การส่งเสริมการย่อยสลายของสีรีแอกทีฟไดอะโซ โดยระบบ
ฟิล์มชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ

นายบัญชา บุญอนันต์วงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

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.

Enhanced Degradation of Reactive Diazo Dyes

by Anaerobic - Aerobic Biofilm Process

Mr. Bancha Boonananwong

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การส่งเสริมการย่อยสลายของสีรีแอกทีฟไดอะโซโดยระบบฟิล์มชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ
โดย	นายบัญชา บุญอนันต์วงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร)

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

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี)

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

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ขจรศักดิ์ โกศลมนตรี)

บัญชา บุญอนันต์วงศ์ : การส่งเสริมการย่อยสลายของสีรีแอกทีฟไดอะโซโดยระบบฟิล์มชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ. (Enhanced Degradation of Reactive diazo dyes by Anaerobic - Aerobic Biofilm Process)
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ศรัณย์ เตชะเสน, 114 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ระบบทางชีวภาพแบบถังกรองไร้อากาศตามด้วยถังโปรยกรอง เดินระบบแบบต่อเนื่องในระดับปฏิบัติการ ตัวกลางที่ใช้ในทั้งสองถังปฏิกิริยาเป็นตัวกลางพลาสติกแบบ Random flow โดยใช้น้ำตาลความเข้มข้น 500 – 20,000 มก/ล เป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์และศึกษาการเวียนน้ำจากถังโปรยกรองกลับเข้าถังกรองไร้อากาศที่อัตรา 0.5 – 5.0 เท่า เพื่อศึกษาสภาวะในการบำบัดสีและค่าซีโอดีที่เหมาะสมที่สุด

จากการทดลองพบว่า สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เกือบทั้งหมดลดลงในขั้นตอนไร้อากาศซึ่งเกิดขึ้นในช่วงการสร้างกรด (Acidogenesis) โดยที่น้ำตาลความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเพียงพอที่ทำให้บำบัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ (75.6%) และสามารถบำบัดค่าซีโอดี (91.5%) ได้จนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ผลการศึกษาพบว่าการลดลงของซีโอดีในถังกรองไร้อากาศเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง โดยมีค่า k_1 คือ 0.311 ต่อวัน และการลดลงของซีโอดีในถังโปรยกรองเป็นปฏิกิริยาโมนอด โดยมีค่า k_m และ k_s คือ 5.479±0.726 กก/ลบ.ม/วัน และ 1.009±0.339 กก./ลบ.ม ตามลำดับ ส่วนการลดลงของสีในถังกรองไร้อากาศเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์โดยมีค่าอัตราการบำบัดคือ 37±1.5 มก/ล/วัน ผลการศึกษาการเวียนน้ำกลับเข้าถังกรองไร้อากาศพบว่า ไม่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีแต่สามารถลดการใช้ปริมาณด่างลงได้ถึง 53.3% ที่อัตราการเวียนน้ำ 5.0 เท่า ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ - เติมอากาศแบบมีตัวกลาง สามารถบำบัดสีและค่าซีโอดีที่ย่อยสลายยากได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอาจนำไปปรับใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมได้

ภาควิชา ....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.... ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา ....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....
ปีการศึกษา ....2554..........

5170360921 : MAJOR Environmental Engineering
KEYWORDS : Anaerobic-Aerobic Process / Biological Color Removal / Trickling filter / Biofiltration

BANCHA BOONANANWONG : ENHANCED DEGRADATION OF REACTIVE DIAZO DYES BY ANAEROBIC – AEROBIC BIOFILM PROCESS.
ADVISOR: ASST.PROF. SARUN TEJASEN, Ph.D., 114 pp.

This research studied a biological process using anaerobic filter (AF) and trickling filter (TF), continuously treat a synthetic color wastewater having a Reactive Black 5 at 100 mg/L in lab scale reactors. Random flow plastic media was used in both reactors with sugar concentrations of 500 - 20,000 mg/L as an electron donor. Recirculation rate of 0.5-5.0 times from effluent to AF were also studied for the most appropriate condition in treating both color and COD.

Results were found that most color was reduced during acidogenesis process in anaerobic treatment. Concentrations of COD 500 mg/L was enough for efficiently treating color (75.6%) and COD was reduced to meet disposal standards (91.5% removal). Reduction of COD in AF followed first-order kinetic, having k_1 of 0.311 d^{-1}, while reduction of COD in TF followed Monod's kinetic, having k_m of 5.479±0.726 kg/m^3/d and k_s of 1.009±0.339 kg/m^3 And reduction of color in AF was zero-order kinetic having removal rate of 37±1.5 mg/l/d. Recirculation effluent to AF did not improve color and COD removal efficiency but can reduced alkalinity addition up to 53.3% at 5.0 times recirculation rate. Results showed that a biological anaerobic-aerobic process using attached growth reactors can treat color and recalcitrance COD effectively and could be adapted for industrial usage.

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

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

Academic Year: 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา แนะแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี ผู้ช่วยศาสตรจารย์.ดร.ชัยพร ภู่ประเสริฐ และ ดร.ขจรศักดิ์ โกศลมนตรี ที่ได้ให้คำปรึกษาจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ช่วยให้คำชี้แนะ ให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสาร และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือเสมอมา

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่าน ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบคุณบริษัท Dystar Thai Co.,Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์สีเพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ บริษัท แซนอี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัดที่ให้ความอนุเคราะห์เชื้อจุลชีพเพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ บริษัท อควา นิชิฮาร่า ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวกลางพลาสติก เพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา พี่สาว ซึ่งสนับสนุน ส่งเสริม และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย..	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..	จ
กิตติกรรมประกาศ..	ฉ
สารบัญ..	ช
สารบัญตาราง..	ญ
สารบัญภาพ..	ฏ
บทที่ 1 บทนำ..	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย..	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..	4
2.1 บทนำ..	4
2.2 กระบวนการผลิตสี..	4
2.3 ประเภทของสีย้อม..	6
2.3.1 การจำแนกประเภทสีย้อม..	6
2.4 พันธะอะโซ (Azo Bond)..	13
2.5 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dyes)..	14
2.5.1 โครงสร้างเคมีของสีรีแอกทีฟ..	14
2.6 สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5)..	15
2.7 การบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม..	15
2.7.1 การกำจัดสีด้วยวิธีการทางกายภาพ..	17
2.7.2 การกำจัดสีด้วยวิธีการทางเคมี..	18
2.7.3 การกำจัดสีด้วยวิธีการชีวภาพ..	19
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดสี..	24
2.9 ถังปฏิกิริยาแบบมีตัวกลาง..	24

หน้า

2.9.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศ (Upflow Attached Growth Anaerobic Reactor) 24
2.9.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง (Trickling filter)........................ 26
2.10 งานวิจัยที่ผ่านมา.. 29
2.11 การนำพารามิเตอร์จากเอกสารอ้างอิงมาใช้ในงานวิจัยนี้........................ 31

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.. 35
3.1 แผนการดำเนินการวิจัย.. 35
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.. 35
3.3 วิธีการทดลอง.. 39
3.3.1 การทดลองที่ 1 39
3.3.2 การทดลองที่ 2 43
3.4 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์... 46
3.5 การวัดสี... 47

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.. 48
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง... 48
4.1 การศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหมาะสมต่อการทำให้เกิดการย่อยสลายของสีและค่าซีโอดีที่ย่อยสลายยาก... 48
4.1.1 ค่าซีโอดี (COD)... 48
4.1.2 ค่าสี (Color)... 54
4.1.3 พีเอช (pH).. 61
4.1.4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity).. 62
4.1.5 ค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS)... 63
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบโดยแปรเปลี่ยนอัตราการเวียนน้ำที่เหมาะสมจากถังเติมอากาศกลับเข้าถังไร้อากาศ.................................. 64
4.2.1 ค่าซีโอดี (COD)... 65
4.2.2 ค่าสี (Color)... 67
4.2.3 พีเอช (pH).. 71
4.2.4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity).. 71

หน้า

4.2.5 ค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS)………….……………………………………. 72
4.2.6 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงเนื่องจากการเวียนน้ำกลับ.................................. 79

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ………………………………………… 80
5.1 สรุปผลการวิจัย ……………………………………………………………... 80
5.2 ข้อเสนอแนะ…………………………………………………………………. 81

รายการอ้างอิง……………………………………………………………………….. 82

ภาคผนวก……………………………………………………………………........ 86
ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง………………….………………………………….. 87
ภาคผนวก ข. รายการคำนวณ……………………….………………………….…. 102
ภาคผนวก ค. กราฟมาตรฐาน………………………………………………………. 111

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์………………………………………………………… 114

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์…………………	5
2.2	โครงสร้างทางเคมีของโครโมฟอร์ และออกโซโครมของสีย้อม …………………..	8
2.3	การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพและเคมี และกระบวนการการบำบัดที่ผ่านมา ……………………………………………………………………...	10
2.4	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมด้วยกระบวนการทางเคมีและกายภาพ………………………………………………	16
2.5	รายชื่อแบคทีเรียในงานวิจัยต่างๆ ที่สามารถลดสีได้ ……………………………	21
2.6	การออกแบบระบบบำบัดแบบ Upflow Attached Growth Reactor …………..	25
2.7	การออกแบบระบบบำบัดแบบโปรยกรอง………………………………………..	27
3.1	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในชุดการทดลองที่ 1 ………………………………..……	40
3.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในชุดการทดลองที่ 2 ……………………...…...…………	43
3.3	ความถี่ของพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์……………………………………..	46
4.1	ประสิทธิภาพการบำบัดสีเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ……………………...............	74
4.2	สรุปผลการทดลองของถังกรองไร้อากาศ ถังโปรยกรอง และทั้งระบบ ที่สภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร……………………...................	75
4.3	สรุปผลการทดลองของถังหรองไร้อากาศ ถังโปรยกรอง และทั้งระบบที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า…………………….......................................	77
ก.1	ผลการทดลองการหาซีโอดีที่ 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร…………………..	88
ก.2	ผลการทดลองการการเวียนน้ำที่อัตรา 0.5 – 5 เท่า…………………….........	93
ก.3	ผลการทดลองค่าพีเอช………………………………………………….........	95
ก.4	ผลการทดลองค่าเอ็มแอลเอสเอส………………………………………...........	100
ข.1	ตารางการคำนวณค่า CIE Tristimulus ในการคำนวณหาหน่วยสีเอดีเอ็มไอ …..	107

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตสี..	4
2.2	โครงสร้างของสี Reactive Black 5…………………………………………....	15
2.3	การบำบัดสีอะโซและกลุ่มอะโรมาติกแอมีนของสภาวะแอนแอโรบิก – แอโรบิก..	22
2.4	ถังกรองไร้อากาศแบบไหลจากล่างขึ้นบน ……….…………………………….	25
2.5	ระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง (Trickling filter)………………………...	27
2.6	ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีเทียบกับอัตราภาระสารอินทรีย์………………….	29
3.1	ตัวกลางพลาสติกรุ่น R-190 Random Flow Media ………………………….	37
3.2	ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองที่ใช้ในการทดลอง………..………………....	38
3.3	ขั้นตอนการทดลองเพื่อหาสภาวะซีโอดีเริ่มต้นที่เหมาะสม……………………..	41
3.4	แผนผังสรุปการหาสภาวะซีโอดีเริ่มต้นที่เหมาะสม……………………………....	42
3.5	การหาอัตราการเวียนน้ำที่เหมาะสม…………………………………………….	44
3.6	แผนผังสรุปการหาอัตราการเวียนน้ำที่เหมาะสม………………………………..	45
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีเทียบกับเวลาการทดลอง ………….	50
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของแต่ละสภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร…………………………………………	51
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศเทียบกับซีโอดีน้ำออก………………………………………………………………………....	52
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ของถังกรองไร้อากาศเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี...	52
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดซีโอดีของถังโปรยกรองเทียบกับซีโอดีน้ำออก………………………………………………………………………….	53
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ของถังโปรยกรองเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี..	53
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับระยะเวลา………..	56
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับระยะเวลา………………	57
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับสภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร…	58

ภาพที่ หน้า

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับสภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร………………. 59
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับซีโอดีเริ่มต้น………………………………………………………………………… 60
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับซีโอดีเริ่มต้น………………………………………………………………………… 60
4.13 ค่าพีเอชเทียบกับเวลา…………………………………………………………… 61
4.14 ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ใช้ในแต่ละสภาวะความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 500 -20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร……………………………………………….. 62
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอ็มแอลเอสเอสเทียบกับเวลาการทดลอง…………….. 64
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีเทียบกับระยะเวลาการทดลอง...............…..…. 66
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของแต่ละสภาวะการเวียนน้ำเทียบกับไม่เวียนน้ำ……………………………………………………........ 67
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับระยะเวลาที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า……………………………………………………….. 68
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับระยะเวลาที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่า ………………………………………………………. 69
4.20 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรที่อัตราเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่า……………………………………………………. 70
4.21 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยเอดีเอ็มไอที่อัตราเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่า………………………………………………….…............... 70
4.22 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเทียบกับเวลา…….………………………...... 71
4.23 ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ใช้ในแต่ละอัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่าที่ซีโอดีเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร…………………………………………... 72
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอ็มแอลเอสเอสเทียบกับเวลาการทดลอง…………….. 73
4.25 เปรียบเทียบอัตราการเวียนน้ำกับค่าใช้จ่ายที่ลดลง…………………………….. 79
ค.1 กราฟมาตรฐานน้ำตาลที่ซีโอดี 50 – 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร…………………. 112
ค.2 กราฟมาตรฐานน้ำตาลที่ซีโอดี 1,000 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร……………… 112

ภาพที่ หน้า

ค.3 ปริมาณสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ค่าดูดกลืนแสง.. 113

ค.4 สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับหน่วยเอดีเอ็มไอ........... 113

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมผลิตสีเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้สารเคมีปริมาณมาก น้ำเสียที่เกิดขึ้นมักมีการปนเปื้อนสี ค่าบีโอดีและค่าซีโอดีที่สูงเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจึงต้องทำการบำบัดก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีมีหลากหลายวิธี ปัจจุบันนิยมใช้การใส่สารช่วยตกตะกอน การกรองแบบละเอียด (Micro Filter) และระบบอาร์โอ (Reverse Osmosis) ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพขั้นสูงและการบำบัดทางเคมีที่มีราคาในการบำบัดสูงมาก อีกทั้งยังมีความเปราะบางทางด้านสิ่งแวดล้อมคือสามารถหยุดหรือเดินระบบได้ทุกเมื่อ ดังนั้นการบำบัดทางชีวภาพจึงได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจากสามารถบำบัดน้ำเสียได้โดยมีต้นทุนต่ำกว่ากระบวนการทางเคมีและกายภาพ กระบวนการทางชีวภาพยังเป็นกระบวนการที่ต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องจึงสร้างความมั่นใจและความไว้วางใจให้ชุมชน เนื่องจากสีนับเป็นค่าซีโอดีที่ย่อยสลายยาก (Recalcitrant COD) จึงไม่สามารถย่อยสลายด้วยระบบเติมอากาศทั่วไป โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการชีวภาพแบบไร้อากาศ-เติมอากาศสามารถลดสีและค่าซีโอดีที่ย่อยสลายยากได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสีจะสลายตัวในสภาวะไร้อากาศและซีโอดีถูกย่อยสลายในสภาวะมีอากาศ (Isik และ Sponza, 2008)

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำระบบแบบไร้อากาศ-เติมอากาศแบบมีตัวกลางมาใช้บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีเพราะสามารถลดสีและซีโอดีที่ย่อยสลายยากได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีค่าดำเนินงานต่ำซึ่งเหมาะกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีปริมาณน้ำเสียมาก โดยใช้ระบบไร้อากาศแบบมีตัวกลาง (Anaerobic Filter) ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากสามารถกักเก็บเชื้อจุลินทรีย์ในระบบได้มากและมีการดำเนินระบบที่ง่ายควบคู่กับระบบเติมอากาศชนิดโปรยกรอง (Trickling Filter) ซึ่งมีค่าดำเนินงานที่ต่ำและประหยัดเนื้อที่ งานวิจัยนี้จะใช้น้ำตาลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันเป็นแหล่งพลังงานให้กับเชื้อจุลินทรีย์ และศึกษาอัตราการเวียนน้ำจากระบบโปรยกรองกลับเข้าสู่ถังไร้อากาศเทียบกับประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากการเวียนน้ำสามารถกักเก็บน้ำเสียให้อยู่ในระบบได้นานขึ้นทำให้เพิ่มระยะเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับเชื้อจุลินทรีย์ อีกทั้งยังคืนความเป็นด่างและธาตุอาหารต่าง ๆ กลับสู่ระบบจึงอาจทำให้ระบบสามารถบำบัดสารอินทรีย์และสีได้มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหมาะสมต่อการทำให้เกิดการย่อยสลายของสีและค่าซีโอดีที่ย่อยสลายยาก

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบโดยแปรเปลี่ยนอัตราการเวียนน้ำที่เหมาะสมจากถังเติมอากาศกลับเข้าถังไร้อากาศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ในระดับทดลอง (Pilot Scale) ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของการวิจัยไว้ดังนี้

1.3.1 ถังไร้อากาศแบบมีตัวกลางใช้ท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 1 เมตร

1.3.2 ถังเติมอากาศชนิดโปรยกรองใช้ท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร มีความสูงตัวกลางเท่ากับ 1 เมตร โดยมีท่อให้อากาศตรงกลางของถังปฏิกิริยา

1.3.3 น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้น้ำตาลทรายขาวยี่ห้อน้ำตาลมิตรผลเป็นแหล่งสารอินทรีย์และสี Reactive Black 5 จากโรงงาน Dystar Thai Co.,Ltd.

1.3.4 ตัวกลางที่ใช้เป็นตัวกลางพลาสติกของบริษัท อควา นิชิฮาร่า รุ่น R-190 Random Flow Media มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

1.3.5 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดคือ ซีโอดี พีเอช สี และ MLSS

1.3.6 หัวเชื้อที่ใช้นำมาจากบริษัท แซนอี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ – เติมอากาศ

1.4.2 ทราบอัตราส่วนของการเวียนน้ำของระบบเติมอากาศกลับเข้าระบบไร้อากาศต่อประสิทธิภาพของการบำบัด

1.4.3 สามารถนำค่าจลนพลศาสตร์มาใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีด้วยระบบไร้อากาศ-เติมอากาศแบบมีตัวกลาง

1.4.4 ทราบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ - เติมอากาศ

1.4.5 ทราบการลดลงของปริมาณด่างที่ต้องเติมเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการเวียนน้ำแตกต่างกัน

บทที่ 2

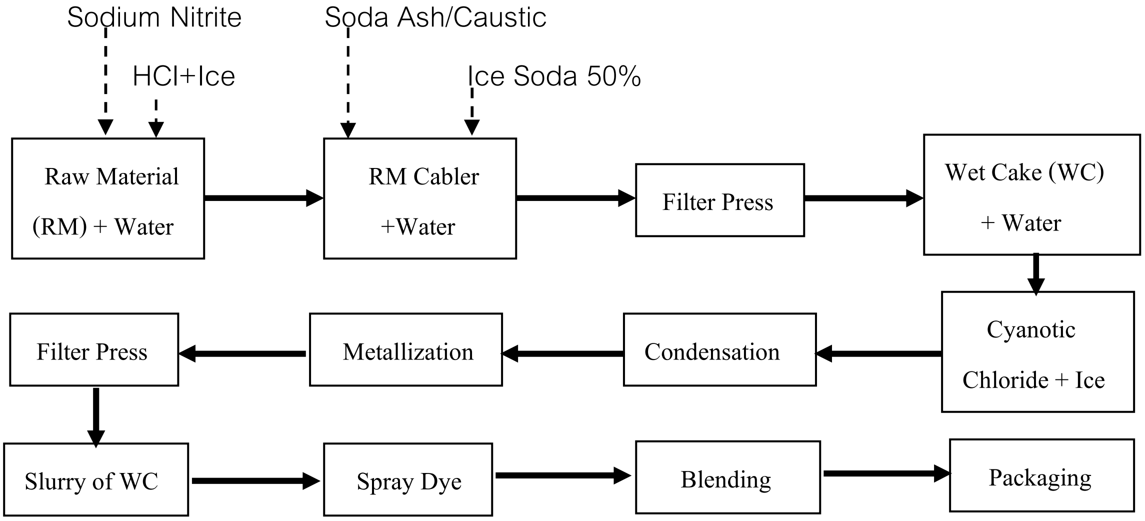
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตสีเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตปริมาณมาก โดยกระบวนการผลิตหลักๆ ได้แก่ การผลิตสีย้อมผ้า และสีพิมพ์ผ้า น้ำทิ้งของอุตสาหกรรมประเภทนี้มักก่อให้เกิดสีและค่าซีโอดีที่สูงเกินมาตรฐานน้ำทิ้งดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต สีและซีโอดีเหล่านี้จัดเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก (Recalcitrant Organics) ทำให้ต้องใช้การบำบัดทางกายภาพขั้นสูงและทางเคมีซึ่งมีราคาในการบำบัดสูงมาก ดังนั้นรูปแบบของการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่สามารถบำบัดสีและซีโอดีเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงควรค่าแก่การศึกษาเนื่องจากมีราคาการบำบัดที่ถูกกว่ากระบวนการทางเคมีและกายภาพขั้นสูงมาก

2.2 กระบวนการผลิตสี

กระบวนการผลิตสีของโรงงานอุตสาหกรรมสีย้อมมีหลากหลายกระบวนการตัวอย่างเช่น กระบวนการผลิตสีย้อมและสีพิมพ์ผ้า เป็นต้น โดยวัตถุดิบที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นสารเคมีที่ใช้ในการผลิตสีโดยกระบวนการ Diazonization ถือเป็นกระบวนการหลักในการผลิตสีย้อมดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตสีย้อมผ้าและสีพิมพ์ผ้า (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553)

ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้มักจะมีค่าซีโอดีสูงแต่มีค่าบีโอดีต่ำ ค่าของแข็งละลายน้ำสูงและเกิดสีของน้ำเสียที่มักเป็นสีเข้มทำให้เกิดความน่ารังเกียจและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การสำรวจเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab Sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย โดยค่าที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรกในรูปของค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และ ค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	**ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด**					**จำนวนข้อมูล (แหล่ง)**
	pH	BOD (มก./ล.)	COD (มก./ล.)	SS (มก./ล.)	**สี (หน่วย 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 หรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

(ที่มา: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553)

2.3 ประเภทของสีย้อม

สีย้อมประเภทต่างๆ มีการใช้งานที่ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์และวัตถุประสงค์ของการผลิต ซึ่งประเภทของสีย้อมจะมีอิทธิพลต่อการบำบัดน้ำเสียมากเนื่องจากสีย้อมแต่ละประเภทมีลักษณะและสมบัติที่แตกต่างกันทำให้ได้น้ำเสียที่มีลักษณะแตกต่างตามไปด้วย ในการศึกษาการบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาประเภทของสีย้อมที่ใช้จากโรงงานแห่งนั้นใช้ด้วย

2.3.1 การจำแนกประเภทของสีย้อม

2.3.1.1 การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งาน

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

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

(3) สีย้อมอะโซอิค (Azoic Dyes): สีย้อมกลุ่มนี้ใช้กับเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีชนิดนี้จะไม่ละลายน้ำ

(4) สีย้อมเบสิค (Basic Dyes): นิยมใช้ย้อมขนสัตว์ และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดย้อมติดเส้นใยของเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย บางครั้งจะเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่าสีแคดไอออน ย้อมติดเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย

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

(6) สีย้อมมอแดนท์ (Modant Dyes): ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เมื่อสีก่อตัวขึ้นบนผ้าแล้วจะนำมาย้อมทับด้วยเกลือโลหะซึ่งจะมีความคงทนมากกว่าผ้าที่ไม่ย้อมทับด้วยเกลือโลหะ

(7) สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes): ใช้ย้อมฝ้ายโดยเฉพาะ ตัวสีย้อมชนิดนี้ราคาค่อนข้างถูก แต่สีที่ย้อมจะไม่ค่อยสดใส ตามปกติตัวสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่ โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ ทำให้สีสามารถละลายน้ำได้ดี

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

(9) สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dyes): ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายได้ในน้ำ มีคุณสมบัติเป็นแอนอิออน เมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะติดแน่นกับเส้นใย

(10) สีย้อมโลหะ (Metalic Dyes): เป็นสีย้อมอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ มีประจุลบ ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

(11) สีย้อมโอเนียม (Oniukm Dyes): ปกติสีตัวนี้นิยมใช้พิมพ์ผ้ามากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสีที่สามารถทำให้ละลายได้ในน้ำ รูปแบบการย้อมคล้ายกับสีแวต

2.3.1.2 การจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

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

2.3.1.3 การจำแนกตามลักษณะทางเคมี

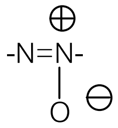
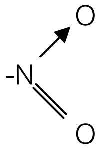
(1) โครโมฟอร์ (Chromophores)

เป็นกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อมที่ทำให้สีปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นเนื่องจากกลุ่มอะตอมนี้จะเป็นตัวดูดกลืนแถบสีขาวไว้บางแถบและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป

(2) ออกโซโครม (Auxochromes)

เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ ถ้าโมเลกุลที่ไม่มีกลุ่มอะตอมออกโซโครมนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใยซึ่งเรียกว่า โครมาเจน (Chromagen) โดยทั้งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี ตามตารางที่ 2.2 แสดงชื่อของหมู่พันธะและชนิดพันธะเคมีของโครงสร้างโครโมฟอร์และออกโซโครม

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของโครโมฟอร์ และออกโซโครมของสีย้อม (บุษรา ประชุมญาติ, 2545)

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม	**หมู่พันธะเคมี**	**ชื่อพันธะ**
Chromophores	-N=N-	Azo
	>C=S	Thio
	-N=O	Nitroso
		Azoxy
		Nitro
	-C=N-	Azomethine
	>C=O	Carbonyl
	>C=C<	Ethenyl
โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม	**หมู่พันธะเคมี**	**ชื่อพันธะ**
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
	$-OCH_3$	Methoxy
	-CN	Cyano
	$-COCH_3$	Acetyl
	$-CONH_2$	Amido

ตามที่กล่าวมาในขั้นต้นสีประเภทต่าง ทำให้น้ำเสียที่ได้มีลักษณะแตกต่างกันดังนั้น กระบวนการบำบัดจึงแตกต่างกันไปด้วย โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ทำการรวบรวมกระบวนการบำบัดต่างๆ ที่ผ่านมาทั้งกระบวนการทางเคมี กายภาพ และชีวะภาพ รวมทั้งลักษณะของแต่ละชนิดสี ตามตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพและเคมี และกระบวนการการบำบัดที่ผ่านมา (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553)

ประเภทสีย้อม	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	กระบวนการการบำบัดที่ผ่านมา
สีย้อมเอซิด (Acid Dye)	- ประจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- กระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก (Brown และ Hamburger, 1987 อ้างถึงในปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553)
สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์เอซิด (Metal Complex Acid Dye)	- ประจุลบ - ละลายน้ำได้น้อย - สีติดแน่น	- ยังไม่มีรายงาน
สีย้อมไดเรกท์ (Direct Dye)	- ประจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดไม่แน่น	- กระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก (Brown และ Hamburger, 1987 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553)
สีย้อมเบสิค (Basic or Cationic Dye)	- ประจุบวก - ละลายน้ำได้ดี	- กระบวนการออกซิเดชันโดยใช้โอโซน (Horning, 1978 อ้างถึงใน Reife และ Freeman,1996)

ตารางที่ 2.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพและเคมี และกระบวนการการบำบัดที่ผ่านมา (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	กระบวนการการบำบัดที่ผ่านมา
สีย้อมอะโซอิค (Asoic Dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตเบสิกกับปูนขาว สารส้มและปูนขาว (สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553)
สีย้อมแวท (Vat Dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตเบสิกกับปูนขาว สารส้มและปูนขาว (สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553)
สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur Dye)	- เป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตเบสิกกับปูนขาว สารส้มและปูนขาว (สมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2525 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการเอสบีอาร์แบบธรรมดา และแบบแอนนอกซิก- แอโรบิก/ออกซิก(จินตนา แป้นสุวรรณ, 2539 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553)
สีย้อมมอร์แดนท์หรือโครม (Mordant or Chrome)	- ประจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่นดี	- กระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก (Brown และ Hamburger, 1987 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553)

ตารางที่ 2.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพและเคมี และกระบวนการการบำบัดที่ผ่านมา (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2542 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี	กระบวนการการบำบัดที่ผ่านมา
สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dye)	- ประจุลบ - ละลายน้ำได้ดี - สีติดแน่นดี	- กระบวนการออกซิเดชันโดยใช้โอโซน (Horning, 1978 อ้างถึงโดย Reife และFreeman, 1996 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้แมกนีเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตเบสิก (Panswad และ Wongchaisuwan, 1986 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (นวลละออ เนียมสะอิ้ง, 2525 ; ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527 ; อภิชาติ หิรัญจิตต์, 2539 ; กมลรัตน์ ดีประเสริฐวงศ์, 2540 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการเอสบีอาร์แบบธรรมดา และแบบแอนนอกซิก- แอโรบิก/ออกซิก (จินตนา แป้นสุวรรณ, 2539 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการออกซิเดชันโดยใช้สารเคมีเฟนตัน (วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิกแบบเอสบีอาร์ (วรวิทย์ เหลืองดิลก, 2541 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการทางชีวภาพแบบทีละเทโดยใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ *Pseudomonas luteola* (Chang และ Lin, 2000 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553) - กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้เฟอริคคลอไรด์ (Kim และคณะ, 2004 อ้างถึงใน ปุณณภา ธนปุณยนันท์, 2553)

2.4 พันธะอะโซ (Azo Bond)

พันธะอะโซ (-N=N-) เป็นโครโมฟอร์ (Chromophores) อาจมีหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่าก็ได้ โดยสามารถมีโครงสร้างออกโซโครมได้หลายกลุ่ม สารตัวกลางในปฏิกิริยา (Intermediate) มี 2 ชนิด คือ ไดอะโซ และสารร่วมทำปฏิกิริยา (Coupling) ซึ่งดำเนินปฏิกิริยาในสภาวะเป็นกรดหรือด่าง ประเภทของสีย้อมที่มีพันธะอะโซเป็นโครโมฟอร์ ได้แก่ (บุษรา ประชุมญาติ, 2545)

1. **Monoazo dyes** ประกอบด้วยโครโมฟอร์อะโซเพียง 1 กลุ่ม และแบ่งออกได้อีกเป็น 8 ชนิด คือ

    1.1 Monoazo Direct dyes

    1.2 Monoazo Acid dyes

    1.3 Monoazo food colours

    1.4 Monoazo Mordant dyes

    1.5 Monoazo Solvent dyes

    1.6 Monoazo Disperse dyes

    1.7 Monoazo Cationic dyes

    1.8 Monoazo Reactive dyes

2. **Diazo หรือ Biazo dyes** มีโครโมฟอร์อะโซ 2 กลุ่ม
3. **Triazo dyes** มีโครโมฟอร์อะโซ 3 กลุ่ม
4. **Polyazo dyes** ประกอบด้วยโครโมฟอร์อะโซตั้งแต่ 4 กลุ่มขึ้นไป
5. **Mordant azo dyes** คือกลุ่มอะโซที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทำหน้าที่เป็นมอร์แดนท์หรือตัวช่วยเพิ่มการยึดเกาะ
6. **Stilbene azo dyes** ประกอบด้วยอะโซหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ซึ่งให้สีเหลืองหรือส้มที่สามารถย้อมได้รวดเร็วและมีการยึดเกาะที่ดีสำหรับเส้นใยฝ้าย
7. **Pyrazolone azo dyes** เป็นสีย้อมอะโซที่มีหมู่ไพราซอลในโครงสร้าง

2.5 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dyes)

สีรีแอกทีฟเป็นชื่อสีย้อมที่เรียกตามลักษณะการใช้งาน สีรีแอกทีฟเป็นสีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน (Hu, 1992 อ้างถึงใน โกมล เอี่ยมเสมอ, 2541) ประมาณ 10 – 15% ของทั้งหมด (Isik และ Sponza, 2004) เนื่องจากสีชนิดนี้ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด โดยจะมีคุณสมบัติเป็นอิออนลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง ขณะย้อมโมเลกุลของสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใยเซลลูโลส แล้วเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโคเวเลนต์เพื่อสร้างสารประกอบครอสลิงค์กับเซลลูโลสซึ่งเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ ทำให้เกิดเป็นสีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก

2.5.1 โครงสร้างเคมีของสีรีแอกทีฟ

โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่ายคือ

S – D – T – X

D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสีและสร้างการยึดเกาะกับเส้นใยเซลลูโลส

X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใยเซลลูโลส

T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง reactive system กับโครโมฟอร์ ยกตัวอย่างเช่น -NH- -NHCO- $-SO_2-$ $-NHSO_2$ และ $-NCH_3-$

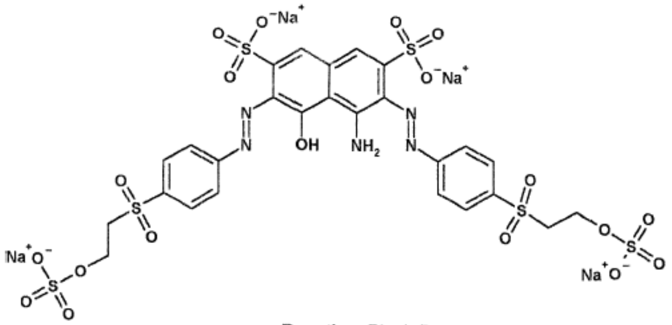
S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงและเป็นกลุ่มที่อยู่ติดกับโครโมฟอร์ โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิก ($-SO_2Na$) อาจมี 1 กลุ่มหรือมากกว่า

ส่วนประกอบ 2 ส่วนที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สีย้อมแต่ละชนิดแตกต่างกัน คือ

1. กลุ่มโครโมฟอร์ (D)
2. กลุ่มรีแอกทีฟ (X)

2.6 **สีรีแอกทีฟแบล็ค** 5 (Reactive Black 5)

สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 มีสูตรทางเคมีคือ $C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$ มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) เท่ากับ 991.82 มีค่าดูดกลืนแสงที่ (Maximum wavelength) 598 นาโนเมตร (Karatas และคณะ, 2010) โครงสร้างโครโมฟอร์ (D) เป็นโมเลกุลของกลุ่มไดอะโซ ส่วนกลุ่มที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซีของเส้นใยเซลลูโลส (X) คือ Sulphatoethylsulphone โดยมีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Forgacs และคณะ, 2004)

เมื่อพิจารณาถึงค่าซีโอดีของสีรีแอกทีฟแบล๊ค 5 จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะพบว่า สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 1 มิลลิกรัมมีค่าซีโอดี 0.77 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6 = 26CO_2 + 96\ e^- \quad (2.1)$$

$$24O_2 + 96\ e^- + 96H^+ = 48H_2O \quad (2.2)$$

$$1mol\ C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6 = 24O_2$$

$$= 0.77\ mgCOD/mg.RB\ 5$$

(100 มิลลิกรัมรีแอกทีฟแบล็ค 5 = 78.2 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร (Karatas และ คณะ 2010)

2.7 การบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมปัจจุบันนิยมใช้กระบวนการทางเคมีและกายภาพแต่ทั้ง 2 กระบวนการมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป โดยตารางที่ 2.4 อธิบายเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในการกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีระหว่างกระบวนการทางเคมีและกายภาพได้ดังนี้

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมด้วยกระบวนการทางเคมีและกายภาพ (Robinson และคณะ, 2001)

กระบวนการทางเคมี/กระบวนการทางกายภาพ	**ข้อดี**	**ข้อเสีย**
1. Fentons Reagent	-สามารถลดสีที่ละลายและไม่ละลายน้ำได้	-เกิดตะกอนเพิ่มขึ้น
2. Ozonation	-ใช้ในสภาวะก๊าซ : ไม่เกิดตะกอนเพิ่ม	-มีราคาแพงและไม่คงตัว
3. Photochemical	-ไม่เกิดตะกอนเพิ่มขึ้น	-เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์
4. NaOCl	-สลายพันธะอะโซ	-เกิดสารประกอบ อะโรมาติกเอมีน
5. Cucurbiturit	-ดูดซับสีได้หลากหลายชนิด	-ราคาแพง
6. Electrochemical destruction	-ไม่เกิดสารประกอบที่อันตราย	-ราคาแพง
7. Activated carbon	-ใช้บำบัดสีได้หลากหลายชนิด	-ราคาแพง
8. Peat	-เป็นสารดูดซับที่ดี ราคาถูก	-มีพื้นที่ดูดซับที่น้อยกว่าถ่านกัมมันต์
9. Wood chips	-ดูดซับสีแอซิดได้ดี	-ระยะเวลาในการบำบัดนาน
10. Silica gel	-กำจัดสีพวกเบสิกได้ดี	-เกิดมลพิษ เช่น ฝุ่นละออง
11. Membrane filtration	-กำจัดสีได้ทุกชนิด	-ตะกอนมีความเข้มข้นสูง
12. Ion exchange	-สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ : ไม่สูญเสียตัวดูดซับ	-ไม่สามารถกำจัดสีได้ทุกชนิด
13. Irradiation	-มีประสิทธิภาพในการทดลองขนาดเล็ก	-ต้องการออกซิเจนละลายมาก
14. Electrokinetic coagulation	-มีค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม	-เกิดตะกอนจำนวนมาก

2.7.1 การกำจัดสีด้วยวิธีการทางกายภาพ

1. กระบวนการดูดติดผิว

เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ในการกำจัดสีที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำๆในน้ำทิ้ง กระบวนการดูดติดผิวนิยมใช้ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ เช่น ชนิดของสีและตัวดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดอนุภาค อุณหภูมิ พีเอช และเวลาในการทำปฏิกิริยา

2. กระบวนการเมมเบรน

เป็นวิธีการกำจัดสีที่มีประสิทธิภาพสูง โดยส่วนมากจะใช้บำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นของสีสูง น้ำที่ได้จากการบำบัดด้วยวิธีนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง แต่กระบวนการเมมเบรนมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาที่สูงมาก

3. กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเหมาะกับสารละลายเจือจาง โดยใช้เรซินที่มีประจุลบหรือประจุบวกในการกำจัดสีย้อม เรซินจะมีอัตราการแลกเปลี่ยนสูงและง่ายต่อการทำรีเจนเนอเรท โดยเรซินที่มีประจุบวกจะใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก หรือโซเดียมคลอไรด์ทำรีเจนเนอเรท เรซินประจุลบจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำรีเจนเนอเรท ซึ่งมีการนำวิธีแลกเปลี่ยนไอออนมาใช้กำจัดสีในน้ำเสีย โดยที่ประสิทธิภาพในการลดสีแอซิด สีรีแอกทีฟ และสีดิสเพอร์สสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ แต่มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีต่ำ

2.7.2 การกำจัดสีด้วยวิธีการทางเคมี

เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างมาก มีกระบวนการสำหรับกำจัดสีที่หลากหลาย โดยกระบวนการเคมีมีกลไกการกำจัดสีโดยการแตกพันธะวงแหวนของโครงสร้างโมเลกุลสี

1. H_2O_2 – Fe (II) salts (Fentons reagent)

เป็นกระบวนการที่ใช้กับน้ำเสียที่บำบัดทางชีวภาพยากหรือน้ำเสียที่เป็นพิษกับเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้บำบัด ซึ่งสามารถกำจัดสีที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำได้

2. Ozonation

มีการใช้กระบวนการนี้ตั้งแต่ประมาณปี 1970 โอโซนเป็นตัวทำปฏิกิริยาที่ดีแต่ไม่ค่อยมีเสถียรภาพและมีช่วงชีวิตที่สั้น เมื่อเทียบกับสารชนิดอื่น หลักการทำงานของโอโซนคือการออกซิไดส์เพื่อทำลายระบบคอนจูเกทของโมเลกุลสีย้อม ข้อดีของโอโซนอีกอย่างคือไม่เพิ่มปริมาณตะกอนซึ่งมีผลต่อการบำบัดตะกอนต่อไป

3. Photochemical

เป็นกระบวนการที่ใช้แสงอัตราไวโอเลตทำปฏิกิริยาร่วมกับสารเคมีคือ ไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์ เพื่อสลายโมเลกุลของสีให้เป็น คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ข้อดีของกระบวนการนี้คือไม่เพิ่มปริมาณของตะกอนและไม่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็น

4. NaOCl

กระบวนการนี้เมื่อ NaOCl แตกตัวแล้วคลอรีนไอออนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม และเกิดการแตกพันธะอะโซจึงทำให้สีในน้ำลดลง

2.7.3 การกำจัดสีด้วยวิธีการทางชีวภาพ

เมื่อพิจารณาทางด้านต้นทุน ความมีเสถียรภาพของระบบ ประสิทธิภาพในการลดสีและสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก กระบวนการบำบัดทางชีวภาพจึงได้รับความสนใจและศึกษาวิจัยมากขึ้น โดยกระบวนการทางชีวภาพสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

(1) กระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิก

การบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิกเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีการอื่นแต่ปัญหาที่พบคือการบำบัดสีย้อม เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถกำจัดสีย้อมที่ผลิตในสภาวะที่มีออกซิเจน และอาจมีการเติมสารเคมีลงไปในสีย้อมเพื่อให้ทนต่อการออกซิไดซ์โดยสารเคมีและแสง สีบางชนิดมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์

Shaul และคณะ (1986) ได้อธิบายไว้ว่ากลไกแรกที่สำคัญสำหรับการกำจัดสีโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบแอโรบิก คือ การดูดติดผิวสลัดจ์ ความสามารถในการกำจัดสีขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญคือ สมบัติ โครงสร้างและโมเลกุลของสี จำนวนและตำแหน่งของกลุ่มย่อย (Substituents) ในโมเลกุลของสี ความสามารถในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นหากว่ามีกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) ไนโตร (nitro) อะโซ (azo) อยู่ในโมเลกุลสี และการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของโมเลกุลสี แต่ถ้าในโมเลกุลของสีมีกลุ่มซัลโฟ (sulfo) อยู่จะทำให้ความสามารถในการกำจัดสีโดยกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ลดลง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟล็อก ขนาดพื้นที่ผิวของฟล็อก และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยพบว่าถ้าเพิ่มพื้นที่ผิวและค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจะทำให้ความสามารถในการกำจัดสีเพิ่มขึ้น

Kornaros และ Lyberatos (2006) ได้ทำการศึกษาเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบโปรยกรองในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตสีย้อมและน้ำมันขัดเงา น้ำทิ้งถูกป้อนใส่ชุดทดลองระบบโปรยกรองใน 2 รูปแบบคือ แบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง (SBR) ในการศึกษาเริ่มต้นจะใช้การเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ภาระชลศาสตร์เท่ากับ 1.1 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวัน ระบบจะมีประสิทธิภาพ 60-70 เปอร์เซ็นต์ และที่ภาระชลศาสตร์เท่ากับ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวัน ระบบจะมีประสิทธิภาพถึง 80-85 เปอร์เซ็นต์ น้ำเสียไม่ได้เจือจางที่ภาระชลศาสตร์เท่ากับ 1.1 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวัน ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะอยู่ที่ 60-70 เปอร์เซ็นต์ ระบบ โปรยกรองนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ถึง 36,000

มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้เงื่อนไขของแอโรบิคที่มีพีเอชระหว่าง 5.5 ถึง 8.0 ประมาณ 30-60 เปอร์เซ็นต์ของซีโอดีที่ถูกบำบัดไป เป็นผลมาจากการเติมอากาศที่ส่วนล่างของระบบ

(2) กระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก

Porter และ Snider (1976) อ้างถึงโดย Dubrow และคณะ (1996) ทำการศึกษาระยะเวลาการปรับตัวของจุลินทรีย์พบว่าน้ำเสียที่มีสีย้อมต้องการระยะเวลาในการปรับตัวของกล่มจุลินทรีย์นานและย่อยสลายได้ช้าซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Shriver และ Daque (1978) อ้างถึงใน Reife และ Freeman (1996) ได้กล่าวว่า น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมจะย่อยสลายได้ช้ากว่าน้ำเสียจากชุมชนโดยทำการทดลองวัดค่าบีโอดีเมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน พบว่า น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมถูกย่อยสลายไปเพียง 31 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่น้ำเสียชุมชนถูกย่อยสลายไป 92 เปอร์เซ็นต์

Singh และคณะ (2007) ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการลดสี 2 ชนิดคือ AO7 และ AO6 ในระบบ sequential fixed-film anaerobic batch reactor (SFABR) ที่ความเข้มข้นสีต่างๆ โดยเติมกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนและสารอาหาร พบว่า ที่ความเข้มข้นสี 300 มิลลิกรัมต่อลิตร มีอัตราการลดสี AO6 และ AO7 เท่ากับ 168 และ 176 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ

สุนันทา เลาวัณย์ศิริ (2544) ศึกษาประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศในการกำจัดสารอินทรีย์และสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยใช้ตัวกลางแตกต่างกันคือ ถ่านกัมมันต์ ยาง และพลาสติก น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน สีอะโซรีแอกทีฟเรด 141 ความเข้มข้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าสารอินทรีย์เท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมน้ำเสียแบบกึ่งต่อเนื่อง ที่ระยะเวลากักเก็บเป็น 24 12 และ 6 ชั่วโมง ค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.94 1.84 และ 3.78 กรัมซีโอดีต่อวัน การศึกษาพบว่าการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุดที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ เท่ากับ 12 ชั่วโมง โดยตัวกลางถ่านกัมมันต์ ยางรถยนต์ และพลาสติก มีค่าเท่ากับร้อยละ 75.25 62.16 และ 59.92 ตามลำดับ และพบว่าการกำจัดสีลดลงเมื่อระยะเวลากักเก็บลดลงอีกด้วย

Chung และคณะ (1992) ได้รวบรวมผลการศึกษากับแบคทีเรียหลายชนิดซึ่งเป็นแบคทีเรียในลำไส้ที่ต่างก็สามารถลดสีชนิดอะโซได้ และมักจะพบเอนไซม์ azoreductase ในแบคทีเรียเหล่านี้ และยังได้ระบุว่าเอนไซม์ azoreductase นี้ไม่สามารถทนออกซิเจนได้ และต้องการสารประกอบฟลาวิน (flavin) เช่น โคเอนไซม์ FAD เพื่อช่วยในการทำงานของเอนไซม์ นั้นคือ สาร FAD จะถูกรีดิวซ์ด้วยสาร NADH กลายเป็น $FADH_2$ (reduced flavin nucleotides) และ

$FADH_2$ ก็ถ่ายอิเล็กตรอนให้กับพันธะอะโซของสีย้อม แล้วพันธะอะโซก็แตกออกนั่นเอง ดังนั้นการลดสีในน้ำเสียจึงไม่ใช่การย่อยสลายโดยตัวสีเป็นสารให้อิเล็กตรอนเช่นสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป แต่ทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซิ่งเอเจนต์สำหรับ $FADH_2$ ในการเปลี่ยนรูปกลับเป็นโคเอนไซม์ FAD ในระบบขนส่งอิเล็กตรอนต่อไป (Gingell และ Waker, 1971 อ้างถึงใน Carliell และคณะ,1995) นอกจากนี้ Banat และคณะ (1996) ได้ทำการรวบรวมรายชื่อของแบคทีเรียในงานวิจัยต่าง ๆ ที่สามารถลดสีได้ ซึ่งมักพบเอนไซม์ azoreductase แสดงดังตาราง 2.5

ตารางที่ 2.5 รายชื่อแบคทีเรียในงานวิจัยต่างๆ ที่สามารถลดสีได้ (Banat และคณะ, 1996)

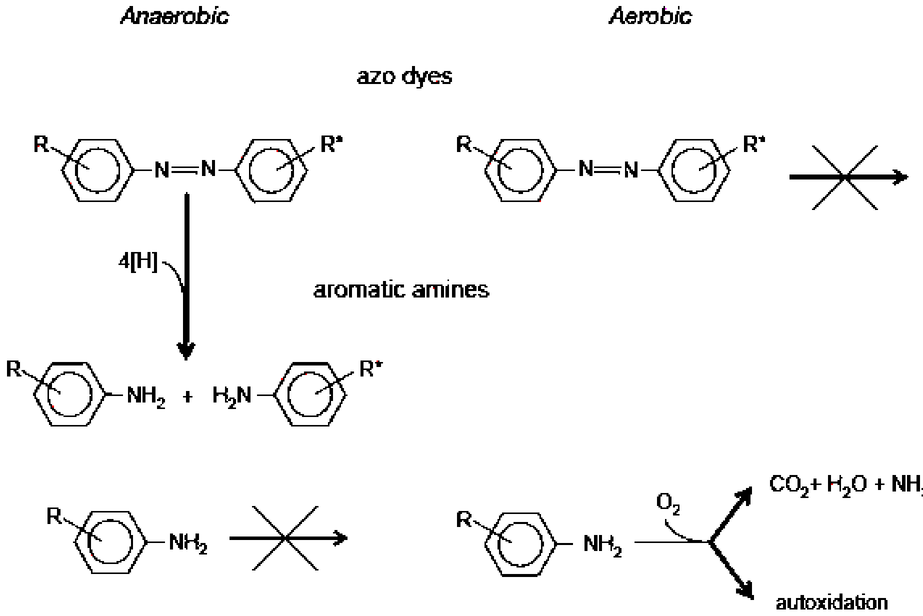
Culture	Dye and concentration	Percent removal/time	Mechanism	Reference
Aeromonas hydrophila var 24B	various azo dyes (0.2 mmol/l)	40–100% (24 h)	azoreductase (cell free extract)	Yatome *et al.* (1987)
Aeromonas hydrophila var 24B	various azo dyes (10–100 mg/l)	50–90% (24 h)	azoreductase (cell free extract)	Idaka & Ogawa (1978)
Bacillus subtilis IFO 13719	2-carboxy 4' dimethyleamino benzene (0.045 mmole)	100% (20 min)	azoreductase (in growing cells)	Yatome *et al.* (1991)
Bacillus subtilis IFO 3002	p-aminoazobenzene (30 mg/l)	80–90% (30 h)	azoreductase	Horitsu *et al.* (1977)
Klebsiella pneumoniae RS-13	Methyl Red (MR) (100 mg/l)	100% (24 h)	azoreductase	Wong & Yuen (1996)
Pseudomonas cepacia 13NA	C.I. Acid Orange 12 (10 mg/l)	65% (8 h)	azoreductase	Ogawa *et al.* (1986)
	C.I. Acid Orange 20 (10 mg/l)	87% (8 h)	azoreductase	
	C.I. Acid Red 88 (37 mg/l)	94% (8 h)	azoreductasee	
Pseudomonas cepacia 13NA	Orange I (0.045 mmole)	= 90% (10 h)	azoreductase (cell free extract and growing cells)	Yatome *et al.* (1991)
Pseudomonas cepacia 13NA (immobilized system)	p-aminoazobenzene (10 mg/l)	60–80% (10 h RT)	azoreductase	Ogawa & Yatome (1990)
Pseudomonas luteola	Red G (100 mg/l)	37.4% (2 days)	azoreductase	Hu (1994)
	RBB (100 mg/l)	93.2% (2 days)	azoreductase	
	RP_2B (100 mg/l),	92.4% (2 days)		azoreductase
	V_2RP (100 mg/l),	88.0% (2 days)		azoreductase
Pseudomonas stutzeri	various azo dyes (0.1 mmol/l)	90% (8–20 min)	azoreductase (cellular extract)	Yatome *et al.* (1990)
Pseudomonas stutzeri IAM 12097	Orange I (0.045 mmole)	= 80% (20 h)	azoreductase (cell free extract)	Yatome *et al.* (1991)
	Orange II (0.045 mmole)	= 80% (20 h)	azoreductase (cell free extract)	
Streptomycetes BW130	Azo-reactive Red 147 (150 mg/l)	29.0% (14 days)	adsorption	Zhou & Zimmermann (1993)
	Azo-copper Red 171 (180 mg/l)	73.0% (14 days)	adsorption	
	Anthraquinone Blue 114 (280 mg/l)	27.0% (14 days)	adsorption	
	Formazan Blue 209 (80 mg/l)	70.0% (14 days)	adsorption	
	Phthalocyanine Blue 116 (200 mg/l)	39.0% (14 days)	adsorption	
Mixed bacterial culture	Mordant Yellow (unknown)	50% (5 days)	azoreductase	Haug *et al.* (1991)

RT = Retention time.

จากงานวิจัยที่ถูกหยิบยกขึ้นมาทำให้ทราบว่ากระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศสามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่กระบวนการไร้อากาศเมื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีชนิดอะโซ พบว่าจะทำให้เกิดสารประกอบอะโรมาติกแอมีน (Aromatic amine) ซึ่งสารประกอบนี้ไม่สามารถกำจัดได้ในขั้นตอนไร้อากาศ

(3) กระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก

Van der Zee และ Villaverde (2005) อธิบายเกี่ยวกับการกำจัดสีว่ากระบวนการแรกคือแอนแอโรบิกจะสามารถแตกพันธะสีทำให้สีมีค่าลดลงแต่จะทำให้เกิดกลุ่มอะโรมาติกแอมีนซึ่งเป็นสารอันตรายต่อสัตว์น้ำและมนุษย์และไม่สามารถกำจัดในขั้นตอนนี้ได้ แต่กลุ่มอะโรมาติกแอมีนสามารลดลงได้เมื่ออยู่ในกระบวนการแอโรบิก ซึ่งเป็นกระบวนการที่สอง ดังนั้นกระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิกจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับบำบัดสีอะโซ



รูปที่ 2.3 การบำบัดสีอะโซและกลุ่มอะโรมาติกแอมีนของสภาวะแอนแอโรบิกและแอโรบิก

โกมล เอี่ยมเสมอ (2541) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟอะโซ โดยใช้กระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก มีช่วงเวลาแอนแอโรบิก แอโรบิก และการตกตะกอน คือ 18 5 และ 1 ชั่วโมง การทดลองแบบออกเป็น 4 สภาวะ โดยมีการเติมนิวเทรียนบรอธ+โซเดียมอะซิเทตเป็นสารอาหาร 250 + 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้กลูโคส 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการเติมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับ 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และ 15 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ตามลำดับ (G1) ใช้กลูโคสแต่เปลี่ยนอัตราส่วนไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับ 25 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และ 5 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ตามลำดับ (G2) และแปรผันช่วงเวลาแอนแอโรบิก แอโรบิกและการตกตะกอนเป็น 6 5 และ 1 ชั่วโมง (G3) ทุกการทดลองใช้สีรีแอกทีฟแบล็คบีที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และอายุตะกอน 8 วัน การทดลองพบว่าการกำจัดสีของนิวเทรียนบรอธ+โซเดียมอะซิเทต G1 G2 และ G3 เท่ากับ 71 68 66 และ 63 ตามลำดับ ในหน่วย SU และเท่ากับ 73 66 64 และ 59 ในหน่วยเอดีเอ็มไอ ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของทุกระบบมีค่าใกล้เคียงกันคือร้อยละ 96-97

Isik และ Sponza (2008) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียฟอกย้อมสังเคราะห์โดยใช้ระบบบำบัดแบบ แอนแอโรบิก-แอโรบิก ที่ค่า Hydraulic Retention Time ต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพการลดซีโอดีอยู่ในช่วง 97-91 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการลดสีอยู่ในช่วง 84-91 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่า Hydraulic Retention Time ของแอนแอโรบิกและแอโรบิก คือ 19.17 และ 1.22 วัน ตามลำดับ และยังพบว่าสารประกอบเอมีนลดลงเมื่อบำบัดแบบแอโรบิก

Randall (1993) ทำการศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียที่มีขั้นตอนไร้อากาศแล้วตามด้วยขั้นตอนเติมอากาศ โดยเปลี่ยนแปลงเวลากักน้ำในขั้นตอนไร้อากาศเป็น 2 ค่า โดยในช่วงแรกของการทดลองที่เวลากักน้ำ 12 ชั่วโมง และในช่วงหลังเป็น 6 ชั่วโมง ส่วนระบบเติมอากาศมีเวลากักน้ำ (HRT) เท่ากับเวลากักตะกอน (SRT) ประมาณ 30 วัน ผลการทดลองปรากฏว่า การลดสีในขั้นตอนไร้อากาศที่การทดลองเวลากักน้ำ 12 ชั่วโมงมีมากกว่าที่ 6 ชั่วโมง และการลดสีส่วนใหญ่ของระบบเกิดขึ้นในขั้นตอนไร้อากาศ คือ ประมาณ 55-60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ขั้นตอนการเติมอากาศลดสีได้ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการดูดติดผิวในสลัดจ์ ดังนั้น Randall จึงเสนอว่า ควรใช้การบำบัดแบบไร้อากาศร่วมกับการบำบัดแบบเติมอากาศในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมให้ได้ผลดีที่สุด

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดสี (ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์, 2543)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการลดสีที่เกิดขึ้นในช่วงแอนแอโรบิก

1. ปริมาณไนเทรตในระบบเนื่องจากไนเทรตจะทำให้เกิดการยับยั้งการลดสีเพราะไนเทรต มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าสีย้อม
2. ความเข้มสีเมื่อความเข้มสีสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการลดสีต่ำลงเล็กน้อย
3. เวลากักน้ำในช่วงแอนแอโรบิกเมื่อเวลากักเก็บน้ำนานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการลดสีสูงขึ้น
4. โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมจะพบว่าการลดสีจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อสีย้อมเป็นโครงสร้างอะโซ

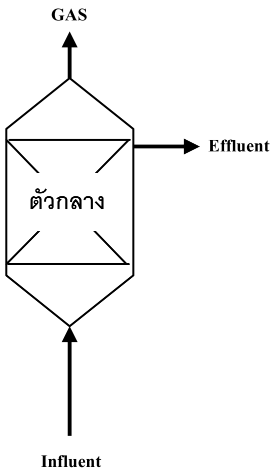
2.9 ถังปฏิกิริยาแบบมีตัวกลาง

ระบบบำบัดแบบฟิล์มชีวภาพเป็นระบบที่จุลชีพจะเกาะผิวตัวกลางเป็นหลัก เพื่อทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ตัวกลางที่ใช้อาจเป็นแผ่นหรือวัสดุรูปทรงต่างๆ ติดตั้งอยู่ในระบบโดยให้น้ำเสียไหลผ่านแผ่นหรือวัสดุตัวกลางอย่างสม่ำเสมอตลอดเวลา ทำให้จุลินทรีย์ชนิดเกาะผิวตัวกลางเริ่มเกิดขึ้นจนเป็นชั้นหนา ระบบบำบัดแบบฟิล์มชีวภาพมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่สูงเนื่องจากมีปริมาณจุลชีพในระบบมาก มีต้นทุนในการก่อสร้างและดำเนินการต่ำและง่ายต่อการดูแลรักษา

2.9.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังกรองไร้อากาศ (Upflow Attached Growth Anaerobic Reactor)

ระบบไร้อากาศแบบมีตัวกลางมีรูปแบบถังทั้งทรงกระบอกและทรงสี่เหลี่ยม มีเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างประมาณ 2-8 เมตร และมีความสูง 3-13 เมตร ตัวกลางมักติดตั้งไว้ตรงกลางของถังโดยมีความสูงร้อยละ 50-70 ของความสูงถัง วัสดุตัวกลางมีหลากหลายชนิด เช่น หิน พลาสติก เป็นต้น พื้นที่ผิวของตัวกลางอยู่ที่ประมาณ 100 ตารางเมตรต่อลูกบาตรเมตร

ระบบบำบัดแบบ Upflow Attached Growth Reactor มีค่า HRT ประมาณ 0.5 – 3 วัน และระบบสามารถรองรับอัตราการรับภาระสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 0.1 – 15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.4 ถังกรองไร้อากาศแบบไหลจากล่างขึ้นบน (Metcalf และ Eddy, 2004)

ตารางที่ 2.6 การออกแบบระบบบำบัดแบบ Upflow Attached Growth Reactor (Metcalf และ Eddy, 2004)

Wastewater	Packing type	Temp (ºc)	COD loading (Kg/m^3.d)	HRT; Θ (d)	Recycle Ratio R/Q	COD removal (%)
1.Guar Gum	Pall ring	37	7.7	1.2	5.0	61
2.Chemical Process	Pall ring Pall ring	37 15-25	12-15 0.1-0.2	0.9-1.3 0.5-0.75	5.0 0	80-90 50-70
3.Domistic	Tubular	37	0.2-0.7	25-37	0	90-96
4. Landfill leachate	Cross-flow	35	1.5-2.5	2-3	0.25	89
5. Food Canning	Cross-flow	30	4-6	1.8-2.5	0	90

การคำนวณอัตราการบำบัดซีโอดี

การหาอัตราการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศคำนวณได้ตามสมการ

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา; } r_s = \frac{(\text{ซีโอดีเข้า - ซีโอดีออก})}{\text{ระยะเวลากักเก็บ}}$$

2.9.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง (Trickling filter)

ระบบโปรยกรอง เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนที่มีจุลินทรีย์เจริญเติบโตอยู่บนวัสดุตัวกลาง โดยทั่วไปน้ำเสียจะถูกปล่อยให้ไหลลงมาจากด้านบนของถังปฏิกิริยาผ่านวัสดุตัวกลางซึ่งเป็นที่เจริญเติบโตของจุลินทรีย์เกิดการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยได้รับออกซิเจนจากอากาศภายนอกฟิล์ม วัสดุตัวกลางมีหลากหลายชนิด เช่น หิน พลาสติก เป็นต้น

พื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลางมีผลต่อปริมาณจุลชีพ ยิ่งพื้นที่ผิวมากจุลินทรีย์ก็มีพื้นที่ในการเจริญเติบโตมาก ปริมาณของจุลินทรีย์ก็จะสูงขึ้น เมื่อน้ำและอากาศเคลื่อนที่ผ่านได้สะดวกประสิทธิภาพการบำบัดจะสูง วัสดุตัวกลางแบบพลาสติกมีข้อดีคือ มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากและอุดตันได้ยาก ทำให้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย

ระบบโปรยกรองมักเพิ่มการหมุนเวียนน้ำโดยนำน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วหมุนเวียนมารวมกับน้ำเสียที่เข้าใหม่ การหมุนเวียนน้ำนั้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นเนื่องจากการช่วยเพิ่มการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับจุลชีพ คืนความเป็นด่างและธาตุอาหารต่าง ๆ กลับสู่ระบบ

การหมุนเวียนน้ำจะทำให้ชั้นกรองอยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา และควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มชีวภาพไม่ให้หนาเกินไป ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างคงที่

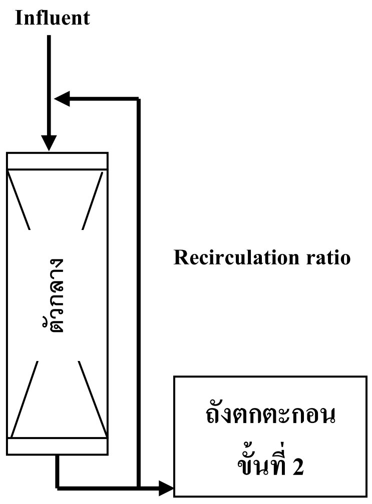
การออกแบบทั่วไปของระบบบำบัดแบบโปรยกรอง ที่อัตราการรับน้ำเสียสูง ตัวกลางที่ใช้เป็นพลาสติก ระบบสามารถรองรับอัตราการรับภาระสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 0.6 – 3.2 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การออกแบบระบบบำบัดแบบโปรยกรอง (Metcalf และ Eddy, 2004)

Design characteristics	Low or standard Rate	Intermediate rate	High rate	High rate	Roughing
Type of packing	Rock	Rock	Rock	plastic	Rock/plastic
Hydraulic loading, $m^3/m^2.d$	1-4	4-10	10-40	10-75	40-200
Organic loading, kg $BOD/m^3.d$	0.07-0.22	0.24-0.48	0.4-2.4	0.6-3.2	>1.5
Recirculation ratio	0	0-1	1-2	1-2	0-2
Filter flies	Many	Varies	Few	Few	Few
Sloughing	Intermittent	Intermittent	continuous	continuous	Continuous
Depth, m	1.8-2.4	1.8-2.4	1.8-2.4	3.0-12.2	0.9-6
BOD removal efficiency, %	80-90	50-80	50-90	60-90	40-70
Effluent quality	Well nitrified	Some nitrification	NO nitrification	NO nitrification	NO nitrification
Power, $kW/10^3m^3$	2-4	2-8	6-10	6-10	10-20

หมายเหตุ : Recirculation Ratio Wetting = 0.5 $L/m^2/s$

ส่วนประกอบของระบบโปรยกรอง



รูปที่ 2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบโปรยกรอง (Trickling filter)

1. ถังใส่ตัวกลาง

มักเป็นรูปทรงกระบอก มีตัวกลางบรรจุอยู่ในถัง แต่เดิมใช้หิน ปัจจุบันมีการใช้ตัวกลางอื่น เช่น พลาสติก ไม้เนื้อแข็ง เป็นต้น เพื่อให้ใช้งานได้คงทนถาวรพอสมควร ทำเป็นรูปต่างๆเพื่อให้มีพื้นที่ผิวและมีช่องว่างระหว่างตัวกลางมาก ช่องว่างระหว่างตัวกลางที่มีมากมายจะถูกใช้เป็นทางสำหรับให้ออกซิเจนผ่านเพื่อให้เกิดสภาพแอโรบิก

2. ระบบจ่ายน้ำเสีย

จะติดตั้งเหนือตัวกลาง มักเป็นท่อยาวและเจาะรูด้านข้าง ท่อนี้จะหมุนช้าๆตามแนวรัศมีของถัง ทำให้น้ำเสียถูกโปรยลงบนผิวบนสุดของตัวกลางได้เต็มพื้นที่ของถัง ในการนี้น้ำเสียจะได้รับออกซิเจนในอากาศไปด้วย และไหลผ่านพื้นผิวของตัวกลางลงไปสู่ชั้นล่าง

3. ระบบระบายน้ำและระบายอากาศ

ระบบระบายน้ำทำหน้าที่รองรับน้ำทิ้งที่ผ่านผิวของตัวกลางมาแล้ว การระบายอากาศมักจะทำโดยผ่านทางระบบระบายน้ำ ทิศทางการไหลของอากาศขึ้นกับอุณหภูมิสัมพัทธ์ระหว่างอากาศและน้ำเสีย ถ้าอุณหภูมิของอากาศข้างเคียงสูงกว่าของน้ำเสีย อากาศจะไหลจากข้างบนผ่านถังใส่ตัวกลางลงข้างล่าง แต่ถ้าในฤดูหนาวที่น้ำเสียอุณหภูมิสูงกว่าอากาศ อากาศจะไหลจากข้างล่างขึ้นข้างบน Metcalf และ Eddy (2004) ได้แนะนำว่าควรมีปริมาณอากาศไหลเข้าสู่ระบบอย่างต่ำสุดประมาณ 0.3 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อตารางเมตร ของพื้นที่ถังเพื่อให้ปริมาณออกซิเจนเพียงพอ

4. ถังตกตะกอนขั้นที่สอง

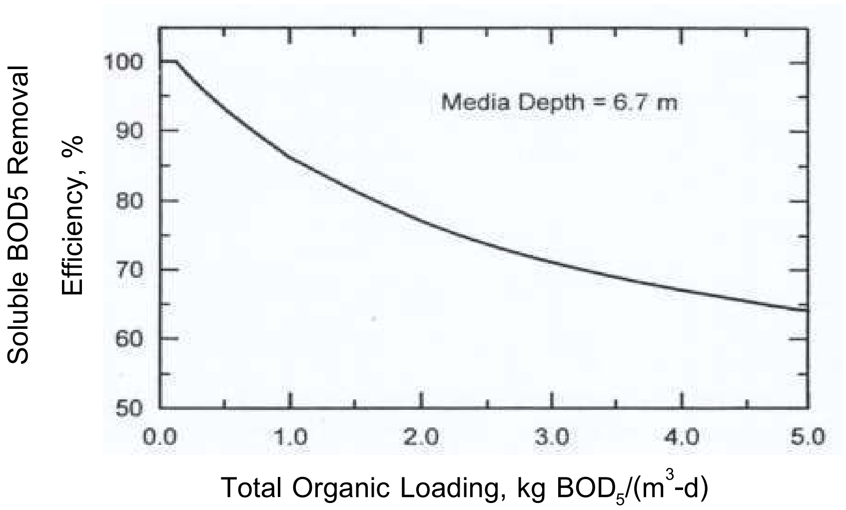
มีหน้าที่แยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำทิ้ง ให้ได้น้ำทิ้งที่ออกจากถังตกตะกอนขั้นที่สองมีความใสปราศจากตะกอนแขวนลอย

การคำนวณอัตราการบำบัดซีโอดี

การหาอัตราการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศคำนวณได้ตามสมการ

$$\text{อัตราการบำบัดซีโอดี; } r_s = \frac{(\text{ซีโอดีเข้า - ซีโอดีออก}) \times \text{อัตราการไหลน้ำ}}{\text{ปริมาณตัวกลาง}}$$

Grady และคณะ (1999) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีเทียบกับอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ของถังโปรยกรองพบว่าเมื่ออัตราภาระสารอินทรีย์มีค่ามากขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีมีค่าลดลง ตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีเทียบกับอัตราภาระสารอินทรีย์ (Grady และคณะ, 1999)

2.10 งานวิจัยที่ผ่านมา

Van der Zee และ Villaverde (2005) ได้ทำการรวบรวมวิธีการบำบัดแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก กับน้ำเสียที่ปนเปื้อนสี ระยะเวลากักเก็บ ประสิทธิภาพ สารตั้งต้น พบว่าความเข้มข้นของสีชนิดรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ใช้ในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้กลูโคสเป็นสารให้พลังงาน ระยะเวลากักเก็บน้ำของระบบไร้อากาศ อยู่ที่ 3-30 ชั่วโมง และระบบเติมอากาศมีระยะเวลากักเก็บอยู่ที่ 10-108 ชั่วโมง โดยไม่พบสารประกอบกลุ่มอะโรมาติกแอมีนที่เกิดจากการแตกพันธะของสี ซึ่งประสิทธิภาพในการลดสีในระบบไร้อากาศอยู่ที่ 82-98 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับชนิดของระบบบำบัด

ตามทฤษฎี พันธะอะโซจะต้องการตัวให้อีเล็กตรอนในปริมาณที่ต่ำ แต่ปฏิกิริยาอื่นๆจะแย่งตัวให้อีเล็กตรอน จึงต้องเพิ่มสารตั้งต้น นอกจากนั้น กระบวนการในการแตกพันธะอะโซที่ช้ายังเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ต้องการสารตั้งต้นมากขึ้นด้วย

Cruz and Buitro (2001) อ้างถึงใน Van der Zee และ Villaverde (2005) มีการศึกษาการบำบัดสีภายใต้สภาวะที่ขาดแคลนสารอาหาร โดยน้ำเสียไม่ใส่ตัวให้อีเล็กตรอนอื่นๆ นอกจากสี พบว่ากระบวนการแอนแอโรบิกมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ต่ำลง ซึ่งสภาวะขาดสารอาหาร

อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นที่เติมสารตั้งต้น เช่นเดียวกับ Kapdan และคณะ (2003) อ้างถึงใน Van der Zee และ Villaverde (2005) ที่ทำการศึกษากระบวนการลดสีชนิด Reactive Red 195 ที่ความเข้มข้นของสีเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพกำจัดสีลดต่ำลงเมื่อมีความเข้มข้นสารตั้งต้นต่ำกว่า 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร

Karatas และ คณะ (2010) ทำการศึกษาการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 และซีโอดี โดยใช้กระบวนการไร้อากาศ-เติมอากาศชนิด UASB – CSTR น้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้กลูโคส 3,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร เป็นแหล่งพลังงาน ทำการแปรผันระยะเวลากักเก็บ (HRT) 3.2-30.1 ชั่วโมง อัตราการรับภาระสารอินทรีย์เป็น 2.4-22.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีและการเกิดแก๊สมีเทนของ UASB ลดลงจาก 61- 36.7% และ 75 - 38.3% ตามลำดับ เมื่ออัตราการรับภาระสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลงจาก 99.8 - 90.7% เมื่อลดระยะเวลากักเก็บลดลง Karatas และ คณะ ยังอธิบายว่าสภาวะอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ที่สูง ทำให้เกิดกรด (VFA) ขึ้นได้มากในถังไร้อากาศส่งผลทางลบกับการบำบัดซีโอดีเนื่องจากเหตุผลที่ทำให้ระบบไร้อากาศยังไม่มีเสถียรภาพ แต่พบว่าไม่มีผลต่อการบำบัดสีเนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (acid producing bacteria) มีส่วนต่อการบำบัดสี

You S. J. และ Teng J. Y. (2009) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มสี 1,000 เอดีเอ็มไอใช้น้ำตาล 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นแหล่งพลังงาน โดยใช้กระบวนการ SBR ร่วมกับ MBR จากการทดลองพบว่าซีโอดีและค่าสีที่เหลือของระบบไร้อากาศและเติมอากาศคือ 23.8 ± 8.4 และ 7.9 ± 2.3 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 264.2±49.9 และ 169.0±22.4 เอดีเอ็มไอคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีของระบบไร้อากาศ และเติมอากาศคือ 92.3 และ 74.6% และ 5.2 และ 9.1% ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและค่าสีของทั้งระบบคือ 84 และ 97% ตามลำดับ

2.11 การนำพารามิเตอร์จากเอกสารอ้างอิงมาใช้ในงานวิจัยนี้

1. น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้คือน้ำเสียสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (อ้างอิงจาก Van der Zee และ Villaverde, 2005)
2. พื้นที่ผิวตัวกลางควรมีค่ามากกว่า 100 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งตัวกลางที่ใช้เป็นของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร (Metcalf และ Eddy, 2004)

ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter)

อัตราการไหลน้ำเข้าถัง = 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง

ระยะเวลากักเก็บ = 48 ชั่วโมง (อ้างอิงจาก Van der Zee และ Villaverde (2005) มีระยะเวลากักเก็บ = 3 - 30 ชั่วโมง)

ปริมาตรถัง ; v

v = อัตราการไหลน้ำเข้าถัง x ระยะเวลากักเก็บ

= 0.5 x 48

= 24 ลิตร (0.024 ลูกบาศก์เมตร)

กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางถัง = 0.2 เมตร

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัด = ¶ $(0.2)^2/4$

= 0.031 ตารางเมตร

ความสูงของน้ำ = 0.76 เมตร

เลือกถังสูง 1 เมตร = 0.031 ตารางเมตร. x 1 เมตร

= 0.031 ลูกบาศก์เมตร

คำนวณหาขนาดของท่อน้ำออก

Qmax < 44 ลิตรต่อวินาที

ดังนั้น Weir loading rate = 248 ลูกบาศก์เมตรต่อเมตรต่อวัน

Qmax = 0.036 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

Weir Length = 0.036/248

= 1.45×10^{-4} เมตร

ดังนั้น เลือกใช้ท่อขนาด 1 นิ้ว

Weir Length ของท่อ 1 นิ้ว = 0.015 เมตร

อัตราการรับภาระสารอินทรีย์ของถังกรองไร้อากาศ (COD loading Rate)

20,000 มิลลิกรัมซีโอดี/ลิตร	=	10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน
10,000 มิลลิกรัมซีโอดี/ลิตร	=	5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน
5,000 มิลลิกรัมซีโอดี/ลิตร	=	2.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน
2,000 มิลลิกรัมซีโอดี/ลิตร	=	1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน
1,000 มิลลิกรัมซีโอดี/ลิตร	=	0.5 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

จากค่าการออกแบบถังกรองไร้อากาศพบว่าอัตราการรับภาระสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 0.5 – 10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงตามคำแนะนำจากหนังสือ Metcalf และ Eddy (2004) แนะนำคือ 0.5 -15 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ถังโปรยกรอง (Trickling Filter)

ประมาณประสิทธิภาพการบำบัดของถังกรองไร้อากาศที่ 60 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นจากความเข้มข้นน้ำเข้า 20,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร จะเหลือซีโอดีเท่ากับ 8,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

ประมาณให้บีโอดีมีค่าประมาณ 0.5 เท่าของค่าซีโอดีโดยประมาณค่าจากลักษณะน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ดังนั้นค่าบีโอดีที่เข้าถังโปรยกรองเท่ากับ 4,000 มิลลิกรัมบีโอดีต่อลิตร

อัตราการไหลน้ำเข้าถัง	=	0.012 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (0.5 ลิตรต่อชั่วโมง)
เลือกอัตราการรับภาระสารอินทรีย์	=	3 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (OLR = 0.6 – 3.2 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน อ้างจาก Metcalf และ Eddy, 2004)

บีโอดี x อัตราไหลน้ำเข้า = 4 x 0.012

= 0.048 กิโลกรัมบีโอดีต่อวัน

ปริมาณถังโปรยกรอง = 0.048 / อัตราการรับภาระสารอินทรีย์

= 0.048 / 3

= 0.016 ลูกบาศก์เมตร

กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.2 เมตร

ดังนั้น พื้นที่ผิว = 0.0314 ตารางเมตร

ความสูงตัวกลาง = 0.016 / 0.0314

= 0.51 เมตร ~ 1 เมตร

Recirculation Ratio Wetting = 0.5 ลิตรต่อตารางเมตรต่อวินาที

= 0.5 x 0.0314

= 0.0157 ลิตร/วินาที

= 57 ลิตรต่อชั่วโมง

$\geq$ 60 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการรับภาระสารอินทรีย์ของถังกรองไร้อากาศ (BOD loading Rate)

ที่ซีโอดี 20,000 = 3 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ที่ซีโอดี 10,000 = 1.5 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ที่ซีโอดี 5,000 = 0.75 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ที่ซีโอดี 2,000 = 0.6 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ที่ซีโอดี 1,000 = 0.3 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

จากค่าการออกแบบถังโปรยกรองพบว่าอัตราการรับภาระสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 0.3 – 3 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงตามคำแนะนำจากหนังสือ Metcalf และ Eddy (2004) แนะนำคือ 0.6 – 3.2 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

กระบวนการไร้อากาศที่มีน้ำตาลเป็นแหล่งพลังงาน ใช้แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เป็นแหล่งไนโตรเจน และมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน สามารถแสดงเป็นปริมาณสารสัมพันธ์ทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ได้จากตามสมการ (2.3)

$$C_{12}H_{22}O_{11} + HCO_3^- + NH_4^+ \longrightarrow 4.75CO_2 + 3.75CH_4 + C_5H_7O_2N + 3H_2O \qquad (2.3)$$

การเติมด่างเพื่อรักษาค่าพีเอชให้เหมาะสมกับสภาวะไร้อากาศต้องใช้ในปริมาณที่พอเหมาะกับปริมาณกรดที่เกิดจากกระบวนการหมักในขั้นตอนไร้อากาศ สมการที่ 2.4 แสดงถึงปริมาณกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นเทียบกับปริมาณน้ำตาลที่ใช้ และสมการ 2.5 แสดงการแตกตัวของโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ใช้เป็นด่างให้กับระบบ

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \longrightarrow 6\ CH_3COOH$$

$$CH_3COOH \longleftrightarrow CH_3COO^- + H^+ \qquad (2.4)$$

$$NaHCO_3^- \longrightarrow Na^+ + HCO_3^-$$

$$HCO_3^- + H_2O \longleftrightarrow H_2CO_3 + OH^- \qquad (2.5)$$

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อุณหภูมิห้องโดยมีรายละเอียดงานวิจัยไว้ดังนี้

งานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

3.1.1 ขั้นตอนการทดลองชุดที่ 1

ทำการศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลที่ 500, 1,000, 2,000, 5,000, 10,000 และ 20,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ต่อการลดลงของสีและค่าซีโอดีที่ย่อยสลายยากในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีในกระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกแบบมีตัวกลาง

3.1.2 ขั้นตอนการทดลองชุดที่ 2

ทำการศึกษาผลของการเวียนน้ำจากถังเติมอากาศกลับเข้าถังไร้อากาศที่อัตราส่วน ของน้ำที่เวียนต่อปริมาณน้ำเสียเข้าของถังเติมอากาศแบบมี ตัวกลาง คือ 0, 0.5, 1, 2 และ 5 เท่า

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ตู้อบความร้อนที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Drying Oven)
- ขวดกรอง (Membrane Filter Funnel) ขนาด 300 มิลลิลิตร
- กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
- บีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

- ปิเปต ขนาด 5 มิลลิลิตร
- ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
- บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
- กระบอกตวง ขนาด 500 มิลลิลิตร
- หลอดทดลอง
- เครื่องชั่งชนิดละเอียด
- เทอร์โมมิเตอร์แบบแท่ง
- เครื่อง Spectrophotometer
- เครื่อง pH meter
- เครื่องสูบน้ำ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง และ 60 ลิตรต่อชั่วโมง

3.2.2 **สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง**

- สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
- สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)
- สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferous Ammonium Sulphate)
- สารละลายเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์ (Ferroin Indicator)
- แอมโมเนียมครอไรด์ (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)
- น้ำตาลทรายขาว
- สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Reactive black 5)
- โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)

วัสดุตัวกลาง

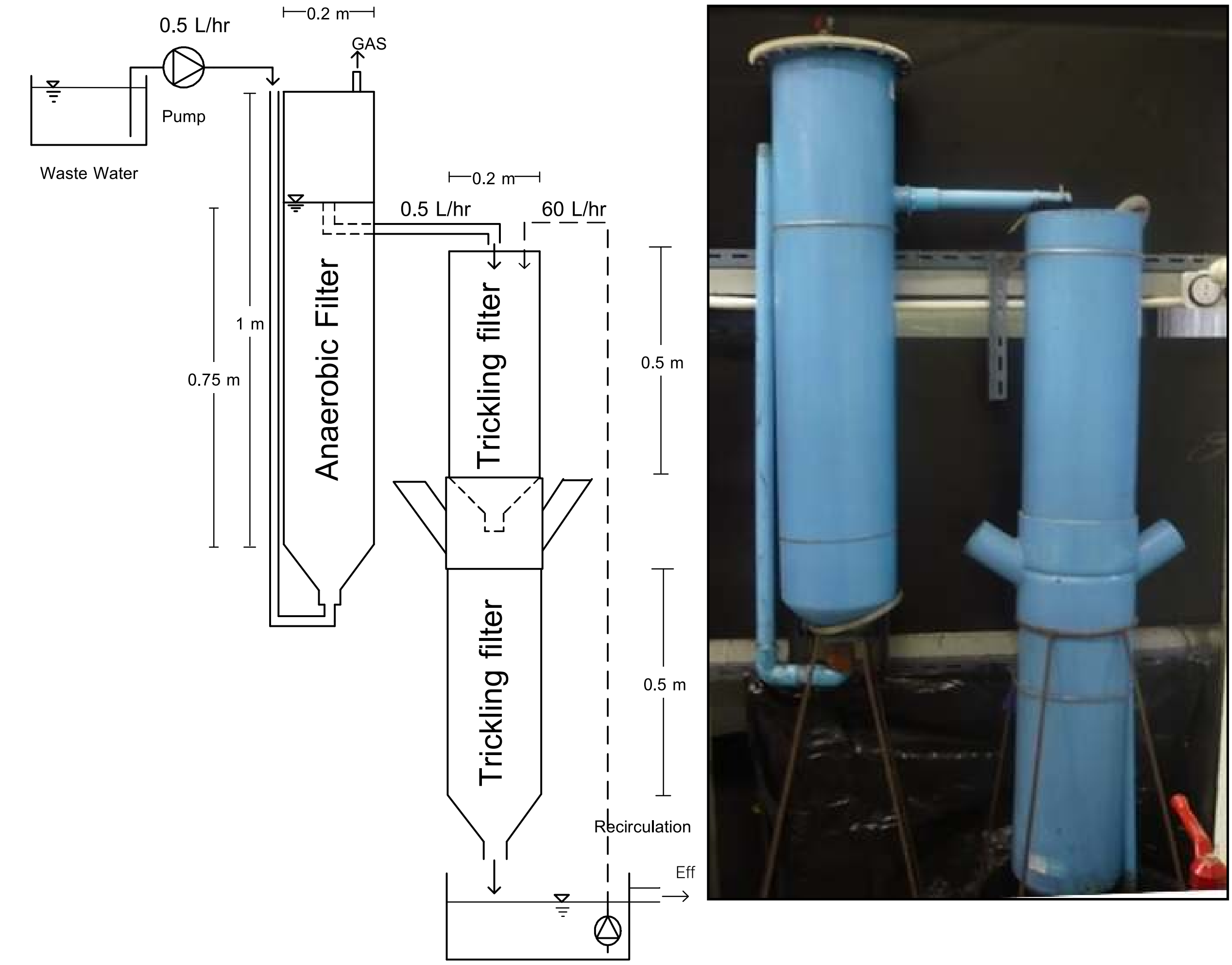
ตัวกลางที่ใช้ในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองเป็นตัวกลางพลาสติกของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 ซม สูง 2 ซม โดยใส่ในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองปริมาณ 230 และ 340 ชิ้น

รูปที่ 3.1 ตัวกลางพลาสติกรุ่น R-190 Random Flow Media

ถังปฏิกิริยา

กระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก ใช้ถังกรองไร้อากาศเป็นทรงกระบอกป้อนน้ำเสียจากด้านล่างขึ้นบน (Upflow Anaerobic filter) ขนาด 31 ลิตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร สูง 1 เมตร ขนาดท่อน้ำเข้า และออกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ 0.025 เมตร (1 นิ้ว) มีอัตราไหลเข้าของน้ำเสียเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลากักเก็บน้ำเสียคือ 48 ชั่วโมง คิดเป็นอัตรารับภาระสารอินทรีย์ระหว่าง 0.5-10 กิโลกรัม ซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ถังโปรยกรองที่ใช้มีความสูงของชั้นตัวกลางเท่ากับ 1 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.2 เมตร มีการเวียนน้ำในถังโปรยกรองมากกว่าหรือเท่ากับ 60 ลิตรต่อชั่วโมง มีอัตราการไหลน้ำเข้าเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง ออกแบบระบบให้มีอัตรารับภาระสารอินทรีย์ระหว่าง 0.3 - 3 กิโลกรัมบีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองที่ใช้ในการทดลอง

3.3 วิธีการทดลอง

น้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้น้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน ใช้แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) เป็นแหล่งไนโตรเจน และไดโปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) เป็นแหล่งฟอสเฟต ที่อัตราส่วน 100:5:1 ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.8 -7.5 โดยเติมผงโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ในน้ำเสียขาเข้าระบบที่ปริมาณแตกต่างกันขึ้นกับค่าซีโอดีเริ่มต้น น้ำตาลที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานเติมในปริมาณ 20 10 5 2 1 และ 0.5 กรัมต่อลิตร คิดเป็นค่าซีโอดี 20,000 10,000 5,000 2,000 1,000 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยคงความเข้มข้นสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นหน่วยเอดีเอ็มไอ คือ 7,192 (กราฟมาตรฐานภาคผนวก ค.4) (จากการทดลองพบว่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าซีโอดี 76 มิลลิกรัมต่อลิตร)

หัวเชื้อกระบวนการแอนแอโรบิก และแอโรบิก

หัวเชื้อที่ใช้ในกระบวนการแอนแอโรบิก และแอโรบิก นำมาจากบริษัท แซนอี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด จากถังไร้อากาศ โดยหัวเชื้อแบ่งเป็น 2 ส่วน คือนำหัวเชื้อมาเติมอากาศแช่กับตัวกลางเตรียมสำหรับก่อนใส่ถังโปรยกรอง และนำตัวกลางมาแช่ไว้กับหัวเชื้อในสภาวะไร้อากาศเตรียมสำหรับถังกรองไร้อากาศ โดยทั้ง 2 ส่วนใส่น้ำเสียสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และให้น้ำตาลเป็นแหล่งพลังงานที่ความเข้มข้น 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะกับตัวกลาง

3.3.1 การทดลองที่ 1

ชุดการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาหาปริมาณน้ำตาลที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิก โดยแปรผันปริมาณน้ำตาลที่เติมในน้ำเสียเพื่อให้ได้ความเข้มข้นประมาณ 500, 1,000 2,000 5,000 10,000 และ 20,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

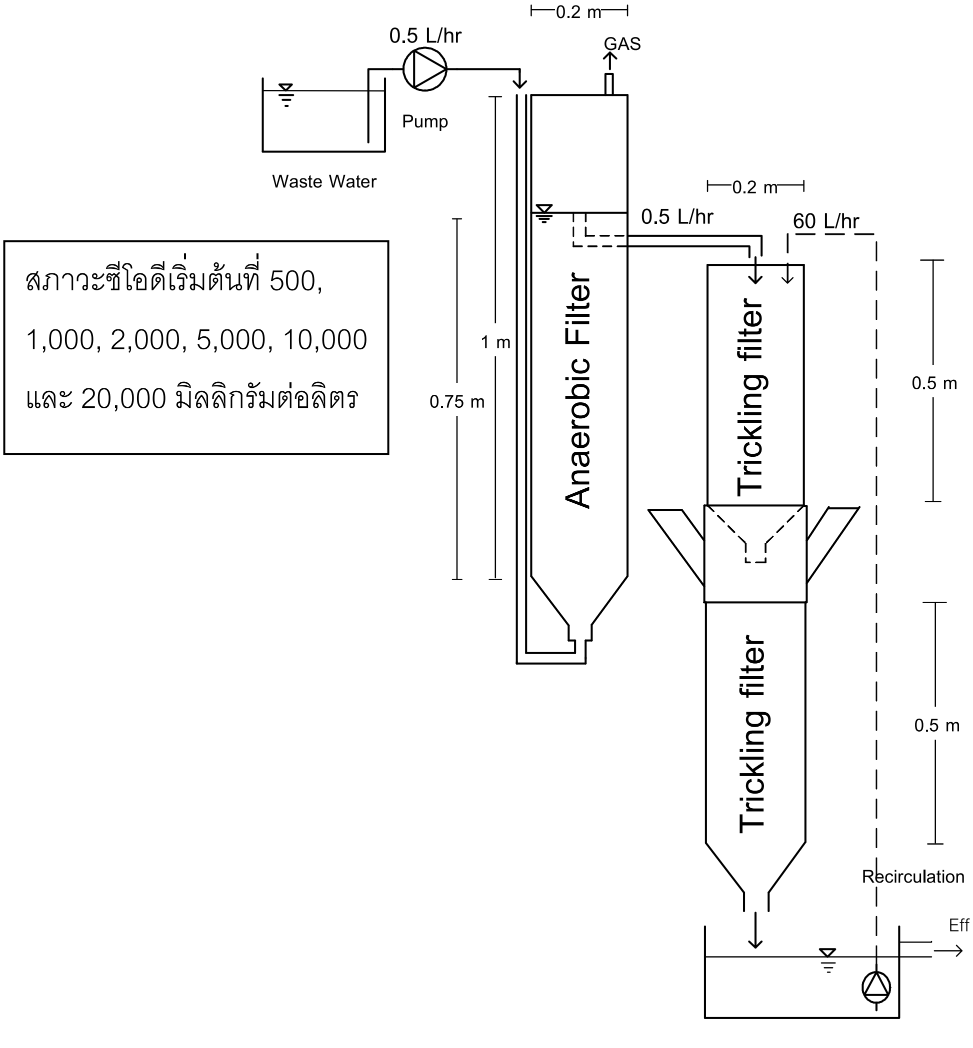
1) **ตัวแปรที่ทำการศึกษา**

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในชุดการทดลองที่ 1

ตัวแปรอิสระ	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ปริมาณน้ำตาล	- 500, 1,000, 2,000, 5,000, 10,000 และ 20,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. อัตราการไหลน้ำเข้า	- 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง
2. ระยะเวลากักเก็บน้ำในถังแอนแอโรบิก (HRT;τ)	- 48 ชั่วโมง
3. ปริมาตรตัวกลางในถังกรองไร้อากาศ	- 0.024 ลูกบาศก์เมตร
4. ปริมาตรตัวกลางในถังโปรยกรอง	- 0.030 ลูกบาศก์เมตร
5. น้ำเสียสังเคราะห์	- ปริมาณสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. อัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง	- 60 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	**วิธีวิเคราะห์**
1. ค่าพีเอช	- พีเอชมิเตอร์
2. ซีโอดี	- วิธีรีฟลักซ์ปิดแบบไตเตรชัน
3. สี	- เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
4. MLSS	- กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C อบด้วยตู้อบที่ 105 $^{\circ}$ซ และนำไปชั่ง

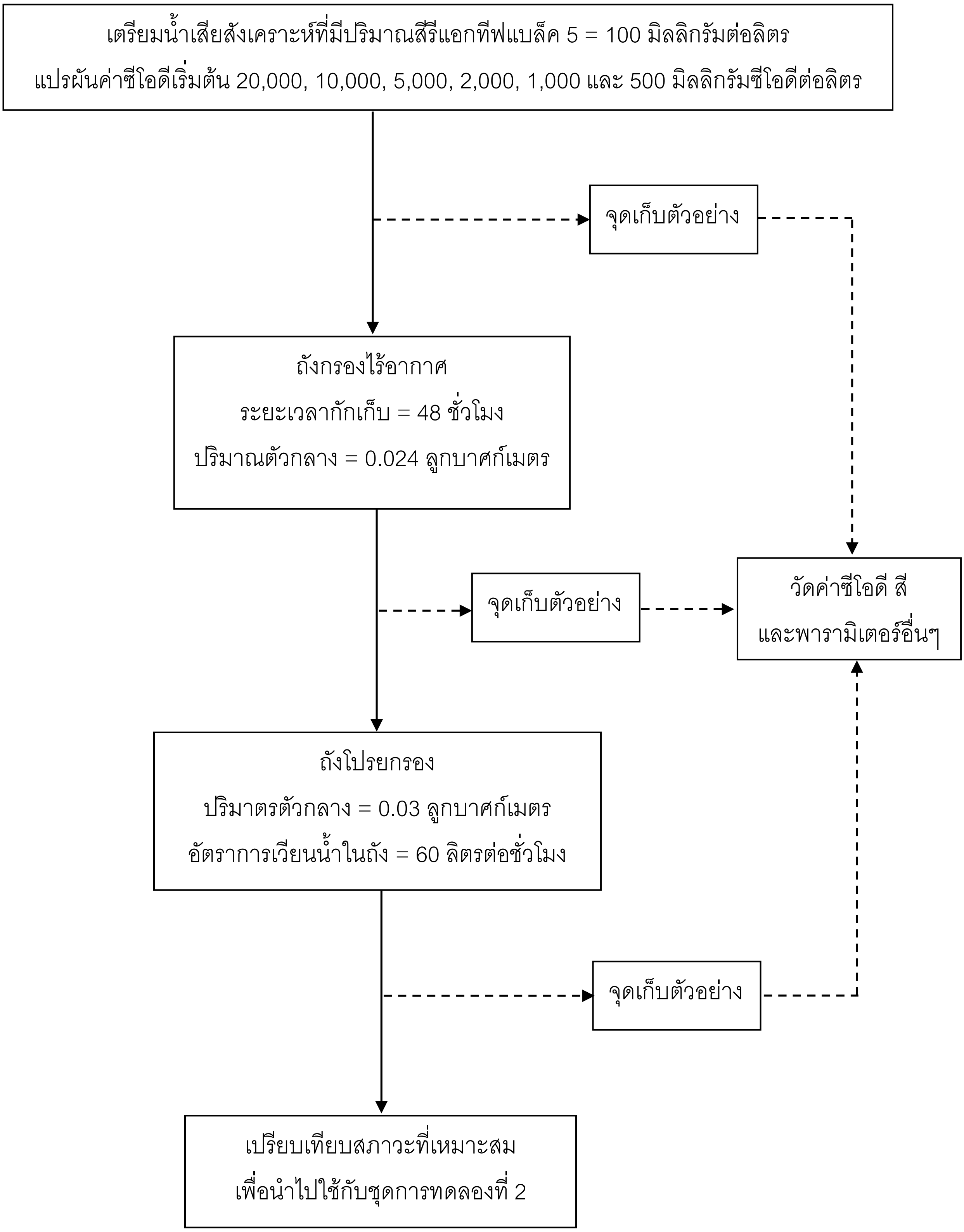
2) ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองชุดที่ 1 ใช้กระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก โดยการทดลองชุดนี้เตรียมน้ำเสียใช้ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นที่ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ป้อนน้ำเสียเข้าถังกรองไร้อากาศจากล่างขึ้นบนที่อัตราไหล 12 ลิตรต่อวัน น้ำออกจากถังกรองไร้อากาศจะไหลเข้าสู่ถังโปรยกรองจากบนลงล่างที่มีอัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรองมากกว่าหรือเท่ากับ 60 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อระบบสามารถบำบัดค่าสีและค่าซีโอดีได้คงที่แล้วจึงการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นเป็น 10,000 5,000 2,000 1,000 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองนี้มีจุดเก็บตัวอย่าง 3 ที่คือ น้ำเสียเข้าถังกรองไร้อากาศ น้ำไหลออกจากถังกรองไร้อากาศ และน้ำทิ้งจากถังโปรยกรอง เพื่อนำมาตรวจวัดค่าสี ซีโอดี พีเอชและเอ็มแอลเอสเอส แล้วนำค่าแต่ละสภาวะซีโอดีเริ่มต้นมาเปรียบเทียบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปใช้กับการทดลองที่ 2 ต่อไป



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองเพื่อหาสภาวะซีโอดีเริ่มต้นที่เหมาะสม

3) แผนผังชุดการทดลองที่ 1



รูปที่ 3.4 แผนผังสรุปการหาสภาวะซีโอดีเริ่มต้นที่เหมาะสม

3.3.2 ชุดการทดลองที่ 2

ชุดการทดลองที่ 2 ศึกษาผลของการเวียนน้ำจากถังเติมอากาศกลับเข้าถังไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบวนการแอนแอโรบิก-แอโรบิก ที่อัตราส่วนของน้ำที่เวียนต่อปริมาณน้ำเสียเข้าของถังเติมอากาศแบบมีตัวกลาง คือ 0, 0.5, 1, 2 และ 5 เท่า เนื่องจากการเวียนน้ำสามารถทำให้น้ำเสียสัมผัสจุลินทรีย์ที่เกาะบนตัวกลางได้มากขึ้น

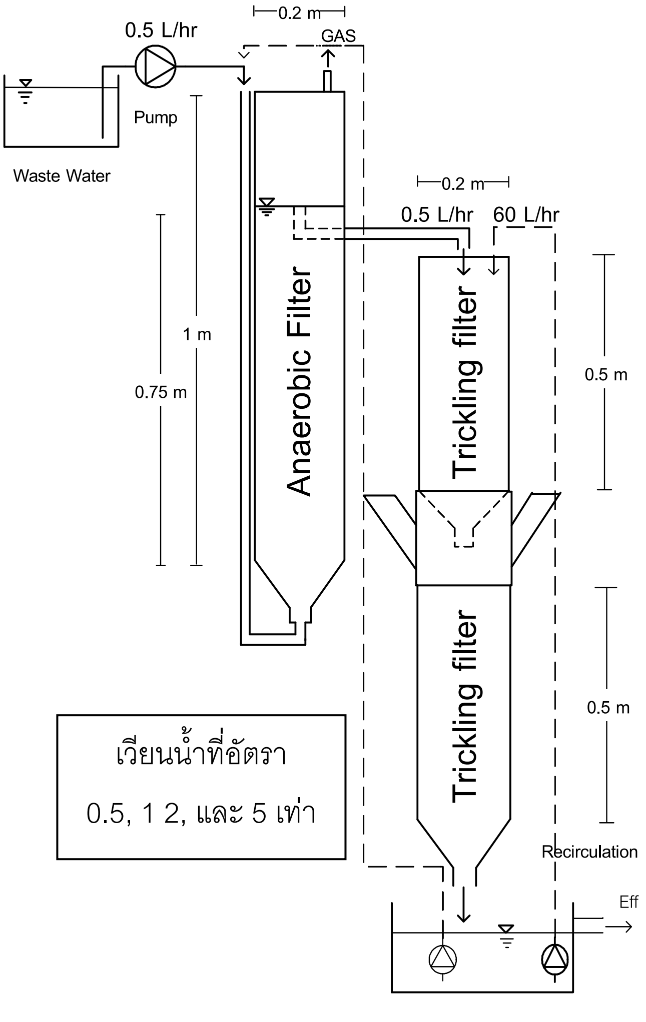
1) ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในชุดการทดลองที่ 2

ตัวแปรอิสระ	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. อัตราส่วนของน้ำที่เวียนต่อปริมาณน้ำเสียเข้าของถังเติมอากาศแบบมีตัวกลาง	- 0, 0.5, 1, 2 และ 5 เท่า
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ความเข้มข้นน้ำตาล	- จากผลการทดลองชุดที่ 1
2. อัตราการไหลน้ำเข้า	- 0.5 ลิตรต่อชั่วโมง
3. ระยะเวลากักเก็บน้ำในถังกรองไร้อากาศ (HRT;τ)	- 48 ชั่วโมง
4. ปริมาตรตัวกลางในถังกรองไร้อากาศ	- 0.024 ลูกบาศก์เมตร
5. ปริมาตรตัวกลางในถังโปรยกรอง	- 0.03 ลูกบาศก์เมตร
6. น้ำเสียสังเคราะห์	- ปริมาณสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
7.อัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง	- 60 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	**วิธีวิเคราะห์**
1. ค่าพีเอช	- พีเอชมิเตอร์
2. ซีโอดี	- วิธีรีฟลักซ์ปิดแบบไตเตรชัน
3. สี	- เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
4. MLSS	- กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C อบด้วยตู้อบที่ 105 °ซ และนำไปชั่ง

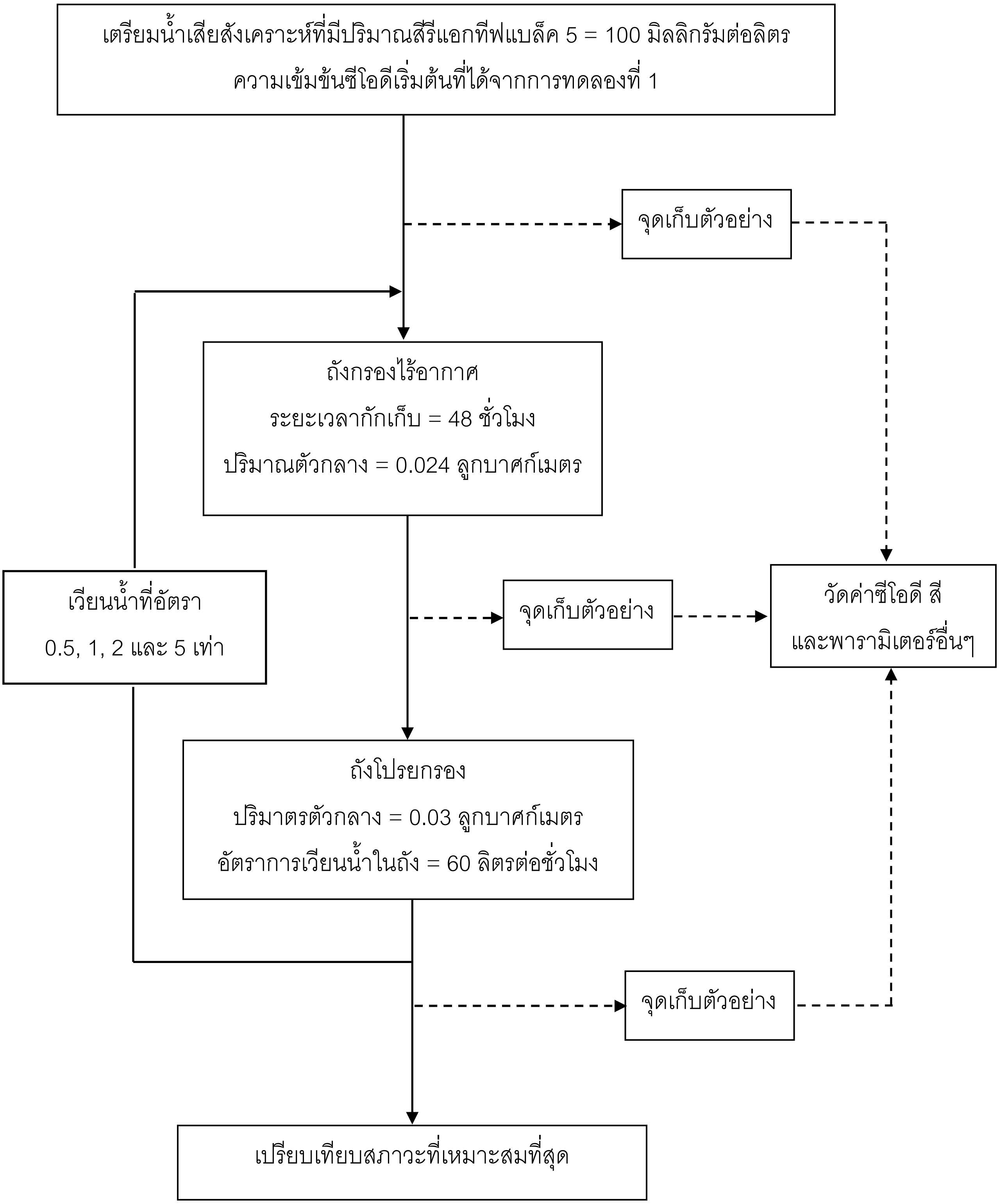
2) ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองชุดที่ 2 ใช้กระบวนการบำบัดแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก โดยการทดลองชุดนี้เตรียมน้ำเสียใช้ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นจากชุดการทดลองที่ 1 และความเข้มข้นสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ป้อนน้ำเสียเข้าถังกรองไร้อากาศจากล่างขึ้นบนที่อัตราไหล 12 ลิตรต่อวัน น้ำออกจากถังกรองไร้อากาศจะไหลเข้าสู่ถังโปรยกรองจากบนลงล่างที่มีอัตราการเวียนน้ำในถังโปรยกรองมากกว่าหรือเท่ากับ 60 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการเวียนน้ำจากถังโปรยถังกรองกลับเข้ากรองไร้อากาศที่อัตรา 0.5 เท่าของน้ำเสียขาเข้าระบบ เมื่อระบบสามารถบำบัดค่าซีโอดีและค่าสีจนคงที่แล้ว จึงทำการเปลี่ยนอัตราการเวียนน้ำเป็น 1 2 และ 5 เท่า การทดลองนี้มีจุดเก็บตัวอย่าง 3 ที่คือ น้ำเสียเข้าถังกรองไร้อากาศ น้ำไหลออกจากถังกรองไร้อากาศ และน้ำทิ้งจากถังโปรยกรอง เพื่อนำมาตรวจวัดค่าสี ซีโอดี พีเอชและเอ็มแอลเอสเอส แล้วนำค่าแต่ละสภาวะซีโอดีเริ่มต้นมาเปรียบเทียบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.5 การหาอัตราการเวียนน้ำที่เหมาะสม

3) แผนผังชุดการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.6 แผนผังสรุปการหาอัตราการเวียนน้ำที่เหมาะสม

3.4 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์

ความถี่ของการเก็บตัวอย่างอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 3.3 ความถี่ของพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการเก็บตัวอย่าง	จุดเก็บตัวอย่าง
ซีโอดี	Close Reflux Method	2-3 ครั้งต่อสัปดาห์	1. ก่อนเข้าถังไร้อากาศ 2. ก่อนเข้าถังเติมอากาศ 3. หลังออกจากถังเติมอากาศ
พีเอช	พีเอชมิเตอร์	2-3 ครั้งต่อสัปดาห์	1. ก่อนเข้าถังไร้อากาศ 2. ก่อนเข้าถังเติมอากาศ 3. หลังออกจากถังเติมอากาศ
สี	Spectrophotometer	2-3 ครั้งต่อสัปดาห์	1. ก่อนเข้าถังไร้อากาศ 2. ก่อนเข้าถังเติมอากาศ 3. หลังออกจากถังเติมอากาศ
MLSS	กรองด้วย GF/C แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 °ซ	2-3 ครั้งต่อสัปดาห์	1. ก่อนเข้าถังไร้อากาศ 2. ก่อนเข้าถังเติมอากาศ 3. หลังออกจากถังเติมอากาศ

3.5 วิธีการการวัดสี

การเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปวัดค่าสีมีขั้นตอนดังนี้ คือ นำตัวอย่างน้ำไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C 0.47 ไมครอน ก่อนแล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน จากนั้นนำตัวอย่าง ที่เตรียมแล้วไปหาค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอและมิลลิกรัมต่อลิตร ดังนี้

1. ทำการวัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอโดยนำตัวอย่างที่เตรียมไปวัดค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิทแทนซ์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร วัดทุกๆความยาวคลื่น 10 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาเป็นค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (Allen และคณะ, 1973)

2. ทำการวัดสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร โดยนำตัวอย่างที่เตรียมไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 601 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณกลับเป็นค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรจากกราฟมาตรฐาน (กราฟมาตรฐานภาคผนวก ค)

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหมาะสมต่อการทำให้เกิดการย่อยสลายของสีและค่าซีโอดีที่ย่อยสลายยาก

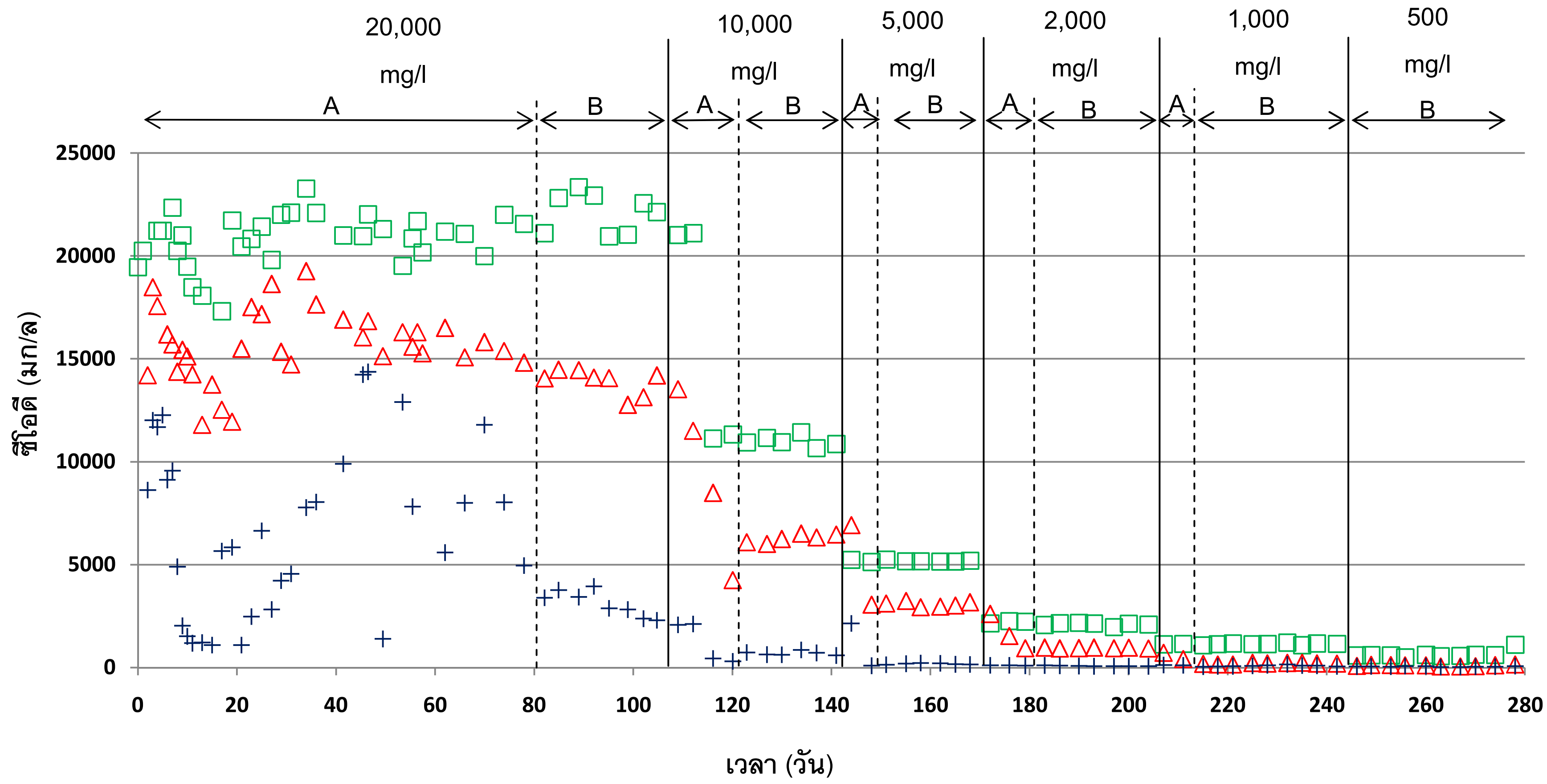
4.1.1 ค่าซีโอดี (COD)

การทดลองตอนที่ 4.1 ระยะเวลาในการเดินระบบ 275 วัน ใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มเดินระบบ (start-up) โดยใช้ความเข้มข้นน้ำตาล 20,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร เวลาเริ่มระบบ 82 วัน จนประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีมีค่าคงที่ (steady-state) จึงทำการเปลี่ยนความเข้มข้นซีโอดีเป็น 10,000 5,000 2,000 1,000 และ 500 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

การทดลองเริ่มเดินระบบน้ำเสียเข้าระบบที่ความเข้มข้นน้ำตาลในช่วง 20,869±1,379 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าช่วงปรับตัวค่าซีโอดีเมื่อผ่านถังกรองไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 15,678±1,728 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำที่ออกจากถังโปรยกรองมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 6,770±4,155 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นว่าค่าซีโอดีของน้ำที่ออกจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีค่าซีโอดีสูงและไม่คงที่ เนื่องจากระบบสามารถบำบัดซีโอดีได้น้อยอาจเพราะเป็นช่วงปรับตัวของเชื้อจุลินทรีย์เข้ากับน้ำเสียใหม่ แต่เมื่อเดินระบบจนถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดซีโอดีคงที่แล้ว ค่าซีโอดีเหลือเพียง 13,903±618 และ 3,117±613 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะนี้ระบบคงที่ 23 วัน จึงเปลี่ยนค่าซีโอดีเริ่มต้นเป็น 11,004±264 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าระบบใช้เวลาปรับตัวกับสภาวะใหม่ประมาณ 15 วัน จึงทำให้ระบบสามารถบำบัดซีโอดีได้คงที่โดยถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดซีโอดีจนเหลือ 6,276±196 และ 693±97 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะนี้ระบบคงที่ 21 วัน จากนั้นทำการเปลี่ยนสภาวะความเข้มข้นซีโอดีเป็น 5,175±39 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าระบบใช้เวลา 1 อาทิตย์ ในการปรับตัวเพื่อทำให้ระบบบำบัดซีโอดีได้คงที่ โดยถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดซีโอดีจนเหลือ 3,074 ± 109 และ 170 ± 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะนี้ระบบคงที่ 20 วัน ทำการเปลี่ยนสภาวะความเข้มข้น ซีโอดีเป็น

2,105±71 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าระบบใช้ระยะเวลาในการปรับตัวกับสภาวะใหม่ประมาณ 20 วัน จึงทำให้ระบบสามารถบำบัดซีโดอีได้คงที่โดยถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดซีโอดีจนเหลือ 950±18 และ 81±15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะนี้ระบบคงที่ 21 วัน ทำการเปลี่ยนสภาวะความเข้มข้นซีโอดีเป็น 1,147±40 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าระบบใช้เวลา 11 วัน ในการปรับตัวเพื่อทำให้ระบบบำบัดซีโอดีได้คงที่โดยถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดซีโอดีจนเหลือ 196±27 และ 88±35 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะนี้ระบบคงที่ 27 วัน และเปลี่ยนสภาวะความเข้มข้นซีโอดีเป็น 587±40 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าระบบสามารถบำบัดซีโอดีได้คงที่โดยไม่ต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวกับสภาวะใหม่ โดยถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดซีโอดีจนเหลือ 96±25 และ 50±15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะนี้ระบบคงที่ 27 วัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าระบบใช้ระยะเวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะซีโอดีเริ่มต้นใหม่น้อยลงเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น โดยที่ซีโอดีเริ่มต้น 2,000 – 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบสามารถบำบัดค่าซีโอดีจนผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงาน คือต่ำกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งระบบสามารถบำบัดค่าซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพและค่อนข้างคงที่ ดังที่แสดงตามรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีเทียบกับระยะเวลาที่ซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ □ แสดงถึงค่าซีโอดีน้ำเสียขาเข้า Δ แสดงถึงค่าซีโอดีน้ำออกจากถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงซีโอดีน้ำออกจากถังโปรยกรอง

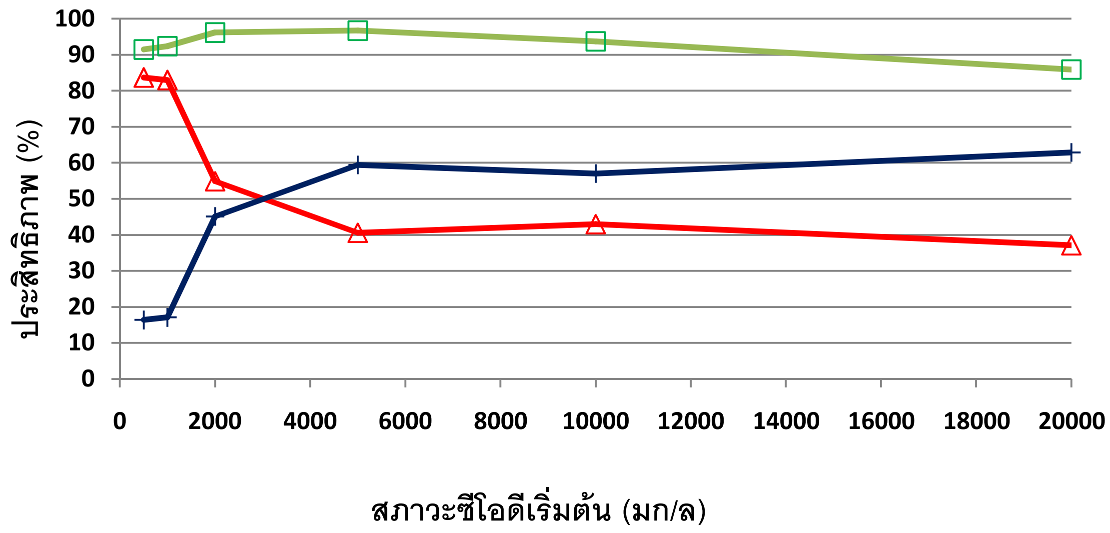


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีเทียบกับเวลาการทดลอง

(□ = Influent Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

หมายเหตุ : A หมายถึงช่วงสภาวะปรับตัว B หมายถึงช่วงสภาวะคงที่

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบไร้อากาศตามด้วยเติมอากาศแบบมีตัวกลางสามารถบำบัดค่าซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพทุกสภาวะความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้วประสิทธิภาพของระบบที่ซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกันทั้งหมดคือ 97 – 86 % โดยระบบสามารถบำบัดซีโอดีได้สูงสุดถึง 97 % ที่สภาวะซีโอดีเริ่มต้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของถังกรองไร้อากาศที่ ซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีแนวโน้มในการการบำบัดซีโอดีต่ำลงคือ 84 – 37% แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของถังโปรยกรองที่ซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีแนวโน้มในการการบำบัดซีโอดีสูงขึ้นคือ 16 – 63 % อาจเป็นเพราะเมื่อถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพสูงขึ้นหรือสามารถบำบัดซีโอดีได้มากขึ้นจึงทำให้มีซีโอดีเหลือเข้าถังโปรยกรองลดลงจึงทำให้ถังถังโปรยกรองมีประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีลดลง ดังแสดงตามรูปที่ 4.2

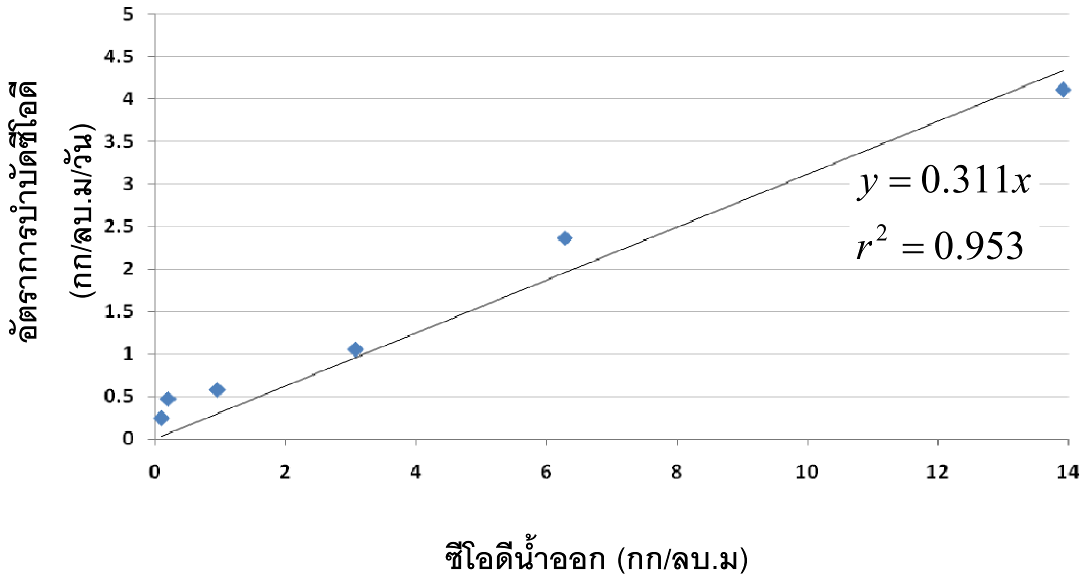


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของแต่ละสภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

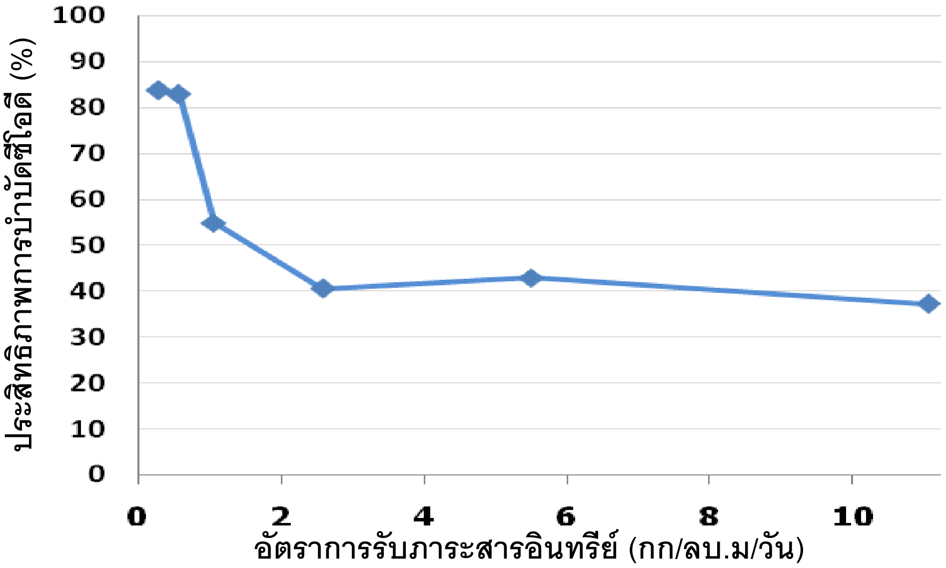
(□ = Anaerobic filter – Trickling filter Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

ที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าถังกรองไร้อากาศมีอัตราการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 0.245 – 4.1 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และยังพบว่าความสัมพันธ์ของอัตราการบำบัดซีโอดีเทียบกับซีโอดีออกของถังกรองไร้อากาศเป็นความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง (1^{st}- order) โดยหาค่า k_s ได้จากค่าความชัน (slope) ของกราฟคือมีค่าเท่ากับ 0.311 ต่อวัน จะเห็นได้ว่าถังกรองไร้อากาศมีอัตราการบำบัดซีโอดีสูงขึ้นตามซีโอดีเริ่มต้น

ดังรูปที่ 4.3 และเมื่อนำค่าอัตราการรับภาระสารอินทรีย์มาหาความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจะพบว่าถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพสูงกว่า 80% ที่อัตราภาระสารอินทรีย์ 0.587 และ 1.146 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ แต่เมื่ออัตราการภาระสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีมีค่าต่ำลงและลดลงเหลือเพียง 40% ที่อัตราการภาระสารอินทรีย์ 2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เป็นต้นไป ดังรูปที่ 4.4

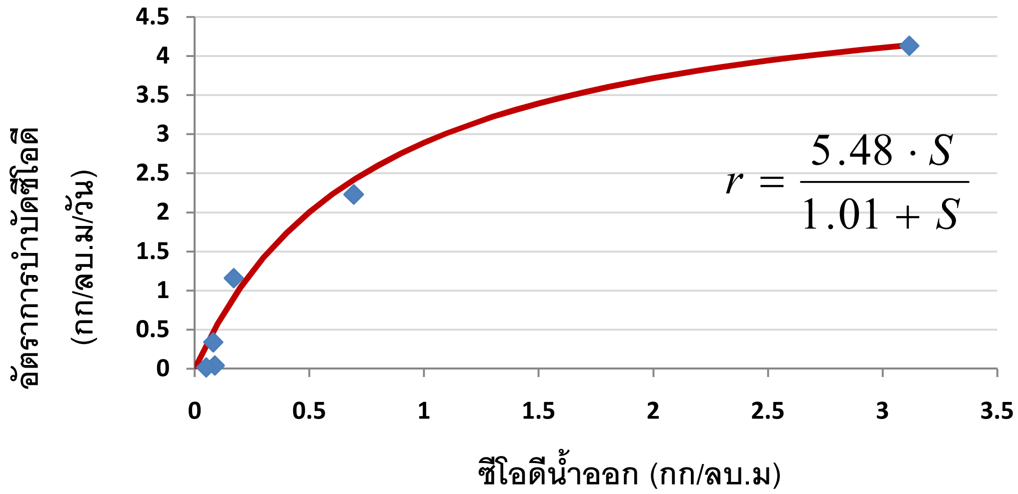


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศเทียบกับซีโอดีน้ำออก

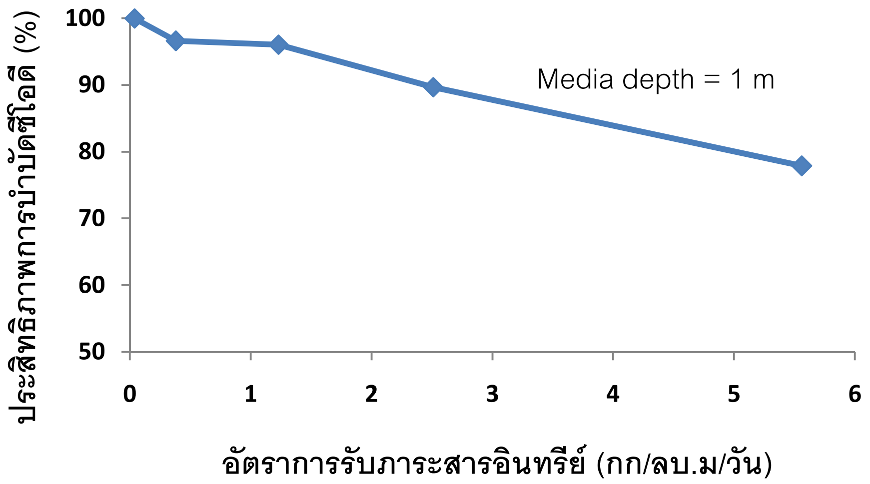


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ของถังกรองไร้อากาศเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

เมื่อพิจารณาถึงอัตราการบำบัดซีโอดีของถังโปรยกรองที่ซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.018 – 4.31 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดซีโอดีเทียบกับซีโอดีออกของถังโปรยกรองเป็นตามสมการของโมโนด (monod equation) ซึ่งมีค่า k_m และ k_s เท่ากับ 5.479±0.726 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และ 1.009±0.339 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร (ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผล SPSS Statistic 17.0 (2008)) จะเห็นได้ว่าถังโปรยกรองมีอัตราการบำบัดซีโอดีสูงขึ้นตามซีโอดีเริ่มต้น ดังรูปที่ 4.5 และเมื่อนำค่าอัตราการรับภาระสารอินทรีย์มาหาความสัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจะพบว่าถังโปรยกรองมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดซีโอดีของถังโปรยกรองเทียบกับซีโอดีน้ำออก



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับภาระสารอินทรีย์ของถังโปรยกรองเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

4.1.2 ค่าสี (Color)

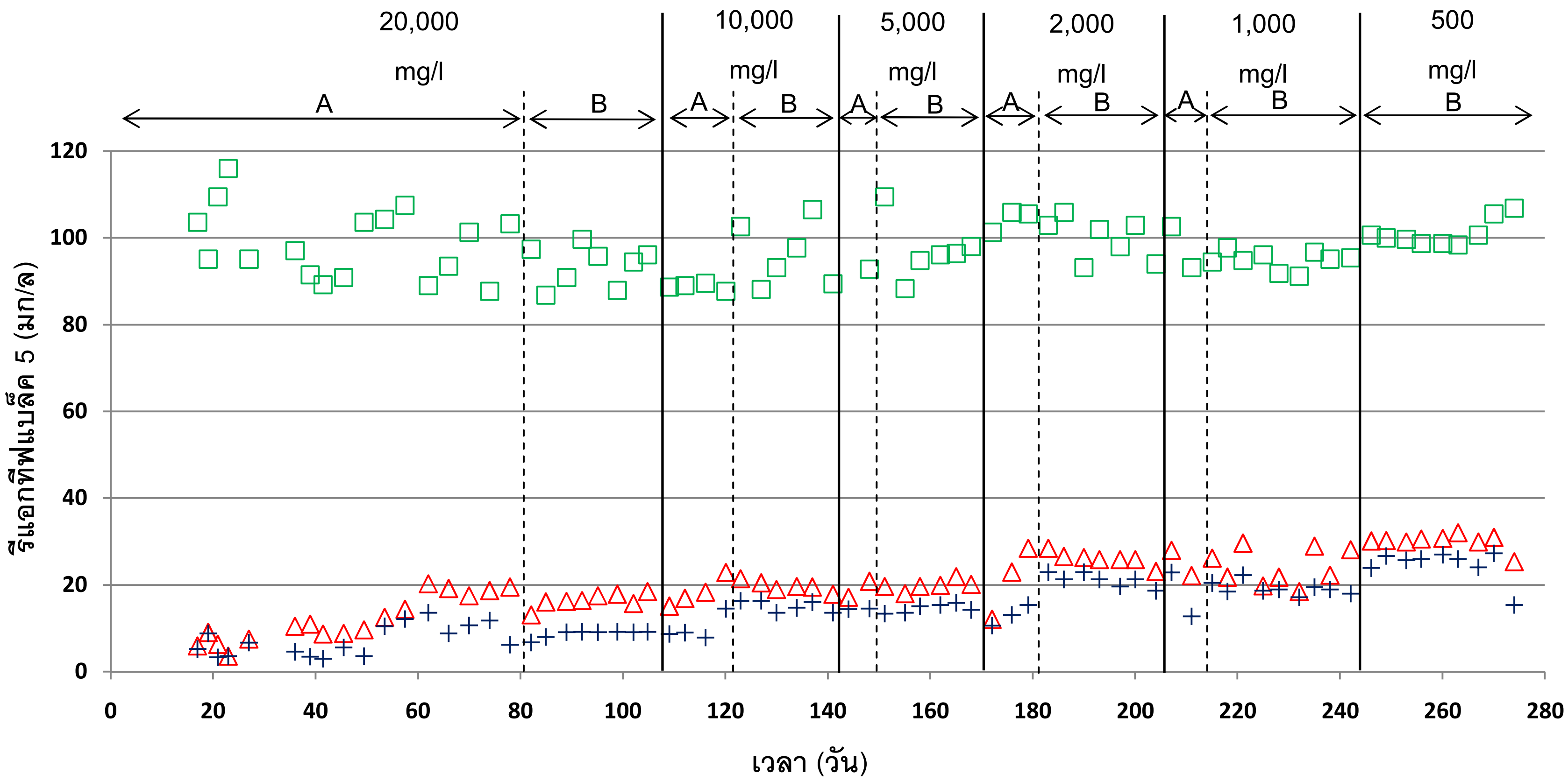
ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ของระบบ ถังกรองไร้อากาศ และถังโปรยกรอง ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรที่ความยาวคลื่น 601 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการวัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เพียงชนิดเดียว และสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (U.S. Federal regulation) ซึ่งเป็นการวัดทุกสีรวมกันที่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร

ผลการทดลองพบว่าถึงแม้ว่าจะอยู่ในช่วงเริ่มต้นระบบที่ค่าซีโอดียังไม่ลดมากนักก็ตาม ถังกรองไร้อากาศและถังเติมอากาศก็ยังสามารถลดสีได้อย่างมากโดยลดสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรลงเหลือเพียง 11±5 และ 7±4 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ซีโอดีเริ่มต้น 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีจนเหลือ 16±2 และ 9±1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ซีโอดีเริ่มต้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีจนเหลือ 20±1 และ 15±1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ซีโอดีเริ่มต้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรจนเหลือ 20±1 และ 15±1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นเป็น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีจนเหลือ 25±2 และ 21±2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นเป็น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีจนเหลือ 24±2 และ 19±2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นเป็น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีจนเหลือ 30±4 และ 25±2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 โดยที่ □ แสดงถึงค่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของน้ำเสียขาเข้า Δ แสดงถึงค่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของน้ำออกจากถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงค่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของน้ำออกจากถังโปรยกรอง

เมื่อพิจารณาถึงค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอพบว่าช่วงเริ่มระบบถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองก็สามารถสามารถลดค่าสีลงเหลือเพียง 1,081 ± 399 และ 1,423 ± 370 ตามลำดับเช่นกัน และที่ซีโอดีเริ่มต้น 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีจนเหลือ 1,242±117 และ 1,129±108 ตามลำดับ ที่ซีโอดีเริ่มต้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีจนเหลือ 1,606±229 และ 1,306±198 ตามลำดับ ที่ซีโอดีเริ่มต้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีจนเหลือ 1,616±299 และ 1,129±263 ตามลำดับ ที่ซีโอดีเริ่มต้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีจนเหลือ 2,118±153 และ 1,462±205 ตามลำดับ ที่ซีโอดีเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถ

บำบัดสีจนเหลือ 1,841±237 และ 1,196±283 ตามลำดับ และที่ซีโอดีเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีจนเหลือ 2,287±368 และ 1,456±247 ตามลำดับดังรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับระยะเวลา โดยที่ □ แสดงถึงค่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของน้ำเสียขาเข้า Δ แสดงถึงค่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของน้ำออกจากถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงค่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของน้ำออกจากถังโปรยกรอง

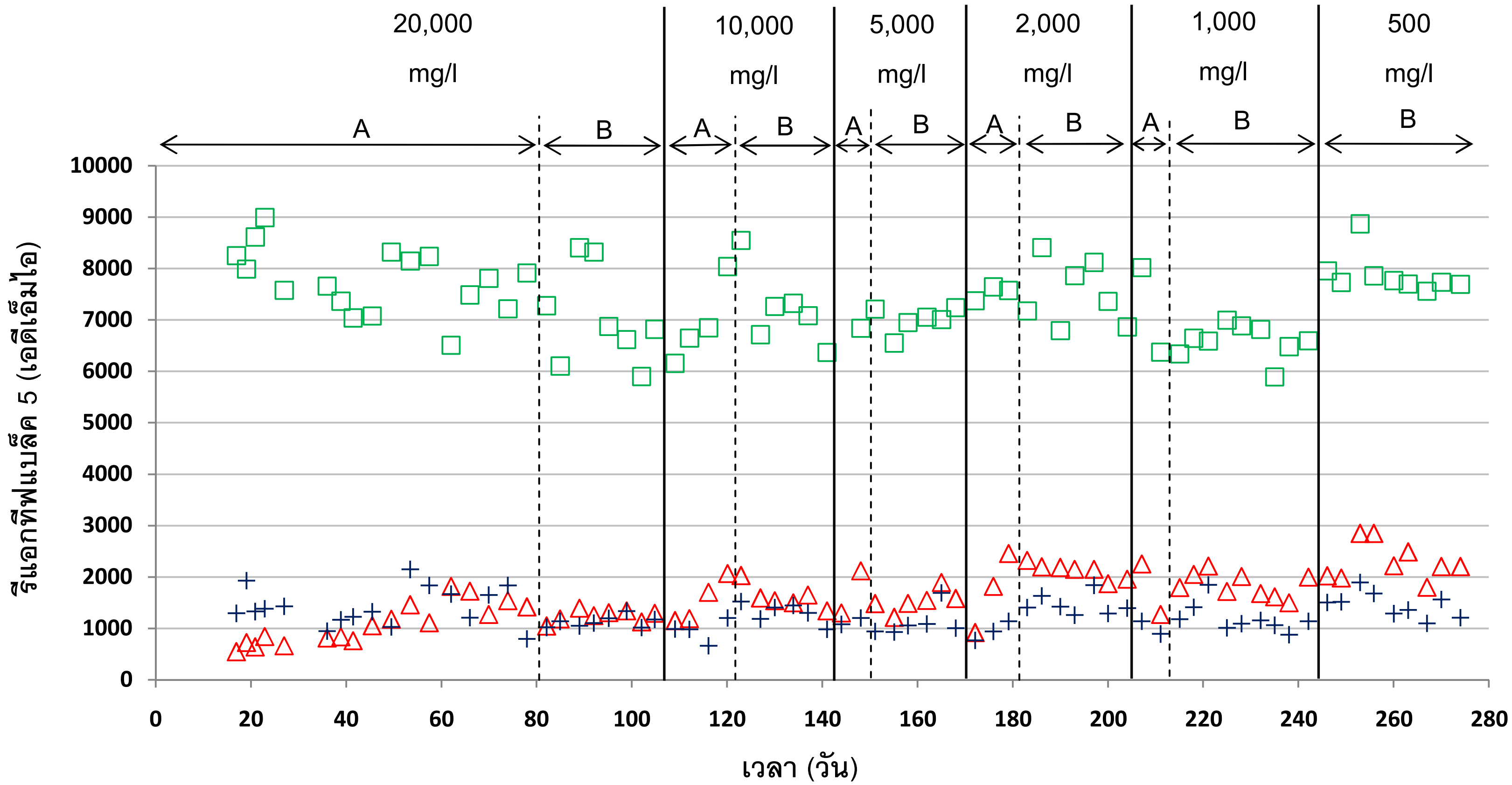
จะเห็นได้ว่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เกือบทั้งหมดลดลงได้ในขั้นตอนไร้อากาศ โดยช่วงเติมอากาศสามารถลดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ลงได้น้อยมาก ทั้งในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรและหน่วยเอดีเอ็มไอ ถึงแม้เป็นช่วงเริ่มต้นระบบที่ซีโอดีลดลงได้น้อยและค่าพีเอชในถังกรองไร้อากาศจะต่ำมาก (~5.5) ก็ตามนั้นแสดงให้เห็นว่าการลดลงของสีในช่วงไร้อากาศเกิดขึ้นในช่วงการหมักกรด (acidogenesis) ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายของ Karatas และ คณะ (2010) ที่อธิบายว่า จุลินทรีย์สร้างกรด (Acid producing bacteria) มีผลต่อการลดลงของสีเช่นกัน และยังพบว่าเมื่อความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นสูงขึ้นระบบสามารถบำบัดค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรได้มากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับระยะเวลา

(□ = Influent △ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

หมายเหตุ : A หมายถึงช่วงสภาวะปรับตัว B หมายถึงช่วงสภาวะคงที่

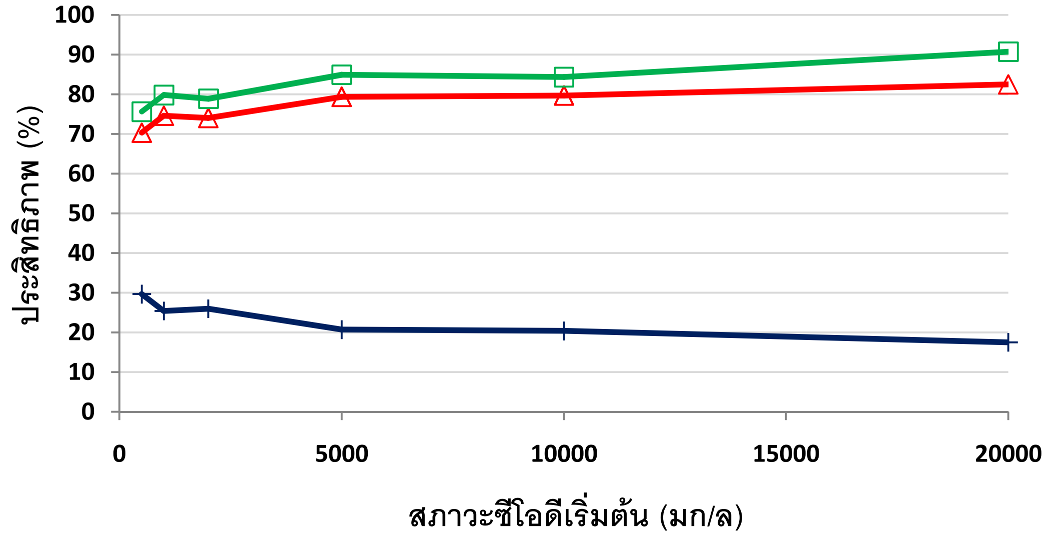


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับระยะเวลา

(□ = Influent Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

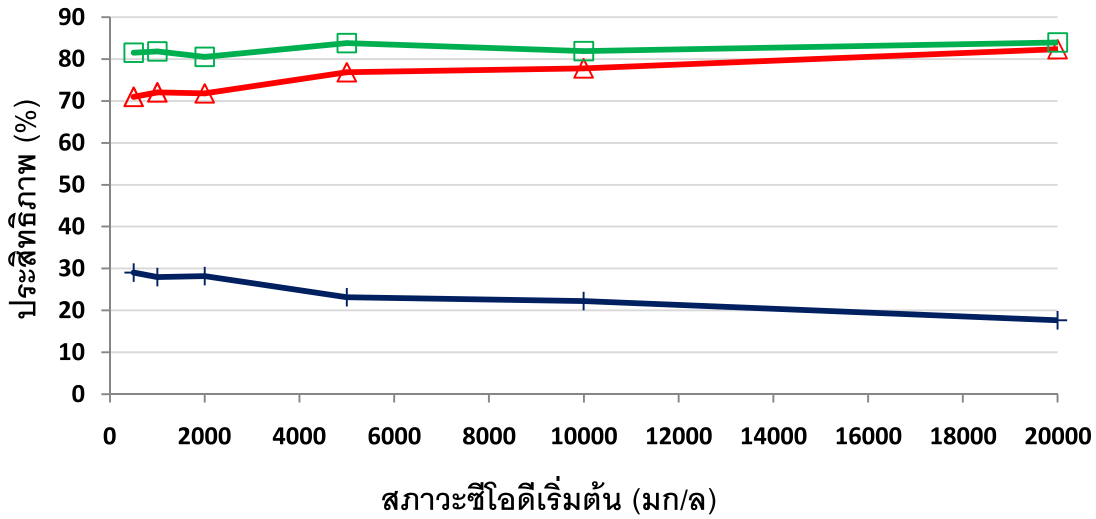
หมายเหตุ : A หมายถึงช่วงสภาวะปรับตัว B หมายถึงช่วงสภาวะคงที่

จากผลการทดลองพบว่าทุกสภาวะซีโอดีเริ่มต้นระบบสามารถบำบัดสีลงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพของระบบ ถังกรองไร้อากาศ และถังโปรยกรอง ในการบำบัดสีหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร คือ 76 – 91%, 70 – 83% และ 30 – 18% ตามลำดับ และสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ คือ 82 – 84 %, 71 – 82 % และ 29 – 18 % ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบสามารถบำบัดค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรและเอดีเอ็มไอ ได้มากที่สุดคือ 91 และ 84 % ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับสภาวะซีโอดีเริ่มต้น และรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยเอดีเอ็มไอ เทียบกับสภาวะซีโอดีเริ่มต้น โดยที่ □ แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัด สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของระบบ Δ แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของถังโปรยกรอง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับสภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

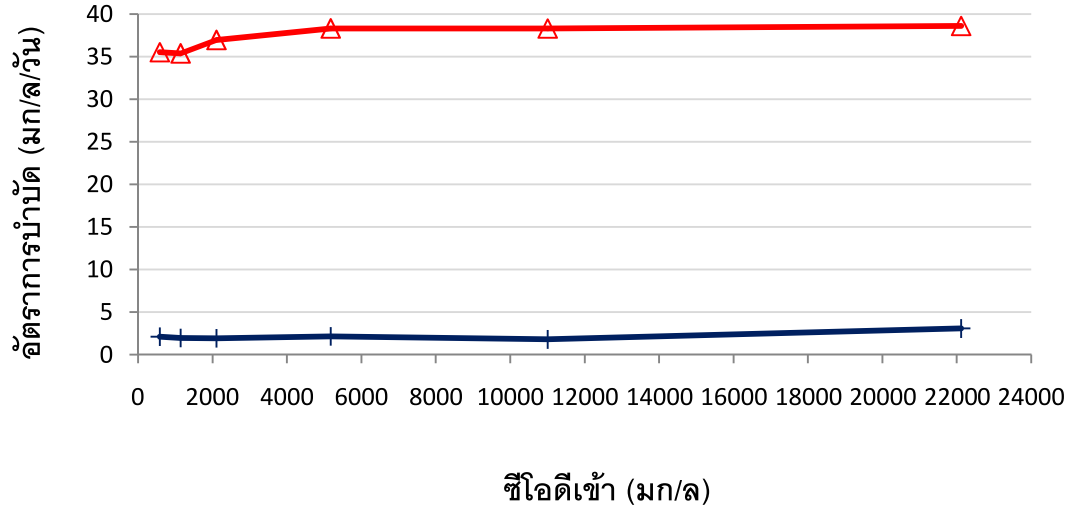
(□ = Anaerobic filter – Trickling filter Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับสภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

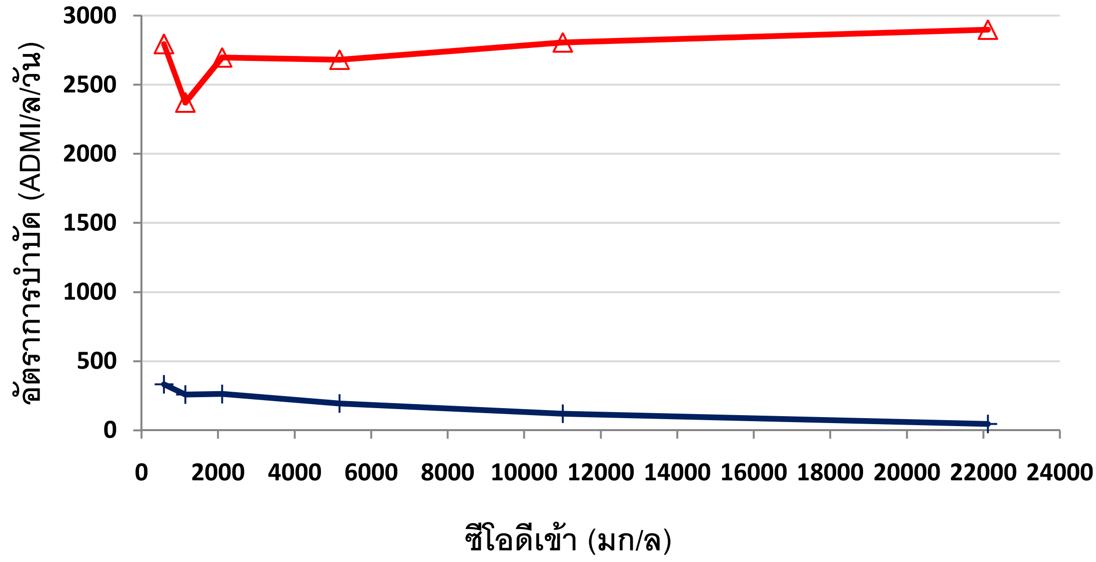
(□ = Anaerobic filter – Trickling filter Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

ที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง มีค่าเท่ากับ 35.5 – 38.6 และ 2.1 – 3.1 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยเอดีเอ็มไอของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง คือ 2,793 – 2,898 และ 332 – 45 เอดีเอ็มไอต่อลิตรต่อวัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ทั้งหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรและหน่วยเอดีเอ็มไอของถังกรองไร้อากาศมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับถังโปรยกรอง โดยการเพิ่มความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น (500 - 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ไม่มีผลต่ออัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง ดังรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับซีโอดีเริ่มต้น และรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับซีโอดีเริ่มต้น



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับซีโอดีเริ่มต้น

(Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

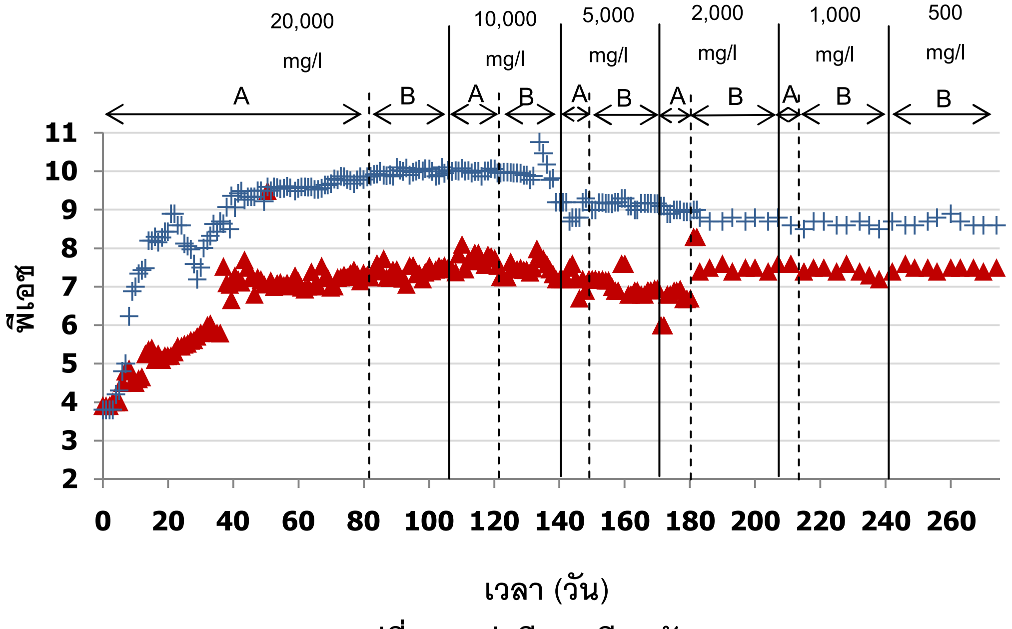


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับซีโอดีเริ่มต้น

(Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

4.1.3 พีเอช (pH)

การทดลองนี้ทำการควบคุมพีเอชของถังไร้อากาศให้อยู่ในช่วงระหว่าง 6.8 – 7.5 โดยใช้ผงโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เติมพร้อมกลับน้ำเสียแล้วทำการวัดพีเอชที่น้ำออกถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง ผลการทดลองพบว่าช่วงแรกระบบถังกรองไร้อากาศมีพีเอชที่ต่ำมากประมาณ 5.16±0.6 ในช่วงวันที่ 0 ถึง 36 เนื่องจากช่วงแรกค่าซีโอดีเริ่มต้นสูง (20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) จึงทำให้ระบบมีกรดที่ผลิตจากกระบวนการไร้อากาศมาก อีกทั้งเป็นช่วงที่ทดลองปรับปริมาณด่างที่ให้ของระบบจึงทำให้พีเอชมีค่าต่ำ แต่เมื่อสามารถปรับค่าด่างที่ระบบต้องการได้แล้วจึงสามารถควบคุมพีเอชของถังกรองไร้อากาศ ที่สภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้อยู่ในช่วง 7.4±0.1 และพีเอชในถังโปรยกรองมีค่า 9.2±0.1 ดังรูปที่ 4.13 แสดงถึงค่าสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเทียบกับเวลา โดยที่ Δ แสดงถึงค่าพีเอชของถังกรองไร้อากาศและ + แสดงถึงพีเอชของถังโปรยกรอง

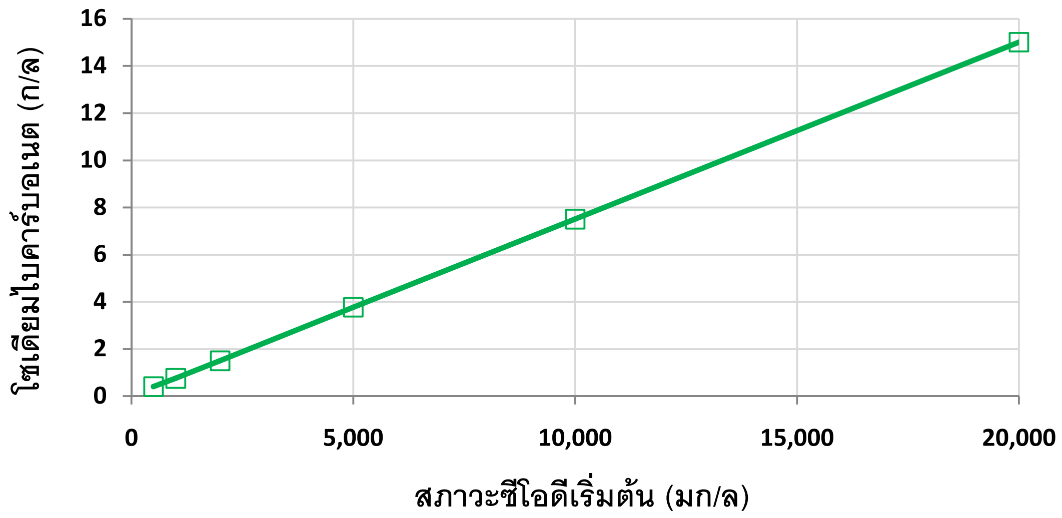


รูปที่ 4.13 ค่าพีเอชเทียบกับเวลา

หมายเหตุ : A หมายถึงช่วงสภาวะปรับตัว B หมายถึงช่วงสภาวะคงที่

4.1.4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

การทดลองนี้ใช้ผงโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ในการปรับพีเอชโดยเติมพร้อมกับน้ำเสียขาเข้าระบบ โดยทำการวัดพีเอชที่น้ำออกถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง ผลการทดลองพบว่าช่วงแรกเป็นช่วงทดลองปรับปริมาณด่างให้เพียงพอกับความเข้มข้นซีโอดี 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยดูจากค่าพีเอชน้ำออกถังกรองไร้อากาศ (6.8 – 7.2) โดยทดลองเริ่มใช้ด่างที่ปริมาณ 5 – 12 กรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณด่างที่ให้ยังไม่เพียงพอจึงทำให้พีเอชมีค่าต่ำ แต่พบว่าเมื่อใช้ปริมาณด่างที่ 15.01±0.005 กรัมต่อลิตร จึงสามารถควบคุมพีเอชในถังกรองไร้อากาศให้อยู่ประมาณ 7.4 ได้ เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นเป็น 10,000, 5,000, 2,000, 1,000 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงลดการใช้ปริมาณด่างลงเป็น 7.51±0.009, 3.77±0.054, 1.5±0.003, 0.75±0.008 และ 0.4±0.105 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากค่าซีโอดีเริ่มต้นที่ลดลงอาจทำให้ระบบเหลือปริมาณกรดที่เกิดในขั้นตอนไร้อากาศน้อยลงด้วย จึงทำให้ถังกรองไร้อากาศต้องการปริมาณด่างน้อยลงตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.14 แสดงปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ใช้ในแต่ละสภาวะความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 500 -20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

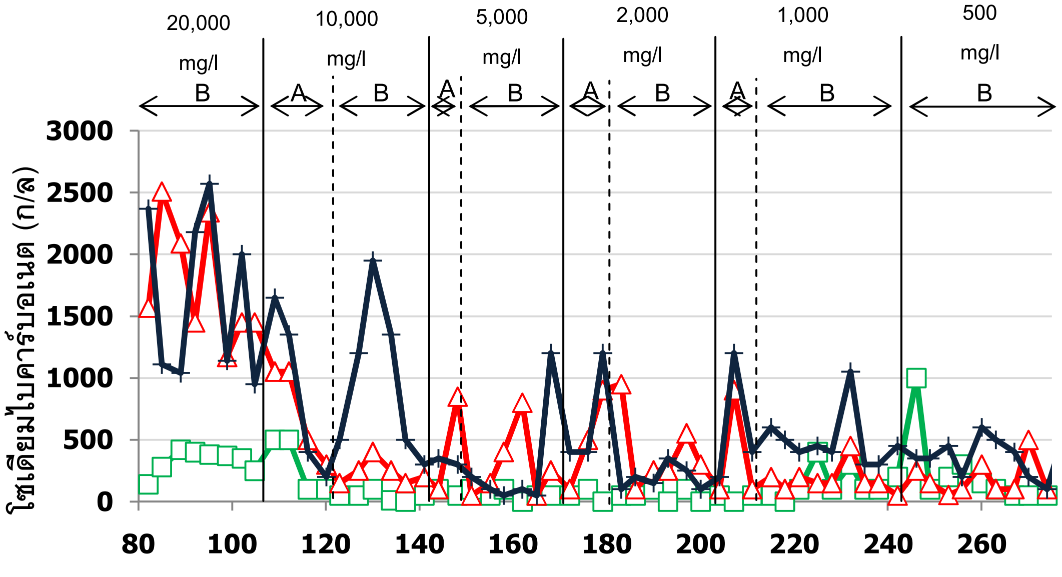


รูปที่ 4.14 ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ใช้ในแต่ละสภาวะความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 500 - 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (□ = ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต)

4.1.5 เอ็มแอลเอสเอส

การทดลองนี้ทำการหาค่าเอ็มแอลเอสเอสน้ำเข้า น้ำออกจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง จากผลการทดลองพบว่าน้ำเข้าระบบมีค่าเอ็มแอลเอสเอสต่ำมาก 71.6 ± 66.4 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจเกิดจากการเตรียมน้ำเสีย น้ำที่ออกจากถังกรองไร้อากาศพบว่าที่ 20,000 10,000 5,000 2,000 1,000 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเอ็มแอลเอสเอส 1,753±181 234±489 364±337 357±301 178±112 และ 183±143 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และน้ำที่ออกจากถังโปรยกรองคือ 1,670±512 966±673 285±413 912±88 494±228 และ 350±160 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเอ็มแอลเอสเอสมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าซีโอดีเริ่มต้นต่ำลง โดยค่าเอ็มแอลเอสเอสของถังโปรยกรองมีค่าสูงกว่า ถังกรองไร้อากาศ เนื่องจากถังกรองไร้อากาศมีชั้นตัวกลางที่สามารถเก็บกักเชื้อจุลินทรีย์ไว้ในถังได้มากและเมื่อพิจารณาในถังโปรยกรองพบว่ามักมีช่วงที่ค่าเอ็มแอลเอสเอสสูงขึ้นและต่ำลงกว่าปกติ อาจเกิดจากการหลุดของชั้นฟิล์มที่เกาะกับตัวกลางเนื่องจากการเวียนน้ำในระบบโปรยกรองจะช่วยคงความหนาของชั้นกรอง ดังรูปที่ 4.15 แสดงถึงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอ็มแอลเอสเอสเทียบกับเวลาการทดลอง โดยที่ □ แสดงถึงค่าเอ็มแอลเอสเอสของน้ำเข้าระบบ Δ แสดงถึงค่าเอ็มแอลเอสเอสของ ถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงค่าเอ็มแอลเอสเอสของถังโปรยกรอง

เมื่อนำค่าเอ็มแอลเอสเอสและค่าซีโอดีมาหาค่ายิลด์ (yield) ที่ซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าถังกรองไร้อากาศมีค่ายิลด์เท่ากับ 0.22±0.1 กรัมเอ็มแอลเอสเอสต่อกรัมซีโอดี จะเห็นได้ว่าค่ายิลด์ของถังกรองไร้อากาศมีค่าสูงกว่าปกติ ((0.04 – 0.1 g MLSS/gCOD) Metcalf และ Eddy (2004)) อาจเกิดจากจุลินทรีย์ที่ใส่ถังไปพร้อมตัวกลางตอนเริ่มระบบหลุดออกมาจึงทำให้ค่ายิลด์ของถังกรองไร้อากาศสูง และเมื่อพิจารณาของถังโปรยกรองพบว่ามีค่ายิลด์เท่ากับ 0.16±0.05 กรัมเอ็มแอลเอสเอสต่อกรัมซีโอดี อาจเกิดจากจุลินทรีย์ที่หลุดออกจากตัวกลางเนื่องจากการเวียนน้ำในถังโปรยกรอง



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอ็มแอลเอสเอสเทียบกับเวลาการทดลอง

(□ = Influent Δ = Anaerobic filter effluent + = Trickling filter effluent)

หมายเหตุ : A หมายถึงช่วงสภาวะปรับตัว B หมายถึงช่วงสภาวะคงที่

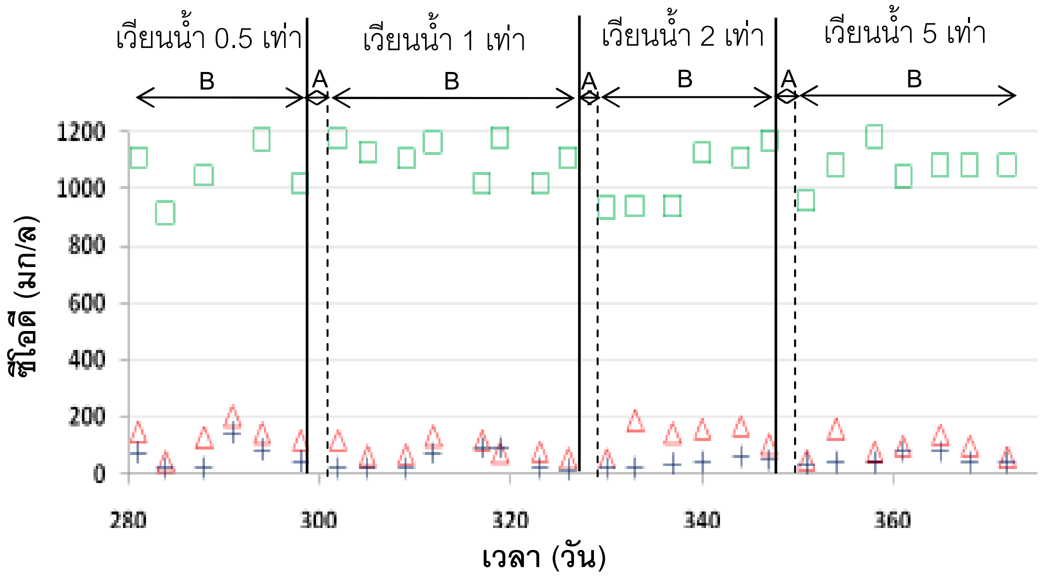
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบโดยแปรเปลี่ยนอัตราการเวียนน้ำที่เหมาะสมจากถังเติมอากาศกลับเข้าถังไร้อากาศ

ผลการทดลองจากการทดลองที่ 4.1 พบว่าทุกความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นสามารถบำบัดสีและซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการทดลองที่ 4.2 จึงเลือกค่าความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นที่ 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเริ่มที่อัตราเวียนน้ำ 0.5 เท่า จนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่จึงเปลี่ยนอัตราเวียนน้ำเป็น 1.0 2.0 และ 5.0 เท่า ตามลำดับ การทดลองนี้เริ่มเดินระบบในวันที่ 280 ถึงวันที่ 374 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 94 วัน

4.2.1 ค่าซีโอดี (COD)

การทดลองที่ 4.2 เริ่มระบบโดยทำการป้อนน้ำเสียที่ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 1,080±91 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาในการปรับตัวของระบบเพียง 1 อาทิตย์ระบบจึงเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 เท่า น้ำออกจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีค่าซีโอดี 130±48 และ 57±47 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะนี้ระบบคงที่ 21 วัน จึงเปลี่ยนอัตราการเวียนน้ำเป็น 1.0 เท่า จากการทดลองพบว่าระบบสามารถบำบัดซีโอดีได้คงที่โดยใช้ระยะเวลาปรับตัว 3 วัน โดยน้ำออกจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีค่าซีโอดี 85±31 และ 49±39 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะนี้ระบบคงที่ 21 วัน ทำการเปลี่ยนอัตราการเวียนน้ำเป็น 2.0 เท่า จากการทดลองพบว่าระบบสามารถบำบัดซีโอดีได้คงที่โดยใช้ระยะเวลาปรับตัว 4 วัน โดยน้ำออกจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีค่าซีโอดี 124±55 และ 36±16 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะนี้ระบบคงที่ 21 วัน และทำการเปลี่ยนอัตราการเวียนน้ำเป็น 5.0 เท่า จากการทดลองพบว่าระบบสามารถบำบัดซีโอดีได้คงที่โดยใช้ระยะเวลาปรับตัว 3 วัน โดย น้ำออกจากถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีค่าซีโอดี 106±37 และ 53±21 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะนี้ระบบคงที่ 18 วัน

จากผลการทดลองโดยรวมแสดงให้เห็นว่าการเวียนน้ำทำให้ระบบสามารถบำบัดค่าซีโอดีได้มากขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับการไม่เวียนน้ำ และการเพิ่มอัตราการเวียนน้ำให้มากขึ้น (0.5 - 5.0 เท่า) ไม่มีผลต่อการการบำบัดค่าซีโอดี โดยทุกอัตราการเวียนน้ำค่าซีโอดีจะลดลงได้มากในถังกรองไร้อากาศ โดยอัตราการเวียนน้ำ น้ำทิ้งของระบบมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง คือน้อยกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีเทียบกับระยะเวลาการทดลองที่อัตราเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า โดยที่ □ แสดงถึงค่าซีโอดีน้ำเสียขาเข้า Δ แสดงถึงค่าซีโอดีน้ำออกจากถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงซีโอดีน้ำออกจากถังโปรยกรอง

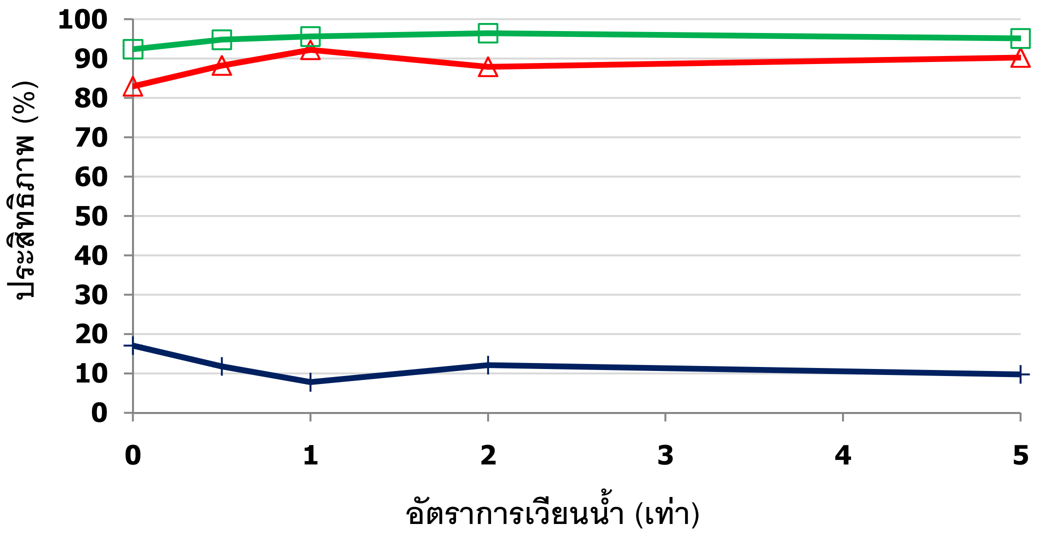


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีเทียบกับระยะเวลาการทดลอง

(□ = Influent Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

หมายเหตุ : A หมายถึงช่วงสภาวะปรับตัว B หมายถึงช่วงสภาวะคงที่

ผลการทดลองจะเห็นว่าการเวียนน้ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้เมื่อเทียบกับสภาวะที่ไม่เวียนน้ำได้เพียง 2.4 – 2.7 % และการเพิ่มการเวียนน้ำ(0.5-5.0 เท่า) ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี โดยอัตราเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่า ประสิทธิภาพของระบบ ถังกรองไร้อากาศ และถังโปรยกรอง มีค่าเท่ากับ 95 – 97 %, 88 – 90 % และ 12 – 10 % ตามลำดับ โดยอัตราการเวียนน้ำ 2.0 เท่าระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดเป็น 97 % เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเกือบทั้งหมดอยู่ในถังกรองไร้อากาศ จึงทำให้ซีโอดีที่เหลือเข้าถังโปรยกรองน้อย จึงทำให้ถังโปรยกรองมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีต่ำ ดังรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของแต่ละสภาวะการเวียนน้ำเทียบกับไม่เวียนน้ำ โดยที่ □ แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบ Δ แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังโปรยกรอง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ของแต่ละสภาวะการเวียนน้ำเทียบกับไม่เวียนน้ำ

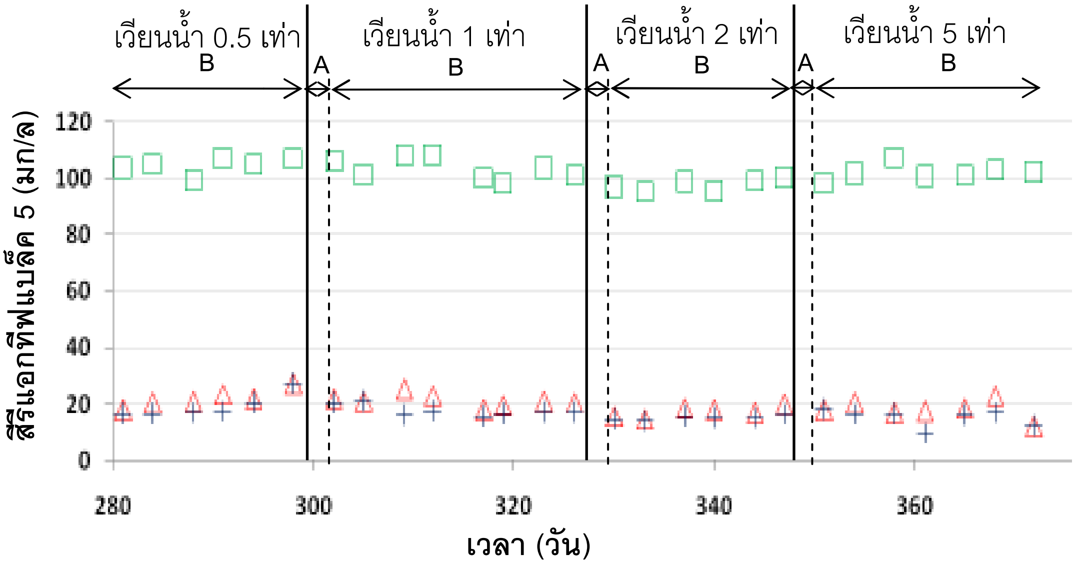
(□ = Anaerobic filter – Trickling filter Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

4.2.2 ค่าสี (Color)

จากการทดลองพบว่าระบบสามารถลดสีได้มากขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะที่ไม่ได้เวียนน้ำโดยที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 เท่า ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถลดสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรลงได้เหลือ 22±3 และ 19±4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่อัตราเวียนน้ำ 1.0 เท่า ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถลดสีลงได้เหลือ 21±2 และ 17±4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่อัตราเวียนน้ำ 2.0 เท่า ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถลดสีลงได้เหลือ 17±2 และ 16±4 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่อัตราเวียนน้ำ 5.0 เท่า ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถลดสีลงได้เหลือ 19±4 และ 15±3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ผลการทดลองยังพบว่าการเวียนน้ำไม่มีผลต่อการลดลงของค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอเมื่อเทียบกับไม่เวียนน้ำ คือที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 เท่า ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถลดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอลงได้เหลือ 1,870±281 และ 1,533±248 ตามลำดับ ที่อัตราเวียนน้ำ 1.0 เท่า ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถลดสีลงได้เหลือ 1,641±166 และ 1,301±121 ตามลำดับ ที่อัตราเวียนน้ำ 2.0 เท่า ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถลดสี ลงได้เหลือ 1,357±171 และ 1,140±133 ตามลำดับ และที่อัตราเวียนน้ำ 5.0 เท่า ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองสามารถลดสีลงได้เหลือ 1,467±478 และ 1,292±143

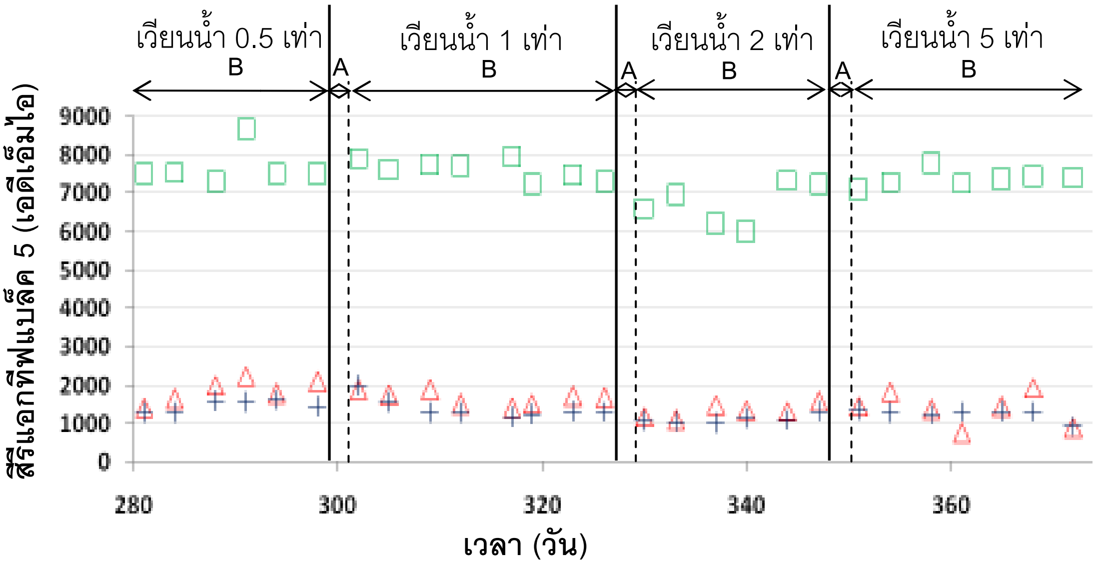
ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับระยะเวลาที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า และรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับระยะเวลาที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า โดยที่ □ แสดงถึงค่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของน้ำเสียขาเข้า Δ แสดงถึงค่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของน้ำออกจากถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงค่าสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของน้ำออกจากถังโปรยกรอง จากผลการทดลองที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการเวียนน้ำจาก 0.5 จนถึง 5.0 เท่า ไม่มีผลต่อการบำบัดสีทั้งในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรและหน่วยเอดีเอ็มไอ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับระยะเวลาที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า

(□ = Influent Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

หมายเหตุ : A หมายถึงช่วงสภาวะปรับตัว B หมายถึงช่วงสภาวะคงที่

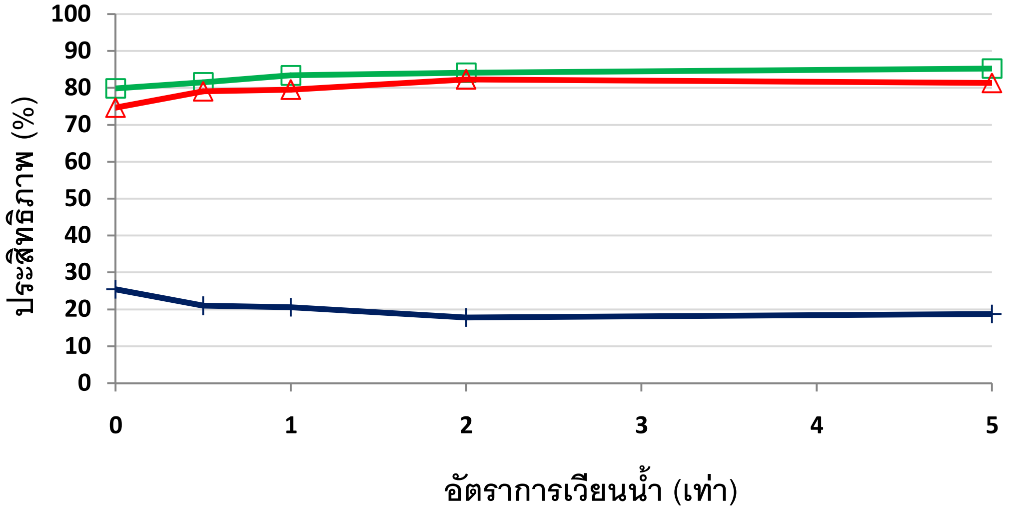


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอเทียบกับ
ระยะเวลาที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่า

(□ = Influent Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

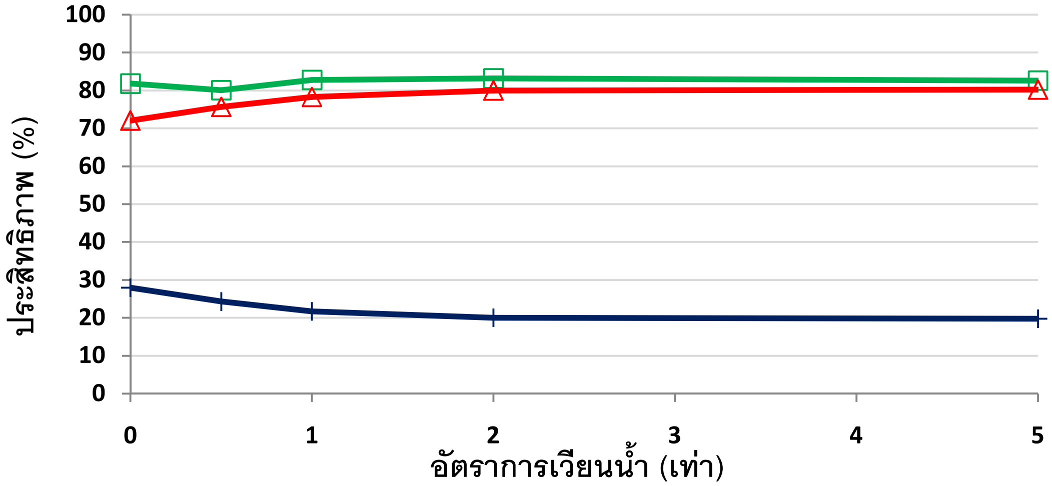
หมายเหตุ : A หมายถึงช่วงสภาวะปรับตัว B หมายถึงช่วงสภาวะคงที่

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเวียนน้ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของระบบได้เล็กน้อยเพียง 1.7 – 5.4% โดยเมื่อเพิ่มอัตราการเวียนน้ำจาก 0.5 เป็น 5.0 เท่า พบว่าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของทั้งระบบ ที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่า คือ 82 – 85 % ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยเอดีเอ็มไอของระบบ ที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่า คือ 80 – 83 % สังเกตได้ว่าค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอมีค่าใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าเพิ่มอัตราการเวียนน้ำก็ตาม อีกทั้งค่าเอดีเอ็มไอที่อัตราการเวียนน้ำยังใกล้เคียงกับสภาวะไม่เวียนน้ำอีกด้วย อาจเป็นเพราะการลดลงเพียงเล็กน้อยของสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรจึงไม่ส่งผลกับค่าสีโดยรวมหรือค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอนั้นเอง ดังรูปที่ 4.20 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า และ รูปที่ 4.21 แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยเอดีเอ็มไอที่อัตราเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า โดยที่ □ แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของระบบ Δ แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ของถังโปรยกรอง



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่า

(□ = Anaerobic filter – Trickling filter Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

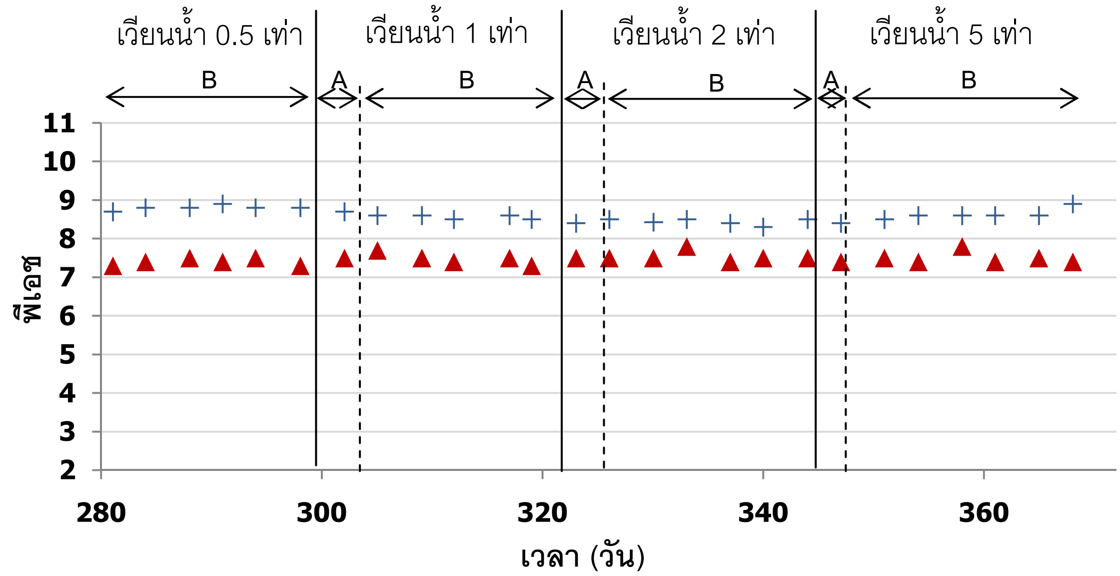


รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยเอดีเอ็มไอ ที่อัตราเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่า

(□ = Anaerobic filter – Trickling filter Δ = Anaerobic filter + = Trickling filter)

4.2.3 พีเอช (pH)

เมื่อพิจารณาค่าพีเอชในถังกรองไร้อากาศพบว่ามีค่าพีเอช 7.5±0.1 แต่พบว่าค่าพีเอชในถังโปรยกรองยังคงสูงคือ 8.6 ± 0.1 ดังรูปที่ 4.22 แสดงถึงค่าสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเทียบกับเวลา โดยที่ Δ แสดงถึงค่าพีเอชของถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงพีเอชของถังโปรยกรอง



รูปที่ 4.22 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเทียบกับเวลา

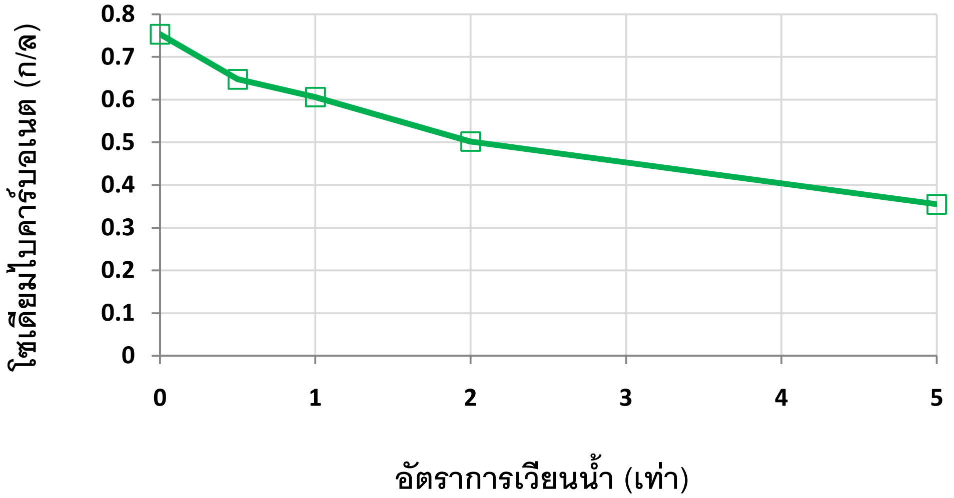
(Δ = Anaerobic filter effluent + = Trickling filter effluent)

หมายเหตุ : A หมายถึงช่วงสภาวะปรับตัว B หมายถึงช่วงสภาวะคงที่

4.2.4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณด่างที่ใช้ของระบบ พบว่าการเวียนน้ำสามารถลดการใช้ปริมาณด่างลงได้เมื่อเทียบกับสภาวะไม่เวียนน้ำ โดยที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 เท่าใช้ปริมาณด่างเพียง 0.65±0.01 กรัมต่อลิตร คือสามารถลดการใช้ปริมาณด่างลงได้ 0.1 กรัมต่อลิตร หรือลดลง13% และเมื่อเพิ่มอัตราการเวียนน้ำเป็น 1.0 2.0 และ 5.0 เท่า จะพบว่าระบบสามารถลดการใช้ปริมาณด่างลดเหลือ 0.61±0.014 0.5±0.002 และ 0.35±0.018 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ คือสามารถลดการใช้ปริมาณด่างลงได้ 0.14 0.25 และ 0.4 กรัมต่อลิตร หรือลดลง 18.6% 33.3% และ 53.3% ตามลำดับ เนื่องจากกรดที่สร้างขึ้นในถังกรองไร้อากาศถูกบำบัดในถังโปรยกรองทำให้ได้ปริมาณด่างกลับคืนมา ดังนั้นการเวียนน้ำจากถังโปรยกรองกลับเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศจึง

เป็นการเวียนด่างกลับเข้าถังกรองไร้อากาศด้วยเช่นกัน จึงทำให้ระบบจึงต้องการปริมาณด่างที่เติมเข้าไปใหม่น้อยลง ดังรูปที่ 4.23 แสดงปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ใช้ในแต่ละสภาวะอัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า ที่ซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

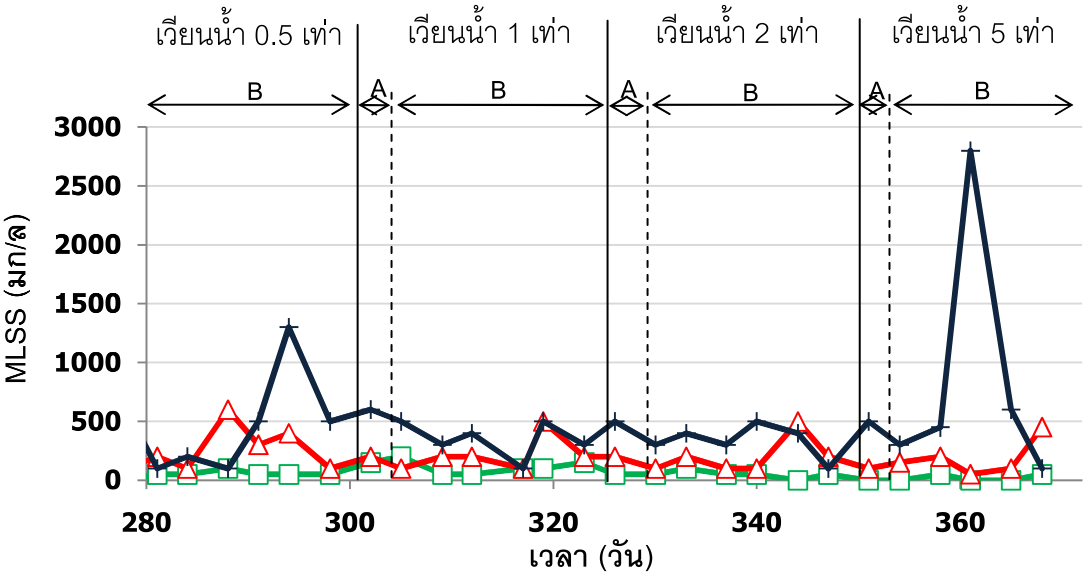


รูปที่ 4.23 ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ใช้ในแต่ละสภาวะอัตราการเวียนน้ำ0.5 – 5.0 เท่า ที่ซีโอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

(□ = ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต)

4.2.5 ค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS)

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเวียนน้ำ 0.5 1.0 2.0 5.0 เท่า ค่าเอ็มแอลเอสเอสของถังกรองไร้อากาศคือ 271±179 364±337 214±134 185±146 และ 190±155 มิลลิกรัมต่อลิตรอ ตามลำดับ และถังโปรยกรองมีค่าคือ 471±419 371±149 214±134 357±139 และ 362±213 มิลลิกรัมต่อลิตรอ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเอ็มแอลเอสเอสของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองทุกอัตราเวียนน้ำมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าเอ็มแอลเอสเอสของถังโปรยกรองมีค่าสูงกว่าถังกรองไร้อากาศ และถังโปรยกรองยังมีค่าเอ็มแอลเอสเอสที่สูงขึ้นและต่ำลงกว่าปกติเป็นช่วงๆ เนื่องจากการหลุดของชั้นฟิล์มที่เกาะกับตัวกลางเนื่องจากการเวียนน้ำในระบบโปรยกรองจะช่วงคงความหนาของชั้นกรอง ดังรูปที่ 4.24 แสดงถึงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอ็มแอลเอสเอสเทียบกับเวลาการทดลอง โดยที่ □ แสดงถึงค่าเอ็มแอลเอสเอสของน้ำเข้าระบบ Δ แสดงถึงค่าเอ็มแอลเอสเอสของ ถังกรองไร้อากาศ และ + แสดงถึงค่าเอ็มแอลเอสเอสของถังโปรยกรอง



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอ็มแอลเอสเอสเทียบกับเวลาการทดลอง

(□ = Influent △ = Anaerobic filter effluent + = Trickling filter effluent)

หมายเหตุ : A หมายถึงช่วงสภาวะปรับตัว B หมายถึงช่วงสภาวะคงที่

จาการทดลองสรุปผลได้ว่า ระบบไร้อากาศ-เติมอากาศแบบมีตัวกลาง ที่ซีโอดีเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการเวียนน้ำ 5.0 เท่า พบว่าระบบประสิทธิภาพบำบัดสีของระบบ 85 % เมื่อเปรียบเทียบกับการวิจัยอื่นๆ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ เช่น UASB-CSTR หรือ SBR-MBR เป็นต้น ตามตารางที่ 4.1

จากการทดลองสามารถสรุปตารางผลการทดลองที่สภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ละพารามิเตอร์ ของถังกรองไร้อากาศ ถังโปรยกรอง และทั้งระบบ ตามตารางที่ 4.2 และสรุปผลการตารางทดลองที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า แต่ละพารามิเตอร์ ของถังกรองไร้อากาศ ถังโปรยกรอง และทั้งระบบ ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

ผู้วิจัย	**ชนิดสี**	**ความเข้มข้นสี**	**ระบบที่ใช้**	**ประสิทธิภาพบำบัดสี (%)**
1. บัญชา และศรัณย์ (2554)	RB 5	100 (mg/l)	AF-TF	85 % 83 % (ADMI)
2. Sponza และ Isik (2002)	RB 5	100 (mg/l)	UASB–CSTR	82-98%
3. Isik และ Sponza (2004)	RB 5	100 (mg/l)	UASB–CSTR	87-98%
4. Panswad และคณะ (2001)	RB 5	10 (mg/l)	SBR	73-77%
5. Karatas และคณะ (2010)	RB 5	150 (mg/l)	UASB-CSTR	91-99.8%
6. You S. J. และ Teng J. Y. (2009)	RB 5	1,000 ADMI	SBR-MBR	97%

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองของถังกรองไร้อากาศ ถังโปรยกรอง และทั้งระบบ ที่สภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ถังปฏิกิริยา	พารามิเตอร์	สภาวะซีโอดีเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		500	1,000	2,000	5,000	10,000	20,000
1. ถังกรองไร้อากาศ							
	1. ซีโอดีที่เหลือ (มก/ล)	96±26	196±27	950±19	3,075±110	6,276±196	13,903±618
	2. ประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี (%)	84	83	55	41	43	37
	3. ค่าสี						
	มิลลิกรัมต่อลิตร	30±4	24±2	25±2	20±1	20±1	16±2
	ADMI	2,287±368	1,842±237	2,118±153	1,616±299	1,606±229	1,242±117
	4. ประสิทธิภาพบำบัดสี (%)						
	มิลลิกรัมต่อลิตร	70	75	74	79	80	83
	ADMI	71	72	72	77	78	82
	5. พีเอช	7.5±0.06	7.4±0.11	7.5±0.07	7±0.23	7.4±0.13	7.4±0.15
	6. MLSS (มก/ล)	184±143	178±11	357±30	364±33	233±48	1754±18

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองของถังกรองไร้อากาศ ถังโปรยกรอง และทั้งระบบ ที่สภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

ถังปฏิกิริยา	พารามิเตอร์	สภาวะซีโอดีเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)					
		500	1,000	2,000	5,000	10,000	20,000
1. ถังโปรยกรอง							
	1. ซีโอดีที่เหลือ (มก/ล)	50±16	88±35	81±15	170±45	693±98	3,117±613
	2. ประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี (%)	16	17	45	59	57	63
	3. ค่าสี						
	มิลลิกรัมต่อลิตร	25±2	19±2	21±2	15±1	15±1	9±1
	ADMI	1,456±247	1,196±283	1,462±205	1,129±263	1,306±198	1,129±108
	4. ประสิทธิภาพบำบัดสี (%)						
	มิลลิกรัมต่อลิตร	30	25	26	21	20	18
	ADMI	29	28	28	23	22	18
	5. พีเอช	8.7±0.1	8.6±0.08	8.7±0.05	9.2±0.09	9.8±0.23	10±0.07
	6. MLSS (มก/ล)	350±160	494±228	193±89	286±413	967±673	1679±512
ถังกรองไร้อากาศ							
- ถังโปรยกรอง	1. ประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี (%)	92	92	96	97	94	86
	2. ประสิทธิภาพบำบัดสี (%)						
	มิลลิกรัมต่อลิตร	76	80	79	85	84	91
	ADMI	82	82	81	84	82	84
	3. ปริมาณด่าง (mg/l $CaCO_3$)	241±62	448±5	894±2	2,242±32	4,469±6	8,933±3
	4. ระยะเวลาเดินระบบ (วัน)	27	38	34	27	38	24

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลองของถังกรองไร้อากาศ ถังโปรยกรอง และทั้งระบบ ที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า

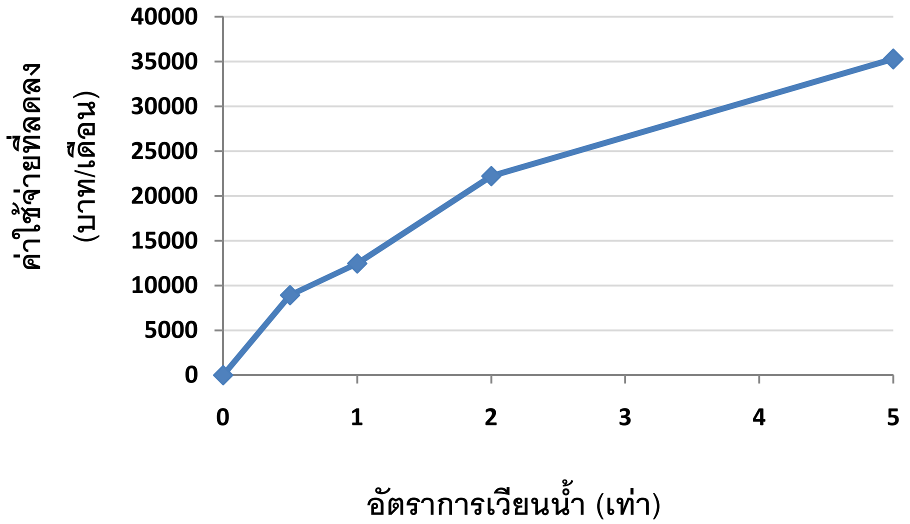
ถังปฏิกิริยา	พารามิเตอร์	อัตราการเวียนน้ำ				
		ไม่เวียนน้ำ	**เวียนน้ำ 0.5 เท่า**	**เวียนน้ำ 1.0 เท่า**	**เวียนน้ำ 2.0 เท่า**	**เวียนน้ำ 5.0 เท่า**
1. ถังกรองไร้อากาศ						
	1. ซีโอดีที่เหลือ (มก/ล)	196±27	130±48	85±31	124±55	106±37
	2. ประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี (%)	83	88	92	88	90
	3. ค่าสี					
	มิลลิกรัมต่อลิตร	24±2	22±3	21±2	17±2	19±4
	ADMI	1,842±237	1,870±281	1,641±166	1,357±171	1,467±478
	4. ประสิทธิภาพบำบัดสี (%)					
	มิลลิกรัมต่อลิตร	75	79	79	82	81
	ADMI	72	76	78	80	80
	5. พีเอช	7.4±0.11	7.4±0.08	7.5 ±0.12	7.5±0.13	7.5±0.17
	6. MLSS (มก/ล)	178±112	271±179	214±134	185±146	190±155

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลองของถังกรองไร้อากาศ ถังโปรยกรอง และทั้งระบบ ที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 – 5 เท่า (ต่อ)

ถังปฏิกิริยา	**พารามิเตอร์**	**อัตราการเวียนน้ำ**				
		ไม่เวียนน้ำ	**เวียนน้ำ 0.5 เท่า**	**เวียนน้ำ 1.0 เท่า**	**เวียนน้ำ 2.0 เท่า**	**เวียนน้ำ 5.0 เท่า**
1. ถังโปรยกรอง						
	1. ซีโอดีที่เหลือ (มก/ล)	88±35	57±47	49±39	36±16	53±21
	2. ประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี (%)	17	12	8	12	10
	3. ค่าสี					
	มิลลิกรัมต่อลิตร	19±2	19±4	17±4	16±4	15±3
	ADMI	1,196±283	1,533±247	1,301±121	1,140±133	1,292±143
	4. ประสิทธิภาพบำบัดสี (%)					
	มิลลิกรัมต่อลิตร	25	21	21	18	19
	ADMI	28	24	22	20	20
	5. พีเอช	8.6±0.08	8.8±0.06	8.5±0.07	8.4±0.07	8.7±0.13
	6. MLSS (มก/ล)	494±228	471±419	371±149	357±139	362.5±213
ถังกรองไร้อากาศ						
- ถังโปรยกรอง	1. ประสิทธิภาพบำบัดซีโอดี (%)	92	95	96	97	95
	2. ประสิทธิภาพบำบัดสี (%)					
	มิลลิกรัมต่อลิตร	80	82	83	84	85
	ADMI	82	80	83	83	83
	3. ปริมาณด่าง (mg/l $CaCO_3$)	448±5	385±5	361±8	299±1	211±11
	4. ระยะเวลาเดินระบบ (วัน)	38	28	21	21	18

4.2.6 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงเนื่องจากการเวียนน้ำกลับ

ค่าใช้จ่ายหลักในการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพคือ ค่าไฟฟ้าในการเดินระบบและค่าสารเคมี เช่น สารเคมีสำหรับปรับพีเอช จากการทดลองเวียนน้ำจากถังโปรยกรองกลับเข้าถังกรองไร้อากาศ พบว่าสามารถลดการใช้ปริมาณด่างลงได้ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเวียนลดลงเช่นกัน ตามรูปที่ 4.25 แสดงค่าใช้จ่ายที่ลดลงเมื่อทำการเวียนน้ำ พบว่ายิ่งเวียนน้ำมากขึ้น (0.5-5.0 เท่า) สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้มากขึ้นตามไปด้วย โดยที่อัตราเวียนน้ำ 5.0 เท่าสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 35,000 บาทต่อเดือน การคำนวณค่าใช้จ่ายแสดงในภาคผนวก ข



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบอัตราการเวียนน้ำกับค่าใช้จ่ายที่ลดลง

(หมายเหตุ: ค่าใช้จ่ายไม่รวมค่าเครื่องสูบน้ำและเครื่องสูบสารเคมี และคิดที่ปริมาณน้ำ 100 ลบ.ม./วัน)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1) จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เจือปนด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ-เติมอากาศ พบว่าการบำบัดค่าซีโอดีจะเกิดขึ้นทั้งในสภาวะไร้อากาศ และเติมอากาศ ส่วนการบำบัดสีจะเกิดขึ้นในสภาวะไร้อากาศเป็นหลัก ซึ่งคาดว่าเกิดจากการบำบัดโดยแบคทีเรียสร้างกรด (Acid producing bacteria) สังเกตได้จากช่วงเริ่มระบบที่ค่าพีเอชของระบบยังต่ำมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าซีโอดีที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากแสดงให้เห็นว่าเป็นช่วงหมักกรดแต่สีก็ยังสามารถลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการลดลงของสีในช่วงเติมอากาศอาจเกิดจากกระบวนการอื่นๆ ที่ไม่ใช่การ แตกพันธะของสี เช่นกระบวนการดูดติดผิวของเชื้อจุลินทรีย์

2) จากค่าซีโอดีเริ่มต้น 500 - 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าระบบไร้อากาศ-เติมอากาศแบบมีตัวกลางสามารถบำบัดซีโอดีและซีโอดีอยู่ในช่วง 92 – 86 % และ 76 – 91 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทุกสภาวะซีโอดีเริ่มต้นมีประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีและสีใกล้เคียงกัน

3) จากการทดลองพบว่าถังกรองไร้อากาศมีค่า k_1 เท่ากับ 0.311 ต่อวัน และถังโปรยกรองมีค่า k_m และ k_s เท่ากับ 5.479$\pm$0.726 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และ 1.009$\pm$0.339 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

4) การเวียนน้ำกลับเข้าถังกรองไร้อากาศที่อัตราการเวียนน้ำ 0.5 - 5.0 เท่า พบว่าระบบไร้อากาศ-เติมอากาศแบบมีตัวกลาง มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและสีอยู่ในช่วง 95 – 95 % และ 82 – 85 % ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเวียนน้ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีได้เพียงเล็กน้อย 2.4 – 4.1 % และ 1.7 – 5.4 % ตามลำดับ แต่สามารถลดการใช้ปริมาณด่างที่เติมลงได้สูงถึง 13 - 53.3 % ที่อัตราเวียนน้ำ 0.5 – 5.0 เท่า โดยที่อัตราการเวียนน้ำ 5.0 เท่า สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้ถึง 35,000 บาทต่อเดือน ดังรูปที่ 5.1

5) สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เป็นซีโอดีที่ย่อยสลายยากดังนั้นการบำบัดสีถือเป็นการบำบัดซีโอดีย่อยสลายยากด้วยเช่นกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าระบบไร้อากาศ-เติมอากาศแบบมีตัวกลางสามารถบำบัด ค่าซีโอดีย่อยสลายยากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะเพื่อนำไปศึกษาหรือวิจัยต่อ

5.2.1.1 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมเจือปนโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสี

5.2.1.2 ศึกษาการบำบัดกับสีชนิดอื่นๆ หรือเปลี่ยนมาทดลองใช้กับน้ำเสียจริง

5.2.1.3 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมเจือปนโดยเปลี่ยนแปลงระยะเวลากักเก็บ

5.2.2 ข้อเสนอแนะเพื่อนำไปประยุกต์ใช้

5.2.2.1 สีสามารถลดลงในช่วงสร้างกรด ดังนั้นระบบจะสามารถลดระยะเวลากักเก็บได้เนื่องจาก ช่วงการหมักกรดใช้เวลาน้อยประมาณ 4-6 ชั่วโมง

5.2.2.2 เมื่อนำระบบนี้ไปใช้จริงควรติดตั้งระบบในที่ที่มีอากาศระบายหรืออยู่ในที่โล่ง เนื่องจากถังโปรยกรองใช้ออกซิเจนในอากาศ

5.2.2.4 การติดตั้งถังตกตะกอนต่อจากถังโปรยกรองจะสามารถช่วงลดของแข็งในน้ำทิ้งให้ต่ำลงได้

5.2.2.3 ปัจจุบันโรงงานนิยมใช้ระบบ RO ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีเจือปน แต่ในทางปฏิบัติโรงงานอาจลักลอบทิ้งน้ำเสียโดยไม่ผ่านระบบ RO ได้ แต่หากโรงงานติดตั้งระบบบำบัดทางชีวภาพจะเป็นการบังคับให้ต้องเดินระบบต่อเนื่องตลอดเวลา

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

โกมล เอี่ยมเสมอ. 2541. ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสีรีแอกทีฟชนิดเอโซโดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิกซึ่งมีและไม่มีสารอาหารที่ส่งเสริมกระบวนการอีบีพีอาร์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นรเสฏฐ์ ธีรชัยไพศาล. 2551. การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยระบบโปรยกรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์. 2543. ผลของเวลากักแอนแอโรบิกและความเข้มสีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม รีแอกทีฟชนิดอะโซที่มีโครงสร้างทางเคมีต่างกัน โดยกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปุณณภา ธนปุณยนันท์. 2553. ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมแบบไร้อากาศ-เติมอากาศด้วยสารช่วยลดสี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์. 2547. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุนันทา เลาวัณย์ศิริ. 2544. การบำบัดสารอินทรีย์และสีจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพมหานคร : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย

ภาษาอังกฤษ

Allen, W., Prescott, W.B., Derby, R.E., Garland, C.E., Peret, J.M. and Saltzman, M. 1973. Proceeding of the 28th Perdue Industrial Wastewater Conference Part 2., Purdue University : 661-675.

American Public Health Association. 1995. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 19th ed. Washington, DC : American Public Health Association.

Banat, I.M., Nigam, P., Singh, D. and Marchant, R. 1996. Microbial decolorization of textile-dye-containing effluents: a review. Bioresource technology. 58: 217-227.

Carliell, C.M., Barclay, S.J., Naidoo, N., Buckley, C.A., Mulholland, D.A. and Senior, E. 1995. Microbial decolourization of a reactive azo dye under anaerobic conditions. Water SA. 21: 61-69.

Chung, K., Stevens, S.E. Jr. and Cerniglia, C.E. 1992. The reduction of azo dyes by the intestinal microflora. Crit.Rev.Microbiol 18: 175-190.

Dubrow, S.F., Boardman, G.D. and Michelsen, D.J. 1996. Chemical pretreatment and aerobic-anaerobic degradation of textile dye wastewater. Environmental Chemistry of Dyes and Pigments. John Wiley & Sons. Inc., 75-104.

Forgacs, E., Cserhati, T. and Oros, G. 2004. Removal of synthesis dyes from wastewater: a review. Environment International 30: 953-971.

Grady, C.P.L Jr., Daigger, G.T. and Lim, H.C. Biological Wastewater Treatment. 2nd ed. Hong Kong : Marcel Dekker, Inc.

Isik, M. and Sponza, D. T. 2004. A batch kinetic study on decolorization and inhibition of Reactive Black 5 and Direct Brown 2 in an anaerobic mixed culture. Chemosphere 55: 119-128.

Isik, M. and Sponza, D. T. 2008. Anaerobic/aerobic treatment of a simulated textile wastewater. Separation and Purification Technology 60: 64-72.

Karatas, M., Dursun, S. and Argun, M. E. 2010. The Decolorization of azo dye reactive black 5 in a sequential anaerobic-aerobic system. Ekoloji 19, 74: 15-23.

Kornaros, M. and Lyberatos, G. 2006. Biological treatment of wastewater from a dye manufacturing company using a trickling filter. Journal of Hazardous Materials. 136: 95-102.

Metcalf and Eddy. 2004. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4th ed. Singapore : McGraw-Hill.

Panswad, T., Iamsamer, K. and Anotai, J. 2001. Decolorization of azo-reactive dye by polyphosphate- and glycogen-accumulating organisms in an anaerobic-aerobic sequencing batch reactor. Bioresource Technology 76: 151-159.

Randall, W.B. 1993. Pilot scale study on anaerobic treatment of a textile wastewater. Hazadous and Industrial Wastes Proceeding of the Mid Atlantic Industrial Waste Conf., 218-227.

Reife, A. and Freeman, H.S. 1996. Carbon adsorption of dyes and selected intermediates. Environmental Chemistry of Dyes and Pigments. John Wiley & Sons. Inc., 3-32.

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. and Nigam, P. 2001. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. Bioresource Technology 77: 247-255.

Shaul, G.M., Dempsey, C.R., Dostal, K.A. and Lieberman, R.J. 1986. Fate of azo dyes in the activated sludge process. 41th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings., 603-611.

Singh, P., Sanghi, R., Pandey, A. and Iyengar, L. 2007. Decolorization and partial degradation of monoazo dyes in sequential Wxed-Wlm anaerobic batch reactor (SFABR). Bioresource Technology 98:2053–2056.

Sponza, D. T. and Isik, M. 2002. Decolorization and azo dye degradation by anaerobic/ aerobic sequential process. Enzyme and Microbial Technology. 31 (1–2): 102–110.

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

You, S. J. and Teng, J. Y. 2009. Anaerobic decolorization bacteria for the treatment of azo dye in a sequential anaerobic and aerobic membrane bioreactor. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 40: 500-504.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

1. ข้อมูลดิบจากการทดลอง

1.1 ผลการทดลองการหาปริมาณซีโอดีเริ่มต้นที่เหมาะสม

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการหาซีโอดีที่ 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	เวลา (วัน)	sCOD (mg/l)			Color (mg/l)			Color (ADMI)		
			IN	AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
20,000 mg/l	24/08/2553	82.1	21109.8	14052.8	3392.6	97.38	13.07	6.699	7276.089	1042.098	1018.587
	27/08/2553	84.9	22816.0	14463.5	3769.6	86.79	16.01	8.0	6102.77	1185.564	1135.51
	31/08/2553	89.0	23349.0	14458.3	3431.4	90.85	16.17	9.07	8403.38	1392.498	1046.944
	3/09/2553	92.0	22936.2	14093.0	3947.4	99.67	16.4	9.15	8318.61	1247.201	1103.41
	6/09/2553	95.1	20959.2	14071.2	2886.4	95.75	17.48	9.07	6871.687	1307.43	1197.023
	10/09/2553	98.9	21033.3	12763.5	2820.8	87.91	17.8	9.15	6618.109	1342.22	1336.21
	13/09/2553	102.1	22565.1	13137.6	2380.0	94.44	15.68	9.07	5899.91	1125.4	1016.81
	16/09/2553	104.8	22134.0	14186.1	2304.7	96.08	18.46	9.15	6817.64	1293.5	1173.16
10,000mg/l	20/09/2553	109.1	21019.0	13526.0	2083.5	88.66	15.03	8.66	6155.83	1146.55	988.26
	23/09/2553	112.1	21109.0	11512.7	2119.0	88.98	16.83	8.98	6645.7	1188.2	982.37
	27/09/2553	116.1	11139.0	8484.6	450.3	89.54	18.3	7.83	6847.15	1700.273	660.522
	1/10/2553	120.1	11328.6	4250.2	308.1	87.68	22.87	14.5	8038.37	2066.869	1200.83

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการหาซีโอดีที่ 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	เวลา (วัน)	sCOD (mg/l)			Color (mg/l)			Color (ADMI)		
			IN	AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
10,000mg/l	4/10/2553	122.9	10939.7	6097.7	733.3	102.61	21.4	16.33	8547.43	2023.109	1521.87
	8/10/2553	127.0	11159.3	6015.3	632.6	88.1	20.42	16.33	6714.035	1587.78	1181.631
	11/10/2553	130.0	10956.0	6240.0	624.0	93.14	18.95	13.56	7263.21	1536.84	1405.16
	15/10/2553	133.9	11433.7	6503.3	858.0	97.71	19.61	14.7	7324.115	1497.83	1444.493
	18/10/2553	137.0	10666.7	6333.3	716.7	106.53	19.44	16.01	7083.804	1648.932	1300.216
	22/10/2553	141.0	10866.7	6466.7	593.3	89.41	17.81	13.56	6369.1	1340.962	981.629
5,000mg/l	25/10/2553	144.0	5237.8	6922.1	2148.2	100.1	17.15	14.38	6579.2	1301.54	1077.02
	29/10/2553	148.1	5132.2	3066.2	93.1	92.81	20.75	14.54	6839.247	2119.712	1199.708
	1/11/2553	151.1	5250.3	3120.0	145.5	109.47	19.607	13.34	7211.194	1476.88	941.988
	5/11/2553	155.1	5170.7	3244.0	192.4	88.3	17.97	13.56	6549.639	1211.119	929.5725
	8/11/2553	158.0	5167.3	2939.0	229.4	94.77	19.6	15.03	6947.923	1488	1053.05
	12/11/2553	162.0	5152.7	2968.7	209.2	96.078	19.9	15.356	7054.186	1544.602	1083.933
	15/11/2553	165.0	5154.0	3017.6	161.4	96.4	21.89	15.84	7006.669	1892.225	1688.103
	18/11/2553	168.0	5198.8	3168.8	158.5	98.04	20.1	14.21	7238.81	1576.474	1005.296

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการหาซีโอดีที่ 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	**วันที่ (ว/ด/ป)**	**เวลา (วัน)**	sCOD (mg/l)			Color (mg/l)			Color (ADMI)		
			IN	AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
2,000 mg/l	22/11/2553	172.1	2150.7	2600.0	118.7	101.3	12	10.6	7372.711	913.9145	767.003
	26/11/2553	175.9	2264.3	1536.7	112.7	105.88	22.9	13.07	7642.455	1816.309	938.323
	29/11/2553	179.1	2237.1	941.2	93.6	105.55	28.43	15.36	7573.979	2455.127	1134.967
	3/12/2553	183.0	2073.1	965.0	108.8	102.94	28.43	22.9	7175.851	2324.714	1403.777
	6/12/2553	186.1	2155.7	926.3	91.6	105.88	26.47	21.24	8405.482	2192.251	1631.727
	10/12/2553	190.0	2173.7	939.3	80.0	93.14	26.3	22.9	6792.925	2179.779	1421.332
	13/12/2553	193.0	2141.3	966.3	66.0	101.96	25.8	21.24	7861.725	2149.779	1255.953
	17/12/2553	197.0	1965.3	946.7	74.7	98	25.8	19.6	8118.668	2150.486	1837.407
	20/12/2553	200.0	2137.3	975.6	77.4	102.9	25.8	21.24	7362.493	1869.898	1288.402
	24/12/2553	204.0	2092.0	933.0	66.2	94	23.04	18.62	6863.99	1958.181	1393.044
1,000 mg/l	27/12/2553	207.1	1131.7	720.0	130.0	102.614	27.9411	22.8758	8018.038	2253.463	1138.488
	31/12/2553	211.0	1152.0	416.7	110.0	93.1372	22.0588	12.7451	6374.67	1270.553	891.6175

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการหาซีโอดีที่ 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	เวลา (วัน)	sCOD (mg/l)			Color (mg/l)			Color (ADMI)		
			IN	AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
1,000 mg/l	4/01/2554	215.0	1088.0	181.9	44.8	94.444	26.1438	20.4248	6339.984	1794.366	1178.562
	7/01/2554	218.0	1139.2	160.0	57.6	97.7124	21.7320	18.4641	6642.538	2051.861	1412.323
	10/01/2554	221.1	1173.3	160.0	66.7	94.7712	29.5752	22.2222	6586.623	2211.852	1847.655
	14/01/2554	225.0	1140.0	220.0	86.7	96.0784	19.7712	18.6275	6993.187	1719.105	1010.177
	17/01/2554	228.0	1146.7	190.0	116.7	91.8301	21.7320	18.9542	6885.847	2010.67	1091.086
	21/01/2554	232.0	1216.7	220.0	156.7	91.1765	18.4641	17.1569	6816.662	1677.528	1154.629
	24/01/2554	235.0	1091.2	236.7	104.4	96.7320	28.9216	19.4444	5889.645	1612.829	1059.519
	27/01/2554	238.0	1174.3	191.3	92.8	95.0980	22.2222	18.9542	6480.815	1497.537	877.6535
	31/01/2554	242.1	1148.8	201.6	60.8	95.4248	28.1046	17.9739	6592.754	1998.063	1135.966
500 mg/l	4/02/2554	246.1	592.7	88.9	52.1	100.653	30.0654	23.8562	7955.141	2017.49	1502.3
	7/02/2554	249.0	604.1	119.6	62.3	100.00	30.2288	26.6340	7729.112	1979.275	1516.591
	11/02/2554	253.0	598.0	125.7	46.0	99.6732	29.9020	25.6536	8869.017	2842.461	1894.515
	14/02/2554	255.8	500.0	110.0	70.0	98.6928	30.5556	25.9804	7856.942	2844.062	1679.723

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการหาซีโอดีที่ 500 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	**วันที่ (ว/ด/ป)**	**เวลา (วัน)**	sCOD (mg/l)			Color (mg/l)			Color (ADMI)		
			IN	AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
500 mg/l	18/02/2554	260.0	620.0	116.7	73.3	98.693	30.719	26.961	7764.298	2220.102	1285.768
	21/02/2554	263.0	554.2	60.8	30.0	98.366	32.026	25.980	7697.972	2483.478	1355.7
	25/02/2554	267.0	567.0	57.8	32.6	100.654	29.902	24.020	7558.652	1799.16	1097.789
	28/02/2554	270.0	625.5	75.9	41.6	105.556	30.882	27.288	7733.312	2197.833	1561.513
	4/03/2554	274.0	617.4	108.4	42.2	106.863	25.327	15.359	7690.83	2197.55	1207.978

1.2 ผลการทดลองการเวียนน้ำที่อัตรา 0.5 – 5 เท่า

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการการเวียนน้ำที่อัตรา 0.5 – 5 เท่า

ช่วงการทดลอง	วันที่ (ว/ด/ป)	เวลา (วัน)	sCOD (mg/l)			Color (mg/l)			Color (ADMI)		
			IN	AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
เวียนน้ำ 0.5 เท่า	8/03/2554	278.1	1107.2	160.0	76.8	105.229	20.915	12.582	7526.729	1621.822	932.74
	11/03/2554	281.1	1113.6	147.2	74.6	103.595	17.974	16.503	7501.99	1423.183	1263.253
	14/03/2554	284.0	910.8	42.9	18.2	105.229	20.425	16.503	7548.575	1641.001	1275.972
	18/03/2554	288.0	1048.8	128.8	18.4	99.020	20.752	17.157	7286.663	2003.582	1583.062
	21/03/2554	291.0	1263.3	203.3	143.3	106.863	23.529	17.647	8668.149	2250.694	1544.233
	24/03/2554	294.0	1170.0	143.3	83.3	105.229	21.732	20.261	7500.543	1787.574	1627.945
	28/03/2554	298.0	1017.6	121.6	44.8	107.190	27.124	27.124	7491.56	2100.319	1448.215
	1/04/2554	302.0	1177.6	121.6	19.2	105.882	22.059	20.425	7923.823	1882.032	1991.416
เวียนน้ำ 1 เท่า	4/04/2554	305.0	1126.4	64.0	19.2	100.980	21.078	20.752	7604.558	1754.517	1552.347
	8/04/2554	309.1	1107.2	70.4	19.2	107.843	25.163	15.850	7737.369	1892.109	1266.766
	11/04/2554	312.0	1159.1	134.4	76.8	108.497	23.039	17.484	7700.184	1514.998	1273.293
	16/04/2554	317.0	1017.6	121.6	96.0	100.327	17.810	15.523	7932.363	1403.882	1166.586
	18/04/2554	319.0	1181.8	74.7	96.0	98.366	19.608	16.340	7231.533	1534.409	1230.215
	22/04/2554	323.0	1017.6	80.1	19.2	103.595	20.915	16.993	7467.534	1714.354	1302.568

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการการเวียนน้ำที่อัตรา 0.5 – 5 เท่า (ต่อ)

ช่วงการทดลอง	**วันที่ (ว/ด/ป)**	**เวลา (วัน)**	sCOD (mg/l)			Color (mg/l)			Color (ADMI)		
			IN	AF	TF	IN	AF	TF	IN	AF	TF
เวียนน้ำ 2 เท่า	25/04/2554	326.1	1113.6	52.8	12.9	101.307	20.588	16.993	7283.324	1675.48	1316.121
	29/04/2554	330.1	932.8	56.8	17.6	96.732	15.686	14.542	6627.435	1182.923	1073.405
	2/05/2554	333.1	938.1	186.6	17.6	95.425	14.706	14.216	6954.014	1106.474	1027.864
	6/05/2554	337.0	938.1	143.4	34.4	98.693	18.627	15.359	6186.623	1493.935	991.379
	9/05/2554	340.0	1127.1	160.0	40.0	95.098	17.810	15.033	5997.623	1357.077	1127.627
	13/05/2554	344.0	1113.6	170.0	60.0	99.346	16.993	15.196	7348.677	1317.342	1115.136
	16/05/2554	347.0	1172.5	102.7	50.4	100.000	19.771	16.667	7214.276	1581.992	1297.953
เวียนน้ำ 5 เท่า	20/05/2554	351.0	958.9	50.4	33.6	98.039	17.810	17.810	7081.633	1460.737	1343.183
	23/05/2554	354.1	1080.0	157.9	40.0	101.634	20.425	16.667	7301.906	1833.1	1275.577
	27/05/2554	358.0	1180.0	80.1	40.0	107.516	16.830	16.340	7775.429	1366.849	1247.651
	30/05/2554	361.0	1040.0	100.3	80.0	100.654	17.320	9.967	7278.455	763.3715	1322.793
	3/06/2554	365.0	1080.0	140.0	80.0	101.307	18.627	16.013	7367.401	1433.647	1296.157
	6/06/2554	368.1	1080.0	100.0	40.0	103.268	23.039	17.157	7431.635	1937.788	1319.033
	10/06/2554	372.0	1080.0	60.0	40.0	101.961	12.092	11.928	7398.638	887.8095	947.993

ตารางที่ ก.3 ค่าพีเอช

วันที่	พีเอช		วันที่	พีเอช		วันที่	พีเอช	
	AF	TF		AF	TF		AF	TF
3/6/2010	3.90	3.80	19/6/2010	5.10	8.30	5/7/2010	6	8.2
4/6/2010	3.90	3.80	20/6/2010	5.26	8.16	6/7/2010	6.03	8.32
5/6/2010	3.90	3.80	21/6/2010	5.10	8.28	7/7/2010	5.85	8.63
6/6/2010	4.00	3.80	22/6/2010	5.2	8.43	8/7/2010	5.8	8.43
7/6/2010	4.00	4.20	23/6/2010	5.2	8.43	9/7/2010	5.79	8.7
8/6/2010	4.00	4.30	24/6/2010	5.21	8.9	10/7/2010	7.52	8.64
9/6/2010	4.50	4.80	25/6/2010	5.3	8.9	11/7/2010	7.1	9.07
10/6/2010	4.80	5.00	26/6/2010	5.45	8.6	12/7/2010	7.06	8.5
11/6/2010	4.87	6.23	27/6/2010	5.45	8.6	13/7/2010	6.66	9.36
12/6/2010	4.54	6.88	28/6/2010	5.5	8.12	14/7/2010	7.29	9.06
13/6/2010	4.50	7.00	29/6/2010	5.53	8.06	15/7/2010	7.19	9.43
14/6/2010	4.60	7.34	30/6/2010	5.6	7.97	16/7/2010	7.12	9.49
15/6/2010	4.65	7.43	1/7/2010	5.62	7.59	17/7/2010	7.7	9.26
16/6/2010	5.25	7.48	2/7/2010	5.71	7.19	18/7/2010	7.5	9.34
17/6/2010	5.37	8.20	3/7/2010	5.8	7.5	19/7/2010	7.23	9.34
18/6/2010	5.40	8.20	4/7/2010	5.8	8.01	20/7/2010	6.8	9.34

ตารางที่ ก.3 ค่าพีเอช (ต่อ)

วันที่	**พีเอช**		**วันที่**	**พีเอช**		**วันที่**	**พีเอช**	
	AF	TF		AF	TF		AF	TF
21/7/2010	7.24	9.5	6/8/2010	7.39	9.6	22/8/2010	7.36	9.79
22/7/2010	7.18	9.5	7/8/2010	7.02	9.53	23/8/2010	7.31	9.86
23/7/2010	7.07	9.22	8/8/2010	7.02	9.53	24/8/2010	7.25	9.87
24/7/2010	9.5	9.6	9/8/2010	7.53	9.56	25/8/2010	7.44	9.92
25/7/2010	7.16	9.5	10/8/2010	7.23	9.65	26/8/2010	7.61	9.93
26/7/2010	7	9.6	11/8/2010	7.23	9.65	27/8/2010	7.41	10
27/7/2010	7.09	9.58	12/8/2010	6.98	9.68	28/8/2010	7.72	9.9
28/7/2010	7.12	9.55	13/8/2010	7.02	9.8	29/8/2010	7.24	9.89
29/7/2010	7.04	9.56	14/8/2010	7.23	9.78	30/8/2010	7.23	9.91
30/7/2010	7.1	9.61	15/8/2010	7.25	9.87	31/8/2010	7.44	9.87
31/7/2010	7.02	9.57	16/8/2010	7.31	9.86	1/9/2010	7.45	10.1
1/8/2010	7.28	9.49	17/8/2010	7.26	9.79	2/9/2010	7.26	10.03
2/8/2010	7.15	9.56	18/8/2010	7.35	9.76	3/9/2010	7.22	10
3/8/2010	6.98	9.6	19/8/2010	7.44	9.68	4/9/2010	7.06	10.09
4/8/2010	6.93	9.6	20/8/2010	7.32	9.78	5/9/2010	7.55	9.9
5/8/2010	7.01	9.59	21/8/2010	7.15	9.86	6/9/2010	7.56	9.98

ตารางที่ ก.3 ค่าพีเอช (ต่อ)

วันที่	พีเอช		วันที่	พีเอช		วันที่	พีเอช	
	AF	TF		AF	TF		AF	TF
7/9/2010	7.33	10.01	23/9/2010	7.67	10.02	9/10/2010	7.49	9.95
8/9/2010	7.35	10.05	24/9/2010	7.67	9.96	10/10/2010	7.44	9.9
9/9/2010	7.2	10.01	25/9/2010	7.87	10	11/10/2010	7.44	9.9
10/9/2010	7.37	10.07	26/9/2010	7.87	10	12/10/2010	7.37	9.78
11/9/2010	7.54	10.06	27/9/2010	7.67	9.87	13/10/2010	7.48	9.88
12/9/2010	7.41	10	28/9/2010	7.57	10.01	14/10/2010	7.98	11.05
13/9/2010	7.45	9.87	29/9/2010	7.82	10.01	15/10/2010	7.85	10.76
14/9/2010	7.53	9.9	30/9/2010	7.78	10.07	16/10/2010	7.72	10.47
15/9/2010	7.49	10.1	1/10/2010	7.74	10.06	17/10/2010	7.59	10.18
16/9/2010	7.55	9.95	2/10/2010	7.55	9.96	18/10/2010	7.46	9.78
17/9/2010	7.49	10.03	3/10/2010	7.26	9.96	19/10/2010	7.33	9.82
18/9/2010	7.46	10	4/10/2010	7.25	9.98	20/10/2010	7.2	9.2
19/9/2010	7.38	10.02	5/10/2010	7.25	9.98	21/10/2010	7.2	9.2
20/9/2010	7.85	10.01	6/10/2010	7.65	9.97	22/10/2010	7.2	9.2
21/9/2010	8.1	10.08	7/10/2010	7.46	9.96	23/10/2010	7.2	9.2
22/9/2010	7.46	10.01	8/10/2010	7.46	9.96	24/10/2010	7.5	8.7

ตารางที่ ก.3 ค่าพีเอช (ต่อ)

วันที่	พีเอช		วันที่	พีเอช		วันที่	พีเอช	
	AF	TF		AF	TF		AF	TF
25/10/2010	7.6	8.8	10/11/2010	7.6	9.3	26/11/2010	6.9	9
26/10/2010	7.2	8.8	11/11/2010	6.8	9.1	27/11/2010	6.94	9
27/10/2010	6.7	8.8	12/11/2010	6.8	9.1	28/11/2010	6.68	8.95
28/10/2010	7.2	9.2	13/11/2010	6.9	9	29/11/2010	6.68	8.95
29/10/2010	6.9	9.3	14/11/2010	6.9	9	30/11/2010	6.7	8.95
30/10/2010	7.2	9.2	15/11/2010	6.8	9.17	1/12/2010	8.3	9
31/10/2010	7.2	9	16/11/2010	6.8	9.17	2/12/2010	8.3	9
1/11/2010	7.2	9	17/11/2010	6.91	9.17	3/12/2010	7.4	8.8
2/11/2010	7.18	9.19	18/11/2010	6.91	9.17	6/12/2010	7.5	8.7
3/11/2010	7.18	9.19	19/11/2010	6.95	9.16	10/12/2010	7.6	8.7
4/11/2010	7.17	9.17	20/11/2010	6.95	9.16	13/12/2010	7.4	8.8
5/11/2010	7.17	9.17	21/11/2010	6	9.1	17/12/2010	7.5	8.7
6/11/2010	7	9.16	22/11/2010	6	9.1	20/12/2010	7.5	8.8
7/11/2010	6.9	9.2	23/11/2010	6.8	8.9	24/12/2010	7.4	8.7
8/11/2010	6.9	9.2	24/11/2010	6.8	8.9	27/12/2010	7.6	8.8
9/11/2010	7.6	9.3	25/11/2010	6.9	9	31/12/2010	7.6	8.6

ตารางที่ ก.3 ค่าพีเอช (ต่อ)

วันที่	**พีเอช**		**วันที่**	**พีเอช**		**วันที่**	**พีเอช**	
	AF	TF		AF	TF		AF	TF
4/1/2011	7.4	8.5	28/2/2011	7.4	8.6	25/4/2011	7.5	8.5
7/1/2011	7.5	8.7	4/3/2011	7.5	8.6	29/4/2011	7.5	8.4
10/1/2011	7.5	8.7	8/3/2011	7.9	8.6	2/5/2011	7.8	8.5
14/1/2011	7.4	8.6	11/3/2011	7.3	8.7	6/5/2011	7.4	8.4
17/1/2011	7.6	8.6	14/3/2011	7.4	8.8	9/5/2011	7.5	8.3
21/1/2011	7.4	8.7	18/3/2011	7.5	8.8	13/5/2011	7.5	8.5
24/1/2011	7.3	8.6	21/3/2011	7.4	8.9	16/5/2011	7.4	8.4
27/1/2011	7.2	8.5	24/3/2011	7.5	8.8	20/5/2011	7.5	8.5
31/1/2011	7.4	8.7	28/3/2011	7.3	8.8	23/5/2011	7.4	8.6
4/2/2011	7.6	8.6	1/4/2011	7.5	8.7	27/5/2011	7.8	8.6
7/2/2011	7.5	8.6	4/4/2011	7.7	8.6	30/5/2011	7.4	8.6
11/2/2011	7.5	8.7	8/4/2011	7.5	8.6	3/6/2011	7.5	8.6
14/2/2011	7.4	8.8	11/4/2011	7.4	8.5	6/6/2011	7.4	8.9
18/2/2011	7.5	8.9	16/4/2011	7.5	8.6	10/6/2011	7.5	8.7
21/2/2011	7.5	8.7	18/4/2011	7.3	8.5			
25/2/2011	7.5	8.6	22/4/2011	7.5	8.4			

ตารางที่ ก.4 ค่าเอ็มแอลเอสเอส

วันที่	MLSS (mg/l)			วันที่	MLSS (mg/l)			วันที่	MLSS (mg/l)		
	IN	AF	TF		IN	AF	TF		IN	AF	TF
24/8/2010	140	1570	2370	18/10/2010	0	150	500	13/12/2010	0	250	350
27/8/2010	280	2510	1110	22/10/2010	50	200	300	17/12/2010	100	550	250
31/8/2010	420	2090	1040	25/10/2010	100	100	350	20/12/2010	0	300	100
3/9/2010	400	1450	2180	29/10/2010	50	850	300	24/12/2010	50	100	200
6/9/2010	380	2340	2570	1/11/2010	100	50	200	27/12/2010	0	900	1200
10/9/2010	370	1170	1140	5/11/2010	50	150	100	31/12/2010	50	100	400
13/9/2010	350	1450	2000	8/11/2010	100	400	50	4/1/2011	50	200	600
16/9/2010	250	1450	950	12/11/2010	0	800	100	7/1/2011	0	100	500
20/9/2010	500	1050	1650	15/11/2010	50	50	50	10/1/2011	100	200	400
23/9/2010	500	1050	1350	18/11/2010	50	250	1200	14/1/2011	400	150	450
27/9/2010	100	500	400	22/11/2010	50	100	400	17/1/2011	100	150	400
1/10/2010	100	300	200	26/11/2010	100	500	400	21/1/2011	300	450	1050
4/10/2010	50	150	500	29/11/2010	0	900	1200	24/1/2011	100	150	300
8/10/2010	50	250	1200	3/12/2010	50	950	100	27/1/2011	100	150	300
11/10/2010	100	400	1950	6/12/2010	50	100	200	31/1/2011	200	50	450
15/10/2010	10	250	1350	10/12/2010	100	250	150	4/2/2011	1000	250	350

ตารางที่ ก.4 ค่าเอ็มแอลเอสเอส (ต่อ)

วันที่	MLSS (mg/l)			วันที่	MLSS (mg/l)			วันที่	MLSS (mg/l)		
	IN	AF	TF		IN	AF	TF		IN	AF	TF
7/2/2011	100	150	350	4/4/2011	200	100	500	30/5/2011	0	50	2800
11/2/2011	200	55	450	8/4/2011	50	200	300	3/6/2011	0	100	600
14/2/2011	300	100	200	11/4/2011	50	200	400	6/6/2011	50	450	100
18/2/2011	150	300	600	16/4/2011	100	100	100	10/6/12011	50	450	100
21/2/2011	100	100	500	18/4/2011	100	500	500				
25/2/2011	50	100	400	22/4/2011	150	200	300				
28/2/2011	50	500	200	25/4/2011	50	200	500				
4/3/2011	50	100	100	29/4/2011	50	100	300				
8/3/2011	0	100	600	2/5/2011	100	200	400				
11/3/2011	50	200	100	6/5/2011	50	100	300				
14/3/2011	50	100	200	9/5/2011	50	100	500				
18/3/2011	100	600	100	13/5/2011	0	500	400				
21/3/2011	50	300	500	16/5/12011	50	200	100				
24/3/2011	50	400	1300	20/5/2011	0	100	500				
28/3/2011	50	100	500	23/5/2010	0	150	300				
1/4/2011	150	200	600	27/5/2010	50	200	450				

ภาคผนวก ข

รายการคำนวณ

ซีโอดี (COD)

1. การคำนวณค่าซีโอดี

$$\text{FAS} = \frac{0.1 \times 3}{\text{ปริมาณที่ไตเตรต}}$$

$$\text{ค่าซีโอดี} = \frac{8{,}000 \times \text{FAS X (blank – ปริมาณที่ไตเตรต)}}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าซีโอดี

วันที่ 30 พฤษภาคม 2554 FAS ไตเตรตได้ 12.1 มิลลิลิตร Blank ไตเตรตได้ 11.9 มิลลิลิตร และน้ำเข้าไตเตรตได้ 6.7 มิลลิลิตร ใช้ตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร

$$\text{คำนวณ FAS} = \frac{0.1 \times 3}{12.1}$$

$$= 0.025$$

$$\text{คำนวณค่าซีโอดี} = \frac{8000 \times 0.025 \times (11.9 - 6.7)}{1}$$

$$= \text{1,040 มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

2. คำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัด} = \frac{(\text{ซีโอดีเข้า - ซีโอดีออก}) \times 100}{\text{ซีโอดีเข้า}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

วันที่ 4 มีนาคม 2554 ค่าเฉลี่ยซีโอดีน้ำเข้าระบบ คือ 617.4 มิลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีออกจากถังหรองไร้อากาศคือ 108.4 มิลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัด} = \frac{(617.4 - 108.4) \times 100}{617.4}$$

$$= 82.44\%$$

3. การคำนวณหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา

3.1 ถังกรองไร้อากาศ

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา; } r_s = \frac{(\text{ซีโอดีเข้า - ซีโอดีออก})}{\text{ระยะเวลากักเก็บ}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่สภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยซีโอดีน้ำเข้าคือ 586.6 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าเฉลี่ยน้ำออกจากถังกรองไร้อากาศคือ 96.0 มิลิกรัมต่อลิตร โดยระยะเวลากักเก็บน้ำของถังกรองไร้อากาศคือ 2 วัน ดังนั้น

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา; } r_s = \frac{(0.5866 \text{ kg/m}^3 - 0.096 \text{ kg/m}^3)}{2 \text{ d}}$$

$$= 0.245 \text{ KgCOD/m}^3\text{/d}$$

3.2 ถังโปรยกรอง

$$\text{อัตราการบำบัดซีโอดี; } r_s = \frac{(\text{ซีโอดีเข้า - ซีโอดีออก}) \times \text{อัตราไหลน้ำ}}{\text{ปริมาณตัวกลาง}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่สภาวะซีโอดีเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าเฉลี่ยซีโอดีน้ำเข้าถังโปรยกรองคือ 96 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าเฉลี่ยน้ำออกจากถังกรองไร้อากาศคือ 50.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่อัตราไหลของน้ำเข้าคือ 0.012 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และปริมาตรตัวการในถังโปรยกรองคือ 0.03 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้น

$$\text{อัตราการบำบัดซีโอดี; } r_s = \frac{(0.096-0.05) \text{ X } 0.012}{0.03}$$

$$= 0.0184 \text{ KgCOD/m}^3\text{/d}$$

สี (Color)

1. หน่วยสีเอดีเอ็มไอ (ADMI Unit)

การวัดสีในหน่วย ADMI ใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำการวัดตัวอย่าง และทำการบันทึกค่าเปอร์เซ็นต์ทรานส์มิชชันที่ทุกๆ 10 นาโนเมตร ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร (ความยาวคลื่นในช่วงที่ตามนุษย์มองเห็น) คำนวณเป็นค่า Tristimulus Values X, Y, Z ตามตารางที่ ข.1 จากนั้นแปลงค่า X, Y, Z ให้เป็นค่า V_x, V_y, V_z โดยใช้โปรแกรม QuickBasic ช่วยในการคำนวณ

2. หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

การวัดสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำการวัดตัวอย่าง และทำการบันทึกค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 601 นาโนเมตร (มีค่าดูดกลืนแสงที่ (Maximum wavelength) 598 nm (KARATAS และคณะ, 2010)) คำนวณค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้กราฟมาตรฐาน รูปที่ ค.3 ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ตารางการคำนวณค่า CIE Tristimulus ในการคำนวณหาหน่วยสีเอดีเอ็มไอ (Allen และคณะ, 1973)

Wavelength (nm)	%T	X		Y		Z	
		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		0.0219		0	
620		0.0707		0.03153		0.00002	
610		0.08325		0.04176		0.00002	
600		0.08949		0.05316		0.00007	
590		0.08984		0.06627		0.0001	
580		0.08417		0.07992		0.00016	
570		0.07322		0.09147		0.0002	
560		0.0588		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		0.0152	
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		0.0157	
400		0.00108		0.00002		0.00513	
		X SUM =		Y SUM =		Z Sum =	

ตัวอย่างโปรแกรมการคำนวณหาค่า V_x, V_y, V_z และค่าเอดีเอ็มไอ 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
```

คำนวณค่าใช้จ่าย

กำหนดอัตราไหล 100 ลูกบาศก์เมตร /วัน

Head lose 3 เมตร

ค่าไฟ 3 บาท/หน่วย

เดินเครื่อง 24 ชั่วโมง

ค่า $NaHCO_3$ 30 บาท/กิโลกรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าสารเคมี

ที่อัตราเวียนน้ำ 1 เท่า ใช้สารเคมี 0.61 กรัม /ลิตร

= 0.61(กรัม/ลิตร) x 100,000 (ลิตร/วัน)

= 61,000 กรัมต่อวัน

= 61 (กิโลกรัม/วัน) x 30 (บาท/กิโลกรัม)

= 1,830 บาท /วัน

= 54,900 บาท /เดือน

ค่าไฟฟ้า

ที่อัตราเวียนน้ำ 1 เท่า เวียนน้ำ 100 ลูกบาศก์เมตร /วัน

= 0.0012 ลูกบาศก์เมตร /วินาที

= 0.0012 x 3 x 9.81 x 2

= 0.068 Kw

=0.068 x 24

= 1.635 หน่วย

= 1.6 x 3

= 4.8 บาทต่อวัน

= 147 บาทต่อเดือน

(หมายเหตุ : การคิดค่าใช้จ่ายที่ลดลงจะนำค่าสารเคมีที่อัตราเวียนน้ำเทียบกับไม่เวียนน้ำและนำมาหักกับค่าไฟฟ้า)

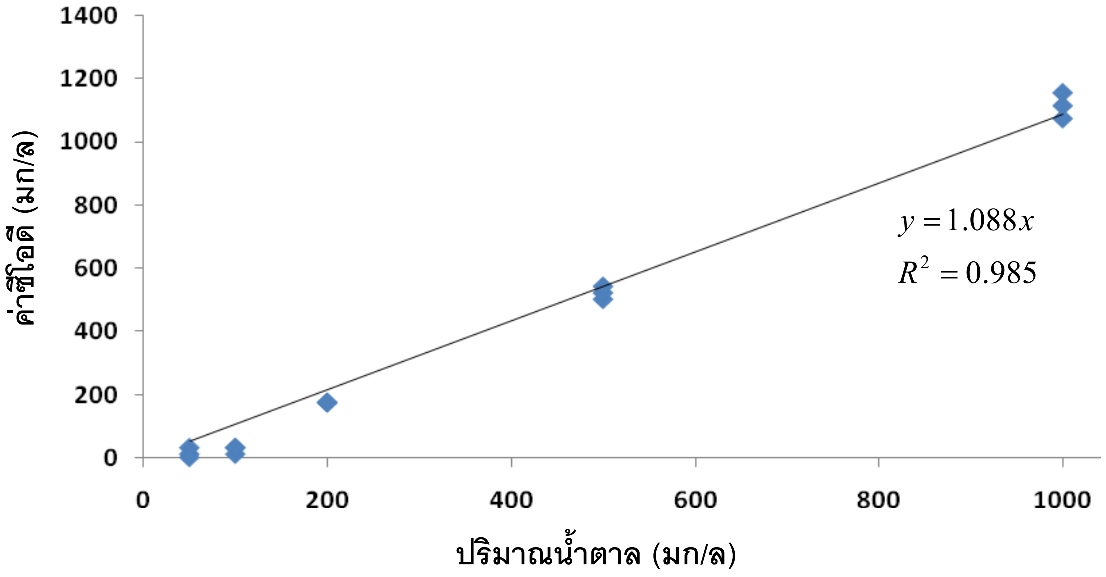
= 54,900 – 147

= 54,753 บาทต่อเดือน

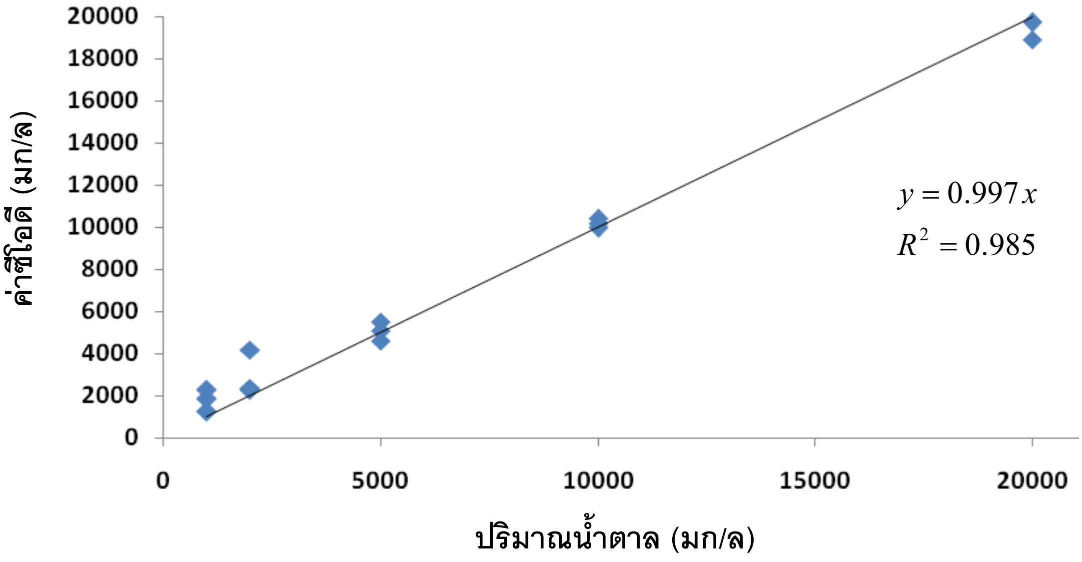
ภาคผนวก ค

กราฟมาตรฐาน

1. กราฟมาตรฐานปริมาณน้ำตาลกับค่าซีโอดี

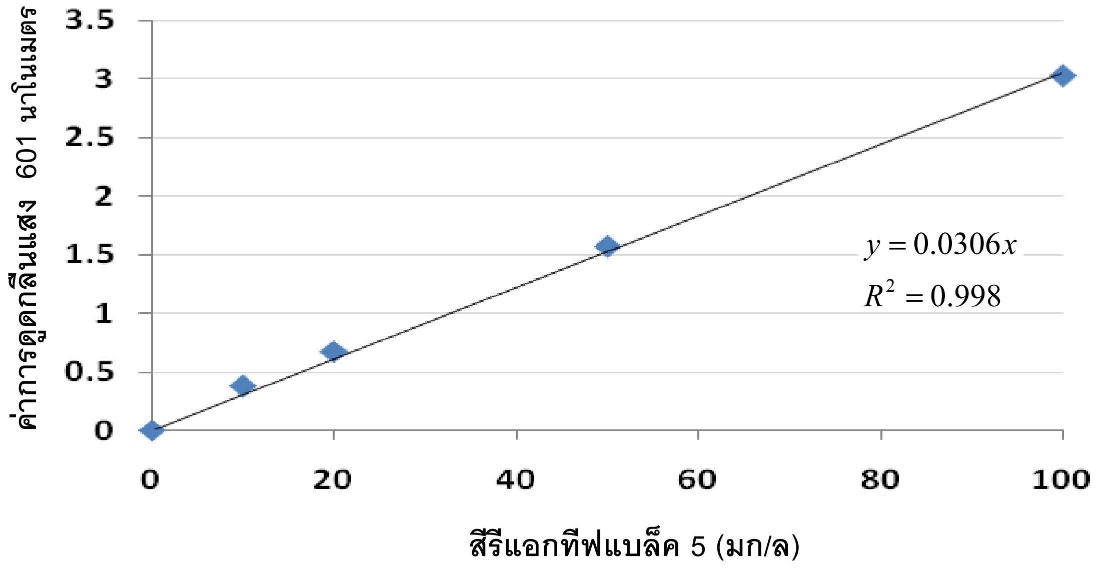


รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานน้ำตาลที่ซีโอดี 50 – 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

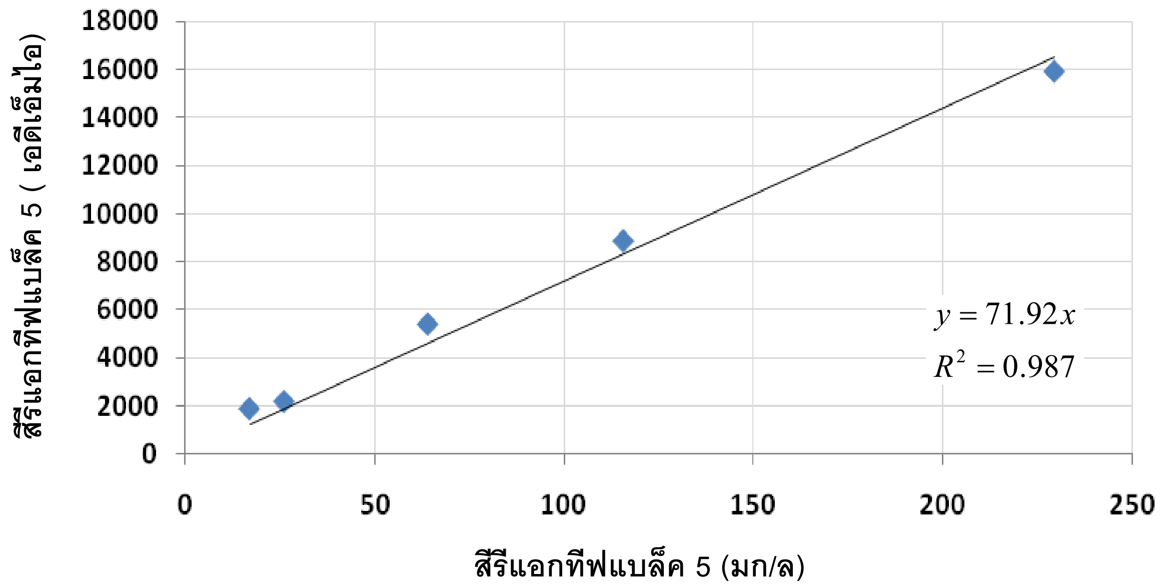


รูปที่ ค.2 กราฟมาตรฐานน้ำตาลที่ซีโอดี 1,000 – 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. กราฟมาตรฐานสี



รูปที่ ค.3 ปริมาณสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ 601 นาโนเมตร



รูปที่ ค.4 สีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับหน่วยเอดีเอ็มไอ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบัญชา บุญอนันต์วงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 13 เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2528 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2550 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2551