



การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูไทล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
Wastewater Treatment of Textile Dyes by Ozonation process and Plastic Media Coated with Rutile TiO_2 as a Catalyst

พีรวิชญ์ วายุพา
จิรภัทร จันทเชิด
เกียรติศักดิ์ ชัยสงค์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2562



การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูไทล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
Wastewater Treatment of Textile Dyes by Ozonation process and Plastic Media Coated with Rutile TiO_2 as a Catalyst

พีรวิชญ์ วายูพา
จิรภัทร จันทเชิด
เกียรติศักดิ์ ชัยสงค์

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

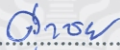
ชื่อปริญญาบัตร	การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการไอโซนเนชันโดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูโพลีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ชื่อ นามสกุล	พีรวิชญ์ วายพา จิรภัทร จันทเชิด เกียรติศักดิ์ ชัยสงค์
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ
คณะ	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กิตติศ ตั้งสัจจวงศ์

คณะกรรมการสอบปริญญาบัตรได้ให้ความเห็นชอบปริญญาบัตรฉบับนี้แล้ว



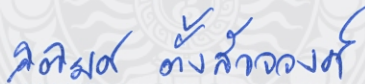
.....ประธานกรรมการ

(นายมานิช หลักฐานดี)



.....กรรมการ

(ดร.ศุภชัย หิรัญศุภโชติ)



.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

(นายกิตติศ ตั้งสัจจวงศ์)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อนุมัติให้รับปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อปริญญาบัตร	การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นโดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูโพลีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ชื่อ นามสกุล	พีรวิษณุ วายพา จิรภัทร จันทเชิด เกียรติศักดิ์ ชัยสงค์
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ
คณะ	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูโพลีในการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งใช้เครื่องผลิตโอโซนที่มีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 2.62 – 3.10 กรัมต่อชั่วโมง โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและสี ได้แก่ ค่า pH ของน้ำที่ใช้ในการบำบัดที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ค่าความเข้มข้นของค่าซีโอดีเริ่มต้นร้อยละ 100, 50 และ 25 ซึ่งมีค่าในช่วง 100 -320 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน 120 นาที จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ในสถานะค่า pH 11 ความเข้มข้นค่าซีโอดีเริ่มต้นที่ร้อยละ 50 มีความสามารถในการลดค่าซีโอดี และสีได้สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 33.3 และ 90 จากความเข้มข้นสี 550 ADMI โดยค่าซีโอดีเริ่มต้น 180 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 2 กรัม ในต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ในสถานะค่า pH 11 ความเข้มข้นค่าซีโอดี เริ่มต้นที่ร้อยละ 100 มีความสามารถในการลดค่าซีโอดี และสีได้สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 40 และ 80 จากความเข้มข้นสี 270 ADMI โดยมีค่าซีโอดีเริ่มต้น 190 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดมีค่าเฉลี่ยที่ 0.0374 กรัมต่อนาที ต่อน้ำเสีย 10.5 ลิตร โดยระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนของทั้ง 2 กระบวนการมีแนวทางใกล้เคียงกันต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีและสีเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน

คำสำคัญ : กระบวนการโอโซนเนชั่น, ไทเทเนียมไดออกไซด์, ไฮดรอกซิลเรดิคัล, น้ำเสียจากสีย้อมผ้า

Thesis title	Wastewater Treatment of Textile Dyes by Ozonation process and Plastic Media Coated with Rutile TiO ₂ as a Catalyst
Author	Peerawit Wayupha Jirapat Janthacherd Kiattisak Chaisong
Degree	Bachelor of Science
Major program	Environmental Science and Natural Resources Faculty of Science and Technology
Academic Year	2019

ABSTRACT

This research is to study the efficiency of treating wastewater from dyeing fabric by the ozonation process. By using rutile TiO₂ coated plastic media to catalyze. Which uses O₃ generators with a capacity of 2.62 - 3.10 g/hr. By studying the factors that affect the treatment efficiency of COD and color, such as the pH of the water used in the treatment at pH 3, pH 7 and pH 11, the initial COD concentration of 100%, 50% and 25% which have values in the range of 100 -320 mg/L. O₃ exposure time 120 min. From the study, it is found that the efficiency of reducing the impurities in wastewater by the ozonation process in the pH 11 state, the COD concentration at 50%, can reduce the COD. And the maximum color is at 33.3% and 90% from the 550 ADMI color intensity, with a COD of 180 mg/L. For the study of the efficiency of reducing the impurities of wastewater by ozonation process together with 2 g. of TiO₂/1 L. of wastewater in the condition of pH 11, concentration COD Beginning at 100%, with the ability to reduce COD values And the maximum color is at 40% and 80% of the 270 ADMI color intensity, with a COD of 190 mg/L. The amount of O₃ suitable for treatment has an average value of 0.0374 g/min./10.5 L. of wastewater. The duration of O₃ exposure in both processes has a similar approach to the efficiency of COD and color treatment when increasing the duration of O₃ exposure.

Keywords : Ozonation process, Titanium Dioxide, Hydroxyl radical, Wastewater Textile Dyes

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของคณาจารย์หลายท่าน คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์กิติยศ ตั้งสัจจวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ อาจารย์มานิช หลักฐานดี ประธานกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ และ ดร.ศุภชัย หิรัญศุภโชติ กรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ ที่สละเวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณอาจารย์มานิช หลักฐานดี หัวหน้าสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องสถานที่การวิจัย รวมทั้งอุปกรณ์ในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม ที่อบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ความสามารถต่าง ๆ ให้แก่คณะผู้วิจัย จนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณเสาวลักษณ์ แม้นพวก เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการมลพิษสิ่งแวดล้อม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้มอบทุนอุดหนุนงบประมาณ จากโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 เพื่อเป็นทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เมตตาอบรมสั่งสอน ให้มีความรู้จนถึงปัจจุบันรวมถึงเพื่อน ๆ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม รุ่นที่ 9 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกาย และกำลังใจในการศึกษาวิจัยและทดลอง จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

พีรวิชญ์	วายุพา
จิรภัทร	จันทเชิด
เกียรติศักดิ์	ชัยสงค์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(ก)
Abstract	(ข)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ง)
สารบัญตาราง	(ช)
สารบัญภาพ	(ฉ)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 กรอบแนวคิดในการศึกษา	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 นิยามศัพท์	4
1.7 คำสำคัญ	5
บทที่ 2 การทบทวนงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สีย้อม	6
2.1.1 การเกิดสีย้อม	6
2.1.2 ประเภทของสี	7
2.2 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม	9
2.2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง	10
2.2.2 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์	11
2.3 วิธีการกำจัดสีย้อมผ้า	12
2.3.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical technology)	12
2.3.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (Chemical Technology)	13
2.3.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological technology)	14
2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการโอโซนเนชั่น	16
2.4.1 คุณสมบัติของโอโซน	16
2.4.2 การผลิตโอโซน	17
2.4.3 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ	18
2.4.4 การนำโอโซนมาประยุกต์ใช้	19
2.4.5 การวัดปริมาณโอโซนในอากาศ	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับไทเทเนียมไดออกไซด์	20
2.5.1 ลักษณะทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์	20
2.5.2 ประเภทของไทเทเนียมไดออกไซด์	21
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีของไทเทเนียมไดออกไซด์	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ	
3.1 รูปแบบงานวิจัย	25
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	25
3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดทำแบบจำลองระบบบำบัด	25
3.2.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	26
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	27
3.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	29
3.4.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ไอโชน	29
3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าซีไอดี	29
3.4.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าบีไอดี	29
3.5 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ	30
3.5.1 วิธีวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	30
3.5.2 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไอโชน	31
3.5.3 วิธีการวิเคราะห์ซีไอดี	32
3.5.4 วิธีการวิเคราะห์บีไอดี	34
3.5.5 วิธีการวิเคราะห์สี	38
3.6 ขั้นตอนการเตรียมงานวิจัย	39
3.7 ขั้นตอนการศึกษา	42
3.8 การกำหนดตัวแปร	43
3.9 ขั้นตอนการบันทึกและรายงานผล	44
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล	
4.1 ผลการวิเคราะห์	45
4.2 การตรวจวัดปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวตัวกลาง	46
4.3 การวิเคราะห์ปริมาณไอโชนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตไอโชน	46
4.3.1 ผลการทดสอบปริมาณไอโชนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยา	47
4.4 ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการไอโชนเนชัน	48
4.4.1 ปัจจัยของค่า pH ที่มีผลต่อกระบวนการไอโชนเนชัน	49
4.4.2 ปัจจัยของความเข้มข้น COD เริ่มต้นที่มีผลต่อกระบวนการไอโชนเนชัน	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3 ปัจจัยของระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชัน	51
4.4.4 อัตราการลดสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน	52
4.5 ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์	53
4.5.1 ปัจจัยของค่าพีเอชที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์	53
4.5.2 ปัจจัยของความเข้มข้น COD เริ่มต้นที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์	57
4.5.3 ปัจจัยของระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์	58
4.5.4 อัตราการลดสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์	61
4.6 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ในสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชัน	64
4.7 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ในสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์	65
4.8 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน	66
4.9 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์	66
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารอ้างอิง	70
ภาคผนวก	76
ภาคผนวก ก กำลังการผลิตโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน	77
ภาคผนวก ข ผลการศึกษาหน้าเสียเริ่มต้น	81
ภาคผนวก ค อัตราการเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซน	83
ภาคผนวก ง ผลการทดลองและตัวอย่างวิธีการคำนวณ	88
ประวัติผู้วิจัย	97

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 กลุ่มอะตอมออกซิโครม	7
2.2 อัตราส่วนบีโอดีและซีโอดีของน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม	9
2.3 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560	10
2.4 การเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดส์ของสารออกซิเดนต์ต่าง ๆ	18
3.1 ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่าง ๆ ของภาชนะที่ใช้ ย่อยสลาย	33
3.2 ตารางการเจือจางน้ำตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์บีโอดี	35
3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	43
3.4 อัตราส่วนการเติมตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ในการทดลอง	44
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากกระบวนการสังเคราะห์	45
4.2 ปริมาณการเติมตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์	46
4.3 ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาจากกระบวนการโอโซนเนชั่น	47
4.4 ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาจากกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับ ไทเทเนียมไดออกไซด์	48
4.5 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วย กระบวนการโอโซนเนชั่น	49
4.6 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วย กระบวนการโอโซนเนชั่นที่ pH 11	50
4.7 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น	51
4.8 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น	52
4.9 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการ การโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียม ไดออกไซด์ 0.5 กรัม	53
4.10 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการ การโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียม ไดออกไซด์ 1 กรัม	55
4.11 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการ การโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียม ไดออกไซด์ 2 กรัม	56
4.12 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วย กระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ pH 11	57

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.13 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับไทเทเนียม ไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม	58
4.14 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับไทเทเนียม ไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม	59
4.15 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับไทเทเนียม ไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม	60
4.16 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการ โอโซนเนชั้นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียม ไดออกไซด์ 0.5 กรัม	61
4.17 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการ โอโซนเนชั้นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียม ไดออกไซด์ 1 กรัม	62
4.18 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั้น ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม	63
4.19 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั้นที่ pH 11	64
4.20 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั้นร่วมกับ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ pH 11	65
4.21 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการ โอโซนเนชั้น	66
4.22 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการ โอโซนเนชั้นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์	66

สารบัญญภาพ

ภาพ	หน้า
1.1 กรอบแนวคิดการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น	3
2.1 กระบวนการผลิตโอโซน	17
2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละแบบ	22
3.1 ถังทำปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง (Reactor)	25
3.2 กระจาด مخروط ขนาด 47 มิลลิเมตร	26
3.3 ขวดแก้วเก็บปริมาณโอโซน ขนาด 2 ลิตร	26
3.4 เครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator)	27
3.5 เครื่องวัด pH (pH meter)	28
3.6 เครื่องวัดสี (Colorimeter)	28
3.7 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven)	28
3.8 เครื่องชั่งละเอียด (Analytical Balance)	29
3.9 ขั้นตอนการตวงปริมาตรน้ำตัวอย่าง	30
3.10 ขั้นตอนการชั่งน้ำหนักกระจาด مخروط	30
3.11 ขั้นตอนการทดสอบปริมาณโอโซน	31
3.12 ขั้นตอนการไทเทรตหาปริมาณโอโซนในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์	32
3.13 ขั้นตอนการเติมน้ำตัวอย่างลงในหลอดย่อยสลาย	33
3.14 ขั้นตอนการไทเทรตตัวอย่างด้วยสารละลาย FAS ความเข้มข้น 0.25 N	34
3.15 ขั้นตอนการเติมน้ำตัวอย่างลงในขวด BOD	36
3.16 ขั้นตอนการเขย่าขวด BOD	37
3.17 ขั้นตอนการตวงปริมาตรน้ำออก	37
3.18 ขั้นตอนการกรองตัวอย่างเพื่อตรวจวิเคราะห์สี	38
3.19 ขั้นตอนการบรรจุตัวอย่างและการอ่านค่าสีด้วยเครื่องวิเคราะห์สี	39
3.20 การประกอบถังทำปฏิกิริยาด้วยน้ำยาเชื่อมอะคริลิก	40
3.21 ชุดจำลองระบบบำบัดน้ำเสีย	40
3.22 การเคลือบผิวตัวกลางพลาสติกด้วยเรซินใส	41
3.23 การเคลือบผิวตัวกลางพลาสติกด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์	41
3.24 ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางพลาสติกที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์	41
3.25 การต่อระบบดักจับโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยากับชุดถังทำปฏิกิริยา	42
4.1 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากการทดลองในแต่ละครั้ง	47
4.2 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอ และวัสดุพอลิเมอร์มีบทบาทสำคัญในการนำเม็ดเงินเข้าสู่ประเทศและมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มสูงขึ้นจากตัวเลขการส่งออกในปี 2561 มีมูลค่ากว่า 11,568.83 ล้านบาท ขยายตัว 4.62% จากในอดีตชี้ให้เห็นถึงความต้องการของผู้บริโภคที่เพิ่มมากขึ้น โดยกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่ทำการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใยด้วยสารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมกับเส้นใย ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ ประกอบด้วย สีย้อม สารปรับปรุงคุณภาพต่าง ๆ และน้ำสะอาดปริมาณมากที่ใช้ในกระบวนการทำละลายสีย้อมอีกทั้งยังเป็นตัวกลางเพื่อให้ยึดติดกับเส้นใยตามที่ต้องการ (บางกอกทูเดย์, 2562)

จากกระบวนการดังกล่าวก่อให้เกิดน้ำเสียที่เหลือหลังจากการพอลิเมอร์ โดยปัญหาที่พบมาจากการลักลอบปล่อยน้ำเสียจากกระบวนการผลิตออกสู่ภายนอกโรงงาน รวมทั้งการปล่อยน้ำเสียจากแหล่งพอลิเมอร์ขนาดเล็กในระดับวิสาหกิจชุมชนที่ไม่มีการบำบัดอย่างถูกวิธีก่อให้เกิดเป็นมลพิษทางน้ำ ส่งผลเสียในด้านทัศนียภาพจากสีย้อมที่ปรากฏในน้ำทิ้ง และยังเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ เนื่องจากน้ำเสียจากสีย้อมมีค่าความเป็นกรด-ด่าง สารแขวนลอย (Suspended Solids : SS) และสารอินทรีย์ในน้ำปริมาณที่สูง ทำให้แหล่งน้ำขาดออกซิเจน และผลกระทบของน้ำเสียนี้ยังเป็นตัวบ่งชี้การทำงานของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) เป็นผลทำให้ระบบนิเวศในแหล่งน้ำเสียสมดุล ซึ่งส่งผลกระทบต่อมนุษย์ในการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำทั้งการอุปโภค บริโภค โดยส่วนมากสีบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพ และทางเคมีทั่ว ๆ ไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีดังกล่าว ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น (Ozonation) โดยเลือกใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ชนิดรูทูล์ในการเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง โดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสีย้อมและนำไปสู่การสลายโมเลกุลนั้น อีกทั้งการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นยังมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงกว่าการบำบัดด้วยวิธีทางเคมี มีต้นทุนในการบำบัดที่ต่ำ

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ทางคณะผู้จัดทำมีความประสงค์ที่จะศึกษาแนวทางการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูทูล์ ลงบนพื้นผิวตัวกลางพลาสติกโพลีเอทิลีน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซน ให้มีการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลที่สูงขึ้น โดยเน้นการศึกษาความสามารถในการบำบัดสีและลดค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand ; COD) ในน้ำเสียจากสี

ย้อมผ้า ภายใต้สภาวะค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสม และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ ร่วมกับระยะเวลาในการเติมโอโซน เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2.2 เพื่อทำการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

1.2.3 เพื่อศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซน (O_3) ร่วมกับตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

1.2.4 เพื่อศึกษาความเข้มข้นของค่า COD ที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

1.2.5 เพื่อศึกษาปริมาณการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่เหมาะสมในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูทูล์

1.3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ โดยใช้แม่สีชนิดเดียวกับโรงฟอกย้อม

1.3.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

1.3.3.1 ระยะเวลาสัมผัสโอโซน

- 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที

1.3.3.2 pH ที่ใช้ในการบำบัด

- pH 3, pH 7 และ pH 11

1.3.3.3 ความเข้มข้นของ COD เริ่มต้น

- 1000 mg/L, 500 mg/L และ 250 mg/L

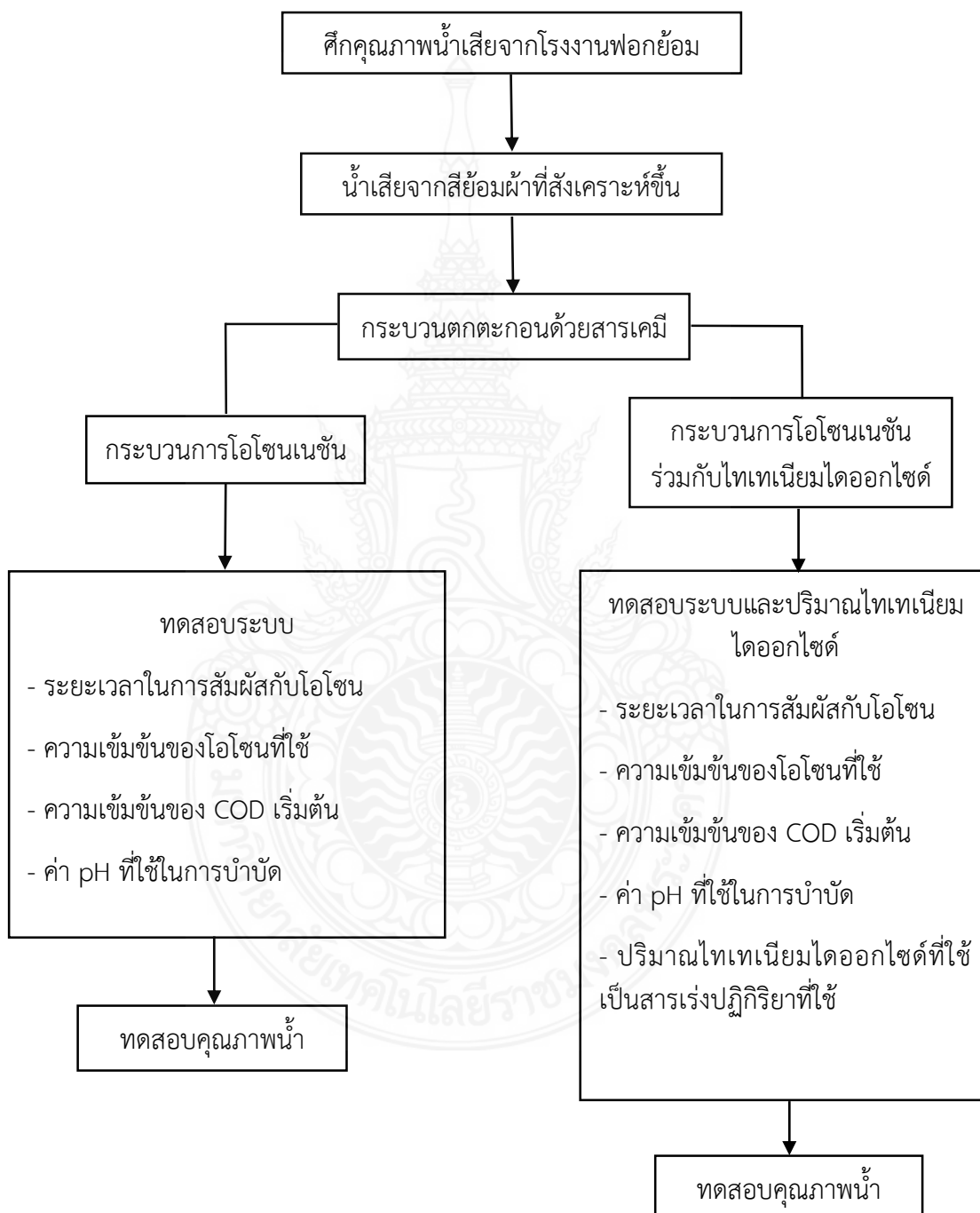
1.3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ Color, pH, COD, BOD

1.3.5 ระบบบำบัดน้ำเสียต้นแบบมีพื้นที่การทำงานขนาดด้านกว้าง, ยาว และ ลึก 10, 17.5 และ 140 เซนติเมตร ตามลำดับ

1.3.6 ทำการศึกษาทดลองภายในห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม ของคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ

1.4 กรอบแนวคิดในการศึกษา

กรอบแนวคิดการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูโพลีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้แสดงไว้ดังภาพ 1.1



ภาพ 1.1 กรอบแนวคิดการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถบำบัดสีและค่าความสกปรกจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมได้
- 1.5.2 ทราบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม
- 1.5.3 ทราบระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซน (O_3) ในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม
- 1.5.4 ทราบความเข้มข้นของค่า COD Loading ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม
- 1.5.5 ทราบปริมาณการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

1.6 นิยามศัพท์

- 1.6.1 น้ำเสียจากสีย้อมผ้า (Wastewater from dye) หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการฟอกย้อมเส้นใยผ้า ประกอบด้วยสารแขวนลอย สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และอนุภาคของเม็ดสีที่ละลายน้ำอยู่ในปริมาณที่สูง จนทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม
- 1.6.2 โรงฟอกย้อม (Dyeing plant) หมายถึง อาคาร หรือสถานที่ ซึ่งประกอบกิจการเกี่ยวกับการเปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายหรือผ้าดิบ ให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรง หรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมอื่น ๆ ด้วยกระบวนการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใย โดยการใช้สารเคมี
- 1.6.3 สีจริง (True color) หมายถึง สีของน้ำที่เป็นสีที่วัดได้หรือมองเห็นหลังจากที่แยกเอาสารแขวนลอยที่ทำให้ น้ำขุ่นออกแล้ว เกิดจากสารต่าง ๆ ในน้ำละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำมีความคงสภาพอยู่ในน้ำได้ยากต่อการแยกออกจากน้ำด้วยวิธีการทางกายภาพ
- 1.6.4 สีปรากฏ (Apparent color) หมายถึง สีของน้ำที่เป็นสีที่วัดได้หรือมองเห็นจริง ๆ ในตัวอย่างน้ำโดยไม่มีการแยกเอาสารแขวนลอยที่ทำให้ น้ำขุ่นออกไป นั่นคือสีที่เกิดจากสารที่ละลายในน้ำ และสารที่ไม่ละลายในน้ำได้รวมกัน สามารถกำจัดออกได้ด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การกรอง หรือการตกตะกอน (กัณฐกริช, 2547)
- 1.6.5 ตัวกลางพลาสติก (Plastic media) หมายถึง เม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีการลอยตัวเคลื่อนหมุนวนไปมาในมวลน้ำด้วยแรงจากฟองอากาศ ทำหน้าที่เป็นสื่อกลางในการยึดเกาะของสารไทเทเนียมไดออกไซด์
- 1.6.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) หมายถึง สาร หรือวัตถุที่ทำให้การปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น มีอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรสูง ช่วยเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา และกระจายตัวในรูปคอลลอยด์ในตัวกลาง ทำให้ง่ายต่อการแยกออกจากปฏิกิริยาซึ่งการเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา (การะเกด, 2556)

1.6.7 pH (พีเอช) หมายถึง เป็นค่าที่บอกถึงความเป็นกรดต่างของน้ำเสีย โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตในน้ำหรือจุลินทรีย์จะดำรงชีพได้ดีในสภาวะที่เป็นกลาง ถ้ามี pH สูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้ระบบนิเวศน้ำเสียหาย น้ำทิ้งควรมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6-9 เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและการนำไปใช้ประโยชน์

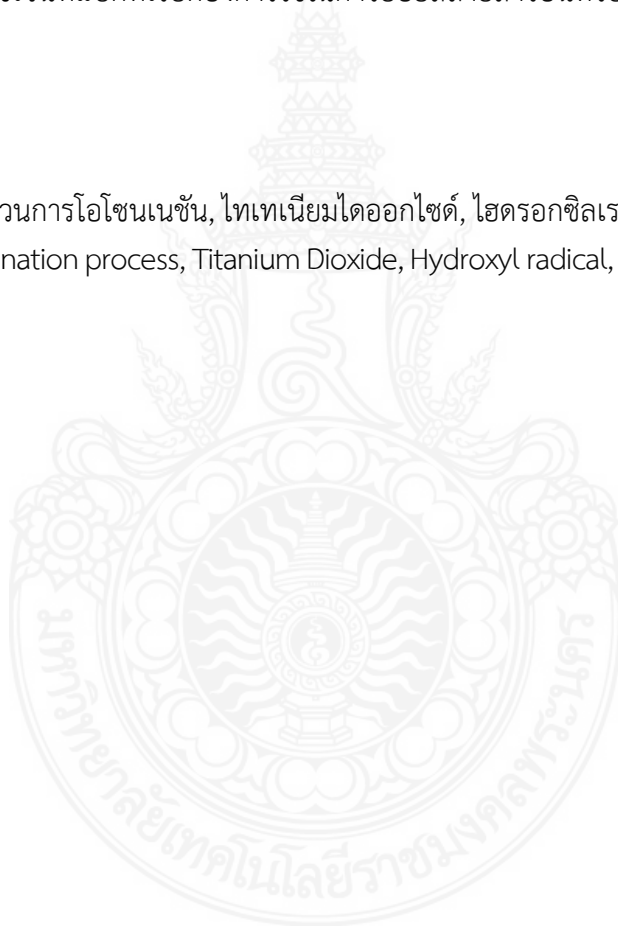
1.6.8 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณของออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

1.6.9 บีโอดี (Biological Oxygen Demand) หมายถึง ปริมาณของออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส BOD เป็นค่าที่บ่งบอกถึงผลกระทบของน้ำเสียที่มีต่อออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยทั่วไปจะวัดในรูปของ BOD₅ ซึ่งหมายถึง ปริมาณของออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเวลา 5 วัน (มณฑล และ สุทธิพงษ์, 2546)

1.7 คำสำคัญ

คำสำคัญ : กระบวนการโอโซนเนชัน, ไทเทเนียมไดออกไซด์, ไฮดรอกซิลเรดิคัล, น้ำเสียจากสีย้อมผ้า

Keywords : Ozonation process, Titanium Dioxide, Hydroxyl radical, Wastewater Textile Dyes



บทที่ 2

การทบทวนงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นโดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูไทล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีความเกี่ยวข้องกับความรู้ในด้านต่าง ๆ เพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม ซึ่งจะต้องนำความข้อมูลเหล่านั้นมาประกอบการพิจารณาวิเคราะห์แนวทางการดำเนินงานวิจัย และอ้างอิงถึงเหตุผลและความเป็นมาในการจัดทำ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างชัดเจนคณะผู้วิจัยได้ศึกษารวบรวมและนำเสนอข้อมูลต่างดังนี้

2.1 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน โดยสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซิน ไชลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ

2.1.1 การเกิดสีย้อม

สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม เรียกกัว่า โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม (ธงชัย, 2527) คือ

- 1). กลุ่มไนโตรโซ (nitroso): $-NO$ (หรือ $=N-OH$)
- 2). กลุ่มไนโตร (nitro): $-NO_2$ (หรือ $=N-OH$)
- 3). กลุ่มอะโซ (azo): $-N=N-$
- 4). กลุ่มเอทิลีน (ethylene): $C=C$
- 5). กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl): $C=O$
- 6). กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen): $C=NH$ และ $-CH=N-$
- 7). กลุ่มซัลเฟอร์ (sulphur): $C=S$ และ $C-S-S-C$

กลุ่มอะตอมต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวยุ่บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง จะทำให้นุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันไป นอกจากกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว สีย้อมยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ กลุ่มอะตอมออกโซโครม (Auxochromes) ดังแสดงในตาราง 2.1 เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครมจะยังแสดงคุณสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่าโครมาเจน (Chromagen) ทั้งกลุ่มอะตอม

โครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะใช้ในการแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี (ปารีชาติ, 2549)

ตาราง 2.1 กลุ่มอะตอมออกโซโครม

ชื่อ	กลุ่ม
อะมิโน (Amino)	NH ₂
เมทิลอะมิโน (Methylamino)	NHCH ₃
ไดเมทิลอะมิโน (Dimethyl amino)	N(CH ₃) ₂
ซัลโฟนิกแอซิด (Sulphonic acid)	SO ₃ H
ไฮดรอกซี (Hydroxy)	OH
คาร์บอกซิลิกแอซิด (Carboxylic Acid)	COOH
คลอโร (Chloro)	Cl
เมทิล (Methyl)	CH ₃
เมทอกซี (Methoxy)	OCH ₃
ไซยาโน (Cyano)	CN
แอซีทิล (Acetyl)	COCH ₃
เอไมด์ (Amide)	CONH ₂

ที่มา: Rangnekar and Singh, 1980

2.1.2 ประเภทของสี

สีที่สีย้อมสิ่งทอตามลักษณะกายภาพแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดหนึ่งละลายน้ำได้ เรียกกันว่า สีย้อม (Dyes) อีกชนิดหนึ่งไม่ละลายน้ำ เรียกว่า พิกเมนต์ (Pigments) น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีราคาถูกที่สุด ดังนั้นแม้ว่าสีบางตัวไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในสารอื่น ทางโรงงานผู้ผลิตจะต้องพยายามค้นคว้าหาวิธีมาทำให้สีตัวนั้นละลายในน้ำให้ได้ ใช้ตัวทำละลายอื่นให้น้อยที่สุด สีเมื่อละลาย น้ำแล้วจะดูดซึมเข้าไปภายในเส้นใยได้ดีพอสมควร ทนซักและขบวนการใช้น้ำอื่น ๆ บางตัวจะมีแขน (Bond) หรือโซ่ (Linkage) เชื่อมโยงอยู่ระหว่างเส้นใยกับตัวสีทำให้ติดทนนานยิ่งขึ้น สีบางตัวจะติดเส้นใยได้เอง (Substantivity) แต่ขณะเดียวกันก็หลุดออกมาได้ง่าย (ดูชัย , 2531)

การแบ่งสีตามลักษณะการใช้งาน สามารถแบ่งออกเป็นคร่าว ๆ ได้ 14 ชนิด ดังนี้

1) สีแอซิกหรือสีกรด (Acid Dyes) เป็นสีที่ใช้กับเส้นใยโปรตีน ขนสัตว์ ไหม ไนลอน ต้องใช้ในภาวะกรด อาจใช้กรดกำมะถัน กรดน้ำส้มหรือกรดฟอร์มิก เป็นกลุ่มสีที่สดใสมาก แต่ละตัวมีความคงทนไม่เท่า ถ้ามีปริมาณกรดน้ำมาก เส้นใยจะมีแคทไอออนเพิ่มมากขึ้น ผ้าจะดูดสีได้มากขึ้น และค่อนข้างเร็ว แต่ถ้ามีมากเกินไปจะกลายเป็นทำให้สีหลุดจากเนื้อผ้า สีนี้บางสีมีสูตรโครงสร้างคล้ายสีย้อมเรกท์

2) สีเอโซอิก (Azoic Dyes) ใช้กับเส้นใยได้หลายชนิด สามารถพลิกแพลงได้หลายแบบ และสวยงามกว่าสีอื่น สีบางตัวละลายน้ำได้แต่บางตัวไม่ละลายน้ำ ตัวสีแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นตัวสีที่เรียกว่า Fast color salt ต้องนำทั้งสองส่วนนี้มาใช้ด้วยกันจึงจะเกิดสี

3) สีเบสิกหรือสีแคทไอออน (Basic / Cationic Dyes) สีกลุ่มนี้เป็นสีที่สดใสที่สุดในกลุ่มสีสังเคราะห์ ไม่ทนแสง ละลายน้ำ มีสถานะเป็นแคทไอออนหรือไอออนชนิดอื่น ถ้าใช้กับใยเซลลูโลสต้องย้อมด้วยสารช่วยติด (Mordant) เช่น กรดแทนทานิก ก่อน

4) สีไคเรกท์หรือสีย้อมตรง (Direct Dyes) เป็นสีที่ละลายได้ในน้ำเย็นธรรมดา ซึมเข้าไปในเส้นใยได้โดยไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ และลอกหลุดออกได้ง่ายเช่นเดียวกัน เป็นสีที่ไม่คงทนต่อการซัก เหมาะสำหรับใช้พิมพ์ผ้าที่ไม่ต้องซักล้างบ่อย ๆ สีพิมพ์ไคเรกท์จะประกอบด้วยสีแบ่งพิมพ์ Wetting agent ตัวทำละลาย สารช่วยดูดความชื้นและต่างอ่อน

5) สีดีสเพส (Disperse Dyes) เดิมเรียกว่า สีอะซิเตท (Acetate) ใช้พิมพ์เส้นใยอาซิเตท และเส้นใยโพลีเอสเตอร์

6) สีมอดแดนท์ (Mordant Dyes) มอดแดนท์ หมายความว่าสารที่ช่วยให้เกิดสี และติดเส้นใยได้ ตัวมอดแดนท์ที่ใช้เป็นเกลือของโลหะหลายชนิด เช่น โครเมียม อลูมิเนียม และ เหล็ก สีชนิดนี้ทนต่อการซักดีมาก ใช้พิมพ์ผ้าขนสัตว์และไหม

7) สีธรรมชาติ (Natural Dyes) สีที่สกัดได้จากวัตถุดิบจากแหล่งธรรมชาติเช่น พืช สัตว์ และแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นมาจากกระบวนการตามธรรมชาติ มีบทบาทเกี่ยวข้องกับวิถีการดำรงชีวิตของมนุษย์มายาวนานนับตั้งแต่สมัยโบราณ มนุษย์ได้เรียนรู้ที่จะนำสีจากวัสดุธรรมชาติมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น ย้อมสิ่งทอ

8) สีพิกเมนต์ (Pigment Dyes) สีพิกเมนต์ไม่ละลายน้ำ ไม่ทำปฏิกิริยากับเส้นใย เมื่อใช้พิมพ์จึงต้องใช้สารยึดติด (Binder) ทำหน้าที่เป็นตัวยึดพิกเมนต์และเส้นใยติดกันได้ มีความคงทนต่อการขัดสีดี แต่ไม่ทนทานต่อการซัก และผิวสัมผัสของผ้ามักกระด้าง

9) สีรีแอกทีฟ (Reactive Dyes) เป็นตัวสีปรับปรุงใหม่ละลายน้ำได้ เป็นสีย้อมใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส มีคุณสมบัติละลายน้ำและดูดติดเส้นใย ทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย เมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวสีจะยึดติดกับเส้นใย สามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยรวมกันเป็นสารประกอบตัวใหม่ ทำให้ติดทนทานดี ทนแสงและทนการซักมีสีมากมายค่อนข้างสดใส แต่ถ้าต้องการพิมพ์สีเข้มจริง ๆ เช่น สีดำหรือสีกรมท่า จะค่อนข้างเปลืองตัวสีมากกว่าสีวัต มีชนิดที่ปรับปรุงเพื่อใช้พิมพ์โดยเฉพาะ

10) สีโซลเวนท์ (Solvent Dyes) เหมาะสมที่สุดสำหรับงานพลาสติกเพื่อที่จะทำให้เป็นสีต่าง ๆ มีความเข้มของสีมากมีความคงทนต่อความร้อน แสงกรดและด่าง ถูกนำมาใช้ในงานทั่วไป เช่น พลาสติก, สีย้อมไม้, เทียน, หมึกพิมพ์

11) สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes) ใช้ย้อมเส้นใยพวกเซลลูโลสได้ทุกชนิด ปกติสีย้อมประเภทนี้ไม่ละลายน้ำหรือ ละลายได้เพียงเล็กน้อย แต่จะละลายได้ในสารละลายของสารรีดิวส์ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยกลุ่มซัลโฟนิค (sulfonic groups) สีย้อมชนิดนี้เมื่อทำให้ละลายน้ำแล้วจะแทรกซึมตัว เข้าไปในเส้นใยได้

12) สีวัต (Vat Dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ในการใช้ต้องทำให้ละลายโดยใช้สารรีดิวส์ และต่างก่อนจึงเกาะติดเส้นใย หลังจากนั้นทำการออกซิไดส์สีให้กลับเป็นสีเดิมที่ไม่ละลายน้ำจับอยู่ภายในเส้นใย สีวัตมีความคงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ได้ดี เหมาะกับเส้นใยเซลลูโลส (Vigo, 1994)

13) สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

14) สีออกซิเดชัน (oxidation dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำโดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์ (ชนิษฐา, 2550)

2.2 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีความหลากหลายอยู่มาก เพราะมีจำนวนกว่า 3,000 โรงงานทั่วทั้งประเทศไทย ดังนั้นคุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด และหลังการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสีย ๆ และที่ผ่านการบำบัด พบว่าคุณสมบัติของน้ำเสีย ค่าบีโอดี จะแปรเปลี่ยนไป ตั้งแต่ 80-2,000 มก./ล แล้วแต่ประเภทของอุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งอาจจะมีเฉพาะโรงทออย่างเดียว หรือมีทั้งโรงทอและโรงย้อมสี การย้อมสีบางครั้งต้องทำการลอกแบ่งที่ติดอยู่กับเนื้อผ้าเดิม ทำให้มีค่าบีโอดีสูงในน้ำเสีย ซึ่งความสกปรกที่คิดเป็นบีโอดีนี้ ก็จะหลากหลายแล้วแต่ประเภทสิ่งทอนั้น ๆ (สุจินต์, 2534)

ค่าความสกปรกของอุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทย ตามแฟ้มข้อมูลรายงานของบริษัท แชน.อี.68 แลบ จำกัด มีอัตราส่วนของค่าบีโอดีและซีโอดี ดังแสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 อัตราส่วนบีโอดีและซีโอดี ของน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม ๆ

ประเภทอุตสาหกรรมฟอกย้อม	บีโอดี (มก./ล.)	ซีโอดี (มก./ล.)	บีโอดี/ซีโอดี	หมายเหตุ
ฟอกย้อมผ้าฝ้ายแบบหนา	512	2,108	0.24	ส่วนใหญ่เป็นผ้าฝ้าย
ฟอกย้อมผ้าฝ้ายแบบธรรมดา	403	1,403	0.29	ส่วนใหญ่เป็นผ้าฝ้าย
ฟอกย้อมด้าย	113	423	0.27	ส่วนใหญ่เป็นผ้าฝ้าย
สารเคมีฟอกย้อมต่าง ๆ	580	1,644	0.35	
สีฟอกย้อม	1,410	7,000	0.20	

ที่มา: มั่นสิน, 2551

2.2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากการประกอบกิจการโรงงานในประเทศไทย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 เพื่อให้มีค่ามาตรฐานและวิธีการตรวจสอบน้ำทิ้งจากโรงงานให้เหมาะสมและเป็นไปตามมาตรฐานสากล รวมถึงเป็นการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน อาศัยอำนาจตามในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน เว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (dilution) ประกาศบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2560 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) มาตรฐานน้ำทิ้งต้องมีคุณภาพ ดังตาราง 2.3

ตาราง 2.3 ควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560

ดัชนีคุณภาพน้ำ	มาตรฐานคุณภาพน้ำ
ความเป็นกรดและด่าง (pH)	ตั้งแต่ 5.5 ถึง 9.0
อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส
สี (Color)	ไม่เกิน 300 เอทีเอ็มไอ
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids หรือ TDS)	(1) กรณีระบายลงแหล่งน้ำ ต้องไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (2) กรณีระบายลงแหล่งน้ำที่มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเกินกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำทิ้งที่จะระบายได้ต้องมีค่าเกินกว่าค่าของแข็งละลายน้ำ ทั้งหมดที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้นไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซัลไฟด์ (Sulfide)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไซยาไนด์ (Cyanides CN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำมันและไขมัน (Oil and Grease)	ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบ

ตาราง 2.3 (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	มาตรฐานคุณภาพน้ำ
ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียมไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
สารหนู (As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีลีเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560

2.2.2 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์

2.2.2.1 ค่ากรด-ด่าง (pH) เป็นค่าที่บอกลักษณะความเป็นกรดเป็นเบส ของสารเคมีจากปฏิกิริยาของไอออนของไฮโดรเจน (H^+) โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตในน้ำหรือจุลินทรีย์จะดำรงชีพได้ดีในสภาวะที่เป็นกลาง ถ้ามี pH สูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้ระบบนิเวศน้ำเสียหาย น้ำที่ควรมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6-9 เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและการนำไปใช้ประโยชน์

2.2.2.2 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ปริมาณของออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

2.2.2.3 บีโอดี (Biological Oxygen Demand) ปริมาณของออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส BOD เป็นค่าที่บ่งบอกถึงผลกระทบของน้ำเสียที่มีต่อออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยทั่วไปจะวัดในรูปของ BOD_5 ซึ่งหมายถึงปริมาณของออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเวลา 5 วัน (มณฑล และ สุทธิพงศ์, 2546)

2.2.2.4 สี (Color unit) เป็นวิธีการวัดสีโดยการเปรียบเทียบแพลทตินัมโคบอลต์ โดยการวัดสีของแพลทตินัมโคบอลต์มาตรฐาน ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ หน่วยสีที่วัดได้เป็น ADMI

2.3 วิธีการกำจัดสีย้อมผ้า

การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งการบำบัดทางชีวภาพ การบำบัดทางเคมี ในอดีตมีการใช้วิธีการบำบัดโดยกระบวนการทางฟิสิกโคเคมีคอล (Physicochemical) เช่น กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) การดูดติดผิว (Adsorption) กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งวิธีใดจะมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด ขึ้นกับชนิดและคุณสมบัติของสีนั้น ๆ (Fox and Dulay, 1993)

2.3.1. เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical technology)

เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การดักด้วยตะแกรง (screening) การทำให้ลอย (floating) การดูดซับ (adsorption) และการกรอง (filtration) เป็นต้น ซึ่งเป็นการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย

2.3.1.1 การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลว หรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง เนื่องจากมีรูขนาดเล็ก (Microporosity) (Duygu and Van, 2010) ทำให้สามารถกำจัดสีแท้และสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำวัตถุดิบพวกสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านหิน พิโตรเลียม กะลามะพร้าว เปลือกถั่วเมล็ดแข็ง กากขานอ้อย ชี้อ้อย กระดูกสัตว์ เป็นต้น นำมาเผาด้วยความร้อนในเตาอับอากาศ และเผาเร่งที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดความพรุน (Porosity) แล้วอัดด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 200-1,600 องศาเซลเซียส (Roop and Meenakshi, 2005) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้มากที่สุดความพรุนมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวล (Surface area per mass ratio) ระหว่าง 500-1,600 ตารางเมตรต่อกรัม (ไพศาล, 2549) จากนั้นนำไปบดเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-2 มิลลิเมตร เรียกว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powered activated carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-50 ไมครอน ในการกำจัดสีนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด โดยบรรจุในถังรูปทรงกระบอก (Fixedbed system) แล้วปล่อยให้สีไหลผ่านชั้นถ่านด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสม คือ ระหว่าง 5-25 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อหนึ่งตารางเมตรของพื้นที่หน้าตัดถัง และมีระยะเวลาสัมผัส (Contact time) ประมาณ 10-15 นาที (อัคร, จารุรัตน์ และศักดิ์ชัย, 2542) ซึ่งจะเกิดกลไกการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ โดยโครงสร้างมีความพรุนสูงทำให้เกิดผิวสัมผัสโมเลกุลภายในจะถูกกระทำด้วยแรงเท่าๆ กันทุกทิศทาง การกำจัดสีด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นเพียงวิธีการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ออกจากน้ำโดยโมเลกุลของสิ่งสกปรกจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของเม็ดถ่านกัมมันต์ โมเลกุลของสีจะพุ่งกระจายเข้าไปในรูของเม็ดถ่านจนเต็มถ่านกัมมันต์จะเสื่อมสภาพแต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ซึ่งมีต้นทุนสูง เพราะการเผาและการกำจัดกากทำให้ไม่เป็นที่นิยม (พวงรัตน์, 2548; ธนภฤต, 2552)

2.3.1.2 การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane)

กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ ออสมอซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration) แต่วิธีอัลตราฟิวเตรชันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีขนาดรูเปิดของเยื่อกรองใหญ่ ไม่สามารถกรองอนุภาคของสีออกจากน้ำเสียได้ (กัลยา, 2547; ศุภลักษณ์, 2552) ส่วนวิธีออสมอซิสย้อนกลับเหมาะสำหรับการกำจัดสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้แก่ สีแท้ เป็นการกรองแยกน้ำออกจากของแข็งแขวนลอยหรือของแข็งที่ละลายน้ำ โดยผ่านรูพรุนขนาดเล็กและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลผ่านตัวกรอง เป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสมอซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย และเยื่อแผ่นออสมอซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล ซึ่งเยื่อแผ่นแรกสามารถกำจัดสีปรากฏซึ่งมาจากโรงฟอกย้อมได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 (ชนกฤต, 2552) สำหรับกระบวนการกำจัดสีโดยใช้แผ่นกรองนาโนใช้หลักการเหมือนออสมอซิสผกกลับ แต่การกรองผ่านแผ่นนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากมีรูขนาดเล็กกว่า ทำให้แยกสีออกจากน้ำได้ดีกว่าโดยสามารถแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารอนินทรีย์เชื้อจุลินทรีย์กรดอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งขนาดของแผ่นกรองส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงประกอบที่มีรูพรุนประมาณ 1.5-2.5 นาโนเมตรและมีช่วงความดันที่ใช้ประมาณ 10-34 บาร์ (Van et al, 1995; Seungkwan and Menachem, 1997; Yacubowicz, 2005)

2.3.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (Chemical Technology)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่าง ๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือเมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง

2.3.2.1 การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation) การรวมตะกอนด้วยสารเคมี เป็นกระบวนการกำจัดสีแท้และสีปรากฏในน้ำเสียโดยใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดต่างสารที่ นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน (Coagulant) คือ สารส้ม (Aluminium Sulfate; Alum) ปูนขาว (Calcium oxide) และเหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) หรือเฟอร์รัสคลอไรด์ ($FeCl_2$) โดยถ้า โมเลกุลของสีมีขนาดเล็ก ละลายน้ำได้ดี การเกิดตะกอนของสีจะไม่สามารถทำได้แต่ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตะกอนให้เป็นอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) (ชนกฤต, 2552)

การกำจัดสีโดยการสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำให้ตะกอนหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloid) รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยมีประจุไฟฟ้าลบเป็นส่วนใหญ่ เมื่ออนุภาคเหล่านั้นมาพบกันก็จะผลัดกันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำลายประจุของอนุภาคหรือทำให้อนุภาคเป็นกลางโดยการ

เติมสารเคมีสร้างตะกอนเรียกว่า กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) หลังจากนั้นเกิดกระบวนการรวมกัน (Flocculation) ได้มากขึ้นโดยการเติมสารเคมีรวมตะกอน (Flocculants) ลงไปช่วยยึดหรือจับให้กลุ่มตะกอนที่รวมตัวกันเข้ามาจับเป็นกลุ่มตะกอนใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (Floc) เมื่อตะกอนกลุ่มใหญ่ขึ้นก็มีน้ำหนักมากขึ้นก็จะสามารถตกตะกอนออกจากน้ำเสียได้

2.3.2.2 การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี ใช้สารเคมีเป็นปัจจัยสำคัญในการออกซิไดส์สารประกอบต่าง ๆ ในน้ำเสีย โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิแดนซ์อย่างแพร่หลายมี 2 วิธี ได้แก่ สารเคมีเฟนต์ัน (Fenton's reagent) และโอโซน (O_3)

1) กระบวนการเฟนต์ัน (Fenton process) คือ การออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนไดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\bullet) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์สารอินทรีย์ (สุทธิณี, 2551) ซึ่งไอออนบวกของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็นตัวกลาง สำคัญ ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสูง แสดงถึงความสามารถในการในการรับอิเล็กตรอนถ้าตัวออกซิไดส์ที่แรงจะรับอิเล็กตรอนได้ง่ายมาก (เกรียงศักดิ์, 2546) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากจนเปลี่ยนเป็นรูปคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Yang and James, 2006) มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีของโรงงานย้อมสิ่งทอ

2) กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone oxidation) การกำจัดสีด้วยโอโซนทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (Chromophores) แตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กและสีหายไปโดยสามารถแยกสลายโมเลกุลของสีที่มีความยาวมากให้มีขนาดสั้นลง ทำให้สีของน้ำเสีลดลงซึ่งโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงมีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสีในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายในน้ำของออกซิเจน สามารถกำจัดสีแท้จริง ทำลายโครงสร้างโมเลกุลแบบโครงสร้างแบบโซ่ของสารอินทรีย์ (Rice et al, 1980) ความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนให้นานขึ้น และสีของน้ำลดลงมากที่สุด เมื่อผ่านน้ำทิ้งเข้าระบบเป็นเวลา 60 นาที ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีโดยความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12 ± 0.1 เป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชันได้ดีที่สุด (วราภรณ์, ต่อพงศ์ และพิลาณี, 2550)

2.3.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological technology)

เทคโนโลยีทางชีวภาพสามารถนำมากำจัดสีแท้และสีปรากฏจากจากน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม เยื่อกระดาษ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.3.1 การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae absorption)

สาหร่ายสามารถกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโดยการดูดซับสีเหล่านั้นภายใต้สภาวะที่มีแสงโดยเปลี่ยนโมเลกุลที่มีสีเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี (Dilek á F. B., Taplamacioglu á H. M. and Tarlan E. , 1999) ซึ่งสาหร่ายช่อพริกไทย (*Caulerpa lentillifera*) สามารถดูดซับสีเบสิคจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้ (พิมล, 2549) นอกจากนี้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และกลุ่มสาหร่ายสีเขียวมีประสิทธิภาพกำจัดสีของโรงงานผลิตสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ โดยมีปัจจัยด้านปริมาณความเข้มข้นของอาหาร ปริมาณความเข้มข้นแสง ปริมาณความเข้มข้นของเซลล์ตั้งต้น รวมทั้งค่าความเป็นกรดต่าง และเมื่อนำปฏิกิริยาเฟนตันและโอโซนมาบำบัดร่วมกับการใช้สาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์ พบว่าสาหร่ายทั้งสองสามารถกำจัดสีได้เพิ่มขึ้น (ชินจิต, 2542)

2.3.3.2 การย่อยสลายโดยเชื้อรา (Fungi decomposition)

กระบวนการกำจัดสีในน้ำทิ้งโดยเชื้อราเป็นการสร้างเอนไซม์นอกเซลล์กลุ่มลิกนินโกลิติก (Ligninolytic enzyme) (Iimura Y., Hartikainen P. and Tatsumi K. 1996; Leontievsky A. et al, 2001) ย่อยสลายเนื้อไม้โดยเฉพาะเห็ดราในกลุ่มเชื้อราขาวหรือเห็ดราขาวหรือเห็ดราสีน้ำตาล (White or brown rot fungi) ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนขอนไม้ โดยในเนื้อไม้มีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ลิกนินเซลลูโลส ทำให้สามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษได้ (พิมพชนก, 2546) นอกจากนี้เชื้อรา *Aspergillus fumigates* สามารถผลิตสารแลคเคสเปอร์แมงกานีส และไซลาเนสซึ่งมีประสิทธิภาพกำจัดสีโดยย่อยสลายลิกนินในช่วงความเป็นกรดต่าง 6.0-9.0 (Debendra K. Sahoo and Rimpay Gupta, 2005)

2.3.3.3 การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition)

การย่อยสลายสีด้วยแบคทีเรียสามารถลดสีหลายประเภทโดย (Walker and Weatherley, 2000) ศึกษาการดูดซับสีกลุ่มแอนทราควิโนนโดยเชื้อ *Bacillus gordonae*, *B. benzeovorans* และ *Ps. putida* ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับร้อยละ 13, 19 และ 18 ตามลำดับ และการย่อยสลายสีรีแอกทีฟ Red 2 พบว่า สามารถกำจัดได้ดีโดยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก แบคทีเรียที่มีความสำคัญในการกำจัดสี 3 สกุล คือ *Pseudomonas* sp., *Proteus* sp. และ *Klebsiella* sp. (ตาลีศา, 2542)

นอกจากนี้ วีรานูช, ธนสิริ และ วิชชุพร, (2551) ศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียสายพันธุ์ *Burkholderia glumae* ในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่ากระบวนการบำบัดแบบไม่เติมอากาศให้ผลเร่งการกำจัดสีได้ดีกว่าการบำบัดแบบเติมอากาศ โดยสามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งได้ร้อยละ 76 ในเวลา 7 วัน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลาย คือ ค่าความเป็นกรดต่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญรวมถึงความต้องการอากาศในการเจริญของเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายสี

2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการโอโซนเนชั่น

กระบวนการโอโซนเนชั่นปัจจุบันถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการนี้ไม่ก่อให้เกิดผลผลิตที่เป็นพิษต่อน้ำที่บำบัด กระบวนการโอโซนเนชั่นโดยโอโซน เป็นการกำจัดสิ่งสกปรกในรูปสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพด้วยกระบวนการทางเคมีที่ใช้โอโซน เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ซึ่งเอเจนต์ที่รุนแรง ซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนได้ ผลของการใช้โอโซนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ ทำให้สามารถลดความเป็นพิษของสารอินทรีย์ และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้

2.4.1 คุณสมบัติของโอโซน

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของโอโซน โอโซน (Ozone) มีสูตรโมเลกุล คือ O_3 และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 อยู่ในสถานะก๊าซอุณหภูมิและความดันปกติ มีจุดเดือดเท่ากับ $111.9\text{ }^{\circ}C$ ที่ความดันบรรยากาศและไม่เสถียร โอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ (Oxidant/oxidizing agent) ที่รุนแรง มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายกลิ่น สี และรสในน้ำ และสามารถละลายในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของสารละลายในน้ำของออกซิเจนแต่จะไม่เสถียรในน้ำ โอโซนมีความเสถียรในอากาศมากกว่าในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอากาศที่เย็นและแห้ง (Weber, 1972; Chrermisinoff and Chereminoff, 1993) ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันของโอโซนในฐานก๊าซ

โอโซนมีสีอ่อนมาก อาจมีแววสีน้ำเงินให้เห็นบ้าง ความหนาแน่นประมาณ 1.6 เท่าของอากาศ ที่ความเข้มข้นน้อย ๆ อาจกล่าวได้ว่าเป็นก๊าซไร้สี และไม่เผาไหม้ที่ความเข้มข้นต่ำ แต่ที่ระดับความเข้มข้นสูง โอโซนจะมีกลิ่นฉุนค่อนข้างรุนแรง (มันสิน, 2539)

โอโซนเป็นก๊าซที่มีโมเลกุลที่เคลื่อนไหวคล่องแคล่วว่องไว เกิดจากการรวมตัวของออกซิเจน 3 ตัว ในสภาวะไม่เสถียรในช่วงอุณหภูมิปกติ $18-30\text{ }^{\circ}C$ โอโซนจะแยกตัวกลายเป็นอะตอมของออกซิเจน ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Majumdar and Sproul, 1974) เครื่องผลิตโอโซนแบบ Commercial จะสามารถผลิตโอโซนจากอากาศได้เข้มข้นประมาณ 1-3 % แต่ถ้าผลิตจากออกซิเจนบริสุทธิ์จะมีความเข้มข้นสูงถึง 2-6 % (Chrermisinoff and Chereminoff, 1993) ภาชนะบรรจุหรืออุปกรณ์สัมผัสโอโซนต้องเป็นวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อน เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ที่รุนแรงมาก และปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซนจะปล่อยความร้อนออกมา (มันสิน, 2539)

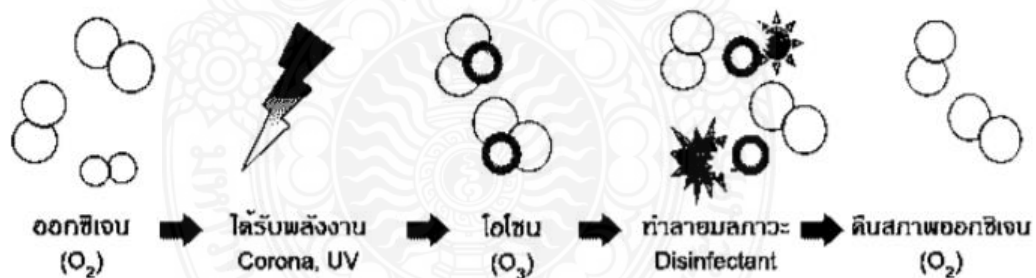
โอโซนเป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดความระคายเคืองอย่างรุนแรงถ้าได้รับโดยตรงและในปริมาณเข้มข้นที่สูง (เป็นอันตรายโดยตรงต่อปอดและตา ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์อักเสบ) ผู้ที่อยู่ในบรรยากาศของโอโซนที่เข้มข้นอาจถึงแก่ความตายได้ อย่างไรก็ตามโอโซนความเข้มข้นเพียง 0.01-0.02 ppm โดยปริมาตร (Chrermisinoff and Chereminoff, 1993; สุรพล, 2545) ก็มีกลิ่นให้เหม็นให้คนรู้ตัว คนสามารถทนโอโซนได้ถึง 0.1 ppm โดยไม่เป็นอันตราย แต่ถ้าความเข้มข้นสูงถึง 1 และ 4 ppm คนจะทนได้ 8 และ 1 นาทีตามลำดับ โดยไม่มีอาการผิดปกติ แต่ถ้านานกว่านี้จะเกิดอาการ

ผิปกติ เช่น ไอ คอแห้ง หายใจลำบาก เคืองตา มีน้ำตาไหล ปวดหัว และแสบเยื่อจมูก ถ้าให้คนดม โอโซนเข้มข้นประมาณ 1 % (ที่ผลิตได้จากเครื่องโดยตรง) จนถึงแก่ความตายภายใน 1 นาที (มันสิน, 2539)

การผลิตโอโซน ในการผลิตโอโซนกระทำได้โดยผ่านอากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ (O_2) ไปยังช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์ประมาณ 15,000-20,000 โวลต์ (สภาวะนี้เรียกว่า Corona discharge หรือ Cold plasma discharge) ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจนบางส่วนจะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน (O) โดยการวิ่งชนของอิเล็กตรอน (e^-) จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจนกลายเป็นโอโซน (O_3) (Chermisinoff and Chereminoff, 1993; วราภรณ์, 2540)

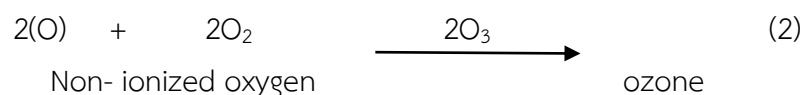
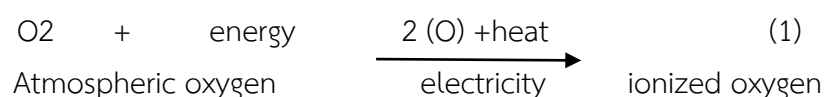
2.4.2 การผลิตโอโซน

การผลิตโอโซนสามารถผลิตได้ทั้งจากอากาศแห้งและออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยให้อากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่ความต่างศักย์สูงประมาณ 15,000 – 20,000 โวลต์ (สภาวะนี้เรียกว่า Corona discharge หรือ Cold plasma discharge) ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจนบางส่วนจะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจนโดยการวิ่งชนของอิเล็กตรอน (e^-) จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) กลายเป็นโอโซน (O_3) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 (Chermisinoff and Chereminoff, 1993; มันสิน, 2540; วราภรณ์, 2540)



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตโอโซน
ที่มา : สุพิชฌาย, 2550

ปฏิกิริยาการผลิตโอโซนอธิบายได้ดังสมการ



ในสมการที่ 1 โมเลกุลออกซิเจน (O_2 ; atmospheric oxygen) จะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน (O) และให้พลังงานความร้อน จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับของโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) เกิดเป็นโอโซน (O_3) ดังสมการที่ 2

2.4.3 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร สามารถสลายตัวเป็นออกซิเจน โดยแตกตัวให้ radical ต่าง ๆ ได้แก่ Hydroxyl radical (OH^*), OH_3 , OH_4 และ Super oxide (O_2^-) ซึ่ง radical ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ (strong oxidant) ตาราง 2.4 แสดงความสามารถของโอโซนในการออกซิไดส์สูงกว่าคลอรีนถึง 1.52 เท่า และสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

ตาราง 2.4 การเปรียบเทียบขอความสามารถในการออกซิไดส์ของสารออกซิแดนต์ต่างๆ

Compound	Oxidation potential (volts)	Relative power of chlorine
Fluorine	3.06	2.25
Hydroxyl radical (OH^*) [*]	2.80	2.05
Atomic oxygen	2.42	1.78
Ozone	2.07	1.52
Hydrogen peroxide	1.77	1.30
Perhydroxyl radical	1.70	1.25
Permanganate	1.67	1.23
Chlorine oxide	1.50	1.10
Hypochlorous acid	1.49	1.10
Bromine	1.09	0.80
Hydrogen oxide	0.87	0.64
Iodine	0.54	0.40
Oxygen	0.40	0.29

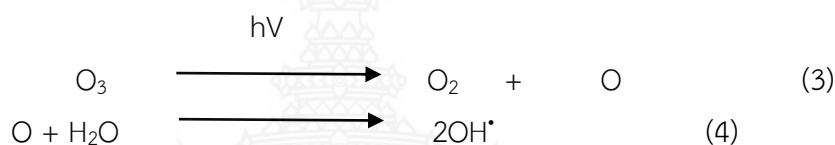
หมายเหตุ * เป็นรูปแบบเมื่อโอโซนแตกตัว

ที่มา : Lin and Yeh (1993)

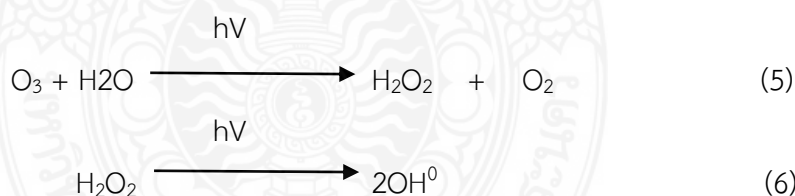
การสลายตัวของโอโซนในน้ำเป็นลักษณะที่สำคัญที่นำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการโอโซนเนชั่นเนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแน่นอนสูงปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโอโซน (Tomiyaso, Fukutomi and Gordon, 1985) คือ pH ของสารละลาย แสง UV ความเข้มข้นของโอโซนและ free radical ที่มีอยู่ในสารละลาย

การสลายตัวของโอโซนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นด่าง (alkalinity) เพิ่มขึ้นทำให้โอโซนทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ได้ hydroxyl radical (OH^\bullet) เป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งกระบวนการนี้จะมีไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เป็นตัว promoter ของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน ดังนั้นครึ่งชีวิตของโอโซนจึงค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นด่างโดยที่ pH 10 ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์มีค่าประมาณ 30 นาที สารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติเป็นทั้งตัว inhibitor และตัว promoter ของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน (Langlais, Reckhow and Brink, 1991; Ku, Su and Shen, 1996; Gottschalk, Libra and Saupe, 2000)

การสลายตัวของโอโซนในสภาวะก๊าซภายใต้อิทธิพลของแสง UV จะได้โมเลกุลของออกซิเจนและอะตอมของออกซิเจน (McGrath and Norrish, 1960) หลังจากนั้นออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็น hydroxyl radical เป็นผลิตภัณฑ์ดังสมการ



ส่วนการสลายตัวของโอโซนในสารละลายที่เป็นน้ำ เมื่อกระตุ้นด้วยแสง UV จะได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อกัน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะแยกได้เป็น hydroxyl radical (OH^\bullet) 2 โมเลกุลดังสมการที่ 5 และ 6 โดยที่แสง UV มีอิทธิพลต่อการสลายตัวของโอโซนเมื่อสารละลายเป็นกรด (pH ต่ำสุดเท่ากับ 2) และอิทธิพลของแสง UV ต่อการสลายตัวของโอโซนจะลดลงเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น (Ku, Su and Shen, 1996)

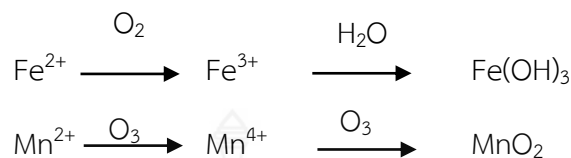


2.4.4 การนำโอโซนมาประยุกต์ใช้

โอโซนถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในการทำน้ำดื่มให้ปราศจากจุลินทรีย์ (Disinfection) นอกจากนี้โอโซนยังสามารถนำมาใช้ประยุกต์ด้านต่าง ๆ คือ

2.4.4.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (Oxidation of Organics) ดังกล่าวมาแล้วโอโซนเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวได้เรดดิคัลต่าง ๆ ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่าง ๆ การออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนอาจสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างสารเคมีของสารอินทรีย์นั้น ๆ

2.4.4.2 การออกซิไดซ์สารอนินทรีย์ (Oxidation of Inorganics) โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำ โดยเปลี่ยนวาเลนซ์จากสองเป็นสามสำหรับเหล็ก ซึ่งทำให้เหล็กและแมงกานีสตกตะกอนได้ ดังแสดงในสมการเคมี



โอโซนสามารถออกซิไดซ์ไฮยาไนด์เป็นไฮยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ไดโนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการเคมี



การใช้โอโซนร่วมกับต่างในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย สามารถลดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่ต้องการในการตกตะกอนให้ต่ำลงได้ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดการใช้กรดในการปรับให้เป็นกลางลงได้

2.4.4.3 การกำจัดสี (Colour Removal) สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี สามารถใช้โอโซนออกซิไดซ์สารอินทรีย์เหล่านี้ ซึ่งจะทำให้สีของน้ำเสียลดต่ำลงโดยโมเลกุลโอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ก่อให้เกิดสี ประสิทธิภาพการกำจัดอาจเพิ่มสูงขึ้นได้ โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ (สุเมธ, 2539)

2.4.5 การวัดปริมาณโอโซนในอากาศ

วิธีนี้จะวัดปริมาณความเข้มข้นของสารที่มีความสามารถถูกออกซิไดซ์ทั้งหมด (total oxidant concentration) ในก๊าซตัวอย่างโดยการใช้สารละลายเป็นตัวดูดซึมและทำปฏิกิริยาสารละลายที่ใช้ได้แก่ สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ในการวิเคราะห์ก๊าซตัวอย่างจะผ่าน เข้าไปสัมผัสกับสารละลายด้วยอัตราคงที่ จากนั้นจะวัดปริมาณไอโอไดด์ (iodide) ที่เหลือในสารละลายเพื่อนำไปหาปริมาณสารที่ถูกออกซิไดซ์ได้ทั้งหมดในก๊าซตัวอย่าง (รวีศ, 2548)

2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับไทเทเนียมไดออกไซด์

2.5.1 ลักษณะทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์

ลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ ซึ่งประกอบด้วยไทเทเนียม 59.95 โดยโมล และออกซิเจนร้อยละ 40.05 โดยโมล มีมวลโมเลกุล 79.90 กรัมต่อโมล มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,850 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นประมาณ 4.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบ ได้แก่ ชนิดอะนาทาส (anatase) ชนิดรูไทล์

(rutile) (Wang *et al.*, 2004) และชนิดบรูไคท์ (brookite) ซึ่งชนิดอะนาเทส และรูไทล์มีโครงสร้างผลึกแบบเททระโกนัล (tetragonal) ที่ประกอบด้วยอะตอมของไทเทเนียม ล้อมรอบด้วยอะตอมของไทเทเนียมจำนวน 6 อะตอม โดยชนิดรูไทล์มีโครงสร้างผลึกคล้ายปริซึม โปรงบางและมักจะอยู่กันเป็นคู่ ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบของไทเทเนียม (Ti) ที่มีสถานะออกซิเดชัน +4 และไม่มีไอออน Ti^{4+} ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในกระบวนการบำบัดทางสิ่งแวดล้อม มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสี ซึ่งมีความเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีจากสีย้อมผ้าร่วมกับโอโซน (O_3) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสี

2.5.2 ประเภทของไทเทเนียมไดออกไซด์

ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ แบ่งตามโครงสร้างของผลึกได้ 3 แบบ แสดงดังภาพที่ 2.2 ได้แก่

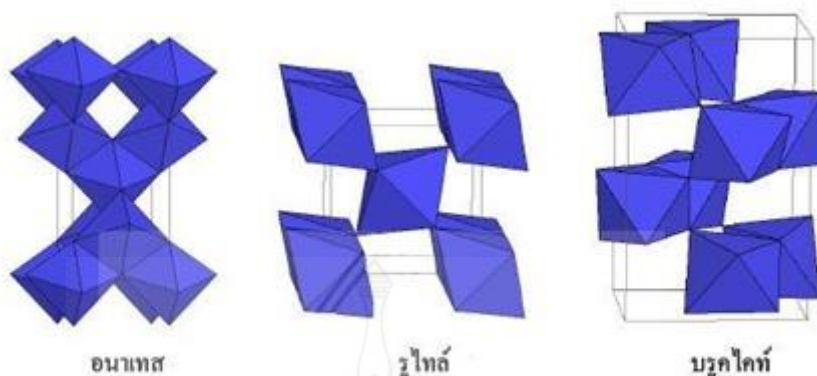
2.5.2.1 รูไทต์ (Rutile) สามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ส่วนมากจะเป็นรูไทต์ เกือบทุกโรงงาน เช่น โรงงานสี โรงงานทำเครื่องสำอาง โรงงานทำอาหาร และบางครั้งพบในหินอัคนี

2.5.2.2 อะนาเทส (Anatase) สามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ารูไทต์ ผลึกประเภทนี้นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงขั้นสูง

2.5.2.3 บรูไคท์ (Brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น และมีโครงสร้างผลึกแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) (ฟิลลิปส์, 2555)

โดยปกติโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นแบบรูไทต์ได้ที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกทั้งแบบอะนาเทสและแบบรูไทต์เป็นที่นิยมนำมาศึกษาสำหรับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้สูงกว่า เนื่องจากโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสเกิดจากการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและโฮลในอัตราที่ต่ำกว่าเพราะแถบช่องว่างพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างผลึกแบบรูไทต์ ยิ่งไปกว่านั้นโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ

อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา โครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส และแบบรูไทต์ให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสเพียงอย่างเดียว เพราะในระหว่างการเร่งปฏิกิริยาอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะถูกส่งผ่านจากโครงสร้างผลึกแบบรูไทต์ไปยังแบบอะนาเทส ซึ่งช่วยลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Li, F. B., and Li, X. Z., 2002)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละแบบ
ที่มา : ฟิสิกส์, 2555

2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีของไทเทเนียมไดออกไซด์

ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 dosage) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (initial dye concentration) อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ความเข้มของแสง (light intensity) และปริมาณไอออนบวก-ลบในสารละลาย (dissolved anions-cations) (วุทธิพันธ์, 2544)

2.5.3.1 ค่าพีเอช ประสิทธิภาพในการโฟโตออกซิเดชัน ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลาย ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสีย้อมที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เพราะประจุไฟฟ้าที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงเมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำ โดยประจุที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำ และจะเป็นลบเมื่อค่าพีเอชสูง อีกทั้งยังทำให้ช่องว่างพลังงาน (E_g) ของไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงได้ด้วย นอกจากนี้สีย้อมผ้าต่างชนิดกันยังมีความสามารถในการสลายตัวได้ในสภาวะค่าพีเอชต่างกัน ซึ่งการสลายตัวนี้มีผลมาจากความสามารถในการดูดเกาะของสีย้อมผ้าที่ผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย

2.5.3.2 ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) ทำปฏิกิริยาและเร่งให้เกิดปฏิกิริยาและเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสี และไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สีย้อมในการละลายยึดเกาะ การยึดเกาะของสีย้อมขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นหนึ่งในปัจจัยควบคุมการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลายจะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันลดลง เพราะจะไปขัดขวางแสงยูวีที่ส่องผ่านลงไปโดยสารละลาย ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคของแสงและปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) ลดลง

2.5.3.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เมื่อแสงยูวีถูกดูดกลืนโดยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายอยู่ในสารละลาย และสีย้อมในสารละลาย หากความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่ำ จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง เมื่อเทียบกับความเข้มข้นสีที่มีค่าสูงจะลดการส่องผ่านของแสงยูวี แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับโครงสร้างเริ่มต้นโมเลกุลของสีย้อมด้วยเช่นกัน ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนต่ำความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมก็จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด แต่ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนมาก ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดด้วย

2.5.3.4 อุณหภูมิ จากทฤษฎีทางจลนพลศาสตร์ (kinetic theory) อุณหภูมินับเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้น อัตราการกำจัดสีย้อมในสารละลายจะเพิ่มขึ้น โดยค่าคงที่อัตราการทำปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius)

2.5.3.5 ปริมาณออกซิเจนละลาย อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำหน้าที่ยึดจับอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้าทำให้เกิด O_2^- และหลังจากนั้น O_2^- ก็สามารถทำปฏิกิริยากับโปรตอน (H^+) ในสารละลาย แล้วเกิดเป็นเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (peroxide radical, HO_2^{\cdot}) ซึ่งมีความว่องไวสูงในการทำปฏิกิริยากับสารอื่นเช่นเดียวกับ O_2^- จึงสามารถย่อยสลายสีย้อมได้

2.5.3.6 ปริมาณไอออนบวก-ลบ ในสารละลาย โดยปกติแล้วน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีไอออนที่มีประจุลบ (anions) และประจุบวก (cations) ประกอบอยู่ด้วย เช่น คลอไรด์ (Cl^-) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไนเตรต (NO_3^-) และฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เป็นต้น ซึ่งไอออนบางชนิดจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาในขณะที่บางชนิดจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา เช่น เหล็ก (Fe^{3+} และ Fe^{2+}) แมงกานีส (Mn^{2+}) และสังกะสี (Zn^{2+}) หากมีปริมาณความเข้มข้นของไอออนโลหะสูง อาจจะต้องทำการบำบัดขั้นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายตัวของสารอินทรีย์ในปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิซิส (ปารีชาติ, 2549)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรารณณ์, ต่อพงศ์ และพิลาณี (2550) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีด้วยโอโซนความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนให้นานขึ้น และสีของน้ำลดลงมากที่สุด เมื่อผ่านน้ำทิ้งเข้าระบบเป็นเวลา 60 นาที ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีโดยความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12 ± 0.1 เป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชันได้ดีที่สุด

Lin and Yeh (1993) ได้ทำการศึกษาถึงการใช้โอโซนในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม และผลของโอโซนต่อการกำจัดค่า COD ในการทดลองใช้เวลาทดลองแต่ละครั้งเป็นเวลา

6 ชั่วโมง สามารถกำจัดได้เกือบทั้งหมด และสามารถลดค่า COD ได้มากกว่า 50 % นอกจากนี้ยังพบว่าโอโซนยังทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกออกจากกัน ทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายต่อไปในระบบ activated sludge และการใช้โอโซนร่วมกับ activated sludge ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น

อลิสตา (2544) ได้ทำการศึกษาการวิจัยการกำจัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษโดยใช้สารไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับ การออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสี ซีไอดี และค่าของแข็งแขวนลอย อยู่ในช่วง 52.44% - 87.91%, 50% - 78.57% และ 84.54% - 99.51% ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ทางสถิติระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณสารเคมี ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมี แต่ประสิทธิภาพมีค่าที่ไม่แตกต่างกันในทุกระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าไม่แตกต่างกันมากในทุกระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และในทุกปริมาณสารเคมี และสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ร่วมกับ สารไททาเนียมไดออกไซด์ คือระดับความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ 9 g/L โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ซีไอดี และของแข็งแขวนลอย 85.04%, 74.14% และ 98.06% ตามลำดับ

Paillard ,Dorel and Bourbogot (1991) ได้ทำการศึกษาการกำจัดกรดออกซาลิก (Oxalic acid) โดยใช้โอโซนร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบกับระบบโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองพบว่า การใช้โอโซนร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดโดยวัดในรูป TOC สูงถึง 95% ในขณะที่ระบบโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และระบบโอโซนอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพการลดค่า TOC เท่ากับ 50% และ 30% ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

3.1 รูปแบบงานวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง เพื่อการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้า ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิลเรดิคอล (OH^\bullet)ที่สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ และสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียจากสีย้อมผ้า ซึ่งสามารถนำมาปรับใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าของโรงงานต่าง ๆ เพื่อลดปัญหามลพิษทางน้ำ

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดทำแบบจำลองระบบบำบัด

3.2.1.1 กระจกอะคริลิกใสขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 17.5 เซนติเมตร สูง 140 เซนติเมตร



ภาพ 3.1 ถังทำปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง (Reactor)

3.2.1.2 ฐานวางกระจกบ่อทำปฏิกิริยา และเครื่องมือตรวจวิเคราะห์

3.2.1.3 เหล็กฉาก(Equal Angle)ขนาด 1 นิ้ว

3.2.1.4 บอลวาล์ว (Ball Valve) ขนาด 0.5 นิ้ว

3.2.1.5 ท่อต่อตรงเกลียวนอก (Valve Socket) ขนาด 0.5 นิ้ว

- 3.2.1.6 ท่อต่อตรงเกลียวใน (Faucet Socket) ขนาด 0.5 นิ้ว
- 3.2.1.7 ลูกล้อเลื่อน (Caster Wheel)ขนาด 3 นิ้ว
- 3.2.1.8 กาวซิลิโคนใส
- 3.2.1.9 น้ำยาเชื่อมอะคริลิค
- 3.2.1.10 สายยางซิลิโคน
- 3.2.1.11 หัวทรายจ่ายอากาศ

3.2.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

3.2.2.1 วัสดุอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ดัชนีปริมาณตะกอน

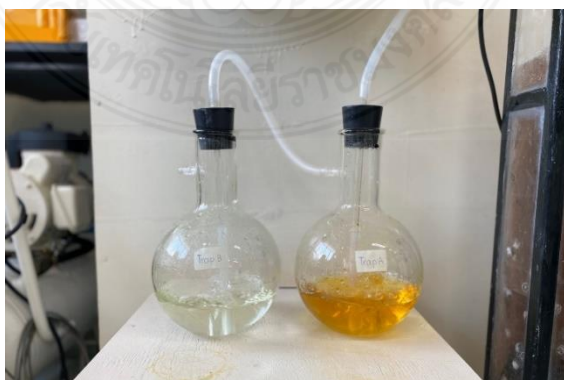
- 1) กรวยอิมฮอฟฟ์ (Imhoff cone) ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
- 2) กระดาษกรอง ขนาด 47 มิลลิเมตร



ภาพ 3.2 กระดาษกรอง ขนาด 47 มิลลิเมตร

- 3) ชุดอุปกรณ์กรองสูญญากาศ(Filtration assembly)
 - 4) คีมคีบ (Forcep)
- #### 3.2.2.2 วัสดุอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ปริมาณโอโซน

- 1) ขวดแก้วปิดเก็บปริมาณเก็บโอโซน ขนาด 2 ลิตร



ภาพ 3.3 ขวดแก้วเก็บปริมาณเก็บโอโซน ขนาด 2 ลิตร

2) ชุดบิวเรต (Buret)

3) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร

4) กระบองตวง (Cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.2.2.3 วัสดุอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ซีโอดีแบบปิด (Closed reflux)

1) หลอดทดลองชนิด borosilicate ขนาด 20 x 150 มิลลิเมตร พร้อมจุก TFE

2) ตะแกรงใส่หลอดทดลอง (Test Tube Rack)

3) ปิเปตต์ (Pipette)

4) ชุดบิวเรต (Buret)

5) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)

3.2.2.4 วัสดุอุปกรณ์ในการวิเคราะห์บีโอดี ด้วยวิธีเจือจาง (Indirect or Dilution Method)

1) ขวดบีโอดี (BOD Bottle) ขนาด 300 มิลลิลิตร

2) ปิเปตต์ (Pipette)

3) ชุดบิวเรต (Buret)

4) กระบองตวง (Cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร

5) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)

3.2.2.5 วัสดุอุปกรณ์ในการวิเคราะห์สี

1) ชุดอุปกรณ์กรองสุญญากาศ (Filtration assembly)

2) กระดาษกรอง ขนาด 0.45 μm

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 เครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator) รุ่น oz-3G



ภาพ 3.4 เครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator)

3.3.2 เครื่องวัด pH ยี่ห้อ Milwaukee รุ่น MI 106



ภาพ 3.5 เครื่องวัด pH (pH meter)

3.3.3 เครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hach รุ่น DR/890 colorimeter



ภาพ 3.6 เครื่องวัดสี (Colorimeter)

3.3.4 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น Model 100-800



ภาพ 3.7 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven)

3.3.5 เครื่องชั่งละเอียด (Analytical Balance) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น ATX 224



ภาพ 3.8 เครื่องชั่งละเอียด (Analytical Balance)

3.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.4.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ไอโอดีน ได้แก่

- 3.4.1.1 สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide : KI)
- 3.4.1.2 สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate : $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
- 3.4.1.3 น้ำแป้ง (Starch solution)

3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าซีโอดี ได้แก่

- 3.4.2.1 โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate : $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
- 3.4.2.2 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid : H_2SO_4)
- 3.4.2.3 ซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver Sulfate : Ag_2SO_4)
- 3.4.2.4 เมอร์คิวริกซัลเฟต (Mercuric Sulfate : HgSO_4)
- 3.4.2.4 เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferrous indicator)
- 3.4.2.5 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียม (Ferrous Ammonium Sulfate : FAS)

3.4.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าบีไอดี ได้แก่

- 3.4.3.1 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid : H_2SO_4)
- 3.4.3.2 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate : MgSO_4)
- 3.4.3.3 สารละลายอัลคาไลไอโอไดด์-อะไซด์ (Alkali-iodide-Azide Regent : AIA)
- 3.4.3.4 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต (Standard Sodium Thiosulfate Tyrant : $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
- 3.4.3.5 สารละลายแมงกานีสซัลเฟต (Manganese Sulfate Solution : MnSO_4)

3.4.3.6 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Calciumchloride : CaCl_2)

3.4.3.7 สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferricchloride : FeCl_3)

3.4.3.8 สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PhosphateBufferSolution)

3.4.3.9 น้ำแป้ง (Starchsolution)

3.5 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

3.5.1 วิธีการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

3.5.1.1 อบกระดาศกรองให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นในเดสิคเคเตอร์แล้วชั่งน้ำหนักเก็บกระดาศกรองไว้ในเดสิคเคเตอร์จนกว่าจะใช้ทดลอง

3.5.1.2 วางกระดาศกรองลงในกรวยบुकเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศ

3.5.1.3 ตวงปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้ว 50 – 100 มิลลิลิตร แล้วเทน้ำตัวอย่างลงในกรวยบुकเนอร์และเปิดเครื่องดูดสุญญากาศจนน้ำแห้ง แล้วล้างเครื่องกรองด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตรเปิดเครื่องทิ้งไว้ 3 นาทีดังแสดงในภาพ 3.9



ภาพ 3.9 ขั้นตอนการตวงปริมาตรน้ำตัวอย่าง

3.5.1.4 เมื่อแห้งแล้วนำกระดาศกรองออกวางในภาชนะเดิม แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 นาทีทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ และชั่งน้ำหนักกระดาศกรอง ดังแสดงในภาพ 3.10



ภาพ 3.10 ขั้นตอนการชั่งน้ำหนักกระดาศกรอง

3.5.1.5 คำนวณค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
สูตรการคำนวณ

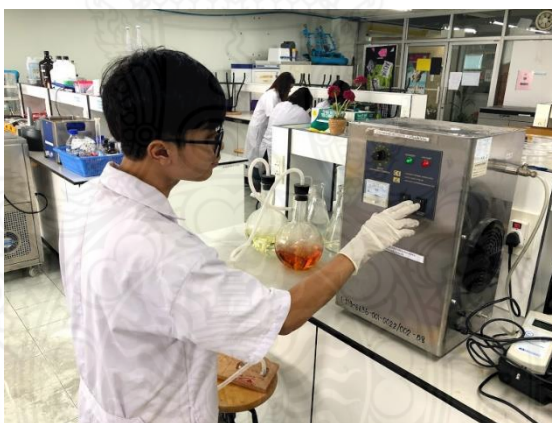
$$\text{ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times 10^6}{\text{Volume (ml)}}$$

กำหนดให้ A หมายถึง น้ำหนักกระดาษกรองหลังการกรอง
B หมายถึง น้ำหนักกระดาษกรองก่อนการกรอง

3.5.2 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณโอโซน

3.5.2.1 เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2 เปอร์เซ็นต์ ลงในขวดแก้วปิดอย่างน้อย 500 มิลลิลิตร ต่ออนุกรมกัน 2 ขวด (Trap A, Trap B)

3.5.2.2 เติมอากาศที่ออกมาจากเครื่องผลิตโอโซน ลงในขวดแก้วปิดเก็บปริมาณเก็บโอโซน โดยให้ปลายสายยางจุ่มลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ เป็นเวลา 10 นาทีสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองดังแสดงในภาพ 3.11



ภาพ 3.11 ขั้นตอนการทดสอบปริมาณการผลิตโอโซน

3.5.2.3 นำสารละลายที่เปลี่ยนสีด้วยกระบอกตวงขนาด 250 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.5.2.4 หยดน้ำแป้ง 2-3 หยด ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 1 N จนถึงจุดยุติจะเปลี่ยนเป็นสีใส ดังแสดงในภาพ 3.12



ภาพ 3.12 ขั้นตอนการไทเทรตหาปริมาณไอโชนในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์

3.5.2.5 คำนวณหาปริมาณไอโชน

สูตรการคำนวณ

$$\text{ปริมาณไอโชน (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)} = \frac{(A+B) \times N \times 24}{\text{ระยะเวลาในการเติมไอโชน}} \times 60$$

กำหนดให้ A หมายถึง ปริมาณโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ Trap A
 B หมายถึง ปริมาณโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ Trap B
 N หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (นอร์มอล)

3.5.3 วิธีการวิเคราะห์ซีโอดี

การวิเคราะห์ซีโอดีโดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed-Reflux)

หลักการการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยวิธีการรีฟลักซ์แบบปิดจะเหมือนกับวิธีการรีฟลักซ์แบบเปิดแต่มีข้อดีคือสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่ายจะสามารถถูกออกซิไดส์ได้มากกว่าในระบบปิดเมื่อเทียบกับการรีฟลักซ์ในระบบเปิดเพราะมีเวลาสัมผัสกับสารออกซิไดส์ได้นานกว่าก่อนทำการทดลอง ควรตรวจสอบฝาปิดหลอดแก้วว่ามีรอยแตกตรงรอยต่อของ TFE liner หรือไม่การเลือกขนาดของหลอดที่ขึ้นอยู่กับความไว (sensitivity) ที่ต้องการสำหรับตัวอย่างน้ำที่มีค่าซีโอดีต่ำควรใช้หลอดแก้วขนาด 25 x 150 มิลลิเมตร เพราะจะต้องใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำที่มากดังแสดงในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่าง ๆ ของภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย

ขนาดของภาชนะ ย่อยสลาย	ตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)	สารละลายในการ ย่อยสลาย (มิลลิลิตร)	กรดซัลฟิวริก รีเอเจนต์ (มิลลิลิตร)	ปริมาตร ทั้งหมด (มิลลิลิตร)
<u>หลอดย่อยสลาย</u>				
16 × 100 มม.	2.5	1.5	3.5	7.5
20 × 150 มม.	5.0	3.0	7.0	15.0
25 × 150 มม.	10.	6.0	14.0	30.0
<u>แอมพูลมาตรฐาน</u>				
10 มม.	2.5	1.5	3.5	7.5

3.5.3.1 ดูดน้ำตัวอย่างด้วยปิเปตต์ 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดย่อยสลายขนาด 20 × 150 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพ 3.13



ภาพ 3.13 ขั้นตอนการเติมน้ำตัวอย่างลงในหลอดย่อยสลาย

3.5.3.2 เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 3 มิลลิลิตร

3.5.3.3 ค่อยเติมกรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ 7 มิลลิลิตรลงในหลอดโดยให้กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ไหลลงก้นหลอดแก้วเพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ที่ชั้นตัวอย่างน้ำและน้ำย่อยสลาย

3.5.3.4 ใส่ Glass Beads 3 - 4 เม็ด ลงในหลอดแก้ว เพื่อป้องกันการเดือด

3.5.3.5 ปิดจุกหลอดให้แน่น เขย่าสารละลายและตัวอย่างให้เข้ากัน

3.5.3.6 นำหลอดย่อยสลายใส่ในตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) อุณหภูมิ 150 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.5.3.7 หลังจากการย่อยสลายแล้วให้นำหลอดย่อยสลายออกจากเตาอบและทิ้งไว้ให้เย็น

3.5.3.8 เทสารจากหลอดย่อยสลายใส่ในขวดรูปชมพู่ หยดเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยดไทเทรตด้วย FAS ความเข้มข้น 0.25 N จนถึงจุดยุติจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง ดังแสดงในภาพ 3.14



ภาพ 3.14 ขั้นตอนการไทเทรตตัวอย่างด้วยสารละลาย FAS ความเข้มข้น 0.25 N

3.5.3.9 คำนวณหาค่า COD

สูตรการคำนวณ

$$\text{ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times N \times 8,000}{\% \text{Dilution} \times V_{\text{sample}}}$$

กำหนดให้ A หมายถึง ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรต Blank (มิลลิลิตร)

B หมายถึง ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)

C หมายถึง ความเข้มข้นของ FAS (โมลาร์)

3.5.4 วิธีการวิเคราะห์บีโอดี

การวิเคราะห์ที่ใช้โดยทั่วไปมี 2 วิธีคือวิธีโดยตรง (Direct Method) และวิธีเจือจาง (Indirect or Dilution Method) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีเจือจาง เนื่องจากค่าความสกปรกสูง (มีค่าบีโอดีมากกว่า 7 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทำให้ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าบีโอดีได้โดยตรง เนื่องจากออกซิเจนในตัวอย่างน้ำจะมีไม่เพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ในการใช้เพื่อย่อยสลายจึงมีความจำเป็นต้องทำให้ตัวอย่างน้ำที่สกปรกเจือจางลงโดยใช้น้ำผสมเจือจาง (dilution water) โดยให้ตัวอย่างที่เจือจางแล้วมีความสกปรกน้อยกว่า 7 มิลลิกรัมต่อลิตรและควรทำหลาย ๆ ความเข้มข้น ดังแสดงในตาราง 3.2

ตาราง 3.2 ตารางการเจือจางน้ำตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์บีโอดี

% Dilution	Range of BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สัดส่วนการผสมน้ำตัวอย่างในน้ำ 1 ลิตร (มิลลิลิตร)
100	0-7	1,000
70	3-10	700
50	4-14	500
40	5-18	400
30	7-23	300
25	8-28	250
20	10-35	200
15	13-47	150
10	20-70	100
7	29-100	70
5	40-140	50
3	67-230	30
2	100-350	20
1.5	130-470	15
1.0	200-700	10
0.70	290-1,000	7
0.50	400-1,400	5
0.30	670-2,300	3
0.20	1,000-3,500	2
0.15	1,300-4,700	1.5
0.10	2,000-7,000	1
0.07	3,900-10,000	0.7
0.05	4,000-14,000	0.5
0.03	6,700-23,000	0.3
0.02	10,000-35,000	0.2
0.01	20,000-70,000	0.1

จากตารางถ้าเลือก % Dilution = 100% หมายถึง ต้องนำน้ำเสียมาทำการ Dilution 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำเจือจางที่เตรียมไว้ 100 มิลลิลิตร ซึ่งถ้าหากเตรียมปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ก็จะต้องใช้น้ำตัวอย่างเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร อย่างไรก็ตามในการเลือก % Dilution ขึ้นอยู่กับการเลือกช่วงของค่าบีโอดีที่คาดว่าจะมีอยู่ในน้ำตัวอย่าง

ตัวอย่างการเลือกช่วงของค่าบีโอดี

ถ้าตัวอย่างน้ำเสียมีค่าซีโอดี = 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ค่าบีโอดีประมาณ} = \frac{\text{ค่า COD}}{2} = \frac{1,000}{2} = 500 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

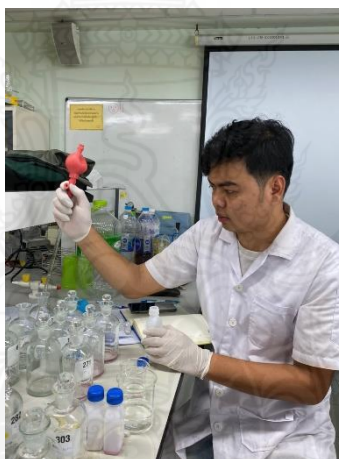
ดังนั้นสามารถเลือก % Dilution ที่ต้องใช้เจือจางน้ำเสียจากตารางที่ 3.2 เพื่อใช้ทดสอบค่าบีโอดี ได้ 3 ความเข้มข้น คือ 1%, 0.7% และ 0.5%

3.5.4.1 เตรียมน้ำเจือจางโดยใช้น้ำ Softening เดิมอากาศก่อนประมาณ 1 ชั่วโมง

3.5.4.2 ทิ้งไว้ 15-30 นาที เพื่อไล่ฟองอากาศ

3.5.4.3 เติมฟอสเฟตบัพเฟอร์, แมกนีเซียมซัลเฟต, แคลเซียมคลอไรด์ และ เฟอร์ริกคลอไรด์ อย่างละ 1 มิลลิลิตร ต่อน้ำเจือจาง 1 ลิตร

3.5.4.4 ใช้ปิเปตต์ตวงตัวอย่างในปริมาณที่คำนวณได้จากตาราง % Dilution ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร เติมน้ำเจือจางที่เตรียมไว้ผสมในขวดปรับปริมาตรจนได้ 1 ลิตร โดยพยายามอย่าให้มีฟองอากาศดังแสดงในภาพ 3.15



ภาพ 3.15 ขั้นตอนการเติมน้ำตัวอย่างลงในขวด BOD

3.5.4.5 เขย่าให้เข้ากัน แล้วเทลงในขวด BOD จำนวน 3 ขวด นำ 1 ขวดไปหาค่า DO_0

3.5.4.6 เติมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและสารละลายอัลคาไลโอไดไฮดรอกไซด์ อย่างละ 1 มิลลิลิตรลงใน ขวด Bod

3.5.4.7 ปิดจุกแล้วเทส่วนที่เกินออก พร้อมทั้งเขย่าขวดขึ้น - ลงดังแสดงในภาพ 3.16



ภาพ 3.16 ขั้นตอนการฆ่าขวด BOD

3.5.4.8 ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนประมาณครึ่งขวด เติมกรดซัลฟิวริก 1 มิลลิลิตร

3.5.4.9 ปิดจุกแล้วเทส่วนที่เกินออก พร้อมทั้งฆ่าขวดขึ้น - ลง

3.5.4.10 ตวงปริมาตรน้ำออก 100 มิลลิลิตร เหลือ 200 มิลลิลิตร หยดน้ำแบ่งแล้วไทเทรต ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.025 N สารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นไม่มีสีดังแสดงในภาพ 3.17



ภาพ 3.17 ขั้นตอนการตวงปริมาตรน้ำออก

3.5.4.11 ขวด BOD ส่วนที่เหลือปิดด้วยกระดาษอะลูมิเนียมฟอยด์ แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นนำมาหาค่า DO_5

3.5.4.12 คำนวณหาค่า BOD

สูตรการคำนวณ

$$DO \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = 40 \times M \times V$$

กำหนดให้ V หมายถึง ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

M หมายถึง ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต(นอร์มอล)

$$BOD_5 \text{ (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{DO_0 - DO_5 \times 100}{\% \text{ Dilution}}$$

3.5.5 วิธีการวิเคราะห์สี

3.5.5.1 ปรับ pH น้ำตัวอย่างให้ได้ค่าประมาณ 7.0 ด้วยกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.5.5.2 กรองน้ำตัวอย่างผ่านกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน หรือใช้การเซ็นทริฟิวจ์เพื่อกำจัดความขุ่นดังแสดงในภาพ 3.18



ภาพ 3.18 ขั้นตอนการกรองตัวอย่างเพื่อตรวจวิเคราะห์สี

3.5.5.3 เทตัวอย่างปริมาตร 12.5 มิลลิลิตร ลงในคิวเวต (cuvette) แล้วเช็ดภายนอกให้สะอาด

3.5.5.4 บรรจุคิวเวตลงในเครื่องตรวจวิเคราะห์สี โดยให้ด้านใสตรงกับจุดที่คลื่นแสงผ่าน ปิดฝาแล้ววัดเริ่มวิเคราะห์ความเข้มของสีในน้ำตัวอย่าง ดังแสดงในภาพ 3.19



ภาพ 3.19 ขั้นตอนการบรรจุตัวอย่างและการอ่านค่าสีด้วยเครื่องวิเคราะห์สี

3.5.5.5 นำข้อมูลที่เครื่องตรวจวิเคราะห์ที่ได้ไปคำนวณอัตราการลดลงของสีที่ละลายในน้ำโดยคำนวณจากหน่วยมิลลิกรัมแพลตตินัมโคบอลต์ต่อลิตร (Platinum-cobalt) เป็นหน่วย ADMI ได้จากสูตรการคำนวณ ดังแสดงในภาคผนวก ง
สูตรการคำนวณ

$$F_n \text{ (mg/L Pt Co)} = \frac{(APHA)_n \times b}{(DE)_n}$$

แปลงค่า Color unit เป็น ADMI ดังสมการ

$$ADMI = \frac{F \times DE}{b}$$

เมื่อ $(APHA)_n$ = ค่าสีมาตรฐานของ n
 $(DE)_n$ = ค่ากลางที่ใช้สำหรับการคำนวณ n
 b = ขนาดของเซลล์วัดแสง (cm)

3.6 ขั้นตอนการเตรียมงานวิจัย

3.6.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.6.2 กำหนดขอบเขตของการศึกษา

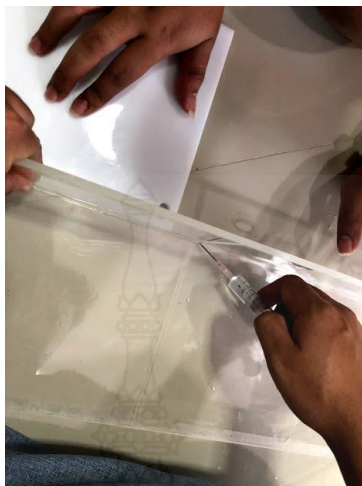
3.6.3 วิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์จากแม่สีชนิดเดียวกับที่โรงฟอกย้อมใช้งาน

3.6.4 ออกแบบและจัดทำแบบจำลองระบบบำบัดน้ำเสียดังนี้

3.6.4.1 ตัดแผ่นอะคริลิกใสให้ได้ความยาว 140 เซนติเมตร กว้าง 17.5 เซนติเมตร จำนวน 2 ชั้น และขนาดยาว 140 เซนติเมตร กว้าง 10 เซนติเมตร จำนวน 2 ชั้น

3.6.4.2 นำมาเชื่อมติดกันด้วยน้ำยาเชื่อมอะคริลิกและกาวซิลิโคนใส ขึ้นดังแสดงใน

ภาพ 3.20



ภาพ 3.20 การประกอบกระบอกทำปฏิกิริยาด้วยน้ำยาเชื่อมอะคริลิก

3.6.4.3 ทำการเชื่อมเหล็กฉาก (Equal Angle) ขนาด 1 นิ้ว ประกบด้านข้างกระบอกทำปฏิกิริยา

3.6.4.4 ทำการประกอบกระบอกทำปฏิกิริยา และฐานวางกระบอกทำปฏิกิริยาเข้าด้วยกัน ดังแสดงในภาพ 3.21

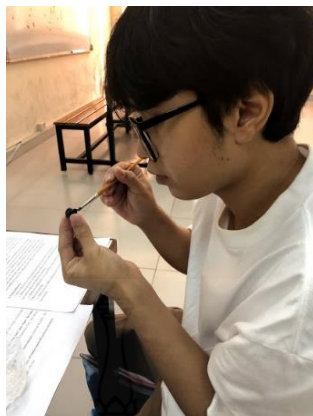


ภาพ 3.21 ชุดจำลองระบบบำบัดน้ำเสีย

3.6.5 เคลือบผิวตัวกลางพลาสติกด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ดังนี้

3.6.5.1 ทำความสะอาดตัวกลางพลาสติกด้วยน้ำสะอาด ทิ้งไว้ให้แห้งสนิท

3.6.5.2 นำตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวด้วยเรซินใสและไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูโพล์ดังแสดงในภาพ 3.22 และ 3.23



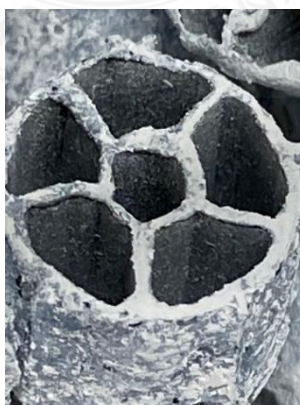
ภาพ 3.22 การเคลือบผิวตัวกลางพลาสติกด้วยเรซินใส



ภาพ 3.23 การเคลือบผิวตัวกลางพลาสติกด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

3.6.5.3 นำมาไว้ในบริเวณที่อากาศถ่ายเทสะดวก เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง เพื่อให้เรซินแข็งตัวเป็นเนื้อเดียวกับตัวกลางพลาสติก

3.6.5.4 จากนั้นนำตัวกลางที่เคลือบผิวแล้วไปล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อกำจัดเศษไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ยึดเกาะพื้นผิว ตากในที่ร่มให้แห้งสนิทพร้อมนำมาใช้งาน ดังแสดงในภาพ 3.24



ภาพ 3.24 ลักษณะพื้นผิวของตัวกลางพลาสติกที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

3.7 ขั้นตอนการศึกษา

3.7.1 การทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

3.7.1.1 ทำการประกอบชุดถังทำปฏิกิริยากับชุดอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์โดยใช้สายยางซิลิโคนต่อจากเครื่องผลิตโอโซนไปยังหัวทรายจ่ายอากาศที่อยู่ภายในถังทำปฏิกิริยา แล้วนำปลายสายอีกเส้นที่เป็นทางออกของโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาต่อกับชุดขวดแก้วปิดเก็บปริมาณโอโซนจำนวน 2 Trap ซึ่งต่ออนุกรมกันโดยให้ปลายสายยางจุ่มลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2% ดังแสดงในภาพ 3.25



ภาพ 3.25 การต่อระบบดักจับโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยากับชุดถังทำปฏิกิริยา

3.7.1.2 นำน้ำเสียจากสีย้อมผ้าที่มีสภาวะค่า pH ตามที่กำหนดได้แก่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ซึ่งกำจัดสีปรากฏด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีปริมาตร 10.5 ลิตร เติมนลงในถังทำปฏิกิริยา

3.7.1.3 เติมโอโซนลงในน้ำเสียเป็นระยะเวลา 120 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 30 นาที คือ 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ

3.7.1.4 นำค่า pH ที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุด มาทำการศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของค่า COD เริ่มต้นที่ 1,000 mg/l , 500 mg/l และ 250 mg/l ตามลำดับ

3.7.1.5 ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในทุกช่วงเวลา

3.7.1.6 บันทึกผล และหาค่า COD เริ่มต้น และ pH ที่เหมาะสมร่วมกับระยะเวลาในการเติมโอโซน

3.7.2 การทดสอบการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

3.7.2.1 ทำการประกอบชุดถังทำปฏิกิริยากับชุดอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์โดยใช้สายยางซิลิโคนต่อจากเครื่องผลิตโอโซนไปยังหัวทรายจ่ายอากาศที่อยู่ภายในถังทำปฏิกิริยา แล้วนำปลายสายอีกเส้นที่เป็นทางออกของโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาต่อกับชุดขวดแก้วปิดเก็บปริมาณโอโซนจำนวน 2 Trap ซึ่งต่ออนุกรมกันโดยให้ปลายสายยางจุ่มลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2%

3.7.2.2 นำน้ำเสียจากสีย้อมผ้าที่มีสถานะค่า pH ตามที่กำหนดได้แก่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ซึ่งกำจัดสีปรากฏด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีปริมาตร 10.5 ลิตร เติมลงในถังทำปฏิกิริยา

3.7.2.3 เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาตร 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ลงในถังทำปฏิกิริยาในทุกสถานะ pH ตามที่กำหนด

3.7.2.4 เติมโอโซนลงในน้ำเสียเป็นระยะเวลา 120 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ทุก ๆ 30 นาที คือ 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ

3.7.2.5 นำค่า pH ที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุด มาทำการศึกษา ปัจจัยของความเข้มข้นของค่า COD เริ่มต้นที่ 1,000 mg/l , 500 mg/l และ 250 mg/l ตามลำดับ

3.7.2.6 ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในทุกช่วงเวลา

3.7.2.7 บันทึกผล และหาค่า COD เริ่มต้น และ pH ที่เหมาะสมร่วมกับระยะเวลา ในการเติมโอโซน

3.8 การกำหนดตัวแปร

ตาราง 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรต้น	-ระยะเวลาในการเติมโอโซน -ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์
ตัวแปรตาม	-คุณภาพน้ำ • ซีไอดี • บีไอดี • สี
ตัวแปรควบคุม	- พีเอช - ปริมาณน้ำ - อัตราการผลิตโอโซนของเครื่อง - ระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำในกระบอกทำปฏิกิริยา

การกำหนดตัวแปรในการทดลองนี้ได้แก่ ปริมาณตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ และระยะเวลาในการเติมโอโซนลงในชุดกระบอกทำปฏิกิริยาที่ทำจากอะคริลิกใสขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 17.5 เซนติเมตร สูง 140 เซนติเมตรซึ่งใช้น้ำเสียจากสีย้อมผ้าที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยแม่สีชนิดเดียวโรงฟอกย้อม ปริมาตร 10.5 ลิตร ต่อการบำบัดน้ำเสียแต่ละครั้งดังแสดงในตาราง 3.4

ตาราง 3.4 อัตราส่วนการเติมตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง

อัตราส่วนการเติม ไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัม)	ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ เติมลงในถังทำปฏิกิริยา (กรัม)	จำนวนตัวกลางพลาสติก (ชิ้น)
0	0	0
0.5	5.25	336
1	10.5	683
2	21	1365

3.9 ขั้นตอนการบันทึกและรายงานผล

3.9.1 เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากสีย้อมผ้าที่สังเคราะห์ขึ้นก่อนเข้าสู่กระบวนการทำปฏิกิริยา

3.9.2 นำน้ำเสียจากสีจากสีย้อมผ้าที่กำจัดสีปรากฏออกแล้วด้วยวิธีการตกตะกอน เติมในชุดกระบวนการทำปฏิกิริยาปริมาตร 10.5 ลิตร เก็บตัวอย่างน้ำปริมาตร 1 ลิตร เมื่อทำการเปิดเครื่องผลิตโอโซนทุกช่วงเวลา 0 ,30, 60 ,90 และ 120 นาที ตามลำดับ เพื่อนำน้ำที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ค่า ซีโอดี และสี

3.9.3 บันทึกผลประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูโพลีเมอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อแก้ไขปัญหาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการบำบัดน้ำเสียให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยอาศัยโอโซนที่เป็นสารออกซิไดซ์ซึ่งเอเจนต์ที่รุนแรง ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ โดยตรวจวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ แบ่งเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำด้านกายภาพ ได้แก่ สีของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำด้านเคมี ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าซีไอดี และค่าบีไอดี ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากสีย้อมผ้าที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้แม่สีชนิดเดียวกับโรงฟอกย้อม พบว่าตัวอย่างน้ำเสียจากสีย้อมผ้าสังเคราะห์ขึ้น มีค่าเกินกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2560 ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ประกอบด้วย ค่าพีเอช ค่าสี ค่าซีไอดี และค่าบีไอดี ดังแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากกระบวนการสังเคราะห์

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง*
1. พีเอช	4.5	5.5-9.0
2. สี (ADMI)	มากกว่า 550	ไม่เกิน 300
3. ซีไอดี (mg/l)	1,032	ไม่เกิน 120
4. บีไอดี(mg/l)	180	ไม่เกิน 20
5. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l)	841	ไม่เกิน 50

หมายเหตุ * มาตรฐานควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงาน
ที่มา : กระทรวงอุตสาหกรรม (2560)

4.2 การตรวจวัดปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวตัวกลาง

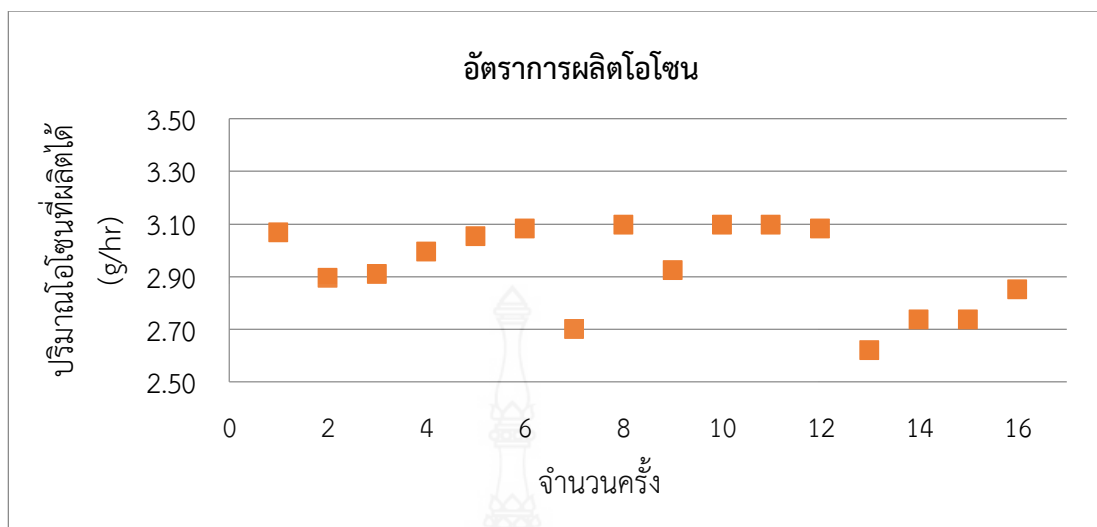
จากการศึกษาแนวทางการเคลือบพื้นผิวตัวกลางพลาสติกด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้สารเรซินใสในการยึดติดผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังภาพ 4.1 และทำการเปรียบเทียบน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของตัวกลางพลาสติกหลังทำการเคลือบพื้นผิว เพื่อนำมาคำนวณอัตราการยึดติดผงไทเทเนียมไดออกไซด์ บนพื้นผิวตัวกลางพลาสติก พบว่าน้ำหนักของตัวกลางพลาสติก 20 ชิ้น มีน้ำหนัก 4.8637 กรัม หลังเคลือบสารเรซินใส มีน้ำหนัก 6.0246 กรัม และหลังเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ มีน้ำหนัก 6.3335 กรัม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ยึดติดบนพื้นผิวตัวกลางเท่ากับ 0.3089 กรัมต่อตัวกลางพลาสติก 20 ชิ้น ซึ่งสามารถเปรียบเทียบอัตราการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ดังตาราง 4.2

ตาราง 4.2 ปริมาณการเติมตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์

อัตราส่วนการเติม ไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัม)	จำนวนตัวกลางพลาสติกต่อตัวอย่าง 1 ลิตร (ชิ้น)
0	0
0.5	32
1	65
2	130

4.3 การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน

โอโซน คือ สารชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตจากออกซิเจนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในอากาศ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าหรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต เปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของออกซิเจนจาก 2 อะตอม (O_2) ให้เป็น 3 อะตอม (O_3) ใน 1 โมเลกุลซึ่งปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องจะแตกต่างกันมีผลมาจากออกซิเจน อุณหภูมิ และความชื้นในอากาศ (ปิยะวิทย์, มปป.) ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์หาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องทุกวันก่อนทำการทดลองด้วยวิธี Wet Chemistry Method โดยทำการเป่าโอโซนที่ผลิตจากเครื่องลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ความเข้มข้น 2 % เป็นเวลา 10 นาที พบว่าเครื่องผลิตโอโซนมีอัตราการกำลังการผลิตได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน โดยโอโซนที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 2.62 – 3.10 กรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าเฉลี่ยปริมาณโอโซน เท่ากับ 2.93 กรัมต่อชั่วโมง ซึ่งปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากการทดลองแสดงดังภาพ 4.1



ภาพ 4.1 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากการทดลองในแต่ละครั้ง

4.3.1 ผลการทดสอบปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยา

จากการทดลองในแต่ละครั้งจะมีโอโซนบางส่วนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาหลุดออกมาจากถังทำปฏิกิริยาโดยจะดักจับโอโซนด้วยชุดดักจับโอโซนที่มีสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ความเข้มข้น 2 % จำนวน 2 ชุด เชื่อมต่อระหว่างชุดถังทำปฏิกิริยา เพื่อหาปริมาณโอโซนส่วนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยา (Ozone offgas) จากกระบวนการโอโซนเนชั่น ที่ pH 3 pH 7 และ pH 11 พบว่าโอโซนส่วนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 0.62, 0.82 และ 0.39 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ pH 3 pH 7 และ pH 11 ซึ่งมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน พบว่าโอโซนส่วนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อลิตรมีค่าเท่ากับ 0.62, 0.86 และ 0.35 ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 0.81, 0.84 และ 0.39 ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 0.39, 0.46 และ 0.30 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.3 และ 4.4

ตาราง 4.3 ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาจากกระบวนการโอโซนเนชั่น

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	ระยะเวลาในการเติมโอโซน 120 นาที	
	อัตราการผลิตโอโซนของเครื่องผลิตโอโซน (g/hr)	ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยา (g/hr)
pH 3	3.07	0.26
pH 7	2.89	0.82
pH 11	2.91	0.39

ตาราง 4.4 ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาจากกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

ค่า pH ที่ทำการศึกษา ร่วมกับความเข้มข้นของ ปริมาณ TiO_2	ระยะเวลาในการเติมโอโซน 120 นาที	
	อัตราการผลิตโอโซนของเครื่อง ผลิตโอโซน (g/hr)	ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำ ปฏิกิริยา(g/hr)
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อลิตร		
pH 3	3.08	0.62
pH 7	2.92	0.86
pH 11	3.08	0.35
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร		
pH 3	2.7072	0.81
pH 7	3.10	0.84
pH 11	2.62	0.39
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อลิตร		
pH 3	3.10	0.39
pH 7	3.10	0.46
pH 11	2.74	0.30

4.4 ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

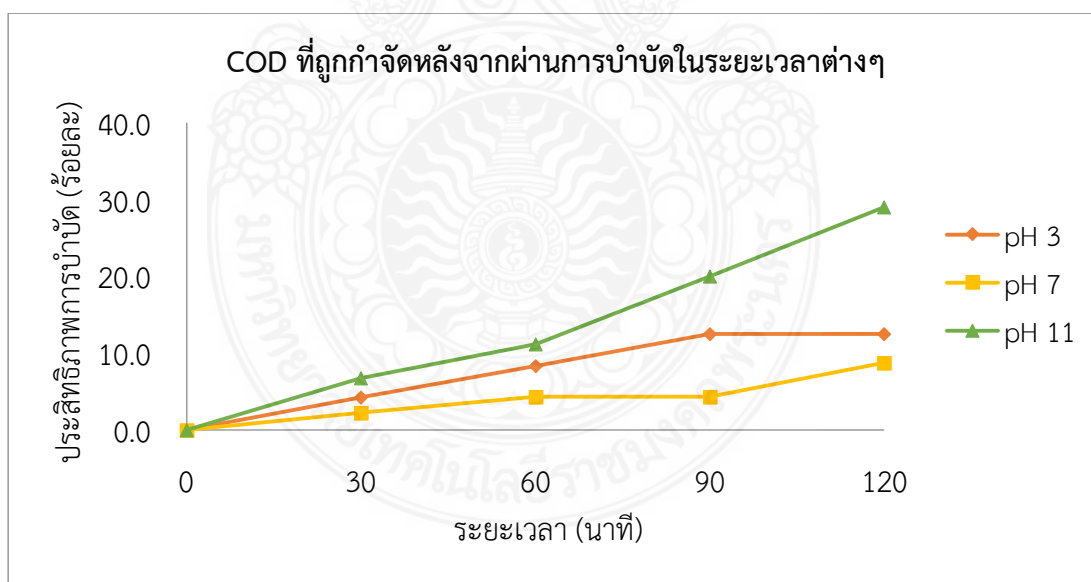
จากการศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากสีฟอกย้อมด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยหาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD และสี ในน้ำเสียที่ได้จากการสังเคราะห์ให้มีค่าความสกปรกใกล้เคียงกับโรงงานฟอกย้อมได้แก่ ค่า pH ของน้ำ ค่าความเข้มข้นของ COD เริ่มต้น ระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน และปริมาณโอโซนที่เข้าทำปฏิกิริยา

4.4.1 ปัจจัยของค่า pH ที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชั่น

จากการทดลองหาค่า pH ของน้ำเสียที่เหมาะสมในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นพบว่า pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุด โดย pH 3 และ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมาในระยะเวลาเต็มโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 29.0, 12.5 และ 8.7 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.5 และภาพ 4.2

ตาราง 4.5 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (320 mg/l)	0	4.2	8.3	12.5	12.5
pH 7 (306 mg/l)	0	2.2	4.3	4.3	8.7
pH 11 (300 mg/l)	0	6.7	11.1	20.0	29.0



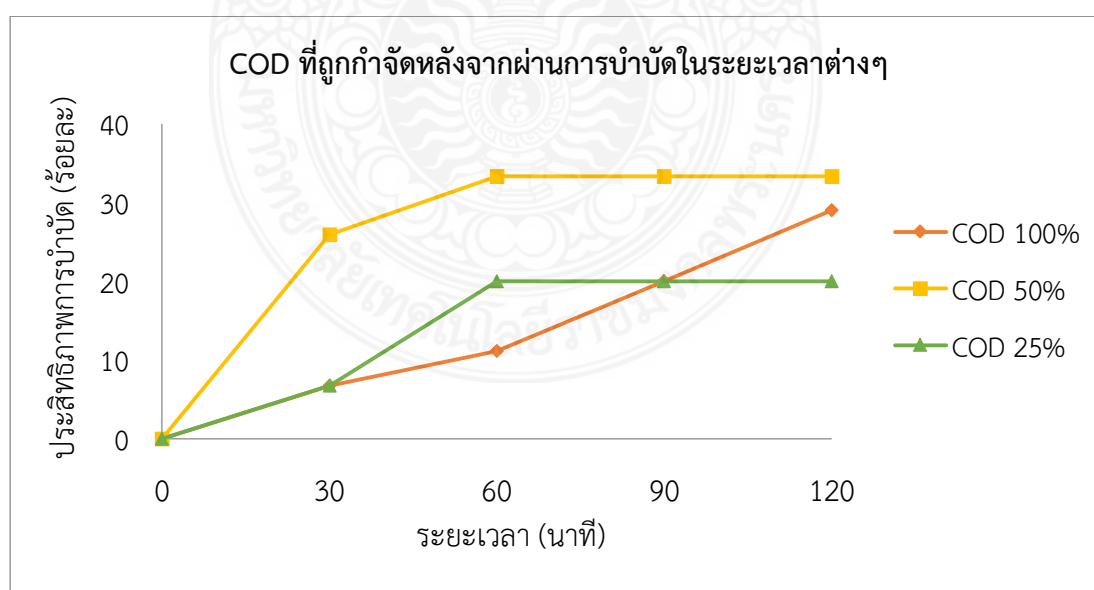
ภาพ 4.2 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

4.4.2 ปัจจัยของความเข้มข้น COD เริ่มต้นที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชั่น

จากการทดลองหาค่า COD เริ่มต้นที่ใช้ในการบำบัด ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นในค่า pH ที่เหมาะสม คือ pH 11 ที่ความเข้มข้น COD เริ่มต้น 1,000, 500 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่าความเข้มข้นของ COD เริ่มต้น ที่ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด โดยความเข้มข้น 1,000 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพการบำบัดรองลงมา ในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 33.3, 29.0 และ 20.0 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.6 และภาพ 4.3

ตาราง 4.6 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ pH 11

ค่า COD เริ่มต้น	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
100% (300 mg/l)	0	6.7	11.1	20	29.0
50% (180 mg/l)	0	25.9	33.3	33.3	33.3
25% (100 mg/l)	0	6.7	20.0	20.0	20.0



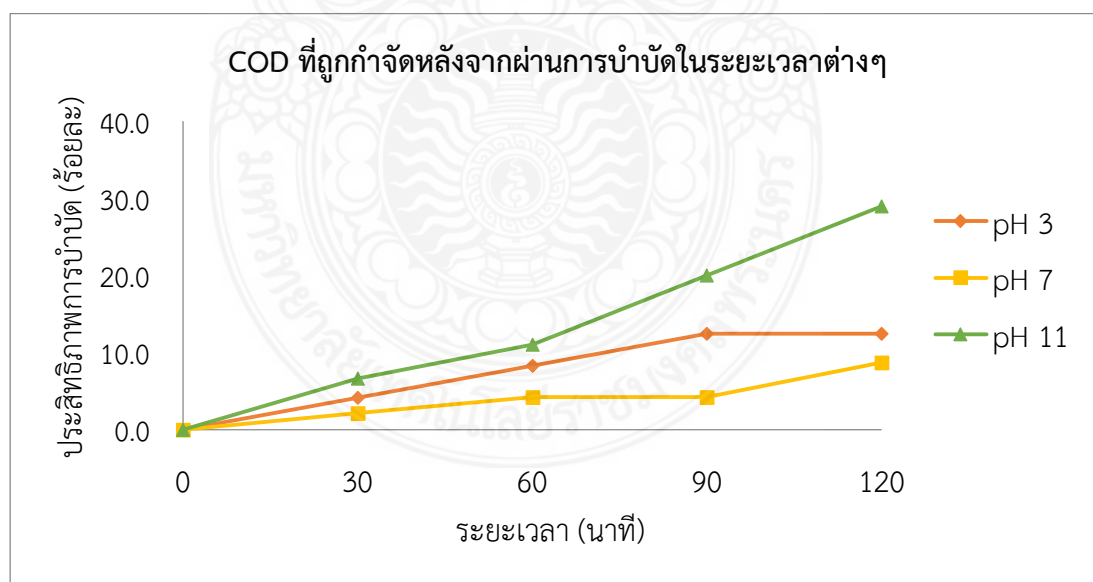
ภาพ 4.3 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ pH 11

4.4.3 ปัจจัยของระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชัน

จากการทดลองหาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชันพบว่าเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลในประสิทธิภาพในการลดค่า COD เพิ่มขึ้นโดย pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุดซึ่ง pH 3 และ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมา ดังแสดงในตาราง 4.7 และภาพ 4.4

ตาราง 4.7 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสีย ด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (320 mg/L)	0	4.2	8.3	12.5	12.5
pH 7 (306 mg/L)	0	2.2	4.3	4.3	8.7
pH 11 (300 mg/L)	0	6.7	11.1	20.0	29.0



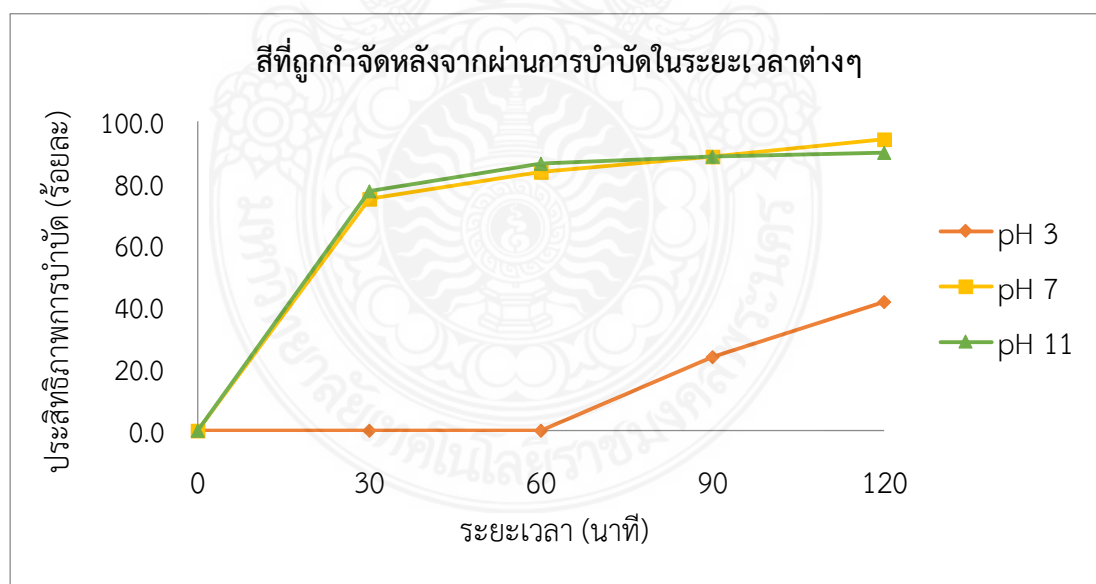
ภาพ 4.4 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสีย ด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน

4.4.4 อัตราการลดสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

ผลการทดลองความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมที่บำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที ที่สภาวะ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าสีรองลงมา คือ pH 11 และ pH 3 คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 94.3, 90 และ 41.6 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.8 และภาพ 4.5

ตาราง 4.8 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	Color Unit ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (550 ADMI)	0	0.0	0.0	23.8	41.6
pH 7 (334 ADMI)	0	75.1	83.8	88.6	94.3
pH 11 (550 ADMI)	0	77.5	86.5	88.7	90



ภาพ 4.5 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

4.5 ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียจากสีฟอกย้อมด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันในสภาวะที่กำหนด โดยหาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD และสี ในน้ำเสียที่ได้จากการสังเคราะห์ให้มีค่าความสกปรกใกล้เคียงกับโรงงานฟอกย้อม ได้แก่ ค่า pH ของน้ำ ค่าความเข้มข้นของ COD เริ่มต้น ระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน และปริมาณโอโซนที่เข้าทำปฏิกิริยา

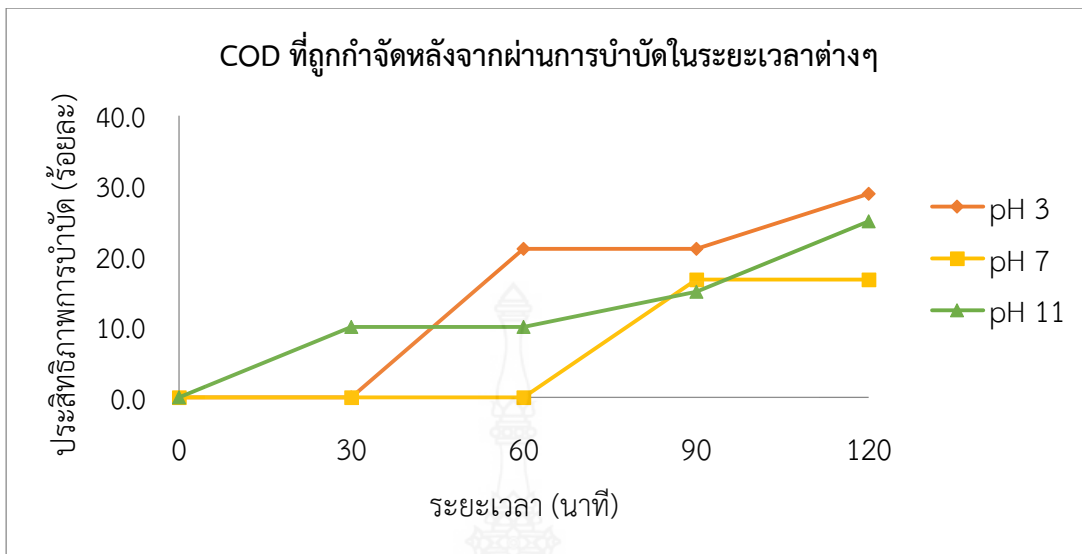
4.5.1 ปัจจัยของค่าพีเอชที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

4.5.1.1 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร

จากการทดลองหาค่า pH ของน้ำเสียที่เหมาะสมในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.5 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร พบว่า pH 3 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุด โดย pH 11 และ pH7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมาในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 28.9, 25 และ 16.7 ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.9 และภาพ 4.6

ตาราง 4.9 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (241 mg/L)	0	0.0	21.1	21.1	28.9
pH 7 (228 mg/L)	0	0	0	16.7	16.7
pH 11 (253 mg/L)	0	10	10	15	25



ภาพ 4.6 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม

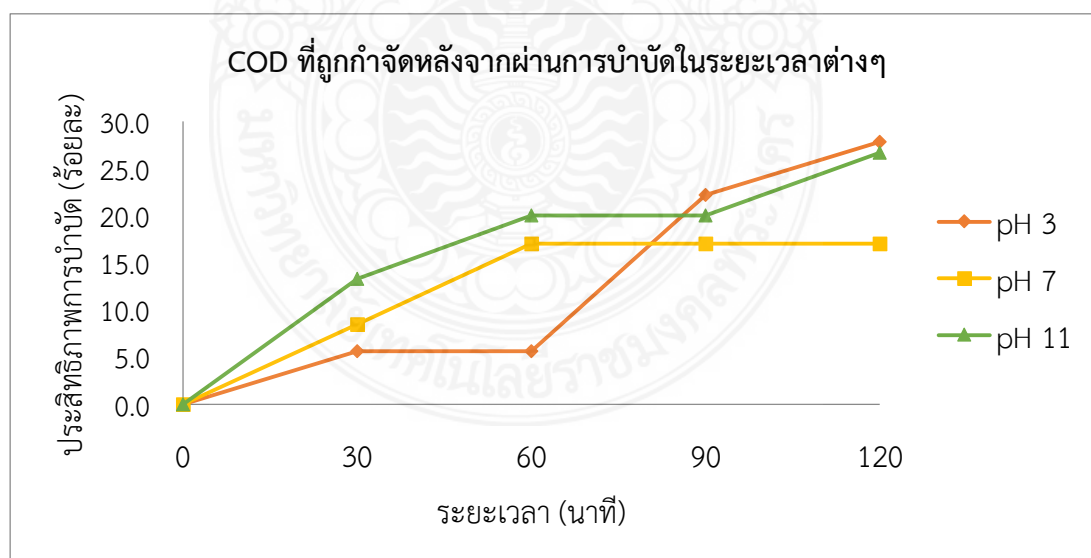


4.5.1.2 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร

จากการทดลองหาค่า pH ของน้ำเสียที่เหมาะสมในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 1 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร พบว่า pH 3 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุด โดย pH 11 และ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมาในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 27.8, 26.7 และ 17.0 ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.10 และภาพ 4.7

ตาราง 4.10 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม

ค่า pH ที่ ทำการศึกษา	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (228 mg/L)	0	5.6	5.6	22.2	27.8
pH 7 (304 mg/L)	0	8.5	17.0	17.0	17.0
pH 11 (190 mg/L)	0	13.3	20.0	20.0	26.7



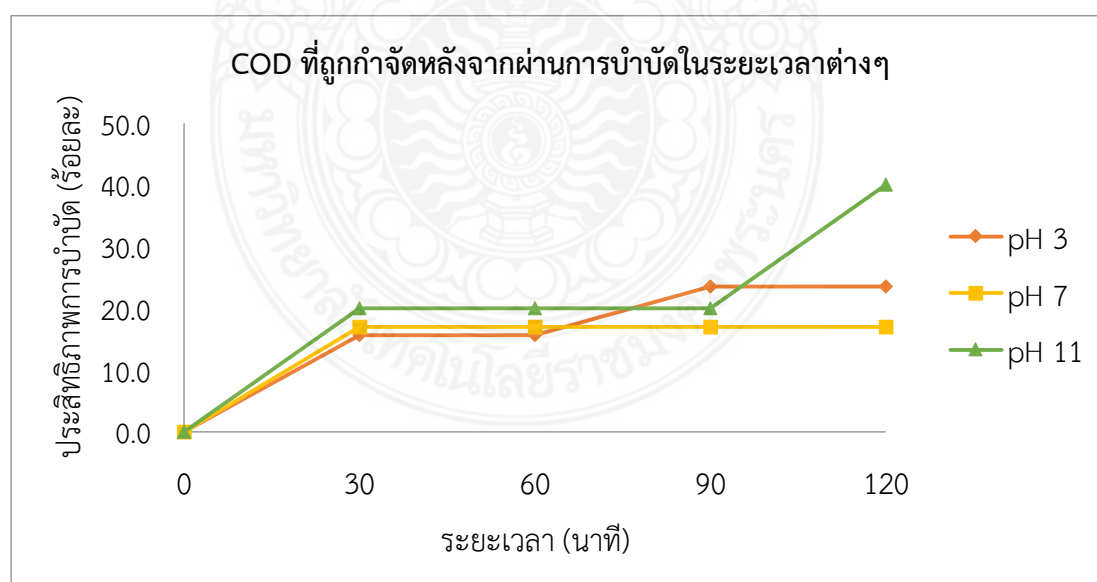
ภาพ 4.7 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม

4.5.1.3 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร

จากการทดลองหาค่า pH ของน้ำเสียที่เหมาะสมในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 2 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร พบว่า pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุด โดย pH 3 และ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมาในระยะเวลาเต็มโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 40, 23.5 และ 17.0 ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.11 และภาพ 4.8

ตาราง 4.11 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (330 mg/L)	0	15.7	15.7	23.5	23.5
pH 7 (304 mg/L)	0	17	17	17	17
pH 11 (190 mg/L)	0	20	20	20	40



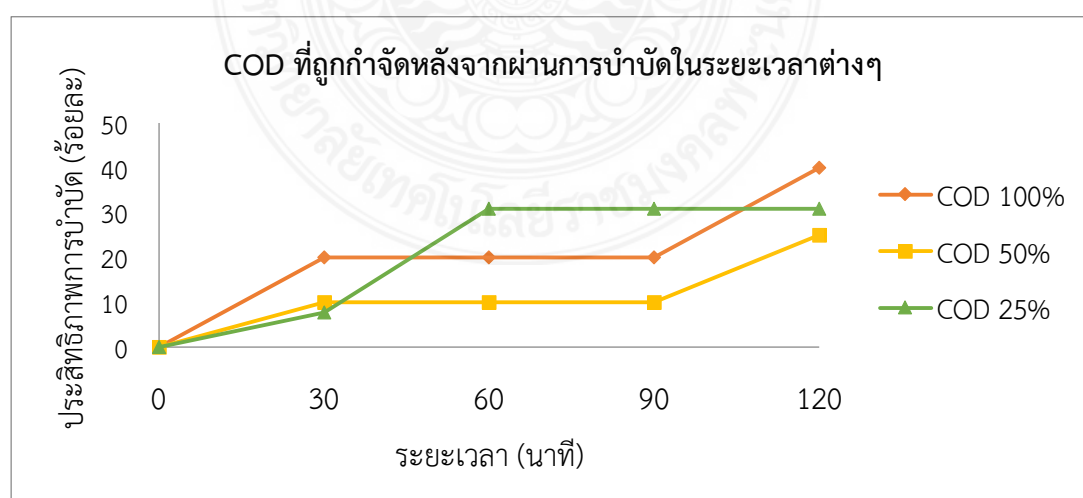
ภาพ 4.8 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม

4.5.2 ปัจจัยของความเข้มข้น COD เริ่มต้นที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการทดลองหาค่า COD เริ่มต้นที่ใช้ในการบำบัด ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 2 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร ในค่า pH ที่เหมาะสม คือ pH 11 ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการบำบัดในความเข้มข้น COD เริ่มต้น 1,000, 500 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่าความเข้มข้นของ COD เริ่มต้น ที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด โดยความเข้มข้น 250 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพการบำบัดรองลงมา ในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 40.0, 30.8 และ 25.0 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.12 และภาพ 4.9

ตาราง 4.12 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ pH 11

ค่า COD เริ่มต้น	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
100% (190 mg/l)	0	20	20	20	40
50% (165 mg/l)	0	10	10	10	25
25% (126 mg/l)	0.0	7.7	30.8	30.8	30.8



ภาพที่ 4.9 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ pH 11

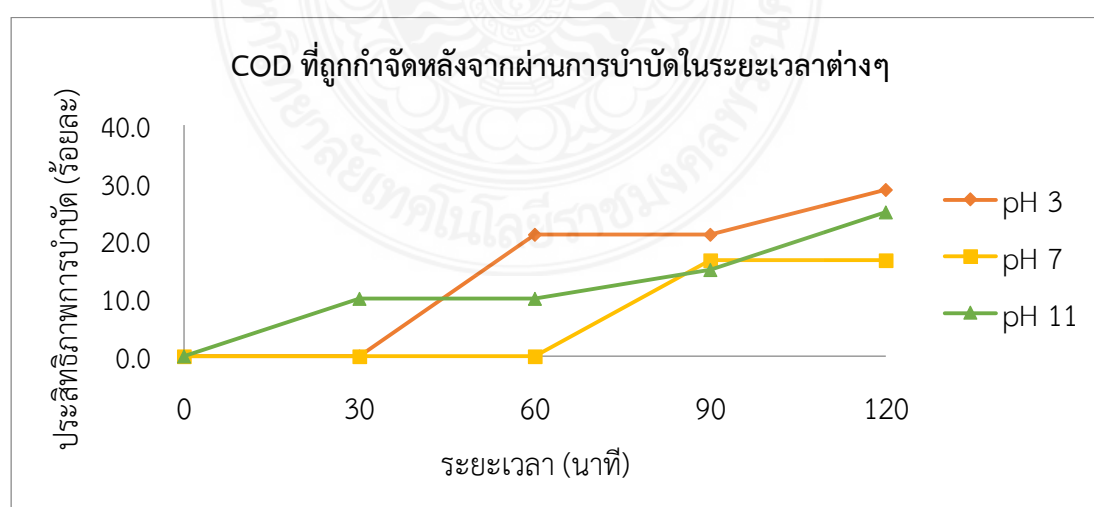
4.5.3 ปัจจัยของระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

4.5.3.1 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร

จากการทดลองหาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.5 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตรพบว่าเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลในประสิทธิภาพในการลดค่า COD เพิ่มขึ้นโดย pH 3 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุดซึ่ง pH 11 และ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมา ดังแสดงในตาราง 4.13 และภาพ 4.10

ตาราง 4.13 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (241 mg/l)	0.0	0.0	21.1	21.1	28.9
pH 7 (228 mg/l)	0	0	0	16.7	16.7
pH 11 (253 mg/l)	0	10	10	15	25



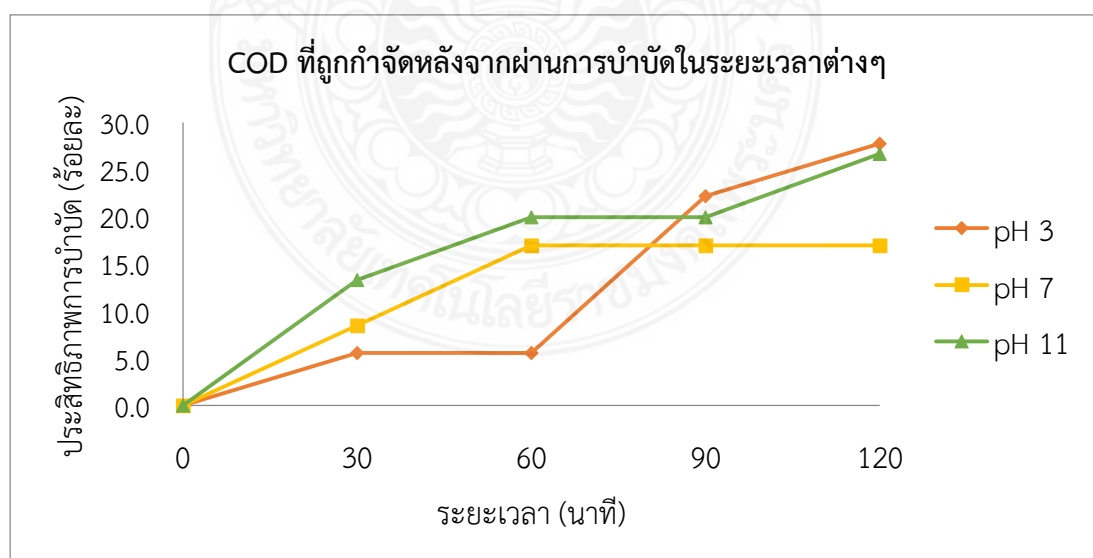
ภาพ 4.10 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม

4.5.3.2 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร

จากการทดลองหาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 1 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตรพบว่าเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลในประสิทธิภาพในการลดค่า COD เพิ่มขึ้นโดย pH 3 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุดซึ่ง pH 11 และ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมาดังแสดงในตาราง 4.14 และภาพ 4.11

ตาราง 4.14 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสีย ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม

ค่า pH ที่ ทำการศึกษา	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (228 mg/l)	0.0	5.6	5.6	22.2	27.8
pH 7 (304 mg/l)	0	8.5	17	17	17
pH 11 (190 mg/l)	0	13.3	20	20	26.7



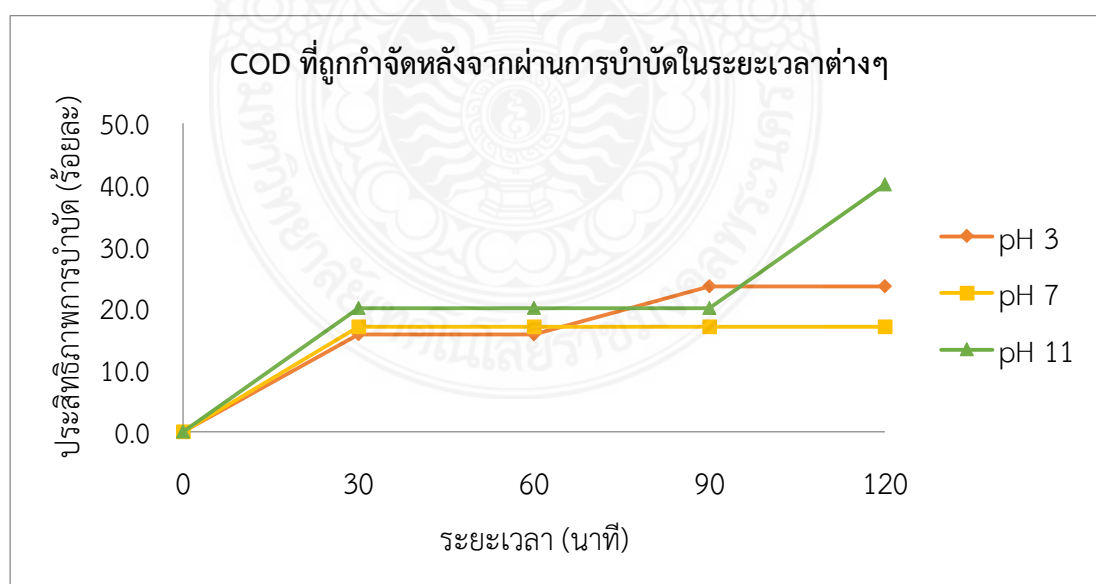
ภาพ 4.11 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม

4.5.3.3 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร

จากการทดลองหาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 2 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตรพบว่าเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลในประสิทธิภาพในการลดค่า COD เพิ่มขึ้นโดย pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุดซึ่ง pH 3 และ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมา ดังแสดงในตาราง 4.15 และภาพ 4.12

ตาราง 4.15 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสีย ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม

ค่า pH ที่ ทำการศึกษา	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (330 mg/L)	0.0	15.7	15.7	23.5	23.5
pH 7 (304 mg/L)	0	17	17	17	17
pH 11 (190 mg/L)	0	20	20	20	40



ภาพ 4.12 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม

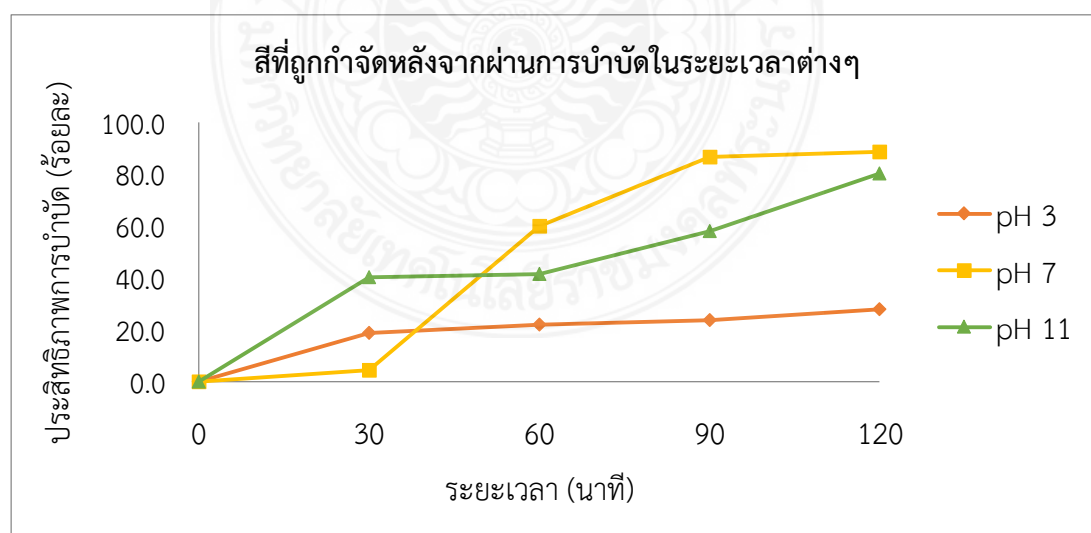
4.5.4 อัตราการลดสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

4.5.4.1 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร

ผลการทดลองความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมที่บำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.5 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตรในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที ที่สภาวะ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าสีรองลงมา คือ pH 11 และ pH 3 คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 88.5, 80.3 และ 28.0 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.16 และภาพ 4.13

ตาราง 4.16 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม

ค่า pH ที่ ทำการศึกษา	สี ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (550 ADMI)	0.0	18.7	22.0	23.8	28.0
pH 7 (375 ADMI)	0	4.5	60	86.7	88.5
pH 11 (305 ADMI)	0	40.2	41.6	58	80.3



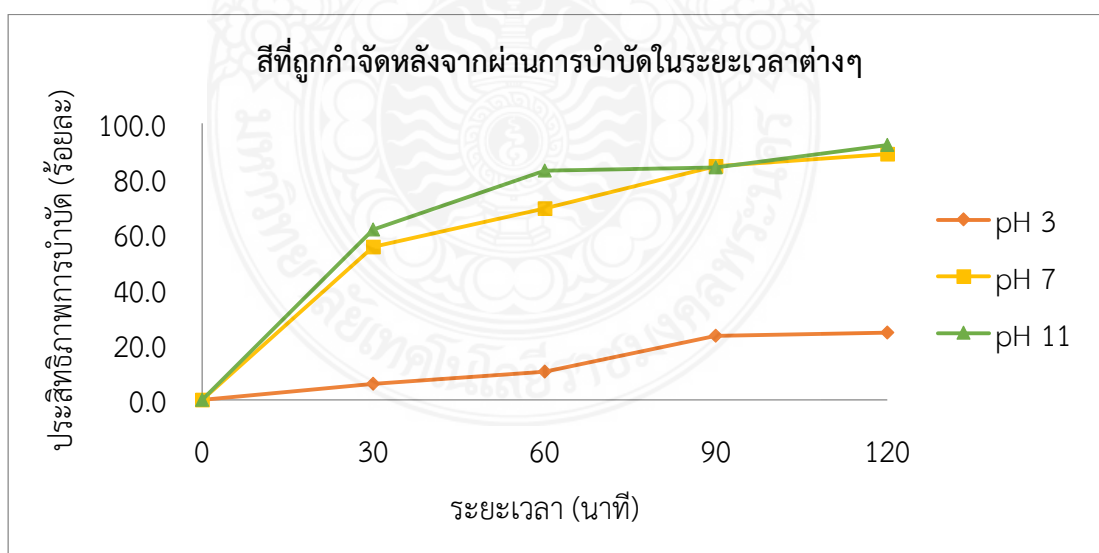
ภาพที่ 4.13 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัม

4.5.4.2 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร

ผลการทดลองความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมที่บำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 1 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร ในระยะเวลาเต็มโอโซน 120 นาที ที่สภาวะ pH 11 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าสีรองลงมา คือ pH 7 และ pH 3 คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 92.1, 88.9 และ 24.2 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.17 และภาพ 4.14

ตาราง 4.17 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม

ค่า pH ที่ ทำการศึกษา	สีที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (308 ADMI)	0.0	5.7	10.1	23.2	24.2
pH 7 (280 ADMI)	0	55.4	69.3	84.6	88.9
pH 11 (239 ADMI)	0	61.5	82.8	84.1	92.1



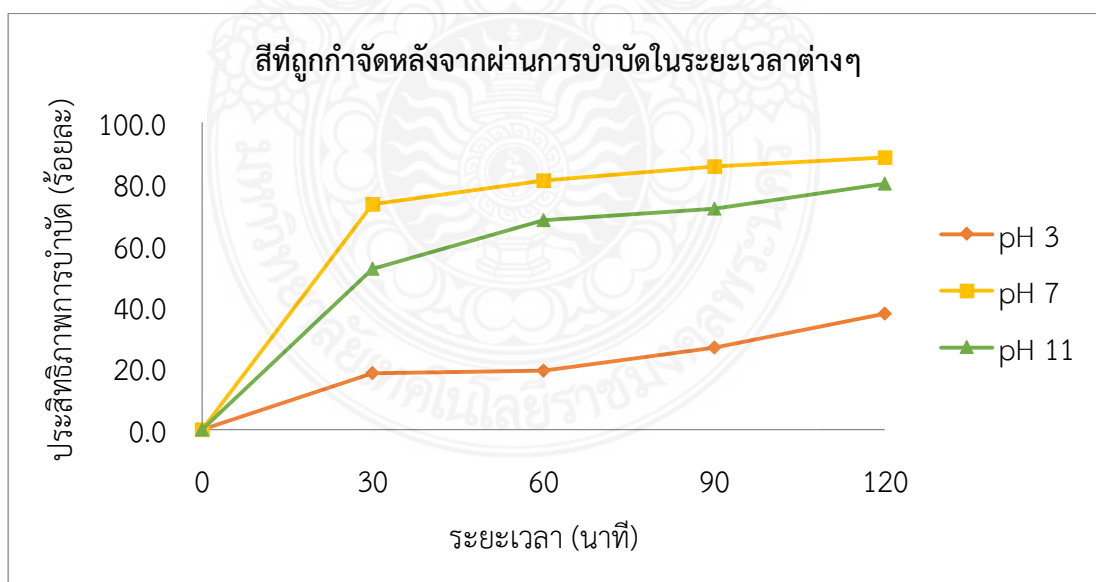
ภาพ 4.14 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัม

4.5.4.3 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร

ผลการทดลองความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมที่บำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 2 กรัมในน้ำเสีย 1 ลิตร ในระยะเวลาเต็มโอโซน 120 นาที ที่สภาวะ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าสีรองลงมา คือ pH 11 และ pH 3 คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 88.5, 80.0 และ 37.7 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.18 และภาพ 4.15

ตาราง 4.18 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	สีที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (424 ADMI)	0.0	18.4	19.1	26.7	37.7
pH 7 (244 ADMI)	0	73.4	81.1	85.7	88.5
pH 11 (270 ADMI)	0	52.2	68.1	71.9	80



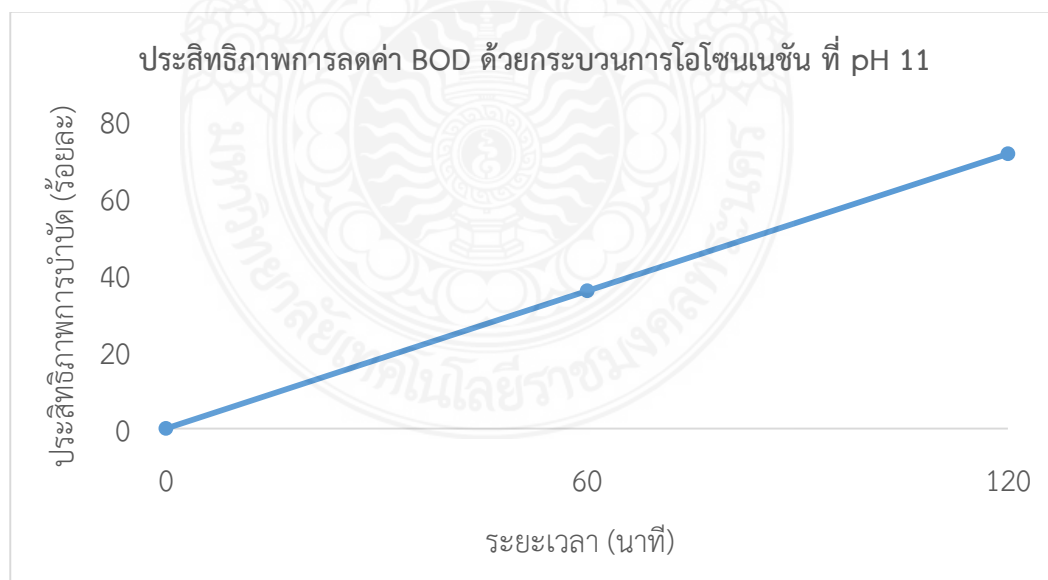
ภาพ 4.15 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม

4.6 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ในสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่น

จากการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นโดยน้ำเสียจากสีย้อมผ้าที่สังเคราะห์ขึ้นซึ่งมีค่า BOD 180 มิลลิกรัมต่อลิตรและหลังตกตะกอนเคมีซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นก่อนการบำบัด พบว่ามีค่า BOD เท่ากับ 21.02 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยทำศึกษาประสิทธิภาพในเพื่อกำจัดสีปรากฏที่อยู่ในน้ำ พบว่ามีค่า BOD 21.02 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เป็นค่าเริ่มต้นก่อนการบำบัด โดยทำศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ในค่า pH ที่เหมาะสม คือ pH 11 ที่ความเข้มข้น COD เริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการบำบัด ในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 60 นาที สามารถลดค่า BOD ได้เท่ากับ 13.51 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 60 และ 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 35.7 และ 71.45 ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.19 และภาพ 4.16

ตาราง 4.19 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ pH 11

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	BOD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)			ประสิทธิภาพในการบำบัด (ร้อยละ)
	0 นาที	60 นาที	120 นาที	
pH 11 (21.02 mg/L)	0	35.7	71.5	71.5



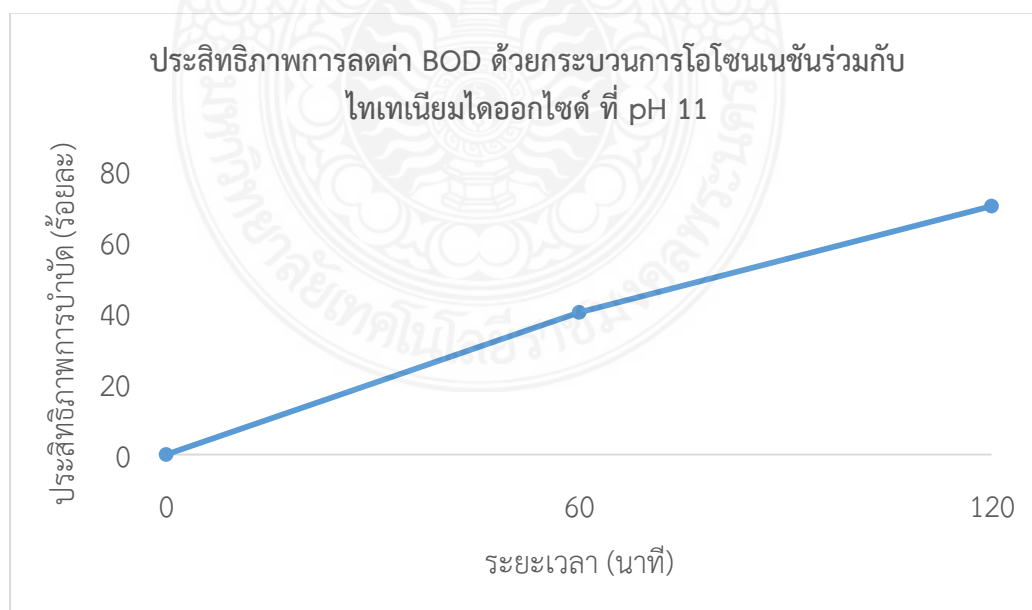
ภาพ 4.16 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ pH 11

4.7 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ในสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยน้ำเสียจากสีย้อมผ้าที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่า BOD 180 มิลลิกรัมต่อลิตรและหลังตกตะกอนเคมีเพื่อกำจัดสีปรากฏที่อยู่ในน้ำ พบว่ามีค่า BOD 25 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เป็นค่าเริ่มต้นก่อนการบำบัด โดยทำศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ในค่า pH ที่เหมาะสม คือ pH 11 ที่ความเข้มข้น COD เริ่มต้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งเป็นสถานะที่ดีที่สุดในการบำบัด ในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 60 นาที สามารถลดค่า BOD ได้เท่ากับ 15 และ 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงเวลา 60 และ 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 40 และ 70 ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.20 และภาพ 4.17

ตาราง 4.20 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ pH 11

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	BOD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)			ประสิทธิภาพในการบำบัด (ร้อยละ)
	0 นาที	60 นาที	120 นาที	
pH 11 (25 mg/l)	0	40	70	70



ภาพ 4.17 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ pH 11

4.8 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน

จากการทดลองพบว่าปริมาณโอโซน 1 กรัม สามารถกำจัด COD ได้ 11.5740 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปริมาณโอโซน 5.1840 กรัม ในระยะเวลา 2 ชั่วโมงผลการทดลองพบว่าปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดมีค่าเฉลี่ยที่ 0.0431 กรัมต่อนาที ต่อน้ำเสีย 10.5 ลิตรดังแสดงในตาราง 4.21

ตาราง 4.21 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
0	0	0	0
30	1.2960	46.67	36.01
60	2.5920	60	23.14
90	3.8880	60	15.43
120	5.1840	60	11.57

4.9 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการทดลองพบว่าปริมาณโอโซน 1 กรัม สามารถกำจัด COD ได้ 16.9515 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปริมาณโอโซน 4.4928 กรัม ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 2 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ในระยะเวลา 2 ชั่วโมงผลการทดลองพบว่าปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดมีค่าเฉลี่ยที่ 0.0374 กรัมต่อนาที ต่อน้ำเสีย 10.5 ลิตร ดังแสดงในตาราง 4.22

ตาราง 4.22 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
0	0	0	0
30	1.1232	32.08	28.56
60	2.2464	32.08	14.28
90	3.3696	32.08	9.52
120	4.4928	76.16	16.95

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูโพลีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในปริมาณที่ต่างกันตั้งแต่ 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ในการเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\cdot}) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นเพียงอย่างเดียว โดยใช้เครื่องผลิตโอโซนที่กำลังในช่วง 2.62 – 3.10 กรัมต่อชั่วโมง พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD และสี ในน้ำเสียที่ได้จากการสังเคราะห์ให้มีค่าความสกปรกใกล้เคียงกับโรงงานฟอกย้อม ได้แก่ ค่า pH ของน้ำ ค่าความเข้มข้นของ COD เริ่มต้น ระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน และปริมาณโอโซนที่เข้าทำปฏิกิริยา

5.1.1 ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

5.1.1.1 ค่า pH ของน้ำเสียที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ความเข้มข้นของ COD เริ่มต้นที่ 320, 306 และ 300 mg/L ในระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 12.5, 8.7 และ 29.0 ตามลำดับ

5.1.1.2 ค่า COD เริ่มต้นจากสถานะที่เหมาะสมในการบำบัด ที่ pH 11 ที่ความเข้มข้น 100 % ,50 % และ 25 % ความเข้มข้นของ COD เริ่มต้นที่ 300, 180 และ 100 mg/L ในระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 29, 33.3 และ 20 ตามลำดับ

5.1.1.3 ค่าความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ความเข้มข้นเริ่มต้น 550, 334 และ 550 ADMI ในระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที สามารถลดค่าความเข้มสีได้ร้อยละ 41.6, 94.3 และ 90 ตามลำดับ

5.1.2 ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

5.1.2.1 ค่า pH ของน้ำเสียที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ในปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ความเข้มข้นของ COD เริ่มต้นที่ 241, 228 และ 253 mg/L ในระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 28.9, 16.7 และ 25.0 ตามลำดับ

5.1.2.2 ค่า pH ของน้ำเสียที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ในปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ความเข้มข้นของ COD เริ่มต้นที่ 228, 304 และ 190 mg/L ในระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 27.8, 17.0 และ 26.7 ตามลำดับ

5.1.2.3 ค่า pH ของน้ำเสียที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ในปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ความเข้มข้นของ COD เริ่มต้นที่ 330, 304 และ 190 mg/L ในระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 23.5, 17.0 และ 40.0 ตามลำดับ

5.1.2.4 ค่า COD เริ่มต้นจากสถานะที่เหมาะสมในการบำบัด ที่ pH 11 ในปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ที่ความเข้มข้น 100 % ,50 % และ 25 % ความเข้มข้นของ COD เริ่มต้นที่ 190, 165 และ 126 mg/L ในระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 40.0, 25.0 และ 30.8 ตามลำดับ

5.1.2.5 ค่าความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ในปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ความเข้มเริ่มต้น 550, 375 และ 305 ADMI ในระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที สามารถลดค่าความเข้มสีได้ร้อยละ 28.0, 88.5 และ 80.3 ตามลำดับ

5.1.2.6 ค่าความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ในปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ความเข้มเริ่มต้น 308,280 และ 239 ADMI ในระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที สามารถลดค่าความเข้มสีได้ร้อยละ 24.4, 88.9 และ 92.1 ตามลำดับ

5.1.2.7 ค่าความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ในปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ความเข้มเริ่มต้น 424, 244 และ 270 ADMI ในระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที สามารถลดค่าความเข้มสีได้ร้อยละ 37.7, 88.5 และ 80.0 ตามลำดับ

5.1.3 สรุปภาพรวมจากการทดลอง

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการลดค่า COD และ สี ในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมประเภท ไตรเร็กซ์ ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น และกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้เครื่องผลิตโอโซนที่มีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 2.62 – 3.10 กรัมต่อชั่วโมง ในการทดลอง ซึ่งปัจจัยที่มีผลในการศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่า COD และ สี ในน้ำเสียได้แก่ค่า pH ของน้ำเสีย ค่า COD เริ่มต้น และระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซน โดยพบว่าระบบบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกมีประสิทธิภาพสูงกว่าจากระบบบำบัดที่ใช้โอโซนเนชั่นเพียงอย่างเดียวในสถานะค่า pH 11 ความเข้มข้นค่าซีไอดีเริ่มต้นที่ร้อยละ 50 มีความสามารถในการลดค่าซีไอดี และสีได้สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 33.3 และ 90 จากความเข้มสี 550 ADMI โดยค่าซีไอดีเริ่มต้น 180 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยประสิทธิภาพของกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 2 กรัม ในต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ในสถานะค่า pH 11 ความเข้มข้นค่าซีไอดี เริ่มต้นที่ร้อยละ 100 มีความสามารถในการลดค่าซีไอดี และสีได้สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 40 และ 80 จากความเข้มสี 270 ADMI และมีค่าซีไอดีเริ่มต้น 190 มิลลิกรัมต่อลิตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป จากการศึกษาครั้งนี้ มีข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่ต้องการทำการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

5.2.1 ข้อเสนอแนะด้านการทดลองวิจัยครั้งต่อไป

5.2.1.1 ชุดถังทำปฏิกิริยาควรเป็นรูปทรงกระบอกเพื่อทนต่อแรงดันของน้ำเสียภายในถังทำปฏิกิริยา

5.2.1.2 ควรทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโอโซน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศต่ออัตราการผลิตโอโซน

5.2.1.3 ควรศึกษาปัจจัยของค่า pH ของน้ำเสียที่ละเอียดมากขึ้นเพื่อความชัดเจนของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

5.2.1.4 ควรศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนให้มีระยะเวลานานขึ้น ว่ามีผลต่อความเปลี่ยนแปลงในการบำบัดน้ำเสียในทิศทางใด

5.2.1.5 ควรมีการทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าประเภทอื่น ๆ ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้ตัวกลางพลาสติกเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูทูล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

5.2.1.6 ควรศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกซิลเรดิคัล ในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อความชัดเจนของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

5.2.2 ข้อเสนอแนะด้านการนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

5.2.2.1 จากการศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่า COD และสี ในน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูทูล์ในการเร่งปฏิกิริยา โดยค่า COD ของน้ำเสียเริ่มต้นหลังทำการกำจัดสีปรากฏด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี ต้องมีค่า ไม่เกิน 300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เครื่องผลิตโอโซนที่มีกำลังการผลิตไม่น้อยกว่า 0.0374 กรัมต่อนาที ต่อปริมาตรน้ำเสีย 10.5 ลิตร พร้อมทั้งจะต้องมีการเติมอากาศที่มากพอให้ตัวกลางพลาสติกที่เคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์เคลื่อนตัวเพื่อให้เกิดการสัมผัสกับน้ำเสียอย่างทั่วถึง

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2560. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.diw.go.th/hawk/news/11.PDF>, 25 กุมภาพันธ์ 2563.
- กัณฑ์ศรี ศรีพงศ์พันธุ์. 2547. **มลพิษทางน้ำ**. พิมพ์ครั้งที่ 3. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร. กรุงเทพมหานคร. นครปฐม.
- กัลยา ศรีสุวรรณ. 2547. **โมเดลการเกิดฟาวลิงของเมมเบรนสำหรับการกำจัดสีในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- การะเกด เทศศรี. 2556. **“ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน : เทคโนโลยีการเร่งปฏิกิริยายุคใหม่.”** (ภาควิชาเคมี). คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. **ของเสียอันตราย**. (ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม). คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยรังสิต.
- ชนิษฐา ภูมิจักร. 2550. **สีย้อมผ้าในอุตสาหกรรมฟอกย้อม**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370, 8 กุมภาพันธ์ 2563.
- ชื่นจิต ชาญชิตปรีชา. 2542. **“การใช้สารกำจัดสีและซีโอทีในน้ำทิ้งจากโรงงานสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ.”** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม. คณะสาธารณสุขศาสตร์. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ฉมาลีดา เนียมมณี. 2542. **การกำจัดสีรีแอกทีฟ 2 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยแบคทีเรียเด่นในกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดุชนิ สุนทรารุณ. 2531. **การออกแบบลายพิมพ์ผ้า**. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพมหานคร.
- ธงชัย พรธณสวัสดิ์. 2527. **“การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า.”** (ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาลและสถาบันวิจัยและพัฒนา). คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชนกฤต พรหมทอง. 2552. **“การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเพนตันรีเอเจนต์.”** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. การจัดการสิ่งแวดล้อม. คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บางกอกทูเดย์. 2562. **“สถาบันสิ่งทอ”** **ชี้ตัวเลขส่งออกสิ่งทอตลาต (EU) รุ่ง พร้อมแนะผู้ประกอบการ SME ในอุตสาหกรรมแฟชั่นและไลฟ์สไตล์**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://bangkok-today.com/web/สถาบันสิ่งทอ-ชี้ตัวเลข/>, 25 พฤศจิกายน 2562.
- ปาริชาติ นรนาถตระกูล. 2549. **“ผลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มโคโตนานเพื่อการกำจัดสีย้อม.”** สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ปิยะวิทย์ ทิพรส. ม.ป.ป. วารสารวิชาการ. สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร. คณะศิลปศาสตร์ และวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล. 2548. “โครงการการใช้กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันในการบำบัดน้ำเสียขึ้นต้นสำหรับน้ำเสียจากโรงพยาบาล.” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. (ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พิมพ์ชนก เต็งเจริญ. 2546. “การกำจัดสีของน้ำทิ้งในการผลิตลิกนินโดยราไวต์รอต.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิมล พันธุ์จงหาญ. 2549. “การกำจัดสีเบิลด์ด้วยกลไกการดูดซับทางชีวภาพ.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพศาล วีรกิจ. 2549. การผลิตน้ำสำหรับอุตสาหกรรม. (พิมพ์ครั้งที่ 2). โรงพิมพ์ หจก. นำอักษรการพิมพ์.
- พิสิทธ์ อุดมทรัพย์. 2555. “การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารเคลือบผิวดูดกลืนของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ เพื่อยับยั้งแบคทีเรียในน้ำเสีย.” (ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน). คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มงคล ต๊ะอุ่น และ สุทธิพงศ์ เป็รื่องคำ. 2546. “น้ำเสียและแนวทางการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม.” วารสารศูนย์บริการวิชาการ. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. 2539. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. 2540. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. 2551. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รวิต เจียสกุล. 2548. “การกำจัดสีด้วยโอโซนจากสารละลายลิกนินในท่อแวนระนาบ.” สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. (ภาควิชาวิศวกรรมเคมี). คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วราภรณ์ กัลยาเลิศ. 2540. “การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยโอโซน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- วราภรณ์ อภิวัฒน์ภิวัด, ต่อพงศ์ กรีธาชาติ และพิลาณี ไฉนอมสัจย์. 2550. การลดสีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดย โอโซนออกซิเดชัน. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 45. สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- วีรานุช หลาง, ธนสิริ มีชัย และ วิชชุพร จันทร์ศรี. 2551. ความสามารถในการกำจัดสีย้อมผ้าประเภทที่แยกทีฟของ *Burkholderia glumae*. Environment and Natural Resources Journal.

วูถินันท์ ศิริพงษ์. 2544. “การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการฟิโตออกซิเดชัน โดยใช้ไทเทเนียม

ไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภลักษณ์ อรรณพ. 2552. ผลของการเติมอากาศแบบเป็นช่วงต่อระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมม

เบรนสำหรับบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, การจัดการ

สิ่งแวดล้อม. คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุจินต์ พนาปวุฒิกุล. 2534. การบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ. สภาอุตสาหกรรม

แห่งประเทศไทย.

สุทธิณี นาควิทยา. 2551. “ออกซิเดชันสาร 2,6-ไดเมธิลอะนิลีนโดยกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดเฟน

ตัน.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย.

สุพิชฌาย วิจารณรงค์. 2550. “ผลของไอโซนต่อประสิทธิภาพการขจัดสี.” ปริญญาวิทยาศาสตร

บัณฑิต. คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุเมธ ชวเดช. 2539. “การพัฒนากระบวนการออกซิเดชันไอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย.”

วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรพล รักปทุม. 2545. ไอโซนเพื่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม. โรงพิมพ์ภาพพิมพ์. กรุงเทพมหานคร.

อุดร จารุรัตน์, จารุรัตน์ วรนิสรากุล และศักดิ์ชัย สุริยจันทร์ทอง. 2542. “วิศวกรรมการประปา

และสุขาภิบาล เล่ม 1.” ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าธนบุรี.

อลิสสา อสัมภินชาติ . 2544. การกำจัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษโดยการใช้สารไททา

เนียมไดออกไซด์ ร่วมกับการออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเลต. กรุงเทพมหานคร :

ฐานข้อมูลวิทยานิพนธ์ไทย.

Allen, W., Prescott, W.B., Derby, R.E., Garland, C.E., Peret, J.M. and Saltzman, M. 1973.

Determination of Color of Water and Wastewater by Means of ADMI Color

Values. Proc. 28th Ind. Waste Conf., Purdue Univ.

Chermisnoff, N.P. and P.N. Chereminnoff. 1993. **Water Treatment and Waste**

Recovery Advanced Technology and Application. Prentice Hall, Inc.,

Englewood Cliffs, New jersey. 310 p.

Debendra K. Sahoo and Rimpay Gupta. 2005. **Evaluation of ligninolytic**

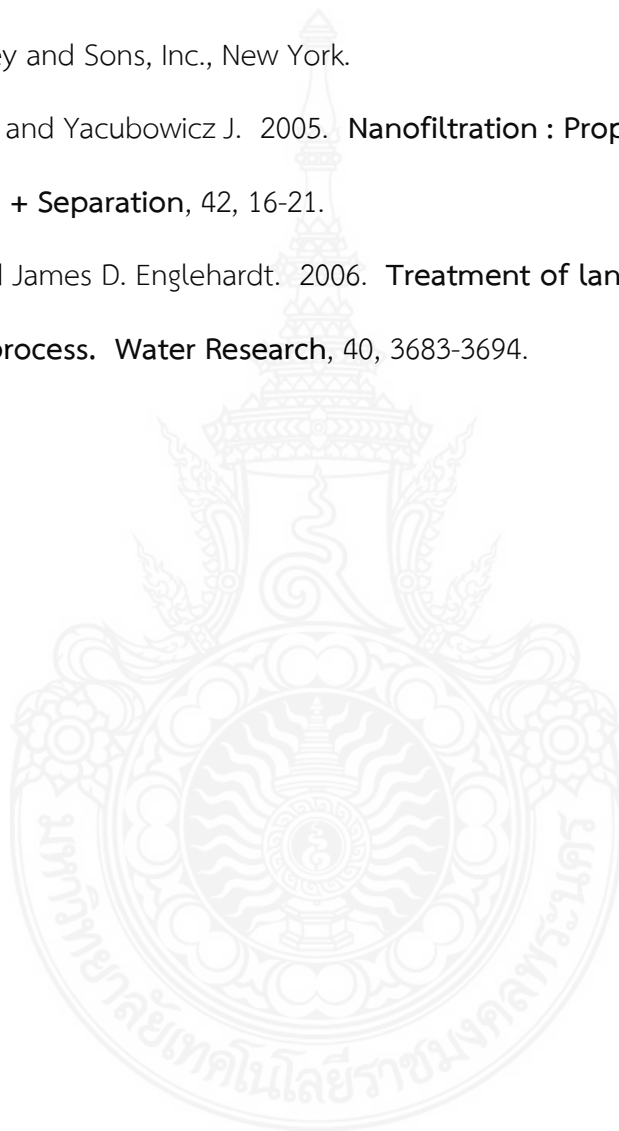
microorganisms for efficient decolorization of a small pulp and paper mill

effluent. Process Biochemistry, 40, 1573-1578.

- Dilek á F B., Taplamacioglu á H. M. and Tarlan E. 1999. **Colour and AOX removal from pulping effluents by algae.** Applied Microbiology and Biotechnology, 52, 585-591.
- Duygu Ozsoy H. and Van Leeuwen J. 2010. **Removal of Color from Fruit Candy Waste by Activated Carbon Adsorption.** Journal of Food Engineering, 101, 106-112.
- Fox, M. A. and Dulay, M. T. 1993. **Heterogeneous Photocatalysis.** Chemical Rev. 93 (1): 341-357.
- Gottschalk, C., Libra J. A. and Saupe A. 2000. **Ozonation of Water and Waste Water.** WILEY-VCH, Inc., Germany. 189 p.
- limura Y. , Hartikainen P. and Tatsumi K. 1996. **Dechlorination of tetrachloroguaiacol by laccase of white-rot basidiomycete.** Applied Microbiology and Biotechnology, 45, 434-439.
- Ku, Y., Su W.J. and Shen Y.S.. 1996. **Decomposition kinetic of ozone in aqueous Solution.** Ind. Eng. Chem. Res. 35: 3369-3374.
- Langlais, B., Reckhow, D.A. and Brink, D.R., 1991. **Ozone in Water Treatment: Application and Engineering.** Chelsea: Lewis., C.
- Leontievsky A., Myasoedova N., Baskunov B., Golovleva L., Bucke C. and Evans C. 2001. **Transformation of 2,4,6-trichlorophenol by free and immobilized fungal laccase.** Applied Microbiology and Biotechnology, 57, 85-91.
- Li, F. B., and Li, X. Z. 2002. **The enhancement of photodegradation efficiency using Pt – TiO₂ Catalyst.** Chemosphere. 48.10: 1103 -1111.
- Lin, S.H. and Yeh, K.L., 1993. **Looking to Treat Wastewater ? Try Ozone.** Chemical Engineering. p. 112-116.

- Majumder, S.B. and Sproul, O.J. 1974. **Technical and economic aspects of water and Wastewater Ozonation.** Wat. Res. 9: 253-260.
- McGrath, W.D. and Norrish, R.G.W. 1960. **Studies of the reactions of excited oxygen atoms and molecules produced in the flash photolysis of ozone.** Proc. R. Soc. A.: 254-317.
- Paillard, H., Dorel, M. and Bourbogot, M.M., 1991. **Prospect Concerning Application of Catalytic Ozonation in Drinking Water Treatment,** Proc 10th Ozone World Congress. Monaco, vol. 1 : p. 261-279
- Rangnekar, D.W. and Singh, P.P. 1980. **An Introduction to Synthetic Dyes.** Dhanraj: Himalaya Publishing House: p. 21-28.
- Rice R.G., Miller G.W., Robson C.M. and Hill A.G. 1980. **Ozone Utilization in Europe.** In. **AIChE Symposium Series,** Ozone Institute, Toronto, 117-134.
- Roop Chand Bansal and Meenakshi Goyal. 2005. **Activated Carbon Adsorption.** CRC Press.
- Seungkwan Hong and Menachem Elimelech. 1997. **Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes.** Journal of Membrane Science, 132, 159-181.
- Tomiyaso, H., Fukutomi H. and Gordon G.. 1985. **Kinetics and Mechanisms of Ozone Decomposition in Basic Aqueous Solution.** Inorg. Chem. 24: 2962-2985.
- Van der Horst H.C., Timmer J. M. K., Robbertsen T. and Leenders J. 1995. **Use of nanofiltration for concentration and demineralization in the dairy industry:** Model for mass transport. Journal of Membrane Science, 104, 205-218.
- Vigo, T.L. 1994. **Textile Processing and Properties.** Elsevier, New York. 415 p.
- Walker G.M. and Weatherley L.R. 2000. **Biodegradation and biosorption of acid anthraquinone dye.** Environmental Pollution, 108, 2, 219-223.

- Wang, J., Guo, B., Zhang, X., Zhang, Z., Han, J. and Wu, J. 2004. **Sonocatalytic degradation of methyl orange in the presence of TiO₂ catalysts and catalytic activity comparison of rutile and anatase.** *Ultrasonics Sonochemistry*, 12: 331-337.
- Weber, W.J., Jr. 1972. **Physicochemical Processes for Water Quality Control.** John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Yacubowicz H. and Yacubowicz J. 2005. **Nanofiltration : Properties nano and uses.** *Filtration + Separation*, 42, 16-21.
- Yang Deng and James D. Englehardt. 2006. **Treatment of landfill leachate by the Fenton process.** *Water Research*, 40, 3683-3694.





ภาคผนวก

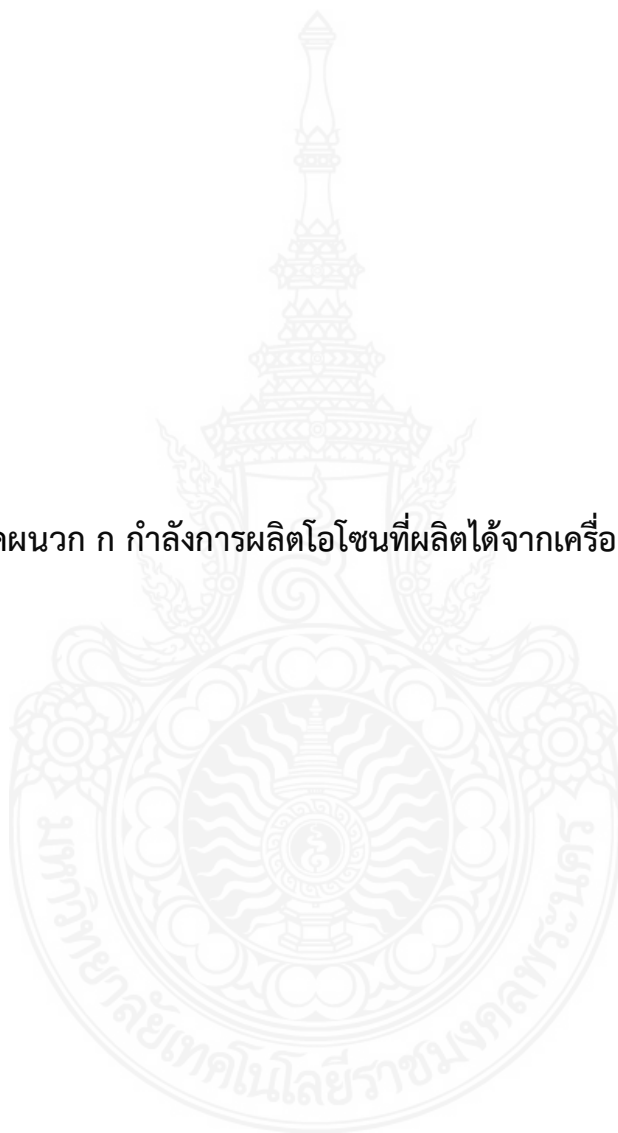
ภาคผนวก ก กำลั้การผลิตโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน

ภาคผนวก ข ผลการศึกษาน้ำเสียเริ่มต้น

ภาคผนวก ค อัตราการเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซน

ภาคผนวก ง ผลการทดลองและตัวอย่างวิธีการคำนวณ

ภาคผนวก ก กำลังการผลิตโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน



กำลังการผลิตโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน

ทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณโอโซนที่ทำการผลิตในกระบวนการโอโซนเนชั่นโดยใช้สารละลาย KI ใส่ใน Trap A และ Trap B จำนวน Trap ละ 250 มิลลิลิตร เป่าโอโซนเป็นเวลาครั้งละ 10 นาที แล้วทำการไตเตรตด้วยสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติเป็นสีใส ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางภาคผนวก ก1

ตารางภาคผนวก ก1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในกระบวนการโอโซนเนชั่น

ครั้งที่	ระยะเวลาในการเติม โอโซน (นาที)	ปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 1 N ที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)			ปริมาณ O_3 (กรัม/ชั่วโมง)
		Trap A	Trap B	Total	
1	10	19.4	1.9	21.3	3.07
2	10	18.1	2	20.1	2.89
3	10	18.3	1.9	20.2	2.91
4	10	18.6	2.2	20.8	3.00
5	10	20.1	1.1	21.2	3.05
ค่าการผลิตสูงสุด					3.07
ค่าการผลิตต่ำสุด					2.89
ค่าพิสัย					0.18
ค่าเฉลี่ย					2.98
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน					0.080

ทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณโอโซนที่ทำการผลิตในกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้สารละลาย KI ใส่ใน Trap A และ Trap B จำนวน Trap ละ 250 มิลลิลิตร เป่าโอโซนเป็นเวลาครั้งละ 10 นาที แล้วทำการไตเตรตด้วยสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติเป็นสีใส ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางภาคผนวก ก2

ตารางภาคผนวก ก2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในกระบวนการโอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

ครั้งที่	ระยะเวลาในการเติม โอโซน (นาที)	ปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 1 N ที่ใช้ไตเตรท (มิลลิลิตร)			ปริมาณ O_3 (กรัม/ชั่วโมง)
		Trap A	Trap B	Total	
1	10	20	1.4	21.4	3.08
2	10	17.2	1.6	18.8	2.71
3	10	19.2	2.3	21.5	3.10
4	10	19	1.3	20.3	2.92
5	10	19.2	2.3	21.5	3.10
6	10	19.2	2.3	21.5	3.10
7	10	20	1.4	21.4	3.08
8	10	16.3	1.9	18.2	2.62
9	10	17.2	1.8	19	2.74
10	10	17.2	1.8	19	2.74
11	10	18.1	1.7	19.8	2.85
ค่าการผลิตสูงสุด					3.10
ค่าการผลิตต่ำสุด					2.62
ค่าพิสัย					0.48
ค่าเฉลี่ย					2.91
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน					0.188

ตัวอย่างการคำนวณ

แสดงการคำนวณปริมาณโอโซนที่เครื่องผลิตได้จากการทดลองครั้งที่ 1 ระยะเวลาในการเป่าโอโซน 10 นาที ปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 1 N ที่ใช้ไตเตรท Trap A 19.4 มิลลิลิตร และ Trap B 1.9 มิลลิลิตร นำปริมาณ ไปคำนวณปริมาณโอโซนตามสมการ

$$\text{ปริมาณโอโซน (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)} = \frac{(A+B) \times N \times 24}{\text{เวลาเติมโอโซน (นาที)}} \times 60$$

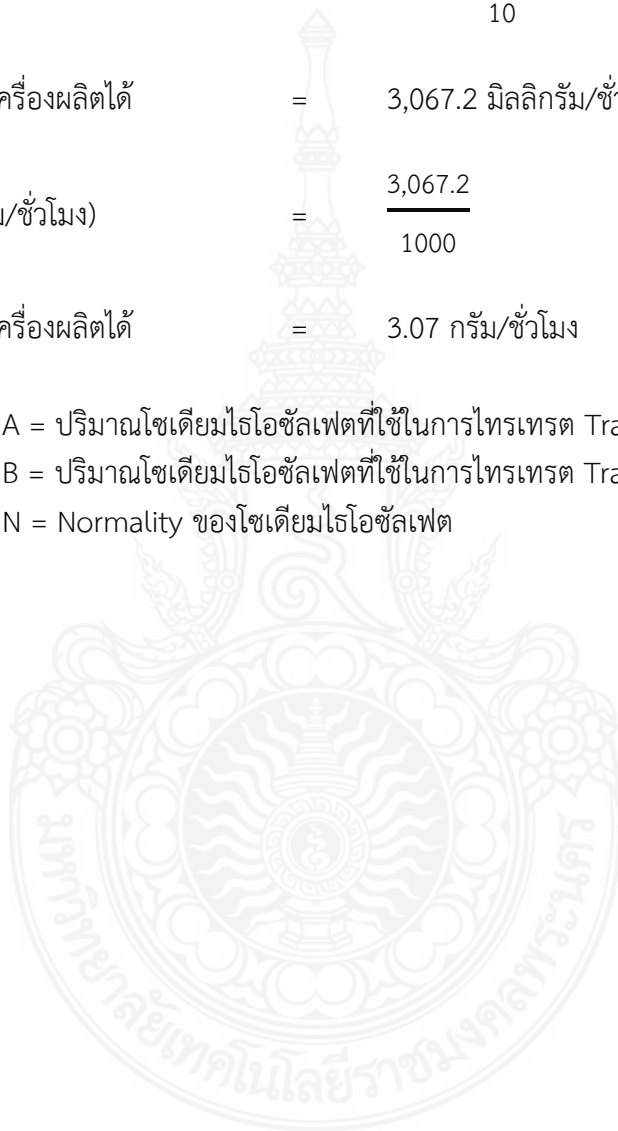
$$\text{แทนค่า ปริมาณโอโซน (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)} = \frac{(19.4+1.9) \times 1 \times 24}{10} \times 60$$

$$\text{ปริมาณโอโซนที่เครื่องผลิตได้} = 3,067.2 \text{ มิลลิกรัม/ชั่วโมง}$$

$$\text{แปลงหน่วย (กรัม/ชั่วโมง)} = \frac{3,067.2}{1000}$$

$$\text{ปริมาณโอโซนที่เครื่องผลิตได้} = 3.07 \text{ กรัม/ชั่วโมง}$$

เมื่อ A = ปริมาณโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต Trap A (มิลลิกรัม)
 B = ปริมาณโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต Trap B (มิลลิกรัม)
 N = Normality ของโซเดียมไฮโอซัลเฟต



ภาคผนวก ข ผลการศึกษาน้ำเสียเริ่มต้น



การศึกษาพารามิเตอร์ของน้ำเสียเริ่มต้น

น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียจากการสังเคราะห์ตามอัตราส่วนขอสถานประกอบการที่ทำการศึกษา โดยผสมสีชนิดไดเร็กซ์ต่อน้ำอัตราส่วน 4 กรัมต่อลิตร โดยได้ทำการศึกษาค่าความสกปรกของน้ำเสียก่อนเข้ากระบวนการบำบัดได้ ดังนี้

ตารางภาคผนวก ข1 ค่าความสกปรกของน้ำเสียเริ่มต้น

น้ำตัวอย่าง (ก่อนเข้าระบบบำบัด) ความเข้มข้น (%)	ปริมาณ COD ที่วิเคราะห์ได้		
	ก่อนตกตะกอน (มิลลิกรัม/ลิตร)	หลังตกตะกอน (มิลลิกรัม/ลิตร)	อัตราการกำจัด (ร้อยละ)
100 %	1000	300	70
50 %	480	180	62.5
25 %	260	100	61.5

ตารางภาคผนวก ข2 ค่าความสกปรกของน้ำเสียเริ่มต้น

น้ำตัวอย่าง (ก่อนเข้าระบบบำบัด) ความเข้มข้น (%)	ปริมาณค่าความสกปรกของน้ำเสียเริ่มต้น		
	COD (มิลลิกรัม/ลิตร)	BOD (มิลลิกรัม/ลิตร)	ช่วงของค่า BOD (มิลลิกรัม/ลิตร)
100 %	1000	180	500

ตัวอย่างวิธีการคำนวณเลือกช่วงของค่าบีโอดี

น้ำเสียมีค่า COD = 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ค่า BOD ประมาณ = $\frac{\text{ค่า COD}}{2}$

= $\frac{1,000}{2}$

= 500

= 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

= 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาคผนวก ค อัตราการเข้าทำปฏิริยาของไอโซน



อัตราการเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซน

ตารางภาคผนวก ค1 ผลการทดลองปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ที่สภาวะค่า pH 3, pH 7, pH 11 ความเข้มข้นร้อยละ 100

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
สภาวะที่ pH3			
0	0	0	0
30	1.4040	13.33	9.49
60	2.8080	26.67	9.49
90	4.2120	40	9.49
120	5.6160	40	7.12
สภาวะที่ pH7			
0	0	0	0
30	1.0368	6.67	6.67
60	2.0736	13.34	6.43
90	3.1104	13.34	4.28
120	4.1472	26.67	6.43
สภาวะที่ pH11			
0	0	0	0
30	1.2600	20	15.87
60	2.5200	33.33	13.22
90	3.7800	60	15.87
120	5.0400	86.67	17.19

ตารางภาคผนวก ค2 ผลการทดลองปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ที่สภาวะค่า pH 11 ความเข้มข้นร้อยละ 50

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
0	0	0	0
30	1.2960	46.67	36.01
60	2.5920	60	23.14
90	3.8880	60	15.43
120	5.1840	60	11.57

ตารางภาคผนวก ค3 ผลการทดลองปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการ
โอโซนเนชั่น ที่สภาวะค่า pH 11 ความเข้มข้นร้อยละ 25

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
0	0	0	0
30	1.3680	6.7	4.89
60	2.7360	20	7.30
90	4.1040	20	4.87
120	5.4720	20	3.65

ตารางภาคผนวก ค4 ผลการทดลองปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการ
โอโซนเนชั่นร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่สภาวะค่า pH 3 ความเข้มข้นร้อยละ 100

ปริมาณ (g)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร			
0	0	0	0
30	1.2312	50.77	41.24
60	2.4624	50.77	20.62
90	3.6936	50.77	13.75
120	4.9248	69.81	14.17
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร			
0	0	0	0
30	0.9504	12.69	13.35
60	1.9008	12.68	6.67
90	2.8512	50.77	17.81
120	3.8016	63.47	16.69
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร			
0	0	0	0
30	1.3536	51.84	38.30
60	2.7072	51.84	19.15
90	4.0608	77.76	19.15
120	5.4144	77.76	14.36

ตารางภาคผนวก ค5 ผลการทดลองปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการ

โอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่สภาวะค่า pH 7 ความเข้มข้นร้อยละ 100

ปริมาณ (g)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร			
0	0	0	0
30	1.3680	25.39	18.56
60	2.7360	25.39	9.30
90	4.1040	38.16	9.30
120	5.4720	63.47	11.60
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร			
0	0	0	0
30	1.1160	25.39	22.75
60	2.2320	38.08	17.06
90	3.3480	38.08	11.37
120	4.4640	50.77	11.37
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร			
0	0	0	0
30	1.1232	38.08	33.90
60	2.2464	38.08	16.95
90	3.3696	38.08	11.30
120	4.4928	76.16	16.95

ตารางภาคผนวก ค6 ผลการทดลองปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการ

โอโซนเนชันร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่สภาวะค่า pH 11 ความเข้มข้นร้อยละ 100

ปริมาณ (g)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร			
0	0	0	0
30	1.0296	0	0
60	2.0592	0	0
90	3.0888	38.08	12.33
120	4.1184	38.08	9.24

ตารางภาคผนวก ค6 (ต่อ)

ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร			
0	0	0	0
30	1.1304	25.92	22.93
60	2.2608	51.84	22.93
90	3.3912	51.84	15.29
120	4.5216	51.84	11.46
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร			
0	0	0	0
30	1.3176	51.84	39.34
60	2.6352	51.84	19.67
90	3.9528	51.84	13.12
120	5.2704	51.84	9.84

ตารางภาคผนวก ค7 ผลการทดลองปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 2 กรัม ที่สภาวะค่า pH 11 ความเข้มข้น ร้อยละ 50

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
0	0	0	0
30	1.2168	12.69	10.43
60	2.4336	50.77	20.86
90	3.6504	50.77	13.90
120	4.8672	50.77	10.43

ตารางภาคผนวก ค8 ผลการทดลองปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 2 กรัม ที่สภาวะค่า pH 11 ความเข้มข้น ร้อยละ 25

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
0	0	0	0
30	1.1808	12.69	10.75
60	2.3616	12.69	5.37
90	3.5424	12.69	3.58
120	4.7232	31.73	6.72

ภาคผนวก ง ผลการทดลองและตัวอย่างวิธีการคำนวณ



รายการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า BOD

ตารางภาคผนวก ง1 ผลปริมาณ BOD ที่เหลืออยู่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นในระยะเวลาต่าง

ค่า pH ที่ ทำการศึกษา	BOD ที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นในระยะเวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	DO ₀	DO ₅	อัตราเจือจาง
น้ำตัวอย่าง (ก่อนเข้าระบบบำบัด)	9.3	8.4	0.5
pH 11 0 min.	8.3	8.76	3.33
pH 11 60 min.	8.7	8.25	3.33
pH 11 120 min.	8.5	8.3	3.33

ตารางภาคผนวก ง2 ผลปริมาณ BOD ที่เหลืออยู่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นโดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระยะเวลาต่าง

ค่า pH ที่ ทำการศึกษา	BOD ที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นในระยะเวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)		
	DO ₀	DO ₅	อัตราเจือจาง
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม/ลิตร			
pH 11 0 min.	8.2	7.7	2
pH 11 60 min.	8.3	8	2
pH 11 120 min.	8.4	8.25	2

จากผลการทดลองในตารางภาคผนวก ง1 ปริมาณการไทเทตวัดปริมาณออกซิเจนของตัวอย่างน้ำตัวอย่าง วันแรก (DO₀) เท่ากับ 9.3 มิลลิกรัม และสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (0.025 นอร์มอล/ลิตร) ปริมาณออกซิเจนละลายในตัวอย่างน้ำจะมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ของออกซิเจนละลายน้ำ แต่ถ้าใช้สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่มีความเข้มข้นอื่นให้คำนวณปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

วิธีคำนวณ

$$DO = 40 \times M \times V$$

$$\text{แทนค่า DO} = 40 \times 9.3 \times 0.025$$

เมื่อ

$$DO = \text{ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)}$$

$$M = \text{ปริมาณสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (ml)}$$

$$V = \text{ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (Mol/L)}$$

การหาค่าบีโอดีทำได้โดยการวัดปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ในเวลา 5 วันในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 20°C จะทำการวัดปริมาณออกซิเจนของตัวอย่าง วันแรก (DO₀) และวันที่ 5 (DO₅) จากนั้นเอาค่ามาคำนวณหาค่า BOD ดังนี้

$$BOD \text{ (mg/L)} = \frac{(DO_0 - DO_5)}{P} \times 100$$

$$\text{แทนค่า BOD (mg/L)} = \frac{(9.3 - 8.4)}{0.5} \times 100$$

$$BOD \text{ ที่ได้} = 180 \text{ mg/L}$$

เมื่อ

$$DO_0 = \text{ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำของวันแรก (mg/L)}$$

$$DO_5 = \text{ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำของวันที่ 5 (ml)}$$

$$P = \text{อัตราการเจือจาง (Dilution) (\%)}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า COD

ตารางภาคผนวก ง3 ผลปริมาณ COD ที่เหลืออยู่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นในระยะเวลาต่าง

ค่า pH ที่ ทำการศึกษา	COD ที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นในระยะเวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3	320.0	306.7	293.3	280.0	280.0
pH 7	306.7	300.0	293.3	293.3	280.0
pH 11	300.0	280.0	266.7	240.0	213.0

ตารางภาคผนวก ง4 ผลปริมาณ COD ที่เหลืออยู่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นโดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระยะเวลาต่าง

ค่า pH ที่ ทำการศึกษา	COD ที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นในระยะเวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม/ลิตร					
pH 3	330.5	278.6	278.6	252.7	252.7
pH 7	304.6	252.7	252.7	252.7	252.7
pH 11	190.4	152.3	152.3	152.3	114.2

จากผลการทดลองในตารางภาคผนวก ง3 ความเข้มข้นของ COD เริ่มต้น 320 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเติมโอโซน 30 นาที มีค่า COD เท่ากับ 306.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ได้จากการทดลองคำนวณหาปริมาณ COD ตามสมการ

$$\text{COD (mg/L)} = \frac{(A-B) \times N \times 8000}{\text{ปริมาณน้ำตัวอย่าง}}$$

$$\text{แทนค่า COD (mg/L)} = \frac{(3.1-2.3) \times 0.25 \times 8000}{5}$$

$$\text{COD ที่ได้} = 320 \text{ mg/L}$$

เมื่อ A = ปริมาณของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรต blank (ml)
 B = ปริมาณของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง (ml)
 N = Normality ของ FAS ที่ใช้โรการไทเรต

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า ADMI

การหาค่า ADMI โดยการใช้เครื่อง Single Beam Spectrophotometer สถาบันผู้ผลิตสีแห่งอเมริกา (American Dye Manufacturers Institute : ADMI) ได้จัดตั้งคณะกรรมการทางนิเวศวิทยาขึ้นเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของสีย้อมผ้า (dyes) ต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้จำเป็นที่จะต้องหาวิธีในการวัดสีที่สามารถเชื่อถือได้มากกว่าวิธีการวัดสีที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยมีบรรทัดฐาน 4 ข้อคือ

- 1) สามารถใช้ได้กับสีทุกเฉดสี (hue)
- 2) สามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างของค่าสีที่ปริมาณน้อย ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) สัมพันธ์กับค่าวัดสีในหน่วย APHA

4) เครื่องมือที่ใช้ในการวัดราคาไม่สูงมากนัก

สิ่งที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ คือการวัดสีในหน่วยเอทีเอ็มไอ ซึ่งปกติการวัดสีในหน่วยเอทีเอ็มไอนี้ตาม Standard Methods 2120E จะต้องใช้เครื่อง Filter photometer โดยใช้ CIE tristimulus filters ประกอบด้วย แต่ที่ทำยหวัข้อนี้ใน Standard Method ก็ยังได้บอกว่าการวัดสีในหน่วยเอทีเอ็มไอนั้นยังสามารถหาได้โดยการใช้เครื่อง Spectrophotometer โดยอ้างอิงถึงการศึกษาซึ่งจะอธิบายวิธีในการหาดังต่อไปนี้ (Allen et. Al., 1973)

1.หลักการ

เนื่องจากการวัดสีในหน่วยเอทีเอ็มไอนี้ จะต้องทำการวัดโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิซชัน ดังนั้นตัวอย่างที่จะใช้ในการวัดจะต้องทำการกำจัดคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยออกเสียก่อน โดยหลักการที่ใช้วัดจะยึดตามสูตรของ Adams-Nickerson Chromatic Value เช่น ถ้ามีสีอยู่ 2 สี เมื่อมองด้วยตาเปล่าแล้วเห็นความแตกต่างของสีจากสภาวะไร้สีในระดับที่เท่ากันแล้วค่าสีทั้งสองสีนี้จะมีค่าเอทีเอ็มไอเท่ากัน

อธิบายโดยละเอียดได้ดังนี้ ถ้ามีสารละลายสีฟ้าอยู่และมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าว่ามีความแตกต่างจากสภาวะไร้สีเทียบเท่ากับค่าความแตกต่างของ APHA 100 platinum-cobalt Standard (สีเหลือง) จากสภาวะไร้สี เมื่อนำไปพล็อตเวกเตอร์ใน Adams-Nicherson Chromatic Value ความยาวของเวกเตอร์จากสภาวะไร้สีที่ชี้ไปที่ส่วนของสีฟ้าจะมีความยาวเท่ากับเวกเตอร์ของสภาวะไร้สีที่ชี้ไปที่ APHA 100 ซึ่งก็จะได้ค่าสีของสีฟ้าเท่ากับ 100 ADMI นั่นเอง

2.กรรมวิธีการวัด

1) ทำการวัดตัวอย่างด้วยเครื่อง Single Beam Spectrophotometer และทำการบันทึกค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิซชันที่ทุก 10 แลมบ์ด้า ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร (คลื่นที่ตามนุษย์มองเห็น)

2) คำนวณเป็นค่า C.I.E Tristimulus Values X, Y, Z ตามตารางภาคผนวก ง7

3) แปลงค่า X, Y, Z, ให้เป็นค่า V_x, V_y, V_z โดยสูตรของ McLaren

$$X = 0.98071(1.2219V_x - 0.23111V_x + 0.23951V_x^3 - 0.021009V_x^4 + 0.0008404V_x^5)$$

$$Y = (1.2219V_y - 0.23111V_y^2 + 0.23951V_y^3 - 0.021009V_y^4 + 0.0008404V_y^5)$$

$$Z = 1.181032(1.2219V_z - 0.23111V_z^2 + 0.23951V_z^3 - 0.021009V_z^4 + 0.0008404V_z^5)$$

เนื่องจากการแปลงค่าตามสมการข้างบนยุ่งยากมาก เพื่อความสะดวกจึงใช้ตารางสำเร็จรูปสำหรับหาค่า V_x, V_y, V_z หลังจากทราบค่า X, Y, Z แล้ว อนึ่งตารางดังกล่าวนี้มีปริมาณมากจึงไม่ขอกล่าวในที่นี้ แต่สามารถดูได้ใน “Color Science : Concepts and Methods Quantitative Data and Formular” หรือสามารถใช้การคำนวณในโปรแกรม QuickBasic

4) คำนวณค่าความแตกต่างของสี Adams-Nickerson (DE)

$$DE = [(0.23 \cdot V_Y)^2 + \{(V_X - V_Y)\}^2 + \{0.4 \cdot (V_Y - V_Z)\}^2]^{1/2}$$

สำหรับน้ำกลั่น เมื่อแทนค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิซชันในตารางที่ผนวกที่ ๗ เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ทุกค่าความยาวคลื่นจะได้ค่า V_{XC} , V_{YC} , V_{ZC} เท่ากับ 9.900, 9.902, 9.910 ตามลำดับซึ่งจะทำให้ได้สมการใหม่ดังนี้

$$DE = [\{0.23(9.902 - V_Y)\}^2 + (V_Y - V_X - 0.002)^2 + \{0.4(V_Z - V_Y - 0.008)\}^2]^{1/2}$$

5) แปลงค่า DE มาเป็นค่าในหน่วย ADMI โดยจะต้องจัดทำกราฟมาตรฐานระหว่าง DE กับค่า ADMI (APHA) ของเครื่อง Single Beam Spectrophotometer ออกมาก่อน ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

1) ละลาย 1.246 กรัมโพแทสเซียมคลอโรแพลตินิก, K_2PtCl_6 (เทียบเท่ากับ 500 มก.แพลทินัม) และ 1 กรัมโคบอลต์คลอไรด์, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ (เทียบเท่ากับ 250 มก.โคบอล) ในน้ำกลั่น ซึ่งเติมกรดไฮโดรคลอริก 100 มล. แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1,000 มล. สารละลายมาตรฐานนี้มีความเข้มข้นสีเท่ากับ 500 หน่วยสารละลายเหล่านี้จะมีหน่วยเป็น APHA

ตารางภาคผนวก ๕ ผลปริมาณ Color unit ที่เหลืออยู่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชันในระยะเวลาต่าง

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	Color unit ที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการโอโซนเนชันในระยะเวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/ลิตรแพลทินัมโคบอลต์)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
	pH 3	550.0	550.0	550.0	419.0
pH 7	334.0	83.0	54.0	38.0	19.0
pH 11	550.0	124.0	74.0	62.0	55.0

ตารางภาคผนวก ๖ ผลปริมาณ Color unit ที่เหลืออยู่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชันโดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระยะเวลาต่าง

ค่า pH ที่ทำการศึกษา	Color unit ที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการโอโซนเนชันในระยะเวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/ลิตรแพลทินัมโคบอลต์)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
	ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม/ลิตร				
pH 3	424.0	346.0	343.0	311.0	264.0
pH 7	244.0	65.0	46.0	35.0	28.0
pH 11	270.0	129.0	86.0	76.0	54.0

ตารางภาคผนวก ง7 ตารางการคำนวณค่า C.I.E. Tristimulus

Wavelength	%T.	X		Y		Z	
		Factor	%T x Fact.	Factor	%T x Fact.	Factor	%T x Fact.
700		0.00156		0.00056		0	
690		0.00171		0.00062		0	
680		0.00369		0.00134		0	
670		0.00708		0.00259		0	
660		0.01361		0.00504		0	
650		0.02349		0.00886		0	
640		0.03693		0.01443		0	
630		0.05309		0.0219		0	
620		0.0707		0.03153		0.00002	
610		0.08325		0.04176		0.00002	
600		0.08949		0.05316		0.00007	
590		0.08984		0.06627		0.0001	
580		0.08417		0.07992		0.00016	
570		0.07322		0.09147		0.0002	
560		0.0588		0.09841		0.00039	
550		0.04282		0.09832		0.00086	
540		0.02785		0.09149		0.00195	
530		0.01523		0.07934		0.00388	
520		0.00576		0.06462		0.00712	
510		0.00089		0.04833		0.0152	
500		0.00052		0.03401		0.02864	
490		0.00363		0.02358		0.05274	
480		0.01112		0.01618		0.09461	
470		0.02272		0.01058		0.14972	
460		0.03362		0.00694		0.19299	
450		0.03915		0.00443		0.20638	
440		0.03975		0.00262		0.19938	
430		0.02997		0.00122		0.14628	
420		0.01238		0.00037		0.05949	
410		0.00329		0.00009		0.0157	
400		0.00108		0.00002		0.00513	

ที่มา : Allen et. Al., 1973

จากผลการทดลองในตารางภาคผนวก ง5 ความเข้มข้นของ Color unit เริ่มต้น 550 มิลลิกรัมต่อลิตรแพลทตินัมโคบอลต์ ที่ได้จากการทดลองคำนวณหาปริมาณ Color unit ตามสมการ

$$F_n \text{ (mg/L Pt Co)} = \frac{(\text{APHA})_n \times b}{(\text{DE})_n}$$

เมื่อ $(\text{APHA})_n =$ ค่าสีมาตรฐานของ n
 $(\text{DE})_n =$ ค่ากลางที่ใช้สำหรับการคำนวณ n
 $b =$ ขนาดของเซลล์วัดแสง (cm)

คำนวณหาค่า DE ดังสมการ

$$\text{DE} = \{ (0.23 V_y)^2 + [V_x - V_y]^2 + [0.4(V_y - V_z)]^2 \}$$

เมื่อ $x = 0.04282$
 $y = 0.09832$
 $z = 0.00086$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \text{DE} &= \{ (0.23 \times 0.09832)^2 + [0.04282 - 0.09832]^2 + [0.4(0.09832 - 0.00086)]^2 \} \\ &= \{ (0.0226136)^2 + [-0.0555]^2 + [0.038984]^2 \} \\ &= \{ 0.00051137490496 + 0.00308025 + 0.001519752256 \} \\ &= 0.00408862735104 \\ &= 0.0041 \\ F_n &= \frac{550 \times 2.5}{0.0041} \\ &= \frac{1375}{0.0041} \\ &= 335,365.85 \end{aligned}$$

แปลงค่า Color unit เป็น ADMI ดังสมการ

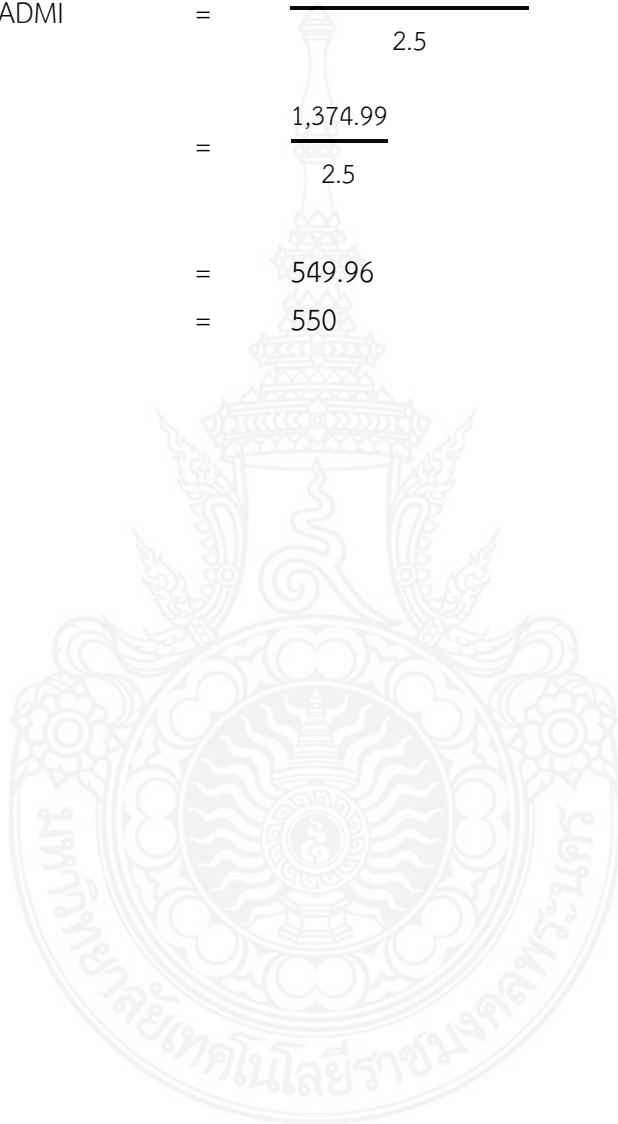
$$\text{ADMI} = \frac{F \times DE}{b}$$

$$\text{แทนค่า ADMI} = \frac{335,365.85 \times 0.0041}{2.5}$$

$$= \frac{1,374.99}{2.5}$$

$$= 549.96$$

$$= 550$$



ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ สกุล นายพีรวิษณุ วายุพา
 วัน เดือน ปีเกิด 2 กันยายน พ.ศ. 2540
 ภูมิลำเนา อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัดราชบุรี

ประวัติการศึกษา

2553 ประถมศึกษา	โรงเรียนตรุณาราชบุรี	จังหวัดราชบุรี
2556 มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์	จังหวัดราชบุรี
2559 มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์	จังหวัดราชบุรี

ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ
 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

ทุนการวิจัย

โครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2563

ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ สกุล นายจิรภัทร จันทเขต
 วัน เดือน ปีเกิด 9 พฤศจิกายน พ.ศ. 2540
 ภูมิลำเนา อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี

ประวัติการศึกษา

2553 ประถมศึกษา	โรงเรียนเล็กโกเมศอนุสรณ์	จังหวัดนนทบุรี
	โรงเรียนวัดบ่อ	จังหวัดนนทบุรี
2556 มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนปากเกร็ด	จังหวัดนนทบุรี
2559 มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนปากเกร็ด	จังหวัดนนทบุรี

ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

ทุนการวิจัย

โครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2563

ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ สกุล นายเกียรติศักดิ์ ชัยสงค์
 วัน เดือน ปีเกิด 15 กันยายน พ.ศ. 2540
 ภูมิลำเนา อำเภอเมือง จังหวัดยโสธร

ประวัติการศึกษา

2553 ประถมศึกษา	โรงเรียนบางแคเหนือ	กรุงเทพมหานคร
2556 มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนวัดรางบัว	กรุงเทพมหานคร
2559 มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนวัดรางบัว	กรุงเทพมหานคร

ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ
 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

ทุนการวิจัย

โครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2563