป็นกรด จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ และประสิทธิภาพการลดสีก็จะลดต่ำลง

Kapdan และ Alparslan (2005) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยระบบแอนแอโรบิกแพ็คคอล์ลัมน์ (Anaerobic packed column reactor) ตามด้วยระบบเอเอส เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่มีการเติมธาตุอาหารเสริมและไม่เติม โดยใช้น้ำเสียจริงจากกระบวนการฟอกย้อม พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียที่ไม่มีการเติมธาตุอาหารเสริมอยู่ระหว่างร้อยละ 40-60 แต่เมื่อเติมธาตุอาหารเสริม พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดสีมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 70-90 ดังนั้นในน้ำเสียจริงอาจจะมีธาตุอาหารเสริมไม่เพียงพอต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในระบบบำบัด จึงจำเป็นที่จะต้องเติมธาตุอาหารเสริมลงในน้ำเสียด้วย

2.5 การบำบัดร่วมแบบไร้อากาศและใช้อากาศ (Combined Anaerobic-Aerobic treatment)

การทำงานร่วมกันระหว่างระบบบำบัดแบบไร้อากาศกับระบบใช้อากาศ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น เพราะระบบไร้อากาศสามารถบำบัดสี

ย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถบำบัดสารอะโรเมติกเอมีนจึงจะเกิดการสะสมตัวขึ้นภายในระบบ แต่อะโรเมติกเอมีนสามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ สำหรับปฏิกิริยาของการบำบัดสีย้อมอะโซที่เกิดขึ้นภายในการบำบัดแบบไร้อากาศกับระบบใช้อากาศ แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การบำบัดสีอะโซและสารอะโรเมติกเอมีนภายใต้
ระบบบำบัดแบบไร้อากาศกับระบบใช้อากาศ
(Van der Zee และ Villaverde, 2005)

ภายใต้สภาวะไร้อากาศ พันธะอะโซจะทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอน โดยมีกลูโคสหรือสารอินทรีย์เป็นสารให้อิเล็กตรอน จากปฏิกิริยาสลายพันธะอะโซเกิดเป็นสารประกอบอะโรเมติกเอมีน ดังสมการที่ 3 และ 4 (Dos Santos และคณะ, 2007)

$$(R_1 - N = N - R_2) + 2e^- + 2H^+ \rightarrow R_1 - HN - NH - R_2 \quad 3)$$

$$R_1 - HN - NH - R_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow R_1 - NH_2 + NH_2 - R_2 \quad 4)$$

Lourenço และคณะ (2001) พบว่าเมื่อพันธะอะโซของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 และสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ถูกย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศจะพบสารประกอบอะโรเมติกเอมีน 2 ประเภท คือ เบนซีนเอมีน (Benzene based amine) และแนปทาลีนเอมีน (Naphthalene based amine) ส่วนในระบบบำบัดแบบใช้อากาศ แนปทาลีนเอมีนจะมีความทนต่อการบำบัดของจุลินทรีย์ในระบบมากกว่าเบนซีนเอมีน และจากการศึกษาของ Yasar, Cirik และ Cinar (2012) พบว่า เมื่อเพิ่ม

ระยะเวลาในการสัมผัสของน้ำเสียในระบบเติมอากาศ สารเบนซีนเอมีนจะถูกบำบัดได้เพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะที่แนปทาลีนเอมีนพบว่าไม่มีการลดลงจนสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยการบำบัดร่วมแบบไร้อากาศและเติมอากาศ

ระบบ	สี	ความเข้มข้น (มก/ล.)	เวลา (ชั่วโมง)	ซีโอดี (มล/ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)		อ้างอิง
					ซีโอดี	สี	
Anaerobic Down Flow Fixed Film bioreactor	Reactive Violet 5R	300	8 – 48	3,808 - 32,256	88	95	Sheth และ Dave (2010)
Anaerobic – Aerobic SBR	Remazol Red RR	50 – 500	23	1,000	-	95	Kapdan และ Ozturk (2005)
Anaerobic Continuous Fixed bed reactor	Reactive Red 141 Reactive Blue 21 Remazol Black B	1007.8 - 635.7	5.4 - 21	-	-	66 - 46	Aksu, Cagatay และ Gonen (2007)
UASB / CSTR	Direct Black 38	100 และ 3200	15 / 51	2000	84 - 48	100 - 80	Sponza และ IsIk (2005)
SBR	Remazol Black B	1533	54	2400	66	> 94	Shaw, Carliell และ Wheatley (2002)
Anaerobic / Aerobic biological Fluidized Bed	Reactive blue 13	200	20 – 70	2000	67 - 91	67 - 83	Lin และคณะ (2010)
Rotating Disc Reactors	Reactive Black 5	1250	15 และ 7.5	-	-	65	Libra และคณะ (2004)
Anaerobic SBR – Aerobic MBR	Reactive Black 5	6.25 - 125	48 – 24	300	85 - 90	98 - 99.9	You, Damodar และ Hou (2010)
Anaerobic filter - Tricking filter	Reactive Black 5	100	48	500 - 20,000	97 - 86	91 - 82	บัญชาบุญอนันต์วงศ์ (2554)

2.6 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดแบบฟิล์มชีวภาพ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบฟิล์มชีวภาพ (Bio film) ที่ได้รับความนิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบโปรยกรอง (Thickling filter) ระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating biological contactor) เมื่อฟิล์มชีวภาพเจริญเติบโตและหนาขึ้นมากๆ จะเกิดการหลุดลอกของฟิล์มชีวภาพ ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุ 3 ประการ (ปิยะชน สันดุษฎี, 2545)

1) สารอินทรีย์ไม่สามารถผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปด้านในสุดได้ ดังนั้น จุลินทรีย์จึงขาดสารอาหารและตายจนหลุดออกมา

2) ในระบบบำบัดแบบใช้ออากาศ ออกซิเจนที่ละลายน้ำไม่สามารถถ่ายเทไปถึงฟิล์มชั้นในสุดได้ จึงเกิดสภาวะแอนแอโรบิก แล้วเกิดการย่อยแบบไร้อากาศ เกิดก๊าซมีเทนสะสมอยู่ แล้วดันชั้นฟิล์มหลุดออกมา

3) เมื่อฟิล์มมีความหนามากขึ้นจะมีน้ำหนักที่มากขึ้นตามไปด้วย ประกอบกับแรงเฉือนจากการไหลของน้ำเสีย จึงทำให้ฟิล์มหลุดออกมา

ข้อดีของระบบบำบัดแบบฟิล์มชีวภาพ

1) ง่ายในการเดินระบบและดำเนินการ

2) เนื่องจากมีการสะสมตัวของจุลินทรีย์จำนวนมาก จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าสูงขึ้นด้วย

3) จุลินทรีย์ในระบบสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะน้ำเสียที่เข้าระบบได้ เช่น อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำ

4) จุลินทรีย์ในระบบมีความสามารถในการรับสารพิษในน้ำเสียได้ดี เพราะจุลินทรีย์ส่วนนอกสุดของชั้นฟิล์มที่รับสารพิษจะตายและหลุดออไป แต่จะยังมีฟิล์มส่วนล่างที่ยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อได้

5) ธรรมชาติของฟิล์มจุลินทรีย์มีความหนาแน่นสูง เมื่อหลุดออกปะปนกับน้ำทิ้งจึงสามารถแยกโดยการตกตะกอนได้ง่าย ซึ่งต่างจากระบบจุลินทรีย์แขวนลอย จำเป็นต้องมีถังตกตะกอน เพื่อทำการแยกน้ำที่ผ่านการบำบัดและเชื้อจุลินทรีย์ให้ออกจากกัน ซึ่งอาจมีตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนที่ไม่สามารถตกตะกอนได้แล้วหลุดลอยออกไปกับน้ำทิ้ง ทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพไม่เป็นที่น่าพอใจ

ข้อเสียของระบบบำบัดแบบฟิล์มชีวภาพ

1) การที่จุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่บนตัวกลาง จึงไม่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจุลินทรีย์ได้ตามสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไป จึงไม่มีวิธีที่จะควบคุมประสิทธิภาพการบำบัดและคุณภาพน้ำทิ้งได้ จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบเผื่อไว้มาก (Over design) สำหรับการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น ความเข้มข้นสารอินทรีย์ อัตราการไหล ความเป็นพิษในน้ำเสีย และอุณหภูมิ

2) มีปัญหาเรื่องการอุดตันภายในตัวกลาง โดยเฉพาะบริเวณทางน้ำเข้าซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง จึงมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของชั้นฟิล์มจึงเกิดการอุดตัน รวมไปถึงการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของความหนาของฟิล์มบริเวณทางน้ำเข้าของถังปฏิกรณ์

3) ในฤดูร้อน ระบบโปรยกรองจะมีปัญหาเรื่องกลิ่นและเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของแมลง

2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บัญชา บุญอนันต์วงศ์ (2554) ศึกษาความเข้มข้นน้ำตาลที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสีและค่าซีโอดีที่ย่อยสลายยาก โดยใช้ระบบบำบัดแบบถังกรองไร้อากาศร่วมกับถังโปรยกรอง สีที่ใช้ในการศึกษา คือ สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่ 500 1,000 2,000 5,000 10,000 และ 20,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า เมื่อซีโอดีที่เข้าระบบมีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดสีของระบบถังกรองไร้อากาศก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยสามารถบำบัดความเข้มสีในน้ำทิ้งให้ลดลงเหลือ 30 24 25 20 20 และ 16 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ส่วนการบำบัดค่าซีโอดีในถังโปรยกรองพบว่า ที่ความเข้มข้นของซีโอดีเข้าระบบตั้งแต่ 500 - 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังโปรยกรองสามารถบำบัดค่าซีโอดีให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและค่อนข้างคงที่ และผลการทดลองเพื่อศึกษาอัตราการเวียนน้ำจากระบบโปรยกรองกลับเข้าระบบไร้อากาศ พบว่าสามารถช่วยลดปริมาณการเติมด่างให้ระบบได้ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสีมีค่าไม่แตกต่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเวียนน้ำกลับ

Sheth และ Dave (2010) ศึกษาการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ด้วยระบบ Down flow fixed film bioreactor (DFFR) โดยการเปลี่ยนอัตราไหลของน้ำเสียเข้าระบบ ผลปรากฏว่าที่อัตราไหล 120 และ 800 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระบบสามารถบำบัดสีย้อมได้มากกว่า ร้อยละ 90 แต่เมื่อเพิ่มอัตราไหลเป็น 1250 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเหลือเพียงร้อยละ 60 เนื่องจากการเพิ่มอัตราไหลของน้ำส่งผลให้ระยะเวลาที่น้ำเสียสัมผัสกับฟิล์มชีวภาพสั้นลง มีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีลดลง

Farabegoli และคณะ (2010) ศึกษาการบำบัดสีรีแอกทีฟเรด 195 ด้วยระบบเอสบีอาร์ ค่าซีโอดีเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร อายุตะกอน 50 วัน ดำเนินระบบเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของสีเริ่มต้นที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบสามารถบำบัดค่าซีโอดีสูงสุดได้ร้อยละ 97

Wang และคณะ (2009) ศึกษาผลกระทบของการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ด้วยจุลินทรีย์ *Enterobacter sp. EC3* โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาล สี อุณหภูมิ และค่าพีเอช ผลการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำตาลที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพียงพอสำหรับกระบวนการบำบัดสีย้อมในระยะเวลา 36 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลเป็น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จุลินทรีย์จะถูกยับยั้งอย่างเห็นได้ชัด โดยประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลงภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 12,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดสีอยู่ในระดับต่ำเช่นเดียวกับประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อไม่มีการเติมน้ำตาลในน้ำเสียสังเคราะห์ จุลินทรีย์ไม่สามารถเติบโตได้เมื่อไม่มีแหล่งพลังงาน ประสิทธิภาพการบำบัดสีจึงอยู่ในระดับต่ำ แต่ปริมาณน้ำตาลมากกว่า 8,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จุลินทรีย์จะใช้น้ำตาลในการเติบโตมากกว่าการใช้สีอะโซ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีอยู่ในระดับต่ำ การเพิ่มความเข้มข้นสีในระบบจะต้องเพิ่มระยะเวลากักน้ำให้สูงขึ้น เพื่อให้น้ำเสียมีเวลาสัมผัสกับจุลินทรีย์นานพอ เมื่อทำการบำบัดสีย้อมที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องใช้เวลากักน้ำถึง 108 ชั่วโมง จึงสามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 80 และที่ความเข้มข้นสี 1.000 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลากักน้ำ 120 ชั่วโมง สามารถบำบัดสีย้อมได้เพียง ร้อยละ 35.63 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย เพื่อให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด ต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส และ พีเอชที่เหมาะสม คือ 7 ไม่ควรเกิน 10 ซึ่งการบำบัดสีย้อมนี้เกิดขึ้นด้วยการย่อยสลายมากกว่าการดูดซับของจุลินทรีย์ ประสิทธิภาพสูงสุดของการบำบัดสีย้อม คือ ร้อยละ 92.56

Isik และ Sponza (2008) ศึกษาผลของระยะเวลากักน้ำ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี สีและสารอะโรเมติกเอมีน ด้วยระบบยูเอเอสบี ต่อด้วยซีเอสทีอาร์ พบว่าสีย้อมอะโซสามารถถูกบำบัดด้วยระบบยูเอเอสบีด้วยระยะเวลาที่สั้น สามารถบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 97 ถึง ร้อยละ 91 และสามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 84 ถึง ร้อยละ 91 ที่ระยะเวลากักน้ำ 19.17 ชั่วโมง และ 1.22 วัน ตามลำดับ ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลากักน้ำให้มากขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและสีภายใต้ระบบ แอนแอโรบิกได้ สารอะโรเมติกเอมีนถูกบำบัดในถังซีเอสทีอาร์ เวลากักน้ำ 8.85 และ 6.05 วัน สามารถบำบัดสารอะโรเมติกเอมีน ร้อยละ 70 57 และ 85 ตามลำดับ และอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) ที่เหมาะสำหรับการบำบัดซีโอดีและสีเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ 3.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

Lourenco และคณะ (2006) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และสีรีแอกทีฟแบล็ค5 ด้วยระบบเอสบีอาร์ พบว่า ลักษณะการลดลงของสีย้อมทั้งสองชนิดจะเกิดเกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาลำดับที่ 1 แต่ความเร็วของอัตราการบำบัดจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้น คือ ในช่วง 1-2 ชั่วโมงแรกของการทดลอง การบำบัดสีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไป ค่า k_1 ของปฏิกิริยาจะมีค่าลดลง สีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 โครงสร้างเคมีที่ใหญ่และซับซ้อนกว่า อีกทั้งยังมีหมู่พันธะอะโซ 2 พันธะ จึงส่งผลให้การบำบัดเกิดขึ้นได้ช้าและมีอัตราบำบัดที่น้อยกว่าสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5

Kapdan และคณะ (2005) ทดลองการบำบัดสีย้อมโดยใช้น้ำเสียจริงจากกระบวนการฟอกย้อม ด้วยระบบแอนแอโรบิกแพ็คคอลัมน์ (Anaerobic packed column reactor) ต่อด้วยระบบเอเอส ซึ่งน้ำเสียมีค่าซีโอดีเริ่มต้นที่ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลากักน้ำในระบบใช้อากาศ ประสิทธิภาพของการบำบัดสีก็เพิ่มขึ้น ซึ่งระยะเวลากักน้ำในถังแอนแอโรบิกแพ็คคอลัมน์ที่เหมาะสม คือ 48 ชั่วโมง สามารถบำบัดสีได้มากกว่าร้อยละ 85 และสามารถบำบัดซีโอดีได้สูงถึงร้อยละ 90 แต่ถ้าระยะเวลากักเก็บของระบบไร้อากาศให้นานกว่า 48 ชั่วโมง จะพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดจะมีค่าลดลง

Sponza และ Isik (2005) ศึกษาการบำบัดสีไดเร็คแบล็ค 38 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 3200 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยระบบไร้อากาศแบบยูเอเอสบี ระยะเวลากักน้ำ 15 ชั่วโมง และระบบใช้อากาศแบบซีเอสทีอาร์ ระยะเวลากักน้ำ 2.3 วัน ดำเนินระบบแบบต่อเนื่อง ค่าซีโอดีเข้าระบบเริ่มต้นคงที่ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อรักษาสภาพพีเอชในระบบยูเอเอสบี ความเข้มข้นสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่าซีโอดีได้ถึงร้อยละ 72.5 และสามารถลดสีได้ร้อยละ 100 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีเป็น 3200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีลดลง ระบบสามารถบำบัดซีโอดีได้เพียงร้อยละ 48 ประสิทธิภาพการบำบัดสีได้ร้อยละ 20 การเพิ่มความเข้มข้นสี ส่งผลให้กรดไขมันระเหยง่ายในระบบเพิ่มขึ้นจาก 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร การสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบ พีเอชลดลง จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถผลิตมีเทนได้ การกำจัดค่าซีโอดีลดลง และปริมาณแก๊สมีเทนที่ผลิตได้ลดลง สามารถสรุปได้ว่า ความเข้มข้นสีมีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ

Sponza และ IsIk (2004) ศึกษาการกำจัดสารอะโรเมติกเอมีนจากการบำบัดสีไดเร็คแบล็ค 38 ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 100 และ 3200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีเริ่มต้นคงที่ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยระบบยูเอเอสบี ระยะเวลากักน้ำ 15 ชั่วโมงต่อด้วยระบบซีเอสทีอาร์ ระยะเวลากักน้ำ 2.3 วัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีขึ้นจะเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายทำให้พีเอชของระบบลดลงส่งผลต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนและประสิทธิภาพของการบำบัด และนอกจากนั้นจะเกิดการสะสมของสารอะโรเมติกเอมีน เมื่อน้ำเข้าสู่ระบบซีเอสทีอาร์ การสะสมของสารอะโรเมติกเอมีนส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีลดลง เนื่องจากเกิดการสะสมของสารอะโรเมติกเอมีนสูง ระยะเวลากักน้ำอาจไม่เพียงพอสำหรับการบำบัดอะโรเมติกเอมีนประสิทธิภาพจึงลดลง ถ้าเพิ่มระยะเวลากักน้ำให้นานขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอาจสูงขึ้นได้

Oxspring และคณะ (1996) ศึกษาการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ด้วยระบบฟิล์มชีวภาพแบบยูเอเอฟ (Upflow anaerobic filter, UAF) โดยใช้จุลินทรีย์ *Alcaligenes faecaiis* และ *Commamonas acidovorans* และใช้ Gravel substratum เป็นวัสดุสำหรับยึดเกาะ การทดลองเป็นแบบทีละเท (Batch reactor) ดำเนินระบบเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราไหลน้ำเข้าระบบ100 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่า สีสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 48 ชั่วโมง สามารถบำบัดสีได้มากกว่าร้อยละ 95 และได้ทำการทดลองด้วยจุลินทรีย์ชนิดเดิม แต่จุลินทรีย์เจริญแบบแขวนลอย พบว่าระบบสามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 82 แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการทดลองถึง 7 วัน

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า

- จุลินทรีย์ที่เจริญแบบยึดเกาะตัวกลางสามารถทนต่อความเป็นพิษของสีย้อมได้ดีกว่าจุลินทรีย์ที่เจริญแบบแขวนลอย
- ความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นจะยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีของระบบบำบัดลดลง
- เมื่อเวลากักน้ำในระบบไร้อากาศนานขึ้น น้ำเสียจะสัมผัสกับจุลินทรีย์มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงขึ้น แต่ไม่ควรนานเกิน 48 ชั่วโมง
- ปริมาณน้ำตาลที่ใส่เข้าไปในระบบมีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดสีย้อม เมื่อใส่น้ำตาลเข้าไปในระบบในปริมาณที่มากหรือน้อยเกินไป จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดลดลง
- ปริมาณของน้ำตาลที่เหมาะสม ควรอยู่ในช่วง 500 – 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ต้องควบคุมพีเอชของระบบบำบัดไร้อากาศให้อยู่ในช่วง พีเอช 7 ไม่ควรเกิน 10

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- เครื่องยูวีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV Spectrophotometer)
- เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)
- เครื่องวัดโออาร์พี (ORP meter)
- เครื่องสูบน้ำชนิดรีดสาย (Peristaltic pump)
- ตู้อบความร้อนที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Drying Oven)
- เครื่องชั่ง (Balance)
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- เครื่องดูดสุญญากาศและชุดกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
- บีกเกอร์ ขนาด 50 100 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- ปิเปต ขนาด 2 5 และ 10 มิลลิลิตร
- บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
- กระบอกตวง ขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- หลอดทดลอง

3.1.2 สารเคมี

- น้ำตาลทรายขาว
- แป้งมันสำปะหลัง
- สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5) จากบริษัท Dystar (Thailand) จำกัด
- สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 (Reactive Violet 5) จากบริษัท Dystar (Thailand) จำกัด
- สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
- สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)
- สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS)
- สารละลายเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์ (Ferroin Indicator)

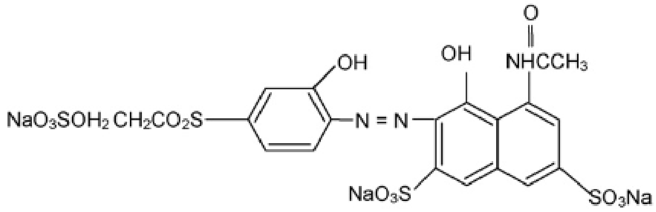
- แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)
- ไดโปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)
- แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$. $7H_2O$)
- โคบอลต์คลอไรด์ ($CoCl_2$. 2 H_2O)
- นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2$. $6H_2O$)
- ซิงก์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)
- คอปเปอร์คลอไรด์ ($CuCl_2$. $2H_2O$)
- แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$. H_2O)
- แอมโมเนียมโมลิบเดท ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}$. $4H_2O$)
- กรดบอริก (H_3BO_3)
- โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)

3.2 แผนการทดลอง

3.2.1 สีย้อม

การทดลองนี้ใช้สีย้อมรีแอกทีฟ 2 ชนิด คือ

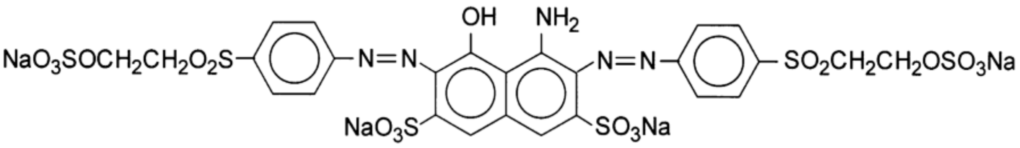
สีรีแอกทีฟ ไวโอเล็ต 5 (Reactive Violet 5) หรือ Remazol Brilliant Violet 5R ดัชนีสี คือ 18097 สูตรเคมี คือ $C_{20}H_{16}N_3O_{15}S_{4.3}Na$ น้ำหนักโมเลกุล 735.58 กรัมต่อโมล ค่าการดูดกลืนแสง 560 นาโนเมตร มีพันธะอะโซเป็นโครโมฟอร์ 1 ตำแหน่ง (Monoazo) สีย้อมที่ใช้ของบริษัท Dystar (Thailand) จำกัด



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอกทีฟ ไวโอเล็ต 5

(Cinar และคณะ, 2008)

สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5) หรือ Remazol Black B เป็นสีที่นิยมใช้ในการฟอกและย้อม มีรายงานว่าสีชนิดนี้มีความเป็นพิษ (Mohanty, Dafale และ Rao, 2006) มีพันธะอะโซเป็นโครโมฟอร์ 2 ตำแหน่ง (Diazo) สามารถละลายน้ำได้มากกว่า 50 กรัมต่อลิตร ขนาดโมเลกุลของสีมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร (Greluk และ Hubicki, 2010) สูตรเคมี $C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$ น้ำหนักโมเลกุล 991.82 กรัมต่อโมล ดัชนีสี คือ 20505 ช่วงของการดูดกลืนแสงจากการทดลองอยู่ระหว่าง 595 นาโนเมตร (Zhou, Lim และ and Wu, 2011) ถึง 600 นาโนเมตร (Hsueh, Chen และ Yen, 2009) สีย้อมที่ใช้ของบริษัท Dystar (Thailand) จำกัด



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5

(Lourenco, Novais และ Pinheiro, 2001)

3.2.2 น้ำเสียสังเคราะห์

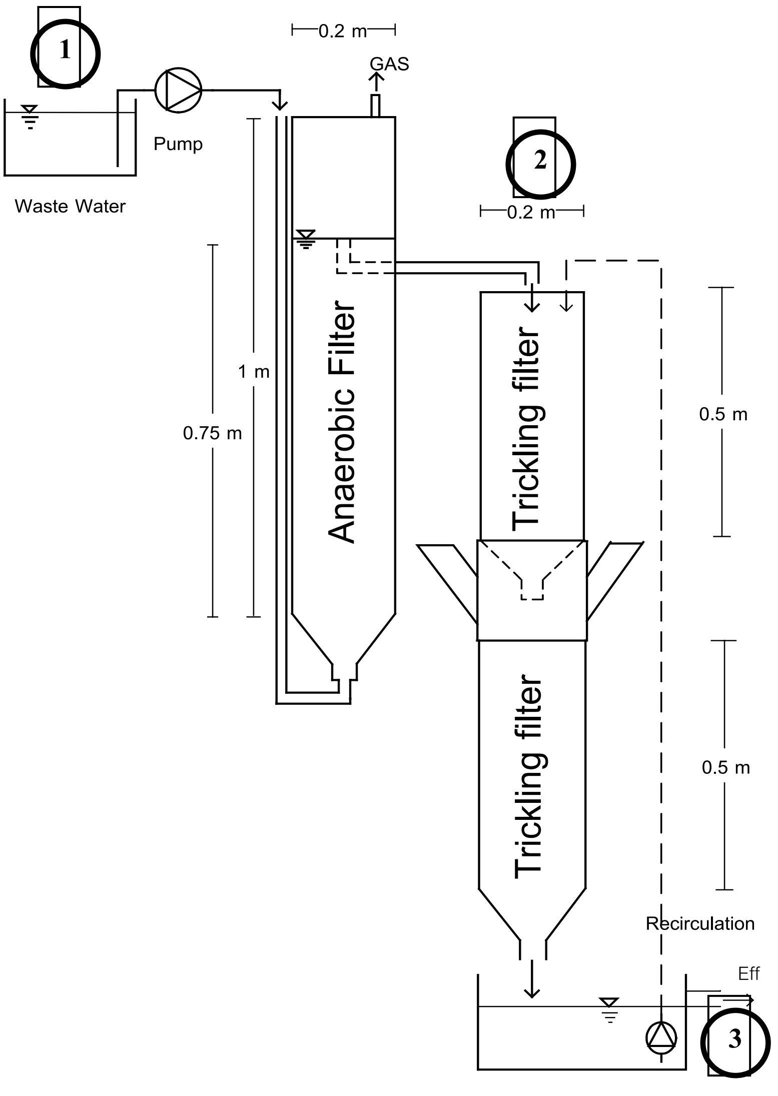
น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง กำหนดให้มีค่าซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งการทดลองที่ใช้น้ำตาลทรายและแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงาน ทำการควบคุมพีเอชของระบบด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ค่าพีเอชภายในระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 6.5 ถึง 8.5 เติมธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารเสริมอื่นๆ (ตารางที่ 2.4) ส่วนความเข้มของสีย้อมที่ใช้ในการศึกษามี 5 ค่า คือ ที่ความเข้มข้นสี 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.3 ถังปฏิกิริยา

ถังบำบัดแบบไร้อากาศถูกออกแบบให้สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 48 ชั่วโมง อัตราการไหลของน้ำเข้าถัง 500 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยถังเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 1 เมตร ปริมาตรถัง 31 ลิตร ขนาดท่อน้ำเข้าและออกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 เมตร ป้อนน้ำเสียจากด้านล่างขึ้นบน (Up flow anaerobic filter) ปริมาตรตัวกลาง 0.024 ลูกบาศก์เมตร

ระบบบำบัดแบบโปรยกรองถูกออกแบบให้สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์อยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 3 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน น้ำเสียที่ไหลออกถังกรองแบบไร้อากาศจะเข้าสู่ถังโปรยกรองด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ถังมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร ความสูงของชั้นตัวกลางเท่ากับ 1 เมตร ปริมาตรตัวกลาง 0.030 ลูกบาศก์เมตร และมีการเวียนน้ำในถังโปรยกรองมากกว่าหรือเท่ากับ 60 ลิตรต่อชั่วโมง

จุดเก็บตัวอย่างของการทดลอง มี 3 จุด ได้แก่ จุดที่ 1 คือ น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบถังกรองไร้อากาศ จุดที่ 2 คือ บริเวณท่อน้ำออกของถังกรองไร้อากาศ และจุดที่ 3 คือ ท่อน้ำทิ้งจากระบบโปรบกรอง ซึ่งลักษณะของถังปฏิกิริยาที่ใช้และจุดเก็บตัวอย่างดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แบบถังปฏิกิริยาไร้อากาศแบบมีตัวกลางและถังปฏิกิริยาโปรยกรอง

(บัญชา บุญอนันต์วงศ์ 2554)

ส่วนตัวกลางพลาสติกที่ใช้ในการทดลองใช้ตัวกลางของของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media พื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ลักษณะแสดงดังภาพที่ 3.4

ภาพที่ 3.4 ตัวกลางพลาสติกรุ่น R-190 Random Flow Media

ส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองในถังปฏิกิริยาทั้งสองถัง มาจากบริษัท แซนอี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด แล้วทำการเลี้ยงหัวเชื้อร่วมกับวัสดุตัวกลาง เพื่อให้เชื้อยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางก่อนใส่เข้าไปในถังปฏิกิริยา

3.2.4 วิธีวิเคราะห์และค่าพารามิเตอร์

1) ค่าความเข้มสี

หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C

2. นำน้ำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยจากการทดลองสแกนหาช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมแต่ละชนิดด้วยเครื่องยูวี สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 200 – 800 นาโนเมตร พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 คือ 559 นาโนเมตร และสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 คือ 597 นาโนเมตร

3. นำค่าดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นโดยสีเทียบกับกราฟมาตรฐานของสีในภาคผนวก ค

หน่วยสีเอดีเอมไอ

1. กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C
2. นำน้ำตัวอย่างวัดค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง (%Transmittance) ด้วยเครื่องยูวี สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร โดยการวัดค่าจะเริ่มจากความยาวคลื่นแสง 400 นาโนเมตร แล้วเพิ่มความยาวคลื่นแสงขึ้นครั้งละ 10 นาโนเมตร ไปจนถึงค่าความยาวคลื่นแสงที่ 700 นาโนเมตร
3. นำค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงทั้งหมด 31 ค่า มาคำนวณตามวิธีของ Allen และคณะ (1973) ให้กลายเป็นเป็นค่า Teristimulus Values X, Y, Z และคำนวณให้เป็นค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ ซึ่งใช้โปรแกรม Quick Basic ช่วยในการคำนวณ ตัวอย่างของคำสั่งในการเขียนโปรแกรมและตารางฟังก์ชันของการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข

2) ค่าซีโอดี

วิเคราะห์ค่าซีโอดีในน้ำเสียโดยวิธี Closed Reflux แบบ Titrimetric Method แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข

3) ค่าของแข็งแขวนลอย

วิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยโดยการการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข

4) ค่าพีเอช

วัดค่าพีเอชของระบบด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์

ตารางที่ 3.1 การตรวจวิเคราะห์และความถี่ของการเก็บตัวอย่าง

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์	การเก็บตัวอย่าง (ครั้งต่อสัปดาห์)
ซีโอดีกรอง	มิลลิกรัมต่อลิตร	รีฟลักซ์แบบปิด (Close reflux method)	3 - 4
พีเอช	-	เครื่องวัดพีเอช	3 - 4
สารแขวนลอย	มิลลิกรัมต่อลิตร	กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C แล้วอบที่ 105 องศาเซลเซียส	3 - 4
ค่าสี	มิลลิกรัมต่อลิตร	วัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องยูวี สเปคโตรโฟโตมิเตอร์	3 - 4
	เอดีเอมไอ	วัดค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง ด้วยเครื่องยูวี สเปคโตรโฟโตมิเตอร์	

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของการทดลอง

ตัวแปร	พารามิเตอร์
ตัวแปรอิสระ	**ตอนที่ 1** ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมไดอะโซในน้ำเสีย - ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในน้ำ 5 ช่วงความเข้มข้น เริ่มจาก 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร **ตอนที่ 2** ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมโมโนอะโซในน้ำเสีย - ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ในน้ำ 5 ช่วงความเข้มข้น เริ่มจาก 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร **ตอนที่ 3** ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมโดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงาน - แป้งมันสำปะหลัง ที่ซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรควบคุม	- ค่าซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร - โซเดียมไบคาร์บอเนต 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร - อัตราการไหลน้ำเข้าระบบถังกรองไร้อากาศ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง - ระยะเวลากักเก็บน้ำในถังแอนแอโรบิก (HRT;τ) 48 ชั่วโมง - อัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง 60 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	- โออาร์พี - ซีโอดีที่เหลือ - สารแขวนลอย - ค่าความเข้มสีที่เหลือ - ค่าพีเอช

หมายเหตุ ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ คือ อุณหภูมิ

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การทดลองตอนที่ 1

ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมไดอะโซในน้ำเสียที่ความเข้มข้นสีต่างกัน

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเติมสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสี 10 มิลลิกรัม น้ำตาลทรายขาว 1,000 มิลลิกรัม โซเดียมไบคาร์บอเนต 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมธาตุอาหารเสริมในน้ำ 1 ลิตร พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

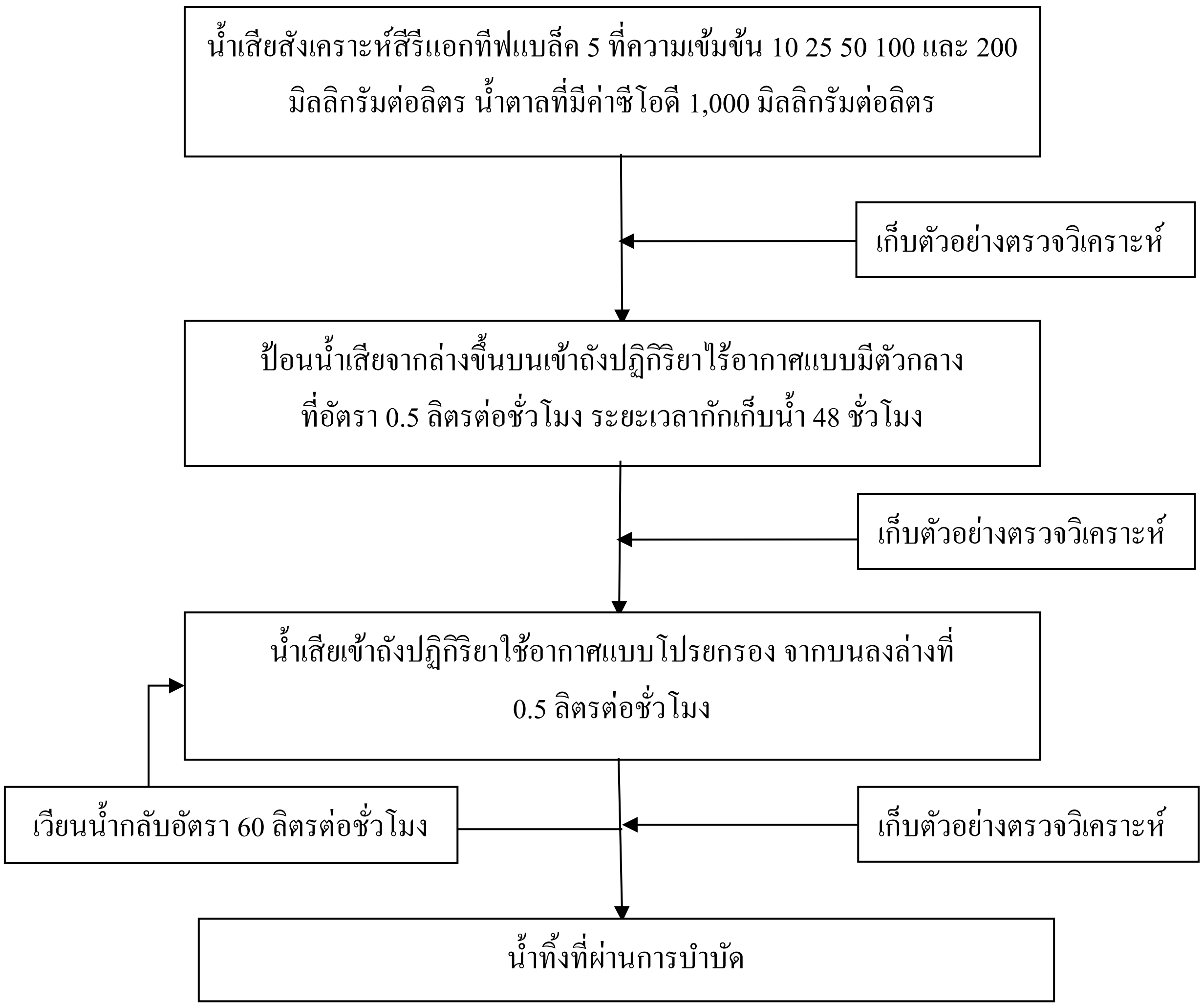
2) ป้อนน้ำน้ำเสียสังเคราะห์ เข้าสู่ระบบถังกรองไร้อากาศด้วยอัตราไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลากักเก็บน้ำ 2 วัน พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศ

3) ป้อนน้ำทิ้งจากระบบถังไร้อากาศถูกส่งเข้าสู่ถังโปรยกรองด้วยอัตราไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยในถังโปรยกรองมีการเวียนน้ำในถังโปรยกรองด้วยอัตรา 60 ลิตรต่อชั่วโมง พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากถังโปรยกรอง

4) ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำตัวอย่าง

5) ดำเนินระบบต่อเนื่องจนกระทั่งประสิทธิภาพของการบำบัดคงที่ และเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว จะทำการเดินระบบและเก็บตัวอย่างต่อเนื่องไปอีกประมาณ 7 – 10 วัน จึงเปลี่ยนความเข้มข้นสีที่ใช้ในการทดลอง เป็น 25 50 100 และ200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

6) วิเคราะห์และสรุปผล



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการทดลองตอนที่ 1

3.3.2 การทดลองตอนที่ 2

ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมโมโนอะโซในน้ำเสียที่ความเข้มข้นสีต่างกัน

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นสี 10 มิลลิกรัม น้ำตาลทรายขาว 1,000 มิลลิกรัม โซเดียมไบคาร์บอเนต 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง ในน้ำ 1 ลิตร พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

2) ป้อนน้ำเข้าสู่ระบบถังกรองไร้อากาศจากล่างขึ้นบนที่อัตราไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลากักเก็บน้ำ 2 วัน พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศ

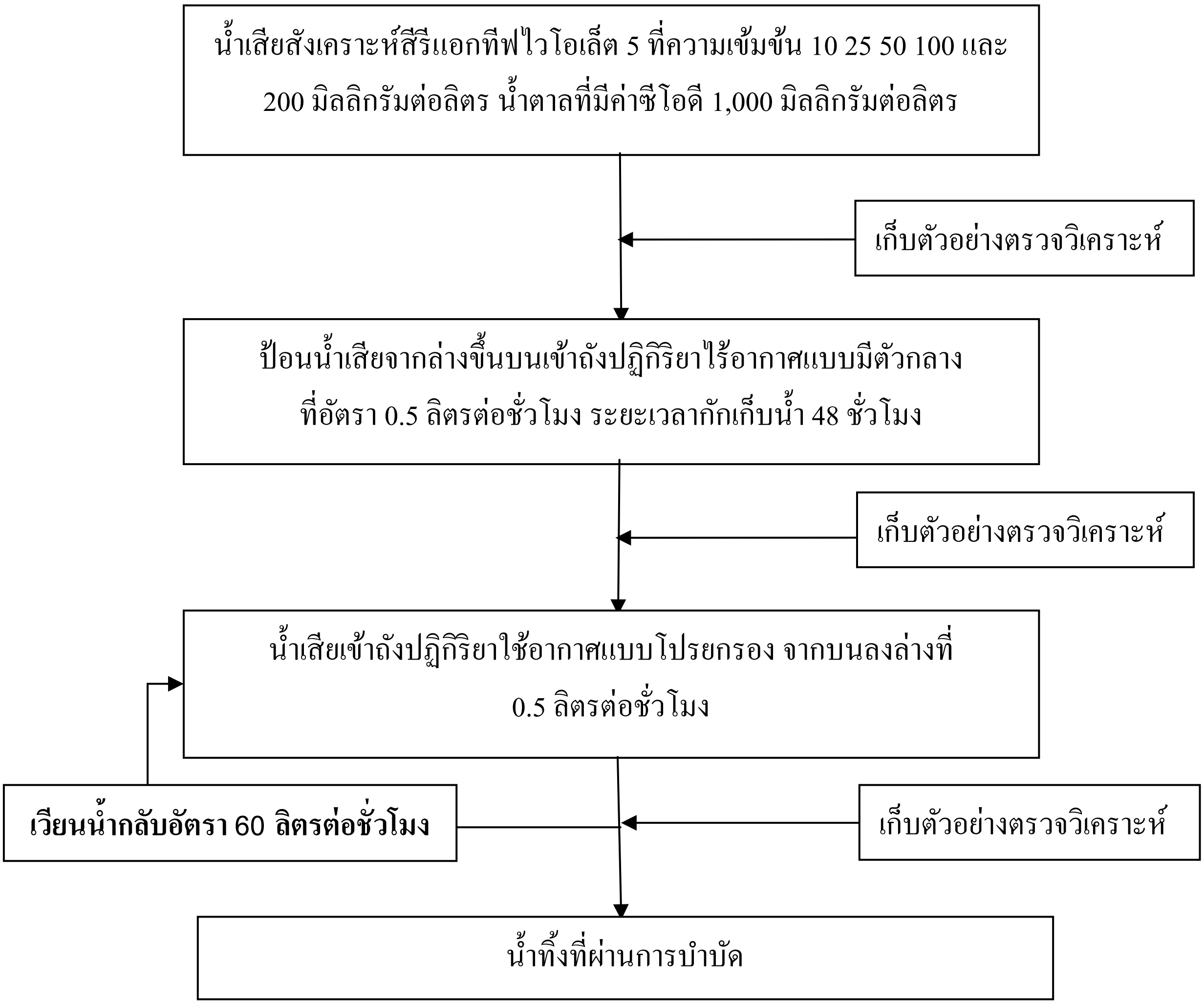
3) ป้อนน้ำทิ้งจากระบบถังไร้อากาศถูกส่งเข้าสู่ถังโปรยกรองด้วยอัตราไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยในถังโปรยกรองมีการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง 60 ลิตรต่อชั่วโมง พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากถังโปรยกรอง

4) ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำตัวอย่าง

5) เดินจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ จึงเปลี่ยนความเข้มข้นสีที่ใช้ในการทดลองเป็น 25 50 100 และ200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

6) ดำเนินระบบต่อเนื่องจนกระทั่งประสิทธิภาพของการบำบัดคงที่

7) วิเคราะห์และสรุปผล



ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการทดลองตอนที่ 2

3.3.3 การทดลองตอนที่ 3

ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสีย เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังแทนน้ำตาลทรายขาว

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ โดยละลายแป้งมันสำปะหลังในน้ำร้อน กำหนดให้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีโอดี 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

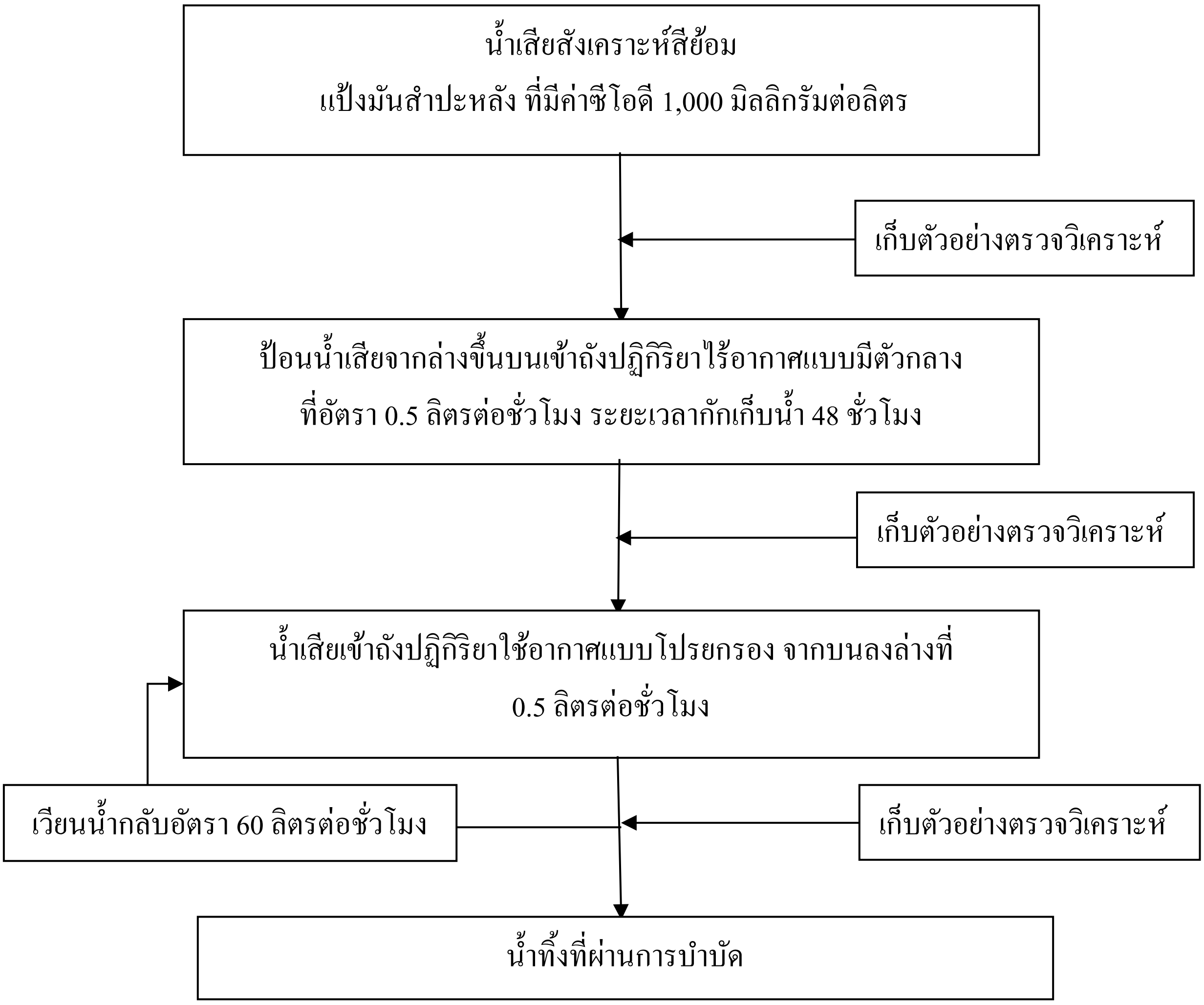
2) ป้อนน้ำเข้าสู่ระบบถังกรองไร้อากาศจากล่างขึ้นบนที่อัตราไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลากักเก็บน้ำ 2 วัน พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศ

3) ป้อนน้ำทิ้งจากระบบถังไร้อากาศถูกส่งเข้าสู่ถังโปรยกรองด้วยอัตราไหล 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง โดยในถังโปรยกรองมีการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง 60 ลิตรต่อชั่วโมง พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากถังโปรยกรอง

4) ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำตัวอย่าง

5) เดินจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

6) วิเคราะห์และสรุปผล



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการทดลองตอนที่ 3

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การเริ่มต้นระบบ

ในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยสีย้อมรีแอกทีฟที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เพื่อเป็นตัวแทนของสีชนิดโมโนอะโซ และสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เพื่อเป็นตัวแทนของสีชนิดไดอะโซ และใช้น้ำตาลทรายและแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานสำหรับจุลินทรีย์ในระบบ โดยระบบที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้เป็นระบบถังกรองชีวภาพแบบไร้อากาศกับระบบโปรยกรอง ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ต่อเนื่องจากงานวิจัยของบัญชา บุญอนันต์วงศ์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการเดินระบบประกอบไปด้วยค่าซีโอดีจากน้ำตาลทรายขาวความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากการทดลองของบัญชา บุญอนันต์วงศ์ (2554) พบว่า ที่ความเข้มข้นซีโอดี 500-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถบำบัดซีโอดีและสีย้อมได้ดี และใช้สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมธาตุอาหารเสริมและควบคุมพีเอชของระบบด้วยสารโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อให้ระบบมีสภาวะที่เหมาะสมแก่การเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งจะควบคุมให้ระบบมีค่าพีเอชของระบบถังกรองไร้อากาศอยู่ในช่วง 6.5-8.5 ระยะเวลาการเดินระบบจะดำเนินไปจนกระทั่งประสิทธิภาพของการบำบัดสีและซีโอดีเข้าสู่สภาวะคงที่อย่างต่อเนื่องอีกประมาณ 7- 10 วัน เพื่อเป็นการยืนยันว่าการบำบัดของระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วแน่นอน จากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นชุดการทดลองอื่นต่อไป

4.2 ผลกระทบจากชนิดและความเข้มข้นสีย้อมต่อประสิทธิภาพการบำบัด

4.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์

สมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง คือ ใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นแหล่งพลังงาน โดยให้ซีโอดีของน้ำเสียมีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และควบคุมให้ระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าพีเอช อยู่ระหว่าง 6.5-8.5 โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต พร้อมทั้งเติมธาตุอาหารเสริมที่มีความสำคัญต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย การทดลองใช้สีย้อม 2 ชนิด คือ สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เพื่อเป็นตัวแทนของสีที่มีโครงสร้างอะโซ 2 ตำแหน่ง และสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เป็นตัวแทนของสีที่มีโครงสร้างอะโซ 1 ตำแหน่ง

ค่าความเข้มสีย้อมที่เลือกใช้ในการทดลองเป็นค่าความเข้มสีที่อยู่ในช่วงของความเข้มสีที่พบในน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อม คือ ที่ความเข้มสีตั้งแต่ 10 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (O'Neill และคณะ, 1999) โดยลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 และสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ตลอดช่วงการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ และตัวอย่างความเข้มสีย้อมในน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

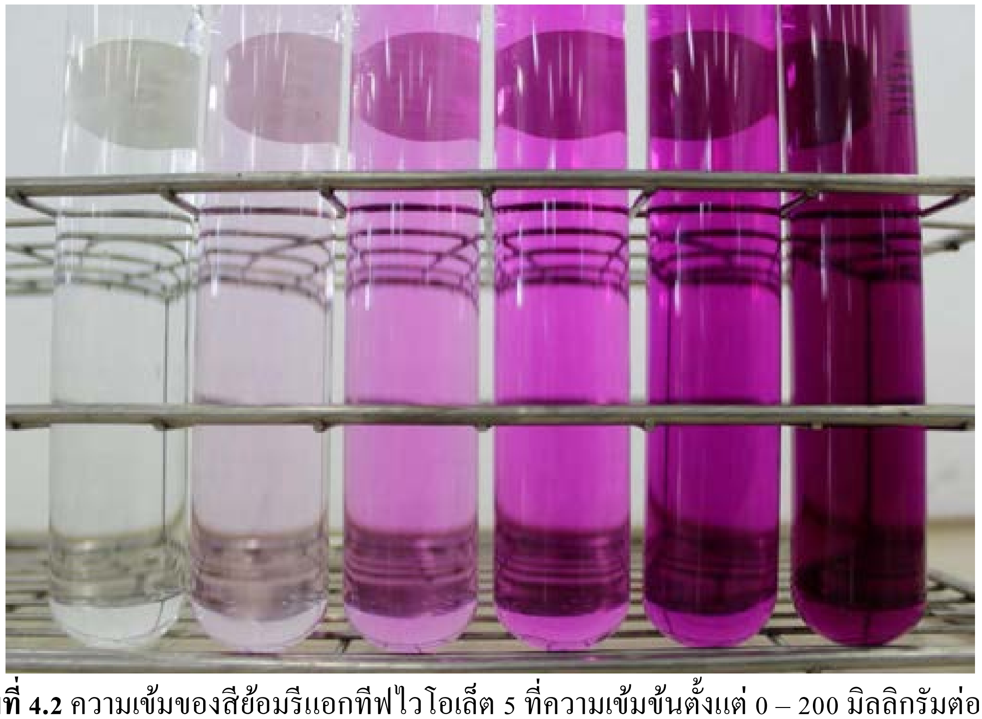
ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ ของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างๆ

ความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมสีต่อลิตร)	**ความเข้มสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	**ความเข้มสี (ADMI)**	**ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)**
Start up	96.5±2.16	7,324±168	1,060±29.4
10	9.90±0.08	763±2.43	1,039±28
25	23.1±0.42	1,542±29.7	1,048±28
50	45.9±0.71	2,241±41.7	1,071±20
100	97.1±1.96	7,625±155	1,107±40
200	190±2.10	12,937±242	1,130±30

ตารางที่ 4.2 สมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ต่างๆ

ความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัมสีต่อลิตร)	**ความเข้มสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)**	**ความเข้มสี (ADMI)**	**ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)**
10	11.1±0.28	485±24.2	1,110±47.9
25	26.4±0.41	1,147±38.7	1,082±26.0
50	45.4±0.18	2,008±8.17	1,104±42.3
100	99.9±0.98	4,420±43.7	1,132±33.2
200	198±0.64	8,778±28.5	1,134±21.3

ภาพที่ 4.1 ความเข้มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.2 ความเข้มของสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2.2 การบำบัดสีย้อมไดอะโซ

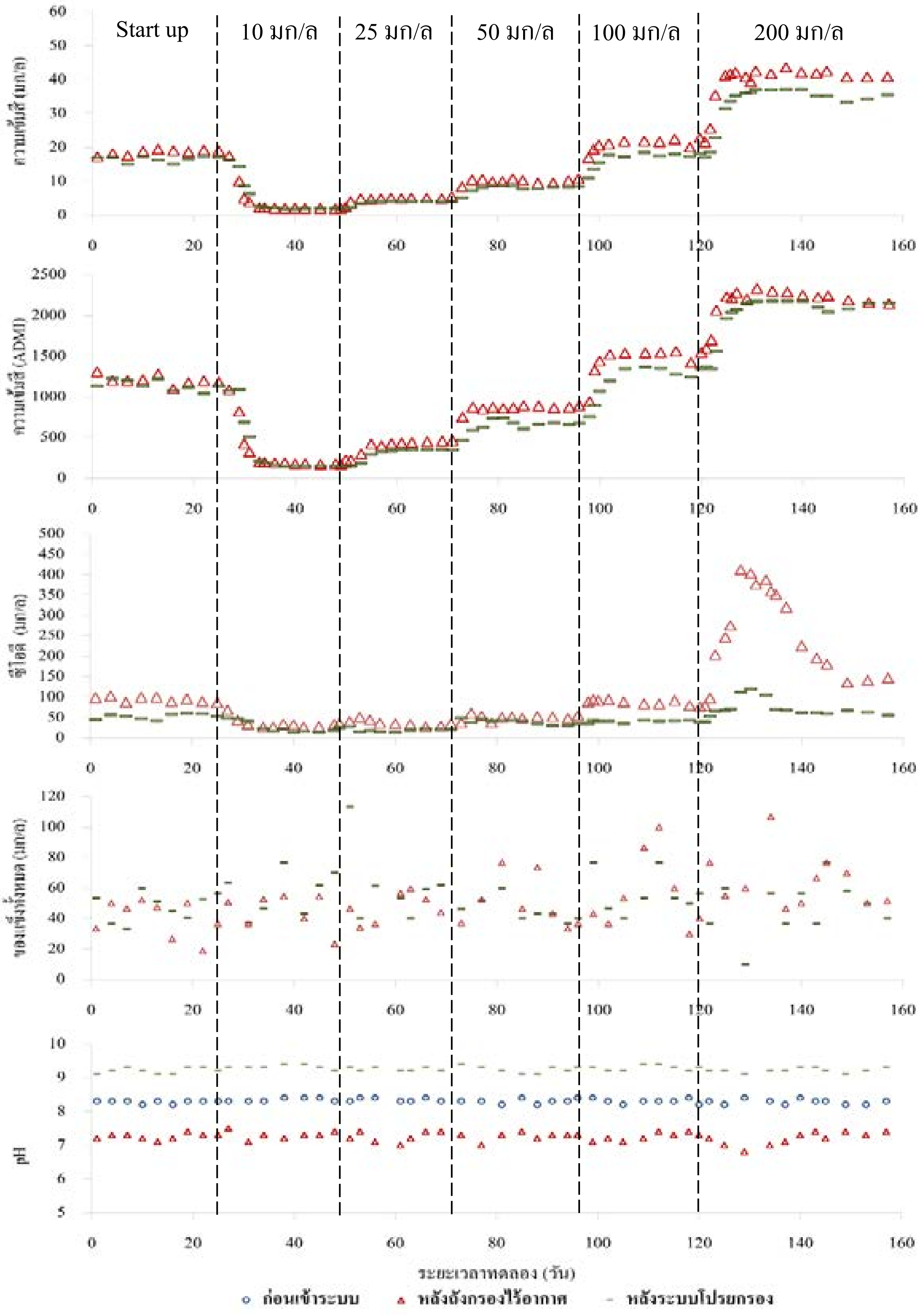
การทดลองใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 156 วัน ซึ่งแบ่งเป็นช่วงเริ่มต้นระบบ 26 วัน และ 22 22 25 25 และ 37 วัน ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ตลอดระยะเวลาทดลองได้แก่ ความเข้มสีในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตรและเอดีเอมไอ ซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยและพีเอช ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.3

4.2.2.1 ผลการทดลอง

1) ค่าความเข้มสี

ระยะแรกของการเริ่มต้นระบบด้วยความเข้มสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า ค่าความเข้มสีในน้ำทิ้งจากการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าเหลืออยู่ 18.7±0.77 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านเข้าสู่ระบบโปรยกรองมีค่าเหลืออยู่ 16.5±0.93 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อวัดค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอมีค่า 1,206±59.5 และ 1,143±63.3 เอดีเอมไอ ตามลำดับ จากนั้นเปลี่ยนความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเป็น 10 25 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ค่าความเข้มสีย้อมคงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศมีค่า 2±0.08 5.02±0.09 10.03±0.47 21.23±1.00 และ 40.83±0.58 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และค่าความเข้มสีของน้ำทิ้งจากระบบโปรยกรองมีค่า 1.78±0.05 4.04±0.05 8.36±0.48 17.8±0.50 และ 34.37±1.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับการวัดค่าความเข้มสีของน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศในหน่วยเอดีเอมไอมีค่า 174±3 444±10 869±13 1,505±64 และ 2,162±23 เอดีเอมไอ ตามลำดับ ความเข้มสีของน้ำทิ้งจากระบบโปรยกรองมีค่า 141±0.5 354±0.6 684±44 1,319±59 และ 2,130±41 เอดีเอมไอ ตามลำดับ

ผลของการเปลี่ยนความเข้มของสีย้อมเริ่มต้น พบว่า เมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น ค่าความเข้มสีในน้ำทิ้งก็มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน แต่ในขณะเดียวกันกลับไม่ส่งผลต่อระยะเวลาการปรับตัวของระบบ คือ ระบบถังกรองไร้อากาศใช้เวลาปรับตัวประมาณ 13.4±0.89 วัน การบำบัดสีย้อมของระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ ในทุกช่วงความความเข้มข้นสีย้อมที่ทดลอง ซึ่งในระบบโปรยกรองก็มีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกันกับถังกรองไร้อากาศ



ภาพที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการทดลองด้วยสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดระยะเวลา 156 วัน

2) ค่าซีโอดี

การทดลองใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นแหล่งพลังงานแก่จุลินทรีย์ในระบบ โดยกำหนดให้น้ำเสียสังเคราะห์ตลอดการทดลองมีค่าซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการเริ่มต้นระบบ พบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียจาก 1,060±29.4 ลดลงเหลือ 93.8±6.06 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำทิ้งจากระบบโปรยกรองมีค่าซีโอดี 52.8±6.48 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดค่าซีโอดีในให้ลดลงเหลือ 29.8±3.3 31±3.7 52±0.8 82±1.7 และ 140±5.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อน้ำเสียจากระบบถังกรองไร้อากาศผ่านเข้าสู่ระบบโปรยกรอง ค่าซีโอดีของน้ำเสียก็ถูกบำบัดให้ลดลงเหลือ 15.3±2.6 19±4.3 37.8±6.4 42.3±1.2 และ 62.3±5.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

สำหรับผลของการเปลี่ยนความเข้มของสีย้อมเริ่มต้นต่อการบำบัดซีโอดีของระบบ พบว่า เมื่อความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นสูงขึ้น น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าซีโอดีคงเหลือในน้ำสูงขึ้น จาก 29.8±3.3 เป็น 140±5.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 10 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ตลอด 5 ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง พบว่า ค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศเพียงขั้นตอนเดียวก็มีค่าซีโอดีต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนดไว้ โดยกำหนดว่าน้ำทิ้งต้องมีค่าซีโอดีไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้นการทดลองด้วยความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศยังคงมีค่าสูงกว่าที่เกณฑ์มาตรฐานกำหนด คือ มีซีโอดี 140±5.51 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อน้ำเสียผ่านเข้าระบบโปรยกรองแล้ว ค่าซีโอดีถูกบำบัดให้ลดลงเหลือ 62.3±5.69 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดได้

ระยะเวลาการปรับตัวของระบบเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมสูงขึ้น พบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศใช้ระยะเวลาปรับตัวประมาณ 13.3±0.96 วัน สำหรับความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบถังกรองไร้อากาศต้องใช้ระยะเวลานานถึง 29 วัน จึงสามารถบำบัดให้ค่าซีโอดีในน้ำทิ้งมีค่าคงที่ 140±5.5 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจมีสาเหตุมาจากการย่อยสลายพันธะอะโซของสีย้อมเกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรดในการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ (Sponza และ IsIk, 2005) เมื่อความเข้มข้นสีย้อมสูงขึ้น ปริมาณกรดไขมันย่อยสลายง่ายภายในระบบก็ถูกผลิตในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบลดลง และเมื่อเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายภายในระบบมากขึ้นเรื่อยๆ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนก็จะได้รับผลกระทบจากค่าพีเอชที่ต่ำลง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ

ค่าพีเอชจากผลการทดลองก็พบว่า ในช่วงแรกของการทดลองด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของระบบถังกรองไร้อากาศจะมีค่าลดต่ำลง อยู่ที่ประมาณ 6.8 แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถปรับสภาพให้เข้ากับสภาวะของระบบได้แล้ว ค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจึงมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเข้าสู่สภาวะคงที่ในที่สุด

3) ค่าของแข็งแขวนลอย

การทดลองนี้หาค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียที่ออกจากระบบถังกรองไร้อากาศและน้ำเสียที่ออกจากระบบโปรยกรอง จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบถังกรองไร้อากาศในทุกชุดการทดลองมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสูงขึ้น โดยเริ่มตั้งแต่ช่วงเริ่มระบบและความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 10 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่า 41.1±11.9 46.6±11.8 47.2±9.75 51.8±17.0 54.1±24.3 และ 64.5±17.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนปริมาณของแข็งแขวนลอยที่วัดได้จากน้ำทิ้งของระบบโปรยกรอง มีค่า 47.7±9.28 57.0±14.7 61.3±24.8 46.0±7.85 54.8±13.7 และ 47.1±17.6 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ตรวจพบในน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศส่วนใหญ่อยู่ในลักษณะของการผสมระหว่างจุลินทรีย์และของแข็งอินทรีย์ที่ไม่ได้ถูกย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบถังกรองไร้อากาศมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นสูงขึ้น แต่ผลการทดลองที่ได้จะมีค่าค่อนข้างแปรปรวน เพื่อเป็นตรวจสอบสมรรถนะของระบบถังกรองไร้อากาศในแง่การเก็บรักษาปริมาณจุลินทรีย์ภายในระบบ จึงทำการเปรียบเทียบปริมาณของเซลล์จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่ภายในระบบกับปริมาณของเซลล์ที่หลุดออกจากระบบ โดยที่ค่ายิลด์ (Yield) ของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 0.06 – 0.10 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมซีโอดี (Metcalf และ Eddy, 2003) ซึ่งตัวอย่างวิธีการคำนวณปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นและเซลล์ที่หลุดออกจากระบบแสดงในภาคผนวก ข-1 ผลจากการคำนวณ พบว่า ปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นใหม่ภายในระบบมีค่ามากกว่าเซลล์ที่หลุดออกไปจากระบบ โดยปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นใหม่ภายในระบบถังกรองอากาศมีค่า 0.93±0.09 กรัมต่อวัน ส่วนปริมาณเซลล์ที่หลุดออกจากระบบถังกรองไร้อากาศ มีค่า 0.69±0.23 กรัมต่อวัน ดังนั้น ถึงแม้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่เข้าระบบมีค่าสูงขึ้น และปริมาณของแข็งแขวนลอยที่พบก็มีปริมาณสูงขึ้น แต่สมรรถนะการบำบัดของระบบถังกรองไร้อากาศก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ส่วนค่าของแข็งแขวนลอยในระบบโปรยกรองมีความแปรปรวนสูง เนื่องจากสีย้อมอะโซมีความเป็นพิษต่ออัตราการหายใจของจุลินทรีย์ (Microorganism's respiration rate) ในระบบฟิล์มชีวภาพแบบใช้อากาศ ส่งผลให้ชั้นฟิล์มมีลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non homogeneous) และทำให้ชั้นฟิล์มชีวภาพเกิดหลุดลอกออกมาในปริมาณสูง ส่งผลให้ความหนาแน่นของจุลินทรีย์ในชั้นฟิล์มลดน้อยลง (Zhang และคณะ, 1995)

4) ค่าพีเอช

การทดลองจะควบคุมพีเอชของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 6.5-7.5 โดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตปริมาตร 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบมีค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 8.3±0.07 เมื่อดำเนินระบบอย่างต่อเนื่องค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศมีค่า 7.2±0.14 และเมื่อน้ำเสียจากระบบถังกรองไร้อากาศผ่านเข้าสู่ระบบโปรยกรอง น้ำทิ้งมีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น เป็น 9.2±0.1 ซึ่งเป็นผลมาจากกระการที่น้ำเสียสัมผัสกับออกซิเจน ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำหลุดออกไปค่าพีเอชของน้ำเสียจึงมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งยังเกิดจากการสะสมของด่างที่เติมเข้าไปในบริเวณภาชนะรองรับน้ำจากระบบโปรยกรอง

ทั้งนี้จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ บัญชา บุญอนันต์วงศ์ (2554) พบว่า จากชุดการทดลองด้วยสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ควรเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 0.75±0.008 กรัมต่อลิตร เพื่อให้ค่าพีเอชของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าอยู่ประมาณ 7.4 แต่การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของงานวิจัยนี้ ได้เพิ่มปริมาณการเติมผงโซเดียมไบคาร์บอเนตให้มากขึ้นเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบปริมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากผลการทดลองที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นตั้งแต่ 10 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 7.26±0.12 แต่เมื่อความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าลดต่ำลง พีเอชที่วัดได้ต่ำสุด คือ 6.8 ในวันที่ 9 ของการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของค่าซีโอดีในน้ำทิ้งจากระบบถังกรองอากาศในช่วงเวลาเดียวกัน ก็พบว่าเป็นช่วงที่ซีโอดีของน้ำทิ้งมีค่าคงเหลือสูงที่สุด และเมื่อเวลาผ่านไป พีเอชเริ่มกลับสูงขึ้นมาอยู่ในช่วง 7.3 - 7.4 ค่าซีโอดีในน้ำทิ้งก็มีค่าลดลงเช่นกัน ดังนั้น การควบคุมค่าพีเอชของระบบถังกรองไร้อากาศจึงมีความจำเป็นมาก (Oranusi และ Ogugbue, 2005)

4.2.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัด

สำหรับในหัวข้อนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและซีโอดี ของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรอง และแบ่งเป็นระบบถังกรองไร้อากาศ และระบบโปรยกรอง เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 10 – 200 มิลลิกรัมสีย้อมต่อลิตร และค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบมีค่าคงที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรอง (AF/TF) ระบบถังกรองไร้อากาศ (AF) และระบบโปรยกรอง (TF) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) (4.2) และ (4.3) ตามลำดับ

โดยผลการทดลองที่นำมาคำนวณ คือ ค่าความเข้มสีและซีโอดีที่หลงเหลือในน้ำเมื่อการบำบัดของระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ AF/TF (ร้อยละ)

$$= \frac{(\text{ความเข้มข้นที่เข้าระบบ AF} - \text{ความเข้มข้นที่ออกระบบ TF}) \times 100}{\text{ความเข้มข้นที่เข้าระบบ AF}} \quad (4.1)$$

ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ AF (ร้อยละ)

$$= \frac{(\text{ความเข้มข้นที่เข้าระบบ AF} - \text{ความเข้มข้นที่ออกระบบ AF}) \times 100}{\text{ความเข้มข้นที่เข้าระบบ AF}} \quad (4.2)$$

ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ TF (ร้อยละ)

$$= \frac{(\text{ความเข้มข้นที่เข้าระบบ TF} - \text{ความเข้มข้นที่ออกระบบ TF}) \times 100}{\text{ความเข้มข้นที่เข้าระบบ TF}} \quad (4.3)$$

ส่วนการหาอัตราการบำบัดของระบบถังกรองไร้อากาศ และระบบโปรยกรอง สามารถคำนวณดังสมการที่ (4.4) และ (4.5) ตามลำดับ ซึ่งใช้ผลการทดลองในช่วงที่การบำบัดของระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วเช่นกัน

อัตราการบำบัดของระบบ AF (ความเข้มข้นต่อลิตรต่อวัน)

$$= \frac{(\text{ความเข้มข้นที่เข้าระบบAF} - \text{ความเข้มข้นที่ออกจากระบบ AF})}{\text{ระยะเวลากักเก็บ}} \quad (4.4)$$

อัตราการบำบัดของระบบ TF (ความเข้มข้นต่อลิตรต่อวัน)

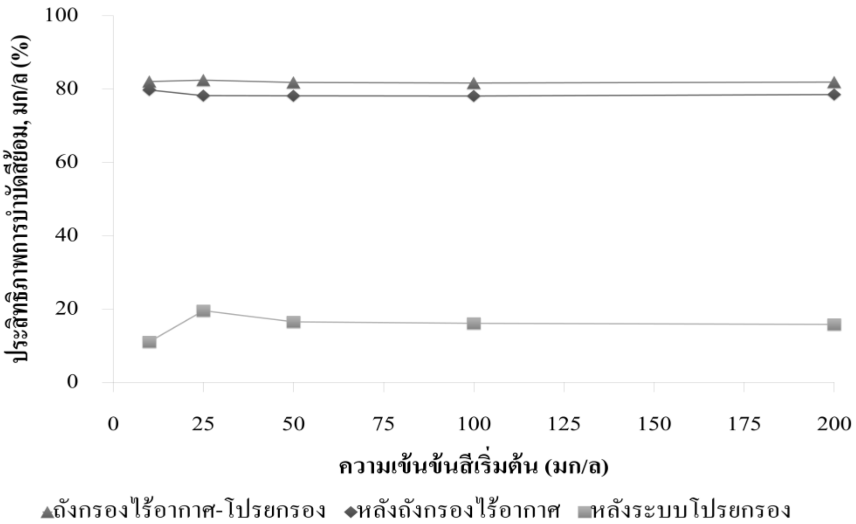
$$= \frac{(\text{ความเข้มข้นที่เข้าระบบ TF} - \text{ความเข้มข้นที่ออกจากระบบ TF}) \times \text{อัตราการไหล}}{\text{ปริมาณตัวกลางในระบบโปรยกรอง}} \quad (4.5)$$

4.2.2.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม

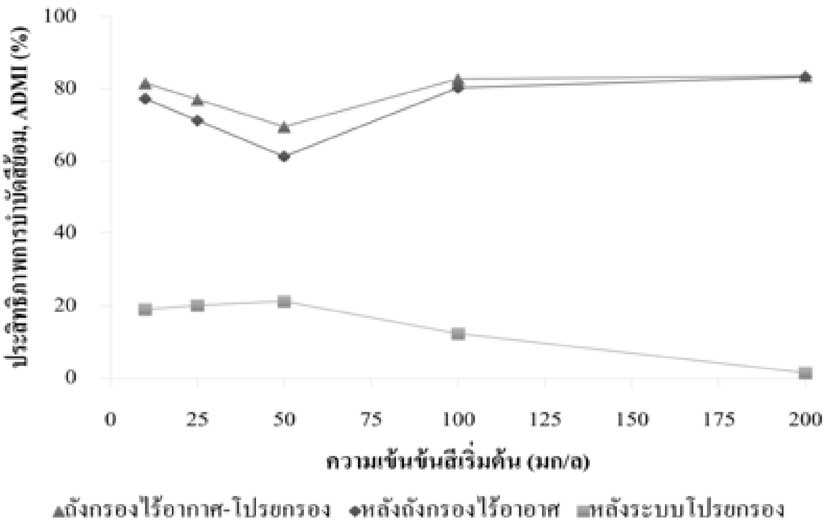
ในช่วงเริ่มต้นระบบด้วยสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดระยะเวลา 26 วัน ระบบระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรอง สามารถบำบัดสีย้อมได้มากกว่าร้อยละ 80 โดยการวัดค่าความเข้มสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดได้ร้อยละ 82.9 และร้อยละ 84.4 ของการวัดค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ การบำบัดสีย้อมส่วนใหญ่เกิดขึ้นในระบบถังกรองไร้อากาศ ส่วนระบบโปรยกรองแทบไม่สามารถบำบัดสีย้อมได้เลย แต่เมื่อทำการคำนวณประสิทธิภาพแล้วก็พบว่ามีส่วนทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรองเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อย โดยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเฉพาะของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าการบำบัดร้อยละ 80.7 ส่วนการวัดความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ ก็มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเช่นเดียวกับการวัดค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 83.5

จากภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมที่สภาวะคงที่ ของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรอง ของเฉพาะระบบถังกรองไร้อากาศ และเฉพาะของระบบโปรยกรองอย่างเดียว เทียบกับความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง ตั้งแต่ 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรองที่สภาวะคงที่ มีค่าเท่ากับร้อยละ 82.1 82.5 81.8 81.7 และ 81.9 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าเท่ากับร้อยละ 79.8 78.2 78.2 78.1 และ 78.5 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสีของระบบโปรยกรอง มีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับระบบถังกรองไร้อากาศ แต่ก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดรวมของทั้งระบบให้มีค่าเพิ่มขึ้นได้ (Kapdan และ Alparslan, 2005)

จากภาพที่ 4.5 แสดงผลการศึกษาสำหรับประสิทธิภาพการการบำบัดสีย้อมเมื่อวัดค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการวัดสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่สภาวะคงที่ ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรองมีค่าเท่ากับร้อยละ 81.6 77 70 82.73 และ 78.9 ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นตั้งแต่ 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบถังกรองไร้อากาศ มีค่าเท่ากับร้อยละ 77.2 71.2 61.2 80.2 และ 83.3 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่างๆ เมื่อวัดความเข้มสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่างๆ เมื่อวัดความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ

แต่จากการวัดค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมมีค่าต่ำกว่าช่วงความเข้มข้นสีย้อมค่าอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากข้อผิดพลาดระหว่างการทดลอง ในขั้นตอนของการวัดค่าร้อยละของการส่องผ่านของแสง (%T) ด้วยเครื่องยูวีสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งในการวัดค่าการส่องผ่านของแสงควรอยู่ในช่วงตั้งแต่ ร้อยละ 15 – 80 (Kao และคณะ, 2001) ถ้าน้ำตัวอย่างมีความเข้มสีสูงมากจำเป็นต้องทำการเจือจางน้ำตัวอย่างก่อนทำการวัด แต่ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

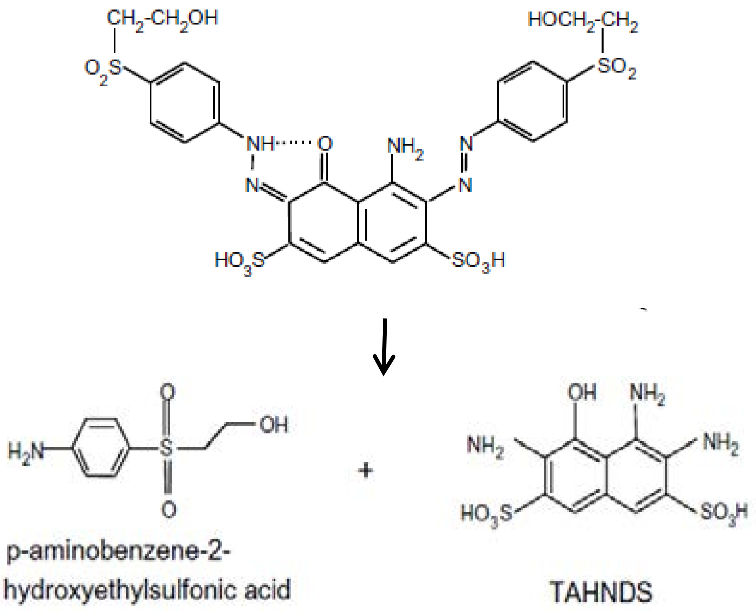
ผู้วิจัยไม่ได้ทำการเจือจางน้ำตัวอย่างก่อนทำการวัดค่าการส่องผ่านของแสง ส่งผลให้การวัดค่าการส่องผ่านของแสงที่ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 530 – 650 นาโนเมตร ค่าการส่องผ่านของแสงที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าร้อยละ 15 จึงอาจส่งผลให้ค่าความเข้มสีที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง และเมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัด ผลที่ได้จึงแตกต่างออกไป ในขณะที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 10 25 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร การวัดค่าการส่องผ่านของแสงอยู่ในช่วงร้อยละ15 – 80 ผลการทดลองที่ได้จึงอยู่ในแนวโน้มเดียวกัน

จากภาพที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่างการทดลอง (เมื่อไม่พิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรของการวัดความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ) แต่สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบโปรยกรอง พบว่า การวัดค่าความเข้มสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร แนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ แต่การวัดความเข้มสีแบบเอดีเอมไอ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสูงขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดสีของระบบโปรยกรองมีค่าลดลง

เนื่องจากตามทฤษฏีของการบำบัดสีย้อมด้วยระบบชีวภาพแบบไร้อากาศ พันธะอะโซของสีย้อมจะประพฤติตัวเป็นสารรับอิเล็กตรอน และมีสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นสารให้อิเล็กตรอน เป็นผลให้พันธะอะโซของสีย้อมสลายไป ความเข้มสีในน้ำเสียจึงมีค่าลดลง ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดในขั้นตอนการสร้างกรด (Sponza และ IsIk, 2005) แต่ด้วยการสลายพันธะอะโซของสีย้อมจะทำให้เกิดสารประกอบอะโรเมติกเอมีนสะสมอยู่ภายในระบบ ซึ่งสารประกอบชนิดนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศ แต่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ (Van der Zee และ Villaverde, 2005) จากการสลายพันธะของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 จะเกิดเป็นสารอะโรมาติกเอมีน มี 2 ชนิดหลัก คือ p-amino-benzene-hydroxyethyl-sulfone (p-ABHES) และ 1,2,7-triamino-8-hydroxynapthalene-3,6-disulfonic acid (TAHNDS) (Libra และคณะ, 2004) แสดงโครสร้างโมเลกุลดังภาพที่ 4.6

เมื่อสารประกอบ TAHNDS สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชัน แล้วกลายเป็นโครมาเจนหรือโมเลกุลที่ไม่มีกลุ่มอะตอมออกโซโครมมาสร้างพันธะ ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีสีปรากฏแต่ขาดสมบัติการยึดติดกับเส้นใย ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงของโครมาเจนที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับค่าการดูดกลืนแสงของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (597 นาโนเมตร) ซึ่งเป็นผลให้ความเข้มสีในน้ำมีค่าสูงขึ้น แต่จากข้อจำกัดของการวัดค่าความเข้มสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ที่เป็นการวัดค่าสีที่ช่วงความยาวคลื่นแสงสูงสุดที่สีย้อมชนิดนั้นๆ สามารถดูดกลืนไว้เพียงค่าเดียว จึงไม่สามารถเห็นความแตกต่างได้ แต่สามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงได้ แต่การวัดความเข้มสีแบบเอดีเอมไอ จะทำการวัดค่าการส่องผ่านของแสง

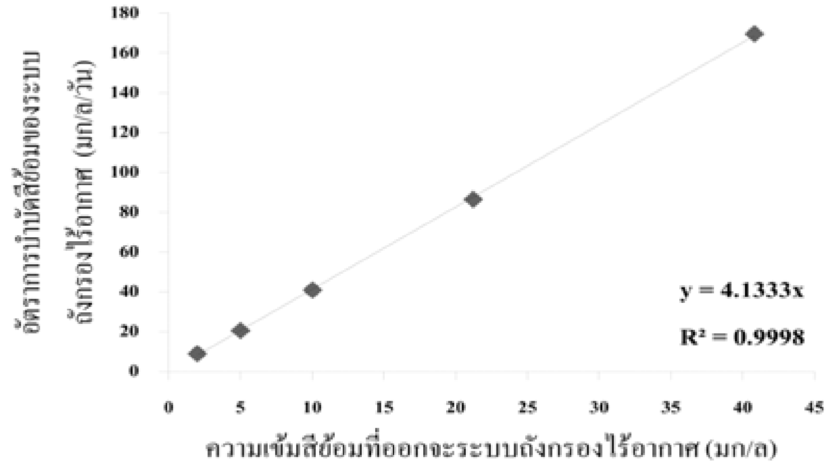
ด้วยช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ตั้งแต่ 400 – 700 นาโนเมตร แล้วนำไปคำนวณเพื่อเปลี่ยนเป็นค่าความเข้มสีที่แท้จริงเพียงค่าเดียว ซึ่งไม่ได้ขึ้นอยู่ว่าเป็นเฉดสีอะไร (Kao และคณะ, 2001) ด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบโปรยกรองจึงมีค่าลดลง เมื่อวัดความเข้มสีด้วยหน่วยเอดีเอมไอ



ภาพที่ 4.6 แสดงโครงสร้างของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 และสารประกอบอะโรมาติก เมื่อพันธะอะโซสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ตามทฤษฎีที่ว่าสีย้อมไม่สามารถบำบัดได้ภายใต้ระบบบำบัดแบบใช้อากาศ เพราะในสภาวะเติมอากาศ การรับอิเล็กตรอนของพันธะอะโซจะถูกจำกัด เนื่องจากออกซิเจนมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าพันธะอะโซ จึงเป็นผลให้การบำบัดสีย้อมในระบบเติมอากาศเกิดขึ้นได้น้อย (Van der Zee และ Villaverde, 2005; Dos Santos และคณะ, 2007) แต่นอกเหนือจากการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันแล้ว ก็ยังมีอีกทฤษฎีที่ว่าการบำบัดสีย้อมสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยกลไกลการดูดซับสีย้อมเข้าไปในตะกอนจุลินทรีย์ ส่งผลให้ความเข้มสีในน้ำทิ้งมีค่าลดลงได้ (Srinivasan และ Viraraghavan, 2010)

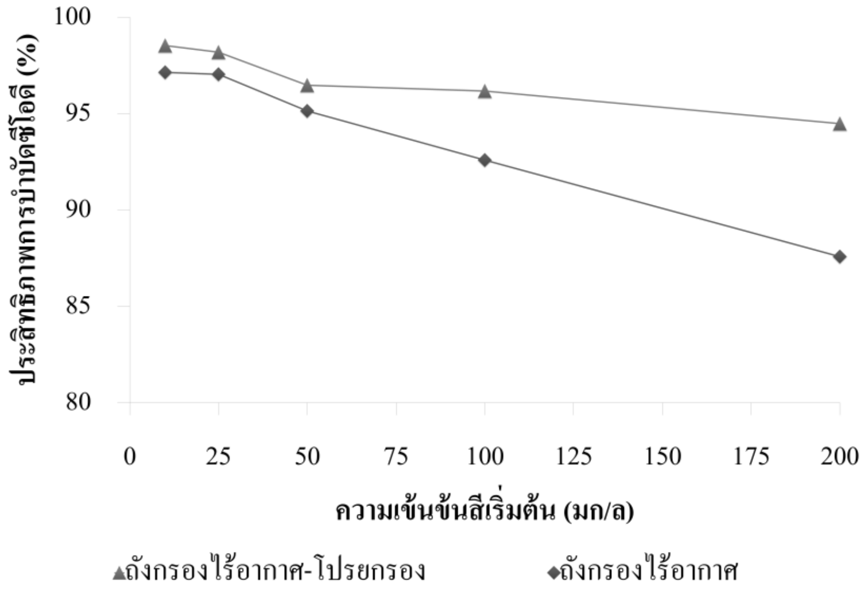
จากภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เทียบกับค่าความเข้มสีในน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศที่สภาวะคงที่ การบำบัดสีย้อมของระบบถังกรองไร้อากาศมีอัตราการบำบัดสีย้อมอยู่ระหว่าง 9 – 170 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ที่ค่าความเข้มสีย้อมเริ่มต้นจาก 10 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร กราฟมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นเส้นตรง (1^{ST}-order reduction) โดยมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k_1) หาได้จากความชันของเส้นกราฟ มีค่าเท่ากับ 4.13 ต่อวัน ซึ่งเมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น อัตราการบำบัดสีย้อมก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เทียบกับค่าความเข้มสีในน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศที่สภาวะคงที่

4.2.2.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรองมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.5 98.5 96.5 96.2 และ 94.5 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นตั้งแต่ 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าร้อยละ 97.1 97 95.1 92.6 และ 87.6 ผลการทดลองแสดงให้ทราบว่า ค่าซีโอดีส่วนใหญ่ถูกบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ แต่เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสูงขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศมีค่าลดต่ำลงจากร้อยละ 97.1 เหลือเพียงร้อยละ 87.6 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 10 เพิ่มเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีแสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรองที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่างๆ

เนื่องจากค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์มากกว่าร้อยละ 87 ถูกบำบัดตั้งแต่อยู่ในระบบถังกรองไร้อากาศ เมื่อน้ำเสียไหลต่อเนื่องเข้าสู่ระบบโปรยกรอง ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบโปรยกรองมีค่าไม่สูงมาก ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 43.8±10.9 ตลอดการทดลอง แต่วัตถุประสงค์หลักของการใช้ระบบโปรยกรองสำหรับการศึกษาในใครนี้ก็คือ เพื่อเป็นการบำบัดสารประกอบอะโรมาติกเอนมีที่เกิดจากการสลาพันธะอะโซของสีย้อม เพราะสารประกอบอะโรเมติกเอมีนไม่สามารถย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศ แต่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ (Van der Zee และ Villaverde, 2005)

สำหรับอัตราการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นตั้งแต่ 10 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าค่อนข้างคงที่ถึงแม้ว่าความเข้มข้นสีย้อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยอัตราการบดัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าเฉลี่ยตลอด 5 ช่วงความเข้มข้นสีย้อมที่ทำการทดลอง เท่ากับ 506±6.76 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน อัตราการบำบัดซีโอดีของระบบโปรยกรองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.67±11.3 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน

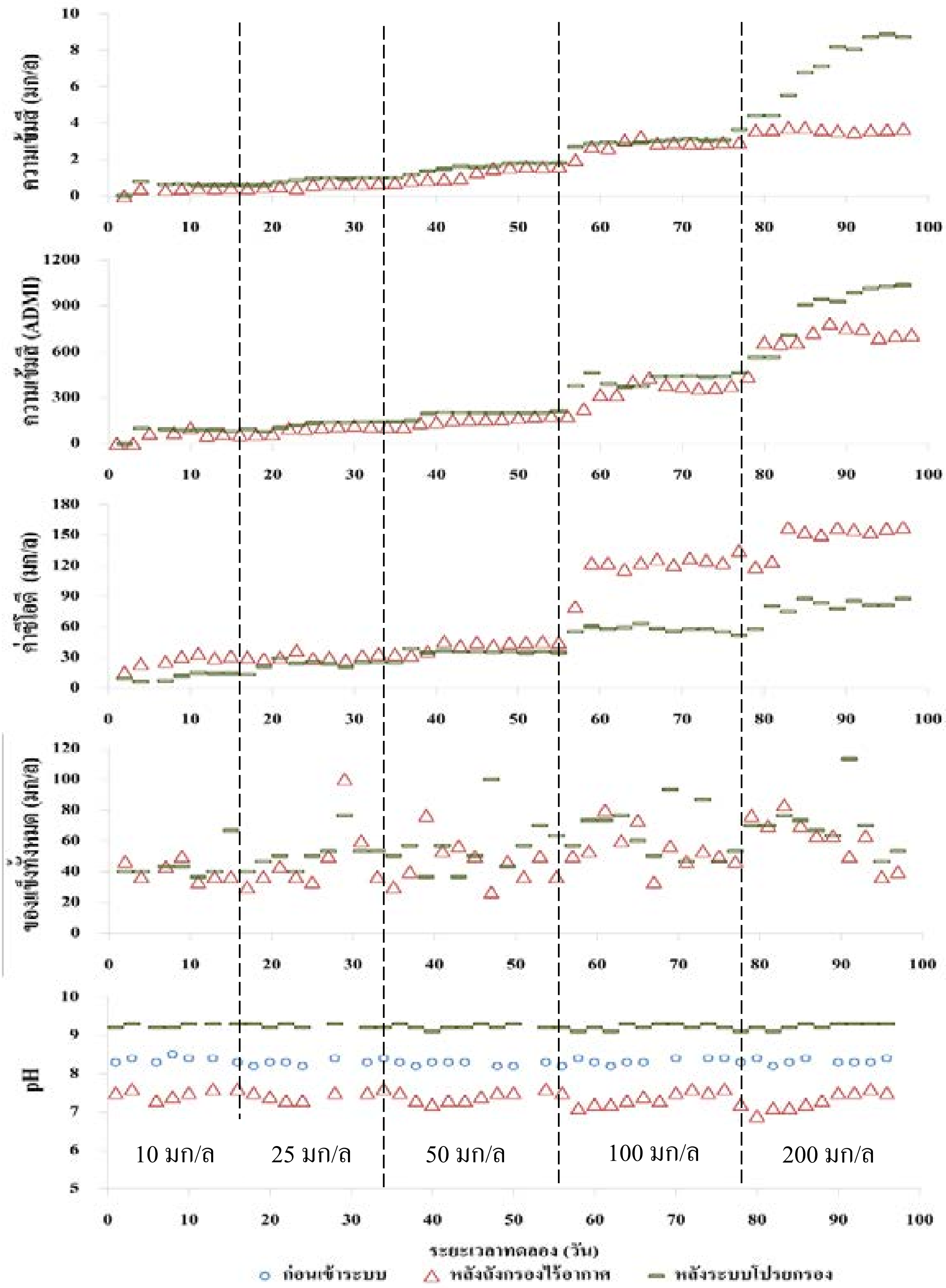
4.2.3 การบำบัดสีย้อมโมโนอะโซ

การทดลองนี้เลือกใช้สีรีแอกทีฟไวโอเล็ตเพื่อเป็นตัวแทนของสีย้อมโมโนอะโซ การทดลองเริ่มต้นด้วยความเข้มขั้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อการบำบัดเข้าสู่สภาวะคงที่จึงเปลี่ยนความเข้มข้นสีย้อมเป็น 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยระยะเวลาในการทดลองแต่ละช่วงความเข้มข้นสีเท่ากับ 17 18 20 20 และ 22 วัน ตามลำดับ รวมระยะเวลาตลอดการทดลองทั้งสิ้น 97 วัน พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ตลอดระยะเวลาทดลองได้แก่ ความเข้มสีในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตรและเอดีเอมไอ ซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยและพีเอช ซึ่งก่อนเริ่มทำการทดลองการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรองได้ทำการเดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มีสีย้อมเป็นระยะเวลาประมาณ 3 สัปดาห์ เพื่อเป็นการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่อาจหลงเหลืออยู่ให้ออกไปจากทั้งระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง จึงเริ่มทำการทดลองด้วยสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.9

4.2.3.1 ผลการทดลอง

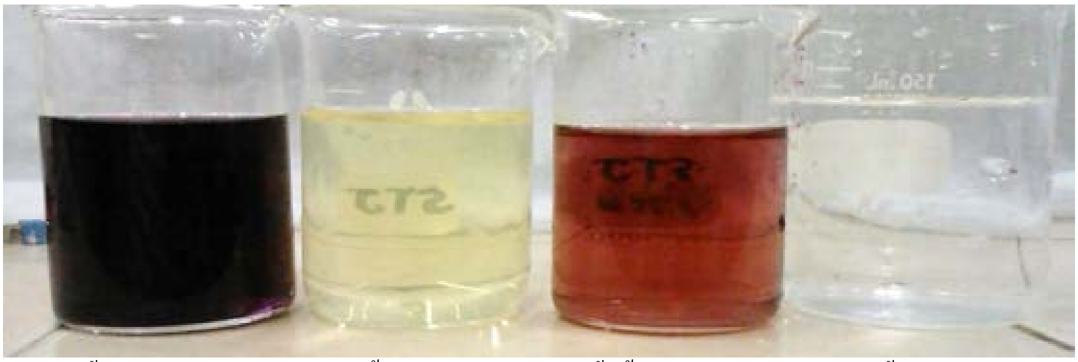
1) ค่าความเข้มสี

จากการทดลอง พบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรองใช้ระยะเวลาเพียง 10-12 วัน ระบบก็สามารถบำบัดสีย้อมให้เข้าสู่สภาวะคงที่ได้ โดยที่ความเข้มข้นสีย้อมเข้าสู่ระบบ 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถกำจัดความเข้มสีให้ลดลงเหลือเพียง 0.44±0.02 0.71±0.03 1.79±0.02 2.91±0.04 และ 3.64±0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอลดลงเหลือ 59.4±3.33 109±1.49 180±2.05 447±11.5 และ 703±9.44 ตามลำดับ และเมื่อสังเกตสีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ พบว่า น้ำที่ออกมาแทบจะไม่หลงเหลือความเข้มสีเหมือนกับในตอนแรกก่อนเข้าระบบเลย ลักษณะสีของน้ำที่ออกมาค่อนข้างมีสีเหลือง-เขียว ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการทดลองด้วยสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดระยะเวลา 97 วัน

เมื่อน้ำจากระบบถังกรองไร้อากาศผ่านเข้าสู่ระบบโปรยรอง พบว่า น้ำทิ้งกลับมีความเข้มสีเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งสี่ที่เกิดขึ้นก็แตกต่างจากสีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบถังกรองไร้อากาศ โดยค่าความเข้มสีของน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศมีค่า 0.57±0.02 0.98±0.00 1.62±0.02 3.08±0.03 และ 8.76±0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสีย้อมเข้าสู่ระบบ 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอมีค่า 87.3±5.91 143±2.65 204±5.51 291±4.65 และ 1,027±10.8 เอดีเอมไอ ตามลำดับ ลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง ดังภาพที่ 4.10

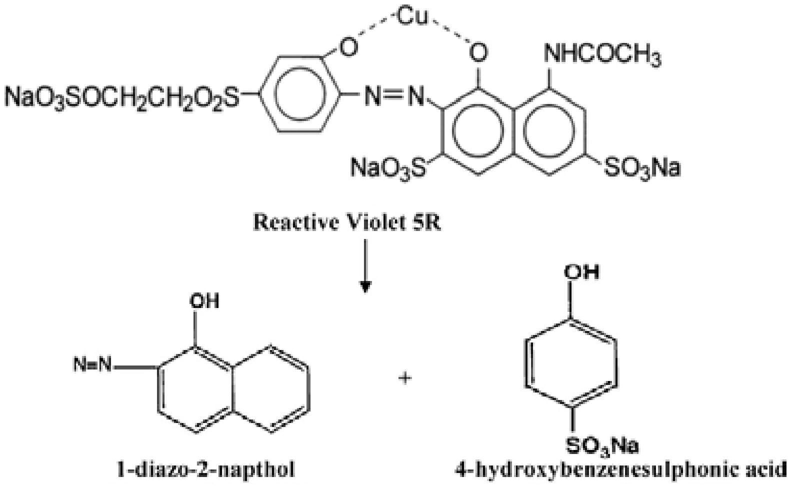


น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มก/ล	ทิ้งจากระบบ ถังกรองไร้อากาศ	น้ำทิ้งจากระบบ โปรยกรอง	น้ำกลั่น

ภาพที่ 4.10 ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศและน้ำทิ้งจากระบบโปรยกรองที่สภาวะคงที่เทียบกับน้ำกลั่น

การที่น้ำทิ้งจากระบบโปรยกรองมีค่าความเข้มสีสูงขึ้นอาจเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยา Azo Coupling คือ ปฏิกิริยาการวมตัวกันของสารอะโรมาติก 2 ชนิด ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง เกิดเป็นสารประกอบที่มีสีขึ้นมา หรือก็คือปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตสีย้อมนั้นเอง ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเป็นด่างสูงๆ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าพีเอชในน้ำทิ้งจากระบบโปรยกรอง พบว่า มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 9.2±0.1 จึงเป็นไปได้ว่าการที่น้ำทิ้งมีสีเข้มขึ้นอาจเกิดจากปฏิกิริยา Azo Coupling (Libra และคณะ, 2004; Sheth และ Dave, 2010) เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มสีในน้ำที่สูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ระบบโปรยกรอง กับน้ำผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ พบว่า มีความเข้มสีสูงขึ้นร้อยละ 31.4±15.3 ของทุกช่วงความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นที่ทำการศึกษา

การสลายพันธะอะโซของสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ภายใต้สภาวะไร้อากาศ เกิดเป็นเป็นสารประกอบอะโรมาติก 2 ชนิด คือ 1-diazo-2-naphthol และ 4-hydroxybenzenesulphonic acid ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงของสารทั้ง 2 ชนิด มีค่า 250 และ 325 นาโนเมตร ตามลำดับ (Jain และคณะ , 2012) ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 แสดงโครงสร้างของสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และสารประกอบอะโรมาติก เมื่อพันธะอะโซสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ

แต่เมื่อสารอะโรมาติก 2 ชนิดนี้เข้าสู่สภาวะที่มีออกซิเจนและมีค่าพีเอชเป็นด่าง จะเกิดปฏิกิริยา Azo Coupling ของสารอะโรมาติกทั้ง 2 ชนิดนี้ กับสาร Phenylamine ที่เกิดขึ้นจากสารอะโรมาติกทำปฏิกิริยากับกรดภายในระบบถังกรองไร้อากาศ ซึ่งผลที่ได้จากปฏิกิริยา Azo Coupling ระหว่าง 1-diazo-2-naphthol และ Phenylamine คือเกิดเป็นสีย้อมที่แสดงสมบัติของสีเหลือง ส่วนการทำปฏิกิริยากันระหว่าง 4-hydroxybenzenesulphonic acid กับ Phenylamine จะเกิดเป็นสีย้อมที่แสดงสมบัติของสีแดง (Jain และคณะ , 2012)

ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้ผลการทดลองที่วัดค่าความเข้มสีแบบเอดีเอมไอ เพื่อการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและอัตราการบำบัดสีย้อมของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เพราะการวัดค่าความเข้มสีแบบเอดีเอมไอ เพราะการวัดค่าสีในหน่วยเอดีเอมไอ เป็นการตรวจวัดปริมาณของสี (Color Value) ในทุกหน่วยสี ไม่เน้นที่สีใดสีหนึ่ง แต่การวัดค่าความเข้มสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรทำโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว (559 นาโนเมตร) ดังนั้นการวัดความเข้มสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรจึงอาจไม่มีความแม่นยำเพียงพอ

2) ค่าซีโอดี

ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดค่าซีโอดีในน้ำเสีย จากค่าซีโอดีเริ่มต้น 1,099±47.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ลดลงเหลือเพียง 30±0.93 33±0.76 45±0.47 125±2.23 และ 156±2.47 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าได้ว่า ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีในน้ำยังมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ แต่เมื่อน้ำเสียผ่านเข้า

สู่ระบบโปรยกรอง ค่าซีโอดีในน้ำทิ้งก็ถูกบำบัดให้ลดลง จนสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 120 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ทุกช่วงการทดลอง โดยค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากระบบโปรยกรองมีค่า 14±0.52 25±0.09 35±0.99 57±1.42 และ 83±3.74 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

การเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ไม่ส่งผลต่อการบำบัดซีโอดีของทั้งระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง เพราะระบบใช้เวลาเพียง 10 – 12 วัน การบำบัดซีโอดีของระบบก็สู่สภาวะคงที่ได้แล้ว และที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็ไม่พบปัญหาในการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศ เหมือนเช่นการทดลองด้วยสีรีแอกทีฟแบล็ค 5

3) ค่าของแข็งแขวนลอย

จากผลการทดลอง ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกจากระบบถังกรองไร้อากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่หลุดออกจากระบบถังกรองไร้อากาศมีค่า 39.2±6.84 ชุ47.4±21.8 47.4±21.8 55.7±12.3 และ 60.3±15.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนปริมาณของแข็งแขวนลอยที่วัดได้จากน้ำทิ้งของระบบโปรยกรองมีค่า 43.8±9.50 52.6±9.97 57.0±18.6 66.3±16.7 และ 68.8±17.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

สำหรับตรวจสอบสมรรถนะของระบบถังกรองไร้อากาศในแง่การเก็บรักษาปริมาณจุลินทรีย์ จึงทำการเปรียบเทียบปริมาณของเซลล์จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่ระบบกับปริมาณของเซลล์ที่หลุดออกจากระบบ (ภาคผนวก ข-1) พบว่า ปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นใหม่ภายในระบบถังกรองอากาศ มีค่า 0.98±0.04 กรัมต่อวัน ส่วนปริมาณเซลล์ที่หลุดออกจากระบบถังกรองไร้อากาศมีค่า 0.61±0.19 กรัมต่อวัน ดังนั้น สมรรถนะของระบบยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เช่นเดียวกับการทดลองด้วยสีรีแอกทีฟแบล็ค 5

4) ค่าพีเอช

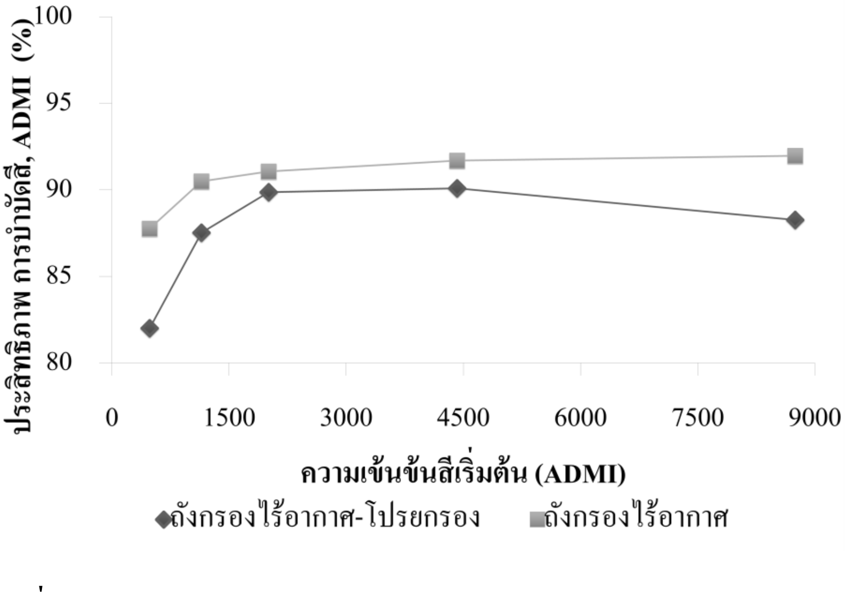
การทดลองจะควบคุมพีเอชของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 6.5-7.5 โดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตปริมาตร 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบมีค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 8.3±0.1 เมื่อดำเนินระบบอย่างต่อเนื่องค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศมีค่า 7.4±0.2 และเมื่อน้ำเสียจากระบบถังกรองไร้อากาศผ่านเข้าสู่ระบบโปรยกรอง น้ำทิ้งมีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น เป็น 9.2±0.1 ซึ่งเป็นผลมาจากกระการที่น้ำเสียสัมผัสกับออกซิเจน ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำหลุดออกไปค่าพีเอชของน้ำเสียจึงมีค่าสูงขึ้น รวมไปถึงเกิดการสะสมของด่างที่เติมเข้าไปอยู่ในภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บน้ำของระบบโปรยกรอง ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากทั้งสองระบบมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการทดลอง

4.2.3.2 ประสิทธิภาพการบำบัด

การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรอง (AF/TF) ระบบถังกรองไร้อากาศ (AF) และระบบโปรยกรอง (TF) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) (4.2) และ (4.3) ตามลำดับ โดยผลการทดลองที่นำมาคำนวณ คือ ค่าความเข้มสีและซีโอดีที่หลงเหลือในน้ำเมื่อการบำบัดของระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ และในการทดลองนี้จะนำเสนอค่าความเข้มสีเฉพาะในหน่วยเอดีเอมไอ ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อผลการทดลอง

4.2.3.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม โดยวัดค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ พบว่า ที่สภาวะคงที่ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมโดยรวมของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรองมีค่าเท่ากับร้อยละ 82 87.5 89.9 90.1 และ 88.3 ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นตั้งแต่ 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบถังกรองไร้อากาศ พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อคิดรวมทั้งระบบ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการความเข้มสีในน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านระบบโปรยกรอง ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าเท่ากับร้อยละ 87.8 90.5 91.1 91.7 และ 92 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.12

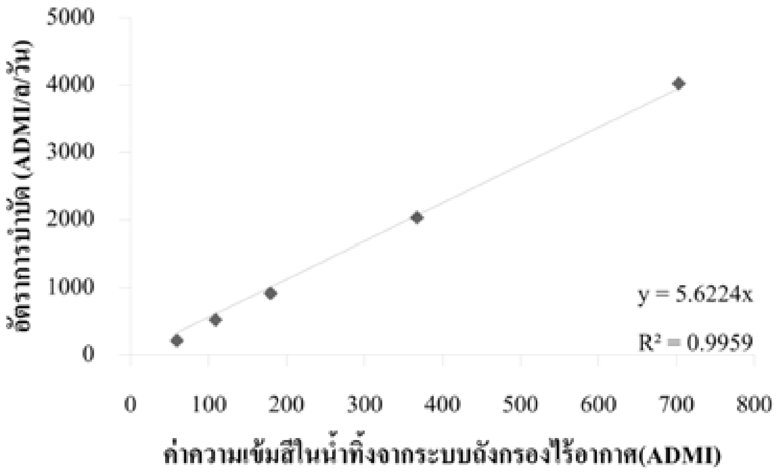


ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดสีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ในหน่วยเอดีเอมไอที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่างๆ

จากภาพที่ 4.12 พบว่า ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นที่เข้าระบบ ตั้งแต่ 10 -50 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบถังกรองไร้อากาศ มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 87.8 เป็นร้อยละ 91.1 แต่เมื่อความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นที่เข้าระบบเพิ่มขึ้นเป็น 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าคงที่ นั้นหมายความว่า ระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ได้สูงสุด ไม่เกินร้อยละ 92 ของความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น

สำหรับอัตราการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ของระบบถังกรองไร้อากาศ เมื่อการบำบัดเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า อัตราการบำบัดสีย้อมมีค่าตั้งแต่ 213 – 4,022 เอดีเอมไอต่อลิตรต่อวัน ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 10 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เทียบกับค่าความเข้มสีในน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศที่สภาวะคงที่ พบว่า เมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น อัตราการบำบัดสีย้อมก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งปฏิกิริยาการบำบัดสีย้อมในถังกรองไร้อากาศเกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาลำดับที่ 1 มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k_1) เท่ากับ 5.62 ต่อวัน

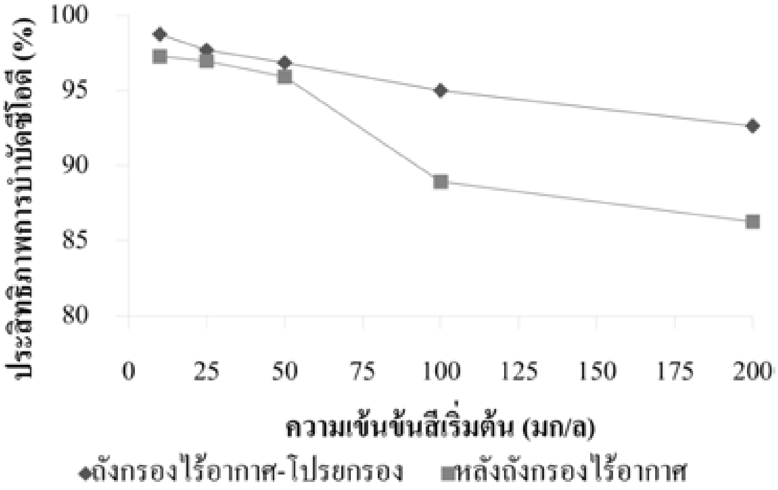


ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เทียบกับค่าความเข้มสีในน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศที่สภาวะคงที่

4.2.3.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรองมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ที่ร้อยละ 98.7 97.7 96.9 95 และ 92.6 ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นตั้งแต่ 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศ พบว่า มีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ ร้อยละ 97.3 97 95.9 88.9 และ 86.3 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบโปรยกรองมีค่าร้อยละ 53.9 24.2 22.9 54.9 และ 46.5 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีตลอดช่วงการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ต่างๆ

จากผลการทดลอง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียให้สูงขึ้นจาก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศมีค่าลดต่ำลงเล็กน้อย จากร้อยละ 97.3 ลดลงเหลือร้อยละ 86.3 โดยประสิทธิภาพการบำบัดสามารถแบ่งเป็น 2 ช่วงโดยใช้ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ คือ 120 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเกณฑ์ ช่วงแรกคือ ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดค่าซีโอดีเริ่มต้นที่เข้าระบบ 1,112 ± 21.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีซีโอดีเหลือเพียง 36±7.90 มิลลิกรัมต่อลิตร และอีกช่วง คือ ช่วงที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบถังกรองไร้อากาศไม่สามารถบำบัดซีโอดีให้ต่ำกว่ามาตรฐานได้ คือ มีค่าซีโอดีเหลือในน้ำ 141±21.6 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อน้ำเสียเข้าระบบโปรยกรองแล้ว ระบบสามารถบำบัดให้ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งลดลงเหลือ 69.9±18.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับอัตราการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าเท่ากับ 517±20.7 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ส่วนอัตราการบำบัดซีโอดีของระบบโปรยกรองเท่ากับ 14.0±12.9 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน

4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟในเมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานแทนน้ำตาลทราย

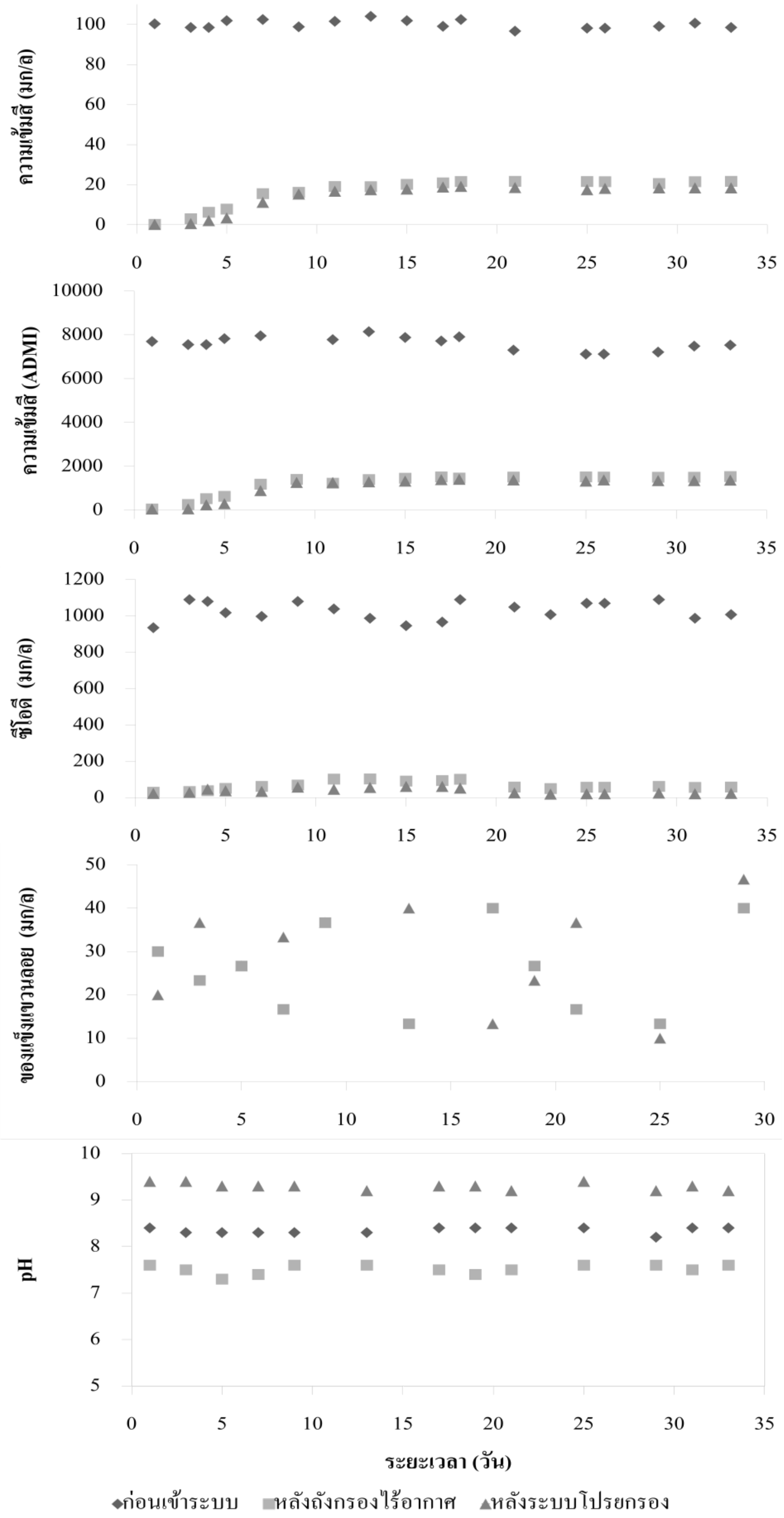
4.3.1 น้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองนี้ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานสำหรับจุลินทรีย์ เพราะในกระบวนการฟอกย้อมนั้นมีการใช้แป้งมันร่วมอยู่ด้วย ซึ่งปริมาณแป้งมันที่ใช้ในกระบวนการเคลือบเส้นใยของผ้า ปริมาณที่ใช้โดยประมาณเท่ากับร้อยละ 1 ของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ (การแปรรูปและการใช้ประโยชน์มันสำปะหลัง, 2542 : ออนไลน์) โดยการทดลองนี้เลือกใช้ค่าซีโอดีเริ่มต้นที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีของระบบ และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดกับผลการทดลองในตอนที่ผ่านมา สำหรับขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากแป้งมันไม่สามารถละลายน้ำได้ จึงต้องมีการให้ความร้อนแก่น้ำ เพื่อช่วยให้แป้งมันสามารถละลายได้ในน้ำ โดยระยะเวลาตลอดการทดลองใช้เวลาทั้งสิ้น 31 วัน

4.3.2 ผลการทดลอง

จากการทดลอง ระบบใช้เวลาประมาณ 15 วัน การบำบัดสีย้อมและซีโอดีก็เข้าสู่สภาวะคงที่ โดยที่ความเข้มสีเริ่มต้น 100±2.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดความเข้มสีให้เหลือ 21.4±0.56 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบโปรยกรองน้ำทิ้งมีค่าความเข้มสีเท่ากับ 18.4±0.48 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับความเข้มสีย้อมในหน่วยเอดีเอมไอของน้ำที่เข้าระบบเท่ากับ 7,604±317 เอดีเอมไอ หลังจากผ่านการบำบัดของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง มีความเข้มสีเท่ากับ 1,509±25.5 และ 1,347±30.1 เอดีเอมไอ ตามลำดับ

ค่าซีโอดีที่เข้าระบบตลอดระยะเวลาการทดลองมีค่าเท่ากับ 1,033±47.4 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อน้ำเสียผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรองแล้ว ค่าซีโอดีที่เหลือในน้ำมีค่าเท่ากับ 58.4±18.8 และ 21.8±17.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าพีเอชตลอดการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 8.3±0.07 และค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีค่าเท่ากับ 7.5±0.1 และ 9.3±0.08 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีค่าเท่ากับ 24.9±9.59 และ 27.9±11.2ตามลำดับ



ภาพที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 โดยแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงาน

4.3.3 ประสิทธิภาพการบำบัด

ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมโดยรวมของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรองมีค่าเท่ากับร้อยละ 81.6 และ 82.3 สำหรับความเข้มสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรและเอดีเอมไอ ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าเท่ากับร้อยละ 78.6 และ 80.2 ตามลำดับ ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบโปรยกรองมีค่าเท่ากับร้อยละ 14.1 และ 10.7 ตามลำดับ

ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีโดยรวมของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรองมีค่าเท่ากับร้อยละ 97.9 เมื่อแยกพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรองมีค่าเท่ากับร้อยละ 94.4 และ 62.7 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อแหล่งพลังงาน คือ แป้งมันสำปะหลังและน้ำตาลทรายขาว พบว่าการเปลี่ยนชนิดของแหล่งพลังงานไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและซีโอดีของทั้งระบบถังกรองไร้อากาศและระบบโปรยกรอง ทั้งนี้อาจเป็นมาจากขั้นตอนของการการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ เพราะมีการให้ความร้อนแก่แป้งมันสำปะหลัง ซึ่ง ส่งให้โครสร้างโมเลกุลของบ้างมันถูกสลาย จึงเป็นการง่ายขึ้นสำหรับการย่อยสลาย

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของบัญชา บุญอนันต์วงศ์ (2554) ที่สมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเหมือนกัน พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของถังกรองไร้อากาศ ของการทดลองที่ใช้แป้งมันสำปะหลังและน้ำตาล ทั้งคู่มีประสิทธิภาพสูงกว่าผลการทดลองของบัญชา บุญอนันต์วงศ์ ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากระบบบำบัดที่ใช้ในการทดลองนี้ ผ่านการเดินระบบอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลานาน ทำให้ปริมาณของฟิล์มชีวภาพในระบบมีมากขึ้นและจุลินทรีย์ในระบบสามารถทนต่อสภาวะที่เป็นพิษของสีย้อมได้ดีขึ้น จึงสามารถปรับสภาพให้เข้ากับน้ำเสียได้เร็วและดีมากขึ้น แต่ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของระบบโปรยกรองมีค่าต่ำกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากฟิล์มชีวภาพในระบบได้รับผลกระทบจากความเป็นพิษของสีย้อมของการทดลองก่อนหน้านี้ ซึ่งใช้ความเข้มข้นของสีย้อมถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ชนิดของสีย้อมมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมด้วยระบบไร้อากาศ โดยสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เป็นสีย้อมที่มีพันธะอะโซในโครสร้างสี 1 ตำแหน่ง สามารถถูบำบัดให้ค่าความเข้มสีในน้ำลดลงได้มากกว่าสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่มีพันธะอะโซอยู่ 2 ตำแหน่ง โดยระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรอง สามารถบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ได้ร้อยละ 88 และสามารถบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ได้ร้อยละ 80

2. ชนิดและความเข้มข้นของย้อมที่เข้าระบบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรอง ซึ่งระบบสามารถบำบัดซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 95 ของการทดลองด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด และความเข้มข้นของสีย้อมตั้งแต่ 10 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ซีโอดีส่วนมากถูกบำบัดตั้งแต่อยู่ในระบบถังกรองไร้อากาศ โดยอัตราการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าเท่ากับ 517±20.7 และ 506±6.76 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อ ของการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ตามลำดับ

4. การบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ด้วยถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรอง พบว่า ความเข้มสีในน้ำกลับมีค่าสูงขึ้นเมื่อน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยนะบบโปรยกรอง ซึ่งเป็นไปได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยา Azo coupling โดยความเข้มสีที่กลับสูงมีค่าร้อยละ 31.4 เมื่อเทียบกับความเข้มสีของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบถังกรองไร้อากาศ

5. การบำบัดสีย้อมทั้ง 2 ชนิดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศเกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ซึ่งค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k_1) ของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 และสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เท่ากับ 4.13 และ 5.62 ต่อวัน ตามลำดับ

6. เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมมีค่าสูงขึ้น ปริมาณด่างที่เติมเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบถังกรองไร้อากาศก็ต้องมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

7. แหล่งพลังงาน (แป้งมันและน้ำตาลทรายขาว) ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศต่อด้วยระบบโปรยกรอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1.ควรปรับค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดให้มีค่าเป็นกลาง เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยา Azo coupling

2. จากการทดลองที่พบว่าเมื่อน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศไหลเข้าสู่ระบบโปรยกรอง มีความเข้มของสีในน้ำทิ้งสูงขึ้น ดังนั้นจึงควรศึกษาเพื่อหาวิธีจัดการกับความเข้มสีที่เพิ่มขึ้นในส่วนนี้ต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะเพื่อนำไปประยุกต์ใช้

1.การบำบัดสีย้อมด้วยระบบฟิล์มชีวภาพแบบไร้อากาศให้ผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ทั้งการเดินระบบอย่างต่อเนื่องและระยะเวลานานอาจส่งผลให้จุลชีพในระบบมีความสามารถในการทนต่อความเป็นพิษของสีย้อมได้ดี ดังนั้นการนำระบบบำบัดนี้ไปใช้งานในสภาวะจริง ควรเตรียมจุลินทรีย์ให้มีความพร้อมต่อความเป็นพิษของสีย้อมให้มากที่สุด โดยการเลี้ยงจุลินทรีย์ให้มีความคุ้นเคยกับสภาพน้ำเสีย โดยการค่อยๆ ปรับเพิ่มปริมาณและความเข้มข้นของสีย้อมที่เข้าระบบ

2.การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอาจทำได้โดยการเติมตะกอนจุลินทรีย์เข้าไปในระบบฟิล์มชีวภาพด้วย เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกลไกการดูดซับของสีย้อมของตะกอนจุลินทรีย์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ควบคุมมลพิษ, กรม 2539. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s1 [26 มีนาคม 2555]

ควบคุมมลพิษ, กรม 2542. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

ส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรม 2547. คู่มือเทคโนโลยีสะอาดในอุตสาหกรรมสิ่งทอ. กรุงเทพฯ. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

ส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรม 2555. บทที่ 9 การวิเคราะห์ปัญหา อุปสงค์ และ SWOT ของอุตสาหกรรมสิ่งทอไทย. กรุงเทพฯ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://library.dip.go.th/multim4/eb/EB%20141.9.doc [23 เมษายน 2555]

จันทิมา ชั่งสิริพร, ณรงค์พล ทองสังข์ , วุฒิไกร วงษ์มะยุรา และจรรยา อินทมณี. 2551. การกำจัดสีและCODในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการรวมตะกอน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 58 – 63 . คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์. 2546. เอกสารประกอบการสัมมนา เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน, โครงการจัดทำคู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ. กรุงเทพฯ.

บัญชา บุญอนันต์วงศ์. 2554. การส่งเสริมการย่อยสลายของสีรีแอกทีฟไดอะโซ โดยระบบฟิล์มชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์หมาวิทยาลัย.

บุษรา ประชุมญาติ. 2545. การกำจัดสีรีแอกทีฟหมู่อะโซด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์หมาวิทยาลัย.

ปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง, หน่วย. การแปรรูปและการใช้ประโยชน์มันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. 2542. แหล่งที่มา: http://www.thailandtapiocastarch.net/download/download-th-17.pdf [1 กันยายน 2556]

ปิยะชน สันดุษฎี. 2545. ผลของสับสเตรททีมีต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟและฟอสฟอรัสโดยระบบเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์หมาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2538. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุบัณฑิต นิ่มรัตน์. 2548. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. กรุงเทพมหานครฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Aksu, Z., Cagatay, S.S., and Gonen, F. 2007. Continuous fixed bed biosorption of reactive dyes by dried Rhizopus arrhizus: Determination of column capacity: Journal of Hazardous Materials143: 362-371.

Albuquerque, M.G.E., Lopes, A.T., Serralheiro, M.L., Novais, J.M., and Pinheiro, H.M. 2005. Biological sulphate reduction and redox mediator effects on azo dye decolourisation in anaerobic–aerobic sequencing batch reactors. Enzyme and Microbial Technology 36: 790-799.

Allen, W., Prescott, W.B., Derby, R.E., Garland, C.E., Peter, J.M. and Saltzman, M. 1973. Determination of color of water and wastewater by means of ADMI color values. Proceeding of 28th Perdue Industrial Wastwater Conference Part 2., Purdue University : 661-675.

Amini, M., Arami, M., Mahmoodi, N.M., and Akbari, A. 2011. Dye removal from colored textile wastewater using acrylic grafted nanomembrane. Desalination 267: 107-113.

Bafana, A., Krishnamurthi, K., Devi, S.S., and Chakrabarti, T. 2008. Biological decolourization of C.I. Direct Black 38 by *E. gallinarum*. Journal of Hazardous Materials 157: 187-193.

Chen, M., Liu, H., Wang, J. and Wang, Y. 2002. Influence of Supplemental Nutrient on Aerobic Decolorization of Acid Red 14 in Activated Sludge. Journal of Environmental Science and Health 37: 667-678.

Chung, K., and Cerniglia, C.E. 1992. Mutagenicity of azo dyes: Structure-activity relationships. Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology 277: 201-220.

Cinar, O., Yasar, S., Kertmen, M., Demiroz, K., Yigit, N.O., and Kitis, M. 2008. Effect of cycle time on biodegradation of azo dye in sequencing batch reactor. Process Safety and Environmental Protection 86: 455-460.

Deive, F.J., Domiacutenguez, A., Barrio, T., Moscoso, F., Moraacuten, P., Longo, M.A., and Sanromn, M.A. 2010. Decolorization of dye Reactive Black 5 by newly isolated thermophilic microorganisms from geothermal sites in Galicia (Spain). Journal of hazardous materials 182: 735-42.

Dos Santos, A.B., Cervantes, F.J., and van Lier, J.B. 2007. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. Bioresource Technology 98: 2369-2385.

Dos Santos, A.B., Brauna, C.H., Mota, S., and Cervantes, F.J. 2008. Effect of nitrate on the reduction of Reactive Red 2 by mesophilic anaerobic sludge. Water Sci Technol 57(7): 1067-71.

Farabegoli, G., Chiavola, A., Rolle, E., and Naso, M. 2010. Decolorization of Reactive Red 195 by a mixed culture in an alternating anaerobic–aerobic Sequencing Batch Reactor. Biochemical Engineering Journal 52: 220-226.

Forgacs, E., Cserhti, T., and Oros, G. 2004. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. Environment International 30: 953-971.

Franciscon, E., Zille, A., Fantinatti-Garboggini, F., Silva, I.S., Cavaco-Paulo, A., and Durrant, L.R. 2009. Microaerophilic–aerobic sequential decolourization/biodegradation of textile azo dyes by a facultative *Klebsiella sp.* strain VN-31. Process Biochemistry 44: 446-452.

Golob, V., Vinder, A., and Simonic, M. 2005. Efficiency of the coagulation/flocculation method for the treatment of dyebath effluents. Dyes and Pigments 67: 93-97.

Greluk, M., and Hubicki, Z. 2010. Kinetics, isotherm and thermodynamic studies of Reactive Black 5 removal by acid acrylic resins. Chemical Engineering Journal 162: 919-926.

Gupta, V. and Suhas, K. 2009. Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. Journal of Environmental Management 90: 2313-2342.

Jain, K., Shah, V., Chapla, D. and Madamwar, D. 2012. Decolorization and degradation of azo dye – Reactive Violet 5R by an acclimatized indigenous bacterial mixed cultures-SB4 isolated from anthropogenic dye contaminated soil. Journal of Hazardous Materials 213–214(0): 378-386.

Koupaie, H. E., Moghaddam M., R. and Hashemi, S. H. 2011. Post-treatment of anaerobically degraded azo dye Acid Red 18 using aerobic moving bed biofilm process: Enhanced removal of aromatic amines. Journal of Hazardous Materials 195: 147-154.

Koupaie H., E., Moghaddam Alavi M. R., Hashemi S. H. 2012. Investigation of decolorization kinetics and biodegradation of azo dye Acid Red 18 using sequential process of anaerobic sequencing batch reactor/moving bed sequencing batch biofilm reactor. International Biodeterioration & Biodegradation 71: 43-49.

Hsueh, C.-C., Chen, B.-Y., and Yen, C.-Y. 2009. Understanding effects of chemical structure on azo dye decolorization characteristics by Aeromonas hydrophila. Journal of Hazardous Materials 167: 995-1001.

Isik, M., and Sponza, D.T. 2007. Fate and toxicity of azo dye metabolites under batch long-term anaerobic incubations. Enzyme and Microbial Technology 40: 934-939.

Jeris, J.S., and McCarty, P.L. 1962. The Biochemistry of Methane Fermentation Using C14 Traces J. WPCF 37: 178 - 192.

Kapdan, I.K., and Alparslan, S. 2005. Application of anaerobic–aerobic sequential treatment system to real textile wastewater for color and COD removal. Enzyme and Microbial Technology 36: 273-279.

Kao, C.M., Chou, M.S., Fang, W.L., Liu BW, Huang BR. 2001. Regulating colored textile wastewater by 3/31 wavelength ADMI methods in Taiwan. Chemosphere 44(5) : 1055-63.

Kapdan, I.K. and Ozturk, R. 2005. Effect of operating parameters on color and COD removal performance of SBR: Sludge age and initial dyestuff concentration. Journal of Hazardous Materials 123: 217-222.

Kodam, K.M., Soojhawon, I., Lokhande, P.D., and Gawai, K.R. 2005. Microbial decolorization of reactive azo dyes under aerobic conditions. World Journal of Microbiology and Biotechnology 21: 367-370.

Li, J., and Bishop, P.L. 2002. In situ identification of azo dye inhibition effects on nitrifying biofilms using microelectrodes. Water Science & Technology 46: 207–214

Libra, J.A., Borchert, M., Vigelahn, L., and Storm, T. 2004. Two stage biological treatment of a diazo reactive textile dye and the fate of the dye metabolites. Chemosphere 56: 167-180.

Lin, J., Zhang, X., Li, Z., and Lei, L. 2010. Biodegradation of Reactive blue 13 in a two-stage anaerobic/aerobic fluidized beds system with a *Pseudomonas sp.* Isolate. Bioresource Technology 101: 34-40.

Lourenco, N.D., Novais, J.M., and Pinheiro, H.M. 2001. Effect of some operational parameters on textile dye biodegradation in a sequential batch reactor. Journal of Biotechnology 89: 163-174.

Lourenco, N. D., Novais, J., and Pinheiro, H. M. 2006. Kinetic Studies of Reactive Azo Dye Decolorization in Anaerobic/aerobic Sequencing Batch Reactors: Biotechnology Letters 28: 733-739.

Metcalf and Eddy. 2003. Wastewater Engineering : Treatment and Reuse. 4th edition. New York: McGraw-Hill.

Mohanty, S., Dafale, N., and Rao, N. 2006. Microbial decolorization of reactive black-5 in a two-stage anaerobic–aerobic reactor using acclimatized activated textile sludge: Biodegradation 17: 403-413.

Moosvi, S., and Madamwar, D. 2007. An integrated process for the treatment of CETP wastewater using coagulation, anaerobic and aerobic process. Bioresource Technology 98: 3384-3392.

Nosheen, S., Nawaz, R., Arshad, M., and Jamil, A. 2010. Accelerated Biodecolorization of Reactive Dyes with Added Nitrogen and Carbon Sources. INTERNATIONAL JOURNAL OF AGRICULTURE & BIOLOGY 12: 426–430.

O'Neill, C., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L., Lourenco, N.D., Pinheiro, H.M., and Delee, W. 1999. Colour in textile effluents – sources, measurement, discharge consents and simulation: a review. Journal of Chemical Technology & Biotechnology 74: 1009-1018.

Ola, I.O., Akintokun, A.K., Akpan, I., Omomowo, I.O., and Areo, V.O. 2010. Aerobic decolourization of two reactive azo dyes under varying carbon and nitrogen source by Bacillus cereus. African Journal of Biotechnology 9: 672-677.

Oranusi, N.A. and Ogugbue, C.J. 2005. Effect of pH and Nutrient Starvation on Biodegradation of Azo Dyes by *Pseudomonas* sp. Journal of Applied Sciences and Environmental Management 91 : 39- 43

Oxspring, D., McMullan, G., Smyth, W., and Marchant, R. 1996. Decolourisation and metabolism of the reactive textile dye, Remazol Black B, by an immobilized microbial consortium. Biotechnology Letters 18: 527-530.

Panswad, T., and Luangdilok, W. 2000. Decolorization of reactive dyes with different molecular structures under different environmental conditions. Water Research 34: 4177-4184.

Saratale, R.G., Saratale, G.D., Chang, J.S., and Govindwar, S.P. 2011. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 42: 138-157.

Sen, S., and Demirer, G.N. 2003. Anaerobic Treatment of Synthetic Textile Wastewater Containing a Reactive Azo Dye. Journal of Environmental Engineering 129: 595-601.

Shaw, C.B., Carliell, C.M., and Wheatley, A.D. 2002. Anaerobic/aerobic treatment of coloured textile effluents using sequencing batch reactors. Water Research 36: 1993-2001.

Sheth, N., and Dave, S. 2010. Enhanced biodegradation of Reactive Violet 5R manufacturing wastewater using down flow fixed film bioreactor. Bioresource Technology 101: 8627-8631.

Srinivasan, A. and Viraraghavan T. 2010. Decolorization of dye wastewaters by biosorbents: A review. Journal of Environmental Management 91 (10) : 1915-1929.

Solozhenko, E.G., Soboleva, N.M., and Goncharuk, V.V. 1995. Decolourization of azodye solutions by Fenton's oxidation. Water Research 29: 2206-2210.

Speece, R.E. 1996. Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater. Archae Press, Tennessee.

Sponza, D.T., and Isik, M. 2004. Decolorization and inhibition kinetic of Direct Black 38 azo dye with granulated anaerobic sludge. Enzyme and Microbial Technology 34: 147-158.

Sponza, D.T., and Isik, M. 2005. Reactor performances and fate of aromatic amines through decolorization of Direct Black 38 dye under anaerobic/aerobic sequentials. Process Biochemistry 40: 35-44.

Tehrani-Bagha, A.R., Mahmoodi, N.M., and Menger, F.M. 2010. Degradation of a persistent organic dye from colored textile wastewater by ozonation. Desalination 260: 34-38.

Tony, B.D., Goyal, D., and Khanna, S. 2009. Decolorization of textile azo dyes by aerobic bacterial consortium. International Biodeterioration & Biodegradation 63: 462-469.

Van der Zee, F.P. 2002. Anaerobic azo dye reduction. Wageningen University. Netherlands.

Van der Zee, F.P., and Villaverde, S. 2005. Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes-A short review of bioreactor studies.Water Research 39: 1425-1440.

Vandevivere, P.C., Bianchi, R., and Verstraete, W. 1998. Review: Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: Review of emerging technologies. Journal of Chemical Technology & Biotechnology 72: 289-302.

Wang, H., Zheng, X.-W., Su, J.-Q., Tian, Y., Xiong, X.-J., and Zheng, T.-L. 2009. Biological decolorization of the reactive dyes Reactive Black 5 by a novel isolated bacterial strain *Enterobacter sp. EC3*. Journal of Hazardous Materials 171: 654-659.

Yasar, S., Cirik, K., and Cinar, O. 2012. The effect of cyclic anaerobic–aerobic conditions on biodegradation of azo dyes. Bioprocess and Biosystems Engineering 35: 449-457.

You, S.J., Damodar, R.A., and Hou, S.C. 2010. Degradation of Reactive Black 5 dye using anaerobic/aerobic membrane bioreactor (MBR) and photochemical membrane reactor. Hazard Mater 15 : 1112-1118.

Zhang, T. C., Fu, Y. C., Bishop, P. L., Kupferle, M., FitzGerald, S., Jiang, H. H., and Harmer, C. 1995. Transport and biodegradation of toxic organics in biofilms. Journal of Hazardous Materials 41: 267-285.

Zhou, T., Lim, T.-T., and Wu, X. 2011. Sonophotolytic degradation of azo dye reactive black 5 in an ultrasound/UV/ferric system and the roles of different organic ligands. Water Research 45: 2915-2924.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

1. ข้อมูลดิบจากการทดลอง

1.1 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมไดอะโซในน้ำเสียที่ความเข้มข้นสีต่างกัน

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน

ความเข้มข้นสี (มก/ล)	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มสี (มก/ล)			ความเข้มสี (ADMI)			ซีโอดี (มก/ล)		
		IN	AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
Pre-treatment	1	96.8	17.3	16.9	7385	1305	1135	1043	98	45
100	4	94.5	18.3	17.0	7245	1201	1226	1058	102	57
	7	93.5	17.6	15.0	7112	1199	1198	1087	87	53
	10	97.6	18.9	17.4	7353	1213	1135	1023	99	48
	13	99.4	19.5	16.2	7537	1279	1223	1038	99	42
	16	96.8	19.1	15.0	7385	1099	1075	1063	89	58
	19	94.6	18.8	16.6	7225	1177	1117	1112	95	60
	22	99.6	19.3	17.4	7575	1198	1041	1084	89	59
	25	95.3	19.1	17.0	7102	1182	1135	1033	86	53
10	27	10.0	17.6	16.2	766	1090	1075	1043	69	49
	29	9.9	10.2	14.3	762	823	1088	1057	43	48
	30	9.9	5.0	8.6	762	423	687	-	-	-
	31	9.9	3.9	6.3	761	324	510	1058	33	41
	33	10.0	2.3	2.6	766	201	207	-	-	-
	34	10.0	2.3	2.3	766	195	187	1087	26	23
	36	9.9	2.1	2.0	762	186	164	1042	26	17
	38	10.0	2.0	1.7	766	187	140	1014	34	22
	40	9.8	2.1	1.7	760	175	141	1017	32	13
	42	10.0	2.0	1.8	766	177	141	1079	26	17
	45	9.9	2.0	1.8	763	170	140	1038	28	13
	48	9.9	1.9	1.8	764	174	140	1023	33	18
25	49	24.2	2.0	1.7	1533	169	141	1035	36	25
	50	24.2	2.5	1.7	1533	228	137	-	-	-
	51	23.7	4.0	2.3	1517	223	142	1038	41	27
	53	23.5	4.9	3.4	1504	297	181	1018	51	15

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน (ต่อ)

ความเข้มข้นสี	ระยะเวลา	ความเข้มสี (มก/ล)			ความเข้มสี (ADMI)			ซีโอดี (มก/ล)		
(มก/ล)	(วัน)	IN	AF	TF	IN	IN	IN	IN	AF	TF
	55	24.0	4.7	3.8	1544	420	292	1084	45	18
	57	23.4	4.9	3.9	1508	400	328	1080	36	15
	59	23.1	5.1	3.9	1456	425	336	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	1043	35	13
	61	23.0	5.0	4.0	1586	432	354	-	-	-
	63	23.0	5.1	4.1	1524	439	354	1023	33	19
	66	22.6	5.1	4.0	1528	449	355	1038	27	23
	69	23.6	4.9	4.1	1529	456	354	1087	29	21
50	71	44.9	5.5	3.9	2249	463	350	1038	35	20
	73	44.5	8.4	5.1	2244	752	465	1063	37	49
	75	45.7	10.4	7.2	2299	874	590	1072	61	38
	77	46.2	10.6	8.2	2259	850	627	1079	54	48
	79	46.6	9.9	8.9	2269	873	737	1072	37	41
	81	46.6	10.0	9.0	2244	859	740	1042	51	43
	83	45.0	10.8	8.5	2257	869	680	1080	52	43
	85	46.1	10.3	7.7	2151	893	605	1068	49	42
	88	46.7	9.5	7.8	2235	886	663	1072	53	35
	91	45.5	9.6	8.3	2263	863	681	1088	52	30
	94	45.9	10.2	8.3	2206	872	658	1078	48	30
100	96	96.6	10.8	8.4	7337	893	679	1072	55	35
	98	98.5	17.0	10.9	7380	943	758	1140	88	35
	99	98.5	19.5	13.6	7380	1326	895	1140	93	43
	100	94.5	20.6	15.5	7243	1442	1070	1062	91	41
	102	99.4	21.1	17.7	7564	1523	1195	1130	93	41
	105	100	21.8	17.2	7473	1538	1343	1072	88	35

เมื่อ IN คือ ก่อนเข้าระบบ AF คือ หลังถังกรองไร้อากาศ TF คือ หลังถังโปรยกรอง

- คือ ไม่มีการบันทึกข้อมูล

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก/ล)	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มสี (มก/ล)			ความเข้มสี (ADMI)			ซีโอดี (มก/ล)		
		IN	AF	TF	IN	IN	IN	IN	AF	TF
	109	94.8	21.9	18.5	7519	1542	1367	1140	83	43
	112	98.2	21.7	17.5	7522	1548	1347	1062	83	41
	115	95.4	22.4	17.9	7529	1561	1273	1130	91	42
	118	98.2	20.1	17.4	7834	1424	1243	1118	80	43
	120	97.8	22.8	18.2	7834	1546	1344	1035	77	39
200	121	183	21.6	17.0	12790	1600	1371	1173	79	40
	122	183	25.7	18.6	12790	1701	1344	1173	97	53
	123	183	35.5	22.8	12568	2065	1562	1118	203	66
	125	187	41.2	31.4	12799	2231	1967	1120	246	67
	126	187	41.8	33.6	12799	2219	2041	1120	275	71
	127	185	42.1	35.3	12300	2280	2070	-	-	-
	128	-	-	-	-	-	-	1200	412	111
	129	182	40.8	36.0	12529	2203	2142	-	-	-
	130	-	-	-	-	-	-	1145	403	119
	131	183	42.6	37.1	12536	2333	2172	1163	376	
	133	-	-	-	-	-	-	1130	387	104
	134	188	41.7	37.0	12235	2300	2174	-	-	-
	135	-	-	-	-	-	-	1100	351	70
	137	189	43.6	37.1	12560	2290	2173	1170	320	68
	140	188	42.1	37.1	12783	2249	2174	1217	225	62
	143	189	41.9	35.2	12956	2226	2097	1137	195	63
	145	190	42.6	35.2	12907	2241	2042	1178	180	59
	149	190	40.8	33.3	12967	2187	2082	1100	135	67
	153	188	40.8	34.3	12681	2156	2153	1160	140	64
	157	192	40.9	35.5	13162	2143	2154	1130	146	56

ตารางที่ ก-2 พีเอชและปริมาณของแข็งแขวนลอยจากการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน

ความเข้มข้นสี (มก/ล)	**ระยะเวลา (วัน)**	**พีเอช**			**ของแข็งแขวนลอย (มก/ล)**	
		IN	**AF**	**TF**	**AF**	**TF**
Pre-treatment	1	8.3	7.2	9.1	33.3	53.3
100	4	8.3	7.3	9.2	50.0	36.7
	7	8.3	7.3	9.3	46.7	33.3
	10	8.2	7.2	9.2	52.0	60.0
	13	8.3	7.1	9.1	47.3	51.0
	16	8.2	7.2	9.1	26.7	45.0
	19	8.3	7.4	9.3	50.0	40.3
	22	8.3	7.3	9.3	18.7	52.7
	25	8.3	7.3	9.2	36.7	56.7
10	1	8.3	7.5	9.3	50.7	63.3
	5	8.3	7.1	9.3	36.7	37.3
	8	8.3	7.3	9.3	52.6	46.7
	12	8.4	7.2	9.4	54.5	76.7
	16	8.4	7.3	9.4	40.0	43.3
	19	8.4	7.3	9.3	54.3	61.7
	22	8.3	7.4	9.2	23.3	70.0
25	3	8.3	7.2	9.3	46.7	113.3
	5	8.4	7.4	9.2	34.0	40.0
	8	8.4	7.1	9.3	36.7	61.3
	13	8.3	7.0	9.2	56.7	53.3
	15	8.3	7.2	9.2	59.7	40.0
	18	8.4	7.4	9.3	52.7	59.3
	21	8.3	7.4	9.2	44.0	62.0
50	3	8.3	7.3	9.4	37.0	46.3
	7	**8.3**	7	**9.3**	52.5	52.0
	11	8.2	7.3	9.2	76.7	60.0
	15	8.4	7.4	9.1	46.7	40.0

ตารางที่ ก-2 พีเอชและปริมาณของแข็งแขวนลอยจากการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน (ต่อ)

ความเข้มข้นสี	**ระยะเวลา**	**พีเอช**			**ของแข็งแขวนลอย (มก/ล)**	
(มก/ล)	**(วัน)**	**IN**	**AF**	**TF**	**AF**	**TF**
	18	8.2	7.2	9.1	73.3	43.3
	21	8.3	7.3	9.3	43.3	43.3
	24	8.3	7.3	9.2	33.3	36.7
100	1	8.4	7.3	9.3	36.7	40.0
	4	8.4	7.1	9.3	43.3	76.7
	7	8.3	7.2	9.2	36.7	46.7
	10	8.2	7.1	9.2	53.3	40.0
	14	8.3	7.2	9.4	86.7	53.3
	17	8.3	7.4	9.4	100.0	76.7
	20	8.3	7.3	9.3	60.0	53.3
	23	8.4	7.4	9.2	30.0	50.0
	25	8.2	7.3	9.3	40.0	56.7
200	2	8.3	7.2	9.2	76.7	36.7
	5	8.2	7	9.2	55.0	60.0
	9	8.4	6.8	9.1	60.0	10.0
	14	8.3	7	9.2	106.7	56.7
	17	8.2	7.1	9.2	46.7	36.7
	20	8.4	7.3	9.3	50.0	56.7
	23	8.3	7.4	9.3	66.7	36.7
	25	8.3	7.2	9.2	76.7	76.7
	29	8.2	7.4	9.1	70.0	58.3
	33	8.2	7.3	9.2	50.0	50.0
	37	8.3	7.4	9.3	51.7	40.0

เมื่อ IN คือ ก่อนเข้าระบบ AF คือ หลังถังกรองไร้อากาศ TF คือ หลังถังโปรยกรอง

- คือ ไม่มีการบันทึกข้อมูล

1.2 ประสิทธิภาพของการกำจัดสีย้อมโมโนอะโซในน้ำเสียที่ความเข้มข้นสีต่างกัน

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน

ความเข้มข้นสี	ระยะเวลา	ความเข้มสี (มก/ล)			ความเข้มสี (ADMI)			ซีโอดี (มก/ล)		
(มก/ล)	(วัน)	IN	AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
10	2	11.5	0.00	0.00	499	0	0	1074	15.6	9.02
	4	10.8	0.40	0.77	462	65.4	100	1013	23.6	5.90
	7	11.2	0.34	0.62	485	71.5	91.3	1003	25.9	6.89
	9	10.8	0.40	0.65	440	100	86.1	1034	30.8	11.6
	11	11.1	0.46	0.55	478	53.8	87.1	1013	33.8	14.8
	13	11.1	0.43	0.58	506	62.8	88.8	1110	29.5	14.2
	15	11.4	0.46	0.58	511	56.1	80.8	1119	31.3	14.2
	17	10.8	0.43	0.55	498	59.2	92.3	1100	29.9	13.3
25	19	26.6	0.49	0.58	1052	61.4	78.3	1129	28.5	20.9
	21	26.0	0.52	0.74	1160	98.1	103	1088	29.8	29.0
	23	26.3	0.43	0.86	1152	97.7	120	1027	36.9	23.7
	25	26.9	0.62	0.95	1167	104	133	1079	29.0	25.4
	17	26.0	0.68	0.98	1141	112	138	1076	29.8	23.5
	29	26.0	0.68	0.92	1145	117	137	1083	27.1	20.7
	31	26.2	0.68	0.98	1146	111	140	1074	32.1	24.8
	33	26.8	0.71	0.98	1185	108	143	1086	33.6	25.0
	35	27.1	0.74	0.98	1176	108	146	1086	33.0	24.9
50	37	45.2	0.87	1.17	2000	134	150	1010	32.1	38.5
	39	45.2	0.89	1.37	2000	140	195	1060	35.6	34.0
	41	45.3	0.92	1.48	2007	153	203	1090	45.7	36.9
	43	45.3	0.98	1.63	2007	155	202	1090	41.6	35.2
	45	45.2	1.32	1.57	2000	158	201	1094	44.8	35.3
	47	45.3	1.51	1.63	2007	161	200	1010	41.9	34.9
	49	45.3	1.57	1.78	2007	168	202	1074	44.0	35.3
	51	45.4	1.63	1.82	2010	177	200	1156	44.8	34.0

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก/ล)	**ระยะเวลา (วัน)**	**ความเข้มสี (มก/ล)**			**ความเข้มสี (ADMI)**			**ซีโอดี (มก/ล)**		
		IN	**AF**	**TF**	**IN**	**AF**	**TF**	**IN**	**AF**	**TF**
	53	45.6	1.60	1.78	2020	181	201	1083	45.6	35.9
	55	45.7	1.63	1.82	2024	180	210	1074	44.7	34.3
100	57	100.8	1.97	2.68	4460	227	378	1200	80.0	55.1
	59	100.8	2.71	2.86	4460	320	464	1156	122.7	59.8
	61	101.0	2.65	2.95	4470	317	390	1173	122.7	57.5
	63	99.1	3.05	2.86	4385	405	369	1139	116.3	58.9
	65	101.5	3.26	2.92	4490	433	376	1155	122.9	63.0
	67	99.1	2.89	3.02	4385	383	440	1149	126.3	58.1
	69	99.2	2.92	3.08	4389	376	441	1110	121.0	55.3
	71	99.2	2.89	3.11	4389	358	443	1160	127.5	57.2
	73	99.1	2.89	3.05	4385	365	432	1079	125.3	57.5
	75	99.2	2.95	3.08	4389	379	440	1156	122.9	54.9
200	77	197	2.95	3.63	8727	441	465	1102	134.9	51.1
	79	197	3.60	4.40	8700	662	564	1083	119.0	57.2
	81	197	3.63	4.40	8703	656	564	1121	124.1	79.7
	83	198	3.75	5.52	8744	662	708	1140	157.5	74.9
	85	198	3.75	6.77	8751	725	908	1099	153.0	87.5
	87	198	3.63	7.11	8778	785	945	1116	150.3	83.0
	89	198	3.57	8.15	8747	754	929	1134	157.4	78.0
	91	198	3.51	8.03	8747	747	984	1152	155.3	85.2
	93	198	3.60	8.71	8778	693	1016	1121	152.9	81.2
	95	198	3.63	8.86	8774	705	1027	1142	156.5	81.2
	97	198	3.69	8.71	8778	711	1037	1138	157.7	87.6

เมื่อ IN คือ ค่าก่อนเข้าระบบ AF คือ ค่าหลังถังกรองไร้อากาศ TF คือ ค่าหลังถังโปรยกรอง

ตารางที่ ก-4 พีเอชและปริมาณของแข็งแขวนลอยจากการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน

ความเข้มข้นสี (มก/ล)	**ระยะเวลา (วัน)**	**พีเอช**			**ของแข็งแขวนลอย (มก/ล)**	
		IN	**AF**	**TF**	**AF**	**TF**
10	2	8.3	7.5	9.2	46.7	40.0
	4	8.4	7.6	9.3	36.7	40.0
	7	8.3	7.3	9.2	43.3	43.3
	9	8.5	7.4	9.2	50.0	43.3
	11	8.4	7.5	9.3	33.3	36.7
	13	-	-	-	36.7	40.0
	15	8.4	7.6	9.3	-	-
	17	-	-	-	36.7	66.7
	19	8.3	7.6	9.3	30.0	40.0
25	21	8.2	7.5	9.3	36.7	46.7
	23	8.3	7.4	9.2	43.3	50.0
	25	8.3	7.3	9.3	36.7	40.0
	17	8.2	7.3	9.2	33.3	50.0
	29	-	-	-	50.0	53.3
	31	8.4	7.5	9.3	100	76.7
	33	-	-	-	60.0	53.3
	35	8.3	7.5	9.2	36.7	53.3
	37	8.4	7.6	9.2	30.0	50.0
50	39	8.3	7.5	9.3	40.0	56.7
	41	8.2	7.3	9.2	76.7	36.7
	43	8.3	7.2	9.1	53.3	56.7
	45	8.3	7.3	9.2	56.7	36.7
	47	8.3	7.3	9.2	50.0	50.0
	49	8.3	7.4	9.3	26.7	100.0
	51	8.2	7.5	9.2	46.7	43.3
	53	-	-	-	50.0	70.0

ตารางที่ ก-4 พีเอชและปริมาณของแข็งแขวนลอยจากการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นสีต่างกัน (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก/ล)	**ระยะเวลา (วัน)**	**พีเอช**			**ของแข็งแขวนลอย (มก/ล)**	
		IN	**AF**	**TF**	**AF**	**TF**
	55	8.3	7.6	9.2	36.7	63.3
100	57	8.2	7.5	9.2	50.0	56.7
	59	8.4	7.1	9.1	53.3	73.3
	61	8.3	7.2	9.2	80.0	73.3
	63	8.2	7.2	9.1	60.0	76.7
	65	8.3	7.3	9.3	73.3	60.0
	67	8.3	7.4	9.2	33.3	50.0
	69	8.3	7.3	9.3	56.7	93.3
	71	8.4	7.5	9.3	46.7	46.7
	73	8.3	7.6	9.2	53.3	86.7
	75	8.4	7.5	9.3	50.0	46.7
200	77	8.4	7.6	9.2	46.7	53.3
	79	8.3	7.2	9.1	76.7	70.0
	81	8.4	6.9	9.2	70.0	70.0
	83	8.2	7.1	9.1	83.3	76.7
	85	8.3	7.1	9.2	70.0	73.3
	87	8.4	7.2	9.3	63.3	66.7
	89	8.3	7.3	9.2	63.3	63.3
	91	8.3	7.5	9.3	50.0	113
	93	8.3	7.5	9.3	63.3	70.0
	95	8.3	7.6	9.3	36.7	46.7
	97	8.4	7.5	9.3	40.0	53.3

เมื่อ IN คือ ก่อนเข้าระบบ AF คือ หลังถังกรองไร้อากาศ TF คือ หลังถังโปรยกรอง

- คือ ไม่มีการบันทึกข้อมูล

1.3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟ เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงาน

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสี100 มก/ล เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงาน ที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 1,000 มก/ล

ระยะเวลา	ความเข้มสี (มก/ล)			ความเข้มสี (ADMI)			ซีโอดี (มก/ล)		
(วัน)	IN	AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
1	100	0.15	0.12	7692	48.9	41.7	935	29.6	22.9
3	98.5	3.05	0.52	7548	257	48.7	1090	33.4	27.7
4	98.5	6.22	2.03	7548	520	233	1079	38.2	46.8
5	102	7.82	3.32	7824	628	289	1018	50.6	37.2
7	102	15.5	11.1	7954	1177	884	997	62.0	33.4
9	98.8	16.2	15.3	-	1400	1260	1079	69.7	57.3
11	102	19.1	16.7	7777	1229	1256	1038	102.1	45.8
13	104	19.0	17.4	8140	1394	1289	987	103.1	55.3
15	102	20.2	17.8	7874	1451	1317	946	91.6	61.1
17	99.1	20.9	18.7	7720	1512	1388	966	93.5	61.1
18	102	21.6	19.1	7910	1459	1403	1090	101.2	51.5
21	96.6	21.7	18.6	7301	1508	1372	1048	58.6	25.7
23	-	-	-	-	-	-	1007	50.4	18.5
25	98.2	21.6	17.4	7121	1514	1316	1069	57.6	20.6
26	98.2	21.5	18.1	7121	1508	1371	1069	57.6	20.6
29	99.1	20.6	18.4	7209	1498	1342	1090	61.7	24.7
31	101	21.5	18.4	7482	1496	1343	987	56.5	20.6
33	98.5	21.7	18.4	7529	1527	1361	1007	58.6	22.6

เมื่อ IN คือ ก่อนเข้าระบบ AF คือ หลังถังกรองไร้อากาศ TF คือ หลังถังโปรยกรอง

- คือ ไม่มีการบันทึกข้อมูล

ตารางที่ ก-6 พีเอชและปริมาณของแข็งแขวนลอยจากการทดลองการกำจัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสี100 มก/ล เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน ที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 1,000 มก/ล

ระยะเวลา	พีเอช			ของแข็งแขวนลอย (มก/ล)	
(วัน)	IN	AF	TF	AF	TF
1	8.4	7.6	9.4	30.0	20.0
3	8.3	7.5	9.4	23.3	36.7
5	8.3	7.3	9.3	26.7	26.7
7	8.3	7.4	9.3	16.7	33.3
9	8.3	7.6	9.3	36.7	36.7
13	8.3	7.6	9.2	13.3	40.0
17	8.4	7.5	9.3	40.0	13.3
19	8.4	7.4	9.3	26.7	23.3
21	8.4	7.5	9.2	16.7	36.7
25	8.4	7.6	9.4	13.3	10.0
29	8.2	7.6	9.2	40.0	46.7
31	8.4	7.5	9.3	23.3	20.0
33	8.4	7.6	9.2	16.7	20.0

ภาคผนวก ข

รายการคำนวณ

ข-1 การคำนวณเซลล์ที่เกิดขึ้นและเซลล์ที่หลุดออกจากระบบถังกรองไร้อากาศในรูปของปริมาณของแข็งแขวนลอย

ยกตัวอย่างการคำนวณเซลล์ที่เกิดขึ้นเทียบกับเซลล์ที่หลุดออกไปในช่วงวันที่ 25 ของการเริ่มต้นระบบ

ข้อมูล ซีโอดีน้ำเข้า 1,033 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอดีน้ำออกจากระบบถังกรองไร้อากาศ 86 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตะกอนแขวนลอย 36.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ 12 ลิตรต่อวัน และค่ายิลด์ของระบบไร้อากาศ อยู่ในช่วง 0.06 – 0.10 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมซีโอดี (Metcalf และ Eddy, 2003) ในที่นี้เลือกใช้ 0.08 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมซีโอดี ในการคำนวณ

จาก $$Y = \frac{\text{เซลล์ที่เกิดขึ้นในระบบ}}{\text{ซีโอดีที่ถูกจุลินทรีย์ใช้ไป}}$$

จะได้

เซลล์ที่เกิดขึ้นในระบบ = Y × ซีโอดีที่ถูกจุลินทรีย์ใช้ไป

= (0.08 กรัมวีเอสเอสต่อกรัมซีโอดี) × (1,033 - 86) × (12 ลิตร/วัน) × (1 กรัม/1,000 มิลลิกรัม)

= 0.91 กรัมเซลล์ที่เกิดขึ้นในระบบต่อวัน

เซลล์ที่หลุดออกจากระบบ = ปริมาณตะกอนแขวนลอย × น้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ

= (36.7 มิลลิกรัมต่อลิตร) × (12 ลิตร/วัน) × (1 กรัม/1,000 มิลลิกรัม)

= 0.44 กรัมต่อวัน

ดังนั้น เซลล์ที่เกิดขึ้นในระบบถังกรองไร้อากาศมีค่ามากกว่าปริมาณเซลล์ที่หลุดออกจากระบบ

ข-2 ตัวอย่างการคำนวณค่าซีโอดี

การคำนวณความเข้มข้นเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต (FAS)

$$\text{FAS} = \frac{0.1 \times 0.3}{\text{ปริมาณ } FAS \text{ ที่ใช้ในการไตเตรท}}$$

การคำนวณค่าซีโอดี

$$\text{ค่าซีโอดี} = \frac{8{,}000 \times \text{FAS} \times (\text{Blank} - \text{Example})}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

โดย

FAS คือ ความเข้มข้นเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต

Blank คือ ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์

Example คือ ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง

ปริมาณ FAS ที่ไตเตรทเพื่อหา FAS 13.1 มิลลิลิตร ปริมาณ FAS ที่ไตรเตรท Blank 12.9 มิลลิลิตร ปริมาณ FAS ที่ไตรเตรทน้ำเสียสังเคราะห์ 7.26 มิลลิลิตร

$$\text{FAS} = \frac{0.1 \times 0.3}{13.1}$$

$$= 0.023$$

$$\text{ซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์} = \frac{8{,}000 \times 0.023 \times (12.9 - 7.26)}{1 \text{ มิลลิลิตร}}$$

$$= 1{,}033 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ข-3 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพและอัตราการบำบัด

ประสิทธิภาพและอัตราการบำบัดซีโอดี

ยกตัวอย่างการคำนวณในช่วงวันที่ 25 ของการเริ่มต้นระบบ

ข้อมูล ซีโอดีน้ำเข้า 1,033 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอดีน้ำออกจากระบบถังกรองไร้อากาศ 86 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีโอดีน้ำออกจากระบบโปรยกรอง 53 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ 12 ลิตรต่อวัน ปริมาตรตัวกลางในระบบโปรยกรอง 0.030 ลูกบาศก์เมตร

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบ AF/TF (ร้อยละ)

$$= \frac{(1{,}033 - 53) \times 100}{1{,}033}$$

$$= 94.87\ \%$$

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบ AF (ร้อยละ)

$$= \frac{(1{,}033 - 86) \times 100}{1{,}033}$$

$$= 91.67\ \%$$

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบ TF (ร้อยละ)

$$= \frac{(86 - 53) \times 100}{86}$$

$$= 38.37\ \%$$

อัตราการบำบัดซีโอดีของระบบ AF (ความเข้มข้นต่อลิตรต่อวัน)

$$= \frac{(1{,}033 - 86)}{2}$$

= 473.5 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน

อัตราการบำบัดซีโอดีของระบบ TF (ความเข้มข้นต่อลิตรต่อวัน)

$$= \frac{(86 - 53\ \text{มก/ล}) \times 12\ \text{ล/ว}}{0.030\ \text{ลบ.ม}} \times \frac{(1\ \text{ลบ.ม.})}{1000\ \text{ล}}$$

= 13.2 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน

ข-4 ตัวอย่างการคำนวณความเข้มสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

การคำนวณค่าความเข้มสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อมูล วัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่าง 0.324

จากกราฟมาตรฐานสีรีแอกทีฟแบล็ค 5

$$Y = 0.0326\,X$$

$$X = \frac{Y}{0.0326}$$

$$= \frac{0.324}{0.0326}$$

$$= 9.94 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

เมื่อ Y คือ ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นแสง 597 นาโนเมตร

X คือ ความเข้มสีรีแอกทีฟแบล็ค 5

ตารางที่ ข-1 ตารางการคำนวณค่า CIE Tristimulus ในการคำนวณหาหน่วยสีเอดีเอมไอ

Wavelength	%T	X	Y	Z

(nm)		Factor	%T x Fact.	Factor	%T x Fact.	Factor	%T x Fact.
700		0.00156		0.00056		0	
690		0.00171		0.00062		0	
680		0.00369		0.00134		0	
670		0.00708		0.00259		0	
660		0.01361		0.00504		0	
650		0.02349		0.00886		0	
640		0.03693		0.01443		0	
630		0.05309		0.02190		0	
620		0.07070		0.03153		0.00002	
610		0.08325		0.04176		0.00002	
600		0.08949		0.05316		0.00007	
590		0.08984		0.06627		0.00010	
580		0.08417		0.07992		0.00016	
570		0.07322		0.09147		0.00020	
560		0.05880		0.09841		0.00039	
550		0.04282		0.09832		0.00086	
540		0.02785		0.09149		0.00195	
530		0.01523		0.07934		0.00388	
520		0.00576		0.06462		0.00712	
510		0.00089		0.04833		0.01520	
500		0.00052		0.03401		0.02864	
490		0.00363		0.02358		0.05274	
480		0.01112		0.01618		0.09461	
470		0.02272		0.01058		0.14972	
460		0.03362		0.00694		0.19299	
450		0.03915		0.00443		0.20638	
440		0.03975		0.00262		0.19938	
430		0.02997		0.00122		0.14628	
420		0.01238		0.00037		0.05949	
410		0.00329		0.00009		0.01570	
400		0.00108		0.00002		0.00513	
		X SUM =		Y SUM =		Z Sum =	

ตัวอย่างโปรแกรมการคำนวณหาค่า V_x, V_y, V_z และค่าเอดีเอมไอ โดยโปรแกรมQuickBasic

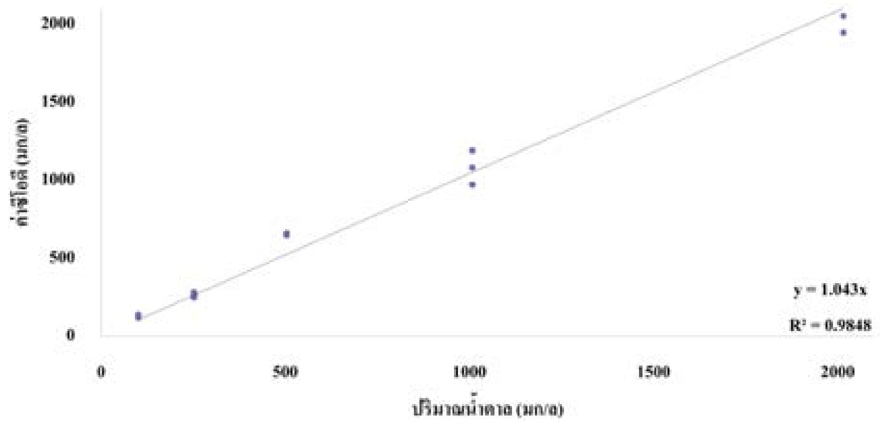
10 INPUT “X=”,x

```
11 INPUT “Y=”,y
12 INPUT “Z=”,z
15 u = 1
16 v = 1
17 w = 1
20 IF x = 0 THEN
        END
25 ELSE
        GOTO 40
27 END IF
35 u = u + .001
40 c = .98071 * (1.2219 * u – 0.23111 * u ^ 2 + 0.23951 * u ^ 3 – 0.021009 * u ^ 4 +
      0.0008404 * u ^ 5)
50 d = INT(c)
60 e = (c – d) * 1000
70 f = INT (e)
80 g = f / 1000
90 h = d + g
100 IF h < x THEN
        GOTO 35
110 ELSE GOTO 130
120 END IF
130 PRINT u, c
140 v = v = 0.001
150 i = (1.2219 * v – 0.23111 * v ^ 2 + 0.23951 * v ^ 3 – 0.021009 * v ^ 4 +
      0.0008404 * v ^ 5)
160 j = INT (i)
170 k = (i – j) * 1000
180 l = INT (k)
190 m = l / 1000
```

```
200 n = j + m
300 IF n < y THEN
        GOTO 140
310 ELSE
        GOTO 320
315 END IF
320 PRINT v, i
330 w = w + .001
340 o = 1.181032 * (1.2219 * w – 0.23111 * w ^ 2 + 0.23951 * w ^ 3 – 0.021009 * w ^ 4 +
        0.008404 * w ^ 5)
350 p = INT (o)
360 q = (o – p) * 1000
370 r = INT (q)
380 s = r / 1000
390 t = p + s
400 IF t < z THEN
        GOTO 330
410 ELSE
        GOTO 430
420 END IF
430 PRINT w, o
440 a = ((.23 * (9.902 – v)) ^ 2 + (v – u - .002) ^ 2 + (.4 * (w – v - .008)) ^ 2) ^ .5
450 b = 1338.858 * a
455 PRINT "DE=", a
460 PRINT "ADMI=", b
470 GOTO 10
1000 END
```

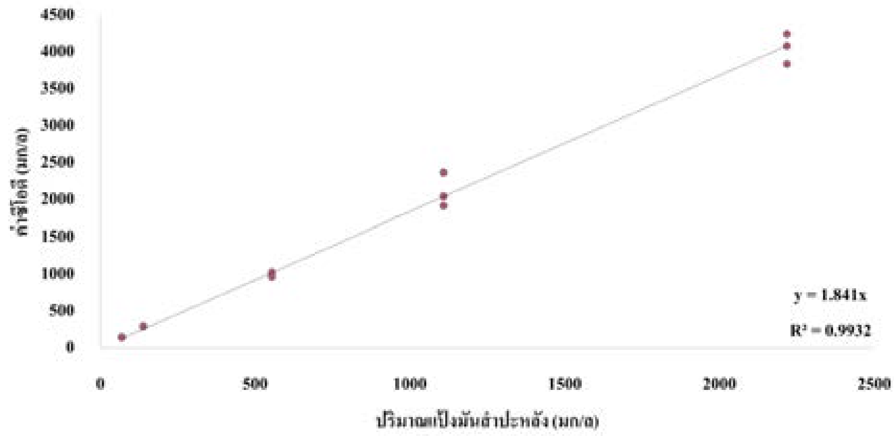
ภาคผนวก ค
กราฟมาตรฐาน

1. **กราฟมาตรฐานค่าซีโอดีของน้ำตาลทราย**

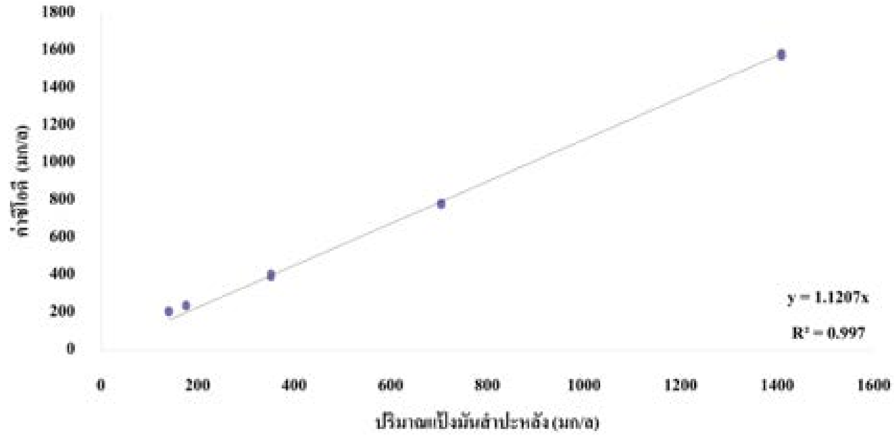


ภาพที่ ค-1 ปริมาณน้ำตาลทรายเทียบกับค่าซีโอดี

2. **กราฟมาตรฐานค่าซีโอดีของแป้งมันสำปะหลัง**

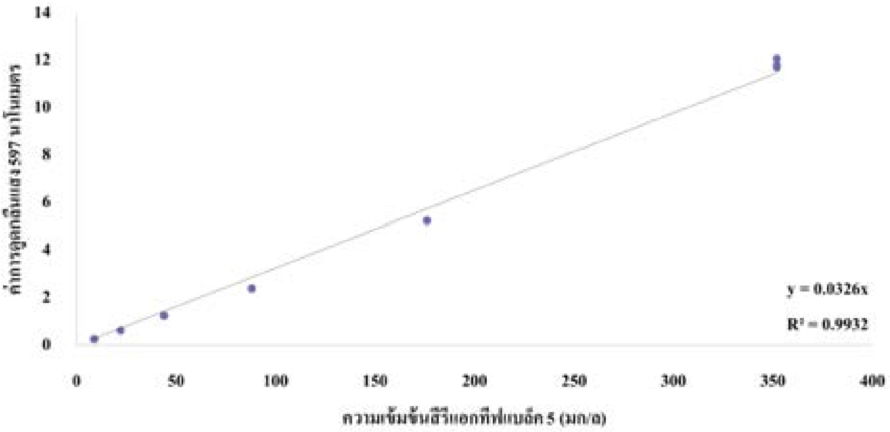


ภาพที่ ค-2 ปริมาณแป้งมันสำปะหลังเทียบกับค่าซีโอดี

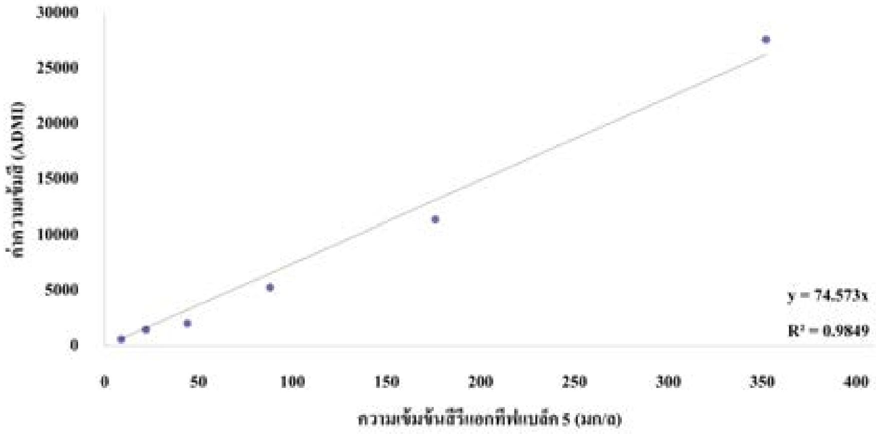


ภาพที่ ค-3 ปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนเทียบกับค่าซีโอดี

3. กราฟมาตรฐานสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5

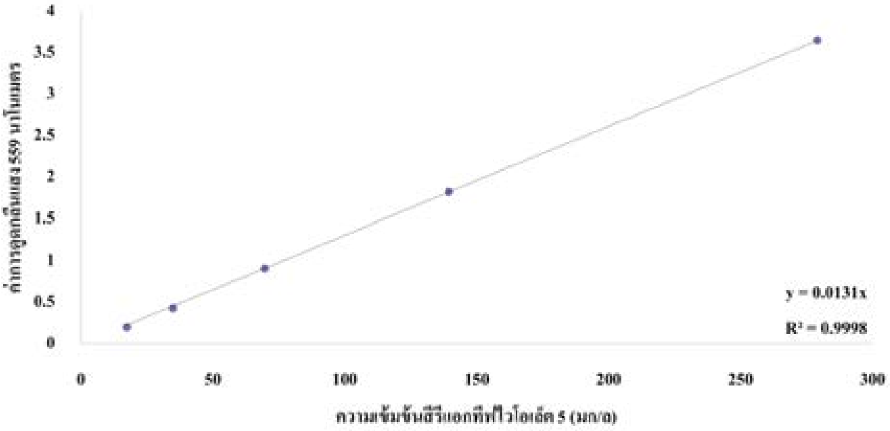


ภาพที่ ค-4 ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีที่ความยาวคลื่นแสง 597 นาโนเมตร

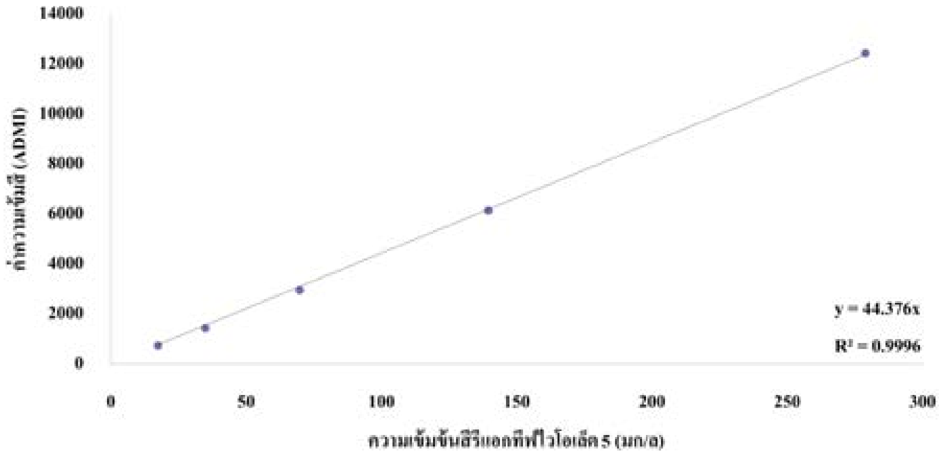


ภาพที่ ค-5 ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 เทียบกับค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ

4. กราฟมาตรฐานสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5



ภาพที่ ค-6 ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีที่ความยาวคลื่นแสง 559 นาโนเมตร



ภาพที่ ค-7 ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เทียบกับค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอมไอ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนภาจรี แสงสิงห์ เกิดวันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมื่อปีการศึกษา 2553 หลังสำเร็จการศึกษา ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

เข้าร่วมการประชุมและนำเสนอผลงานวิชาการ ในโอกาสครบรอบ 25 ปี วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ และการประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ประจำปีการศึกษา 2556 ณ มหาวิทยาลัยรังสิต ในวันที่ 17 ตุลาคม 2556 ในหัวข้อเรื่อง จลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีรีแอกทีฟโดยถังปฏิกิริยาฟิล์มชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ