

การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกโตออกซิเดชัน
โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบสลับไร้อากาศและเติมอากาศ



นางสาวศุภรัตน์ สวัสดิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Enhancement of Azo Dye Removal and Byproduct from Autoxidation Reaction
by Alternating Anaerobic and Aerobic Biological Process

Miss Suparat Sawat



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซและผลิตภัณฑ์จาก
ปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน โดยกระบวนการบำบัดทาง
ชีวภาพแบบสลับไร้อากาศและเติมอากาศ

โดย

นางสาวศุภรัตน์ สวัสดิ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ตะวัน ลิ้มปิยากร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. กิตติคุณ ตรุยานนท์)

ศุภรัตน์ สวัสดิ์ : การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบสลับไร้อากาศและเติมอากาศ (Enhancement of Azo Dye Removal and Byproduct from Autoxidation Reaction by Alternating Anaerobic and Aerobic Biological Process) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ศรัณย์ เตชะเสน, 122 หน้า.

สีอะโซเป็นสีที่ย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและไม่สามารถบำบัดได้ด้วยระบบเอเอสทั่วไป งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพและอัตราการบำบัดสีอะโซด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศ และอัตราการเกิดสีใหม่จากระบบเติมอากาศ ทำการทดลองแบบแบทช์โดยใช้ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง โดยใช้สิริแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 10 25 50 100 150 200 และ 400 มก./ล ซึ่งเท่ากับความเข้มข้นสี 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอตามลำดับ ใช้น้ำตาลทรายความเข้มข้น 1,000 มก.ซีไอดี/ลิตร และควบคุมพีเอชภายในถังปฏิกิริยาให้อยู่ในช่วง 7-7.5 ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นสีลดลงในถังกรองไร้อากาศ และน้ำเปลี่ยนสีจากม่วงเข้มเป็นเหลืองเขียว โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงสุด 97% และมีอัตราการบำบัดสีอยู่ในช่วง 678.7±21.1 ถึง 20,636.3±69.31 เอดีเอ็มไอ/วัน ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยมีค่า k_1 เท่ากับ 0.861±0.04 วัน⁻¹ และเมื่อนำน้ำทิ้งจากระบบถังกรองไร้อากาศมาบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 72±24.3 และ 113.3±32.1 เอดีเอ็มไอ น้ำทิ้งไม่เปลี่ยนสีและค่าความเข้มข้นสีไม่เพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 175±50.4 ถึง 800 เอดีเอ็มไอ น้ำเปลี่ยนสีจากเหลืองเขียวเป็นส้มแดงโดยมีค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น 134.1±11% จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และอัตราการเกิดสีใหม่อยู่ในช่วง 30.65±14.8 ถึง 204.41±40.3 เอดีเอ็มไอ/วัน และจาก Modified monod equation พบว่า ค่า k_m เท่ากับ 334.09±55.46 เอดีเอ็มไอ/วัน และค่า K_s เท่ากับ 229.23±117.92 เอดีเอ็มไอ และเมื่อนำกลับไปบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศพบว่า ถังกรองไร้อากาศไม่สามารถบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่ให้หายไปหรือลดลงจากเดิมได้ ถึงแม้ว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดสีโอดีเฉลี่ย 65.3% สรุปได้ว่า ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดสีอะโซได้เป็นอย่างดี และระบบถังโปรยกรองทำให้ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้นที่ความเข้มข้นสีเริ่มต้นสูงกว่า 1,471 เอดีเอ็มไอ โดยสีที่เกิดขึ้นมีสีแตกต่างไปจากสีตั้งต้น จึงควรศึกษาชนิดของสีที่เกิดขึ้นเพื่อหาแนวทางในการบำบัดต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670410021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS:

SUPARAT SAWAT: Enhancement of Azo Dye Removal and Byproduct from Autoxidation Reaction by Alternating Anaerobic and Aerobic Biological Process. ADVISOR: ASST. PROF.SARUN TEJASEN, Ph.D., 122 pp.

Azo dye is commonly used in the textile industry which could not be treated with conventional activated sludge process. This research studied the efficiencies and removal rates of Azo dye by anaerobic process and autoxidation rate by aerobic process. Batch reactors using anaerobic filter and trickling filter were tested with Reactive Violet 5 color concentrations of 10, 25, 50, 100, 150, 200, and 400 mg/L, equally to 508, 1471, 2771, 4328, 7747, 10800, and 21800 ADMI respectively. Sugar was used as energy source at 1,000 mgCOD/L, and pH was controlled at 7-7.5. Results showed that dye concentrations were reduced significantly in anaerobic filter, color was changed from deep violet to pale yellow with maximum color removal efficiency at 97%, and the color removal rates were in range of 678.7 ± 21.1 to $20,636.3 \pm 69.31$ ADMI/h, following 1st order kinetic reactions at a rate constant (k_1) of 0.861 ± 0.04 day⁻¹. Effluent from anaerobic filter was further treated by trickling filter. The results showed that there were no color reappearing at remaining color of 72 ± 24.3 and 113.3 ± 32.1 ADMI. But at remaining color of 175 ± 50.4 to 800 ADMI, water color was changed from pale yellow to reddish orange with the increase in ADMI of $134.1 \pm 11\%$ from autoxidation process. The color reappearing rates were 30.65 ± 14.8 to 204.41 ± 40.3 ADMI/day. The equation can be described as Modified monod equation, k_m of 334.09 ± 55.46 ADMI/day and K_s of 229.23 ± 117.92 ADMI. These effluents were treated again with anaerobic filter but the new color could not be decolorized even though the average COD removal efficiencies was at 65.3%. In conclusion, anaerobic filter had high efficiency for treating the Azo dye in wastewater while trickling filter was able to treat the remaining aromatic amines. However, anaerobic treatment of high concentrations of azo dye resulting in high aromatic amines which can form an autoxidation color that unable to treat again by anaerobic condition. Therefore this newly formed color needs to be further investigated to find the proper treatment process.

Department: Environmental Engineering

Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณต่อผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา และแก้ไขปัญหา รวมไปถึงข้อบกพร่องตลอดการดำเนินงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์ กรรมการ และ ดร.กิตติคุณ ตรียานนท์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่ได้กรุณาชี้แนะแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท ไทสตาร์ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สีย้อมรีแอกทีฟไอโอเล็ท 5 เพื่อใช้ในการทดลองครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ ครูห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้คำชี้แนะ ให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสาร และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ Firstclass Lap ทุกคน รวมถึงเพื่อนนิสิตปริญญาโท และพี่ปริญญาเอกทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันในช่วงการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา-มารดา และทุกคนในครอบครัวที่สนับสนุน ส่งเสริม และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สีย้อม.....	5
2.1.1 ประวัติของสีย้อม.....	5
2.1.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม	5
2.1.2.1 การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งาน	6
2.1.2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ	7
2.1.2.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางเคมี.....	7
2.1.3 พันธะอะโซ (Azo bond).....	9
2.2 สีย้อมรีแอกทีฟ.....	10
2.2.1 โครงสร้างเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟ	10
2.2.2 สีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5.....	11

2.3 คุณลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ	11
2.3.1 น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม.....	11
2.3.2 ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	13
2.3.3 สีของน้ำเสีย.....	14
2.3.4 อันตรายจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ	15
2.4 การวัดสี	16
2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ	17
2.5.1 กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment).....	17
2.5.2 กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment).....	18
2.5.3 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment).....	20
2.5.3.1 การบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศ (Anaerobic treatment).....	20
2.5.3.2 การบำบัดทางชีวภาพแบบเติมอากาศ (Aerobic treatment).....	23
2.5.3.3 การบำบัดร่วมแบบไร้อากาศ-แบบเติมอากาศ (Combined Anaerobic- Aerobic treatment).....	24
2.6 ข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีบำบัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ	26
2.7 ธาตุอาหาร (Nutrients).....	29
2.8 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Autoxidation Reaction).....	31
2.9 กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Filter)	32
2.10 กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบถังโปรยกรอง (Trickling Filters).....	34
2.11 สมการปริมาณสารสัมพันธ์ต่อสารอินทรีย์ในน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	37
2.12 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3 แผนการทดลองและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	46
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	46

3.2	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	47
3.2.1	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	47
3.2.2	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	47
3.2.3	ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
3.3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	50
3.3.1	การเริ่มเดินระบบ.....	50
3.3.2	การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	51
3.3.3	การทดลองที่ 1.....	51
3.3.2	การทดลองที่ 2.....	52
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	56
4.1	ผลการทดลองที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออดิออกซิเดชัน โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ.....	56
4.1.1	การเริ่มต้นระบบ.....	57
4.1.2	ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	59
4.1.3	ค่าความเข้มข้นสี.....	60
4.1.4	ค่าซีไอดี.....	64
4.1.5	ประสิทธิภาพการบำบัด.....	65
4.1.5.1	ประสิทธิภาพการบำบัดสี.....	66
4.1.5.2	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี.....	70
4.1.6	ลักษณะสีของน้ำทิ้งเมื่อผ่านระบบบำบัดต่างๆ.....	74
4.1.7	พีเอช.....	78
4.1.8	ของแข็งแขวนลอย.....	79

4.2 ผลการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกโต ออกซิเดชัน	80
4.2.1 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	81
4.2.2 ค่าความเข้มข้นสี.....	81
4.2.3 ค่าซีไอดี.....	83
4.2.4 ประสิทธิภาพการบำบัด	83
4.2.4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสี.....	83
4.2.4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี.....	85
4.2.5 ลักษณะสีของน้ำทิ้งเมื่อผ่านระบบบำบัดต่างๆ	87
4.2.6 พีเอช	89
4.2.7 ค่าของแข็งแขวนลอย.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	92
5.3 ข้อเสนอแนะ	92
รายการอ้างอิง	93
ภาคผนวก.....	99
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	122

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 สรุปลักษณะการผลิตสีย้อม.....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมฟิโวลีน 5.....	11
รูปที่ 2.3 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม.....	12
รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงผลกระทบของน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม.....	16
รูปที่ 2.5 การบำบัดสีอะโซและสารอะโรมาติกเอมีน.....	25
รูปที่ 2.6 ถังกรองไร้อากาศ.....	32
รูปที่ 2.7 ถังโปรยกรอง.....	35
รูปที่ 3.1 ระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังโปรยกรอง.....	49
รูปที่ 3.2 ตัวกลางพลาสติกกรุ่น R-190 Random Flow Media ของบริษัท AQUA.....	50
รูปที่ 3.3 แผนผังสรุปการทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ และอัตราการเกิดสี.....	52
รูปที่ 3.4 แผนผังสรุปการทดลองที่ 2.....	53
รูปที่ 4.1 ค่าซีไอดีเทียบกับเวลา เมื่อผ่านระบบถังกรองไร้อากาศในช่วงเริ่มต้นระบบ.....	58
รูปที่ 4.2 ค่าซีไอดีเทียบกับเวลา เมื่อผ่านระบบถังโปรยกรองในช่วงเริ่มต้นระบบ.....	58
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นสี (เอดีเอ็มไอ) เทียบกับเวลา เมื่อผ่านระบบถังกรองไร้อากาศ.....	59
รูปที่ 4.4 ลักษณะสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมฟิโวลีน 5 ความเข้มข้นต่างๆในหน่วย.....	60
รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นสีย้อมฟิโวลีน 5 เริ่มต้นที่ความเข้มข้นต่างๆในหน่วยเอดีเอ็มไอ.....	62
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งในหน่วยเอดีเอ็มไอเมื่อผ่านระบบถังโปรยกรอง.....	62
รูปที่ 4.7 ค่าซีไอดีเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความเข้มข้นสีย้อมฟิโวลีน 5 ต่างๆ.....	65
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมฟิโวลีน 5 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของถังกรองไร้อากาศ.....	66
รูปที่ 4.9 อัตราการบำบัดสีย้อมฟิโวลีน 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 21,800 เอดีเอ็มไอ.....	67

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีเทียบกับความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5	68
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่เทียบกับความเข้มข้นสีของน้ำทิ้ง	70
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศ ถังโปรยกรอง และถังกรองไร้อากาศ	71
รูปที่ 4.13 อัตราการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 21,800 เอดีเอ็มไอ	72
รูปที่ 4.14 อัตราการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นต่างๆ	73
รูปที่ 4.15 อัตราการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นต่างๆ	73
รูปที่ 4.16 ลักษณะสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 7,747	74
รูปที่ 4.17 โครงสร้างสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิด	75
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร	78
รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ และค่าซีโอดีเทียบกับเวลา	82
รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10,800 เอดีเอ็มไอ	84
รูปที่ 4.21 อัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10,900 เอดีเอ็มไอ	85
รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร	86
รูปที่ 4.23 อัตราการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 10,900 เอดีเอ็มไอ	86
รูปที่ 4.24 ลักษณะสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น	88

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของโครโมฟอร์ และออกโซโครมของสีเขียว	8
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม	14
ตารางที่ 2.3 เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ	27
ตารางที่ 2.4 ธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ใช้ในระดับ ห้องปฏิบัติการ	30
ตารางที่ 2.5 ธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศที่ใช้ในระดับ ห้องปฏิบัติการ	31
ตารางที่ 2.6 การออกแบบระบบบำบัดแบบ Upflow Attached Growth Reactor	33
ตารางที่ 2.7 การออกแบบระบบบำบัดแบบโปรยกรอง	36
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัย	54
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัย	55
ตารางที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบบำบัดที่มีสีรีแอกทีฟไอโอเล็ต 5 ความ เข้มข้นต่างๆ	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย และเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำและสารเคมีในขั้นตอนกระบวนการผลิตต่างๆ เป็นจำนวนมาก โดยสีย้อมที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมนี้ได้มีการพัฒนาให้มีความคงทนและยากต่อการย่อยสลายมากขึ้น ซึ่งสีย้อมอะโซ (Azo dyes) เป็นสีย้อมที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทออย่างแพร่หลายและถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะสีย้อมอะโซรีแอคทีฟ (Reactive azo dyes) เนื่องจากสีย้อมประเภทนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อน สามารถละลายน้ำได้ดี เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลส โมเลกุลของสีย้อมจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลส และติดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ในสถานะที่เป็นต่าง และหลังจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียประมาณ 10% ของปริมาณสีย้อมที่ใช้ทั้งหมด (Jonstrup และคณะ, 2011) ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพแบบทั่วไปได้ หากปล่อยน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนเพียงเล็กน้อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง ส่งผลให้แหล่งน้ำนั้นเป็นที่น่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์โดยรอบ เช่น สีย้อมจะไปบดบังการส่งผ่านของแสงลงสู่ท้องน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำอาจตายได้ จึงควรบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนสามารถบำบัดได้หลายวิธี เช่น กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) กระบวนการบำบัดทางฟิสิกส์-เคมี (Physicochemical Treatment) โดยกระบวนการบำบัดเหล่านี้เป็นกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีการใช้สารเคมีปริมาณมาก จึงทำให้เกิดตะกอนจากกระบวนการบำบัดเป็นจำนวนมาก และตะกอนที่เกิดขึ้นเหล่านี้ต้องนำไปทำการกำจัดต่อ ส่งผลให้มีต้นทุนในการบำบัดสูง ดังนั้นกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) จึงเป็นกระบวนการบำบัดที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นกระบวนการบำบัดที่มีต้นทุนต่ำ ระบบดูแลรักษาง่าย อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบ่งออกเป็น กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Process) เป็นกระบวนการที่ทำให้พันธะอะโซ (Azo bond) ที่อยู่ในโครงสร้างของสีย้อมอะโซแตกออกจากกัน ซึ่งได้เป็นสารประกอบอะโรมาติกเอมีน ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นสีลดลงจนเกือบไม่มีสี และกระบวนการบำบัดแบบเติมอากาศ (Aerobic Process) ซึ่งในกระบวนการนี้สามารถย่อยสลายสารประกอบอะโร

มาติกเอมีน (Aromatic amines) ซึ่งเกิดจากการสลายสีในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศได้ โดยสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดขึ้นนี้เป็นสารที่อันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ (Jonstrup และคณะ, 2011) และที่ความเข้มข้นของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนสูงๆ การเติมอากาศส่งผลให้สารประกอบอะโรมาติกเอมีนรวมตัวกัน ทำให้น้ำที่กลับมามีสีอีกครั้งหนึ่งด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Autoxidation Reaction) จากงานวิจัยที่ผ่านมานาจรีย์ แสงสิงห์ (2556) พบว่า น้ำเสียที่มีสีขมปนเปื้อนเมื่อผ่านกระบวนการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) ค่าความเข้มสีลดลงจนเกือบไม่มีสี แต่เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรอง (Trickling Filter) น้ำทิ้งจะกลับมามีสีอีกครั้ง ส่งผลให้ค่าความเข้มสีเพิ่มสูงขึ้น

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ และอัตราการผลิตสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่มีโครงสร้างเคมีประกอบด้วยพันธะอะโซ 1 พันธะ (Monoazo) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เมื่อผ่านการบำบัดแบบเติมอากาศ จะเห็นความเปลี่ยนแปลงสีของน้ำทิ้งที่กลับมามีสีใหม่อีกครั้งหนึ่งได้อย่างชัดเจนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบสลับริ้อากาศและเติมอากาศแบบมีตัวกลาง ทำการทดลองแบบแบทช์ โดยใช้ระบบบำบัดต่อเนื่องจากงานวิจัยบัญชา บุญอนันต์วงศ์ (2554)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ และอัตราการผลิตสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นต่างๆ
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5
3. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยระดับห้องปฏิบัติการ (Lap scale) โดยดำเนินการทดลองที่ อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ระบบที่ใช้ในงานวิจัย คือ ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) ปริมาตรถัง 31 ลิตร และระบบถังโปรยกรอง (Trickling Filter) ปริมาตรถัง 31 ลิตร ระดับห้องปฏิบัติการ
2. สีย้อมสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 จากบริษัท Dystar (Thailand) จำกัด
3. หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย นำมาจากบริษัท แชนอี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด จากถังไร้อากาศ โดยนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาเลี้ยงร่วมกับวัสดุตัวกลาง และใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นแหล่งพลังงาน เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางก่อนใส่เข้าไปในถังปฏิกริยา
4. น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วยความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 7 ค่า ได้แก่ 10 25 50 100 150 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 ตามลำดับ ใช้น้ำตาลทรายขาวเป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร และเติมธาตุอาหารเสริมอื่นๆ
5. พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดได้แก่ ซีไอดี (COD) พีเอช (pH) ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS) ค่าความเข้มสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (American Dye Manufacturers Institute color units, ADMI) และมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซและอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกริยาออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นต่างๆ
2. ทราบประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกริยาออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5
3. ทราบระยะเวลาที่เก็บน้ำที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซของระบบถังกรองไร้อากาศ และทราบระยะเวลาการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกริยาออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของระบบถังโปรยกรอง

4. ทราบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นต่างๆ
5. ทราบจลนพลศาสตร์ของอัตราการบำบัดสรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และอัตราการเกิดสีใหม่ จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบการบำบัด สีที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อไปในอนาคต



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

2.1.1 ประวัติของสีย้อม

สีย้อม (Dyestuff) เป็นสารเคมีที่สกัดมาจากน้ำมันปิโตรเลียมและถ่านหิน เมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีน ไซลีน แอนทาซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว สารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไนเตรชัน แอมมิเนชัน ฯลฯ เพื่อเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) และสารตัวกลางนี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2527 อ้างถึงใน บัญชา บุญอนันต์วงศ์, 2554) ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมามีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป กระบวนการผลิตสีย้อมจะแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สรุปกระบวนการผลิตสีย้อม

2.1.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม

การจัดการน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพ จะต้องเข้าใจเกี่ยวกับประเภทของสีย้อม สารเคมีที่ใช้ในการย้อม และคุณลักษณะของน้ำเสีย เป็นต้น โดยประเภทของสีย้อมสามารถแบ่งออกถึงลักษณะของน้ำเสียได้ เช่น น้ำเสียมีการปนเปื้อนสารละลายที่มีประจุลบ ความสามารถในการละลายน้ำ อุณหภูมิในการย้อมสี และสภาพความเป็นกรด-ด่างที่ทำให้สีย้อมติดผ้าได้ดี เป็นต้น สามารถจำแนกประเภทของสีย้อมได้ดังนี้

2.1.2.1 การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งาน

1. สีย้อมเพอร์ส (Disperse Dyes) ใช้ย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีย้อมชนิดนี้จะไม่ละลายน้ำจึงเป็นอนุภาคคอลลอยด์กระจายอยู่ในน้ำซึ่งต้องใช้สารพา (Carrier) ช่วยให้เข้าไปทำปฏิกิริยาในเส้นใย

2. สีย้อมกรด (Acids Dyes) ใช้ย้อมเส้นใยในน้ำย้อมซึ่งมีสภาพเป็นกรดเจือจาง อาจนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ เช่น ปอ ป่าน และโพลีเอไมด์ เป็นต้น ตัวสีย้อมเกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกำมะถัน

3. สีย้อมอะโซอิก (Azoic Dyes) สีย้อมกลุ่มนี้ใช้กับเซลลูโลสเท่านั้น ตัวสีย้อมชนิดนี้จะไม่ละลายน้ำ

4. สีย้อมเบสิก (Basic Dyes) นิยมใช้ย้อมขนสัตว์ และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด ย้อมติดเส้นใยของเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย บางครั้งจะเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่า สีย้อมไอออน ย้อมติดเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมจะจับกับประจุลบของเส้นใย

5. สีย้อมไคเรกต์ (Direct Dyes) สีย้อมไคเรกต์บางชนิดเรียกว่า สีย้อมฝ้าย เพราะเป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่สามารถย้อมติดใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องเติมสารช่วยย้อม แต่ในปัจจุบันการย้อมด้วยสีไคเรกต์นี้จะใช้เกลือช่วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้สูงขึ้น สีย้อมในกลุ่มนี้มี โทนสี คุณสมบัติการย้อม ความคงทน ราคาแตกต่างกันมาก ถ้าเป็นสีที่คงทนมาก โครงสร้างจะซับซ้อนมาก ส่งผลให้ราคาทุนจะสูงตามไปด้วย

6. สีย้อมมอดานต์ (Modant Dyes) ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เมื่อสีก่อตัวขึ้นบนผ้าแล้วจะนำมาย้อมทับด้วยเกลือโลหะซึ่งจะมีความคงทนมากกว่าผ้าที่ไม่ได้ย้อมทับด้วยเกลือโลหะ

7. สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes) ใช้ย้อมฝ้ายโดยเฉพาะ ตัวสีย้อมชนิดนี้ราคาค่อนข้างถูก แต่สีที่ย้อมจะไม่ค่อยสดใส ตามปกติตัวสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่ โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ ทำให้สีสามารถละลายน้ำได้

8. สีย้อมแวต (Vat Dyes) นิยมใช้กับเส้นใยเซลลูโลส โดยเฉพาะเส้นใยฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ ต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมมาทำให้ละลาย เช่นเดียวกับสีย้อมชนิดซัลเฟอร์ สีแวตเมื่อถูกรีดิวซ์จะมีสีคราม และมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมเข้าไปในเส้นใย และเมื่อถูกอากาศจะถูกออกซิไดซ์ให้กลับกลายเป็นสีแวตที่ไม่ละลายน้ำอย่างเดิม

9. สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dyes) ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายได้ในน้ำ มีคุณสมบัติเป็นแอนไอออน เมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะติดแน่นกับเส้นใย

10. สีย้อมโลหะ (Metalic Dyes) เป็นสีย้อมอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ มีประจุลบ ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

11. สีย้อมโอเนียม (Onium Dyes) ปกติสีตัวนี้นิยมใช้พิมพ์ผ้ามากกว่าย้อมผ้า จัดเป็นสีที่สามารถทำให้ละลายได้ในน้ำ รูปแบบการย้อมคล้ายกับสีแวต (บุขรา ประชุมญาติ, 2545)

2.1.2.2 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ

สามารถแบ่งสีย้อมได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ละลายน้ำได้เรียกว่า สีย้อม (Dyes) และชนิดที่ไม่ละลายน้ำเรียกว่า ปิกเมนต์ (Pigments)

2.1.2.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะทางเคมี

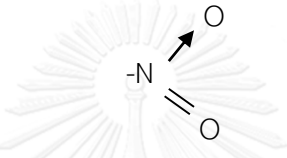
1) โครโมฟอร์ (Chromophores)

เป็นกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อมที่ทำให้สีปรากฏออกมาให้ตามนุษย์ปกติมองเห็น เนื่องจากกลุ่มอะตอมนี้จะเป็นตัวดูดกลืนแถบสีขาวยาวบางแถบและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มองเห็นสีย้อมในโทนสีแตกต่างกันไป

2) ออกโซโครม (Auxochromes)

เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ ถ้าโมเลกุลที่ไม่มีกลุ่มอะตอมออกโซโครมนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้ แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใยซึ่งเรียกว่า โครมาเจน (Chromagen) โดยทั้งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แสดงชื่อของหมู่พันธะและชนิดพันธะเคมีของโครงสร้างโครโมฟอร์และออกโซโครม

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของโครโมฟอร์ และออกโซโครมของสีย้อม
(บุชรา ประชุมญาติ, 2545)

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม	หมู่พันธะเคมี	ชื่อพันธะ
โครโมฟอร์	-N=N-	Azo
	>C=S	Thio
	-N=O	Nitroso
	$\begin{array}{c} \oplus \\ \\ -N=N-\ominus \\ \\ O \end{array}$	Azoxy
		Nitro
	-C=N-	Azomethine
	>C=O	Carbonyl
	>C=C<	Ethenyl
โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม	หมู่พันธะเคมี	ชื่อพันธะ
ออกโซโครม	-NH ₂	Amino
	-NHCH ₃	Methylamino
	-NH(CH ₃) ₂	Dimethyl amino
	-SO ₃ H	Sulphonic acid
	-OH	Hydroxy
	-COOH	Carboxylic acid
	-CL	Chloro
	-CH ₃	Methyl
	-OCH ₃	Methoxy
	-CN	Cyano
	-COCH ₃	Acetyl
	-CONH ₂	Amino

ตามที่กล่าวมาข้างต้นประเภทสีที่แตกต่างกันจะทำให้สีที่ได้มีลักษณะที่ต่างกันออกไป ดังนั้นกระบวนการบำบัดจึงแตกต่างกันไปด้วย โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ทำการรวบรวมกระบวนการบำบัดต่างๆที่ผ่านมาทั้งกระบวนการบำบัดทางเคมี กายภาพ และชีวภาพ รวมทั้งลักษณะของแต่ละชนิดสี

2.1.3 พันธะอะโซ (Azo bond)

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

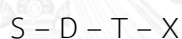
1. **Monoazo dyes** ประกอบด้วยโครโมฟอร์อะโซเพียง 1 กลุ่ม และแบ่งออกได้อีกเป็น 8 ชนิด คือ
 - 1.1 Monoazo Direct dyes
 - 1.2 Monoazo Acid dyes
 - 1.3 Monoazo food colours
 - 1.4 Monoazo Mordant dyes
 - 1.5 Monoazo Solvent dyes
 - 1.6 Monoazo Disperse dyes
 - 1.7 Monoazo Cationic dyes
 - 1.8 Monoazo Reactive 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** คือกลุ่มอะโซที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ ทำหน้าที่เป็นมอร์แดนท์หรือตัวช่วยเพิ่มการยิดเกาะ
6. **Stilbene azo dyes** ประกอบด้วยอะโซหนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ซึ่งให้สีเหลืองหรือส้มที่สามารถย้อมได้รวดเร็วและมีการยิดเกาะที่ดีสำหรับเส้นใยฝ้าย
7. **Pyrazolone azo dyes** เป็นสีย้อมอะโซที่มีหมู่ไพราซอลในโครงสร้าง

2.2 สีย้อมรีแอกทีฟ

สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dyes) เป็นชื่อสีย้อมที่เรียกตามลักษณะการใช้งาน สีย้อมรีแอกทีฟ เป็นสีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ประมาณ 10-15% ของทั้งหมด เนื่องจากสีชนิดนี้ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด โดยจะมีคุณสมบัติเป็นอออนลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง ขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใยเซลลูโลส แล้วเชื่อมโยงติดกัน โดยพันธะโคเวเลนต์เพื่อสร้างสารประกอบครอสลิงก์กับเซลลูโลสซึ่งเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ ทำให้เกิดเป็นสีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก

2.2.1 โครงสร้างเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟ

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่ายคือ



D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี และสร้างการยึดเกาะกับเส้นใยเซลลูโลส

X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใยเซลลูโลส

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

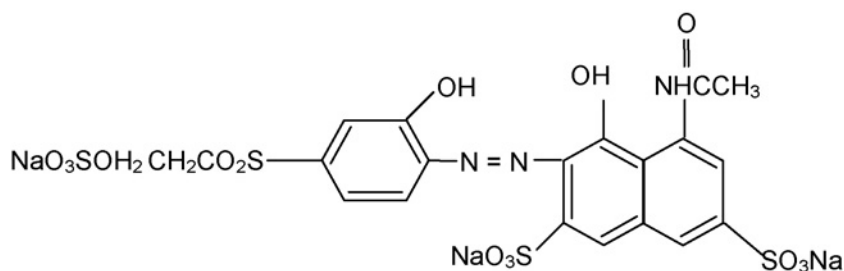
S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงและเป็นกลุ่มที่อยู่ติดกับโครโมฟอร์ โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิค ($-SO_2Na-$) อาจมี 1 กลุ่มหรือมากกว่า

ส่วนประกอบ 2 ส่วนที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สีย้อมแต่ละชนิดแตกต่างกัน คือ

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

2.2.2 สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5

สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 (Reactive Violet 5) หรือ Remazol Brilliant Violet 5R ดัชนีสีคือ 18097 สูตรเคมีคือ $C_{20}H_{16}N_3O_{15}S_4 \cdot 3Na$ น้ำหนักโมเลกุล 735.58 กรัมต่อโมล ค่าการดูดกลืนแสง 559 นาโนเมตร มีพันธะอะโซเป็นโครโมฟอร์ 1 ตำแหน่ง (Monoazo) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (นภาพจรีย์ แสงสิงห์, 2556)



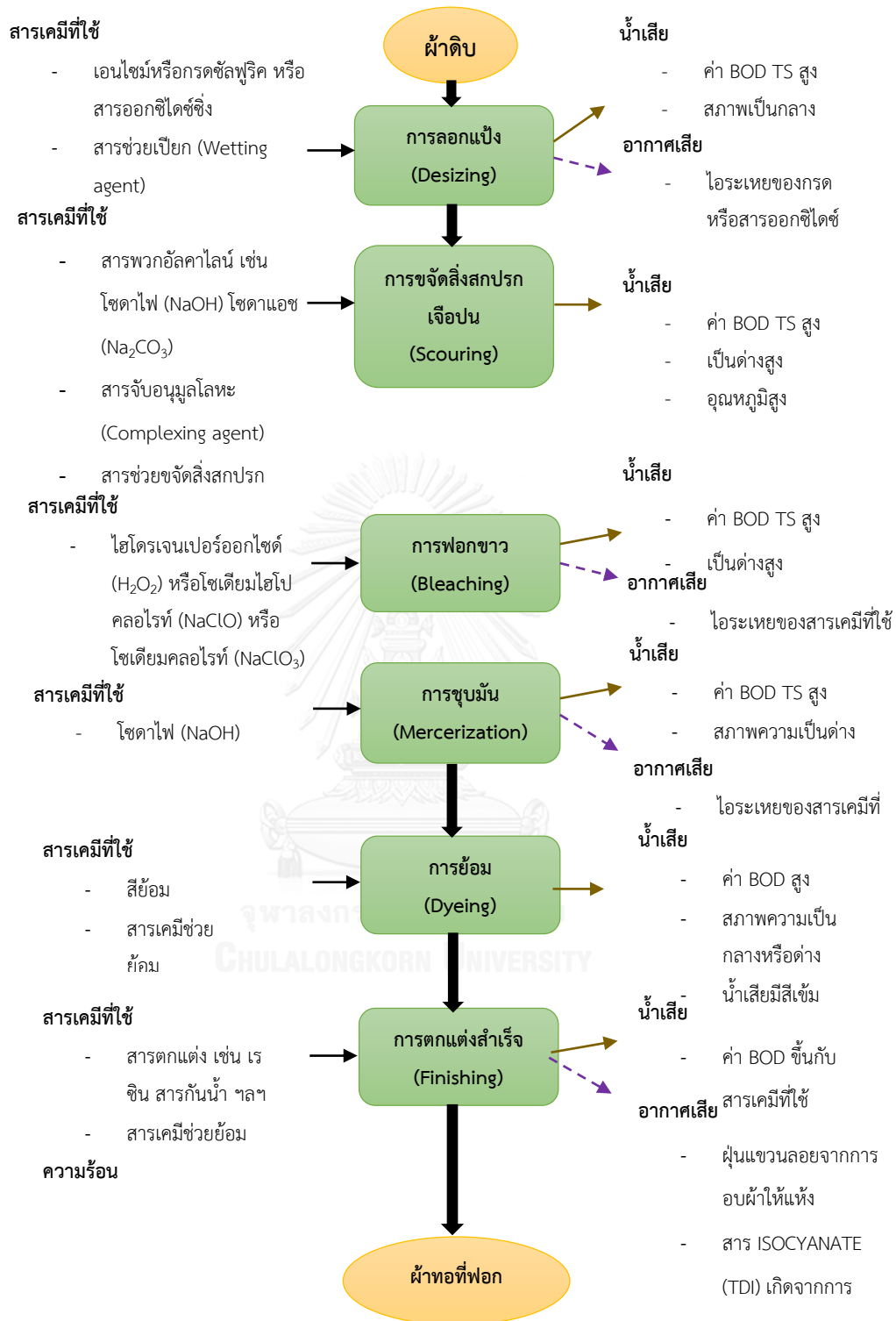
รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5

(Cinar และคณะ, 2008)

2.3 คุณลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

2.3.1 น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม

น้ำเสียที่มาจากกระบวนการฟอกย้อม จะมีองค์ประกอบและปริมาณของน้ำเสียแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการฟอกย้อม เช่น สีย้อม สารเคมี เป็นต้น และขั้นตอนหรือกระบวนการต่างๆของการฟอกย้อม เช่น ขั้นตอนการเตรียมผ้า ขั้นตอนการฟอก การย้อม และการตกแต่งสำเร็จ ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนนี้จะมีความเข้มข้นของมลสารที่อยู่ในน้ำเสียสูง นอกจากนี้ น้ำเสียอีกส่วนหนึ่งจะมาจากการซักล้าง และการทำความสะอาดเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนต่างๆ โดยสารเคมีที่ใช้และของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.3.2 ลักษณะน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีลักษณะดังนี้ (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544 อ้างถึงในพงษ์ขาว ขาวอินทร์, 2555)

1. มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมากับกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้ว สารอินทรีย์อาจเกิดจาก สบู่ ไขมัน และน้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝ้าคลุมผิวน้ำ และสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียมักจะมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. มีค่าพีเอช และค่าสภาพด่าง (Alkalinity) สูง น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมักมีค่าพีเอชประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่าพีเอชและค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการจัดสิ่งสกปรกเจือปน

3. มีอุณหภูมิสูง น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมโดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการจัด สิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

4. มีปริมาณของแข็งละลายน้ำสูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือ โซเดียม และกรดต่างๆ

5. มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อม เพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมา กับ น้ำเสียในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

6. มีโลหะหนักเจือปนอยู่ โลหะหนักเหล่านี้เจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่แล้ว ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

7. มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้

8. มีการปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะมีคั่งเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

2.3.3 สีของน้ำเสีย

1. สีแท้หรือสีจริง (True Color)

สีของน้ำที่กำจัดสารแขวนลอยออกจากน้ำก่อนนำไปตรวจวัดสี นั่นคือสีจริงเป็นสีที่เกิดจากสารที่ละลายในน้ำเท่านั้น

2. สีปรากฏ (Apparent Color)

สีของน้ำที่เป็นสีที่ตรวจวัดจากตัวอย่างน้ำโดยไม่มีการแยกเอาสารแขวนลอยออกไป นั่นคือ สีปรากฏเป็นสีที่เกิดจากสารที่ละลายและไม่ละลายน้ำรวมกัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

สีของน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานย้อมผ้าจากการใช้สีย้อมในกระบวนการย้อม ซึ่งอนุภาคของสีย้อมจะละลายเจือปนและแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย เป็นสาเหตุทำให้เกิดสีในน้ำเสีย ซึ่งอนุภาคของสีย้อมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียจัดเป็นอนุภาคที่ไม่สามารถถูกกำจัดออกไปได้ด้วยวิธีตกตะกอนทางธรรมชาติ ดังนั้น สีของน้ำเสียที่เกิดจากอนุภาคสีย้อมจึงเป็นสีแท้ในน้ำเสีย (ศุภบุศย์ ดำรงค์กิจการ, 2556)

ดังนั้น น้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตต่างๆ จึงจำเป็นต้องทำการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยทั่วไปน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีค่าความเข้มข้นของสีย้อมอยู่ในช่วง 10 – 250 มิลลิกรัมต่อลิตร (O'Neill และคณะ, 1999)

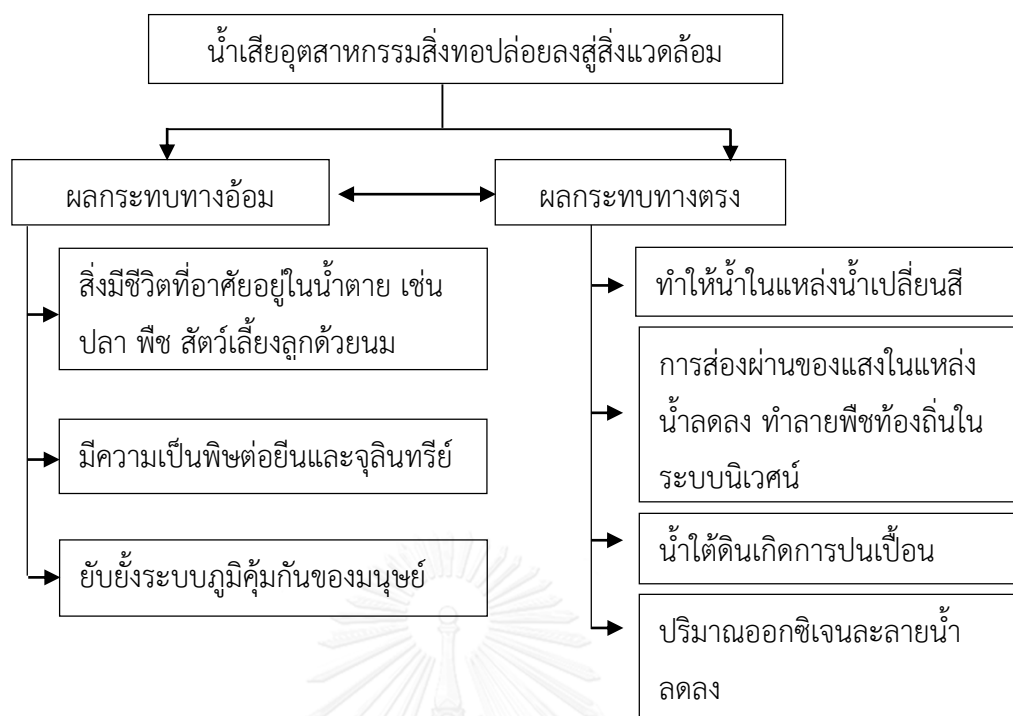
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

พารามิเตอร์	มาตรฐานน้ำทิ้ง
พีเอช	5.5-9.0
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	< 40
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 3,000
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 50
บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 20
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 120
สี (เอทีเอ็มไอ)	< 300

(ที่มา: ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ลงวันที่ 29 มีนาคม 2558 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนพิเศษ 129 ลงวันที่ 6 มิถุนายน 2559)

2.3.4 อันตรายจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเกิดจากกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ ซึ่งมีสารพิษเป็นจำนวนมากและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม หากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอปล่อยน้ำเสียจากกระบวนการผลิตลงสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรงโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดก่อนจะส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาด้านทัศนียภาพ เช่น ทำให้สีของแหล่งน้ำธรรมชาติเปลี่ยนไป เช่น ทะเลสาบ แม่น้ำ เป็นต้น การสะสมของสีย้อมในแหล่งน้ำจะไปขัดขวางการส่งผ่านของแสงแดดจากบริเวณผิวน้ำสู่ท้องน้ำและจะรบกวนระบบนิเวศน์ (Merzouk และคณะ, 2010) ระบบน้ำใต้ดินก็จะได้รับผลกระทบจากสารพิษเหล่านี้ด้วย เนื่องจากสารพิษเหล่านี้จะซึมผ่านทางดิน นอกจากนี้การสะสมของสีย้อมหลายๆประเภทและเกิดการย่อยสลายต่างๆ จะมีการตรวจวัดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ เช่น พืชน้ำ จุลินทรีย์ ปลา และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีความเป็นพิษต่อยีนและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ โดยที่ความเข้มข้นของสีย้อมมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นพิษหรือยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Isik และSponza, 2007) นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกัน ระบบหายใจ ระบบการไหลเวียนต่างๆ และระบบประสาทส่วนกลางอีกด้วย (Foo และคณะ, 2010)



รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงผลกระทบของน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม
(Verma และคณะ, 2012)

2.4 การวัดสี

การเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปวัดค่าสีมีขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ นำตัวอย่างน้ำไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ก่อน แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน จากนั้นนำไปหาค่าสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรและหน่วยเอตีเอ็มไอ ดังนี้

1. หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) สูงสุดของสีด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 200 – 800 นาโนเมตร พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 คือ 559 นาโนเมตร แล้วนำมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นสีโดยเทียบกับกราฟมาตรฐานสี

2. หน่วยเอตีเอ็มไอ นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปวัดค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์ (% Transmittance) ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร โดยวัดความยาวคลื่นทุกๆ 10 นาโนเมตร จากนั้นนำมาคำนวณเป็นค่า Teristimulus Values X, Y, Z แล้วนำมาคำนวณเป็นค่าสีในหน่วยเอตีเอ็มไอ (Allen และคณะ, 1973) โดยใช้โปรแกรม Quick Basic ในการคำนวณ

2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนต่างๆในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น การย้อมสี การพิมพ์ผ้าในโรงงานฟอกย้อม และการล้างทำความสะอาดเครื่องจักร เป็นต้น ส่วนใหญ่จะมีสีย้อม และสารเคมีที่เป็นส่วนที่เหลือตกค้างปนอยู่ในน้ำเสีย ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอจะมีหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการบำบัดทางกายภาพ กระบวนการบำบัดทางเคมี และกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ดังนี้

2.5.1 กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment)

1) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

การบำบัดสีในน้ำเสียโดยวิธีการดูดซับ ขึ้นอยู่กับการดูดซับระหว่างสีย้อมชนิดต่างๆ กับตัวดูดซับ (Adsorbent) เช่น ปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับสีย้อม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ขนาดอนุภาค อุณหภูมิ พีเอช และระยะเวลาสัมผัส (Patel และคณะ, 2012) เกณฑ์สำหรับการเลือกใช้ตัวดูดซับขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับ และความเป็นไปได้ของการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ของตัวดูดซับ โดยถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้หลายชนิด คาร์บอนที่นิยมใช้มี 2 ประเภท คือ คาร์บอนแบบเกล็ด (Granular carbon) และคาร์บอนแบบผง (Power carbon) สำหรับกลุ่มอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีจะนิยมใช้กำจัดสีที่ไม่สามารถกำจัดในระบบตะกอนทางเคมีหรือระบบบำบัดทางชีวภาพได้ ข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูง และต้องผ่านการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นก่อนเพื่อลดปริมาณของแข็งแขวนลอยให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ก่อนป้อนน้ำเสียเข้าสู่คอลัมน์การดูดซับ

2) การกรอง (Filtration)

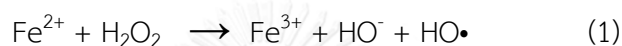
ระบบการกรองที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมสี มักใช้เป็นหน่วยบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง ทำหน้าที่กรองสารแขวนลอยหรือตะกอนเบาที่หลุดออกมาจากระบบบำบัดก่อนหน้านี้ โดยปกตินิยมใช้ถังกรองทราย โดยออกแบบให้ใช้ที่อัตราการกรองต่ำ สามารถกำจัดสารแขวนลอย และสีที่เกาะติดมากับตะกอนได้ และทำการล้างย้อนตะกอนที่ตกค้างในชั้นกรองก่อนนำตะกอนดังกล่าวไปสู่ระบบกำจัดตะกอนต่อไป เช่น การกรองผ่านเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) การกรองผ่านเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) และรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) เทคโนโลยีเหล่านี้ถูกนำมาใช้สำหรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

และการนำสารเคมีกลับคืน (Fersi และคณะ, 2008) สำหรับน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุณหภูมิและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสียจะเป็นตัวกำหนดชนิดและความพรุนของตัวกรอง

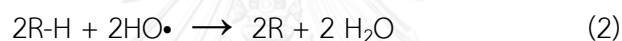
2.5.2 กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment)

1) ปฏิกริยาเฟนตัน (Fenton's reaction)

ปฏิกริยาเฟนเป็นปฏิกริยาออกซิเดชันขั้นสูง สำหรับการสลายโครโมฟอร์ในสีย้อม (Ferrero, 2000) โดยเกิดการทำปฏิกริยาระหว่างเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ได้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical, $OH\cdot$) ดังสมการ (1)



ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลนี้จะเข้าไปเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกริยาออกซิเดชันในสารอินทรีย์ดังสมการ (2)



ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกริยาเฟนตัน ได้แก่ ความเข้มข้นของไอออนเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกริยา และความเป็นกรดต่าง ซึ่งค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการออกซิไดซ์จะอยู่ในช่วงความเป็นกรดที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3-4 โดยค่าพีเอชต่ำกว่า 3 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดทั้งสีและ COD จะไม่ดีเท่าค่าพีเอช 3-4 เนื่องจากที่พีเอชต่ำๆจะถูกรบกวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของเฟอร์รัสไอออน โดยปฏิกริยาระหว่างเฟอร์ริกไอออนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกยับยั้ง (สุเทพ สิริวิทยา ปรกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง, 2553) และข้อดีของกระบวนการนี้คือ สามารถบำบัดสีโอดี สีย้อม และความเป็นพิษได้สูง และสามารถบำบัดสีย้อมที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำได้ ข้อเสียคือ เกิดสลัดจ์เป็นจำนวนมาก ต้องควบคุมความเข้มข้นของเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อีกทั้งยังเป็นกระบวนการบำบัดที่มีค่าใช้จ่ายสูง

2) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone treatment)

โอโซน (O_3) เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง จึงนิยมนำมาใช้ในการย่อยสลายสีและสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสี ข้อดีคือ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูง ใช้เวลาน้อย และไม่เกิดตะกอน เป็นต้น ส่วนข้อเสีย คือ มีค่าก่อสร้าง

และค่าเดินระบบสูง อีกทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าอีกด้วย เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง แต่โอโซนจะไม่สามารถบำบัดสีย้อมดิสเพอร์สและสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำได้ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาช้าและมีระยะเวลาทำปฏิกิริยานานกว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ถ้าค่าพีเอชลดลงการไฮโดรไลซ์ของสีย้อมก็จะลดลงด้วย (Rein, 2001) โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโอโซนคือ 12 ± 0.1 (Venkatesh และคณะ, 2015)

โอโซนเนชัน เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลสีด้วยโอโซนทำให้พันธะคู่ของโมเลกุลที่มีความยาวมากและทำให้สีแตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กที่มีขนาดสั้นลง ทำให้สีของน้ำเสียลดลง ซึ่งโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงและมีประสิทธิภาพสูงสามารถกำจัดสีจริงได้ แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์ จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม ซึ่งอาจจะมีปัญหากับสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ รวมทั้งอาจมีการทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดในน้ำ และเกิดสารบางชนิดขึ้น โดยสารเหล่านั้นเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic compounds)

3) การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation)

การบำบัดสีในน้ำเสียของกระบวนการสร้างรวมตะกอนจะเป็นการใช้สารเคมีโดยสารสารเคมีที่ใช้ในการสร้างตะกอนได้แก่ สารส้ม เพอร์รัสซัลเฟต เพอร์ริกซัลเฟต เพอร์ริกคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมซัลเฟอร์และสีย้อมดิสเพอร์สได้ ซึ่งเป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเอสิด สีย้อมไดเรกต์ สีย้อมรีแอกทีฟ และสีย้อมแวตต้า จึงต้องใช้สารช่วยในการรวมตัวของตะกอนเช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ เกิดสลัดจ์เป็นจำนวนมาก และไม่สามารถบำบัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้บางชนิด (Hai และคณะ, 2007)

4) การออกซิเดชันไฟฟ้าเคมี (Electro-chemical oxidation)

โดยปกติกระบวนการนี้จะทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดอื่นๆที่ไม่มีการใช้ไฟฟ้าเคมี (Non-electrochemical) กระบวนการออกซิเดชันทางไฟฟ้าเคมีตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญคือ ไฮโปคลอไรท์ไอออน (OCl^-) หรือกรดไฮโปคลอรัส ($HOCl$) ข้อดีของกระบวนการนี้คือ ไม่มีการเติมสารเคมีเพิ่มลงไป ควบคุมระบบง่าย ป้องกันการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่

ต้องการ และทำลายโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์และโครงสร้างโมเลกุลที่ยึดกันได้ ข้อเสียคือราคาของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดสูง (Morawwski และคณะ, 2000)

2.5.3 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment)

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เป็นกระบวนการที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์และกำจัดสีได้ โดยอาศัยจุลินทรีย์มาทำการย่อยสลายหรือแปรเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆเพื่อเปลี่ยนไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถ้าใช้ระบบบำบัดแบบเติมอากาศ หรือเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ถ้าใช้ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria)

ข้อดีของกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

1. เป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
2. ต้นทุนการบำบัดต่ำ
3. ปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้อย
4. สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์
5. ต้องการใช้ปริมาณน้ำในกระบวนการน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางกายภาพ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ สามารถแบ่งตามชนิดของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ การบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic treatment) การบำบัดแบบเติมอากาศ (Aerobic treatment) และการบำบัดร่วมแบบไร้อากาศและเติมอากาศ (Combined Anaerobic-Aerobic treatment)

2.5.3.1 การบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศ (Anaerobic treatment)

กระบวนการบำบัดนี้เป็นกระบวนการที่อาศัยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศในการย่อยสลาย ดูดซับ เปลี่ยนรูปมลสารต่างๆที่อยู่ในน้ำเสียให้มีความสกปรกน้อยลง มลสารที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนไปเป็นจุลินทรีย์เซลล์ใหม่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซมีเทน (CH_4) เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ จะได้พลังงานน้อย เซลล์ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่จึงมีจำนวนไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดแบบเติมอากาศ ส่วน

ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศ สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้น้อยกว่ากระบวนการย่อยแบบเติมอากาศ คือ สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ร้อยละ 50-80 แต่สามารถบำบัดสึได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศมักจะมีปัญหาในเรื่องกลิ่น และเกิดสารประกอบอะโรมาติกเอมีนจากการสลายสี

กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (Complex Organic) ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เกินกว่าจุลินทรีย์จะสามารถดูดซึมเข้าเซลล์ได้ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก โดยจุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลซิง (Hydrolysing bacteria) จะผลิตเอนไซม์แล้วปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) เพื่อให้จุลินทรีย์สามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ได้ เช่น ย่อยสลายโปรตีนให้กลายเป็นกรดอะมิโน ย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตให้กลายเป็นกลูโคส ย่อยสลายไขมันให้กลายเป็นกรดไขมัน เป็นต้น ซึ่งระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ การสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กหรือกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid; VFA) เช่น กรดอะมิโน กลูโคส กรดไขมัน เป็นต้น เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์โดยผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) ผลผลิตที่ได้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดวาเลอริก และกรดแลคติก เป็นต้น โดยมีสัดส่วนของกรดอะซิติกที่สูงที่สุด นอกจากนั้นแล้วยังสามารถพบผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ปนออกมาอีกด้วย ซึ่งได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้าภายในระบบเกิดปฏิกิริยาการสร้างกรดในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงและส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มอื่นๆ ในระบบ

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) เป็นปฏิกิริยาย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากขั้นตอนของปฏิกิริยาการสร้างกรดให้เป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน โดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนิค (Acetogenic bacteria) หรือจุลินทรีย์สร้างกรดอะซิติก เป็นขั้นตอนสำคัญของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยระบบไร้อากาศ เนื่องจากในขั้นตอนของการสร้างมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogens) มีความจำเพาะเจาะจงในการใช้สารอาหารสูงมาก จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดอะซิติกที่ผลิตไฮโดรเจนนี้จะ

ช่วยไม่ให้เกิดการสะสมตัวของกรดโพรพโอนิกและกรดบิวทริกในถังปฏิกริยา มีผลให้ค่าพีเอชลดลง ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน

ขั้นตอนที่ 4 ปฏิกริยาการสร้างมีเทน (Methanogenesis) เป็นปฏิกริยาการเปลี่ยนกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดแรก คือ จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic bacteria) โดยได้คาร์บอนมาจากคาร์บอนไดออกไซด์และได้พลังงานจากไฮโดรเจน ชนิดที่สอง คือ จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (acetotrophic bacteria) ซึ่งใช้อะซิเตตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนเหล่านี้มีอัตราการเจริญเติบโตช้าและมีความจำเพาะต่อชนิดของอาหารมาก คือ สามารถใช้สารโมเลกุลขนาดเล็กที่มีคาร์บอนเพียง 1 ถึง 2 คาร์บอนเท่านั้น เช่น เมทานอล กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก รวมถึงก๊าซไฮโดรเจน

ส่วนกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมขึ้นไป จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ ทำให้มีสารตกค้างอยู่ในระบบเป็นจำนวนมาก เป็นเหตุผลที่ทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศไม่สามารถลดค่าซีโอดีของน้ำเสียให้มีค่าต่ำเท่ากับกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศได้ นอกจากนี้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจะมีความไวต่อสภาวะแวดล้อมมาก ไม่สามารถทนต่อออกซิเจนแม้ปริมาณเพียงเล็กน้อยได้ สามารถเติบโตดีเมื่ออยู่ในช่วงพีเอช 6.8 ถึง 7.2 ดังนั้น การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจึงขึ้นอยู่กับการทำงานของจุลินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและขั้นตอนการสร้างกรด

สีย้อมสามารถถูกบำบัดได้ดีในสภาวะไร้อากาศ โดยจะเกิดปฏิกริยารีดักชันบริเวณพื้นระอะโซ แล้วสลายกลายเป็นสารประกอบอะโรมาติกเอมีน (Aromatic amines) ซึ่งจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศไม่สามารถบำบัดสารชนิดนี้ได้ สำหรับอิเล็กตรอนนั้นอาจมาจากเซลล์ของจุลินทรีย์โดยตรงหรือจากปฏิกริยาซัลเฟตรีดักชัน เพราะซัลเฟตสามารถใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ ภายใต้สภาวะไร้อากาศ อีกทั้งจุลินทรีย์ในระบบยังต้องการแหล่งพลังงานอื่น เพื่อการเจริญเติบโตด้วย เช่น กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids, VFAs) หรือกลูโคส

Wijetunga และคณะ (2010) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมปนอยู่ด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพโดยใช้ระบบยูเอเอสบี (Upflow anaerobic sludge blanket reactor) ซึ่งใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงาน โดยความเข้มข้นสีย้อมที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ 10 25 50 100 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นซีโอดีได้แก่ 1,000 2,000 และ 3,000

มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าระบบสามารถบำบัดสีได้มากกว่า 85% ที่ทุกความเข้มข้นสีย้อมและสามารถบำบัดความเข้มข้นซีไอดีทั้ง 3 ความเข้มข้นได้ อีกทั้งระบบยังมีประสิทธิภาพการบำบัดสีลดลงเมื่อความเข้มข้นสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น และมีประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีสูงที่ทุกความเข้มข้นสีย้อม และประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีสูงเมื่อความเข้มข้นสีย้อมต่ำๆ นอกจากนี้สีย้อม Acid Red 131 และ Acid Yellow 79 ซึ่งเป็นสีย้อมอะโซที่มีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยพันธะอะโซ 1 พันธะ สามารถบำบัดได้โดยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ ในขณะที่สีย้อม Acid Blue 204 สามารถถูกบำบัดได้เนื่องจากการดูดซับใน anaerobic granules

Murali และคณะ (2013) ศึกษาการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมอะโซ Methyl Orange (MO) ปนอยู่ โดยใช้ระบบยูเอเอสบี พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดสีประมาณ 94% 90% และ 96% ที่ความเข้มข้นสี Methyl Orange เริ่มต้นเท่ากับ 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และสามารถบำบัดซีไอดีได้สูงสุดถึง 69% ที่ความเข้มข้นสี Methyl Orange 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นสีย้อมเพิ่มขึ้น การที่พันธะอะโซในสี Methyl Orange แยกออกจากกันเป็นผลทำให้เกิดการสะสมของสารประกอบอะโรมาติกเอมีน ส่งผลให้ความเข้มข้นซีไอดีในน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และยังคงศึกษา kinetic พบว่า กระบวนการบำบัดซีไอดีหรือสารอินทรีย์จะเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับ 2 (second-order kinetic model) และกระบวนการบำบัดสีจะเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับ 1 (first-order kinetic model) ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (R^2) สำหรับการบำบัดสีและการย่อยสลายซีไอดีประมาณ 0.9 การย่อยสลายกลายเป็นแร่ธาตุอย่างสมบูรณ์ของสี Methyl Orange จะไม่เกิดขึ้นในสภาวะแบบไร้อากาศ เนื่องจากเกิดสารประกอบอะโรมาติกเอมีนในน้ำทิ้ง

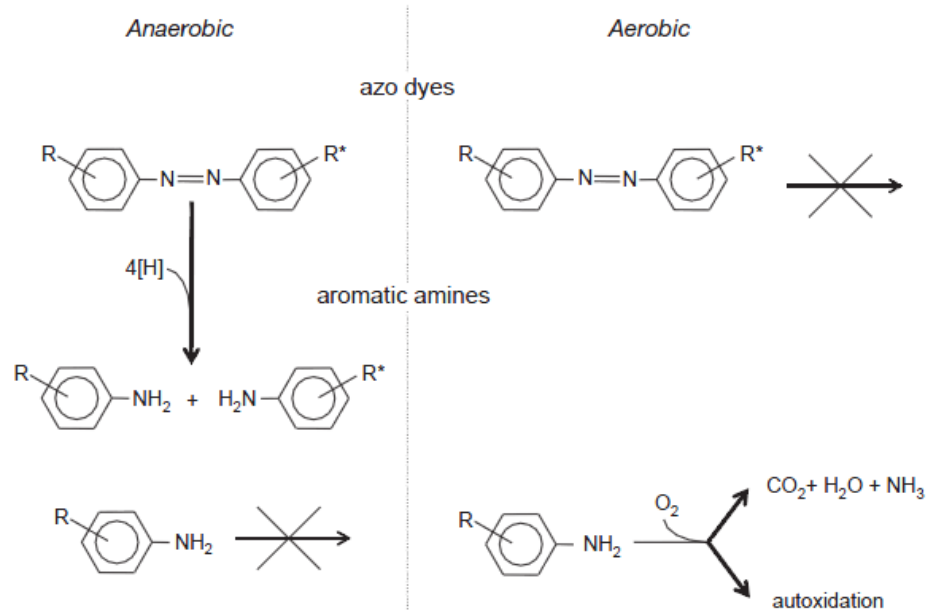
2.5.3.2 การบำบัดทางชีวภาพแบบเติมอากาศ (Aerobic treatment)

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบเติมอากาศ เป็นกระบวนการบำบัดที่อาศัยจุลินทรีย์ชนิดใช้อากาศในการย่อยสลาย ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปมลสารต่างๆที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหาร และนำมาสร้างเซลล์ แต่กระบวนการบำบัดแบบเติมอากาศมักจะมีปัญหาในการบำบัดสี โดยพบว่า ไม่สามารถบำบัดสีที่มีสารประกอบอะโซให้มีประสิทธิภาพสูงได้

Pala และคณะ (2002) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีด้วยระบบแอกทิเวเต็ดสลิจจ์ โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะมีการเติมตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่แตกต่างกันลงไปในระบบได้แก่ Marwicheм DEM ผงถ่านกัมมันต์ (Powered activated carbon, PAC) เบนโทไนด์ Activated clay และ Macrosorb พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจะไม่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากเติมตัวดูดซับดังกล่าว ระบบจะยังคงมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 80-90% ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีพบว่า เมื่อเติมเบนโทไนด์ Activated clay และ Macrosorb จะมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีน้อยกว่า 40% และยังทำให้ระบบมีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นอีกด้วย ส่วนตัวดูดซับ DEM ที่ความเข้มข้น 100 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 65% และ 78% ตามลำดับ และ PAC ที่ความเข้มข้น 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 77% และ 86% ตามลำดับ

3.5.3.3 การบำบัดร่วมแบบไร้อากาศ-แบบเติมอากาศ (Combined Anaerobic-Aerobic treatment)

กระบวนการบำบัดสีย้อมอะโซในน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จะประกอบไปด้วย กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่แยกหรือสลายพันธะอะโซออกจากกัน ซึ่งเป็นการนำไปสู่การสลายสี กระบวนการบำบัดนี้จึงมีประสิทธิภาพการบำบัดสีสูง แล้วตามด้วยกระบวนการบำบัดแบบเติมอากาศ เพื่อย่อยสลายผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายสีคือ สารประกอบอะโรมาติกเอมีน ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ แต่เมื่อสารประกอบอะโรมาติกเอมีนสัมผัสกับออกซิเจนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Autoxidation Reaction) อย่างรวดเร็ว โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้สีเปลี่ยนจากไม่มีสีกลับมาเป็นสีอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวจึงไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์และบำบัดสีได้พร้อมกัน จึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและมีการตีพิมพ์เกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมอะโซปนอยู่ โดยใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพร่วมแบบไร้อากาศ-เติมอากาศเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 2.5 การบำบัดสีอะโซและสารอะโรมาติกเอมีน
ภายใต้ระบบบำบัดร่วมแบบไร้อากาศ-แบบเติมอากาศ
(Van der Zee และ Villaverde, 2005)

Yasar และคณะ (2012) พบว่า กลูโคสจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) และสีรีแอกทีฟไอโอเล็ด 5 จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) โดยแบคทีเรียจะปล่อยเอนไซม์ที่ชื่อว่า เอนไซม์อะโซรีดักเทส (Azo reductase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีความไวต่อออกซิเจนออกมานอกเซลล์เพื่อสลายสีรีแอกทีฟไอโอเล็ด 5 ภายใต้สภาวะไร้อากาศ เอนไซม์อะโซรีดักเทส จะใช้เป็นตัวชี้วัดการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศของสีรีแอกทีฟไอโอเล็ด 5 จากการสลายสีรีแอกทีฟไอโอเล็ด 5 จะพบสารประกอบอะโรมาติกเอมีนได้แก่ เบนซีนเอมีน (Benzene based amine) และแนปทาไลน์เอมีน (Naphthalene based amine) ส่วนเอนไซม์แคตาคอล 2,3 ไดออกซิจีเนส (Catechol 2,3-dioxygenase, C23DO) จะถูกปล่อยออกมาเพื่อย่อยสลายสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะเติมอากาศ เอนไซม์แคตาคอล 2,3 ไดออกซิจีเนส จะใช้เป็นตัวชี้วัดการย่อยสลายทางชีวภาพของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนภายใต้สภาวะเติมอากาศ จากการศึกษายังพบอีกว่า แนปทาไลน์เอมีนเป็นสารที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ ส่วนเบนซีนเอมีน สามารถย่อยสลายได้เพิ่มขึ้นเมื่อมีช่วงเวลาเติมอากาศมากขึ้น

Farabegoli และคณะ (2010) ทำการศึกษาการบำบัดสีย้อม Reactive Red 195 ซึ่งเป็นสีย้อมโมโนอะโซ ภายใต้การบำบัดร่วมแบบไร้อากาศและเติมอากาศ ด้วยระบบบำบัด SBR (Sequencing Batch Reactor) ภายในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ผสม (mixed culture) และป้อนแหล่งพลังงานที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพลงไปในระบบ โดยหาค่าอายุสัปดาห์ ระยะเวลาเก็บกักน้ำ และความเข้มข้นสีย้อมที่เหมาะสม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถบำบัดสีและซีโอทีได้สูงสุดคือ ระบบมีค่าความเข้มข้นซีโอทีเริ่มต้นเท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร มีอายุสัปดาห์ที่เหมาะสมที่ 50 วัน ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 1 วัน วัฏจักรคือ 24 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะนี้จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูงสุดถึง 97% ที่ความเข้มข้นสี Reactive Red 195 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.6 ข้อดี-ข้อเสียของเทคโนโลยีบำบัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียของโรงงานแต่ละประเภทต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพการบำบัด ค่าใช้จ่าย ฯลฯ ในทางปฏิบัติควรมีการนำน้ำเสียมาทดสอบก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมนั้นๆ และเพื่อให้การบำบัดได้รับประสิทธิภาพสูงสุด เทคโนโลยีที่เลือกใช้ในการบำบัดใช้จึงมีความแตกต่างกันโดยสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางการเลือกใช้ให้เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีในน้ำเสียแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ
(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

กระบวนการบำบัดทางกายภาพ		
เทคโนโลยีการบำบัด	ข้อดี	ข้อเสีย
การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	-เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง -สามารถกำจัดสีจริงและสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ	-การนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความร้อนสูง -มีค่าใช้จ่ายสูง
การกรองผ่านเยื่อกรองออสโมซิสย้อนกลับ	-ใช้กำจัดอิมัลชันและโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่	-ไม่สามารถใช้กับสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายได้ -เกิดปัญหาการอุดตันและเยื่อกรองเสียหายง่ายหากน้ำที่นำมาบำบัดมีการปนเปื้อนสูง -ค่าใช้จ่ายสูง
การกรองผ่านเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน	-มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูง -สามารถนำวัสดุ (พีวีเอ โซดาไฟ สีย้อมอินดิโก) และนำน้ำกลับมาใช้ได้ใหม่	-ค่าใช้จ่ายสูง
การกรองผ่านเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน	-สีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่	-ค่าใช้จ่ายสูง
การกรองผ่านเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน	-มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูง -สามารถแยกสารพวกอีเล็กโตรไลต์ออกมาและนำกลับมาใช้ใหม่ได้	-ค่าใช้จ่ายสูง

ตารางที่ 2.3 เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ
(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) (ต่อ)

กระบวนการบำบัดทางเคมี		
เทคโนโลยีการบำบัด	ข้อดี	ข้อเสีย
การตกตะกอนเคมี	-เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง	-กากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากซึ่งยุ่งยากในการนำไบกำจัด -มีประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ละลายน้ำได้ต่ำ
กระบวนการเฟ้นต้น	-มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ	-ต้องควบคุมความเข้มข้นของเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา -ค่าใช้จ่ายสูง
การใช้โอโซน/การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน	-สามารถทำลายโมเลกุลของสีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้	-ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดต่าง -สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า -อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง
การใช้ไฟฟ้าเคมี	-สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียได้ -มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง -สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้ และใช้เวลาการทำปฏิกิริยาน้อย	-ต้องควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาการตกตะกอน -ค่าใช้จ่ายสูง

ตารางที่ 2.3 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ
(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) (ต่อ)

กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ		
เทคโนโลยีการบำบัด	ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ	<ul style="list-style-type: none"> -สามารถกำจัดสรีระกาทิปในน้ำเสียได้ -ได้ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงาน -ใช้แบคทีเรียที่เป็น obligate และ facultative ในการกำจัดสือโซ 	<ul style="list-style-type: none"> -สร้างสารประกอบอะโรมาติกเอมีนขึ้นจากการสลายสี -ต้องบำบัดขั้นที่สองต่อจากการบำบัดแบบไร้อากาศ
ระบบบำบัดแบบเติมอากาศ	<ul style="list-style-type: none"> -สามารถกำจัดสืออมกลุ่มอะโซ และแอนทราควิโนน -เหมาะสมกับการใช้งานในโรงงาน -คุณภาพน้ำทิ้งได้มาตรฐาน 	<ul style="list-style-type: none"> -มีอัตราเร็วในการกำจัดสีต่ำ -เป็นระบบที่ต้องการแหล่งพลังงานมาก -น้ำทิ้งเกิดสีขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออกโตออกซิเดชัน ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นสีเพิ่มขึ้น -ไม่สามารถย่อยสลายสารประกอบอะโรมาติกเอมีนได้อย่างสมบูรณ์

2.7 ธาตุอาหาร (Nutrients)

สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจะต้องคำนึงถึงธาตุอาหารเสริมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซึ่งในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะขาดธาตุอาหารดังกล่าว จึงต้องทำการเติมธาตุอาหารลงไปในระบบ โดยจะต้องควบคุมปริมาณธาตุอาหารเสริมให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ในระบบ หากระบบขาดธาตุอาหารส่งผลให้จุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อกเจริญเติบโตได้ไม่ดี จุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยจะเจริญเติบโตได้ดีกว่า สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบเติมอากาศ โดยทั่วไปจะควบคุมอัตราส่วน ซีโอดี: ไนโตรเจน: ฟอสฟอรัส

เท่ากับ 150: 5: 1 (Metcalf และEddy, 1991) เพื่อให้จุลินทรีย์ที่ใช้อากาศนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ โดยการสร้างเซลล์ใหม่จะเกิดขึ้นมากกว่ากระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ นอกจากนี้กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศยังมีธาตุอาหารอื่นๆที่จุลินทรีย์ต้องการ แต่ต้องการในปริมาณน้อย เช่น เหล็ก นิเกิล โคบอลต์ เป็นต้น หากขาดไปจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์โดยปริมาณธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศและแบบเติมอากาศที่ใช้เติมในระดับห้องปฏิบัติการแสดงดังตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ (Speece, 1996 อ้างถึงในภาจรีย์ แสงสิงห์, 2556)

สารเคมี	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารเคมี	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
NH ₄ Cl	400	MnCl ₂ •4H ₂ O	0.5
MgSO ₄ •7H ₂ O	400	NH ₄ VO ₃	0.5
KCl	400	CuCl ₂ •2H ₂ O	0.5
Na ₂ S•9H ₂ O	300	ZnCl ₂	0.5
CaCl ₂ •2H ₂ O	50	AlCl ₃ •6H ₂ O	0.5
(NH ₄) ₂ HPO ₄	80	NaMoO ₄ •2H ₂ O	0.5
FeCl ₂ •4H ₂ O	40	H ₃ BO ₃	0.5
CoCl ₂ •6H ₂ O	10	NiCl ₂ •6H ₂ O	0.5
KI	10	NaWO ₄ •2H ₂ O	0.5
(NaPO ₃) ₆	10	Na ₂ SeO ₃	0.5
Cysteine	10	NaHCO ₃	6000

ตารางที่ 2.5 ธาตุอาหารเสริมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศที่ใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ
(Jefferson และคณะ, 2001)

Nutrients	Reported requirements (mg/L)
N	15
P	3
S	1
Ca	0.4 – 1.4
K	0.8 - < 3.0
Fe	0.1 – 0.4
Mg	0.4 - 0.5
Mn	0.01 – 0.5
Cu	0.01 – 0.5
Al	0.01 – 0.5
Zn	0.1 – 0.5
Mo	0.2 – 0.5
Co	0.1 – 5.0

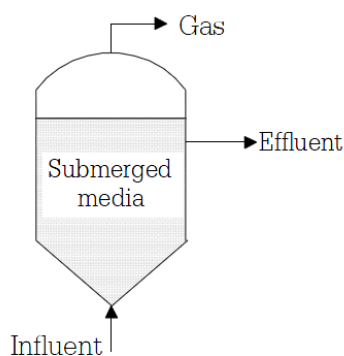
2.8 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Autoxidation Reaction)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเกิดขึ้นเร็วกว่ากระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ และเกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบต่างๆ ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นส่วนมากจะไม่ใช่ที่ต้องการและไม่เหมาะสำหรับการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งจากการสลายสียอะโซในสภาวะไร้อากาศ จะได้ผลิตภัณฑ์จากการสลายสีคือ สารประกอบอะโรมาติกเอมีน และเมื่อนำมาบำบัดต่อในสภาวะเติมอากาศ เนื่องจากน้ำทิ้งสัมผัสกับออกซิเจน ส่งผลให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดกลับมามีสีใหม่อีกครั้งเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการที่มีการสะสมสารประกอบอะโรมาติกเอมีนในปริมาณมาก อาจทำให้น้ำทิ้งกลับมามีสีใหม่ได้ง่ายและเร็วขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการสะสมของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนในปริมาณมากโอกาสที่จะทำให้สารประกอบอะโรมาติกเอมีนกลับมารวมตัวกันหรือจับกันใหม่ง่ายขึ้น ซึ่งอาจจะไม่ได้กลับมาจับกันด้วยพันธะอะโซ ดังนั้นการบำบัดสีย้อมประเภทอะโซจึงไม่ใช่การทำให้สีหายไปอย่างถาวร (Libra และคณะ, 2004) ได้ทำการสังเกตหลังจากทำการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ที่มีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยพันธะอะโซจำนวน 2 พันธะ โดย

ใช้ anaerobic granular sludge พบว่า สีจะกลับมาปรากฏอีกครั้งหนึ่งภายในไม่กี่นาที และไม่สามารถบำบัดได้โดยกระบวนการบำบัดแบบเดิมอากาศ

2.9 กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น (Upflow Anaerobic Filter)

ลักษณะทั่วไปของถังกรองไร้อากาศแสดงดังรูปที่ 2.6 ส่วนประกอบที่สำคัญคือ เป็นถังสูงที่มีลักษณะคล้ายถังกรอง ภายในบรรจุตัวกลาง น้ำเสียจะไหลเข้าจากด้านล่างขึ้นด้านบนของถัง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้น้ำท่วมตัวกลางอยู่ตลอดเวลา โดยจุลชีพที่บรรจุอยู่ในถังจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งตัวจุลชีพจะเกาะอยู่บริเวณผิวตัวกลาง และบางส่วนจะอาศัยอยู่ในช่องว่างระหว่างตัวกลาง ทำให้ระบบนี้ไม่ต้องมีการกวนน้ำเสียภายในถัง การกำจัดบีโอดีของน้ำเสียโดยระบบนี้เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวเคมี ระบบนี้อาจใช้เวลาเก็บกักน้ำเสียตั้งแต่ 1-10 วัน โดยสามารถรับบีโอดีของน้ำเสียได้ตั้งแต่ 4-16 กก.ซีโอดี/(ลบ.ม.วัน) ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำเสีย ตัวกลางที่สามารถใช้ได้คือ พวกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ ได้แก่ ก้อนหิน พลาสติก อิฐ กระเบื้อง ยาง ดินเผา เป็นต้น สำหรับขนาดของตัวกลางไม่ควรมีขนาดเล็กหรือใหญ่จนเกินไป ถ้ามีขนาดเล็กจนเกินไปอาจจะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดการไหลลัดวงจร แต่ถ้าใช้ตัวกลางขนาดใหญ่เกินไปอาจทำให้มีพื้นที่ผิวตัวกลางน้อยลง ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียลดลงไปด้วย ข้อมูลการออกแบบระบบบำบัดแบบ Upflow Attached Growth Reactor แสดงดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ถังกรองไร้อากาศ

(มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542 อ้างถึงในกรมควบคุมมลพิษ, 2548)

ตารางที่ 2.6 การออกแบบระบบบำบัดแบบ Upflow Attached Growth Reactor
(Metcalf และ Eddy, 2004 อ้างถึงในปัญหา บุญอนันต์วงศ์, 2554)

Wastewater	Packing type	Temp (°C)	COD Loading (Kg/m ³ ·d)	HRT (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. Domestic	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

ข้อดีของระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น

1. ก่อสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน การดำเนินการและบำรุงรักษาระบบง่าย ไม่ยุ่งยาก
2. สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกย่อยสลายไปเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ทำให้มีสลัดจ์ชีวภาพเกิดขึ้นน้อย ช่วยลดภาระการจัดการสลัดจ์
3. มีค่าสูญเสียความดันต่ำในระบบถังบำบัด โดยปกติจะมีน้อยกว่า 0.15 เมตร
4. มีความต้องการสารอาหารน้อย
5. น้ำทิ้งมีกลิ่นน้อย และมีของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ไม่มากนัก
6. สามารถรับน้ำเสียที่มีอัตราไหลน้ำเสียแปรเปลี่ยนมากได้ แม้กระทั่งไม่มีน้ำเสียไหลต่อเนื่อง ก็ยังสามารถเดินระบบได้
7. ระบบมีตัวกลางบรรจุอยู่ในถังกรอง ทำให้ตัวกลางเหล่านี้ช่วยป้องกันการไหลทิ้งของของแข็งแขวนลอย
8. ถังกรองไร้อากาศอาจใช้กับการกำจัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งให้เป็นก๊าซไนโตรเจน (เกิด Denitrification)
9. ระบบนี้ไม่จำเป็นต้องการระยะเวลาเก็บกักนาน เพราะระบบบำบัดนี้มีอายุสลัดจ์นานพอเพียงกับการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพ

10. ระบบนี้สามารถรับสารพิษต่างๆจนเกิดปัญหาพีเอชลดต่ำลง หรือปล่อยถังไว้โดยไม่มีน้ำไหลผ่านเข้าออกเป็นระยะเวลาต่างๆได้ แต่ระบบถังกรองไร้อากาศนี้สามารถฟื้นคืนสภาพบำบัดได้อย่างรวดเร็ว

ข้อเสียของระบบถังกรองไร้อากาศแบบไหลขึ้น

1. สลัดจ์ในระบบมีการกวนผสมกันน้อยมาก โดยทั่วไประบบถังกรองไร้อากาศจะบรรจุตัวกลางภายในถังปฏิกิริยา และน้ำเสียไหลเข้าสู่ถังจากด้านล่างขึ้นด้านบน ทำให้น้ำเสียสัมผัสกับตัวกลางตลอดเวลา จึงทำให้ระบบนี้ไม่ต้องการกวนผสมภายในถังปฏิกิริยา
2. การจัดเรียงตัวกลางค่อนข้างมีความสำคัญ เพราะอาจแทนที่น้ำมากเกินไปจนมีความจุน้ำจริงน้อยกว่าที่คำนวณออกแบบไว้ และอาจมีพวกสลัดจ์ทับถมกันจนแทนที่น้ำ
3. ถ้าน้ำเสียมีของแข็งแขวนลอยทั้งหมดค่อนข้างมากก็อาจทำให้ถังกรองไร้อากาศอุดตันได้ง่าย
4. ต้องการการเดินระบบช่วงเริ่มต้นจนถึงสภาวะคงที่ในระยะเวลาานานกว่าระบบเดิมอากาศ
5. โดยปกติระบบบำบัดนี้จะได้น้ำทิ้งออกที่มีบีโอดี₅ มากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. เนื่องจากระบบบำบัดนี้ต้องมีค่าอายุสลัดจ์นาน ทำให้ใช้เวลาปรับสภาพใหม่นานเมื่อมีสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป

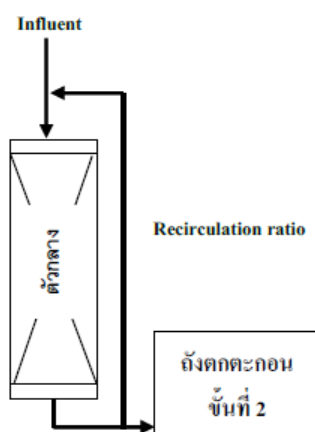
2.10 กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบถังโปรยกรอง (Trickling Filters)

ระบบถังโปรยกรองจะมีตัวกลางบรรจุอยู่ในถังปฏิกิริยา เพื่อให้จุลชีพเกาะอยู่บริเวณผิวตัวกลาง ซึ่งการเติมอากาศจะต้องอาศัยออกซิเจนจากอากาศผสมกับน้ำเสียก่อนที่จะไหลผ่านผิวตัวกลางที่มีจุลชีพเกาะอยู่ ซึ่งมีลักษณะเป็นเมือกหนาพอเพียงที่จะให้ออกซิเจนแทรกซึมเข้าไปได้ พบว่า ยิ่งตัวกลางมีพื้นที่ผิวมากๆและมีช่องว่างมากๆจะยิ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้นเท่านั้น ดังนั้นการเลือกตัวกลางก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมาก นอกจากนี้พบว่าดินเผาจะมีพื้นที่ผิวที่ขรุขระมากคือ มีพื้นที่ผิวของตัวกลาง (ตร.ม./ลบ.ม. ที่บรรจุอยู่ในถัง) สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนหิน หรือพลาสติก โดยทั่วไปพบว่า ก้อนหินขนาด 3 นิ้ว มีพื้นที่ผิวประมาณ 40-60 ตร.ม./ลบ.ม. เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกที่ผลิตเพื่อใช้กับงานบำบัดน้ำเสียจะมีพื้นที่ผิวประมาณ 90 ตร.ม./ลบ.ม. ซึ่งเป็นลูกบาศก์เมตรของปริมาตรรวม (Bulk Volume) (ปริมาตรของเนื้อตัวกลางรวมกับปริมาตร

ช่องว่าง) ส่วนประกอบระบบโปรยกรองแสดงดังรูปที่ 2.7 ข้อมูลการออกแบบระบบบำบัดแบบโปรยกรองแสดงดังตารางที่ 2.7

ระบบถังโปรยกรองมักจะมีระบบให้น้ำไหลล้นเวียนกลับเข้าสู่ระบบอีกครั้งเป็นวงจร (Recirculation) เพื่อประโยชน์ต่างๆ ดังนี้

1. การหมุนเวียนน้ำทำให้สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำทิ้งนำกลับมาสัมผัสจุลชีพที่เกาะอยู่ภายในถังโปรยกรองอีก ซึ่งช่วยเพิ่มการสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับจุลชีพ
2. การหมุนเวียนน้ำจะช่วยรักษาภาระชลศาสตร์ของระบบโปรยกรอง เมื่อมีปริมาณน้ำเสียไหลเข้ามามากหรือน้อยกว่าปกติ ทำให้ชั้นกรองอยู่ในสภาพเปียกตลอดเวลา
3. การหมุนเวียนน้ำทำให้น้ำเสียในระบบบำบัดไม่ส่งกลิ่นเหม็นมาก เพราะการป้อนน้ำกลับจะช่วยเจือจางความสกปรกของน้ำเสียได้ในระดับหนึ่ง และยังช่วยควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำของระบบโปรยกรอง
4. การหมุนเวียนน้ำยังช่วยเพิ่มปริมาณน้ำในถังโปรยกรอง ทำให้ช่วยกระจายน้ำเข้าถังโปรยกรองได้สม่ำเสมอต่อเนื่องตลอดเวลา ยังจะช่วยลดปัญหาอุดตันภายในถังโปรยกรอง และยังช่วยลดปัญหาแมลงต่างๆที่มาตอมผิวตัวกลางที่ไม่มีน้ำโปรยผ่านเข้ามาตลอดเวลา ซึ่งอาจเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นได้



รูปที่ 2.7 ถังโปรยกรอง

ตารางที่ 2.7 การออกแบบระบบบำบัดแบบโปรยกรอง

(Metcalf และ Eddy, 2004 อ้างถึงในปัญหา บุญอนันต์วงศ์, 2554)

Design characteristics	Low or Standard Rate	Intermediate rate	High rate	High rate	Roughing
Type of packing	Rock	Rock	Rock	plastic	Rock/plastic
Hydraulic loading $m^3/m^2 \cdot d$	1-4	4-10	10-40	10-75	40-200
Organic loading $kgBOD/m^3 \cdot d$	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, $kW/10^3 m^3$	2-4	2-8	6-10	6-10	10-20

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

ข้อดีของระบบถังโปรยกรอง

1. ระบบโปรยกรองจะอาศัยตัวกลางให้จุลชีพเกาะติดไว้ ทำให้ช่วยควบคุมจุลชีพให้มีอยู่ในระบบเสมอ ไม่หลุดหรือปล่อยทิ้งออกจากระบบจนเหลือน้อยเกินไป
2. ไม่จำเป็นต้องควบคุมปริมาณจุลชีพ (MLSS) ในระบบ โดยอาศัยการถ่ายทิ้งออกในปริมาณที่ต้องคำนวณหาอยู่ตลอดเวลา ซึ่งต้องมีผู้ควบคุมระบบที่มีความรู้ด้านการบำบัดน้ำเสียพอสมควร
3. สามารถรับปริมาณช็อกโหลดได้ดี (Shock Loads)
4. ไม่มีปัญหาสไลด์จ์ลอยตัว (Bulking Sludge) ในระบบ ทำให้ลดปัญหายุ่งยากในการดำเนินการ
5. การดูแลถังตกตะกอนสำหรับระบบโปรยกรองจะมีปัญหายุ่งยากน้อยกว่าของระบบจุลชีพแขวนลอย

6. สำหรับเรื่องของการวัดปริมาณจุลชีพ (MLSS) ในระบบโปรยกรอง อาจไม่จำเป็นต้องวัดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบจุลชีพแขวนลอยจำเป็นต้องวัด MLSS ในระบบอยู่ตลอดเวลา ซึ่งลดค่าใช้จ่าย และเวลาของบุคลากรในหน่วยงานที่ดูแลระบบ

7. ระบบโปรยกรองไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องเติมอากาศให้กับระบบทั้งๆที่เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ ทำให้ระบบนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าระบบเอเอส

8. เมื่อระบบได้รับน้ำเสียที่เป็นพิษต่อจุลชีพในระบบ ระบบจะยังคงมีจุลชีพบางส่วนที่เกาะบนผิวตัวกลางภายในถังหลงเหลืออยู่ เพื่อทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อไปได้โดยไม่หยุดทำงาน

9. ระบบโปรยกรองทำงานได้ดีในภูมิประเทศเขตร้อน เช่น ประเทศไทย จึงเป็นสาเหตุที่ประเทศเขตนานไม่นิยมใช้ระบบนี้

10. ปริมาณสลัดจ์ที่หลุดออกจากระบบมีน้อยกว่าระบบเอเอสมาก และมักจะเป็นสลัดจ์ค่อนข้างเสถียร ดังนั้นจึงเป็นสลัดจ์ที่กำจัดได้ง่าย

ข้อเสียของระบบถังโปรยกรอง

1. ไม่สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ เนื่องจากในระบบมีออกซิเจนตลอดทั้งระบบ ทำให้ไม่สามารถสร้าง Anaerobic หรือ Anoxic zone ได้
2. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีลักษณะขุ่น
3. ในระบบโปรยกรองจะมีกลิ่นและแมลงเกิดขึ้น อาจเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นได้

2.11 สมการปริมาณสารสัมพันธ์ต่อสารอินทรีย์ในน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ

น้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนกระบวนการผลิตต่างๆของอุตสาหกรรมสิ่งทอ จะประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่เกิดจากแป้ง สีย้อม เป็นต้น และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งถ้าสามารถหาสมการปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric Equation) ของสารอินทรีย์เหล่านี้ได้จะทำให้ง่ายต่อการคำนวณในการเติมสารเคมีต่างๆ หรือการเดินระบบ หลักการคำนวณหาสมการปริมาณสารสัมพันธ์มีสูตรดังนี้ (Grady และคณะ, 1999)

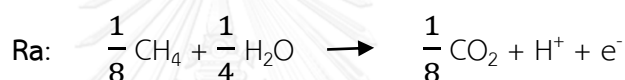
$$R = R_d - f_e R_a - f_s R_c$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } R &= \text{ปฏิกิริยารวมของสมการปริมาณสารสัมพันธ์} \\ R_d &= \text{ปฏิกิริยาของการให้อิเล็กตรอนของสารอาหารในน้ำเสีย} \end{aligned}$$

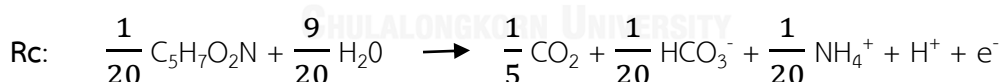
Ra	=	ปฏิกิริยาของการรับอิเล็กตรอน
Rc	=	ปฏิกิริยาของสารประกอบที่ใช้สร้างเซลล์
f _e	=	สัดส่วนของอิเล็กตรอนสำหรับการใช้พลังงาน
f _s	=	สัดส่วนของอิเล็กตรอนสำหรับการสร้างเซลล์
f _s + f _e	=	1

ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

ให้น้ำตาล (CH₂O) เป็นทั้งตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้น ปฏิกิริยาของการรับอิเล็กตรอนจะเป็นดังนี้



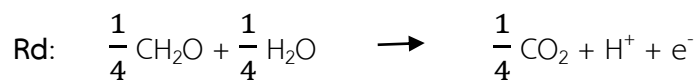
Grady และคณะ, 1999 ได้กล่าวถึงการนำเสนอให้ใช้จุลชีพในรูปสารประกอบ C₆₀H₈₇O₂₃N₁₂P แต่เนื่องจากสารประกอบดังกล่าวมีส่วนประกอบที่ซับซ้อน ทำให้ไม่เป็นที่นิยมจึงใช้ในรูปแบบ C₅H₇O₂N และแนะนำว่าความต้องการฟอสฟอรัส (P) เป็นหนึ่งในห้าของไนโตรเจน (N) ดังนั้น ปฏิกิริยาของสารประกอบที่ใช้สร้างเซลล์โดยใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งของไนโตรเจนจะเป็นดังนี้



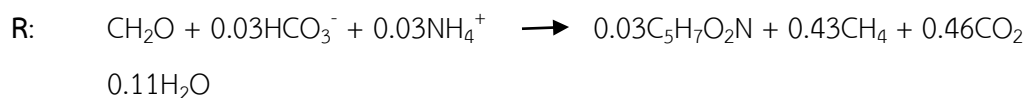
ในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Biomass yield, Y) เท่ากับ 0.1 กรัมวีเอสเอส/กรัมซีโอดี (Metcalf & Eddy., 1991) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตนี้มีความสัมพันธ์กับค่า f_s ดังนี้

$$f_s = 1.42 \times Y$$

และจะสามารถหาค่า f_e ได้จาก f_e + f_s = 1 ซึ่งจะสามารถคำนวณหาสมการปริมาณสารสัมพันธ์ของน้ำตาลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตเท่ากับ 0.1 กรัมวีเอสเอส/กรัมซีโอดี ดังนั้นจะมีปฏิกิริยาของการให้อิเล็กตรอน ดังนี้



จะได้ $f_s = 0.142$ $f_e = 0.858$ และ R คือ

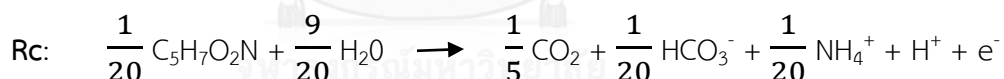


ระบบบำบัดแบบเติมอากาศ

ให้ออกซิเจน (O_2) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้น ปฏิกิริยาของการรับอิเล็กตรอนจะเป็นดังนี้



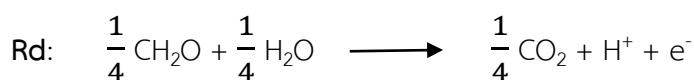
ปฏิกิริยาของสารประกอบที่ใช้สร้างเซลล์โดยใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งของไนโตรเจนจะเป็นดังนี้



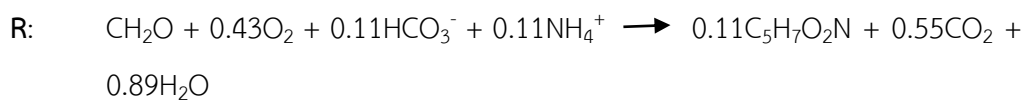
ในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบบที่ใช้เติมอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Biomass yield, Y) เท่ากับ 0.4-0.8 กรัมวีเอสเอส/กรัมซีไอดี (Metcalf และ Eddy, 1991) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตนี้มีความสัมพันธ์กับค่า f_s ดังนี้

$$f_s = 1.42 \times Y$$

และจะสามารถหาค่า f_e ได้จาก $f_e + f_s = 1$ ซึ่งจะสามารถคำนวณหาสมการปริมาณสารสัมพันธ์ของน้ำตาล โดยเลือกค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตเท่ากับ 0.4 กรัมวีเอสเอส/กรัมซีไอดี ดังนั้นจะมีปฏิกิริยาของการให้อิเล็กตรอน ดังนี้



จะได้ $f_s = 0.568$ $f_e = 0.432$ และ R คือ



เมื่อได้ปฏิกิริยารวมของสมการปริมาณสารสัมพันธ์ จะสามารถทราบถึงปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้น รวมถึงปริมาณสารอาหารที่สำคัญในการเดินระบบ ดังนั้นจึงสามารถบอกปริมาณสารอาหารที่ต้องใส่เพิ่มเติม เพื่อปรับสภาพน้ำเสียให้เหมาะสมต่อการบำบัดทางชีวภาพ

2.12 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บัญชา บุญอนันต์วงศ์ (2554) ศึกษาความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหมาะสมต่อการทำให้เกิดการย่อยสลายสีและค่าซีโอดีที่ย่อยสลายยาก โดยใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพแบบถังกรองไร้อากาศตามด้วยถังโปรยกรองเดินระบบอย่างต่อเนื่องในระดับปฏิบัติการ สีที่ใช้คือ สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่ 500 1,000 2,000 5,000 10,000 และ 20,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร พบว่าระบบสามารถบำบัดความเข้มข้นสีในน้ำทิ้งให้ลดลงเหลือ 30 24 25 20 20 และ 16 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ เมื่อซีโอดีที่เข้าระบบมีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดสีของระบบถังกรองไร้อากาศก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนการบำบัดค่าซีโอดีพบว่า ที่ความเข้มข้นของซีโอดีเข้าระบบตั้งแต่ 500 - 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ระบบสามารถบำบัดค่าซีโอดีให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานคือ ต่ำกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งระบบสามารถบำบัดค่าซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพและค่อนข้างคงที่ และผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบโดยเปลี่ยนอัตราการเวียนน้ำที่เหมาะสมจากถังโปรยกรองกลับเข้าถังกรองไร้อากาศพบว่า ไม่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดี แต่สามารถลดการใช้ปริมาณต่างได้ 53.3% ที่อัตราการเวียนน้ำ 5 เท่า

นภาพรีย แสงสิงห์ (2556) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างเคมีประกอบด้วยพันธะอะโซ 1 หมู่ และ 2 หมู่ ที่ความเข้มข้นสีต่างๆ ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและตามด้วยระบบโปรยกรอง สีที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ความเข้มข้น 10 25 50 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซีโอดีคงที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดค่าความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และเอเอ็มไอด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

โดยในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 559 นาโนเมตร ส่วนสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร แล้วนำค่าดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นสีโดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของสี ส่วนหน่วยเอดีเอ็มไอจะวัดค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง (%Transmittance) ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร แล้วนำค่าร้อยละการส่องผ่านมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นสี ผลการทดลองพบว่า สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดความเข้มข้นสีให้เหลือเพียง 0.44 0.71 1.79 2.91 และ 3.64 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และ 59.4 109 180 447 และ 703 เอดีเอ็มไอตามลำดับ เมื่อนำไปผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองต่อพบว่า น้ำทิ้งจะมีค่าความเข้มข้นสีเพิ่มขึ้นเป็น 0.57 0.98 1.62 3.08 และ 8.76 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และ 87.3 143 204 291 และ 1,027 เอดีเอ็มไอตามลำดับ ส่วนสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 พบว่าระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดความเข้มข้นสีให้เหลือเพียง 2.00 5.02 10.03 21.23 และ 40.83 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และ 174 444 869 1,505 และ 2,162 เอดีเอ็มไอตามลำดับ เมื่อนำไปผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองต่อพบว่า น้ำทิ้งจะมีค่าความเข้มข้นสีเท่ากับ 1.78 4.04 8.36 17.8 และ 34.37 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และ 141 354 684 1,319 และ 2,130 เอดีเอ็มไอตามลำดับ การที่ค่าความเข้มข้นสีของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 มีค่าลดลงเมื่อการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรอง เนื่องจากสีที่เกิดขึ้นใหม่เป็นสีคนละชนิดกับสีตั้งต้น และอาจจะเกิดจากการวัดผิดพลาดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งวัดที่ความยาวคลื่นเดียวทำให้ได้ค่าที่ออกมาไม่มีความแม่นยำ และเมื่อค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นสีในน้ำทิ้งมีค่ามากขึ้นเช่นกัน และผลการศึกษาการเปลี่ยนชนิดของแหล่งพลังงานจากน้ำตาลทรายเป็นแป้งมันสำปะหลังพบว่า ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศและตามด้วยด้วยระบบโปรยกรอง

Kapdan และคณะ (2005) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศตุรกี โดยใช้ระบบแอนแอโรบิกแพ็คคอลัมน์ (anaerobic packed column reactor) และต่อด้วยระบบแอกทีเวเต็ดสลัดจ์ (activated sludge) เติระบบอย่างต่อเนื่อง ซึ่งภายในถังแอนแอโรบิกแพ็คคอลัมน์ จะบรรจุโลหะที่มีลักษณะพรุน (metal sponges) เพื่อให้จุลินทรีย์เกาะ และมีค่าซีโอดีเริ่มต้นคือ 3000 ± 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 800 ± 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 24 ชั่วโมง เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดี พบว่าที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำภายในถังแอนแอโรบิกแพ็คคอลัมน์ที่เหมาะสมคือ 48 ชั่วโมง สามารถบำบัดสีได้มากกว่า 85% และบำบัดซีโอดีได้ 90% แต่ถ้าระยะเวลาเก็บกักน้ำสูงกว่า 48 ชั่วโมง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีลดลง และทำการเปรียบเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียจริง พบว่าสามารถบำบัดสีได้มากกว่า 60% ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่ 24 ชั่วโมง

Kapdan และคณะ (2005) ศึกษาผลของอายุสลัดจ์และความเข้มข้นสีเริ่มต้น เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีไอดี โดยระบบบำบัด SBR แบบไร้อากาศ-เติมอากาศ โดยใช้ สีย้อมที่ฟออะโซ Remazol Red RR a vinylsulphonyl (VS) และ monochlorotriazine (MCT) อายุสลัดจ์ที่ใช้ในการศึกษาคือ 12-30 วัน และความเข้มข้นสีเริ่มต้นระหว่าง 50-500 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดค่าความเข้มสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสี Remazol Red RR มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร แล้วนำค่าดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นสีพบว่า ที่ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถบำบัดสีและซีไอดีได้สูงที่สุดคือ 95% และ 70% ตามลำดับที่อายุสลัดจ์ 15 วัน และไม่สามารถบำบัดได้สูงกว่านี้เมื่ออายุสลัดจ์เพิ่มขึ้น จนถึง 30 วัน กระบวนการหลักของการบำบัดสีจะอยู่ในระยะไร้อากาศ เพราะระยะไร้อากาศมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีมากกว่า 95% และระยะเติมอากาศสามารถบำบัดสีได้เล็กน้อย ความเข้มข้นสีที่เพิ่มขึ้นจะไม่มีผลต่อการบำบัดสี ระบบบำบัดแบบ SBR สามารถลดความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้นที่ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นสี 50-150 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีจะลดลงจาก 70% เหลือ 60% เมื่อความเข้มข้นสีเพิ่มขึ้นจาก 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จนถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

Van der Zee และคณะ (2001) ศึกษาการบำบัดสีอะโซโดยใช้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ไร้อากาศ จากระบบยูเอเอสบี (Upward-flow anaerobic sludge bed: UASB) สีย้อมที่ใช้ได้แก่ สี Reactive yellow 2 และ Direct yellow 12 ความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่า เมื่อผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศสามารถบำบัดสีได้มากกว่า 95% และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายสีคือ สารอะโรมาติกเอมีน เมื่อสารเหล่านี้สัมผัสกับอากาศจะทำให้น้ำทิ้งกลับมามีสีอีกครั้งด้วยปฏิกิริยา ออกซิเดชัน

Jonstrup และคณะ (2011) ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการบำบัดสีย้อม และการสลายสารประกอบอะโรมาติกเอมีนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ระบบบำบัดร่วมแบบไร้อากาศและระบบบำบัดแบบเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง สีย้อมที่ใช้ศึกษาคือ สีย้อมอะโซ 3 ชนิด ได้แก่ Remazol Red RR Remazol Blue RR และ Remazol Yellow RR ภายในถังปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ ภายในจะบรรจุตัวกลาง และทำการเปรียบเทียบตัวกลางที่แตกต่างกัน พบว่าตัวกลาง Poraver ที่ทำจากแก้ว และมีลักษณะพรุน สามารถบำบัดสีได้ถึง 98% ซึ่งบำบัดสีได้มากกว่าตัวกลาง Kaldnes ที่ทำจากพลาสติกเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของโครงสร้างไบโอฟิล์ม และทำการศึกษาเกี่ยวกับความเข้มข้นของสีย้อม พบว่าสามารถบำบัดสีได้เกือบสมบูรณ์ที่ความเข้มข้นสีระหว่าง 100 ถึง 2000

มิลลิกรัมต่อลิตร และภายในถังปฏิกริยาแบบเติมอากาศพบว่า สามารถย่อยสลายสารประกอบอะโรมาติกเอมีนได้บางส่วน และผลการบำบัดสี Remazol Yellow RR ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศมาทำการบำบัดต่อด้วยระบบเติมอากาศพบว่า น้ำทิ้งเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีแดงเข้ม เนื่องจากปฏิกริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองแบบแบทช์ โดยใช้สลัดจ์ที่มาจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเคมีต่างๆ พบว่า ไม่สามารถย่อยสลายสารประกอบอะโรมาติกเอมีนได้อย่างสมบูรณ์

Yasar และคณะ (2012) ทำการศึกษาระยะเวลาในการบำบัดสีย้อมอะโซ โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศและตามด้วยแบบเติมอากาศด้วยระบบบำบัดแบบ SBR โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นซีไอดี 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้จุลินทรีย์แบบผสม (mixed microbial culture) ทำการทดลองใน 1 วัฏจักรเท่ากับ 12 ชั่วโมงประกอบด้วย ระยะไร้อากาศและตามด้วยระยะเติมอากาศโดยแบ่งเป็น 3/9 6/6 และ 9/3 ชั่วโมงตามลำดับ ทำการศึกษาภายใต้สภาวะ steady-state พบว่า ในสภาวะไร้อากาศจะเกิดการบำบัดสีย้อมอะโซ และการที่มีระยะไร้อากาศนานขึ้นส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงขึ้น คือสามารถบำบัดสีได้ 71% ที่ระยะไร้อากาศ 3 ชั่วโมง 87% ที่ระยะไร้อากาศ 6 ชั่วโมง และ 92% ที่ระยะไร้อากาศ 9 ชั่วโมงตามลำดับ และในสภาวะเติมอากาศความเข้มข้นของสีในน้ำทิ้งจะคงที่ที่ระยะเติมอากาศ 9 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมงตามลำดับ แต่ที่ระยะเติมอากาศ 6 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำทิ้งจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะเติมอากาศ ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีทั้งหมดมากกว่า 84% ในแต่ละวัฏจักร และเมื่อระยะไร้อากาศนานขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีก็เพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามอัตราการบำบัดสีสูงสุดในแต่ละวัฏจักรในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นภายใน 3 ชั่วโมงแรก

Cinar และคณะ (2008) ศึกษาระยะเวลาในการบำบัดสีอะโซ โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพด้วยระบบบำบัดแบบ SBR โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงานความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำภายใต้สภาวะไร้อากาศและตามด้วยสภาวะเติมอากาศใน 1 วัฏจักรที่แตกต่างกันได้แก่ 48 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 12 ชั่วโมงตามลำดับพบว่า ในระยะไร้อากาศจะเกิดการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และในระยะเติมอากาศจะเกิดการบำบัดซีไอดีหลังจากระยะไร้อากาศ และพบว่าที่ระยะไร้อากาศสามารถบำบัดสีได้ 72% 89% และ 86% ในระยะไร้อากาศ 24 ชั่วโมง 12 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมงตามลำดับ แต่เมื่อเริ่มเข้าสู่สภาวะเติมอากาศความเข้มข้นของสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยจะเพิ่มขึ้น 5% ในระยะ

เติมอากาศ 24 ชั่วโมง เพิ่มขึ้น 2% ที่ระยะเติมอากาศ 12 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมงตามลำดับ มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีทั้งหมดมากกว่า 75% สำหรับทุกๆการดำเนินงาน และสามารถบำบัดซีโอดีได้ประมาณ 70% ภายใน 3 ชั่วโมงแรกของระยะไร้อากาศ ในระหว่างการบำบัดซีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 จะเกิดสารอะโรมาติกเอมีน 2 ชนิด คือ แนปทาไลน์เอมีน (naphthalene-based amine) และ เบนซีนเอมีน (Benzene based amine) ซึ่งในระยะไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนเอมีนเท่ากับ 64% 92% และ 89% ตามลำดับของระบบ SBR ใน 1 วัฏจักร 48 ชั่วโมง 24 ชั่วโมงและ 12 ชั่วโมงตามลำดับ ผลการศึกษาสามารถบ่งชี้ได้ว่าระบบ SBR สามารถบำบัดซีและย่อยสลายสารอะโรมาติกเอมีนที่ดีที่สุดที่วัฏจักร 24 ชั่วโมง

Lin และคณะ (2010) ศึกษาการบำบัดซีรีแอกทีฟฟลูอิด 13 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยระบบแอนแอโรบิก/แอโรบิกฟลูอิดไดซ์เบด (Anerobic/aerobic fluidized bed) ที่มี *Pseudomonas* sp. strain L1 ที่เกาะอยู่บนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ความเข้มข้นของซีรีแอกทีฟฟลูอิด 13 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ระยะเวลาเก็บกักน้ำ และความเข้มข้นของกลูโคส พบว่าระบบมีประสิทธิภาพบำบัดซีและซีโอดีเท่ากับ 83.2% และ 90.7% ตามลำดับ ในสภาวะที่เหมาะสมคือ ระยะเวลาเก็บกักน้ำ 70 ชั่วโมง พีเอชเท่ากับ 7 และความเข้มข้นของกลูโคส 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และยังพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีและซีโอดีจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักน้ำเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงหลังจากชั่วโมงที่ 50 และที่พีเอช 5 หรือ 9 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีและซีโอดีลดลง นอกจากนี้ออกซิเจนจะไปขัดขวางการสลายพันธะอะโซ ดังนั้นการบำบัดซีแอมจะเกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์แบบไร้อากาศ และการย่อยสลายกลายเป็นแร่ธาตุเพียงบางส่วนจะเกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์แบบเติมอากาศ

Sheth และคณะ (2010) ศึกษาการบำบัดซีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตซีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ด้วยระบบ Down flow fixed film bioreactor (DFFR) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยจะทำการทดลองแบบน้ำไหลต่อเนื่อง ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ $32,600 \pm 50$ มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเปรียบเทียบที่อัตราการไหลต่างๆ พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเท่ากับ 120 200 375 500 และ 800 มิลลิตรต่อชั่วโมง สามารถบำบัดซีได้มากกว่า 90% และที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 1,000 มิลลิตรต่อชั่วโมง สามารถบำบัดซีได้ 90% ซึ่งมีระยะเวลาที่น้ำเสียสัมผัสกับจุลินทรีย์ 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดซีจะลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้นเป็น 1,250 มิลลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดซีจะลดลงจาก $91 \pm 2\%$ เหลือแค่ $60 \pm 2\%$ เนื่องจากระยะเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับจุลินทรีย์ลดลง

Yu และคณะ (2001) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมประเภทต่างๆ โดย *Pseudomonas* strain พบว่า *Pseudomonas* strain GM3 สามารถบำบัดสี Acid violet (Monoazo dye) ได้ในสภาวะต่างๆ โดยพีเอชที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงพีเอช 7-8 ซึ่งจะสามารถบำบัดสีได้สูงที่สุดมากกว่า 90% แต่การบำบัดสีจะลดลงประมาณ 50% เมื่อพีเอชลดลงมา 0.5 ความเข้มข้นสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 35 – 40 องศาเซลเซียส โดยกิจกรรมของ *Pseudomonas* strain GM3 จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 10 องศาเซลเซียสเป็น 35 องศาเซลเซียส และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียสที่ และยังศึกษาธาตุอาหารที่ใช้เป็นแหล่งไนโตรเจน ได้แก่ โพแทสเซียมคลอไรด์ เพปโทน แอมโมเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าจะนำไปสู่การบำบัดสีได้ 83.5% 93.9% และ 89.3% ตามลำดับ ส่วนโพแทสเซียมไนเตรต และโพแทสเซียมไนเตรตร่วมกับเพปโทน ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่านำไปสู่การบำบัดสีได้เพียงแค่ 2% ซึ่งไนเตรตจะส่งผลกระทบต่อ การสลายพันธะอะโซ เนื่องจากไนเตรตจะสามารถเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ในสภาวะไร้อากาศโดยจะไปแย่งรับอิเล็กตรอนกับพันธะอะโซ

บทที่ 3

แผนการทดลองและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ ณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ และศึกษาอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชันจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีอะโซปนเปื้อน โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบสลับริ่้อากาศและตามด้วยเติมอากาศ ขั้นตอนการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่

การทดลองที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน

การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 10 25 50 100 150 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือเท่ากับ 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอตามลำดับ โดยเติมน้ำตาลทรายขาวความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตรเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์ ในระบบทำการทดลองแบบแบทช์ภายในระบบถังกรองไร้อากาศ และศึกษาอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 หลังจากผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศมาแล้ว ทำการทดลองแบบแบทช์ภายในระบบถังโปรยกรอง

การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน

การทดลองที่ 2 ทำการเลือกความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 21,800 เอดีเอ็มไอ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เห็นการเปลี่ยนแปลงการเกิดสีขึ้นมาใหม่ของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วอย่างชัดเจน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน โดยนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองมาเติมน้ำตาลทรายขาวความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตร หลังจากนั้นนำกลับมาบำบัดต่อด้วยระบบถังกรองไร้อากาศอีกครั้ง ทำการทดลองแบบแบทช์

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- ตู้อบความร้อนที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Drying Oven)
- เครื่องชั่งชนิดละเอียด (Balance)
- กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- เครื่องดูดสุญญากาศและชุดกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer)
- เครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มหรือแช่ (Submersible pump)
- บีกเกอร์ขนาด 50 100 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
- กระบอกตวงขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- ปีเปตขนาด 2 5 และ 10 มิลลิลิตร
- บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร
- หลอดทดลอง

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 (Reactive Violet 5) จากบริษัท Dystar (Thailand) จำกัด
- น้ำตาลทรายขาว
- ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)
- โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)
- สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS)
- สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroin Indicator)
- สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$)
- สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
- แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)

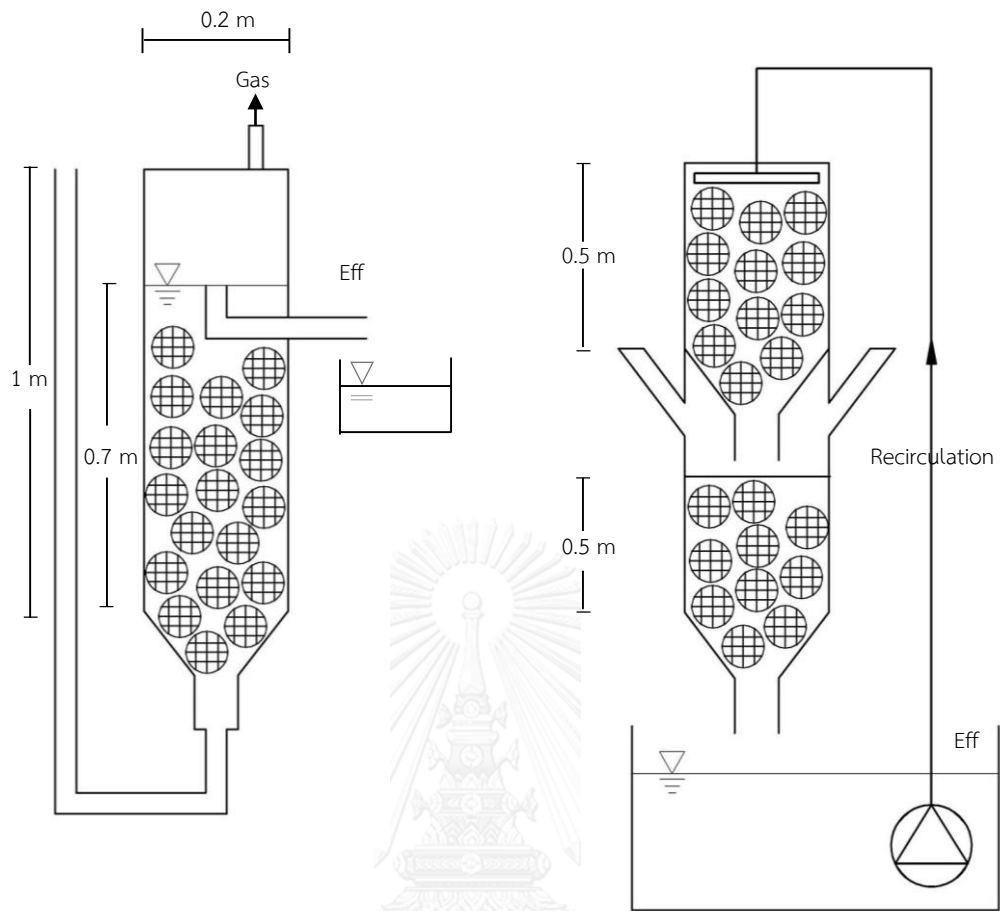
- ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2)
- คอปเปอร์คลอไรด์ ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- กรดบอริก (H_3BO_3)
- แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- แมกนีเซียมซัลเฟต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- โคบอลต์คลอไรด์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- นิกเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- แมงกานีสซัลเฟต ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

3.2.3 ถังปฏิริยาที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้ถังปฏิริยาทั้งหมด 2 แบบได้แก่ ระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังโปรยกรองแสดงดังในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ต่อเนื่องมาจากการงานวิจัยของบัญชา บุญอนันต์วงศ์ (2554) โดยในแต่ละถังปฏิริยามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

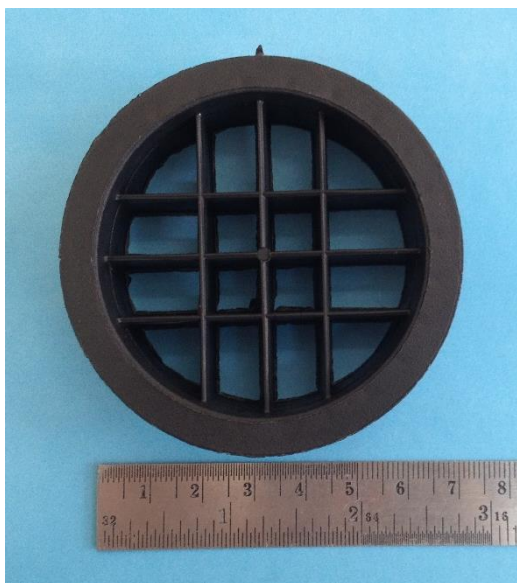
ถังกรองไร้อากาศ ถูกรออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร ความสูงของชั้นตัวกลางเท่ากับ 0.7 เมตร มีปริมาตรถึง 31 ลิตร ขนาดท่อน้ำเข้าและออกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 เมตร ปริมาตรตัวกลาง 0.024 ลูกบาศก์เมตร สามารถรับอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ระหว่าง 0.5-10 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ถังโปรยกรอง ถูกรออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร ชั้นตัวกลาง 2 ชั้น สูงชั้นละ 0.5 เมตร และมีการเวียนน้ำภายในถังโปรยกรองโดยใช้เครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มหรือแช่ที่มีอัตราการไหลมากกว่า 60 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถรับอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ระหว่าง 0.3-3 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน



รูปที่ 3.1 ระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังโปรยกรอง
(บัญชา บุญอนันตวงศ์, 2554)

สำหรับตัวกลางพลาสติกที่บรรจุอยู่ในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองเป็นของบริษัท AQUA รุ่น R-190 Random Flow Media มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะ 190 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวกลางพลาสติกกรุ่น R-190 Random Flow Media ของบริษัท AQUA

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ นำมาจากจากบริษัท แชนอี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด โดยนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาเลี้ยงร่วมกับตัวกลางพลาสติกภายในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง เพื่อให้จุลินทรีย์เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางพลาสติกในลักษณะเป็นชั้นฟิล์ม

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเริ่มเดินระบบ

ในงานวิจัยนี้ ก่อนเริ่มดำเนินการทดลองที่ 1 และ 2 ต้องเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ให้มีความพร้อมที่จะทำงาน โดยนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาเลี้ยงร่วมกับตัวกลางพลาสติกภายในถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง เพื่อให้จุลินทรีย์เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางพลาสติกในลักษณะเป็นชั้นฟิล์ม และใช้น้ำตาลทรายขาวความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตรเป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์เติมธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารเสริม และควบคุมพีเอชภายในถังกรองไร้อากาศให้อยู่ในช่วง 7-7.5 โดยใช้ไดโพลแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตหรือโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ระยะเวลาการเดินระบบจะดำเนินไปจนกระทั่งประสิทธิภาพการบำบัดซีไอคองที่ซึ่งใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 35 วัน หลังจากนั้นเริ่มเติมสิรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 508 เอดีเอ็มไอเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศเพื่อให้จุลินทรีย์ปรับตัวและเริ่มบำบัดสิรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ดำเนินการไปจนกระทั่งระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดสิรีแอกทีฟไอคองที่ซึ่งใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 10 วัน หลังจากนั้นจึงเริ่มดำเนินการทดลองที่ 1 ได้

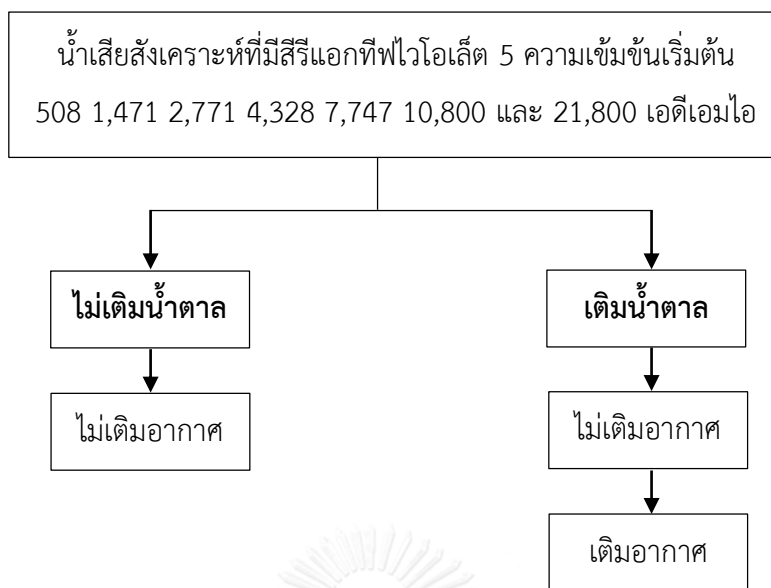
3.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 1 และ 2 เตรียมโดยใช้น้ำประปาซึ่งกำหนดให้มีความเข้มข้นสารแอกทิฟเวอเลต 5 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 10 25 50 100 150 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับความเข้มข้นสี 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอตามลำดับ และควบคุมความเข้มข้นน้ำตาลทรายขาวให้คงที่ 1,000 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตร เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์ เดิมแอมโมเนียมคลอไรด์เพื่อเป็นแหล่งไนโตรเจน และไดโพลแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเพื่อเป็นแหล่งฟอสฟอรัส และควบคุมอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 150:5:1 และเติมธาตุอาหารเสริมอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2.4 และ 2.5 ทำการควบคุมพีเอชภายในถังกรองไร้อากาศให้อยู่ในช่วง 7-7.5 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์

3.3.3 การทดลองที่ 1

การทดลองที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสีแอกทิฟเวอเลต 5 ที่ความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่างๆ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ภายในระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังโปรยกรอง มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีแอกทิฟเวอเลต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 508 เอดีเอ็มไอ ทำการควบคุมความเข้มข้นน้ำตาลทรายขาวให้คงที่ 1,000 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตรเติมเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศ และเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่อยู่ในถังกรองไร้อากาศในช่วงเวลาที่ 0 2 4 6 8 10 12 และหลังจากช่วงเวลาที่ 12 เป็นต้นไปเก็บตัวอย่างน้ำทุกวัน เพื่อนำไปวัดความเข้มข้นสีที่ลดลงด้วยปฏิกิริยาทางชีวภาพแบบไร้อากาศจนประสิทธิภาพการบำบัดสีคงที่ หลังจากนั้นนำน้ำทิ้งที่ออกจากถังกรองไร้อากาศมาเติมเข้าสู่ถังโปรยกรอง ซึ่งภายในถังโปรยกรองมีอัตราการเวียนน้ำกลับที่อัตราการไหลมากกว่า 60 ลิตรต่อชั่วโมง และเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่อยู่ในถังโปรยกรองในช่วงเวลาที่ 2 4 6 8 10 12 และหลังจากช่วงเวลาที่ 12 เป็นต้นไปเก็บตัวอย่างน้ำทุกวันเป็นระยะเวลา 4 วัน เพื่อนำไปวัดความเข้มข้นสีที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนความเข้มข้นสีแอกทิฟเวอเลต 5 เริ่มต้นเป็น 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 ตามลำดับ โดยในแต่ละความเข้มข้นทำการทดลอง 3 ซ้ำ และมีชุดควบคุมที่ทำเหมือนกัน แต่ต่างกันตรงที่ชุดควบคุมจะไม่มีเติมน้ำตาลทรายขาวความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศ และเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่อยู่ในถังกรองไร้อากาศในช่วงเวลาที่ 0 2 4 6 8 10 12 และหลังจากช่วงเวลาที่ 12 เป็นต้นไปเก็บตัวอย่างน้ำทุกวัน เพื่อนำไปวัดความเข้มข้นสีที่ลดลง ซึ่งสามารถสรุปแผนผังการทดลองที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.3



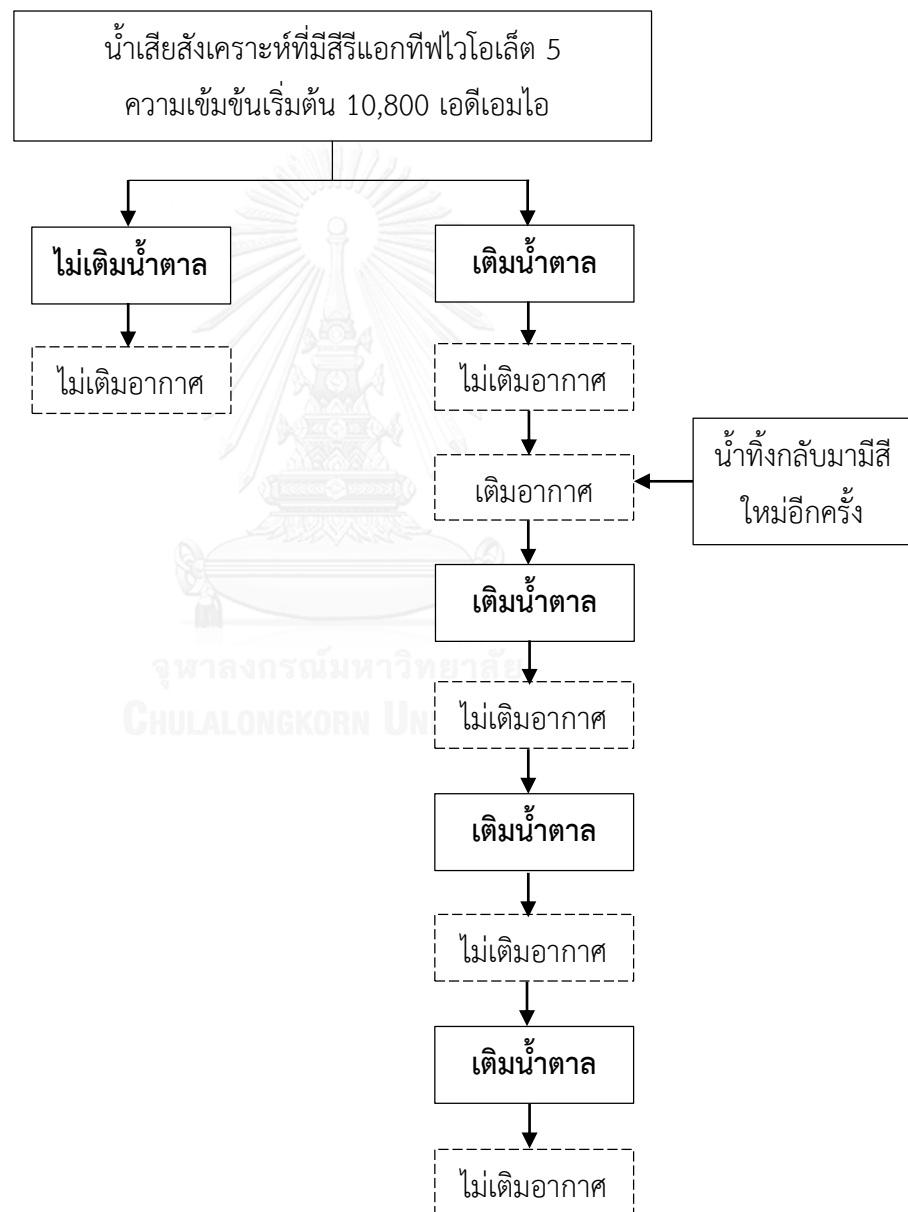
รูปที่ 3.3 แผนผังสรุปการทดลองครั้งที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5

3.3.2 การทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชันของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ซึ่งเลือกความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10,800 เอดีเอ็มไอ โดยนำน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นใหม่เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถึงโปรยกรองกลับมาบำบัดต่อด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ

เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10,800 เอดีเอ็มไอ ทำการควบคุมความเข้มข้นน้ำตาลทรายขาวให้คงที่ 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรเติมเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศและเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่อยู่ในถังกรองไร้อากาศในชั่วโมงที่ 0 2 4 6 8 10 12 และหลังจากชั่วโมงที่ 12 เป็นต้นไปเก็บตัวอย่างน้ำทุกวัน เพื่อนำไปวัดความเข้มข้นสีที่ลดลงด้วยปฏิกิริยาทางชีวภาพแบบไร้อากาศจนประสิทธิภาพการบำบัดสีคงที่ หลังจากนั้นนำน้ำทิ้งที่ออกจากถังกรองไร้อากาศมาเติมเข้าสู่ถังโปรยกรอง ซึ่งภายในถังโปรยกรองมีอัตราการเวียนน้ำกลับที่อัตราการไหลมากกว่า 60 ลิตรต่อชั่วโมง และเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่อยู่ภายในถังโปรยกรองในชั่วโมงที่ 2 4 6 8 10 12 และหลังจากชั่วโมงที่ 12 เป็นต้นไปเก็บตัวอย่างน้ำทุกวันเป็นระยะเวลา 4 วัน เพื่อนำไปวัดความเข้มข้นสีที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชัน จากนั้นนำน้ำทิ้งที่เกิดสีขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยา

ออโตออกซิเดชันและมีค่าความเข้มข้นสีเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการบำบัดด้วยถังโปรยกรองเวียนกลับเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศอีกครั้ง เพื่อบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ให้หายไปหรือทำให้ค่าความเข้มข้นสีลดลงจากเดิม และเติมน้ำตาลทรายขาวความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์ในระบบ เก็บตัวอย่างน้ำภายในถังกรองไร้อากาศทุกวันจนประสิทธิภาพการบำบัดสีคงที่ และทำซ้ำแบบนี้เป็นจำนวนทั้งหมด 2 ครั้งจนความเข้มข้นสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ไม่สามารถลดลงได้อีก ซึ่งสามารถสรุปแผนผังการทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังสรุปการทดลองที่ 2

ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชัน

ตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ตลอดทั้งการทดลองที่ 1 และ 2 ประกอบด้วย ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุม โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.1 และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตลอดการทดลองที่ 1 และ 2 ได้แก่ ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ และหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ซีไอดี ของแข็งแขวนลอย และพีเอช โดยวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และความถี่ในการเก็บตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัย

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรต้น	<p>การทดลองที่ 1</p> <ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอ <p>การทดลองที่ 2</p> <ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นสีในน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกโตออกซิเดชัน
ตัวแปรควบคุม	<p>การทดลองที่ 1 และ 2</p> <ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นน้ำตาลทรายขาวในน้ำเสียสังเคราะห์ 1,000 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร - ควบคุมพีเอชภายในถังกรองไร้อากาศให้อยู่ในช่วง 7-7.5 โดยใช้ ไคโทแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต - อัตราการเวียนน้ำภายในถังโปรยกรองมากกว่า 60 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	<p>การทดลองที่ 1 และ 2</p> <ul style="list-style-type: none"> - ค่าความเข้มข้นสี - ซีไอดี - ของแข็งแขวนลอย

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัย

การทดลอง	พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์	ความถี่ในการเก็บตัวอย่าง
การทดลองที่ 1 และ 2	พีเอช	-	เครื่องวัดพีเอช	ทุกวัน
	ซีโอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	รีฟลักซ์แบบปิด	ทุกวัน
	ของแข็งแขวนลอย	มิลลิกรัมต่อลิตร	กรองด้วยกระดาษกรอง GF/C แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส	ทุกวัน
	สี	เอดีเอ็มไอ	วัดค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer	ชั่วโมงที่ 0 2 4 6 8 10 และ 12 หลังจากนี้เก็บทุกวัน
	มิลลิกรัมต่อลิตร	วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 559 นาโนเมตร	ชั่วโมงที่ 0 2 4 6 8 10 และ 12 หลังจากนี้เก็บทุกวัน	

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซโดยระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศ และศึกษาอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชันโดยระบบบำบัดทางชีวภาพแบบเติมอากาศ อีกทั้งยังศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชันโดยระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศ ทำการทดลองแบบแบทช์ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้รวมทั้งสิ้น 285 วัน โดยมีผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทดลอง ดังต่อไปนี้

4.1 การทดลองที่ 1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ

4.2 การทดลองที่ 2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

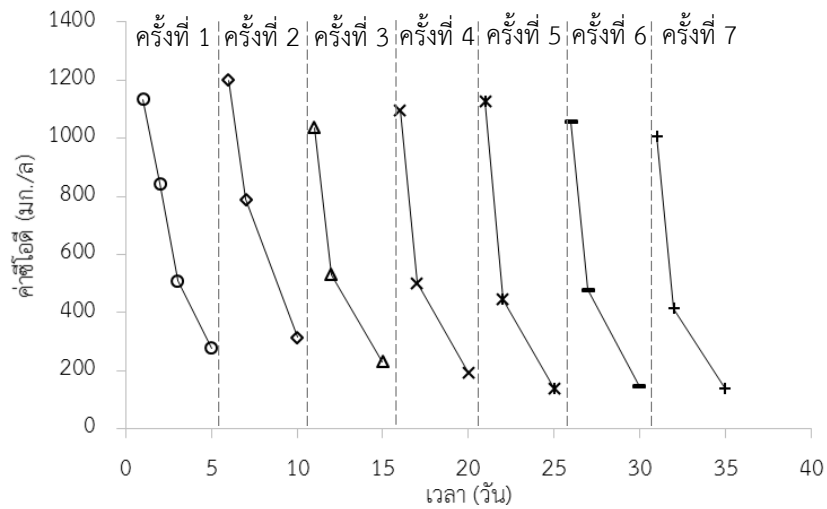
4.1 ผลการทดลองที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ

การทดลองที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ และศึกษาอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชัน ด้วยระบบถังโปรยกรอง ทำการทดลองแบบแบทช์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ และสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ซึ่งมีโครงสร้างเคมีประกอบด้วยพันธะอะโซ 1 พันธะที่ประกอบด้วยกลุ่มของเบนซีนและแนพทาลีนแสดงดังรูปที่ 2.2 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ได้แก่ ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ และมีลิกรัมต่อลิตร ค่าซีไอดี พีเอช และของแข็งแขวนลอย โดยเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ให้มีความพร้อมที่จะเริ่มทำงานประมาณ 45 วัน หลังจากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่การทดลองที่ 1 โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ชั่วโมง ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 210 วัน ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้เตรียมเชื้อจุลินทรีย์ให้มีความพร้อมที่จะบำบัดซีไอดีและสีย้อม รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองที่ 1 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 255 วัน

4.1.1 การเริ่มต้นระบบ

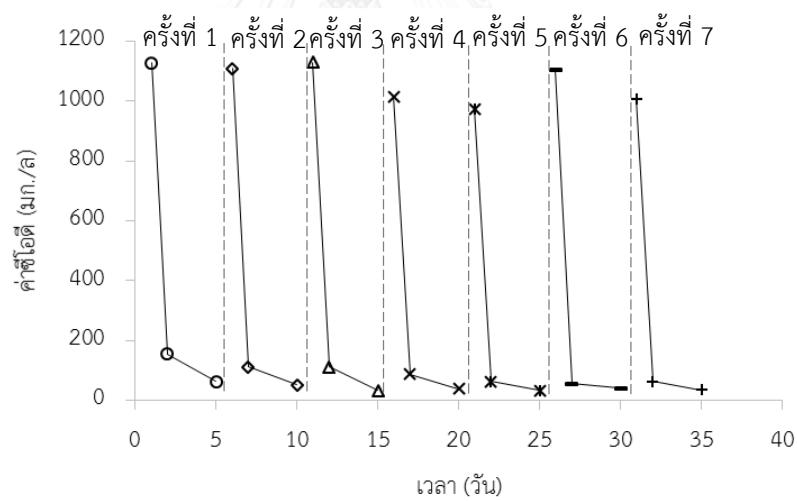
การเริ่มเดินระบบในช่วงแรกก่อนเริ่มการทดลองที่ 1 โดยใช้ น้ำตาลทรายขาวความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร เติมเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองเป็นจำนวน 7 ครั้ง เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์ในระบบ รวมระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเชื้อจนประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีคงที่เท่ากับ 35 วัน ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นซีโอดีก่อนเข้าระบบถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง $1,132.88 \pm 50.38$ และ $1,126.4 \pm 30.48$ มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองแล้ว ความเข้มข้นซีโอดีลดลงเหลือ 276.91 ± 21.8 และ 62.13 ± 10.99 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาที่ใช้บำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองเท่ากับ 5 วัน โดยในช่วงแรกความเข้มข้นซีโอดีค่อยๆลดลงอย่างช้าๆจนประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีคงที่ หลังจากนั้นเติมน้ำตาลทรายขาวเข้าสู่ระบบถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองจำนวน 6 ครั้ง โดยความเข้มข้นซีโอดีครั้งที่ 2-7 ที่เติมเข้าสู่ระบบถังกรองไร้อากาศเท่ากับ $1,092.94 \pm 81.75$ มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศแล้ว ความเข้มข้น ซีโอดีลดลงเหลือ 314.67 ± 28.84 230.19 ± 19.45 193.6 ± 19.36 139.83 ± 47.27 144.64 ± 31.32 และ 136.79 ± 10.35 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดซีโอดีในแต่ละครั้งเท่ากับ 4 วันแสดงดังรูปที่ 4.1 และความเข้มข้นซีโอดีครั้งที่ 2-7 ที่เติมเข้าสู่ระบบถังโปรยกรองเท่ากับ $1,056 \pm 65.36$ มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองแล้ว ความเข้มข้นซีโอดีลดลงเหลือ 50.55 ± 3.24 31.81 ± 5.31 38.98 ± 7.57 31.81 ± 5.31 40.63 ± 0.57 และ 33.91 ± 7.79 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดซีโอดีในแต่ละครั้งเท่ากับ 4 วันแสดงดังรูปที่ 4.2 จากการทดลองจะเห็นว่าระบบถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองใช้ระยะเวลาในการปรับตัวในการบำบัดซีโอดีเริ่มต้นให้หายไปลดน้อยลง โดยในช่วงแรกความเข้มข้นซีโอดีค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ แต่เมื่อเติมน้ำตาลทรายขาวความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรในครั้งที่ 3 เป็นต้นมา ระบบสามารถบำบัดซีโอดีให้มีความเข้มข้นคงเหลือน้อยกว่า 2 ครั้งแรก และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดซีโอดีลดลง จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

เมื่อระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีคงที่แล้ว จึงเริ่มเติมสิรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 508 เอดีเอ็มไอเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศ ผลการทดลองพบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดสิรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 513 เอดีเอ็มไอ ให้ลดลงเหลือ 144 เอดีเอ็มไอ 231 เอดีเอ็มไอภายในเวลาเพียงแค่ 1 วัน และค่อนข้างคงที่ไปจนถึงวันที่ 10 แสดงดังรูปที่ 4.3 จากนั้นจึงเริ่มต้นการทดลองที่ 1 ต่อไป



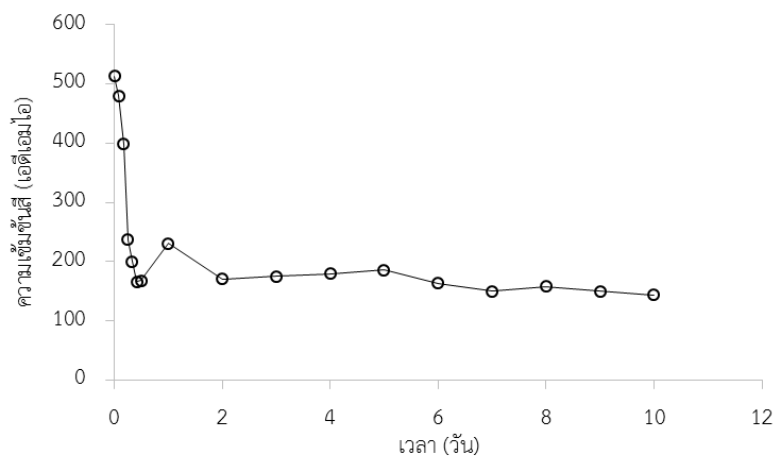
รูปที่ 4.1 ค่าซีโอดีเทียบกับเวลา เมื่อผ่านระบบถังกรองไร้อากาศในช่วงเริ่มต้นระบบ

○ : เต็มซีโอดีครั้งที่ 1, ◇ : เต็มซีโอดีครั้งที่ 2, △ : เต็มซีโอดีครั้งที่ 3, × : เต็มซีโอดีครั้งที่ 4,
* : เต็มซีโอดีครั้งที่ 5, - : เต็มซีโอดีครั้งที่ 6, + : เต็มซีโอดีครั้งที่ 7



รูปที่ 4.2 ค่าซีโอดีเทียบกับเวลา เมื่อผ่านระบบถังโปรยกรองในช่วงเริ่มต้นระบบ

○ : เต็มซีโอดีครั้งที่ 1, ◇ : เต็มซีโอดีครั้งที่ 2, △ : เต็มซีโอดีครั้งที่ 3, × : เต็มซีโอดีครั้งที่ 4,
* : เต็มซีโอดีครั้งที่ 5, - : เต็มซีโอดีครั้งที่ 6, + : เต็มซีโอดีครั้งที่ 7



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นซี (เอตีเอ็มไอ) เทียบกับเวลา เมื่อผ่านระบบถังกรองไร้อากาศ

4.1.2 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ซีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 10 25 50 100 150 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอตีเอ็มไอตามลำดับ และควบคุมความเข้มข้นของน้ำตาลทรายขาวเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และไดโทแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตให้อยู่ในอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 150:5:1 และเติมธาตุอาหารเสริมอื่นๆ และควบคุมพีเอชภายในถังปฏิกิริยาให้อยู่ในช่วง 7-7.5 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ โดยความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบบำบัดแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบบำบัดที่มีซีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นซี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นซี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นซี (เอตีเอ็มไอ)	ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
10	10.2±0.1	508±2.5	1,019±74.8
25	25.5±0.5	1,471±91	1,080±15
50	50.5±0.6	2,771±8	1,036±63.6
100	102.3±1.3	4,328±45.9	978±14.3
150	150.8±0.5	7,747±61.1	1,102.7±31.1
200	201.1±0.3	10,800±17.6	1,022±28.6
400	400.8±0.9	21,800±100	1,146.6±51.3

ลักษณะสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ทั้ง 7 ความเข้มข้น ได้แก่ 10 25 50 100 150 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอตามลำดับก่อนเข้าระบบถังกรองไร้อากาศแสดงดังรูปที่ 4.4



0 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 21,800 เอดีเอ็มไอ

รูปที่ 4.4 ลักษณะสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นต่างๆในหน่วย เอดีเอ็มไอ ก่อนเข้าระบบถังกรองไร้อากาศ

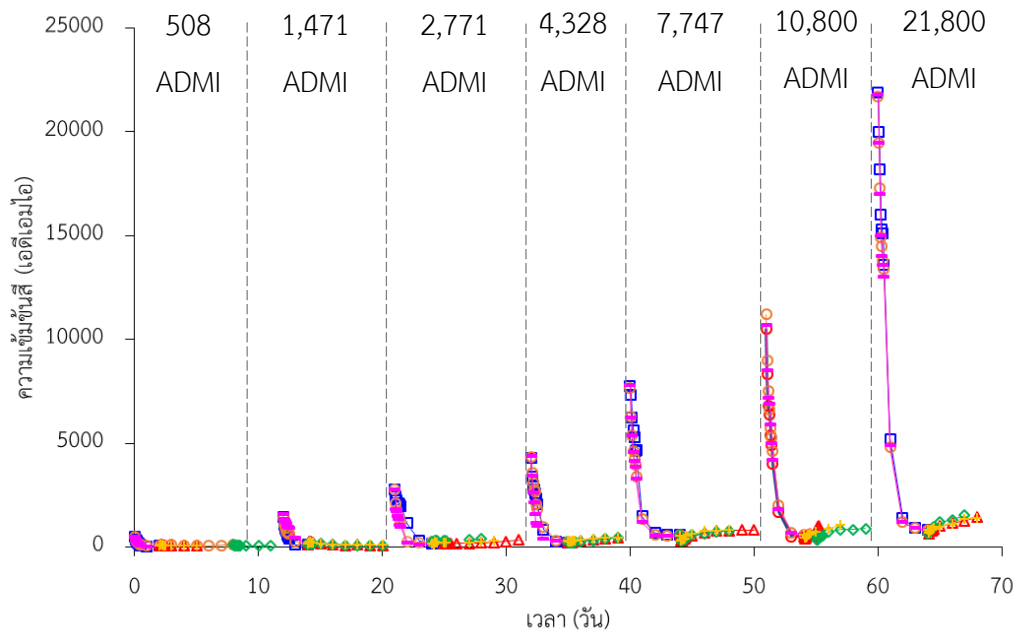
4.1.3 ค่าความเข้มข้นสี

เมื่อเติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ระบบถังกรองไร้อากาศ ผลการทดลองพบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 25 50 100 150 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอตามลำดับได้เป็นอย่างดี โดยลดลงเหลือ 0.8 ± 0.25 1.8 ± 0.58 4.1 ± 0.81 6.8 ± 0.49 8.3 ± 1.04 10.4 ± 0.13 9.9 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 72 ± 24.3 113.3 ± 32.1 175 ± 50.4 242.3 ± 50.8 573.3 ± 46.2 566.7 ± 57.7 และ 800 ± 0 เอดีเอ็มไอตามลำดับ ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดสีเท่ากับ 2-4 วันแสดงดังรูปที่ 4.5 โดยสีขุ่นจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในวันแรก และหลังจากนั้นค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ จนคงที่ เนื่องจากการสลายสีในสภาวะไร้อากาศที่เกิดขึ้นในช่วงแรกๆ อาจจะยังเกิดการสะสมของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนในระบบไม่มากนัก จึงทำให้สามารถบำบัดสีให้ลดลงได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปเรื่อยๆ ส่งผลให้เกิดการสะสมของสารประกอบอะโร

มาติกเอมีนในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบสามารถบำบัดสีได้ลดน้อยลง เมื่อความเข้มข้นของสีเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lin และคณะ (2010) พบว่า ระบบบำบัดแบบชั้นลอยตัวแบบไร้อากาศ (Anaerobic fluidized bed system) สามารถบำบัด สีรีแอกทีฟบลู 13 ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 50 – 400 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ และสามารถบำบัดสีให้ลดลงได้ อย่างรวดเร็วในช่วงแรกๆ และหลังจากนั้นจะเริ่มลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากการสะสมของ สารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่ได้จากการสลายสี ในขณะที่ชุดควบคุมที่ไม่ได้มีการเติมน้ำตาลทรายขาวความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตรลงไปเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์พบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศไม่สามารถบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ทั้ง 7 ความเข้มข้นให้หายไปได้ โดย ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดเท่ากับ 7 วัน เนื่องจากสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ไม่สามารถใช้เป็นแหล่ง พลังงานให้จุลินทรีย์นำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ส่งผลให้ไม่สามารถบำบัดสีให้หายไปได้ จาก งานวิจัยของ Lin และคณะ (2010) พบว่า ระบบบำบัดแบบชั้นลอยตัวแบบไร้อากาศมีประสิทธิภาพ การบำบัดสีรีแอกทีฟบลู 13 เพิ่มขึ้น 80.3% เมื่อเติมกลูโคสความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรเข้า ไปในระบบ

หลังจากบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศแล้ว น้ำทิ้งที่ออกจากระบบถังกรอง ไร้อากาศจะถูกถ่ายไปยังระบบถังโปรยกรองเพื่อบำบัดค่าซีไอดีที่เหลืออยู่ ซึ่งหมายถึงน้ำตาลทรายขาว ที่หลงเหลืออยู่ในระบบและสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่ถูกสร้างขึ้นมาจากการสลายสี พบว่า ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเมื่อผ่านระบบบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองมีค่าเท่ากับ 0.6 ± 0.05 1.1 ± 0.2 5 ± 0.85 7.4 ± 0.13 9.7 ± 1.52 12.9 ± 0.27 13.1 ± 0.36 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 50.7 ± 7.4 89.3 ± 12.7 334.7 ± 48.2 460.7 ± 2.3 793.7 ± 32.7 980 ± 83.8 1418 ± 6.5 เอดีเอ็มไอตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรอง โดยที่ความ เข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 50 100 150 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือเท่ากับ 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอตามลำดับ ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น 118% 120% 163% 154% และ 116% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่ออกจากถังกรอง ไร้อากาศ ในขณะที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 10 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ เท่ากับ 508 และ 1,471 เอดีเอ็มไอ ค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งลดลง และผ่านมาตรฐานการระบาย น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดให้มี ค่าสีไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ แสดงดังรูปที่ 4.6 การที่ค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผ่าน ระบบถังโปรยกรองที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟ ไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 2,771 – 21,800 เอดีเอ็มไอ อาจมา จากการสะสมของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสลายสี ซึ่งมีความเข้มข้น ของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนสูงเมื่อความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้

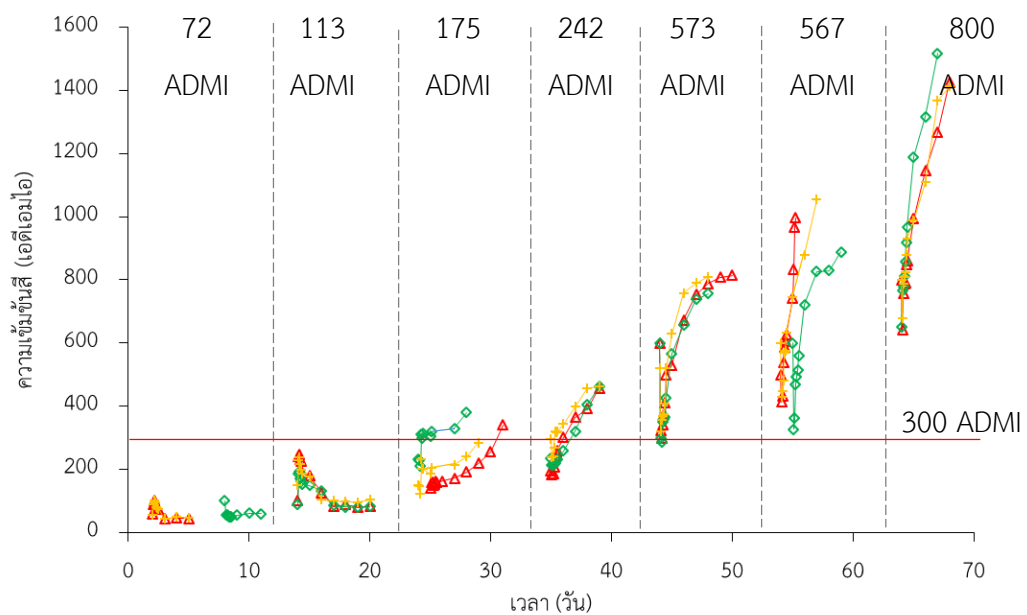
เกิดการรวมตัวกันของสารประกอบอะโรมาติกได้ง่ายขึ้นเมื่อสัมผัสกับออกซิเจน ทำให้ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเมื่อผ่านการเติมอากาศแล้วมีความเข้มข้นสีเพิ่มขึ้น และสีของน้ำทิ้งกลับมาสีใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไอโอดีต 5 เริ่มต้นที่ความเข้มข้นต่างๆในหน่วยเอดีเอ็มไอ

เมื่อผ่านระบบบำบัดถังกรองไร้อากาศและตามด้วยระบบถังโปรยกรอง

- : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 1, ○ : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 2, — : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 3
 △ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 1, ◇ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 2, + : ถังโปรยกรองครั้งที่ 3



รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งในหน่วยเอดีเอ็มไอเมื่อผ่านระบบถังโปรยกรอง

- △ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 1, ◇ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 2, + : ถังโปรยกรองครั้งที่ 3

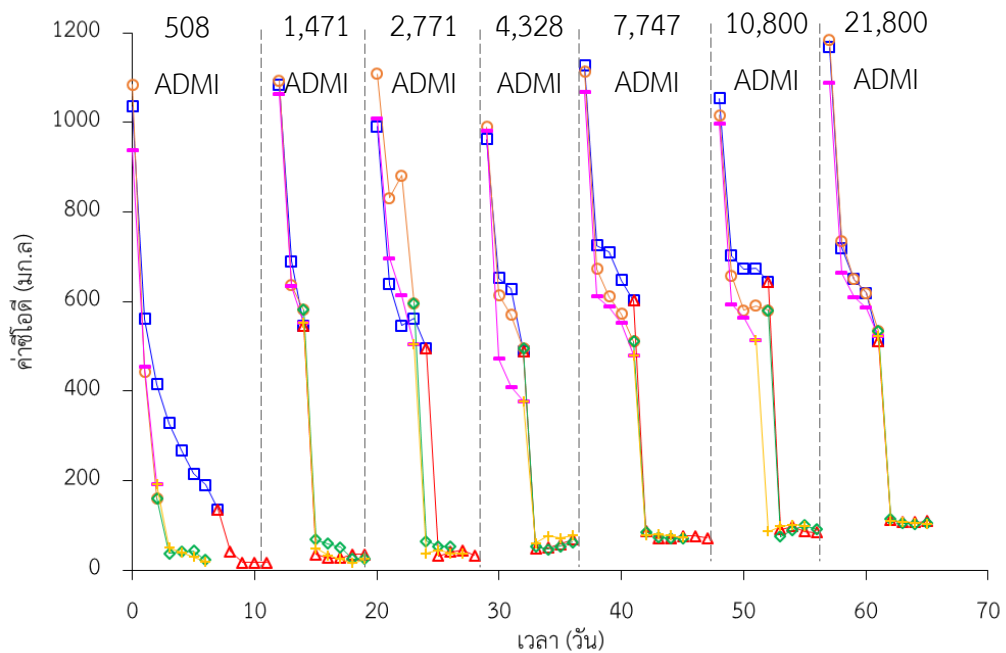
การบำบัดสีรีแอกทีฟไอโอเล็ด 5 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศนั้น ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นสีลดลงและทำให้สีหายไป เนื่องจากพันธะอะโซ (N=N) ที่อยู่ในโครงสร้างสีรีแอกทีฟไอโอเล็ด 5 จำนวน 1 พันธะที่ประกอบด้วยกลุ่มของเบนซีนและแนพทาลีนถูกทำให้แยกแตกออกจากกัน ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นสีลดลงจากปฏิกิริยารีดักชันในสภาวะไร้อากาศ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายสีคือ สารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่ไม่มีสี และสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดขึ้นนี้สามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะเติมอากาศ (van der Zee และ Villaverde, 2005) ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายสีรีแอกทีฟไอโอเล็ด 5 จะประกอบไปด้วย naphthalene-based aromatic amines และ benzene-based aromatic amines เป็นส่วนใหญ่ โดยที่ความเข้มข้นสีเริ่มต้นสูงๆ จะมีการสะสมของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนเป็นจำนวนมาก และไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะเติมอากาศ และยังพบว่า naphthalene-based aromatic amines มีความคงทนยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ และไม่สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะเติมอากาศ ในขณะที่ benzene-based aromatic amine นั้น สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะเติมอากาศ แต่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ (Supaka และคณะ, 2004)

งานวิจัยนี้วัดค่าความเข้มข้นสีทั้งหมด 2 หน่วยสี ได้แก่ หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรและเอดีเอ็มไอ แต่เนื่องจากการวัดความเข้มข้นสีหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 559 นาโนเมตรเพียงแค่ว่าความยาวคลื่นเดียว ดังนั้นเมื่อน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดต่างๆ แล้ว สีของน้ำทิ้งเปลี่ยนไปจากเดิม จึงทำให้ไม่สามารถวัดด้วยวิธีเดิมได้ ในขณะที่การวัดความเข้มข้นสีหน่วยเอดีเอ็มไอ เป็นการตรวจวัดปริมาณสีในทุกหน่วยสี ไม่เน้นสีใดสีหนึ่ง โดยวัดค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร โดยวัดความยาวคลื่นทุกๆ 10 นาโนเมตร ดังนั้นการวัดค่าความเข้มข้นสีหน่วยเอดีเอ็มไอจึงมีความน่าเชื่อถือมากกว่าหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเหตุนี้จึงเลือกนำเสนอผลการทดลองความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ เพื่อนำค่าความเข้มข้นสีที่ได้จากตรวจวัดไปหาประสิทธิภาพการบำบัดสีอะโซ อัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

นอกจากนี้การวัดตัวอย่างน้ำความเข้มข้นสีหน่วยเอดีเอ็มไอด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไอโอเล็ด 5 ความเข้มข้น 150 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอ ก่อนนำไปวัดเพื่อหาค่าความเข้มข้นสีหน่วยเอดีเอ็มไอต้องเจือจางตัวอย่างน้ำเสียก่อน โดยเจือจางตัวอย่างน้ำเสียเท่ากับ 40 100 และ 100 เท่าตามลำดับ

4.1.4 ค่าซีไอดี

น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีไอดีเริ่มต้นก่อนเข้าระบบถังกรองไร้อากาศที่ความเข้มข้น สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เท่ากับ 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอ โดย ความเข้มข้นซีไอดีก่อนเข้าระบบเท่ากับ $1,019 \pm 74.8$ $1,080 \pm 15.0$ $1,036 \pm 63.6$ 978.1 ± 14.3 $1,102.7 \pm 31.1$ $1,022 \pm 28.6$ และ $1,146.6 \pm 51.3$ มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านระบบถังกรองไร้อากาศ แล้วพบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดซีไอดีให้ลดลงเหลือ 162.8 ± 27.9 560.2 ± 19.1 532 ± 55.9 453.9 ± 65.9 530.7 ± 63.6 579.7 ± 65 และ 542.9 ± 26.2 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดย ซีไอดีถูกบำบัดให้ลดลงสูงสุดในวันแรก หลังจากนั้นค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด ซีไอดีเท่ากับ 2-4 วัน และเมื่อนำไปบำบัดต่อด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า ระบบถังโปรยกรอง สามารถบำบัดซีไอดีที่เหลือจากระบบถังกรองไร้อากาศให้เหลือเพียง 19.5 ± 2.7 28.4 ± 5.6 41.2 ± 10.5 69.5 ± 7.9 72.1 ± 0.5 91.9 ± 7.5 และ 106.3 ± 3.1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยซีไอดีถูกบำบัดให้ลดลงสูงสุด ตั้งแต่วันแรกที่เริ่มเข้าระบบถังโปรยกรองแสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าซีไอดีถูกบำบัดให้ลดลงได้ตั้งแต่ อยู่ในระบบถังกรองไร้อากาศแล้ว ทั้งนี้ระบบถังกรองไร้อากาศและตามด้วยระบบถังโปรยกรอง สามารถบำบัดซีไอดีให้ผ่านค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ได้คือ 120 มิลลิกรัมต่อลิตรในทุกความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 นอกจากนี้ซีไอดีของน้ำทิ้งที่ ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองมีค่าซีไอดีของน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอ เล็ต 5 เริ่มต้นสูงขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากการสะสมของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดจากการ สลายสีมีความเข้มข้นสูงมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นเพิ่มขึ้น จากงานวิจัย ของ Murali และคณะ (2013) ศึกษาการบำบัดสีเมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) ด้วยระบบบำบัด แบบไร้อากาศ – เติมอากาศแบบฟิล์มชีวภาพ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้นจาก 50 เป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำทิ้งที่ออกจากระบบเติมอากาศมีค่าซีไอดีและความเข้มข้น สารประกอบอะโรมาติกเอมีนสูงขึ้น



รูปที่ 4.7 ค่าซีโอดีเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความเข้มข้นสี่รีแอกทีฟไอโอไลต์ 5 ต่างๆ

เมื่อผ่านการบำบัดด้วยถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง

- : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 1, ○ : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 2, — : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 3
 △ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 1, ◇ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 2, + : ถังโปรยกรองครั้งที่ 3

4.1.5 ประสิทธิภาพการบำบัด

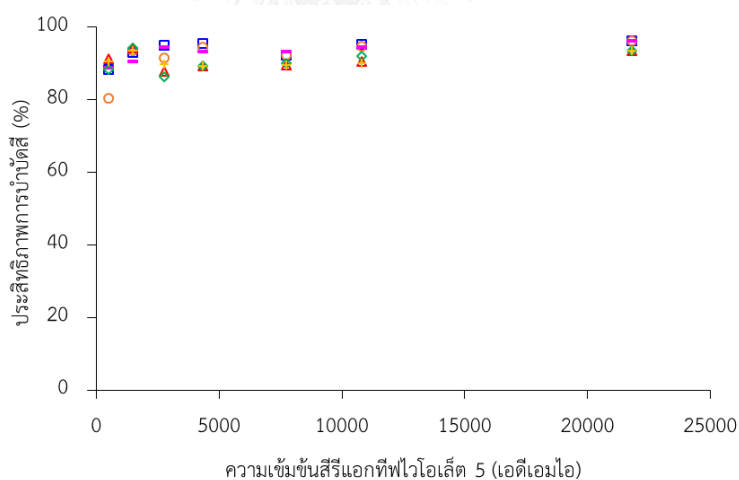
การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดสี่และซีโอดี คิดจากการนำค่าความเข้มข้นสี่และซีโอดีเริ่มต้นก่อนเข้าระบบบำบัด และค่าความเข้มข้นสี่และซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งเมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบต่างๆแล้วมาคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดสี่ดังสมการที่ 4.1 และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีดังสมการที่ 4.2 โดยประสิทธิภาพการบำบัดสี่จะคิดเฉพาะหน่วยเอตีเอ็มไอดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และในงานวิจัยนี้ทำการหาประสิทธิภาพการบำบัดสี่และซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศ ระบบถังโปรยกรอง และระบบถังกรองไร้อากาศและตามด้วยระบบถังโปรยกรอง ดังต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดสี่ (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นสี่ (ก่อน)} - \text{ความเข้มข้นสี่ (หลัง)}}{\text{ความเข้มข้นสี่ (ก่อน)}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นซีโอดี (ก่อน)} - \text{ความเข้มข้นซีโอดี (หลัง)}}{\text{ความเข้มข้นซีโอดี (ก่อน)}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 4.2}$$

4.1.5.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสี

ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอได้เป็นอย่างดี โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีเท่ากับ $85.8 \pm 4.8\%$ $92.4 \pm 1.7\%$ $93.7 \pm 1.8\%$ $94.4 \pm 1.1\%$ $92.6 \pm 0.6\%$ $94.8 \pm 0.4\%$ และ 96.3% ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 508 และ 1,471 เอดีเอ็มไอ เมื่อนำมาบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า ระบบถังโปรยกรองสามารถบำบัดสีให้ลดลงได้อีก และมีประสิทธิภาพการบำบัดสีเท่ากับ $49.3 \pm 7.4\%$ และ $60.1 \pm 5.7\%$ ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอ เมื่อนำมาบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า ค่าความเข้มข้นสีของน้ำที่กลับเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดสีรวมของระบบถังกรองไร้อากาศและตามด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอใกล้เคียงกันเท่ากับ $90 \pm 1.5\%$ $93.9 \pm 0.5\%$ $87.9 \pm 1.7\%$ $89.4 \pm 0.1\%$ $89.8 \pm 0.4\%$ $90.9 \pm 1.0\%$ และ 93.5% ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8

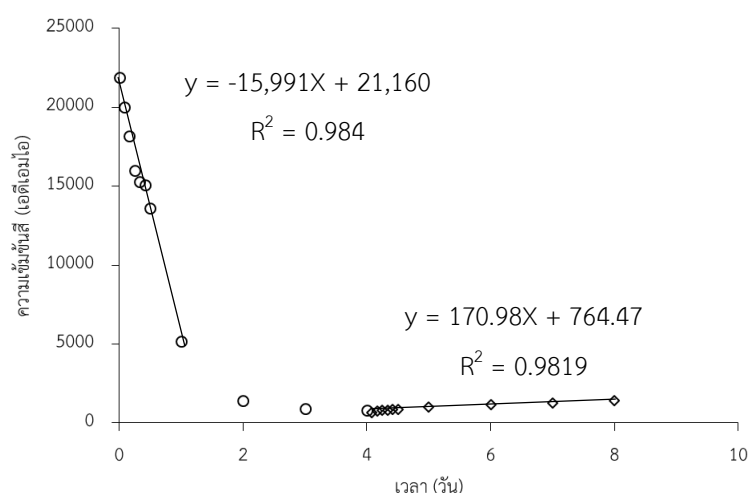


รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของถังกรองไร้อากาศ และถังกรองไร้อากาศและตามด้วยถังโปรยกรอง

- : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 1, ○ : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 2, — : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 3
 △ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 1, ◇ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 2, + : ถังโปรยกรองครั้งที่ 3

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของระบบถังกรองไร้อากาศและตามด้วยระบบถังโปรยกรองกับประสิทธิภาพการบำบัดสีของระบบถังกรองไร้อากาศพบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงกว่าเล็กน้อยที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอตามลำดับ เนื่องจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองมีค่าความเข้มข้นสีเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Supaka และคณะ, 2004) พบว่า สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรจะถูกย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในสภาวะไร้อากาศภายใน 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ (Koupaie และคณะ, 2011) พบว่า ระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดสี Acid Red 18 ความเข้มข้น 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มากกว่า 98% และ (Lin และคณะ, 2010) พบว่า ระบบบำบัดแบบไร้อากาศและตามด้วยระบบบำบัดแบบเติมอากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดสีรวม 83.2% ที่ความเข้มข้นสี Reactive blue 13 50 – 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

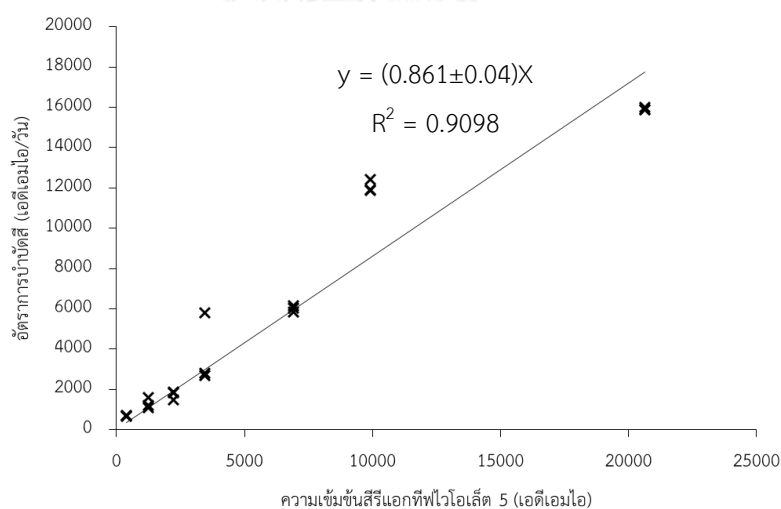
สำหรับอัตราการบำบัดสีของระบบถังกรองไร้อากาศ และอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของระบบถังโปรยกรอง ซึ่งสามารถหาได้จาก Linear Regression เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสีที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา ตัวอย่างการหาอัตราการบำบัดสีและอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่ของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 21,800 เอดีเอ็มไอ พบว่าอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ของระบบถังกรองไร้อากาศเท่ากับ 15,991 เอดีเอ็มไอต่อวัน และมีอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของระบบถังโปรยกรองเท่ากับ 170.98 เอดีเอ็มไอต่อวัน เป็นต้นแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 อัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 21,800 เอดีเอ็มไอของถังกรองไร้อากาศ และอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่ของถังโปรยกรอง

○ : ถังกรองไร้อากาศ ◇ : ถังโปรยกรอง

จากการทดลองพบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศมีอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอเท่ากับ 678.7 ± 21.1 $1,290 \pm 266.9$ $1,727.47 \pm 226.1$ $3,754.2 \pm 1757$ $6,002 \pm 166.6$ $12,071.33 \pm 310.5$ และ $20,636.3 \pm 69.31$ เอดีเอ็มไอต่อวันตามลำดับ และอัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เป็นไปตามปฏิกิริยาลำดับที่ 1 โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k_1) เท่ากับ 0.8606 ± 0.04 ต่อวัน แสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งอัตราการบำบัดสีเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสีเริ่มต้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยของ (Cinar O. และคณะ, 2008) พบว่า ระบบบำบัดแบบไร้อากาศและตามด้วยแบบเติมอากาศ อัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับ 1 โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 8.736 ต่อวัน และ (Karatas และคณะ, 2009) พบว่า ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ มีอัตราการบำบัดสี Reactive Red 24 เป็นไปตามปฏิกิริยาลำดับที่ 1 โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 4.776 ต่อวัน เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการบำบัดสีกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า อัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่า

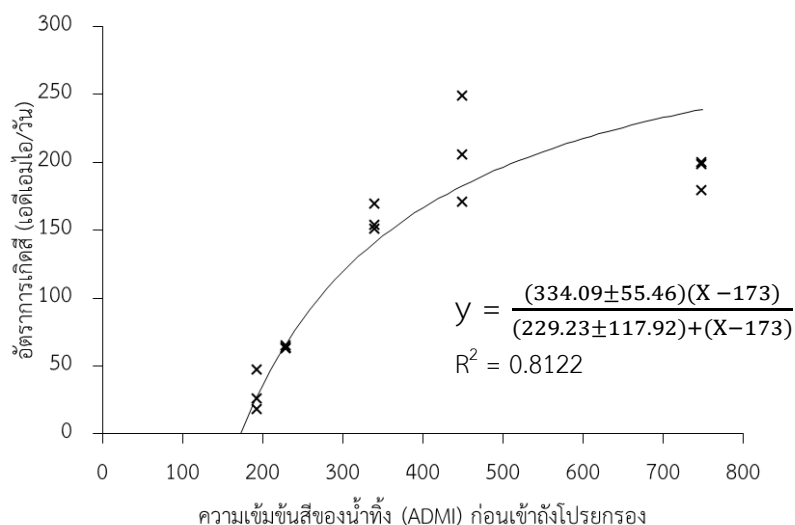


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดสีเทียบกับความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของถังกรองไร้อากาศ

สำหรับอัตราการเพิ่มขึ้นของสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อนำทิ้งผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองพบว่า ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 508 และ 1,471 เอดีเอ็มไอ เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศแล้วมีความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเหลือเท่ากับ 72 ± 24.3 และ 113.3 ± 32.1 เอดีเอ็มไอ เมื่อนำไปบำบัดต่อด้วยระบบถังกรองพบว่า ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 2,771

4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอ เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศแล้วมีความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบถังกรองไร้อากาศและเริ่มต้นก่อนเข้าระบบถังโปรยกรองเท่ากับ 175 ± 50.4 242.3 ± 50.8 573.3 ± 46.2 566.7 ± 57.7 และ 800 ± 0 เอดีเอ็มไอ มีอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันเฉลี่ยเท่ากับ 30.65 ± 14.8 64.12 ± 0.94 112.77 ± 18.1 204.41 ± 40.3 และ 183.22 ± 10.6 เอดีเอ็มไอต่อวันตามลำดับ ซึ่งอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่มีเพียง 5 ค่า เนื่องจากที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 508 และ 1,471 เอดีเอ็มไอ เมื่อผ่านระบบถังกรองไร้อากาศการสะสมของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดจากการสลายสี อาจมีความเข้มข้นต่ำ และเมื่อนำมาบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองน้ำทิ้งจะไม่กลับมาสีใหม่อีกครั้ง ในขณะที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นตั้งแต่ 1,471- 21,800 เอดีเอ็มไอ เมื่อผ่านระบบถังกรองไร้อากาศการสะสมของสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดจากการสลายสี อาจมีความเข้มข้นที่สูงขึ้น และเมื่อนำมาบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองออกซิเจนจะทำให้สารประกอบอะโรมาติกมีโอกาสกลับมาจับกันหรือรวมตัวกันได้มากขึ้น ส่งผลให้น้ำทิ้งกลับมาสีใหม่อีกครั้ง

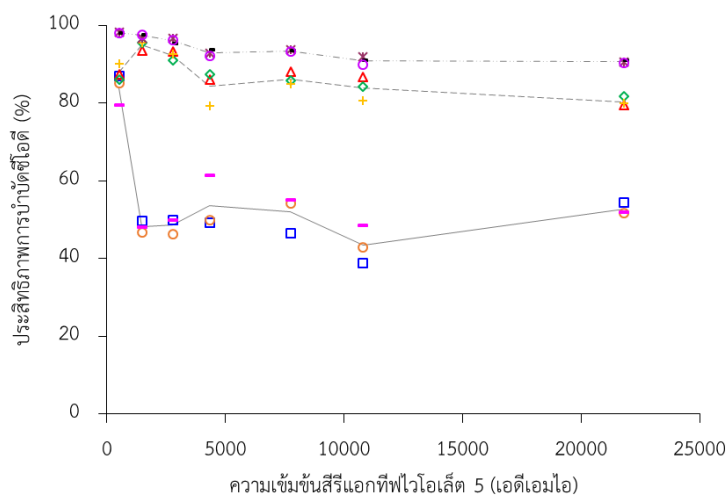
เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจาก Modified monod equation พบว่า จากสมการมีค่าจุดตัดแกน X เท่ากับ 173 สามารถประมาณได้ว่าเมื่อความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบถังกรองไร้อากาศและก่อนเข้าระบบถังโปรยกรองความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่ต่ำกว่า 173 เอดีเอ็มไอ เมื่อนำมาบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองแล้วไม่น่าจะทำให้ น้ำทิ้งกลับมาสีใหม่อีกครั้ง โดยมีค่าอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงสุด (k_m) เท่ากับ 334.09 ± 55.46 เอดีเอ็มไอต่อวัน และมีค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่ส่งผลให้เกิดอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่ได้ร้อยละ 50 ของอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงสุด (K_s) เท่ากับ 229.23 ± 117.92 เอดีเอ็มไอแสดงดังรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ได้จาก Modified monod equation มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งก่อนเข้าระบบถังโปรยกรองที่ได้จากการทดลองคือ 175 ± 50.4 เอดีเอ็มไอ ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าที่ได้จาก Modified monod equation



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นใหม่เทียบกับความเข้มข้นของน้ำทิ้งก่อนเข้าถังโปรยกรองจาก Modified monod equation

4.1.5.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอตีเอ็มไอ มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 83.9±3.8% 48.1±1.4% 48.7±2.2% 53.6±6.9% 51.9±4.7% 43.4±4.8% และ 52.6±1.5% และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังโปรยกรองเท่ากับ 87.9±2.0% 94.9±1.1% 92.3±1.1% 84.3±4.3% 86.3±1.7% 83.9±3.1% และ 80.4±1.2% และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศแล้วตามด้วยระบบถังโปรยกรองมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีใกล้เคียงกัน โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 98.1±0.2% 97.4±0.5% 96.1±0.8% 92.9±0.8% 93.5±0.2% 91±1.0% และ 90.7±0.4% ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าระบบถังกรองไร้อากาศ และระบบถังโปรยกรองสามารถบำบัดซีโอดีให้มีค่าลดลงได้ที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 508 – 21,800 เอตีเอ็มไอ อีกทั้งประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศแล้วตามด้วยระบบถังโปรยกรองไม่ขึ้นกับความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น



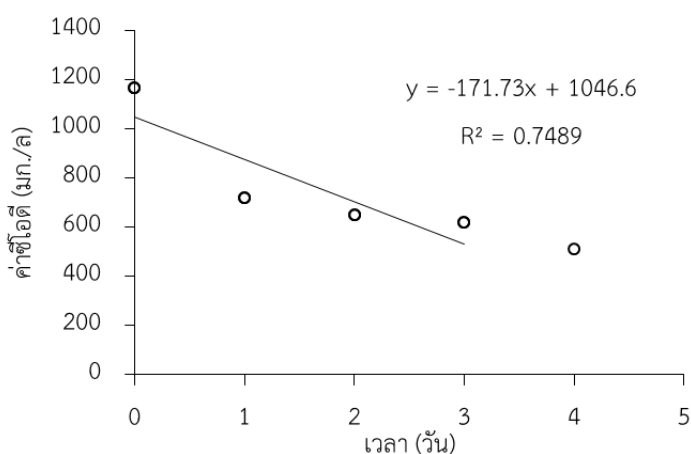
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศ ถังโปรยกรอง และถังกรองไร้อากาศ

และตามด้วยถังโปรยกรองที่ความเข้มข้นสารฟอร์มาลิน 5 ต่างๆ

- : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 1, ○ : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 2, — : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 3
- △ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 1, ◇ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 2, + : ถังโปรยกรองครั้งที่ 3
- * : ถังกรองไร้อากาศ-ถังโปรยกรองครั้งที่ 1, - : ถังกรองไร้อากาศ-ถังโปรยกรองครั้งที่ 2,
- : ถังกรองไร้อากาศ-ถังโปรยกรองครั้งที่ 3, — : ค่าเฉลี่ยถังกรองไร้อากาศ,
- : ค่าเฉลี่ยถังโปรยกรอง, - - - - : ค่าเฉลี่ยถังกรองไร้อากาศ-ถังโปรยกรอง

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศ ความเข้มข้นสารฟอร์มาลิน 5 เริ่มต้น 508 เอดีเอ็มไอ ระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงสุด เนื่องจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าซีโอดีคงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งน้อยที่สุด ในขณะที่ความเข้มข้นสารฟอร์มาลิน 5 เริ่มต้น 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอ มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีใกล้เคียงกันคือ 48-54% และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบถังโปรยกรองพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบถังโปรยกรองมีค่าสูงกว่า เนื่องจากซีโอดีที่คงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าไม่สูงมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Cinar O. และคณะ, 2008) พบว่า ความเข้มข้นซีโอดีเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะถูกบำบัดได้ทั้งระบบบำบัดแบบไร้อากาศและเติมอากาศ โดยระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีถึง 70% ภายในชั่วโมงแรก

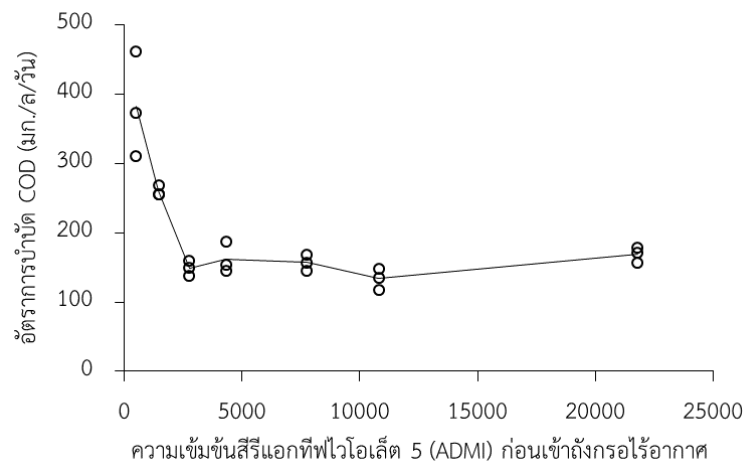
สำหรับอัตราการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังโปรยกรองสามารถหาได้โดยใช้ Linear Regression เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นซีโอดีที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา ตัวอย่างการหาอัตราการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นสรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 21,800 เอดีเอ็มไอของระบบถังกรองไร้อากาศ พบว่า อัตราการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศเท่ากับ 171.73 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน แสดงดังรูปที่ 4.13



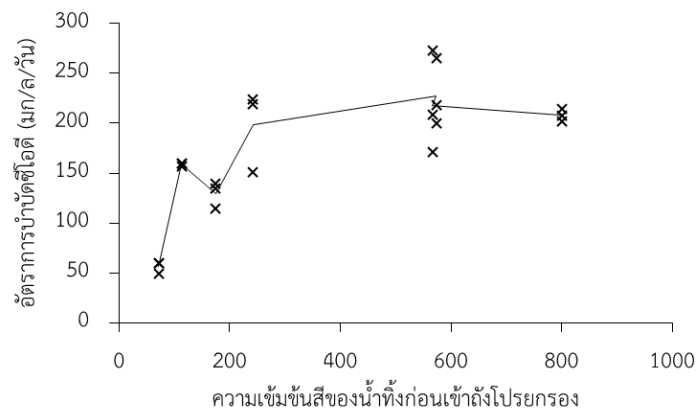
รูปที่ 4.13 อัตราการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นสรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 21,800 เอดีเอ็มไอของถังกรองไร้อากาศ

จากการทดลองพบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศมีอัตราการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นสรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอ เฉลี่ยเท่ากับ 381.6±75.8 260.1±7.6 148.7±10.9 161±22.9 156.9±11.8 133.6±15.2 และ 168.5±11.4 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวันตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าอัตราการบำบัดซีโอดีลดลงในช่วงแรกที่มีความเข้มข้นสรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 508 – 2,771 เอดีเอ็มไอ หลังจากนั้นอัตราการบำบัดซีโอดีจะคงที่เมื่อความเข้มข้นสรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 2,771 – 21,800 เอดีเอ็มไอ การที่อัตราการบำบัดซีโอดีลดลงเมื่อความเข้มข้นสรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นเพิ่มขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากเมื่อความเข้มข้นของสรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสะสมของสารประกอบอะโรมาติกเอมีมากขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในระบบ ส่งผลให้มีอัตราการบำบัดซีโอดีลดลง และระบบถังโปรยกรองมีอัตราการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 56.3±5.9 158.9±1.8 129.3±13.2 198.1±51.1 227.7±33.5 217.3±51.6 และ 207.8±6.3 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวันตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยอัตราการบำบัดซีโอดีสูงสุดคือ 227 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวันที่

ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 7,747 เอดีเอ็มไอ และมีอัตราการบำบัดซีไอดีต่ำสุดคือ 56.3 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวันที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 508 เอดีเอ็มไอ เนื่องจากซีไอดีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าต่ำจึงทำให้อัตราการบำบัดซีไอดีของระบบถังโปรยกรองต่ำตามไปด้วย



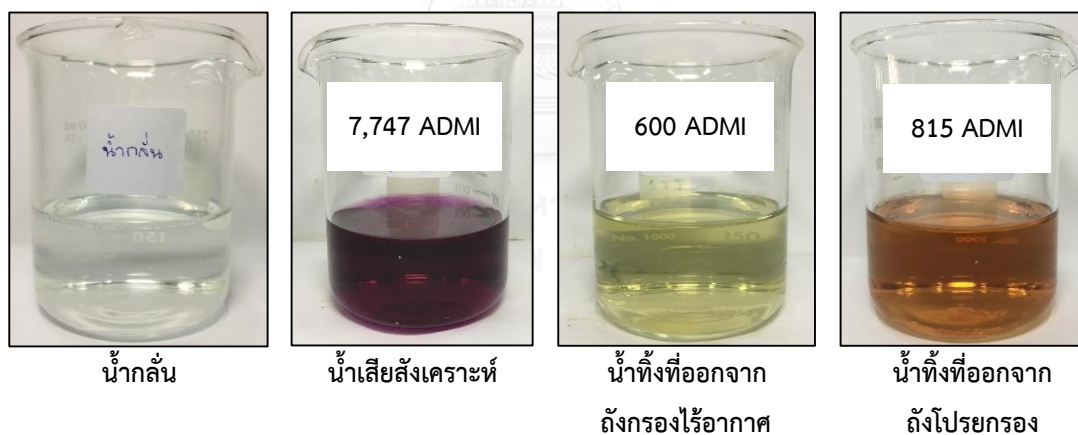
รูปที่ 4.14 อัตราการบำบัดซีไอดีที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นต่างๆ เมื่อผ่านถังกรองไร้อากาศ



รูปที่ 4.15 อัตราการบำบัดซีไอดีที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นต่างๆ เมื่อผ่านถังโปรยกรอง

4.1.6 ลักษณะสีของน้ำทิ้งเมื่อผ่านระบบบำบัดต่างๆ

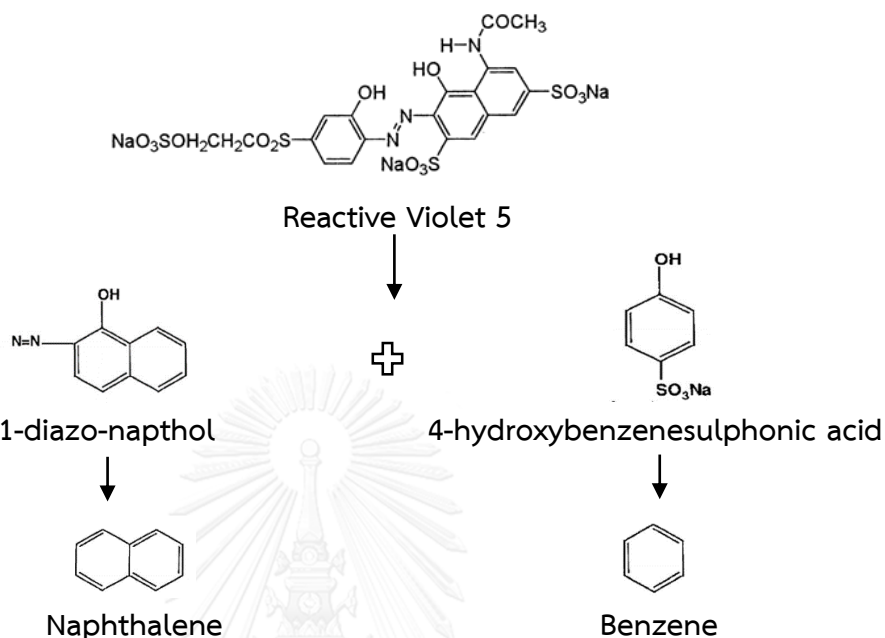
น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นต่างๆ ก่อนเข้าระบบบำบัดถังกรองไร้อากาศ สีของน้ำเสียสังเคราะห์คือ สีม่วง เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศเป็นระยะเวลา 2-4 วัน สีของน้ำทิ้งจะมีสีค่อนข้างเหลือง-เขียว และความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วลดลง หลังจากนั้นเมื่อนำไปบำบัดต่อด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า สีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วเปลี่ยนสีไปจากเดิม โดยเปลี่ยนสีจากสีเหลือง-เขียวเปลี่ยนเป็นสีส้ม-แดง และความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.16 เมื่อสังเกตสีของน้ำเสียสังเคราะห์และสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังโปรยกรอง จะเห็นว่าสีของน้ำทิ้งเปลี่ยนไปจากเดิมและแตกต่างจากสีของน้ำเสียสังเคราะห์อย่างชัดเจน ซึ่งใช้ระยะเวลาเพียง 1 วันก็สามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ นภาจรรย์ แสงสิงห์ (2554) ซึ่งทำการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 10-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและตามด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองสีของน้ำทิ้งเปลี่ยนจากสีเหลือง-เขียวเป็นสีส้ม-แดง



รูปที่ 4.16 ลักษณะสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 7,747 เอดีเอ็มไอ ก่อนการบำบัดและสีน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง

การสลายพันธะอะโซของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายสีคือ สารประกอบอะโรมาติกเอมีน ได้แก่ 1-diazo-naphthol และ 4-hydroxybenzenesulphonic acid และสุดท้ายจะได้เบนซีนและแนพทาลิน (Jain และคณะ, 2012) แสดงดังรูปที่ 4.17 นอกจากนี้ยังพบ aliphatic hydrocarbon ที่มีมวลโมเลกุลต่ำๆ

แอลกอฮอล์ free amides ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ไนโตรเจน (N₂) และธาตุบางตัวก็สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์เปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) ได้



รูปที่ 4.17 โครงสร้างสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดจากการสลายพันธะอะโซภายใต้สภาวะไร้อากาศ

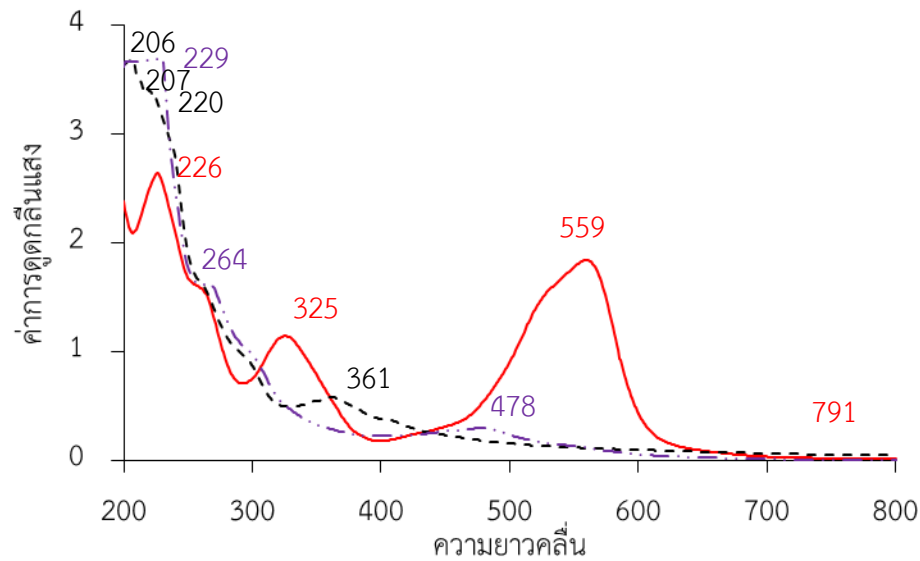
เมื่อนำน้ำทิ้งมาบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบเติมอากาศ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 8 ชั่วโมง น้ำที่อยู่ภายในระบบบำบัดเริ่มกลับมาสีอีกครั้ง โดยสีของน้ำมีสีโทนส้ม-แดง และสีของน้ำจะชัดเจนเมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 1 วัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yasar และคณะ (2012) คือ สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อผ่านการบำบัดในสภาวะไร้อากาศและตามด้วยเติมอากาศพบว่า น้ำทิ้งกลับมาสีใหม่อีกครั้งซึ่งใช้ระยะเวลาที่อยู่ในระบบเพียงแค่ 6 ชั่วโมง การที่สีของน้ำทิ้งกลับมาสีขึ้นมาใหม่อีกครั้งเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน อาจจะทำให้เกิดจากสารประกอบอะโรมาติกเอมีนเหล่านี้ไปสัมผัสกับออกซิเจน จึงทำให้สารประกอบอะโรมาติกเอมีนมีโอกาสที่จะกลับมาจับกันหรือรวมตัวกันใหม่อีกครั้ง เนื่องจาก benzene-base สามารถย่อยสลายให้หายไปได้เพียงบางส่วน ในขณะที่ naphthalene-base ไม่สามารถย่อยสลายให้หายไปได้ เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบเติมอากาศ จากงานวิจัยของ Cinar และคณะ (2008) พบว่า Benzene based และ Naphthalene based ที่เกิดจากการสลายสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 โดย Benzene based สามารถบำบัดได้ 89% และ 92% ที่ 12 และ 24 ชั่วโมง เมื่อผ่านการบำบัดแบบ

เติมอากาศ ในขณะที่ Naphthalene based ไม่สามารถบำบัดให้หายไปได้นอกจากนี้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้น เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ความเข้มข้นสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่สะสมอยู่ในน้ำทิ้งก็มีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้โอกาสที่ทำให้สารประกอบอะโรมาติกเอมีนกลับมาจับกันหรือรวมตัวกันเมื่อผ่านการเติมอากาศก็มีมากขึ้น และสีของน้ำทิ้งก็กลับมาสีใหม่อีกครั้งได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้สีรีแอกทีฟอื่นๆ เช่น สีรีแอกทีฟบลู 13 ซึ่งสีย้อมประเภทนี้มีโครงสร้างเคมีประกอบด้วยพันธะอะโซ 2 พันธะ จากงานวิจัยของ Lin และคณะ (2010) พบว่าในสภาวะไร้อากาศ พันธะโซจำนวน 2 พันธะที่อยู่ในโครงสร้างของสีย้อมจะถูกทำให้แยกแตกออกจากกัน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายพันธะส่วนใหญ่เป็นพวก naphthalene และ aniline เมื่อนำมาบำบัดต่อในสภาวะเติมอากาศพบว่า สารพวก naphthalene จะเปลี่ยนเป็น 2-naphthol และ benzeneacetic acid ส่วน aniline จะเปลี่ยนเป็น phenol และ hexanoic นอกจากนี้ภาจรีย์ แสงสิงห์ (2554) ได้ทำการศึกษาหาประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองพบว่า น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรอง ค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้น และสีของน้ำทิ้งมีสีโทนน้ำเงิน ซึ่งการสลายพันธะอะโซจำนวน 2 พันธะที่อยู่ในโครงสร้างของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 จะได้สารประกอบอะโรมาติกเอมีน 2 ชนิดหลักๆคือ p-amino-benzene-hydroxyethyl-sulfone (p-ABHES) และ 1,2,7-triamino-8-hydroxynaphthalene-3,6-disulfonic acid (TAHNDS) (Libra และคณะ, 2004) เมื่อสารประกอบ TAHNDS สัมผัสกับออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ไรต์กซ์ แล้วกลายเป็นโครมาเจนหรือโมเลกุลที่ไม่มีกลุ่มอะตอมออกซิโครมมาสร้างพันธะ ซึ่งเป็นกลุ่มโมเลกุลที่มีสีปรากฏ

เมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 7,747 เอดีเอ็มไอ และน้ำทิ้งที่ผ่านระบบถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองนำมาวัดค่าดูดกลืนแสงของสารในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต และช่วงคลื่นแสงที่สามารถมองเห็นได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ผลการตรวจวัดพบว่า เมื่อพิจารณาช่วงคลื่นแสงที่สามารถมองเห็นได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบบำบัดซึ่งเห็นเป็นสีม่วงแสดงดังรูปที่ 4.16 มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 559 นาโนเมตร และน้ำทิ้งที่ออกจากระบบถังกรองไร้อากาศซึ่งเห็นเป็นสีเหลือง-เขียว พบว่าที่ช่วงคลื่นแสงที่ตามองเห็นจุด peak ได้หายไป บ่งบอกว่าพันธะอะโซที่อยู่ในโครงสร้างสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่แสดงสีออกมาให้เห็นถูกทำให้แยกแตกออกจากกัน ส่งผลให้สีของน้ำทิ้งที่ออกจากถังกรองไร้อากาศหายไป และน้ำทิ้งที่ออกจากถังโปรยกรองซึ่งเห็นเป็นสีส้ม-แดง

พบว่าในช่วงคลื่นแสงที่ตามองเห็นเกิดจุด peak ใหม่ขึ้นมา 1 peak ที่ความยาวคลื่น 478 แสดงให้เห็นว่า น้ำทิ้งที่มีสีส้ม-แดงที่แสดงออกมาให้เห็นเกิดจากรวมตัวกันหรือการผสมกันของสารประกอบต่างๆ ที่เกิดจากการสลายสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 การที่เห็นสีของน้ำทิ้งเป็นสีส้ม-แดงพบว่า เมื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 478 นาโนเมตร สีที่ถูกดูดกลืนคือ สีโทนน้ำเงินแกมเขียว แต่สีที่แสดงให้เห็นคือ สีโทนส้มแกมแดง ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาว่าสารประกอบที่ทำให้ น้ำทิ้งมีสีส้ม-แดงเมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ นั้นคือสารประเภทใด ซึ่งจากการวิจัยของ Yasar และคณะ (2012) และ Jain และคณะ (2012) พบว่า สารประกอบบอโรมาติกเอมีนที่ได้จากการสลายสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ส่วนใหญ่คือ เบนซีนและแนพทาลีนซึ่งการที่น้ำทิ้งมีสีส้มแดงเมื่อผ่านการเติมอากาศอาจจะเกิดจากสารประกอบเหล่านี้กลับมา รวมตัวกันอีกครั้ง และเมื่อพิจารณาช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบบำบัดมีจุด peak 2 จุดที่ความยาวคลื่นแสง 226 และ 325 ซึ่งคือสาร phenyl และ naphthyl ring ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Jain และคณะ (2012) พบว่าช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตจะเกิดจุด peak 2 จุด ที่ความยาวคลื่น 250 และ 325 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และ น้ำทิ้งที่ออกจากระบบถังกรองไร้อากาศ เมื่อนำมาแสมกนที่ช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต พบว่าความยาวคลื่นเปลี่ยนไปโดยพบจุด peak ที่ความยาวคลื่น 206 207 220 และ 361 นาโนเมตร บ่งบอกถึงเมื่อพันธะอะโซที่อยู่ในโครงสร้างสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ถูกทำให้แตกแยกออกจากกันพบว่า มีสารประกอบเกิดขึ้นจากการสลายสี และเมื่อนำน้ำทิ้งที่ออกจากระบบถังโปรยกรองมาแสมกนที่ช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต พบว่าจุด peak ที่ความยาวคลื่น 206 207 220 และ 361 นาโนเมตรหายไป บ่งบอกถึงสารประกอบเหล่านี้สามารถถูกบำบัดให้หายไปได้ แต่เกิดจุด peak ที่ความยาวคลื่น 229 และ 264 นาโนเมตรขึ้นมาแทน บ่งบอกถึงมีสารประกอบเกิดขึ้นมาใหม่เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองและไม่สามารถย่อยสลายได้ในระบบเติมอากาศ ค่าการดูดกลืนของสารตั้งแต่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตรเมื่อผ่านระบบบำบัดต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.18 นอกจากนี้ สีอะโซประเภทอื่น เช่น สี Disperse Red 1 จากงานวิจัยของ (Franciscon และคณะ, 2015) พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสี Disperse Red 1 เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ค่าการดูดกลืนแสงของคลื่นแสงที่มองเห็นได้ลดลง และเกิดจุด peak จุดใหม่ที่ช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสัมพันธ์กับพันธะอะโซในโครงสร้างสีที่ถูกทำให้แยกแตกออกจากกัน ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นสีลดลง และเกิดสารประกอบบอโรมาติกเอมีนขึ้นมา ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ในสถานะเติมอากาศ



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร ของน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง

- น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบ
- น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยถังกรองไร้อากาศ
- · - · - น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยถังกรองไร้อากาศ-ถังโปรยกรอง

4.1.7 พีเอช

การทดลองนี้ทำการควบคุมพีเอชภายในระบบถังกรองไร้อากาศให้อยู่ในช่วง 7-7.5 เพื่อให้จุลินทรีย์ในระบบมีสถานะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโต โดยใช้โดโทแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตและโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต การทดลองนี้วัดค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบ ภายในระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังโปรยกรอง จากการทดลองพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.57 ± 0.2 เมื่อเติมเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศพบว่า ค่าพีเอชของน้ำเสียที่อยู่ภายในระบบอยู่ในช่วง 7.19 ± 0.02 โดยช่วงวันแรกค่าพีเอชจะลดลงเนื่องจากเกิดกระบวนการสร้างกรดภายในระบบถังกรองไร้อากาศ ส่งผลให้พีเอชในระบบลดต่ำลง และน้ำทิ้งที่ออกจากระบบถังโปรยกรองมีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วง 7.79 ± 0.2 เนื่องจากน้ำทิ้งได้สัมผัสกับออกซิเจนโดยการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังโปรยกรอง

4.1.8 ของแข็งแขวนลอย

การทดลองนี้วัดปริมาณของแข็งแขวนลอยโดยเริ่มวัดตั้งแต่วันที่น้ำเสียสังเคราะห์เต็มเข้าสู่ถังปฏิกิริยา และวันสุดท้ายที่จะออกจากถังปฏิกิริยาพบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยวันแรกภายในถังกรองไร้อากาศที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอเท่ากับ 37 ± 5 51.3 ± 15 26.8 ± 6.7 26.7 ± 4.2 32.7 ± 6.8 37 ± 6.6 และ 54.7 ± 4.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และวันสุดท้ายเท่ากับ 85.8 ± 5.2 105.6 ± 15.2 76.3 ± 8.3 113.2 ± 11.7 80.2 ± 13.2 99.7 ± 7 113.2 ± 11.3 99.7 ± 7 149.1 ± 12 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนปริมาณของแข็งแขวนลอยวันแรกภายในถังโปรยกรองวันแรกที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอดีเอ็มไอเท่ากับ 13.3 ± 1.5 12.3 ± 1.1 9.3 ± 0.9 10.1 ± 1 61.5 ± 6.5 และ 31 ± 9.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และวันสุดท้ายเท่ากับ 132.8 ± 11.2 87.3 ± 19.9 76.3 ± 5.6 89 ± 5.3 113.4 ± 11.3 125.7 ± 20.4 และ 119.6 ± 18.2 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในวันสุดท้ายของทั้งถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับวันที่น้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง เนื่องจากชั้นฟิล์มที่เคลือบอยู่ที่ผิวของตัวกลางในส่วนของตายแล้วหลุดออกจากชั้นตัวกลางจึงส่งผลให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้น

4.2 ผลการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกโตออกซิเดชัน

การทดลองที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกโตออกซิเดชัน ด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ และสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ซึ่งมีโครงสร้างเคมีประกอบด้วยพันธะอะโซ 1 พันธะที่ประกอบด้วยกลุ่มของเบนซีนและแนพทาลีน ทำการทดลองแบบแบทช์ พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอทีเอ็มไอ ค่าซีไอดี พีเอช ของแข็งแขวนลอย

จากผลการทดลองที่ 1 พบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ได้เป็นอย่างดีที่ทุกความเข้มข้นสีได้แก่ 508 1,471 2,771 4,328 7,747 10,800 และ 21,800 เอทีเอ็มไอตามลำดับ และเมื่อนำน้ำทิ้งมาบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า ที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นตั้งแต่ 2,771 – 21,800 เอทีเอ็มไอ ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งกลับเพิ่มสูงขึ้น และสีของน้ำทิ้งกลับมามีสีใหม่อีกครั้งด้วยปฏิกิริยาออกโตออกซิเดชัน ดังนั้นการทดลองที่ 2 จึงเลือกความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่มีความเข้มข้นสีเริ่มต้นจากการทดลองที่ 1 เพียงแค่ 1 ความเข้มข้นคือ 10,800 เอทีเอ็มไอ เนื่องจากเป็นค่าความเข้มข้นของสีที่ย้อมที่ค่อนข้างสูง ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ของน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้น และสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกโตออกซิเดชันได้อย่างชัดเจนเมื่อนำทิ้งผ่านการบำบัดแบบเติมอากาศ

ดังนั้นการทดลองที่ 2 จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกโตออกซิเดชัน โดยนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10,800 เอทีเอ็มไอ มาบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ เพื่อบำบัดสีให้หายไป หลังจากนั้นน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วมาบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองเพื่อบำบัดค่าซีไอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้ง และสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดขึ้นจากการสลายสีให้หายไป และยังพบว่าสีของน้ำทิ้งเปลี่ยนไปจากเดิมเมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรอง ดังนั้นจึงนำน้ำทิ้งที่เกิดสีขึ้นมาใหม่อีกครั้งกลับมาบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ โดยเติมน้ำตาลทรายขาวลงไปเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์ และควบคุมซีไอดีในน้ำทิ้งที่เกิดสีขึ้นมาใหม่มีค่าซีไอดีเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 2 รวมทั้งสิ้นคือ 30 วัน

4.2.1 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

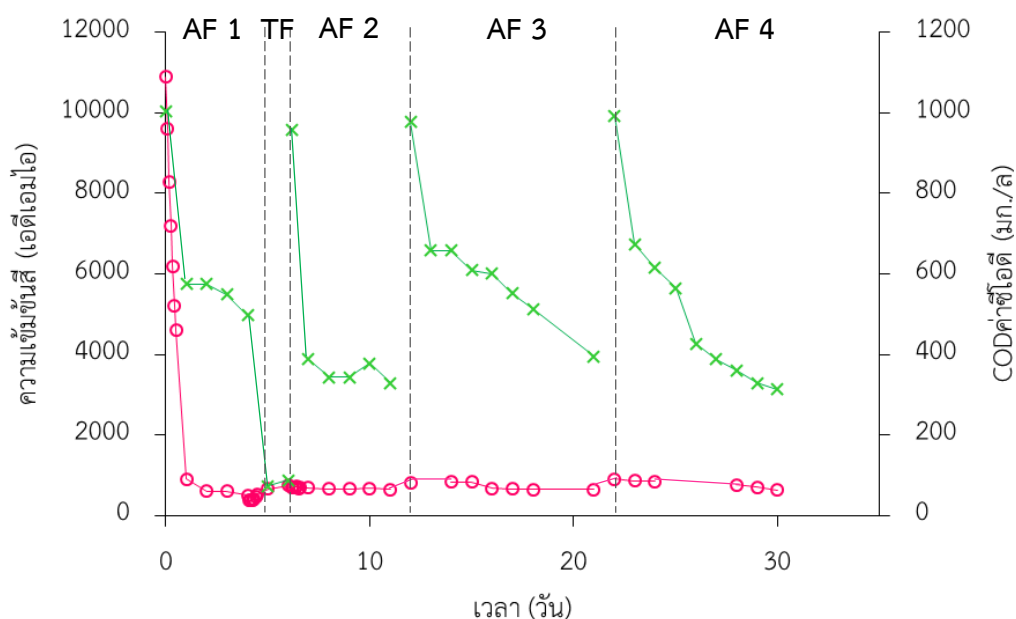
น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 10,900 เอตีเอ็มไอ และควบคุมความเข้มข้นน้ำตาลทรายขาวเท่ากับ 1,002.8 มิลลิกรัม ซีโอดีต่อลิตร เติมน้ำแอมโมเนียมคลอไรด์ และโดฟแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตให้อยู่ในอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 150:5:1 และเติมธาตุอาหารเสริมอื่นๆ ทำการควบคุมพีเอชภายในถังกรองไร้อากาศให้อยู่ในช่วง 7-7.5 โดยใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์

4.2.2 ค่าความเข้มข้นสี

เมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 10,900 เอตีเอ็มไอ มาบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ ผลการทดลองพบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ได้เป็นอย่างดี โดยสามารถบำบัดสีให้ลดลงเหลือเพียง 500 เอตีเอ็มไอ ซึ่งมีระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดเท่ากับ 4 วัน และระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ให้หายไปได้ หลังจากนั้นนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศมาบำบัดต่อด้วยระบบถังโปรยกรอง เพื่อบำบัดค่าซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งและสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดขึ้นจากการสลายสี ผลการทดลองพบว่า น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองมีสีเกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้นจาก 500 เป็น 784 เอตีเอ็มไอ คิดเป็น 33.2% ซึ่งใช้ระยะเวลาเพียง 2 วัน เท่านั้นก็สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำทิ้งได้อย่างชัดเจน

ดังนั้นจึงนำน้ำทิ้งที่เกิดสีขึ้นมาใหม่กลับมาบำบัดต่อด้วยระบบถังกรองไร้อากาศอีกครั้ง เพื่อทำการสลายสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ให้ลดลงจากเดิมหรือทำให้สีหายไป โดยเติมน้ำตาลทรายขาวลงไป และควบคุมความเข้มข้นซีโอดีในน้ำทิ้งที่เกิดสีขึ้นมาใหม่ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งลดลงจาก 748 เหลือ 640 เอตีเอ็มไอ คิดเป็น 5.9% และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดเท่ากับ 5 วัน จะเห็นว่าระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ให้มีค่าความเข้มข้นสีลดลงจากเดิมได้น้อยมาก หรือไม่สามารถบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ได้เลย ดังนั้นจึงเติมน้ำตาลทรายขาวเพิ่มลงไปอีก เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์ โดยควบคุมความเข้มข้นซีโอดีในน้ำทิ้งเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร เป็นจำนวนอีก 2 ครั้ง ผลการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งลดลงจาก 640 เป็น 635 เอตีเอ็มไอ และลดจาก 635 เป็น 632 เอตีเอ็มไอ โดยระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดเมื่อเติมน้ำตาลทรายขาวเพิ่มลงไปอีกจำนวน 2 ครั้ง เท่ากับ 19 วัน แสดงให้เห็นว่า เมื่อเติมน้ำตาลทรายขาวเพิ่มลง

ไปเป็นจำนวนทั้งหมด 3 ครั้ง ระบบถังกรองไร้อากาศไม่สามารถบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่นี้ให้หายไปได้ และค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นมาใหม่ลดลงน้อยมาก หรือเกือบไม่ลดลงเลย แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไอโวลต์ 5 และสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ และค่าซีไอดีเทียบกับเวลา เมื่อผ่านระบบบำบัดถังกรองไร้อากาศ (AF) และถังโปรยกรอง (TF)

○ : ความเข้มข้นสี (เอ็ดไอเอ็มไอ) × : ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)

การทดลองที่ 2 จะเลือกวัดค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอ็ดไอเอ็มไอ เนื่องจากการวัดความเข้มข้นสีหน่วยเอ็ดไอเอ็มไอ เป็นการตรวจวัดปริมาณสีในทุกหน่วยสี ไม่เน้นสีใดสีหนึ่ง โดยวัดค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแตนซ์ ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร โดยวัดความยาวคลื่นทุกๆ 10 นาโนเมตร ดังนั้นการวัดค่าความเข้มข้นสีหน่วยเอ็ดไอเอ็มไอจึงมีความน่าเชื่อถือ ด้วยเหตุนี้จึงเลือกนำเสนอผลการทดลองหน่วยสีเอ็ดไอเอ็มไอ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่

นอกจากนี้การวัดความเข้มข้นสีหน่วยเอ็ดไอเอ็มไอด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ก่อนวัดตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไอโวลต์ 5 10,800 เอ็ดไอเอ็มไอ ต้องเจือจางตัวอย่างน้ำเสียก่อนวัดความเข้มข้นสี โดยเจือจางตัวอย่างน้ำเสียเท่ากับ 100 เท่า

4.2.3 ค่าซีโอดี

ระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดซีโอดีที่มีน้ำตาลทรายขาวความเข้มข้นเริ่มต้น 1,002.8 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรให้ลดลงเหลือ 497 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดเท่ากับ 4 วัน และระบบถังโปรยกรองสามารถบำบัดซีโอดีให้ลดลงอีกเหลือเพียง 87.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใช้ระยะเวลาเพียง 2 วันเท่านั้น หลังจากนั้นนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองกลับมาบำบัดต่อด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ เพื่อบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ โดยเติมน้ำตาลทรายขาวลงไปและควบคุมความเข้มข้นซีโอดีให้มีค่าเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรทุกครั้ง ผลการทดลองพบว่า ต้องเติมน้ำตาลทรายขาวเพิ่มลงไปเป็นจำนวนทั้งหมด 3 ครั้งเพื่อบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และระบบถังกรองไร้อากาศสามารถบำบัดซีโอดีให้ลดลงเหลือ 329.395 และ 312 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ รวมระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดทั้งหมด 24 วัน จะเห็นว่าระบบถังโปรยกรองสามารถบำบัดซีโอดีให้ผ่านค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมได้ คือ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ระบบถังกรองไร้อากาศไม่สามารถบำบัดให้ผ่านมาตรฐานได้แสดงดังรูปที่ 4.19

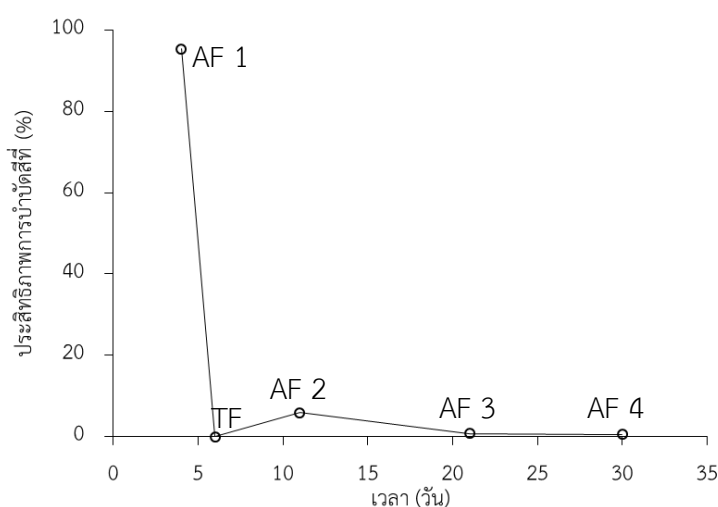
4.2.4 ประสิทธิภาพการบำบัด

การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่และซีโอดี คิดจากการนำค่าความเข้มข้นสีและซีโอดีเริ่มต้นก่อนเข้าระบบบำบัด และค่าความเข้มข้นสีและซีโอดีที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งเมื่อผ่านการบำบัดแล้วมาคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดสีดังสมการที่ 4.1 และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีดังสมการที่ 4.2 โดยประสิทธิภาพการบำบัดสีจะคิดในหน่วยเอตีเอ็มไอ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และในงานวิจัยนี้ทำการหาประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันและซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศ และระบบถังโปรยกรอง ดังต่อไปนี้

4.2.4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสี

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟไอโอไลต์ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10,900 เอตีเอ็มไอ พบว่าระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดสีเท่ากับ 91.2% และเมื่อผ่านการบำบัดต่อด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า ระบบถังโปรยกรองไม่สามารถบำบัดสีได้ แต่กลับทำให้น้ำทิ้งกลับมาเกิดสีขึ้นมาใหม่อีกครั้ง และค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้น คิดเป็น 33.2% แต่เมื่อนำกลับไปบำบัดต่อด้วยระบบถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 2 โดยเติมน้ำตาลทรายขาวลงไป และควบคุมความเข้มข้นซีโอดีของน้ำทิ้งให้เท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่เท่ากับ 5.9% ซึ่งน้อยมาก จึงเติมน้ำตาลทรายขาวลงไปเพิ่ม

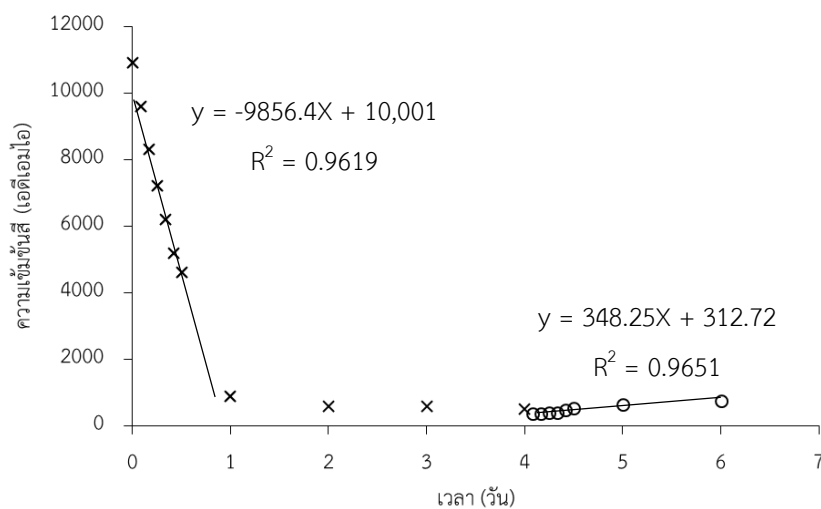
อีกจำนวน 2 ครั้ง และพบว่าระบบถังกรองไร้อากาศมีประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ครั้งที่ 3 และ 4 เท่ากับ 0.8% และ 0.5% ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดสีน้อยมากหรือไม่สามารถบำบัดได้เลย เนื่องจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองทำให้ค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้น และน้ำทิ้งกลับมามีสีใหม่อีกครั้ง การที่ระบบถังกรองไร้อากาศไม่สามารถบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ได้สันนิษฐานว่า สีที่เกิดขึ้นมาใหม่นี้อาจจะไม่ได้จับกันด้วยพันธะอะโซอิกอีกครั้ง ดังนั้น ประสิทธิภาพการบำบัดสีรวมทั้งหมดเท่ากับ 88.9% ซึ่งสามารถสรุปประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟไอโอเล็ต 5 และสีที่เกิดขึ้นมาใหม่แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟไอโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10,800 เอดีเอ็มไอ และสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ด้วยถังกรองไร้อากาศ (AF) และถังโปรยกรอง (TF)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

อัตราการบำบัดสีของระบบถังกรองไร้อากาศและอัตราการเกิดสีใหม่จากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชันของระบบถังโปรยกรอง สามารถหาได้จาก Linear Regression เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสีที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาแสดงดังรูปที่ 4.21 จากการทดลองพบว่าระบบถังกรองไร้อากาศมีอัตราการบำบัดสีครั้งที่ 1 2 3 และ 4 เท่ากับ 9856.4 1.1 0.0 และ 0.0 เอดีเอ็มไอต่อวัน ส่วนน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า มีอัตราการเกิดสีขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชันเท่ากับ 348.3 เอดีเอ็มไอต่อวัน

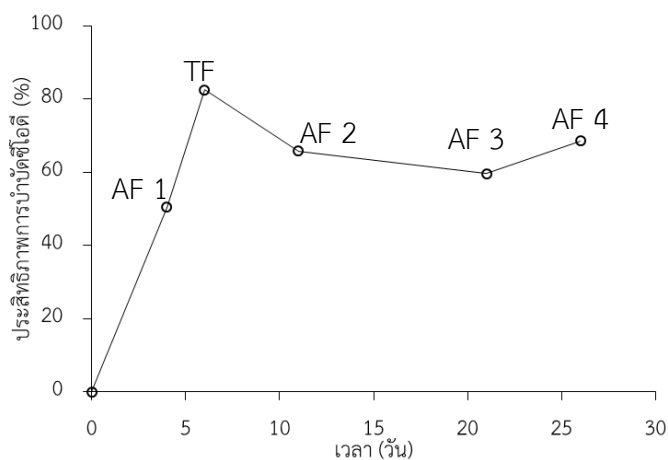


รูปที่ 4.21 อัตราการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10,900 เอตีเอ็มไอ ของฝักรองไร่อากาศ และอัตราการเกิดสีใหม่ของฝักรอง
 x : ฝักรองไร่อากาศ o : ฝักรอง

4.2.4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

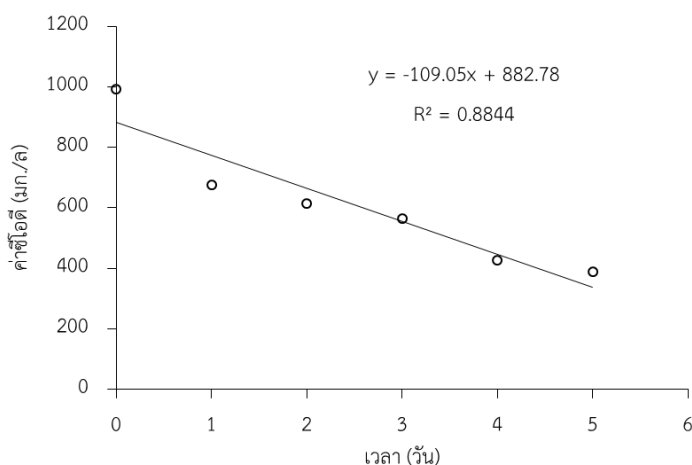
ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของระบบฝักรองไร่อากาศและระบบฝักรองที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 10,900 เอตีเอ็มไอ โดยน้ำเสียสังเคราะห์ ก่อนเข้าระบบฝักรองไร่อากาศมีความเข้มข้นของน้ำตาลทรายขาว 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร

จากการทดลองพบว่า ระบบฝักรองไร่อากาศครั้งที่ 1 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 50.4% และระบบฝักรองมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 82.5% หลังจากนั้นเติมน้ำตาลทรายขาวลงไปให้น้ำทิ้งให้มีความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทุกครั้งก่อนเข้าระบบฝักรองไร่อากาศ ผลการทดลองพบว่า ต้องเติมน้ำตาลทรายขาวเพิ่มลงไปเป็นจำนวนทั้งหมด 3 ครั้ง พบว่าระบบฝักรองไร่อากาศครั้งที่ 2 3 และ 4 มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 65.7% 59.5% และ 68.5% ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของถังกรองไร้อากาศ (AF) และถังโปรยกรอง (TF)

สำหรับอัตราการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังโปรยกรอง สามารถหาได้จาก Linear Regression เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นซีโอดีที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา ยกตัวอย่างเช่น การหาอัตราการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เท่ากับ 10,900 เอดีเอ็มไอของระบบถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 อัตราการบำบัดซีโอดีที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 10,900 เอดีเอ็มไอของถังกรองไร้อากาศ

จากการทดลองพบว่า ระบบถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 1 2 3 และ 4 มีอัตราการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 219.6 308 80.3 109.1 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน โดยอัตราการบำบัดซีโอดีของถังกรองไร้อากาศทั้ง 4 ครั้งค่อนข้างไม่คงที่ และเมื่อพิจารณาอัตราการบำบัดซีโอดีของระบบถังโปรยกรองพบว่า ถังโปรยกรองมีอัตราการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 424.7 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ซึ่งสูงกว่าอัตราการบำบัดซีโอดีของระบบถังกรองไร้อากาศ

4.2.5 ลักษณะสีของน้ำทิ้งเมื่อผ่านระบบบำบัดต่างๆ

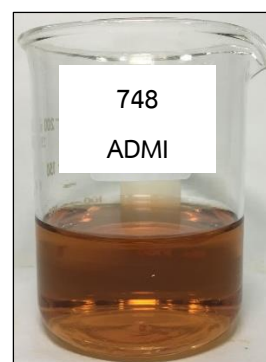
สีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 10,900 เอดีเอมไอก่อนเข้าระบบบำบัดคือ สีม่วง เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศเป็นเวลา 4 วัน พบว่าสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วมีสีค่อนข้างเหลือง-เขียว และเมื่อนำไปบำบัดต่อด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า น้ำทิ้งเปลี่ยนสีจากสีเหลือง-เขียวเป็นสีส้ม-แดง เพียงแค่ 1 วันก็สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำทิ้งได้อย่างชัดเจน ซึ่งสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วแตกต่างจากน้ำเสียสังเคราะห์จากตอนแรกอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นจึงนำน้ำทิ้งที่มีสีส้ม-แดงกลับมาบำบัดต่อด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ เพื่อบำบัดสีของน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้ให้หายไปหรือจางไปจากเดิม โดยเติมน้ำตาลทรายขาวลงไปใต้น้ำทิ้งและควบคุมซีโอดีของน้ำทิ้งเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตรเป็นจำนวนอีก 3 ครั้ง พบว่าระบบถังกรองไร้อากาศไม่สามารถบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ให้หายไปหรือจางไปจากเดิมได้ โดยสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศแล้วทั้ง 3 ครั้งพบว่า สีของน้ำทิ้งยังคงมีโทนสีแดงคือ สีส้ม-แดง แสดงดังรูปที่ 4.24 รวมระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในระบบถังกรองไร้อากาศทั้งสิ้น 24 วัน



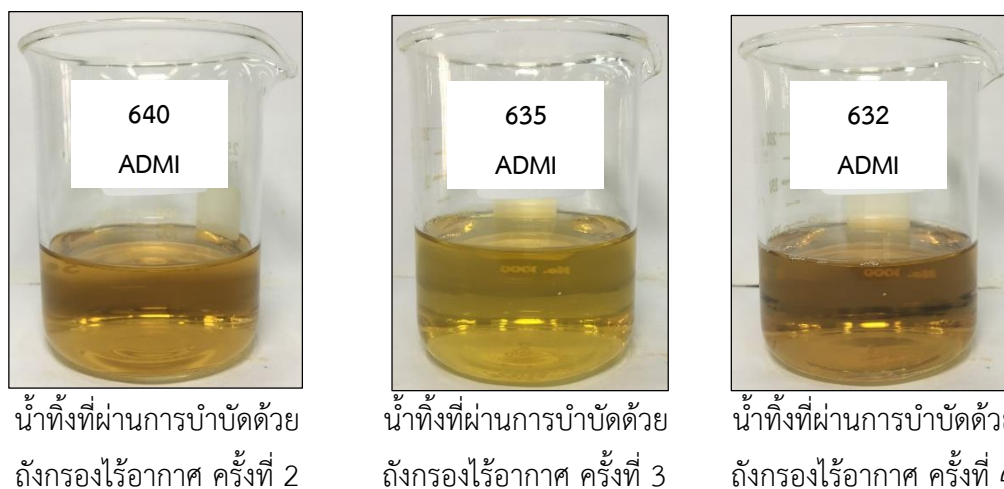
น้ำเสียสังเคราะห์



น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วย
ถังกรองไร้อากาศ ครั้งที่ 1



น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วย
ถังโปรยกรอง ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.24 ลักษณะสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีรีแอกทีฟไอโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 10,900 เอดีเอมไอ และสีน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง

การที่น้ำทิ้งเกิดสีขึ้นมาใหม่จากปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อผ่านการบำบัดแบบเติมอากาศและไม่สามารถบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่นี้ให้หายไปจากเดิมได้ด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ แสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศไม่สามารถบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ให้หายไปได้ ซึ่งการที่สีหายไปเกิดจากพันธะอะโซที่อยู่ในโครงสร้างของสีรีแอกทีฟไอโอเล็ต 5 จำนวน 1 พันธะประกอบด้วยกลุ่มของเบนซีนและแนพทาลีนถูกทำให้แตกแยกออกจากกันในสภาวะไร้อากาศ ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นสีลดลงจากปฏิกิริยารีดักชัน โดยเอนไซม์อะโซรีดักเทส จะไปทำให้พันธะอะโซแตกออกจากกันเกิดเป็นสารประกอบ 2 ชนิด ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบพวกเบนซีนและแนพทาลีน (Fetyan และคณะ, 2013) การที่น้ำทิ้งเมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบแบบเติมอากาศนั้นมีสีโทนส้ม-แดง อาจเกิดจากสารประกอบอะโรมาติกเอมีนกลับมารวมตัวอีกครั้งหนึ่ง ส่งผลให้น้ำกลับมามีสีใหม่ แต่สารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดจากการสลายสีบางชนิดสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะเติมอากาศ (van der Zee และ Villaverde, 2005) และสารประกอบพวกเบนซีนสามารถถูกย่อยสลายได้เพียงบางส่วน ในขณะที่แนพทาลีนไม่สามารถย่อยสลายได้ (Yasar และคณะ, 2012) และสารประกอบเหล่านี้ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะไร้อากาศ ส่งผลให้น้ำทิ้งที่กลับมาสีใหม่ไม่สามารถบำบัดให้หายไปได้ในสภาวะไร้อากาศ

นอกจากนี้ สีย้อมอะโซชนิดอื่นๆ เช่น สี Remazol Yellow RR เมื่อผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศและตามด้วยแบบเติมอากาศ และนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วไปทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี HPLC (High Performance Liquid Chromatography) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียที่มีสี Remazol Yellow RR ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรก่อนเข้าระบบบำบัดและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศพบว่า จุด peak หายไปจากเดิม แสดงให้เห็นว่าพันธะอะโซของสี Remazol Yellow RR ถูกทำให้แตกแยกออกจากกัน นั่นหมายถึงสี Remazol Yellow RR ถูกบำบัดให้หายไป แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศและแบบเติมอากาศพบว่า จุด peak เดิมหายไป แต่จุด peak ที่เวลา 3 นาทียังคงอยู่และเพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิม นั่นหมายถึงสารประกอบอะโรมาติกเอมีนที่เกิดขึ้นจากการสลายสีสามารถถูกย่อยสลายได้เพียงบางส่วน และบางส่วนไม่สามารถย่อยสลายได้ นอกจากนี้เมื่อนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศมาทำการบำบัดต่อแบบเติมอากาศพบว่า สีของน้ำทิ้งเปลี่ยนจากไม่มีสีเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้มอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และไม่สามารถบำบัดให้หายไปได้ด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบเติมอากาศ การที่น้ำทิ้งกลับมาไม่มีสีใหม่นี้ไม่ได้หมายความว่าการศึกษาว่าเป็นสารประเภทใด และโครงสร้างสีที่เกิดขึ้นเป็นแบบใด (Jonstrup และคณะ, 2011) และจากงานวิจัยของ Libra และคณะ (2004) พบว่า สีย้อมรีแอกทีฟแบบสี 5 เมื่อผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศและเติมอากาศพบว่า น้ำทิ้งจะกลับมาไม่มีสีอีกครั้งอย่างรวดเร็ว และไม่สามารถบำบัดให้หายไปได้ด้วยกระบวนการบำบัดแบบเติมอากาศ

4.2.6 พีเอช

การทดลองนี้ทำการควบคุมพีเอชภายในระบบถังกรองไร้อากาศให้อยู่ในช่วง 7-7.5 โดยใช้ไดโพลแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตและโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยการทดลองนี้วัดค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบ น้ำเสียภายในระบบถังกรองไร้อากาศ และน้ำทิ้งที่ออกจากระบบถังกรอง จากการทดลองพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเข้าระบบบำบัดมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.14 เมื่อนำมาเติมเข้าสู่ถังกรองไร้อากาศพบว่า มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.13 ± 0.1 โดยในช่วงวันแรกน้ำเสียที่อยู่ในระบบค่าพีเอชจะลดลง เนื่องจากเกิดกระบวนการสร้างกรดภายในระบบถังกรองไร้อากาศ ส่งผลให้พีเอชในระบบลดต่ำลง และน้ำทิ้งที่ออกจากระบบถังกรองมีค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 8 ± 0.1 เนื่องจากน้ำทิ้งได้สัมผัสกับออกซิเจนโดยการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังกรอง และเมื่อนำน้ำทิ้งที่เกิดสีขึ้นมาใหม่กลับไปบำบัดต่อด้วยระบบถังกรองไร้อากาศพบว่า มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.14 ± 0.1

4.2.7 ค่าของแข็งแขวนลอย

การทดลองนี้ทำการวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในระบบบำบัดถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรอง โดยเริ่มวัดตั้งแต่วันที่น้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในระบบบำบัด และวันสุดท้ายที่จะออกจากระบบบำบัดของถังถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองพบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยวันแรกภายในถังกรองไร้อากาศเท่ากับ 25 ± 1.4 มิลลิกรัมต่อลิตร และวันสุดท้ายเท่ากับ 135 ± 21.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนปริมาณของแข็งของลอยภายในถังโปรยกรองพบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยในวันแรกเท่ากับ 37.3 ± 0.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และวันสุดท้ายเท่ากับ 122 ± 2.8 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อนำน้ำทิ้งที่มีสีเกิดขึ้นมาใหม่กลับไปบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศพบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยวันแรกเท่ากับ 103 ± 9.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และวันสุดท้ายเท่ากับ 178.4 ± 2.2 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในวันสุดท้ายของทั้งระบบถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับวันที่น้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ถังกรองไร้อากาศและน้ำทิ้งที่เข้าสู่ถังโปรยกรอง เนื่องจากชั้นฟิล์มที่ตายแล้วหลุดออกจากชั้นตัวกลางจึงส่งผลให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งเพิ่มสูงขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้น 508 – 21,800 เอดีเอ็มไอ ซึ่งมีซีไอดีเท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของระบบถังกรองไร้อากาศใกล้เคียงกันเท่ากับ $93 \pm 1.6\%$ และ ประสิทธิภาพการบำบัดสีของระบบถังกรองไร้อากาศแล้วตามด้วยระบบถังโปรยกรองมีประสิทธิภาพการบำบัดสีใกล้เคียงเท่ากับ $90.8 \pm 0.7\%$

2. สีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 508 และ 1,471 เอดีเอ็มไอ เมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ น้ำทิ้งมีความเข้มข้นสีเท่ากับ 72 และ 113 เอดีเอ็มไอ เมื่อนำไปบำบัดต่อด้วยระบบถังโปรยกรอง ค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 2,771-21,800 เอดีเอ็มไอ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ มีค่าความเข้มข้นสีตั้งแต่ 175 เอดีเอ็มไอเป็นต้นไป เมื่อนำไปบำบัดต่อด้วยระบบถังโปรยกรองพบว่า ค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น $134.1 \pm 11\%$ เนื่องจากน้ำทิ้งกลับมาสีใหม่อีกครั้ง

3. อัตราการบำบัดสีของระบบถังกรองไร้อากาศมีค่าตั้งแต่ 678.7 ± 21.1 ถึง $20,636.3 \pm 69.31$ เอดีเอ็มไอต่อวัน ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.861 ± 0.04 ต่อวัน

4. อัตราการเกิดสีใหม่ของสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 2,771 – 21,800 เอดีเอ็มไอมีค่าตั้งแต่ 30.65 ± 14.8 ถึง 204.41 ± 40.3 เอดีเอ็มไอต่อวัน และจาก Modified monod equation จะได้ $y = \frac{(334.09 \pm 55.46)(X-173)}{(229.23 \pm 117.92) + (X-173)}$ ซึ่งมีค่า k_m เท่ากับ 334 ± 55.46 เอดีเอ็มไอต่อวัน ค่า K_s เท่ากับ 229 ± 117.92 เอดีเอ็มไอ และมีค่าจุดตัดแกน x เท่ากับ 173 เอดีเอ็มไอ ซึ่งประมาณได้ว่า ค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่ต่ำกว่า 173 เอดีเอ็มไอ เมื่อนำมาบำบัดต่อด้วยระบบถังโปรยกรองแล้วไม่น่าจะทำให้น้ำทิ้งกลับมาสีใหม่อีกครั้ง

5. ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่กลับมาสีใหม่เมื่อนำกลับมาบำบัดต่อด้วยระบบถังกรองไร้อากาศ ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งลดลงเพียง 2.4% ซึ่งน้อยมาก และสีของน้ำทิ้งยังคงเป็นสีโทนเดิมคือ สีส้ม-แดง

6. ซีไอดีถูกบำบัดได้ทั้งระบบถังกรองไร้อากาศและระบบถังโปรยกรอง และระบบถังกรองไร้อากาศมีอัตราการบำบัดซีไอดีเท่ากับ 201.6 ± 24.1 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และระบบถังโปรยกรองมีอัตราการบำบัดซีไอดีเท่ากับ 170 ± 19.8 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน

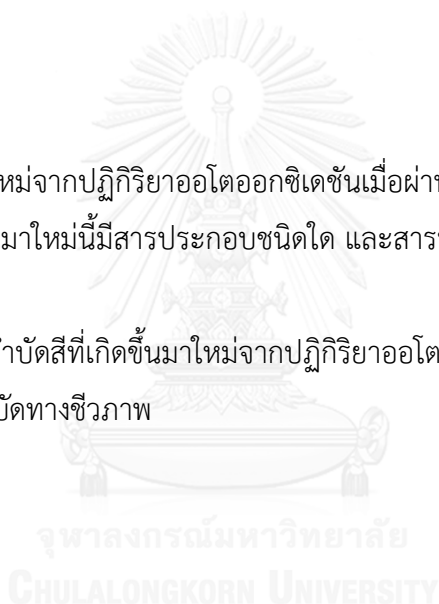
7. สีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชันไม่สามารถบำบัดให้หายไปหรือลดลงไปจากเดิมได้ด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

จากค่าจลนพลศาสตร์ของสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชันพบว่า ความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งที่ต่ำกว่า 173 เอดีเอ็มไอ ไม่น่าจะทำให้เกิดสีขึ้นมาใหม่อีกครั้ง หากนำไปประยุกต์ใช้งานจริง จึงแนะนำว่าควรควบคุมค่าความเข้มข้นสีของน้ำทิ้งให้ต่ำกว่า 173 เอดีเอ็มไอ ซึ่งผ่านมาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดให้มีค่าสีไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. สีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชันเมื่อผ่านการบำบัดด้วยระบบถังโปรยกรอง ควรศึกษาต่อว่าสีที่เกิดขึ้นมาใหม่นี้มีสารประกอบชนิดใด และสารประกอบใดที่ทำให้น้ำทิ้งกลับมาสีขึ้นมาใหม่อีกครั้ง
2. ศึกษาวิธีการบำบัดสีที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาอโตออกซิเดชันด้วยกระบวนการบำบัดอื่นๆแทนกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ



รายการอ้างอิง

- Allen W., Prescott W.B., Derby R.E., Garland C.E., Peter J.M. and Saltzman M.
Determination of color of water and wastewater by means of ADMI color values. 661-675. 1973.
- Cinar O., Yaasar S., Kertmen M., Demiroz K., Yigit O. N. and Kitis M. (2008). Effect of cycle time on biodegradation of azo dye in sequencing batch reactor. process safety and environment protection **86**: 455-460.
- Farabegoli G., Chiavola A., Rolle E. and Naso M. (2010). Decolorization of Reactive Red 195 by a mixed culture in an alternating anaerobic-aerobic Sequencing Batch Reactor. Biochemical Engineering Journal **52**: 220-226.
- Ferrero F. (2000). Oxidative degradation of dyes and surfactant in the Fenton and photo-Fenton treatment of dye house effluents. Coloration Technology **116(5-6)**: 148-153.
- Fersi C. and Dhahbi M. (2008). Treatment of textile plant effluent by ultrafiltration and/or nanofiltration for water reuse. Desalination **222**: 263-271.
- Fetyan, A. H. N., M. S. M. Ali and M. L. Brea (2013). biodegradation of a textile Mono Azo Dy; RV5. Life Science Journal **10**: 397-403.
- Foo K.Y. and Hameed B.H. (2010). Decontamination of textile wastewater via TiO₂/activated carbon composite materials. Advances in Colloid and Interface Science **159**: 130-143.
- Franciscon, E., D. Mendonça, S. Seber, D. A. Morales, G. J. Zocolo, M. B. Zanoni, M. J.

Grossman, L. R. Durrant, H. S. Freeman and G. A. Umbuzeiro (2015). Potential of a bacterial consortium to degrade azo dye Disperse Red 1 in a pilot scale anaerobic–aerobic reactor. Process Biochemistry **50**(5): 816-825.

Grady L., Daigger G. T. and Lim H. C. (1999). Biological Wastewater Treatment. Revised and Expanded. New Year, Marcel Dekker.

Hai F. I., Yamamoto K. and Fukushi K. (2007). Hybrid treatment systems for dye wastewater. Critical Reviews in Environmental Science and Technology **37**: 315-377.

Isik M. and Sponza D. T. (2007). Fate and toxicity of azo dye metabolites under batch long-term anaerobic incubations. ScienceDirect **40**: 934-939.

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

Jefferson., Burgess J. E., Picon A. and J. S. J. Harkness. (2001). Nutrient addition to enhance biological treatment of greywater. Water Sciences **35(11)**: 2702-2710.

Jonstrup M., Kumar N. and Mattiasson B. (2011). Sequential anaerobic–aerobic treatment of azo dyes: Decolourisation and amine degradability. Desalination **280**: 339-346.

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

Kapdan K. I. and Ozturk R. (2005). Effect of operating parameters on color and COD

removal performance of SBR: Sludge age and initial dyestuff concentration. J Hazard Mater: 217-222.

Karatas, M., S. Dursun and E. M. Argun (2009). Decolorization of reactive dyes under batch anaerobic condition by mixed microbial culture. African Journal of Biotechnology **8** (24): 6856-6862.

Koupaie, E. H., M. R. Moghaddam and S. H. Hashemi (2011). Post-treatment of anaerobically degraded azo dye Acid Red 18 using aerobic moving bed biofilm process: enhanced removal of aromatic amines. J Hazard Mater **195**: 147-154.

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

Lin, J., X. Zhang, Z. Li and L. Lei (2010). Biodegradation of Reactive blue 13 in a two-stage anaerobic/aerobic fluidized beds system with a *Pseudomonas* sp. isolate. Bioresour Technol **101**(1): 34-40.

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

Merzouk B., Madani K. and Sekki A. (2010). Using electrocoagulation-electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater, two case studies. Desalination **250**: 573-577.

Metcalf & Eddy. (1991). Wastewater engineering treatment and reuse. Boston, McGraw-Hill.

- Morawwski B., Quan S. and Arnold F. H. (2000). Functional Expression and Stabilization of Horseradish Peroxidase by Directed Evolution in *Saccharomyces cerevisiae*. Biotechnol Bioengineering **76(99)**.
- Murali V., Ong S. A., Ho L. N. and Wong Y. S. (2013). Decolorization of methyl orange using upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor—An investigation of co-substrate and dye degradation kinetics. Taylor & Francis **51**: 7621-7630.
- O'Neill C., Hawkes F.R., Hawkes D.L., Lourenco N.D., Pinheiro H.M. and Delee W. (1999). Colour in textile effluents – sources, measurement, discharge consents and simulation: a review. Journal of Chemical Technology & Biotechnology **74(1009-1018)**.
- Pala A. and Enis T. (2002). Color removal from cotton textile industry wastewater in an activated sludge system with various additives. Water Research **36**: 2920-2925.
- Patel H. and Vashi R.T. (2010). Treatment of textile wastewater by adsorption and coagulation. E-Journal of Chemistry **7(4)**: 1468-1476.
- Rein M. (2001). Advanced oxidation processes-current status and prospects, proc.estonian acad. Science Chemistry **50(59-80)**.
- Sheth N. and Dave S. (2010). Enhanced biodegradation of Reactive Violet 5R manufacturing wastewater using down flow fixed film bioreactor. Bioresour Technol: 8627–8631.
- Supaka, N., K. Juntongjin, S. Damronglerd, M. Delia and P. Strehaiano (2004). Microbial decolorization of reactive azo dyes in a sequential anaerobic–aerobic system. Chemical Engineering Journal **99(2)**: 169-176.

- van der Zee F. P. and Villaverde S. (2005). Combined anaerobic–aerobic treatment of azo dyes—A short review of bioreactor studies. Water Research **39**: 1425–1440.
- Venkatesh, S., A. R. Quaff, N. D. Pandey and K. Venkatesh (2015). Impact of Ozonation on Decolorization and Mineralization of Azo Dyes: Biodegradability Enhancement, By-Products Formation, Required Energy and Cost. Ozone: Science & Engineering **37**(5): 420-430.
- Verma A. K., Dash R. R. and Bhunia P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. Journal of Environmental Management **93**: 154-168.
- Wijetunga S., Li X. F. and Jian C. (2010). Effect of organic load on decolourization of textile wastewater containing acid dyes in upflow anaerobic sludge blanket reactor. J Hazard Mater **177**: 792-798.
- Yasar S., Cirik K. and Cinar O. (2012). The effect of cyclic anaerobic–aerobic conditions on biodegradation of azo dyes. Bioprocess Biosyst **35**: 449-457.
- Yu J., Wang X. and Yue L. P. (2001). Optimal Decolorization and Kinetic Modeling of Synthetic Dyes by *Pseudomonas* strains. Pergamon **35**: 3579–3586.
- กรมควบคุมมลพิษ (2548). แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพมหานคร. .
- กรมควบคุมมลพิษ. (2559). กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2559/E/129/17.PDF>.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2556). คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ.

กรุงเทพมหานคร.

- นภาจรรย์ แสงสิงห์. (2556). ประสิทธิภาพการบำบัดสีทางชีวภาพโดยระบบไร้อากาศ-เติมอากาศต่อความเข้มข้นและชนิดของสีอะโซ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บัญชา บุญอนันต์วงศ์. (2554). การส่งเสริมการย่อยสลายของสีรีแอกทีฟไดอะโซ โดยระบบฟิล์มชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุษรา ประชุมญาติ. (2545). การกำจัดสีรีแอกทีฟหมู่อะโซด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พงษ์ชว ขาวอินทร์. (2555). การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดฟันทูสภาพได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มันลิน (ต้นทุลเวศม์, 2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1,2. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. CHULALONGKORN UNIVERSITY
- ศุภบุศย์ ดำรงค์กิจการ. (2556). การประยุกต์ใช้ระบบไฮบริดไฮโดรไลซิสโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีรณัฐ บุญรุ่ง. การกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยกระบวนการเฟนตันและกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วิศวกรรมสาร 10-16. 2553.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก
รายการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข-1 ตัวอย่างการคำนวณค่าซีไอดี

การคำนวณความเข้มข้นเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

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

การคำนวณค่าซีไอดี

$$\text{ค่าซีไอดี} = \frac{8000 \times \text{FAS} \times (\text{Blank} - \text{ปริมาณ FAS ที่ใช้ไตเตรท})}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

โดย

FAS คือ ความเข้มข้นเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

Blank คือ ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์

เช่น ปริมาณ FAS ที่ใช้ไตเตรทเพื่อหาความเข้มข้น FAS 23.8 มิลลิลิตร ปริมาณ FAS ที่ใช้ไตเตรท Blank 23.1 มิลลิลิตร ปริมาณ FAS ที่ใช้ไตเตรทน้ำเสียสังเคราะห์ 18.1 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{FAS} &= \frac{0.3}{23.8} \\ &= 0.0126 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์} &= \frac{8000 \times 0.0126 \times (23.1 - 18.1)}{0.5} \\ &= 1,008 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

ข-2 ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

การคำนวณค่าความเข้มสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ที่ความเข้มข้นสีเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อมูล วัดค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่าง 0.120

จาก กราฟมาตรฐานสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5

$$Y = 0.0117 X$$

เมื่อ Y คือ ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นแสง 559 นาโนเมตร

X คือ ความเข้มสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5

ดังนั้น

$$X = \frac{Y}{0.0117}$$

$$X = \frac{0.120}{0.0117}$$

$$X = 10.26 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$



ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง



1. ข้อมูลดิบจากการทดลอง

1.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ที่มีความเข้มข้นต่างๆ

ตาราง ข-1 ผลการทดลองการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ที่มีความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นสี (เอทีเอ็มไอ)			ความเข้มข้นสี (มก./ล)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
10	0	510	508	505	10.26	10.09	10.2
	0.1	346	301	340	5.90	7.52	5.68
	0.2	308	250	277	4.70	5.13	4.54
	0.3	230	218	222	3.85	3.59	3.31
	0.3	152	150	154	2.74	2.56	2.56
	0.4	100	132	99	2.05	2.91	2.01
	0.5	80	122	78	1.71	1.79	1.67
	1	30	85	28	0.77	0.94	0.65
	2	60	64	56	0.77	1.03	0.63
	2.1	90	-	90	1.2	-	1.28
	2.2	100	-	100	1.37	-	1.18
	2.3	90	-	94	0.68	-	0.95
	2.3	80	-	80	0.34	-	0.3
	2.4	78	-	76	0.34	-	0.39
	2.5	74	-	75	0.26	1.45	0.25
	3	45	107	43	0.77	1.03	0.61
	4	46	63	49	0.60	1.03	0.59
	5	45	70	48	0.60	1.03	0.52
	6	-	63	-	-	0.77	-
	7	-	77	-	-	1.11	-
	-	100	-	-	-	-	
8.1	-	57	-	-	0.68	-	

ตาราง ข-1 ผลการทดลองการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ในความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นสี (เอติเอมไอ)			ความเข้มข้นสี (มก./ล)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
10	8.2	-	56	-	-	0.60	-
	8.3	-	52	-	-	0.51	-
	8.3	-	51	-	-	0.43	-
	8.4	-	49	-	-	0.43	-
	8.5	-	50	-	-	0.43	-
	9	-	55	-	-	0.43	-
	10	-	61	-	-	0.43	-
	11	-	59	-	-	0.60	-
25	12	1421	1416	1576	25.21	25.13	26.07
	12.1	1058	1070	1352	17.86	18.21	22.74
	12.2	850	897	1252	14.36	15.21	21.28
	12.3	780	746	1136	12.99	12.56	19.91
	12.3	592	720	976	10.17	12.05	16.75
	12.4	468	656	983	8.12	11.28	16.84
	12.5	398	622	905	6.84	10.77	15.56
	13	103	258	428	2.14	4.87	8.21
	14	100	90	150	1.97	1.11	2.22
	14.1	240	187	230	2.31	1.11	1.71
	14.2	246	193	237	2.65	0.94	1.71
	14.3	232	170	218	2.14	0.77	1.45
	14.3	226	162	198	2.14	0.68	1.28
	14.4	189	154	187	1.45	0.68	1.11
	15	180	149	176	1.11	0.68	1.11
	16	127	132	103	0.94	0.77	1.62

ตาราง ข-1 ผลการทดลองการบำบัดสีรีแอกทีฟไอโอไลต์ 5 และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ที่มีความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นสี (เอดีเอ็มไอ)			ความเข้มข้นสี (มก./ล)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
25	17	82	86	101	1.11	1.03	1.45
	18	88	81	98	1.03	1.03	1.28
	19	81	79	96	1.03	1.03	1.37
	20	82	82	104	1.03	1.03	1.37
50	21	2779	2770	2763	51.28	50.43	50.17
	21.1	2458	2122	1839	36.75	36.50	35.64
	21.2	2251	1795	1723	33.76	33.59	29.91
	21.3	2122	1526	1498	28.21	27.86	25.64
	21.3	2086	1447	1329	26.41	26.07	23.08
	21.4	2079	1353	1072	24.44	24.27	19.15
	21.5	1968	1220	973	20.77	20.68	17.18
	22	1138	267	191	18.55	6.58	5.30
	23	296	215	125	11.79	4.79	4.22
	24.0	-	233	150	-	4.87	4.14
	24.1	-	230	148	-	2.48	2.05
	24.2	-	210	122	-	4.62	1.71
	24.3	-	310	232	-	6.75	4.70
	24.3	-	300	200	-	5.98	4.19
	24.4	-	315	201	-	6.58	4.44
	25	142	306	185	1.20	5.98	4.02
	25.1	159	319	203	1.16	5.38	4.02
	25.2	159	-	-	1.97	-	-
	25.3	151	-	-	2.14	-	-
	25.3	154	-	-	2.56	-	-

ตาราง ข-1 ผลการทดลองการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นสี (เอติเอมไอ)			ความเข้มข้นสี (มก./ล)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
50	25.4	161	-	-	2.91	-	-
	25.5	158	-	-	3.16	-	-
	26	163	-	-	3.33	-	-
	27	172	330	215	2.91	5.43	3.93
	28	192	380	240	2.74	5.89	4.36
	29	219	-	284	2.82	-	4.96
	30	255	-	-	3.16	-	-
	31	340	-	-	4.19	-	-
100	32	4278	4339	4368	101.88	103.85	101.28
	32.1	3394	3595	3415	70.51	74.44	73.50
	32.2	2965	3120	2620	59.66	63.08	54.02
	32.3	2762	2766	2175	54.10	54.10	44.27
	32.3	2562	2688	1606	47.26	51.62	33.85
	32.4	2327	2060	1179	43.25	49.32	29.57
	32.5	2071	1806	1020	35.47	34.10	26.15
	33	834	977	396	15.21	19.23	9.83
	34	258	312	307	7.52	7.59	6.15
	35	195	236	296	7.01	7.14	6.24
	35.1	184	213	239	1.79	2.05	3.25
	35.2	187	215	242	2.39	2.14	3.16
	35.3	208	217	267	3.76	2.31	4.10
	35.3	240	220	320	4.44	2.74	5.73
	35.4	254	229	316	5.81	3.08	5.98
	35.5	259	233	319	5.90	3.33	6.41
	36	301	259	344	5.73	4.02	6.50

ตาราง ข-1 ผลการทดลองการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ในความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นสี (เอติเอมไอ)			ความเข้มข้นสี (มก./ล)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
100	37	364	320	398	6.32	4.36	6.92
	38	392	405	457	6.58	5.13	7.26
	39	458	462	462	7.35	7.52	7.26
150	40	7760	7680	7800	150.85	151.28	150.34
	40.1	7320	6280	6240	143.85	129.91	125.80
	40.2	6240	5400	5360	131.03	104.87	100.56
	40.3	5640	4640	4560	114.79	80.34	78.65
	40.3	5280	4240	4160	109.74	68.97	69.34
	40.4	4600	3960	3880	100.00	62.48	58.12
	40.5	4680	3400	3280	96.84	55.04	54.96
	41	1480	1360	1200	31.97	24.87	20.12
	42	680	600	560	6.50	9.49	8.34
	43	600	560	520	7.18	8.21	7.98
	44	600	600	520	7.34	9.40	8.19
	44.1	324	300	320	5.30	5.47	5.68
	44.2	300	285	357	3.59	3.85	3.46
	44.3	340	350	368	3.85	5.13	5.12
	44.3	375	358	376	4.19	4.87	4.34
	44.4	410	367	409	4.27	5.13	5.15
	44.5	498	427	520	4.87	6.07	5.67
	45	530	566	629	8.29	8.89	8.12
	46	673	656	758	7.69	9.91	9.34
47	754	738	790	7.78	10.17	9.81	
48	789	756	810	8.12	10.17	10.98	
49	809	-	-	8.12	-	-	

ตาราง ข-1 ผลการทดลองการบำบัดสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ที่มีความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นสี (เอติเอมไอ)			ความเข้มข้นสี (มก./ล)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
150	50	815	-	-	8.03	-	
200	51	10500	11200	10700	200.85	201.37	201.20
	51.1	8300	9000	8500	148.72	149.06	138.29
	51.2	6800	7500	7200	126.75	127.44	123.93
	51.3	6400	6600	6900	108.63	112.31	116.58
	51.3	5400	5700	5900	95.38	96.58	104.44
	51.4	4900	5300	5000	86.67	87.35	91.62
	51.5	4000	4600	4200	74.19	81.97	78.29
	52	1700	2000	1800	38.72	42.99	43.93
	53	500	700	700	11.71	11.20	13.33
	54	500	600	600	8.46	10.34	10.34
	54.1	-	-	428	-	-	3.85
	54.2	-	-	447	-	-	-
	54.3	-	-	482	-	-	-
	54.3	-	-	568	-	-	-
	54.4	-	-	575	-	-	-
	54.5	-	-	633	-	-	-
	55	500	600	744	10.51	10.26	11.28
	55.1	413	326	-	3.59	3.85	12.39
	55.2	433	362	-	4.44	4.27	-
	55.3	540	470	-	6.32	6.50	-
55.3	586	494	-	6.84	7.18	-	
55.4	606	515	-	7.52	8.03	-	

ตาราง ข-1 ผลการทดลองการบำบัดสีรีแอกทีฟไอโอเล็ด 5 และอัตราการเกิดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นสี (เอติเอมไอ)			ความเข้มข้นสี (มก./ล)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
200	55.5	626	-560	-	8.03	8.89	-
	56	743	722	879	11.88	11.11	13.68
	57	832	826	1054	12.65	11.71	13.25
	58	967	830	-	12.65	12.74	-
	59	997	889	-	12.74	12.82	-
400	60	21900	21700	21800	400.68	400.00	401.71
	60.1	20000	19500	19500	338.63	338.46	337.61
	60.2	18200	17300	17000	275.56	274.19	273.16
	60.3	16000	14900	15000	272.56	271.79	271.97
	60.3	15300	14500	14000	252.39	252.14	252.14
	60.4	15100	13800	13600	230.26	229.40	228.89
	60.5	13600	13400	13000	225.81	225.56	227.52
	61	5200	4800	4900	101.79	101.62	101.45
	62	1400	1200	1200	14.27	14.10	14.44
	63	900	900	900	10.09	10.00	9.66
	64	800	800	800	9.91	9.83	9.83
	64.1	641	650	678	9.32	9.32	9.49
	64.2	757	767	789	9.40	10.43	9.66
	64.3	788	780	808	10.00	9.83	9.74
	64.3	792	812	824	10.09	10.00	10.00
	64.4	847	859	879	9.91	10.17	10.17
	64.5	860	917	932	10.17	10.17	10.26
	65	994	967	987	11.34	11.43	11.65
	66	1145	1189	1109	11.51	11.60	11.68
	67	1267	1317	1367	12.77	11.85	12.15

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองค่าซีโอดีที่เปลี่ยนไปที่ความเข้มข้นสรีรแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ต่างๆ

ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ระยะเวลา (วัน)	ค่าซีโอดี (มก./ล)			ค่าพีเอช		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
10	0	1035.8	1084.2	937.3	7.23	7.25	7.29
	1	561.6	443.5	453.6	7.01	7.10	7.14
	2	414.7	161.3	191.5	7.08	7.20	7.3
	3	328.3	37.2	50.4	7.50	7.25	7.35
	4	267.8	41.3	40.3	7.30	7.20	7.31
	5	216.0	43.3	30.2	7.32	7.69	7.82
	6	190.1	22.4	19.1	7.36	7.75	7.8
	7	135.7	-	-	7.45	-	-
	8	42.4	-	-	7.42	-	-
	9	17.0	-	-	7.50	-	-
	10	17.0	-	-	7.45	-	-
11	17.0	-	-	7.50	-	-	
25	12	1084.2	1093.1	1063.8	7.25	7.49	7.48
	13	689.9	636.6	634.5	7.08	7.29	7.11
	14	546.6	582.1	552.1	7.15	7.10	7.01
	15	35.8	68.5	49.4	7.51	7.6	7.50
	16	26.9	59.9	33.0	7.50	7.57	7.48
	17	26.9	51.4	24.7	7.46	7.48	7.42
	18	34.9	25.7	16.5	7.39	7.42	7.32
	19	34.9	25.7	24.7	7.32	7.38	7.35
50	20	991.2	1108.8	1008	7.72	7.74	7.74
	21	638.4	831.6	697.2	7.05	7.20	7.20
	22	546	882	613.2	7.13	7.14	7.19
	23	562.8	596.4	504	7.28	7.12	7.02
	24	495.6	64.7	37.8	7.34	8.23	8.32
	25	31.9	53.8	44.5	8.22	8.14	8.20

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองค่าซีไอดีที่เปลี่ยนไปที่ความเข้มข้นสรีรแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ต่างๆ (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ระยะเวลา (วัน)	ค่าซีไอดี (มก./ล)			ค่าพีเอช		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
50	26	41.2	52.9	37.8	8.24	8.05	8.09
	27	44.5	-	37.8	7.94	-	7.98
	28	32.8	-	-	7.84	-	-
100	29	962.2	990	982	7.91	7.70	7.70
	30	651.8	615	472.3	7.24	7.30	7.50
	31	628.6	570	409.3	7.19	7.53	7.00
	32	488.9	495	377.9	7.08	7.04	7.10
	33	48.9	53.3	60.6	7.94	8.05	8.04
	34	50.4	46.5	76.4	7.79	7.91	7.94
	35	58.5	53.3	72.4	7.61	7.78	7.72
	36	68.2	62.3	77.9	7.50	7.65	7.65
150	37	1126.6	1114.0	1067.5	7.60	7.60	7.62
	38	725.3	673.0	611.1	7.43	7.12	7.32
	39	709.9	611.1	587.9	7.06	7.15	7.19
	40	648.2	572.5	551.8	7.06	7.05	7.01
	41	601.9	510.6	479.6	7.07	7.05	7.05
	42	88.0	85.9	78.9	8.03	8.43	8.23
	43	71.8	74.3	79.7	7.96	8.33	8.34
	44	71.8	71.2	77.4	7.81	8.3	8.29
	45	76.4	71.9	72.7	7.76	8.24	7.94
	46	76.4	-	-	7.69	-	-
	47	71.8	-	-	7.65	-	-

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองค่าซีไออดีที่เปลี่ยนไปที่ความเข้มข้นสรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ต่างๆ (ต่อ)

ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ระยะเวลา (วัน)	ค่าซีไออดี (มก./ล)			ค่าพีเอช		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
200	48	1054.1	1016.4	997.9	7.70	7.70	7.70
	49	702.7	658.2	594.7	7.50	7.45	7.11
	50	673.4	580.8	564.5	7.42	7.36	7.28
	51	673.4	590.5	514.1	7.23	7.21	7.19
	52	644.2	580.8	86.7	7.12	7.01	8.18
	53	91.7	75.5	97.8	8.07	8.05	8.05
	54	98.6	90.0	101.8	7.94	7.99	7.93
	55	86.9	100.7	99.8	7.85	7.91	7.71
	56	84.9	91.0	-	7.81	7.85	-
400	57	1168.1	1183.6	1088.1	7.4	7.6	7.5
	58	719.4	734.9	663.6	7.39	7.43	7.13
	59	649.8	649.8	609.6	7.23	7.20	7.09
	60	618.9	618.9	586.5	7.41	7.17	7.34
	61	510.6	533.8	522.4	7.38	7.09	7.21
	62	111.4	115.8	111.1	8.5	8.42	8.49
	63	106.8	105.0	108.0	8.42	8.35	8.21
	64	107.5	104.2	105.7	8.35	8.32	8.12
	65	109.8	105.0	104.2	8.24	8.19	7.99

1.2 ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่

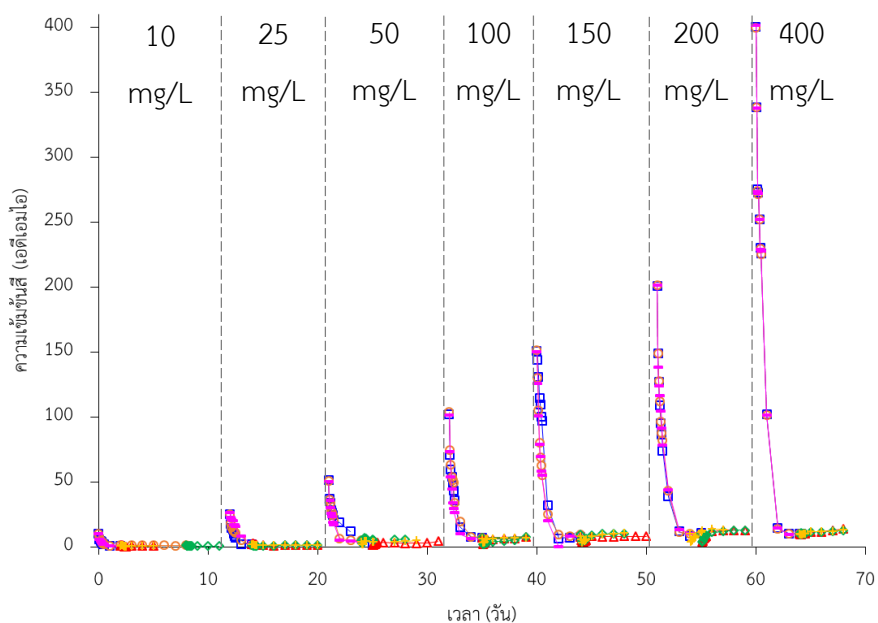
ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไอโอเล็ต 5 เริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ระบบ	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นสี (เอดีเอ็มไอ)	ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ค่าซีไอดี (มก./ล)	ค่าพีเอช	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล)
AF ครั้งที่ 1	0	10900	200.4	1002.8	7.14	25.0
	0.1	9600	175.6	-	-	-
	0.2	8300	153.1	-	-	-
	0.3	7200	134.7	-	-	-
	0.3	6200	102.1	-	-	-
	0.4	5200	98.5	-	-	-
	0.5	4600	88.8	-	-	-
	1	900	26.4	575.5	7.04	-
	2	600	10.5	575.5	7.11	-
	3	600	8.0	549.4	7.23	-
4	500	7.3	497.0	7.23	135.0	
TF	4.1	362	4.0	-	-	37.3
	4.2	373	4.4	-	-	-
	4.3	384	4.4	-	-	-
	4.3	410	4.6	-	-	-
	4.4	468	5.5	-	-	-
	4.5	520	6.1	-	-	-
	5	650	9.7	72.4	8.08	-
	6	748	11.5	87.1	7.92	122.0
AF ครั้งที่ 2	6.2	680	9.9	-	-	-
	6.3	693	9.7	-	-	-
	6.3	703	9.7	-	-	-
	6.4	715	10.1	-	-	-

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองการบำบัดสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ที่ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไอโอดีต 5 เริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

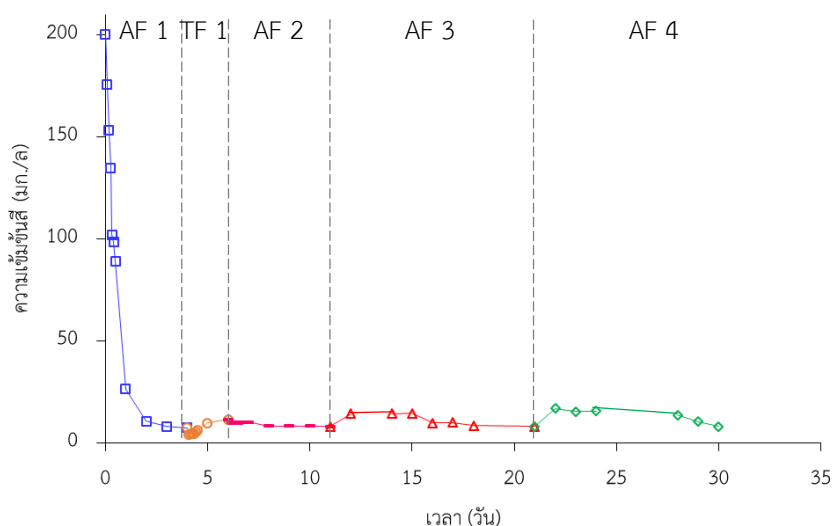
ระบบ	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นสี (เอทีเอ็มไอ)	ความเข้มข้นสี (มก./ล)	ค่าซีโอดี (มก./ล)	ค่าพีเอช	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล)
AF ครั้งที่ 2	6.5	673	9.6		-	-
	6.6	688	9.9	-	-	-
	7	680	10.1	387.2	7.18	-
	8	658	8.2	343.2	7.10	-
	9	660	8.3	343.2	7.10	-
	10	667	8.3	377.5	7.14	-
	11	640	8.0	329.1	7.20	-
AF ครั้งที่ 3	12	811	14.3	977.5	7.01	-
	13	-	-	658.2	-	-
	14	834	14.2	658.2	7.21	-
	15	830	14.4	609.8	7.01	-
	16	664	9.7	600.2	7.10	-
	17	663	9.9	551.8	7.18	-
	18	648	8.5	513.0	7.2	-
	21	635	7.9	395.6	7.31	-
AF ครั้งที่ 4	22	902	16.9	992.0	7.05	-
	23	852	15.4	674.6	7.12	-
	24	839	15.6	615.0	7.26	-
	25	-	-	565.4	-	-
	26	-	-	426.6	-	-
	27	-	-	387.4	-	-
	28	764	13.6	360.5	7.20	-
	29	698	10.3	328.9	7.16	-
	30	632	7.9	312.6	7.02	178.4

1.3 กราฟจากการทดลอง



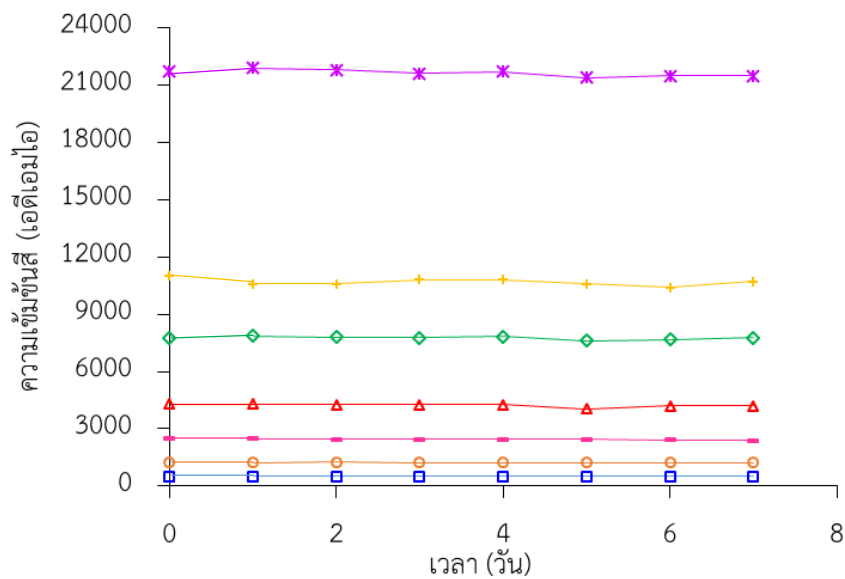
รูปที่ ข-1 ความเข้มข้นสรีรแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้นที่ความเข้มข้นต่างๆในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านระบบบำบัดถังกรองไร้อากาศและถังโปรยกรองของการทดลองที่ 1

- : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 1, ○ : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 2, — : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 3
 △ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 1, ◇ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 2, + : ถังโปรยกรองครั้งที่ 3



รูปที่ ข-2 ความเข้มข้นสรีรแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับเวลา เมื่อผ่านระบบบำบัดถังกรองไร้อากาศ (AF) และถังโปรยกรองของการทดลองที่ 2 (TF)

- : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 1, ○ : ถังโปรยกรองครั้งที่ 1, — : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 2
 △ : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 3, ◇ : ถังกรองไร้อากาศครั้งที่ 4

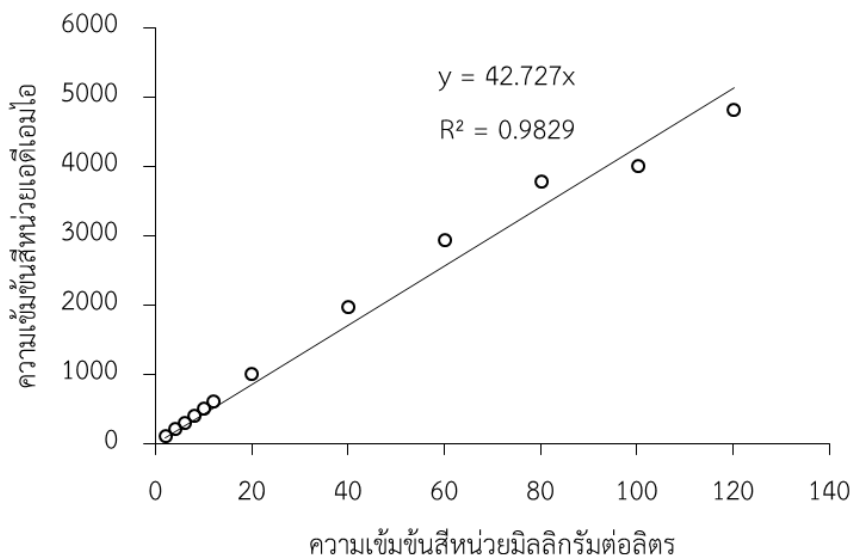


รูปที่ ข-3 ความเข้มข้นซีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ (เอตีเอ็มไอ) เทียบกับเวลาของชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมน้ำตาลทรายขาว 1,000 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร เมื่อผ่านการบำบัดด้วยถังกรองไร้อากาศ

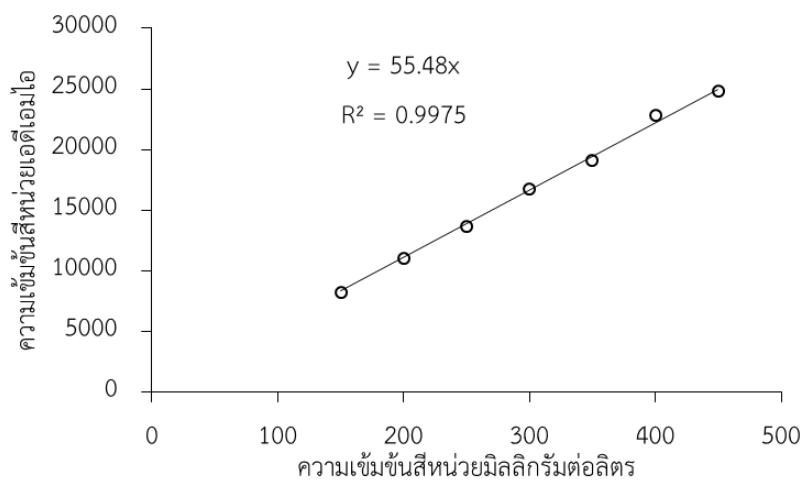
□: ความเข้มข้นซี 508 เอตีเอ็มไอ, ○: ความเข้มข้นซี 1,471 เอตีเอ็มไอ, —: ความเข้มข้นซี 2,771 เอตีเอ็มไอ, △: ความเข้มข้นซี 4,328 เอตีเอ็มไอ, ◇: ความเข้มข้นซี 7,747 เอตีเอ็มไอ, +: ความเข้มข้นซี 10,800 เอตีเอ็มไอ, *: ความเข้มข้นซี 21,800 เอตีเอ็มไอ



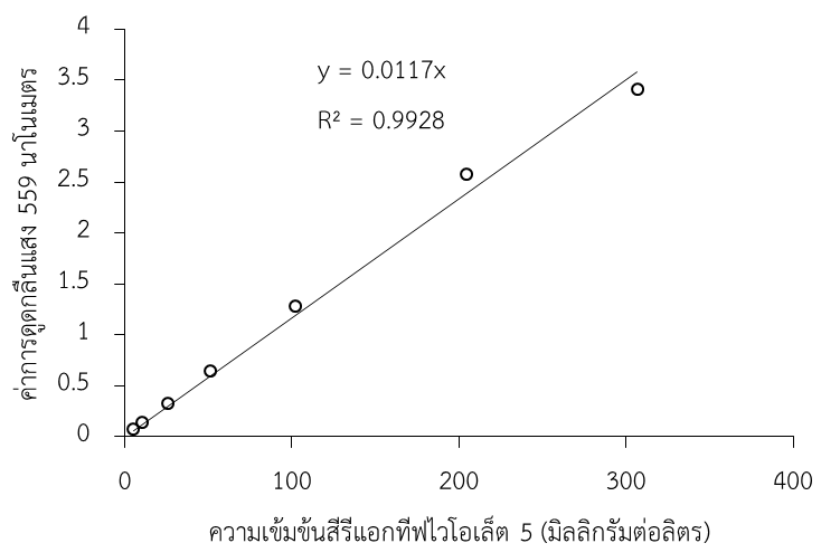
1. กราฟมาตรฐานสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5



ภาพที่ ค-1 ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 2-120 มิลลิกรัมต่อลิตร เทียบกับค่าความเข้มสีในหน่วยเอตีเอ็มไอ



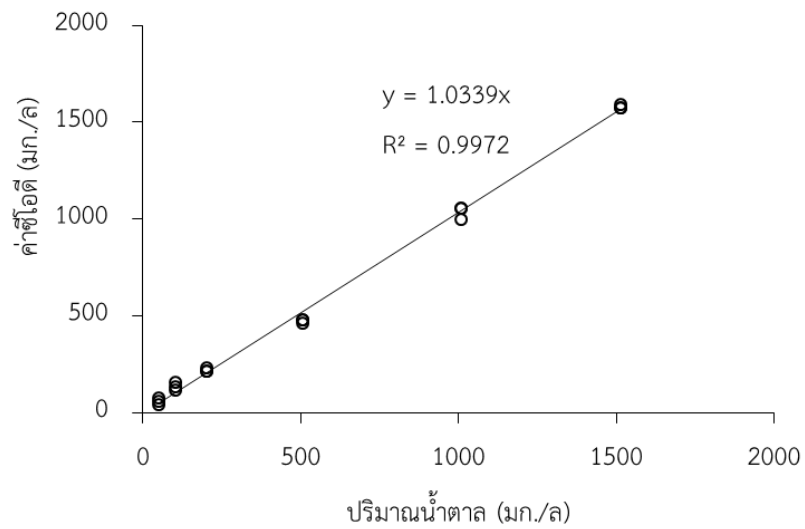
ภาพที่ ค-2 ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เริ่มต้น 150-450 มิลลิกรัมต่อลิตร เทียบกับค่าความเข้มสีในหน่วยเอตีเอ็มไอ



ภาพที่ ค-3 ความเข้มข้นสีรีแอกทีฟไวโอเล็ต 5 เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีที่มีความยาวคลื่นแสง 559 นาโนเมตร



1. กราฟมาตรฐานค่าซีไอของน้ำตาลทราย



ภาพที่ ค-4 ปริมาณน้ำตาลทรายเทียบกับค่าซีไอ



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศุภรัตน์ สวัสดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับชาติ

ศุภรัตน์ สวัสดิ์ และ ศรัณย์ เตชะเสน “การบำบัดสีอะโซและการเกิดสีจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศและเติมอากาศ” ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15 ระหว่างวันที่ 11-13 พฤษภาคม 2559 ณ โรงแรมเดอะทวิน ทาวเวอร์ รongเมือง กรุงเทพฯ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY