



การบำบัดน้ำสีย้อมผ้าโดยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซน
ร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Treatment of Fabric dye by Advance Oxidation using Ozone
with Hydrogen Peroxide

ขวัญตา	สุขสมบุญ
ศรินันท์	อภิรมย์
ณवलจุฑา	ทองอำไพ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2562



การบำบัดน้ำสีย้อมผ้าโดยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซน
ร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Treatment of Fabric dye by Advance Oxidation using Ozone
with Hydrogen Peroxide

ขวัญตา

สุขสมบุญ

ศรินันท์

อภิรมย์

ณवलจุฑา

ทองอำไพ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

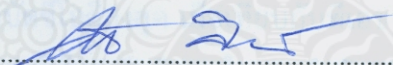
ชื่อปริญญาบัตร	การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน ด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
ชื่อ นามสกุล	ขวัญตา สุขสมบูรณ์ ศรินันท์ อภิรมย์ ณวลจุฑา ทองอำไพ
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ
คณะ	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กิตติศ ตั้งสัจจวงศ์

คณะกรรมการสอบปริญญาบัตรได้ให้ความเห็นชอบปริญญาบัตรฉบับนี้แล้ว



.....ประธานกรรมการ

(อาจารย์มานิช หลักฐานดี)



.....กรรมการ

(ผศ. ณัฐชมัย ลักษณะอำนวยพร)



.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์กิตติศ ตั้งสัจจวงศ์)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อนุมัติให้นับปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

วันที่ เดือน พ.ศ.

ชื่อปริญญาบัตร	การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแอควานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
ชื่อ นามสกุล	ขวัญตา สุขสมบูรณ์ ศรินันท์ อภิรมย์ ณวลจุฑา ทองอำไพ
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ
คณะ	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยกระบวนการแอควานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในการศึกษาได้ใช้เครื่องผลิตโอโซนที่มีกำลังผลิตอยู่ในช่วง 1.0 – 3.0 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการบำบัด โดยปรับสภาพน้ำเสียให้มี พีเอช 3, 7 และ 11 ระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาทีและความเข้มข้นของ COD เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 250 – 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 4, 8 และ 12 มิลลิลิตรต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสี (Color) และซีโอดี (COD) ซึ่งในการทดลองที่ พีเอช 11 ทำการบำบัดโดยใช้โอโซนและเติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณ 4 มิลลิลิตรต่อลิตร จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงสุด เมื่อเทียบกับพีเอช 3 พีเอช 7 และเมื่อเติมสาร H_2O_2 ในปริมาณที่มากขึ้นก็ไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของซีโอดีเริ่มต้นที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง ซึ่งจากการทดลองความสามารถในการบำบัดซีโอดีมีค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 46 ที่ค่าความเข้มข้นของ COD มีค่าเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีโอดีในน้ำสีสังเคราะห์เป็น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีลดลงเหลือร้อยละ 31 และ 40 ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดสีด้วยกระบวนการแอควานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ พีเอช 7 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความเหมาะสมในการกำหนดค่าสภาวะ พีเอช ที่ใช้ในการบำบัดทั้งสีและซีโอดีควรเลือกใช้ พีเอช 11 เนื่องจากสามารถบำบัดได้ทั้งซีโอดีและสี ที่ทำให้คุณภาพน้ำที่ผ่านมาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนด นอกจากนี้หากพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและบีโอดี ด้วยกระบวนการโอโซนร่วมกับ

สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าการลดลงของค่าความสกปรกมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการ
บำบัด COD ทั้ง 2 พารามิเตอร์



Thesis title	Treatment of Fabric dye by Advance Oxidation using Ozone with Hydrogen Peroxide
Author	Khaunta Suksumboon Sirinan Apirom Nounjuta Tongamiphai
Degree	Bachelor of Science
Major program	Environmental Science and Natural Resources Faculty of Science and Technology
Academic Year	2019

ABSTRACT

This research is a study on treatment of Water Dyes from textile dyeing industry by Advance oxidation process with Ozone and hydrogen peroxide (H_2O_2). In this study, Ozone generators with a capacity of 1.0 - 3.0 mg/ hr. were used to study the appropriate factors for treatment with adjusting wastewater conditions (pH 3, pH 7 and pH 11), Ozone exposure distance 120 minute, the initial COD concentration is 250 - 1,000 mg/l. and adding hydrogen peroxide at 4, 8 and 12 ml/l. For the study found that above mentioned factors have an effect on the efficacy of color and COD treatment which the experiment at pH 11 used to Ozone treatment and added 4 ml/l. of H_2O_2 . It makes the highest COD treatment efficiency when compared to pH 3, pH 7 and added more H_2O_2 . it doesn't affect to the higher of treatment efficiency. In addition, it was found that higher initial COD concentration decreased treatment efficiency which the experimental ability for COD treatment has highest value was 46 percent and the COD concentration was 250 ml/l In order that, when COD concentration in synthetic color water was increased to 500 ml/l and 1,000 ml/l. it was found that the COD efficiency decreased to 31% and 40% respectively. For the treatment of Water Dyes from textile dyeing industry by oxidation process with Ozone together with hydrogen peroxide (H_2O_2) at pH 7 will has the highest of treatment efficiency. However, the consideration of suitability for pH configuration used to treat both color and COD should choose pH 11 because it can treat both color and COD that makes the waste water quality meet the standards required by

law. In addition, if we consider the effectiveness of turbidity and BOD found that the decrease of dirtiness tends to be in the same direction with COD both 2 parameters.

Keywords : Fabric dye, Advance Oxidation, Hydrogen Peroxide



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาของอาจารย์หลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์กิตติยศ ตั้งสัจจวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ อาจารย์มาโนช หลักฐานดี ประธานสอบปริญญานิพนธ์ และ ผศ. ณัฐชัมย์ ลักษณะอำนาจพร กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำ ตลอดจนให้คำปรึกษาและช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ซึ่งผู้วิจัยต้องกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์มาโนช หลักฐานดี หัวหน้าสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำวิจัยตลอดจนให้ความรู้ทางวิชาการและวิชาชีพแก่คณะผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณทุนสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ 2563 ที่สนับสนุนทุนสำหรับการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และ ครอบครัว ที่เมตตาอบรมสั่งสอนและช่วยสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน รวมถึงเพื่อน ๆ สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการศึกษาวิจัยตลอดมา จนกระทั่งปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขวัญตา	สุขสมบูรณ์
ศรินันท์	อภิรมย์
ณวลจุฑา	ทองอำไพ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 กรอบแนวคิดในการศึกษา	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 นิยามศัพท์	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	24
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	24
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	25
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	26
3.4 ขั้นตอนการเตรียมงานวิจัย	26
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	28
3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ	28
3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์และรายงานผล	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล	36
4.1 ผลการวิเคราะห์	36
4.2 การเติมปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	37
4.3 โอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน	37
4.4 ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน	39
4.5 ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำสีขุ่นด้วยกระบวนการ	44
แอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	
4.6 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ในสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซน	56
4.7 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ในสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ	57
แอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	
4.8 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ในสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซน	58
4.9 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ในสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ	59
แอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	
4.10 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการโอโซน	60
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผลการวิจัย	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	65
ประวัติผู้วิจัย	71

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 การเลือกขนาดตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วง BOD	32
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากกระบวนการสังเคราะห์	36
4.2 อัตราส่วนการเติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	37
4.3 ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาจากกระบวนการโอโซน	38
4.4 ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาจากกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	39
4.5 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน	40
4.6 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนที่ pH 11	41
4.7 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD น้ำเสียอมฟ้ายด้วยกระบวนการโอโซน	42
4.8 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน	43
4.9 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 4 ml/l	44
4.10 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 8 ml/l	45
4.11 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 12 ml/l	46
4.12 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ pH 11	48

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.13 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสีย ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 4 ml/l	49
4.14 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 8 ml/l	50
4.15 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 12 ml/l	51
4.16 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 4 ml/l	53
4.17 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 8 ml/l	54
4.18 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณ H ₂ O ₂ 12 ml/l	55
4.19 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการโอโซน ที่ pH 11	56
4.20 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซน สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ pH 11	57
4.21 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ด้วยกระบวนการโอโซน ที่ pH 11	58
4.22 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซน ร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ pH 11	59
4.23 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซน	60
4.24 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	60

สารบัญรูปภาพ

ภาพ	หน้า
1.1 กรอบแนวคิดการศึกษา	3
2.1 กระบวนการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล	17
2.2 โครงสร้างของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	18
3.1 ท่อระบบบำบัดที่ใช้ในการทดลอง	24
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	25
3.3. การเตรียมน้ำสีสังเคราะห์	27
3.4 การทดลองหาปริมาณโอโซน (Ozone) ที่ผลิตจากเครื่องผลิตโอโซน	27
3.5 การเตรียมระบบบำบัด	28
3.6 การวิเคราะห์ค่าพีเอช	29
3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์ซีไอดี	30
3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์สี ด้วยเครื่อง Hach DR/890 Colorimeter	31
3.9 ขณะทำการเจือจางด้วยน้ำเจือจางให้ได้ปริมาตร 300 ml	32
3.10 เติมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต 1 มิลลิลิตรและเติมสารละลายอัลคาไลไฮโดรไซด์ 2 มิลลิลิตรลงในขวด BOD	33
3.11 ตวงสารละลายออกปริมาตร 99 ml	33
3.12 ทำการไตเตรทกับสารละลายมาตรฐาน	34
4.1 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ในแต่ละครั้งของการทดลอง	37
4.2 การศึกษาหาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน	40
4.3 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วย กระบวนการโอโซนที่ pH 11	41
4.4 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำสี ด้วยกระบวนการโอโซน	42
4.5 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน	43
4.6 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการ แอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 4 ml/l	45

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.7 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการ แอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 8 ml/l	46
4.8 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการ แอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 12 ml/l	47
4.9 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการ แอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4 ml/l	48
4.10 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการ แอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 4 ml/l	50
4.11 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการ แอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 8 ml/l	51
4.12 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการ แอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 12 ml/l	52
4.13 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน ด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 4 ml/l	53
4.14 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน ด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 8 ml/l	54
4.15 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน ด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 12 ml/l	55
4.16 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการโอโซน ที่ pH 11	56
4.17 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซน ร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ pH 11	57
4.18 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ด้วยกระบวนการโอโซน ที่ pH 11	58
4.19 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน ด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ pH 11	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญและทำรายได้เข้าสู่ประเทศ เป็นอันดับต้น ๆ ซึ่งอุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่าง ๆ มากมาย โดยมีอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขนาดกลางของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำเป็นปริมาณมากในกระบวนการผลิต และน้ำที่ใช้ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยกลับออกมาเป็นน้ำทิ้งซึ่งจะก่อปัญหาต่อสภาพแวดล้อมอย่างมาก เนื่องจากมีปริมาณค่อนข้างมาก มีความเข้มข้นของสีสูง ส่งผลให้น้ำเสียเกิดขึ้นในปริมาณมาก หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ อาจก่อให้เกิดความพิชต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ส่งผลให้พืชน้ำและสาหร่ายไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ แหล่งน้ำขาดออกซิเจน ทำให้น้ำเน่าเสียและมีกลิ่นเหม็น ซึ่งมีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ

น้ำเสียที่ปล่อยมาจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม ประกอบด้วยสารแขวนลอย (Suspended solids) และสารอินทรีย์จากกระบวนการย้อมในปริมาณสูง ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ มลสารส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นมาจากกระบวนการย้อมสี(dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (finishing) โดยส่วนมากแล้วมลสารและสีเหล่านี้บางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีทั่ว ๆ ไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอทีฟ, สีเอซิด, สีเบสิก, สีไดเร็กต์, สีแวลู, สีดิสเพอร์ส เป็นต้น การใช้โอโซนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดและมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดเนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซิงเอเจนต์ (oxidizing agent) ที่แรงซึ่งโอโซนสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนน้อยลงได้ ส่วนสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดซิงเอเจนต์ที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อการหาปริมาณการใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด และสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ที่มีต่อผลต่อการบำบัดน้ำเสีย เพื่อเป็นแนวทางอีกหนึ่งตัวเลือกในกระบวนการบำบัดน้ำเสียให้แก่อุตสาหกรรมฟอกย้อมในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

1.2 วัตถุประสงค์

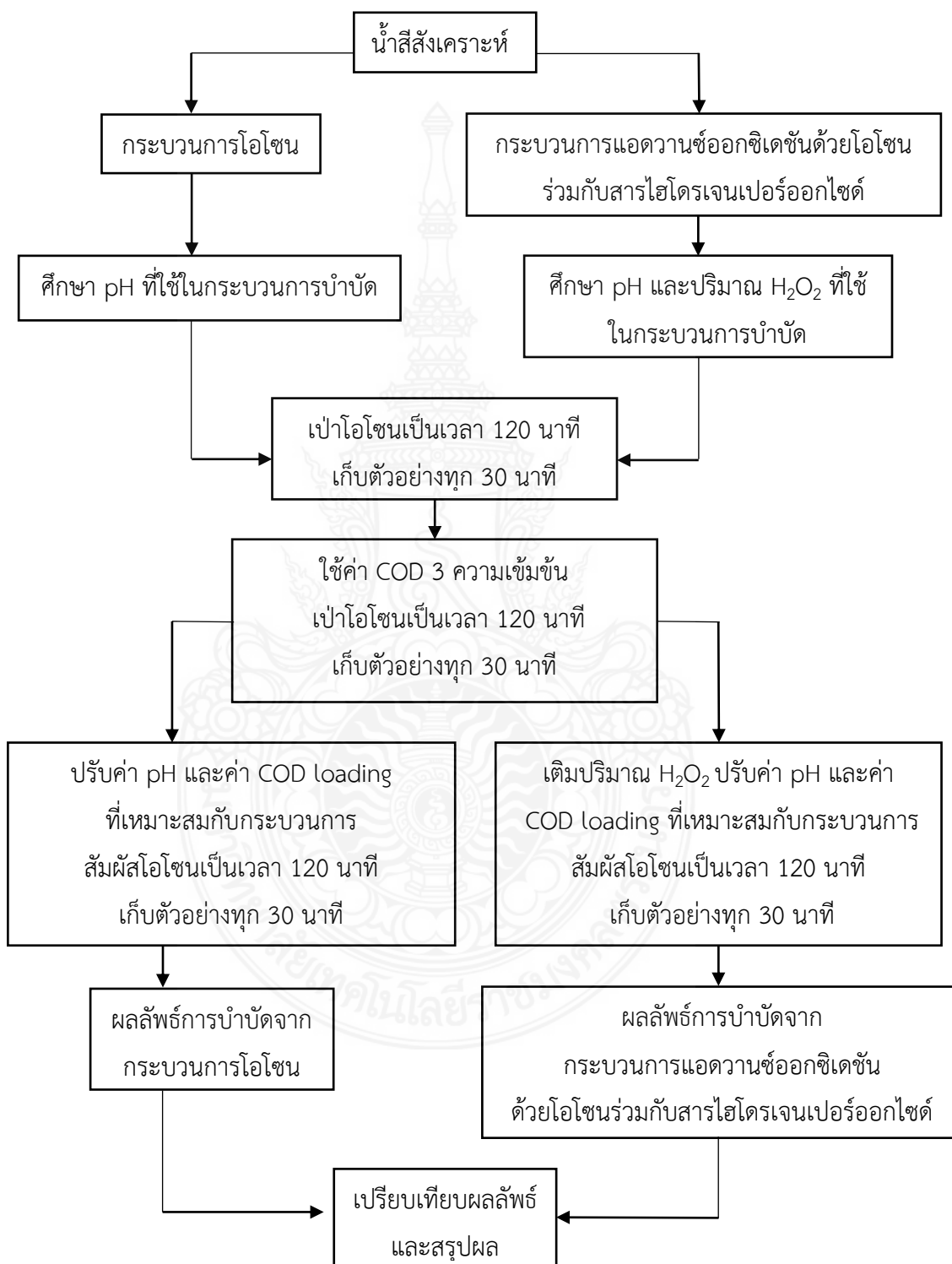
- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการโอโซน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียระหว่างกระบวนการโอโซนเพียงอย่างเดียวกับกระบวนการโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 สถานที่ทำการศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- 1.3.2 ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่นำมาทดลองเป่าโอโซน 7 ลิตร
- 1.3.3 ศึกษาปัจจัยที่มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการโอโซน ได้แก่
 - 1.3.3.1 ระยะเวลาที่สัมผัสโอโซน
0, 30, 60, 90, 120 นาที
 - 1.3.3.2 pH ที่ใช้ในการทดลอง
pH 3, pH 7, pH 11
- 1.3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา
pH, BOD, COD, Color, Turbidity
- 1.3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
 - 1.3.5.1 การใช้กระบวนการโอโซน
 - 1.3.5.2 การใช้กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.4 กรอบแนวคิดการศึกษา

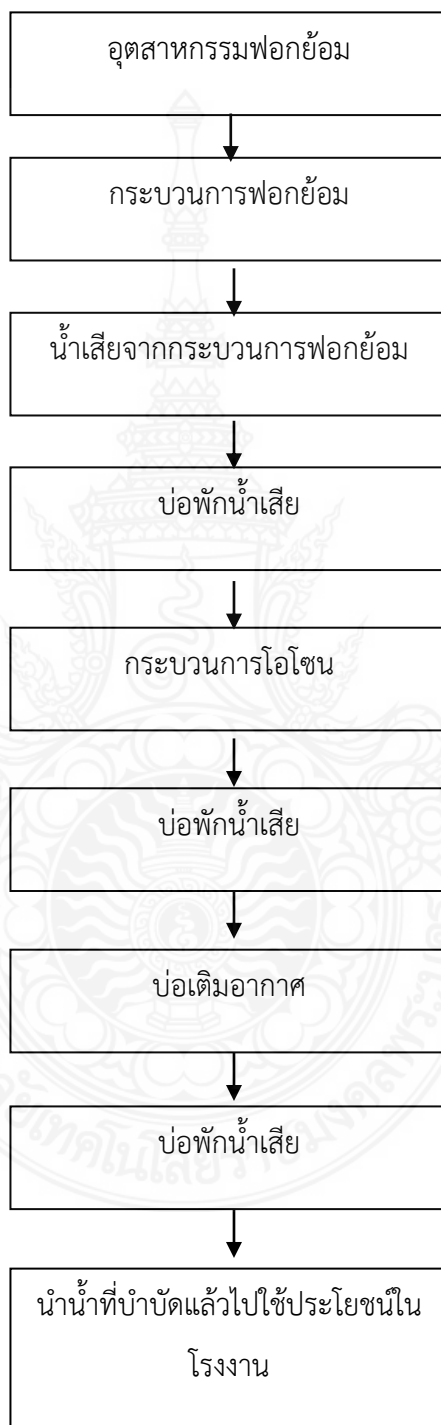
กรอบแนวคิดการศึกษาได้แสดงไว้ดังภาพ 1.1



ภาพ 1.1 กรอบแนวคิดการศึกษา

1.4 กรอบแนวคิดในการศึก

กรอบแนวคิดใหม่



1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
- 1.5.2 ทราบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนกับกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- 1.5.3 สามารถเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียให้กับอุตสาหกรรมฟอกย้อม

1.6 นิยามศัพท์

1.6.1 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) คือ ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ค่าซีโอดีหากมีค่าสูงแสดงว่าน้ำนั้นเน่าเสียมากและมีสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้โดยสารเคมีอยู่ในปริมาณมาก

1.6.2 บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) คือ ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงปริมาณของออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งถือว่ามี การย่อยสลายได้หมดในเวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หากค่าบีโอดีมีค่าสูงแสดงว่าน้ำนั้นเน่าเสียมาก

1.6.3 สี (Color) เกิดจากการปนเปื้อนของสารต่างๆ ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์และทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ สีในน้ำอาจจะเป็นผลมาจากน้ำนั้นมีไอออนของโลหะในธรรมชาติ เช่น เหล็ก และแมงกานีส เป็นต้น

1.6.4 สีจริง (True Color) คือสีของน้ำที่วัดได้หรือมองเห็นหลังจากที่แยกเอาสารแขวนลอยที่ทำให้ น้ำขุ่นออกไปแล้ว คือสีจริงเป็นสีที่เกิดจากสารที่ละลายในน้ำ

1.6.5 สีปรากฏ (Apparent Color) คือสีของน้ำที่เป็นสีที่วัดได้หรือมองเห็นจริง ๆ ในตัวอย่างน้ำโดยไม่มีการแยกเอาสารแขวนลอยที่ทำให้ น้ำขุ่นออกไป นั่นคือสีปรากฏเป็นสีที่เกิดจากสารที่ละลายในน้ำและที่ไม่ละลายได้ในน้ำรวมกัน

1.6.6 แอดวานซ์ออกซิเดชัน (Advance Oxidation) เป็นกระบวนการทางเคมีวิธีการหนึ่งซึ่งอาศัยสารออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) ที่มีค่าศักยภาพออกซิเดชันสูง ปัจจุบันได้รับความสนใจและพัฒนาขึ้นเพื่อนำมากำจัดสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีหัวข้อตามลำดับดังต่อไปนี้

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- 2.1.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม
- 2.1.2 สีย้อมในอุตสาหกรรม
- 2.1.3 ประเภทของสีย้อม
- 2.1.4 เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำ
- 2.1.5 โอโซน
- 2.1.6 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง
- 2.1.7 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- 2.1.8 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 2.2.1 โอโซน
- 2.2.2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการนำเข้าเงินตราต่างประเทศอย่างต่อเนื่อง เป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามความต้องการของผู้บริโภค เนื่องจากเครื่องนุ่งห่มเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปผลิตหรือจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไปได้ กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นต้องใช้วัตถุดิบที่เป็นสารเคมี ไม่ว่าจะเป็น

เป็นสีขุ่น กรด ต่าง สารปรับปรุงคุณภาพต่าง ๆ เช่น สารตกแต่ง สารฟอกขาว เป็นต้น และสิ่งที่ขาดไม่ได้ก็คือน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมที่ต้องใช้ในปริมาณที่มากเพื่อให้ได้ผ้าหรือเส้นด้ายที่มีสีสันสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม ตลอดจนความพอใจ ความรู้สึกของผู้บริโภคนั้น

ดังนั้นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเกิดขึ้นจากน้ำและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจึงมีทั้งสารพิษ สารแขวนลอย น้ำมัน และของเสียไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ ปนเปื้อนออกมา นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง มีสภาพเป็นด่างมีกลิ่นที่แรงและมีสีที่นารังเกียจ เมื่อน้ำเสียที่มีสีถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ สาธารณะหรือสิ่งแวดล้อมก็จะทำลายความสวยงามของธรรมชาติ แล้วยังทำให้สมดุลทางธรรมชาติเสียไปอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสีที่พบในน้ำเสียซึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์จะไปบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงสู่ผิวน้ำ ส่งผลกระทบต่อพืชที่อยู่ในน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ส่งผลให้ปริมาณแก๊สออกซิเจนในน้ำลดลง ซึ่งมีผลให้สิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อยู่ในน้ำอาจตายได้ น้ำเสียก่อนที่จะปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะควรจะต้องมีกระบวนการกำจัดหรือบำบัดน้ำก่อน เพื่อลดปริมาณสี นับเป็นการป้องกันหรือแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะมลพิษทางน้ำในปัจจุบันได้มีการกำหนดข้อบังคับเกี่ยวกับการปล่อยน้ำเสีย ซึ่งเป็นที่ยอมรับในหลายๆ ประเทศเช่น การดูจากปริมาณที่สิ่งมีชีวิตรับได้ สมบัติทางเคมีของน้ำทิ้ง ระดับของสีในน้ำทิ้ง เป็นต้น (ขนิษฐา, 2550)

2.1.2 สีขุ่นในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมนับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูง ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตไม่ว่าจะเป็นการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การถักผ้า และการฟอกย้อมก็ตาม โดยวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีขุ่นผ้า สารเคมี เป็นต้น บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดละลายน้ำไม่ได้ จึงทำให้น้ำมีสภาพที่แปรเปลี่ยนไปที่เราเรียกว่าน้ำเสีย เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น มีกลิ่น มีสี ตลอดจนทำให้สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำตายเนื่องจากมีสารอินทรีย์ในน้ำปริมาณที่สูง ทำให้ขาดออกซิเจนและผลกระทบของน้ำเสียนี้ยังเป็นตัวยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ต่างๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมประเภทที่มีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมาก ปัญหาใหญ่ที่พบและน่าจะมีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมคือ การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานลงสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาประกอบด้วยสารแขวนลอย (Suspended solids) สารอินทรีย์และอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพ ผลเสียที่เกิดขึ้นจากสีนอกจากจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงามแล้ว ยังลดอัตราการนำเข้าไปของออกซิเจนที่เข้าสู่

ผิวหน้าของแหล่งน้ำและบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ จะส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงทำให้สัตว์น้ำอาจตายได้ ดังนั้นการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อมของโรงงานจึงมีความจำเป็นในการป้องกันปัญหามลพิษที่แหล่งกำเนิดและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายโดยมีการศึกษาเทคโนโลยีที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนดและสีที่อยู่ในน้ำทิ้งแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ยังสามารถมองเห็นได้ชัดเจนและทำความรำคาญให้ผู้ใช้แหล่งน้ำ สีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิดและแต่ละชนิดยากต่อการย่อยสลายโดยธรรมชาติ ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีทั้งกระบวนการทางกายภาพและเคมีซึ่งบำบัดสีได้น้อยรวมทั้งมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ค่าใช้จ่ายในการบำบัด ตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัด เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.1.3 ประเภทของสีย้อม

การจำแนกสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด คือ การจำแนกตามการนำไปใช้ เพราะจะต้องมีความคงทนการซัก มีความคงทนต่อแสงและยังต้องมีความคงทนต่อความร้อน โดยที่สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมาก เพราะวัสดุที่ต้องการย้อมอาจสามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่ต่างชนิดกันได้ เช่น เส้นใยเซลลูโลสส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีไดเร็กต์ เป็นต้นซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภทดังต่อไปนี้ (อรุณี, 2562)

2.1.3.1 สีเอซิด (Acid Dye) สีย้อมชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถันกลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่นปอ ป่าน ไนลอน ไยขนแกะ ไหมและอะคริลิกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2.1.3.2 สีไดเร็กต์ (Direct Dye) หรือเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบนิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ตกง่าย ทนแสง

2.1.3.3 สีเบสิก (Basic or Cationic Dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี

ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง

2.1.3.4 สีดีสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดีสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ และสีย้อมแอมมิโน แอนทราควิโนน ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีนหรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

2.1.3.5 สีรีแอกทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบเมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นต่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับ (OH) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นต่างกลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

2.1.3.6 สีอะโซอิก (Azotic Dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโปแนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

2.1.3.7 สีแว้ต (Vat Dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว้ตละลายน้ำ โดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว้ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว้ตสีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือสีอินดิโกและสีแอนทราควิโนนอยด์

2.1.3.8 สีมอร์แดนต์หรือโครม (Mordant or Chrome Dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือสารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนต์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่ายซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมต์ได้ดี

2.1.3.9 สีอินเกรน (Ingrain Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำสีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้าย

2.1.3.10 สีออกซิเดชัน (Oxidation Dye) เป็นสีที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะเป็นคอลลอยด์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมฝ้ายและขนสัตว์

2.1.3.11 สีซัลเฟอร์ (Sulfer Dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำได้ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทนและยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

2.1.4 เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำ

เทคโนโลยีในการกำจัดสีในน้ำในปัจจุบันที่ได้รับความนิยมนั้นมีอยู่หลากหลายวิธีด้วยกันดังนี้

2.1.4.1 เทคโนโลยีการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment)

เทคโนโลยีการบำบัดทางกายภาพเป็นวิธีการแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย เช่น ของแข็งขนาดใหญ่ กระจาด ขยะพลาสติก เศษอาหาร กรวด ทราย ไขมันและน้ำมัน โดยใช้อุปกรณ์ในการบำบัดทางกายภาพ คือ ตะแกรงดักขยะ ถังดักกรวดทราย ถังดักไขมันและน้ำมัน และถังตกตะกอน ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีในน้ำเสียเป็นหลัก ตัวอย่างเทคโนโลยีการกำจัดสีทางกายภาพดังนี้

ก) การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลวหรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง เนื่องจากมีรูขนาดเล็ก (Microporosity) ทำให้สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำวัสดุดิบพวกสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเช่น ไม้ ถ่านหิน พีโตรเลียม กะลามะพร้าว เปลือกถั่วเมล็ดแข็ง กากชานอ้อย ชีลื้อย กระจาดสัตว์ เป็นต้น นำมาเผาด้วยความร้อนในเตาอบอากาศ และเผาแรงที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดความพรุน (Porosity) แล้วอัดด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 200 ถึง 1600 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้มากที่สุด ความพรุนมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวล (Surface area per mass ratio) ระหว่าง 500 ถึง 1600 ตารางเมตรต่อกรัม จากนั้นนำไปบดเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 0.1 ถึง 2 มิลลิเมตร เรียกว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon) ส่วน ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powered Activated Carbon) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ถึง 50 ไมครอน ในการกำจัดสีนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด โดยบรรจุในรูปทรงกระบอก (Fixed Bed System) แล้วปล่อยให้ น้ำเสียไหลผ่านชั้นถ่านด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสม คือระหว่าง 5 ถึง 25 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงต่อหนึ่งตารางเมตรของพื้นที่หน้าตัดถึงและมีระยะเวลาสัมผัส (Contact

Time) ประมาณ 10 ถึง 15 นาที ซึ่งจะเกิดกลไกการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ โดยโครงสร้างนั้นมีความพรุนสูง ทำให้เกิดผิวสัมผัสโมเลกุลภายในจะถูกกระทำด้วยแรงเท่าๆกันทุกทิศทาง ส่วนโมเลกุลที่อยู่บนผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ จะถูกกระทำด้วยแรงที่ไม่สมดุล ซึ่งแรงนี้สามารถทำให้สมดุลได้โดยทำให้โมเลกุลอื่นมาเกาะติดที่ผิวสัมผัสด้วยแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาล์ว โมเลกุลของสารละลายจะถูกยึดไว้ในสภาวะ ที่ความเป็นกรดต่ำจะดูดซับได้ดี เนื่องจากถ่านกัมมันต์จะมีสภาพเป็นประจุบวก อันเนื่องมาจากดูดซับประจุบวกของไฮโดรเจนไว้ ในขณะที่เดียวกันสารคอลลอยด์และสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสีมีประจุลบ แรงดึงดูดระหว่างกันจึงมีมาก แต่การเกาะยึดกันเป็นแรงอ่อนๆ ดังนั้นสามารถเกิดการเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ ทำให้การฟื้นตัวของตัวดูดติดผิวทำได้ง่าย แต่มักเกิดปัญหาสารแขวนลอยติดค้างอุดตันผิวหน้าของชั้นถ่าน จนทำให้อัตราการไหลผ่านลดลง สามารถแก้ไขได้โดยการอัดน้ำล้างเข้าทางด้านล่าง (Back Washing) เมื่อรูปพรุนของเม็ดถ่านจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรกทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพการดูดซับ สามารถฟื้นฟูสภาพโดยการเผาในเตาอบออกซิเจนที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียสและผ่านไอน้ำเพื่อเร่งคุณสมบัติของถ่าน การกำจัดสีด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นเพียงวิธีการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ออกจากน้ำโดยโมเลกุลของสิ่งสกปรกจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของเม็ดถ่านกัมมันต์ โดยโมเลกุลของสีจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูของเม็ดถ่านจนเต็ม ถ่านกัมมันต์จะเสื่อมสภาพ แต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ซึ่งมีต้นทุนสูง เพราะการเผาและการกำจัดกากทำให้ไม่เป็นที่นิยม

ข) การกรองโดยใช้เยื่อแผ่น (Membrane Filtration)

กรองด้วยเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration) แต่วิธีอัลตราฟิวเตรชันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีขนาดรูเปิดของเยื่อกรองใหญ่ ไม่สามารถกรองอนุภาคของสีออกจากน้ำเสียได้ ส่วนวิธีออสโมซิสย้อนกลับเหมาะสำหรับการกำจัดสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เป็นการกรองแยกน้ำออกจากของแข็งแขวนลอยหรือของแข็งที่ละลายน้ำ โดยผ่านรูพรุนขนาดเล็กและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลผ่านตัวกรอง เป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล ซึ่งเยื่อแผ่นแรกสามารถกำจัดสีปรากฏซึ่งมาจากโรงฟอกย้อมได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือจะถูกส่งผ่านไปเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 สำหรับกระบวนการกำจัดสีโดยใช้แผ่นกรองนาโนใช้หลักการเหมือนออสโมซิสผันกลับ แต่การกรองผ่านแผ่นนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากมีรูขนาดที่เล็กกว่า ทำให้แยกสีออกจากน้ำได้ดีกว่าโดยสามารถแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์ กรดอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งขนาดของแผ่นกรองส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงประกอบ ที่มีรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 2.5 นาโนเมตรและมีช่วงความดันที่ใช้ประมาณ 10 ถึง 34 บาร์ เยื่อแผ่นนาโนสามารถกำจัดสียอมที่ความดัน 10 บาร์ อุณหภูมิ

45 และ 60 องศาเซลเซียส มากกว่าร้อยละ 97 และจะลดลงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการกรองผ่านด้วยแผ่นนาโน ได้แก่ อัตราการไหลและลักษณะการไหล ความดัน ความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิ นอกจากนี้มีกระบวนการกำจัดสีจากโรงงานฟอกย้อมโดยการแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้แผ่นกรองร่วมกับไฟฟ้ากระแสตรง แยกสารประจุบวกและประจุลบออกจากน้ำ โดยมีแผ่นกรองที่มีประจุบวก (Cation) และประจุลบ (Anion) ติดตั้งวางสลับกันเป็นชั้นๆ จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งเข้าไปในช่องระหว่างแผ่นกรอง และขณะเดียวกันก็มีการปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงผ่านแผ่นกรอง โดยแผ่นกรองประจุบวกยอมให้ประจุบวกไหลผ่านไปพร้อมกับน้ำส่วนหนึ่งและแผ่นกรองประจุลบยอมให้สารประจุลบไหลผ่าน โดยน้ำที่มีประจุบวกและประจุลบรวมกันแล้วไหลทิ้งออกไป แต่มักเกิดปัญหาตะกอนเกาะติดแผ่นกรองทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก และต้องทำล้างทำความสะอาดบ่อยครั้งจึงไม่ได้รับความนิยม (สุบัณฑิต, 2548)

2.1.4.2 เทคโนโลยีการบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางเคมี เพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำเสียวิธีการนี้จะใช้สำหรับน้ำเสียที่มีส่วนประกอบอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังต่อไปนี้ คือ ค่าความเป็นกรดต่างสูงหรือต่ำเกินไป มีสารพิษ มีโลหะหนัก มีของแข็งแขวนลอยที่ตกตะกอนยาก มีไขมันและน้ำมันที่ละลายน้ำ มีไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสที่สูงเกินไปและมีเชื้อโรค ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า ถังตกตะกอน ถังกรอง และถังฆ่าเชื้อโรค ตัวอย่างเทคโนโลยีการ กำจัดสีทางเคมี ดังนี้

ก) การสร้างและรวมตะกอน (Coagulation Flocculation)

การรวมตะกอนด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดความเป็นด่าง สารที่นิยมใช้เป็นสารเคมีสร้างตะกอน(Coagulant)คือสารส้ม (Aluminium Sulfate; Alum) ปูนขาว (Calcium Oxide) และเหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) หรือเฟอร์รัสคลอไรด์ ($FeCl_2$) โดยถ้าโมเลกุลของสีมีขนาดเล็กละลายน้ำได้ดี การเกิดตะกอนของสีจะไม่สามารถทำได้ แต่ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตะกอนให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) การกำจัดสีได้โดยการสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำให้ตะกอนหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloid) รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยมีประจุไฟฟ้าลบเป็นส่วนใหญ่เมื่ออนุภาคเหล่านั้นมาพบกันก็จะผลักรัน ไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำลายประจุของอนุภาคหรือทำให้อนุภาคเป็นกลางโดยการเติมสารเคมีสร้างตะกอนเรียกว่ากระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) หลังจากนั้นเกิดกระบวนการรวมกัน (Flocculation) ได้มากขึ้นโดยการเติมสารเคมีรวมตะกอน (Flocculants) ลงไปช่วยยึดหรือจับให้กลุ่มตะกอนที่รวมตัว

กันเข้ามาจับเป็น 15 กลุ่มตะกอนใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (Floc) เมื่อตะกอนกลุ่มใหญ่ขึ้นก็มีน้ำหนักมากขึ้นก็จะสามารถตกตะกอนออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งสารส้มมีคุณสมบัติทำหน้าที่เป็นทั้งสารสร้างและรวมตะกอนในขั้นแรกจะเติมปริมาณน้อย เพื่อให้ประจุบวกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอน (Coagulant) ไปทำลายประจุลบ และเมื่อเติมสารส้มมากขึ้นจะเกิดเป็นตะกอนเบาของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ซึ่งจะเป็นที่เกาะของอนุภาคต่างๆ ทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอน โดยสามารถละลายน้ำได้ดี ถึง 71 ส่วนในน้ำ 100 ส่วนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อละลายน้ำจะทำปฏิกิริยาดังสมการที่ 1



จากสมการที่ 1 อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นเม็ดเหนียวๆ (คล้ายเม็ดแมงลักแต่เล็กกว่า) ไม่ละลายน้ำและจะตกตะกอนช้าๆ และระหว่างที่ตกตะกอนก็จะดึงเอาสารแขวนลอยต่างๆ มาเกาะเป็นเม็ดใหญ่ขึ้น จะมีประสิทธิภาพดีที่ความเป็นกรดต่างระหว่าง 5.0 ถึง 7.0 ถ้าน้ำมีค่าสภาพต่างต่ำ เติมสารส้มมากทำให้สภาพต่างจะถูกทำลายหมด และจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำลดลงจนเป็นกรด ดังนั้นในบางกรณีจำเป็นต้องมีการเติมต่างไปพร้อมกับสารส้มเพื่อชดเชย ซึ่งปริมาณสารส้มที่ต้องใช้นั้นจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับลักษณะของน้ำ จึงจำเป็นต้องหาปริมาณที่ถูกต้องด้วยวิธีทดสอบการตกตะกอน (Jar Test) โดยการเติมสารเคมีในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แล้วเริ่มการกวนเร็วไม่เกิน 1 นาที แล้วเปลี่ยนความเร็วไปพัดมากวนช้า ประมาณ 5 ถึง 20 นาที และหยุดให้เกิดการตกตะกอนซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมี ทำให้มีกากตะกอน (Sludge) จำนวนมากต้องกำจัดต่อไป สำหรับปูนขาว (CaO) มีประสิทธิภาพไม่เท่าสารส้ม การใช้งานส่วนใหญ่มักจะเติมพร้อมกับสารส้ม เพื่อให้สารส้มตะตะกอนและปูนขาวปรับค่าความเป็นกรดต่างให้กับน้ำ ส่วนสารประกอบเหล็กในรูปต่างๆไม่ค่อยได้รับความนิยม เพราะมีราคาแพงกว่าสารส้มและตะกอนของเหล็ก ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ที่เกิดขึ้นอาจจะถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารพิษ

ข) การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี ใช้สารเคมีเป็นปัจจัยสำคัญในการออกซิไดซ์สารประกอบต่างๆ ในน้ำเสีย โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิแดนซ์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ สารเคมีเฟนตัน (Fenton's reagent) และโอโซน (O_3)

ค) กระบวนการเฟนตัน (Fenton Process)

การออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้สาร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ซึ่งไอออนบวกของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\cdot) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็น

ตัวกลางสำคัญซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีค่าศักย์ไฟฟ้า 16 ออกซิเดชันสูง แสดงถึงความสามารถในการในการรับอิเล็กตรอน ถ้าตัวออกซิไดซ์ที่แรงจะรับอิเล็กตรอนได้ง่ายมาก ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากจนเปลี่ยนเป็นรูปคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีของโรงงานย้อมสิ่งทอ ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกริยาเพนตัน ได้แก่ ความเข้มข้นของไอออนเหล็กความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกริยา

ง) กระบวนการกำจัดสีแบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process)

ซึ่งสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมโดยเป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกริยาเคมีและพลังงานไฟฟ้าเรียกว่าปฏิกริยารีดอกซ์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชัน ไปยังสารที่เกิดรีดักชันผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไอออนของโลหะ ที่ก่อให้เกิดสีทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไป และสามารถดูดซับกับสารแขวนลอยต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโตรดให้เกิดการตกตะกอนขึ้น กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีกลไกการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) การดูดซับ (Adsorption) การตกตะกอน (Precipitation) และการลอยตัว (Floatation) ทำให้สามารถกำจัดสีออกจากน้ำเสีย ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกริยาและระยะเวลาการตกตะกอนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้าระยะเวลาในการทำปฏิกริยา และระยะเวลาการตกตะกอน เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดสี (วนิดา, 2555)

2.1.4.3 เทคโนโลยีการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment)

เทคโนโลยีการบำบัดทางชีวภาพเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพหรือใช้จุลินทรีย์ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย โดยเฉพาะสารคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยความสกปรกเหล่านี้จะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อการเจริญเติบโตทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกลดลง โดยจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Organisms) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Organisms) (วนิดา, 2555)

2.1.5 โอโซน (Ozone)

2.1.5.1 คุณสมบัติทั่วไปของโอโซน

โอโซนมีสูตรโมเลกุล คือ O_3 และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 อยู่ในสถานะก๊าซที่อุณหภูมิและความดันปกติ มีจุดเดือดเท่ากับ $-111.9^{\circ}C$ ที่ความดันบรรยากาศ และไม่เสถียร โอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ (Oxidation / Oxidizing agent) ที่รุนแรงมาก มีประสิทธิภาพสูงในการทำลาย กลิ่น สี และรสในน้ำ และสามารถละลายในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายในน้ำของ

ออกซิเจน แต่จะไม่เสถียรในน้ำ โอโซนมีความเสถียรในอากาศมากกว่าในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอากาศที่เย็นและแห้ง ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันของโอโซนในสถานะก๊าซ โอโซนมีสีอ่อนมากหรือสีน้ำเงินอ่อนๆ ความหนาแน่นประมาณ 1.6 เท่าของอากาศที่ความเข้มข้นต่ำ อาจกล่าวได้ว่าโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่เผาไหม้ที่ความเข้มข้นต่ำ แต่ที่ระดับความเข้มข้นสูงโอโซนจะมีกลิ่นฉุนมาก (มั่นสิน, 2540) โอโซนเป็นสารออกซิเดนท์ที่แรงกว่าออกซิเจน และปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของโอโซนจะปล่อยความร้อนออกมา โดยปกติแล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าออกซิเจน เมื่อโอโซนอยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คลอรีน หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ปัจจุบันการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการใช้โอโซนมากขึ้นและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยโอโซนมีลักษณะเด่น ดังนี้

ก) สลายตัวเร็ว เนื่องจาก ไม่คงตัว (Unstable) และไม่สามารถเก็บบรรจุใส่ภาชนะใดๆได้ (ยกเว้นการเก็บในสภาวะอุณหภูมิต่ำหรือน้ำแข็ง) การสลายตัวจะขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้น

ข) มีกลิ่นคล้ายกลิ่นฝนตกใหม่ๆ และถ้ามีความเข้มข้นสูงจะมีกลิ่นฉุน

ค) สถานะทั่วไปเป็นก๊าซ

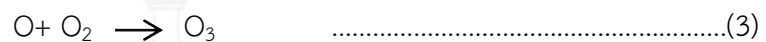
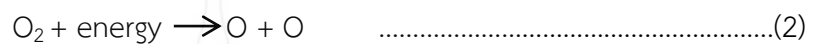
ง) มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่รุนแรงมากทั้งในน้ำและอากาศ

จ).เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความรุนแรงมาก (Potential Oxidizing Agent) จึงสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้

2.1.5.2 กระบวนการโอโซนออกซิเดชั่น (Ozone Oxidation)

การกำจัดสีด้วยโอโซนทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (Chromophores) แตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กและสีหายไป โดยสามารถแยกสลายโมเลกุลของสีที่มีความยาวมากให้มีขนาดสั้นลงทำให้สีของน้ำเสียลดลงซึ่งโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสีในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายในน้ำของออกซิเจน สามารถกำจัดสีแท้จริง ทำลายโครงสร้างโมเลกุลแบบโครงสร้างแบบโซ่ของสารอินทรีย์ ความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนให้นานขึ้น และสีของน้ำลดลงมากที่สุดเมื่อผ่านน้ำที่เข้าระบบเป็นเวลา 60 นาที ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนออกซิเดชั่นในการกำจัดสี โดยความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12 ± 0.1 เป็นสภาวะที่สามารถกำจัดสีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชั่นได้ดีที่สุด ก๊าซโอโซนไม่เสถียรสามารถสลายตัวกลายเป็นออกซิเจนได้ง่าย จึงต้องผลิตขึ้นมาใช้ ณ สถานที่ใช้งานเลย หรือเป็นแบบติดอยู่กับที่ (Generated on-Site) โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซโอโซน คืออากาศหรือออกซิเจนโดยออกซิเจน 2 โมเลกุลจะผลิตก๊าซโอโซนได้ 1 โมเลกุล ดังสมการ (2) และ (3) การผลิตก๊าซโอโซนโดยอากาศด้วยเครื่องผลิตโอโซนจะได้

ก๊าซโอโซนประมาณร้อยละ 0.5 - 3 ในขณะที่การผลิตก๊าซโอโซนโดยใช้ออกซิเจนจะได้ก๊าซโอโซนประมาณร้อยละ 1 - 6 การผลิตโอโซนจะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีในการเปลี่ยนออกซิเจนเป็นก๊าซโอโซน โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีบางชนิดที่เป็นสารให้ออกซิเจน หรือปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีโดยป้อนออกซิเจนเข้าไปในห้องปฏิกิริยา ที่มีขั้วประจุไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงมากแล้วทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของออกซิเจน เป็นอนุมูลออกซิเจนอิสระและไปรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจนเป็นก๊าซโอโซน ซึ่งการผลิตที่เป็นที่นิยมก็คืออาศัยหลักการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการผลิต



โอโซนมีสถานะเป็นก๊าซที่ความดันและอุณหภูมิปกติความสามารถในการละลายของโอโซนในน้ำ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันรวมทั้งค่าความเป็นกรดต่างเป็นสำคัญ โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรอัตราการสลายตัว จึงเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้โอโซนอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น กรณีที่ก๊าซโอโซนเป็นสารให้ออกซิเจนอย่างแรง (Strongly oxidizing agent) อาจจะมีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ รวมทั้งอาจมีการทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดในน้ำ และเกิดสารบางชนิดขึ้นโดยสารเหล่านั้นเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic compounds หรือ Mutagenic compound) นอกจากนี้มีกระบวนการกำจัดสีแบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) ซึ่งสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม โดยเป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาเคมีและพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชัน ผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไอออนของโลหะที่ก่อให้เกิดสี ทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไป และสามารถดูดซับกับสารแขวนลอยต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโตรดให้เกิดการตกตะกอนขึ้น กระบวนการไฟฟ้าเคมีมีกลไกการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ด้วยกระบวนการสร้างตะกอน การดูดซับ การตกตะกอน และการลอยตัว ทำให้สามารถกำจัดสีออกจากน้ำเสียได้ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาการตกตะกอน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยเมื่อใช้ระดับกระแสไฟฟ้าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและระยะเวลาการตกตะกอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดสี (ดวงตา, 2546)

โอโซนเป็นก๊าซพิษที่อันตรายจากการได้รับโอโซนเป็นประจำอาจจะก่อให้เกิดความระคายเคืองอย่างรุนแรง ถ้าได้รับโดยตรงและในปริมาณความเข้มข้นสูง เป็นอันตรายต่อปอดและตา ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์อักเสบ ผู้ที่อยู่ในบรรยากาศของโอโซนที่เข้มข้นอาจถึงแก่ความตายได้ โดยเฉพาะในวัยเด็กที่ปอดกำลังพัฒนา อาจก่อให้เกิดความเสียหายกับระบบสืบพันธุ์และพันธุกรรม

อาจจะเป็นอันตรายต่อเด็กในครรภ์ ทำให้เกิดโรคปอดกำเริบ เช่น กลีบปอดพองลม และโรคหลอดลมอักเสบ ทำให้ภูมิคุ้มกันในระบบหายใจลดลง อาการหอบหืดและโรคหัวใจกำเริบ ลดปริมาณลมหายใจรวมทั้ง ทำให้ปริมาณของเหลวในปอดเพิ่มขึ้นทำให้หายใจขัด ก๊าซโอโซนทำให้เกิดอาการระคายเคืองในระบบหายใจทำให้ไอระคายคอหรือแน่นหน้าอก ปวดศีรษะ ท้องเสีย แน่นท้อง มีอาการป่วย และอาเจียน การสัมผัสโอโซนที่อยู่ในสภาพของเหลวที่มีความเข้มข้นสูงที่ผิวหนังหรือดวงตา อาจจะทำให้เกิดอาการระคายเคือง อาการไหม้รุนแรงและปวดแสบปวดร้อน

2.1.5.3 การนำโอโซนไปประยุกต์ใช้

โอโซนถูกนำมาประยุกต์ใช้ทั้งในด้านอุตสาหกรรมอาหาร ด้านอุตสาหกรรมยา และการใช้เป็นระบบบำบัดน้ำทั้งน้ำดีและน้ำเสีย

ก) การใช้ประโยชน์โอโซนในอุตสาหกรรมอาหาร ปัจจุบันมีการนำโอโซนมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้นดังนี้

ข) อุตสาหกรรมยา เนื่องจากน้ำที่ใช้เพื่อผลิตยาจะต้องเป็นน้ำที่สะอาดมากปราศจากเชื้อโรคและสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ โอโซนจึงถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีในน้ำให้หมดไป

ค) ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย โดยประยุกต์ใช้โอโซนการกำจัดรสและกลิ่นในน้ำ โอโซนถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดรสและกลิ่นในน้ำ โดยการเติมโอโซนในปริมาณ 2.5 - 2.7 mg/l ที่ระยะเวลาสัมผัส 10 นาทีสามารถกำจัดกลิ่น และรสในน้ำได้

ปัญหาที่สำคัญของการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมคือสี เนื่องจากสีเป็นสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมักจะใช้หลายวิธีด้วยกัน ทั้งทางด้านชีววิทยาทางกายภาพและเคมี โดยทั่วไปมักจะใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี เพื่อกำจัดสีซึ่งถือเป็นส่วนที่กำจัดยากที่สุด แล้วตามด้วยกระบวนการกำจัดทางชีววิทยาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ยังเหลืออยู่หรืออาจใช้เพียงวิธีการใดวิธีการหนึ่งในการบำบัด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำเสียและประสิทธิภาพของระบบเป็นสำคัญ โอโซนเป็นทางเลือกที่มีการนำมาใช้เพื่อกำจัดสีในน้ำเสียฟอกย้อม

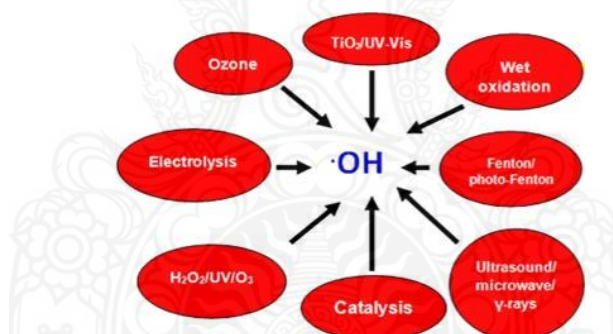
ง) การใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรค กระบวนการโอโซนเนชั่นถูกนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคทั้งในน้ำดีและน้ำเสีย เพราะโอโซนสามารถฆ่าแบคทีเรียในน้ำได้อย่างรวดเร็ว โอโซนที่ความเข้มข้นเพียง 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ทฤษฎีของ ChickWatson (1980) ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดหาปริมาณโอโซนที่ต้องการเติมให้กับน้ำเพื่อฆ่าเชื้อโรคพบว่าประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคจะขึ้นอยู่กับค่า C-T (CT value) โดยที่ C คือความเข้มข้นของโอโซน (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ T คือระยะเวลาในการสัมผัส (min) ค่า C-T ที่ให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคจะอยู่ในช่วง 1.6-2.0 mg.L-1.min-1 นอกจากนี้ชนิดของแบคทีเรีย อุณหภูมิ pH และความขุ่นของน้ำก็เป็นปัจจัย

ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อโรคโดยโอโซนด้วย แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของโอโซนยังสูงกว่าการใช้คลอรีนจึงทำให้การใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรคยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก

จ) การใช้โอโซนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างตะกอนและกำจัดความขุ่นจากการศึกษาพบว่าโอโซนจะไปทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ปฏิกริยาออกซิเดชันโดยโอโซนทำให้เกิดโมเลกุลที่มีขั้ว ซึ่งโมเลกุลสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารสร้างตะกอนและรวมตัวเป็นตะกอน นอกจากนี้การเติมโอโซนยังไปออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ทำให้น้ำมีความขุ่นลดลง (ปิยะวิทย์, 2551)

2.1.6 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Processes)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Processes, AOPs) เป็นกระบวนการทางเคมีวิธีการหนึ่งซึ่งอาศัยสารออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) ที่มีค่าศักย์ออกซิเดชันสูง ปัจจุบันได้รับความสนใจและพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้กำจัดสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้หรือย่อยสลายได้ยาก ด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพหรือกระบวนการทางเคมี โดยหลักการของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้คือการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังภาพ 2.1



ภาพ 2.1 กระบวนการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล
ที่มา : นิตดา (2555)

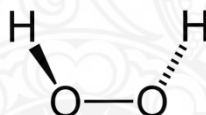
ทำหน้าที่ย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปของสารมลพิษเกิดเป็นอนุกรมของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลอื่นได้ต่อไปทำให้สารอินทรีย์หรืออนินทรีย์เปลี่ยนโครงสร้างและมีขนาดโมเลกุลเล็กลง สารมลพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมหรือหากไม่สามารถออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์ได้ สารมลพิษดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษหรือสร้างภาวะมลพิษได้ต่ำลง

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงโดยทั่วไปนิยมใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดซ์หลักร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยา เช่น เกลือของโลหะ โอโซน รังสียูวีหรือความร้อน เป็นต้น ซึ่งจะสามารถเร่งให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัลซึ่งเป็นสารที่มีศักยภาพในการออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในปัจจุบันที่มีการใช้งานมีหลายประเภท เช่น ฟentonรีเอเจนต์ (Fenton's reagent) แสงยูวีร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (UV/TiO₂) แสงยูวีร่วมกับโอโซน (H₂O₂/O₃) แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/H₂O₂) หรือใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโอโซน (H₂O₂/O₃/UV) (อาลักษณ์ , 2561)

2.1.7 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2.1.7.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมี

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารที่ไม่อยู่ตัว สามารถสลายตัวให้ออกซิเจนกับน้ำ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คล้ายโอโซนมากบางกรณี เช่น ใช้เป็นตัวฟอกจางสี ใช้ฆ่าแบคทีเรียและสลายตัวให้ออกซิเจนได้เหมือนกับน้ำ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีลักษณะใสไม่มีสีคล้ายน้ำ และไม่ติดไฟ สูตรทางเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ H₂O₂ และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 34.01g/mole มีโครงสร้างดังภาพ 2.2



ภาพ 2.2 สูตรโครงสร้างของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ที่มา : Thpanorama (n.d.)

2.1.7.2 ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อม

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ทั้งในด้านอากาศ น้ำเสีย ดิน สลัดจ์ และยังสามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง ๆ หรือทำงานร่วมกับกระบวนการอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้มากขึ้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น Strong Oxidant ซึ่งถูกนำมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เป็นพิษมากมายหลายชนิด เช่น การนำไปใช้ในการป้องกันกลิ่นของซัลไฟด์จากบ่อเก็บกักน้ำเสีย และระบบบำบัดน้ำเสียใช้ในการกำจัดไฮโปคลอไรต์, ไนโตรท, ไชยาไนต์ และคลอรีน อีกทั้ง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังใช้ประโยชน์ในการกำจัดสารพิษที่มีสถานะเป็นก๊าซ ได้แก่ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยการเปลี่ยนรูปไปเป็นกรดประโยชน์อื่น ๆ เช่น ฟอกสีเยื่อกระดาษและกระดาษเป็นต้น (อาพิตย์พันธุ์, 2547)

2.1.8 ค่าพารามิเตอร์

2.1.8.1 พีเอช (pH)

pH (ย่อมาจาก power of Hydrogen ion) ความเป็นกรด-ด่าง เป็นค่าที่แสดงปริมาณหรือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในน้ำ (Hydrogen or hydronium ion; H^+ or H_3O^+) ซึ่งเกิดจากสารที่สามารถแตกตัวให้อนุมูลกรด (H^+) หรือด่าง (OH^-) ได้ความเป็นกรด-ด่างมีค่าตั้งแต่ 0-14 ถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 7 หมายถึงน้ำมีสภาพเป็นกรด ถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7 หมายถึงน้ำมีสภาพเป็นด่าง และถ้าตัวอย่างน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 หมายถึงน้ำมีสภาพเป็นกลาง ค่าความเป็นกรด - ด่างของน้ำไม่ได้บอกความเป็นพิษต่อร่างกายแต่บอกให้ทราบถึงประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำ ในรูปของสารที่ให้อนุมูลกรดหรือด่างได้อย่างไรก็ตามค่าความเป็นกรด-ด่างนี้จะป็นดัชนีที่มีประโยชน์ ในการวัดคุณภาพน้ำโดยที่ภาวะความเป็นกรด - ด่างของน้ำมีผลต่อคุณภาพน้ำ ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นและการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ นอกจากนี้ยังบอกถึงคุณสมบัติในการกัดกร่อนของน้ำด้วย (มันสิน, 2551)

2.1.8.2 สี (color)

สีของน้ำเกิดจากการปนเปื้อนของสารต่างๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์และทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ สีในน้ำอาจจะเป็นผลมาจากนั้นมีไอออนของโลหะในธรรมชาติ เช่น เหล็ก และแมงกานีส เป็นต้น ฮิวมัส แพลงค์ตอน วัชพืชและสารปนเปื้อนจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรม สีสามารถถูกกำจัดเพื่อทำให้น้ำเหมาะกับการใช้โดยทั่วไป และการใช้ในทางอุตสาหกรรมได้ ถ้าปรากฏว่าน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีสีซึ่งเป็นที่น่ารังเกียจ โรงงานอุตสาหกรรมนั้นต้องกำจัดสีของน้ำให้เป็นไปตามที่กำหนดก่อนที่จะระบายออกนอกโรงงานลงสู่แหล่งรองรับน้ำทิ้ง สารที่ทำให้เกิดสีในน้ำมีที่มาจากธรรมชาติและจากมนุษย์ เช่น ขยะชุมชนและขยะอุตสาหกรรม เป็นต้น (มันสิน, 2551)

2.1.8.3 ความขุ่น (Turbidity)

ความขุ่นเกิดจากการที่ในน้ำมีสารที่ไม่ละลายน้ำขนาดเล็กแขวนลอย ซึ่งเป็นไปได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น ดิน ทราเยลเลียด แพลงค์ตอน สารอินทรีย์ขนาดเล็กหรือจุลินทรีย์ เป็นต้น ถ้าในน้ำมีปริมาณสารแขวนลอยดังกล่าวอยู่ในปริมาณมาก เมื่อแสงส่องมากระทบสารแขวนลอยนี้ จะทำให้เกิดการหักเหของแสงกระจัดกระจายไปทำให้มองเห็นน้ำมีลักษณะขุ่น สารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำนี้ อาจจะมีหรือไม่มีผลต่อสุขภาพอนามัยหรือระบบนิเวศวิทยาของแหล่งน้ำก็ได้ สารแขวนลอยบางชนิดที่ทำให้น้ำมีความขุ่น อาจจะไม่มผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคมากนักแต่ทำให้น้ำนั้นไม่น่าใช้ในการอุปโภค บริโภค ทำให้น้ำรังเกียจและมีผลต่อระบบการนำน้ำมาใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ความขุ่นในแหล่งน้ำยังทำให้การสังเคราะห์แสงของพืชในน้ำเป็นไปได้ไม่เต็มที่ เนื่องจากความขุ่นจะบดบังแสงอาทิตย์ที่จะผ่านลงไปใต้น้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำมีน้อยและมีผลต่อ

การมองเห็นของสัตว์น้ำด้วย แต่ก็มีสารแขวนลอยบางชนิดที่ไม่ละลายในน้ำทำให้น้ำขุ่นและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำและไม่สามารถจะนำน้ำนั้นมาเพื่อใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งความขุ่นมีหน่วยเป็น NTU (Nephelometric Turbidity Units) (มันลิน, 2547)

2.1.8.4 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)

ปริมาณออกซิเจน (O_2) ที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD) คือค่าที่วัดถึงปริมาณทั้งหมดของออกซิเจนที่ใช้โดยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้และที่เป็นสารอินทรีย์เฉื่อย) ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมไปถึงสารอินทรีย์ที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์ในการสลายสารอินทรีย์ด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลาย เช่น โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ในปริมาณมากเกินไปในสารละลายกรดซัลฟิวริกซึ่งสารอินทรีย์ในน้ำทั้งหมดทั้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้ก็จะถูกออกซิไดซ์ภายใต้ภาวะที่เป็นกรดและการให้ความร้อน โดยทั่วไปค่า COD จะมีค่ามากกว่า BOD เสมอ ดังนั้นค่า COD จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่ง que แสดงถึงความสกปรกของน้ำเสีย (นิพนธ์ และ คณิตตา, 2555)

2.1.8.5 บีโอดี (Biological Oxygen Demand, BOD)

บีโอดี (BOD) บอกถึงความต้องการออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน จากกระบวนการนี้จุลินทรีย์จะได้รับพลังงานเพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ผลผลิตสุดท้ายของการออกซิไดซ์สารอินทรีย์จะได้แก่ออกไซด์และน้ำ ค่าบีโอดีของน้ำบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ ถ้าบีโอดีสูงแสดงว่ามีสารอินทรีย์ปนเปื้อนมาก แต่ถ้าบีโอดีต่ำแสดงว่ามีสารอินทรีย์ปนเปื้อนน้อย ดังนั้นการวัดค่าบีโอดีจึงเป็นวิธีทางอ้อมในการตรวจวิเคราะห์หาระดับปริมาณสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ (นิพนธ์ และ คณิตตา, 2555)

$$BOD = DO_0 - DO_5$$

DO_0 = ค่าออกซิเจนละลายในน้ำที่ไตเตรทได้ในวันแรก

DO_5 = ค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายในน้ำที่ไตเตรทได้หลังจากเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ

20 ± 1 °C เป็นเวลา 5 วัน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภาณุมาศ (2548) ได้ทำการศึกษาเรื่องกระบวนการโอโซนเนชั่นในการย่อยสลายฟีนอลโดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟีนอลเข้มข้น 25 50 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร เครื่องกำเนิดโอโซนมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 1.14 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการทดลองแบบแบทช์ (Batch) พารามิเตอร์ได้แก่ฟีนอล สารอินทรีย์ 31 ทั้งหมด และพีเอช (pH) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดฟีนอลโดยกระบวนการโอโซนได้แก่ ปริมาณโอโซน ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น และพีเอช โดยที่พีเอช 10 ให้ผลการกำจัดฟีนอล

สูงสุดเมื่อเทียบกับค่าพีเอช พีเอช 4 และ 7 ที่สภาวะเหมาะสมปริมาณโอโซนที่ต้องการจะขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้นเพื่อผลในการกำจัดฟีนอลกระบวนการโอโซนภายใต้สภาวะต่างๆ ที่ทำการ ทดลองให้ผลการกำจัดในช่วง 24.56% - 97.13% โดยให้ผลการกำจัด ฟีนอลสูงสุดที่พีเอช 10 ความ เข้มข้นฟีนอล 25 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณโอโซน 132.96 มิลลิกรัม เนื่องจากการย่อยสลาย ฟีนอล ด้วยกระบวนการโอโซนเนชันจะเป็นการย่อยสลายแบบไม่สมบูรณ์ทำให้ค่าทีโอซี (TOC) ลดลง ได้เพียง 14.26%

กุนทรหายน (2551) ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย และหา สภาวะที่เหมาะสมของการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดย การศึกษาได้ปรับค่า พีเอช ของน้ำเสียเป็น 4, 7 และ 10 ตามลำดับ นำน้ำเสียที่ได้ปรับค่า พีเอช แล้ว จำนวน 5 ลิตร ใส่ลงในถังปฏิกิริยาซึ่งทำจากอะคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 13 ซม. สูง 200 ซม. ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนอัตราการให้ก๊าซโอโซน 1,500, 2,000,3,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยแต่ละความเข้มข้นของโอโซน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 15, 30, 45 และ60 นาที ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าอัตราการให้ก๊าซโอโซนเวลาในการทำปฏิกิริยา และ pH เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของแข็งแขวนลอยและสีพบว่าที่ พีเอช 7 อัตราการให้ก๊าซโอโซน 4,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที สัดส่วนของการ ย่อยสลายทางชีวภาพ (BOD₅/COD ratio) ของน้ำเสียเพิ่มขึ้น จาก 0.55 เป็น 0.83 ซึ่งเหมาะสมต่อ การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพในลำดับต่อไป

ศุภวรรณ (2556) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดี บีโอดี ไนมันและน้ำมัน ปริมาณของแข็งทั้งหมด และความขุ่นของน้ำเสียโรงอาหารด้วย กระบวนการโอโซน และกระบวนการโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในการทดลองกำหนด ปัจจัยที่ทำการทดลอง คือ พีเอช เริ่มต้นของน้ำเสีย 4 7 และ 10 ความเข้มข้นโอโซน 5 กรัม/ชั่วโมง และ 10 กรัม/ชั่วโมง มีระยะเวลาเก็บกัก 0.5 ชั่วโมง 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 กรัม/ลิตร 4 กรัม/ลิตร 6 กรัม/ลิตร และ 8 กรัม/ลิตร จากผล การทดลองพบว่า กระบวนการโอโซนมีสภาวะที่เหมาะสมคือที่ค่า pH 10 ความเข้มข้นโอโซน 10 กรัม/ชั่วโมง ระยะเวลาเก็บกัก 4 ชั่วโมง สามารถกำจัดซีโอดี บีโอดี ไนมันและน้ำมัน ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดได้ $51.49 \pm 3.05\%$ $27.53 \pm 3.39\%$ $89.20 \pm 0.16\%$ และ $28.43 \pm 0.55\%$ ตามลำดับส่วน กระบวนการโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีคือ ที่ค่า พีเอช 10 ความเข้มข้นโอโซน 10 กรัม/ชั่วโมง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 กรัม/ลิตร ระยะเวลาเก็บกัก 0.5ชั่วโมง สามารถกำจัดซีโอดีได้ $64.77 \pm 0.98\%$ สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด บีโอดี คือ ที่ค่า pH 10ความเข้มข้นโอโซน 10 กรัม/ชั่วโมง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 กรัม/ลิตร ระยะเวลาเก็บกัก 1 ชั่วโมง สามารถกำจัดบีโอดีได้ $89.48 \pm 2.35\%$ สภาวะที่เหมาะสมใน

การกำจัดไขมัน น้ำมันและปริมาณของแข็งทั้งหมด คือ ที่ค่า พีเอช 10 ความเข้มข้นโอโซน 10 กรัม/ชั่วโมง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8 กรัม/ลิตร ระยะเวลาเก็บกัก 4 ชั่วโมง สามารถกำจัดไขมันน้ำมันและปริมาณของแข็งทั้งหมดได้ $83.92 \pm 1.53\%$ และ $43.52 \pm 1.18\%$ ตามลำดับ

รัตน์ระพินทร์ (2556) ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อศึกษาการบำบัดซีโอดีจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกลองกระต่ายลูกฟูกด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน ซึ่งใช้เครื่องผลิตโอโซนที่มีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 24.5-59.0 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยศึกษาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียดังกล่าว ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยดังนี้ พีเอช 4, 7 และ 10 ระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาทีและความเข้มข้นของซีโอดีเริ่มต้น 200 - 720 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยทั้ง 3 ประการ ที่กล่าวมาข้างต้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน โดยที่ พีเอช 4 จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงสุดเมื่อเทียบกับ พีเอช 7 และ พีเอช 10 นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของซีโอดีเริ่มต้นสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดก็จะลดลง ซึ่งผลการทดลองสามารถบำบัดซีโอดีได้สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 81.6 ในการบำบัดน้ำเสียที่มีซีโอดีเริ่มต้นที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีโอดีในน้ำเสียเริ่มต้นเป็น 450 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 720 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีลดลงเหลือร้อยละ 71.2 และ 64.4 ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเนชันจะเป็นในแนวทางเดียวกันกับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี โดยประสิทธิภาพในการบำบัดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของซีโอดีเริ่มสูงขึ้น

เพ็ญจิตร์ (2542) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกระดาษโดยกระบวนการโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (O_3 / H_2O_2) น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 70 มล. ปริมาณโอโซน 100 มก./ชม. จากการทดลองพบว่า การทดลอง O_3 / H_2O_2 ต้องปรับ pH ให้เป็นด่างโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างละ 1 มล. จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุด ผลการบำบัดค่าซีโอดี (COD) บำบัดด้วย O_3 / H_2O_2 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (COD) ได้ 93.3% ภายในเวลา 6 ชม. ได้ดีกว่าการใช้ O_3 เพียงอย่างเดียว ส่วนการบำบัดสีโดยใช้ O_3 / H_2O_2 ได้ 100% ภายในเวลา 6 ชม. ได้ผลดีกว่า การใช้ O_3 เพียงอย่างเดียว โดย O_3 เพียงอย่างเดียว ใช้เวลาในการบำบัดสี 8 ชม. ได้ 99.7 % และปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัดคือการผลิตในปริมาณ 1.4% ให้ผลการบำบัดที่ดีที่สุด

อรชุดา (2550) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน โดยใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (central composite design) ซึ่งตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อการลดลงของสีของน้ำเสีย คือ ภาระสารอินทรีย์ (organic loading) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) และเวลาที่ใช้ในการโอโซนเนชัน โดยภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองอยู่ระหว่าง 650 - 1950 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช อยู่ระหว่าง

3 - 11 และเวลาที่ใช้ในการโอโซนเนชัน อยู่ระหว่าง 10 - 60 นาที ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหลของโอโซนคงที่เท่ากับ 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และปริมาณของโอโซนที่ผลิตจากเครื่องผลิตโอโซนโดยวิธีการผลิตแบบโครโนดิซซาร์จ เท่ากับ 27.6 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่า พีเอช และเวลาที่ใช้ในการโอโซนเนชัน แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลงเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสีย นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ คือ ภาระสารอินทรีย์ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 8.7 และเวลาที่ใช้ในการโอโซนเนชัน 20 นาที ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่สภาวะดังกล่าวพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีความแตกต่างกันน้อยกว่า 1.5 %

นวพรรษ (2545) ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากขยะมูลฝอยโดยใช้โอโซน พบว่าที่สภาวะเหมาะสมของการทดลองบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่ภาระบรรทุก 100% พีเอช 7 เวลาสัมผัส 2.5 ชั่วโมง สามารถลด COD และสีได้ 27.27% 83.68% ตามลำดับ และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยค่าอัตราส่วน BOD5/COD เพิ่มขึ้นจาก 0.047 เป็น 0.084



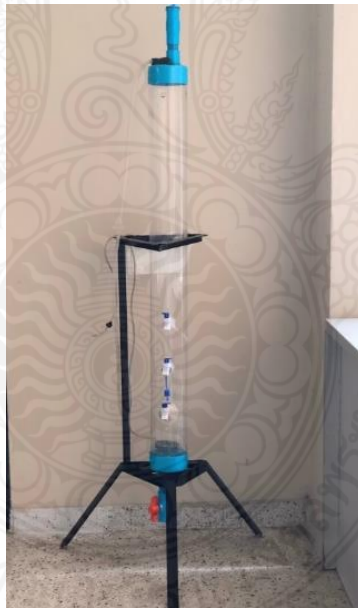
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงการทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาการบำบัดสีและซีไอดีจากน้ำสีย้อมผ้าโดยกระบวนการโอโซนและกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1. กระจกทดลองทำด้วยท่ออะคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร สูง 130 เซนติเมตร ด้านล่างมีท่อต่อเป็นท่อปล่อยน้ำออกบริเวณท่อกึ่งกึ่งน้ำตัวอย่าง 3 ระดับและด้านบนมีท่อต่อระบายอากาศออก



ภาพ 3.1 ท่อระบบบำบัดที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 ขวดแก้วเก็บปริมาณโอโซนส่วนเกินขนาด 2 ลิตร จำนวน 2 ขวด

3.1.3 สายยาง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องผลิตโอโซน (ozone)

3.2.2 เครื่องวัด pH

3.2.3 เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity)

3.2.4 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)



(ก)เครื่องผลิตโอโซน



(ข)เครื่องวัด pH



(ค)เครื่องวัดความขุ่น



(ง)เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ภาพ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 สารเคมีที่ใช้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโอโซนได้แก่

3.3.1.1 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)

3.3.1.2 น้ำแข็ง

3.3.1.3 สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)

3.3.2 สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ COD ได้แก่

3.3.2.1 โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)

3.3.2.2 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

3.3.2.3 ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)

3.3.2.4 เมอร์คิวริกซัลเฟต (HgSO_4)

3.3.2.5 เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ ($\text{C}_{36}\text{H}_{24}\text{FeN}_6\text{O}_4\text{S}$)

3.3.3 สารเคมีที่ใช้ทำการวิเคราะห์สี ได้แก่

3.3.3.1 โพแทสเซียมคลอโรแพลทตินेट (K_2PtCl_6)

3.3.3.2 กรดไฮโดรคลอริก (conc.HCl)

3.3.4 สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ BOD ได้แก่

3.3.4.1 สารละลายแมงกานีสซัลเฟต (manganese (II) sulfate solution)

3.3.4.2 อัลคาไล-ไอโอไดด์-เอไซด์ รีเอเจนต์ (Alkali-Iodide-Azide Reagent)

3.3.4.3 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

3.3.4.4 น้ำแข็ง

3.3.4.5 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)

3.3.4.6 สารละลายไบโอไอเดต (Bi-iodate Solution)

3.4 ขั้นตอนการเตรียมงานวิจัย

3.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

3.4.2 กำหนดกรอบแนวคิด

3.4.3 กำหนดน้ำสีสังเคราะห์ที่ทำการศึกษา คือสีย้อมผ้า

3.4.4 นำน้ำสีสังเคราะห์มาทำการทดลองเบื้องต้น

3.4.5 สังเคราะห์สีย้อมผ้าในการทดลอง ดังนี้

3.4.5.1 นำสีสังเคราะห์มาผสมน้ำในสัดส่วนของผงสีย้อม 4 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร จากนั้น

ทิ้งไว้ให้ตกตะกอนทางเคมีเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพ 3.3



ภาพ 3.3 การเตรียมน้ำสีสังเคราะห์

3.4.5.2 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณโอโซน

ใช้วิธีวิเคราะห์ตาม Standard Method Number ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1 เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ อย่างน้อย 1000 ml ใส่ภาชนะปิด อย่างน้อย 2 ขวด ต่ออนุกรมกัน (Trap A, Trap B) ทำการเติมโอโซนไปในสารละลายสีของ สารละลายจะค่อยๆเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้ม ดังภาพ 3.4

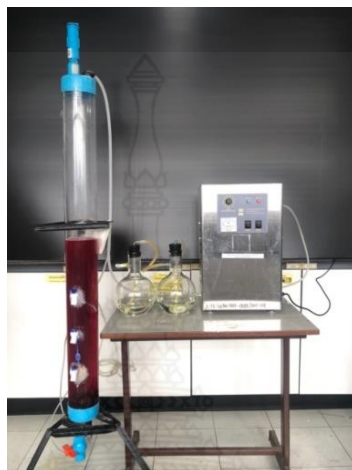
2 นำสารละลายที่ได้จาก (Trap A, Trap B) มาเติมน้ำแบ่ง 1 ml ทำการ ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต 1 N จนถึงจุดยุติ จะได้สารละลายใสไม่มีสี



ภาพ 3.4 การทดลองหาปริมาณโอโซน (Ozone) ที่ผลิตจากเครื่องผลิตโอโซน

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังภาพ 3.5 โดยต่อสายยางจากเครื่องผลิตโอโซนมายังท่อระบบบำบัด ที่ทำด้วยท่ออะคริลิกและต่อสายยางอีกเส้นจากท่อระบบบำบัดด้านบนกับขวดเก็บปริมาณโอโซนส่วนเกิน



ภาพ 3.5 การเตรียมระบบบำบัด

3.5.2 นำน้ำเสียตัวอย่างเทลงในชุดกระบอกทดลองปริมาตร 7,000 ml ทำการเปิดเครื่องโอโซนและเก็บตัวอย่างน้ำทุก 30 นาที ปริมาณ 250 ml จากนั้นนำไปวิเคราะห์ หาค่า พีเอช, สี ความขุ่น, และค่าซีโอดี

3.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

3.6.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์พีเอช

3.6.1.1 ทำการสอบเทียบอุปกรณ์กับน้ำยาสอบเทียบค่าพีเอช 4, 7 และ 10

3.6.1.2 ทำการวัดพีเอชโดยแกว่งหัววัดเบาๆ เมื่อค่าพีเอชหยุดนิ่งประมาณ 10 วินาที

ดังภาพ 3.6

3.6.1.3 จดบันทึกค่าที่วัดได้



ภาพ 3.6 การวิเคราะห์ค่าพีเอช

3.6.2 วิธีการวิเคราะห์ COD

3.6.2.1 ตูมน้ำตัวอย่าง 5 ml ใส่หลอดทดลอง และเติมสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมต 3 ml ดังภาพ 3.7 (ก)

3.6.2.2 เติมกรดซัลฟูริก 7 ml และเติมเมอคิวริซัลเฟต 0.1 g ดังภาพ 3.7 (ข)

3.6.2.3 ปิดฝาให้แน่น เขย่าให้สารละลายเข้ากัน ดังภาพ 3.7 (ค)

3.6.2.4 นำหลอดทดลองใส่ตู้อบ แล้วอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วทิ้งไว้ให้เย็น ดังภาพ 3.7 (ง)

3.6.2.5 เทสารจากหลอดทดลองใส่ขวดรูปชมพู่ เติมเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1-2 หยดแล้วนำไปไตเตรทด้วย FAS จนถึงจุดยุติจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง ดังภาพ 3.7 (จ)

3.6.2.6 สูตรคำนวณ

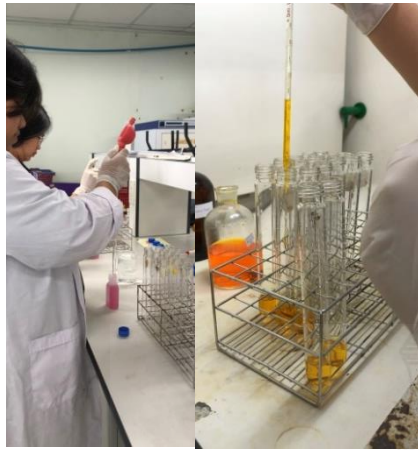
$$\text{ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{(A-B) \times N \times 8,000}{\text{มล.ของน้ำตัวอย่าง}}$$

เมื่อ A = มล.ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรท Blank

B = มล.ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่างน้ำ

N = ความเข้มข้นของ FAS, นอร์มัล

ที่มา : (มันสิน , 2551)

(ก) ปิเปตน้ำตัวอย่าง และเติมสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ 

(ข) เติมกรดซัลฟูริกและเติมเมอคิวรีซัลเฟต



(ค) เขย่าให้สารละลายเข้ากัน



(ง) ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น



(จ) ไตเตรทด้วย FAS จนถึงจุดยุติ

ภาพ 3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์ซีโอดี

3.6.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.6.3.1 ตวงตัวอย่างน้ำลงไปในคิวเวต แล้วเช็ดหลอดให้แห้ง

3.6.3.2 ใส่คิวเวตไปในเครื่อง Hach DR/890 Colorimeter โดยให้ลูกศรบนขวดตรงกับจุดแสดงในเครื่อง ปิดฝาแล้วกดอ่านค่า ดังภาพ 3.8

3.6.3.3 นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ



ภาพ 3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์สี ด้วยเครื่อง Hach DR/890 Colorimeter

3.6.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความขุ่น

3.6.4.1 ทำการสอบเทียบ (Calibrate) อุปกรณ์กับ Stablcal Stabilized Formazin Standard 20, 40, 100, 400 NTU

3.6.4.2 ตวงตัวอย่างน้ำลงไปในขวดวัดความขุ่น ปิดฝาเกลียวแล้วเช็ดขวดให้แห้ง

3.6.4.3 ใส่ขวดวัดความขุ่นลงไปเครื่องวัดความขุ่น โดยให้ลูกศรบนขวดวัดความขุ่นตรงกับจุดที่แสดงในเครื่องใส่ลงเครื่อง ปิดฝาแล้วกดอ่านค่า

3.6.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์บีโอดี

3.6.5.1 การหาค่าออกซิเจนละลายจากน้ำตัวอย่างและแบลงค์ ซึ่งเก็บไว้ในขวด BOD ขนาด 300 ml ทำได้ดังนี้

1) เลือกอัตราเจือจางจากตารางที่ 3.1 โดยคำนวณค่า BOD จากค่า COD ของตัวอย่างน้ำ เมื่อได้ค่า BOD แล้วทำการเลือกอัตราเจือจางจากค่า BOD ที่ได้ ขณะทำการทดลอง ให้เลือกอัตราเจือจางที่มากกว่าและน้อยกว่า จากค่าอัตราเจือจางที่ได้เลือกไว้

ตาราง 3.1 การเลือกขนาดตัวอย่างและอัตราเจือจางสำหรับช่วง BOD ต่าง ๆ

ปริมาณตัวอย่าง (ml)	ช่วง BOD (mg/l)	อัตราเจือจาง
0.02	30,000-105,00	15,000
0.05	12,000-42,000	6,000
0.10	6,000-21,000	3,000
0.20	3,000-10,500	1,500
0.50	1,200-4,200	600
1.0	600-2,100	300
2.0	100-1,050	150
5.0	120-420	60
10.0	60-210	30
20.0	30-105	15
50.0	12-42	6
100	6-21	3

ที่มา : ยุกต์ (2541)

2) เลือกอัตราเจือจางและปริมาณตัวอย่างเท่ากับ 300 และ 6 ml ตามลำดับ เติมน้ำตัวอย่างลงในขวด BOD 6 ml แล้วทำการเจือจางด้วยน้ำให้ได้ปริมาตร 300 ml ดังภาพ 3.9



ภาพ 3.9 เจือจางด้วยน้ำให้ได้ปริมาตร 300 ml

3) ทำแบลงค์โดยทำการเติมน้ำเจือจางลงในขวด BOD 300 ml (แทน ปริมาตรน้ำตัวอย่าง)

4) เติมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต 2 ml และอัลคาไลไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 2 ml ลงในขวด BOD ที่เติมน้ำตัวอย่างและแบลงค์แล้ว โดยให้ปลายปิเปตตะอยู่ข้างปากขวดเหนือผิวของน้ำตัวอย่างเพียงเล็กน้อย จากนั้นปิดจุกขวดระวังอย่าให้มีฟองอากาศ ผสมให้เข้ากันโดยการคว่ำขวดขึ้นลงอย่างน้อย 15 ครั้ง ดังภาพ 3.10



ภาพ 3.10 เติมสารละลายแมงกานีสซัลเฟต 1 มิลลิลิตรและเติมสารละลายอัลคาไลไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 2 ml ลงในขวด BOD

5) ผสมสารละลายให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนจนได้ปริมาณน้ำใส 1/2 ของขวด

6) เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นจำนวน 1 ml โดยให้กรดค่อย ๆ ไหลลงข้าง ๆ คอขวด ปิดจุกผสมสารละลายให้เข้ากัน โดยทำการคว่ำขวดขึ้นลงจนกระทั่งตะกอนละลาย

7) ขวด BOD ที่มีความจุ 300 ml จะต้องตวงน้ำออกจากปริมาตร 99 ml เพื่อนำไปไตเตรท ดังภาพ 3.11



ภาพ 3.11 ตวงสารละลายออกปริมาตร 99 ml

8) ทำการไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.025 N จนกระทั่งได้สารละลายสีฟางข้าว ดังภาพ 3.12



ภาพ 3.12 ทำการไตเตรทกับสารละลายมาตรฐาน

9) เติมน้ำแบ่งจำนวน 2 ml และทำการไตเตรทต่อไปจนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีใส บันทึกผลการทดลอง

3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์และรายงานผล

3.7.1 การทดลองที่ 1 กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซน

3.7.1.1 เก็บตัวอย่างน้ำก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด

3.7.1.2 นำน้ำเสียตัวอย่างเทลงในชุดกระบอกทดลองปริมาตร 7,000 ml ทำการเปิดเครื่องโอโซนและเก็บน้ำเสียทุกๆ 30 นาที ปริมาณ 250 ml จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่า พีเอช, สี, ความขุ่น, และซีโอดี

3.7.1.3 ทำจวนครบ 3 ระดับ ความเข้มข้นของ COD คือ 250 mg/l, 500 mg/l, 1000 mg/l

1) บันทึกผลและหาค่าพีเอชและความเข้มข้นของซีโอดี ที่เหมาะสมที่สุด

2) นำน้ำเสียที่ได้จากการพิจารณาค่าพีเอชที่เหมาะสมมาทำการเป่า ozone แบบเดิมอีกครั้ง แต่ทำการเก็บน้ำเสียที่ปริมาณ 1,250 ml

3) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ หาค่าพีเอช, สี, ความขุ่น, ซีโอดี, และบีโอดี

3.8.1.4 บันทึกผล

3.7.2 การทดลองที่ 2 กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.7.2.1 นำน้ำตัวอย่างผสมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 3 ความเข้มข้นดังนี้ 4 ml/l, 8 ml/l, 12 ml/l ทำการเปิดเครื่องโอโซนและเก็บน้ำเสียทุกๆ 30 นาที ปริมาณ 250 ml จากนั้นนำไปวิเคราะห์ หาค่าพีเอช, สี, ความขุ่น, และค่าซีโอดี

3.7.2.2 ทำจนครบ 3 ระดับ ความเข้มข้นของ COD คือ 250 mg/l, 500 mg/l, 1000 mg/l

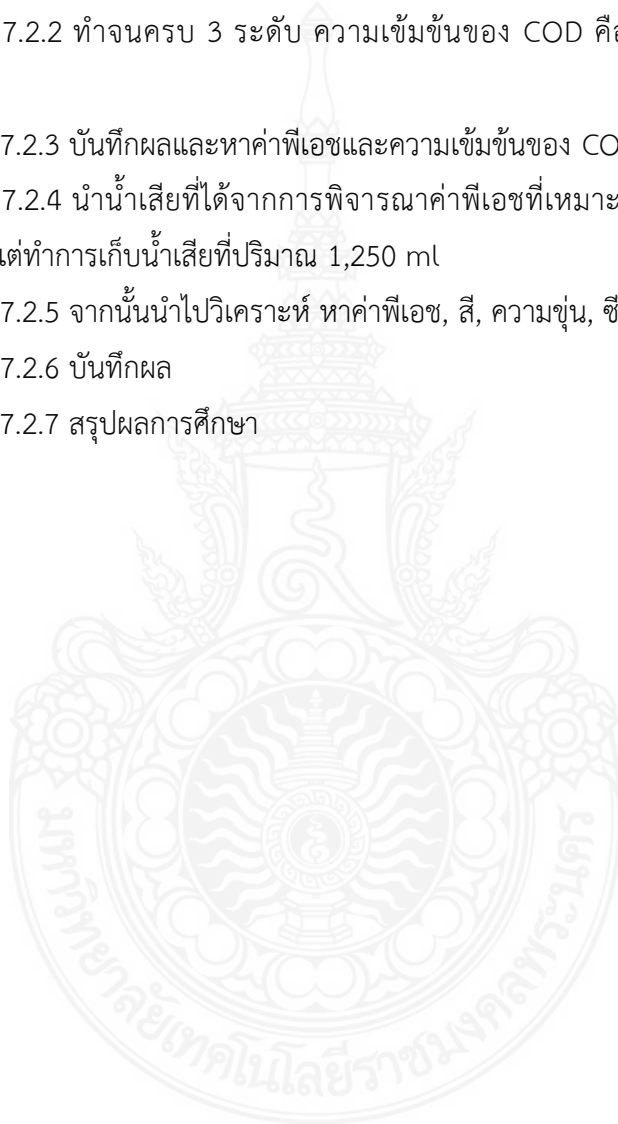
3.7.2.3 บันทึกผลและหาค่าพีเอชและความเข้มข้นของ COD ที่เหมาะสมที่สุด

3.7.2.4 นำน้ำเสียที่ได้จากการพิจารณาค่าพีเอชที่เหมาะสม มาทำการเป่า ozone แบบเดิมอีกครั้ง แต่ทำการเก็บน้ำเสียที่ปริมาณ 1,250 ml

3.7.2.5 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ หาค่าพีเอช, สี, ความขุ่น, ซีโอดี ,และบีโอดี

3.7.2.6 บันทึกผล

3.7.2.7 สรุปผลการศึกษา



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนออกไซด์ เพื่อแก้ไขปัญหาน้ำเสียจากโรงงานสีย้อมผ้าที่ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียที่ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการบำบัดน้ำเสียให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยอาศัยโอโซนที่เป็นสารออกซิไดซ์เชิงเอเจนต์ที่แรงร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งโอโซนสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีโครงสร้างซับซ้อนน้อยลงได้ ส่วนสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารออกซิไดซ์เชิงเอเจนต์ที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ โดยตรวจวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ แบ่งเป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำด้านกายภาพ ได้แก่ สี, ความขุ่น และดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำด้านเคมี ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าซีไอดี และค่าบีไอดี ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้แม่สีชนิดเดียวกับโรงฟอกย้อมพบว่าตัวอย่างน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้น มีค่าเกินกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2560 ทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ ประกอบด้วย ค่าพีเอช ค่าสี ค่าความขุ่น 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. ความขุ่น (NTU)	66.84	ไม่เกิน 50 **
4. ซีไอดี (mg/L)	1,000	ไม่เกิน 120
5. บีไอดี (mg/L)	180	ไม่เกิน 20

หมายเหตุ * มาตรฐานควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงาน ** มาตรฐานควบคุมคุณภาพน้ำบาดาล

ที่มา : กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2559)

4.2 การเติมปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

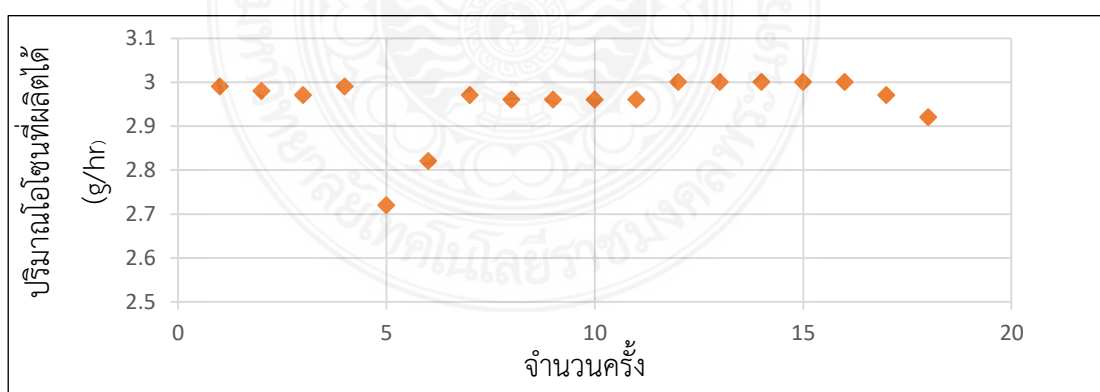
จากการศึกษาแนวทางการเติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 50 % โดยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 ml มีปริมาณสารเทียบเท่ากับ 0.5 g มีการวัดอัตราส่วนปริมาณการเติมดังตาราง 4.2

ตาราง 4.2 อัตราส่วนการเติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

อัตราส่วนการเติมสาร H ₂ O ₂ (g)	ปริมาณการเติมสาร H ₂ O ₂ ต่อ น้ำ 1 ลิตร (ml/l)
2	4
4	8
6	12

4.3 โอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน (Ozone Generator)

ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซนจะแตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ ดังนั้น จึงต้องทำการทดลองหาปริมาณโอโซนก่อนทำการทดลองทุกครั้งโดยใช้วิธี Wet Chemistry Method โดยทำการเป่าโอโซนลงไปในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ครั้งละ 10 นาที พบว่า เครื่องโอโซนที่ใช้ในการทดลองสามารถผลิตโอโซนได้ในปริมาณใกล้เคียงกัน โดยโอโซนที่ผลิตได้จะอยู่ในช่วง 2.72-3.00 mg/hr คิดเป็นปริมาณโอโซนเฉลี่ยเท่ากับ 2.94 mg/hr ซึ่งปริมาณโอโซนที่ได้จากการทดลองแสดงดังภาพ 4.1



ภาพ 4.1 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ในแต่ละครั้งของการทดลอง

4.3.1 ผลการทดลองของอัตราการผลิตโอโซนต่อปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยา

จากการทดลองในแต่ละครั้งจะมีโอโซนบางส่วนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาหลุดออกมาจากถังทำปฏิกิริยาโดยจะดักจับโอโซนด้วยชุดดักจับโอโซนที่มีสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ความเข้มข้น 2 % จำนวน 2 ชุด เชื่อมต่อระหว่างชุดถังทำปฏิกิริยา เพื่อหาปริมาณโอโซนส่วนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยา (Ozone offgas) จากกระบวนการโอโซน ที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 พบว่าโอโซนส่วนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 0.27, 0.82 และ 0.05 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ pH 3, pH 7 และ pH 11 ซึ่งมีปริมาณสารไฮโดรเจนที่แตกต่างกัน พบว่าโอโซนส่วนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาของปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4 ml/l มีค่าเท่ากับ 0.35, 0.01 และ 0.00 ที่ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8 ml/l มีค่าเท่ากับ 0.22, 0.03 และ 0.00 ที่ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 12 ml/l มีค่าเท่ากับ 0.38, 0.89 และ 0.00 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.3 และ 4.4

ตาราง 4.3 ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาจากกระบวนการโอโซน

ค่า pH	ระยะเวลาในการเติมโอโซน 120 นาที	
	อัตราการผลิตโอโซนของเครื่องผลิตโอโซน (g/hr)	ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยา(g/hr)
pH 3	2.99	0.27
pH 7	2.97	0.82
pH 11	2.98	0.05

ตาราง 4.4 ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำปฏิกิริยาจากกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ค่า pH ที่ทำการศึกษาร่วมกับ ความเข้มข้นของ ปริมาณ H ₂ O ₂	ระยะเวลาในการเติมโอโซน 120 นาที	
	อัตราการผลิตโอโซนของเครื่องผลิต โอโซน (g/hr)	ปริมาณโอโซนที่ไม่เข้าทำ ปฏิกิริยา (g/hr)
ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 4 มิลลิลิตรต่อลิตร		
pH 3	2.99	0.35
pH 7	3.00	2.96
pH 11	2.96	0.00
ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 8 มิลลิลิตรต่อลิตร		
pH 3	2.82	0.22
pH 7	3.00	0.03
pH 11	2.97	0.00
ปริมาณสาร H ₂ O ₂ 12 มิลลิลิตรต่อลิตร		
pH 3	2.96	0.38
pH 7	2.96	0.89
pH 11	3.00	0.00

4.4 ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน

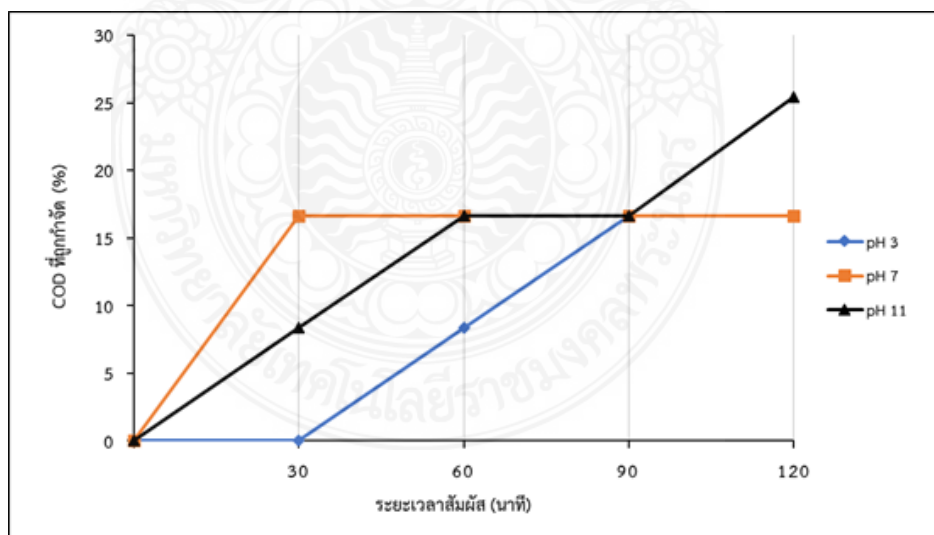
จากการศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน โดยหาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD และสี ในน้ำเสียที่ได้จากการสังเคราะห์ให้มีค่าความสกปรกใกล้เคียงกับโรงงานฟอกย้อม ได้แก่ ค่า pH ของน้ำ ค่าความเข้มข้นของ COD เริ่มต้น ระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน และปริมาณโอโซนที่เข้าทำปฏิกิริยา

4.4.1 ปัจจัยของค่า pH ที่มีผลต่อกระบวนการโอโซน

จากการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซน พบว่า pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุด โดย pH 7 และ pH 3 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมาในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 25.4, 16.6 และ 16.6 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.5 และภาพ 4.2

ตาราง 4.5 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน

ค่า pH	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (COD เริ่มต้น 240 mg/l)	0.0	0.0	8.3	16.6	16.6
pH 7 (COD เริ่มต้น 240 mg/l)	0.0	16.0	16.6	16.6	16.6
pH 11 (COD เริ่มต้น 240 mg/l)	0.0	8.3	16.6	16.6	25.4



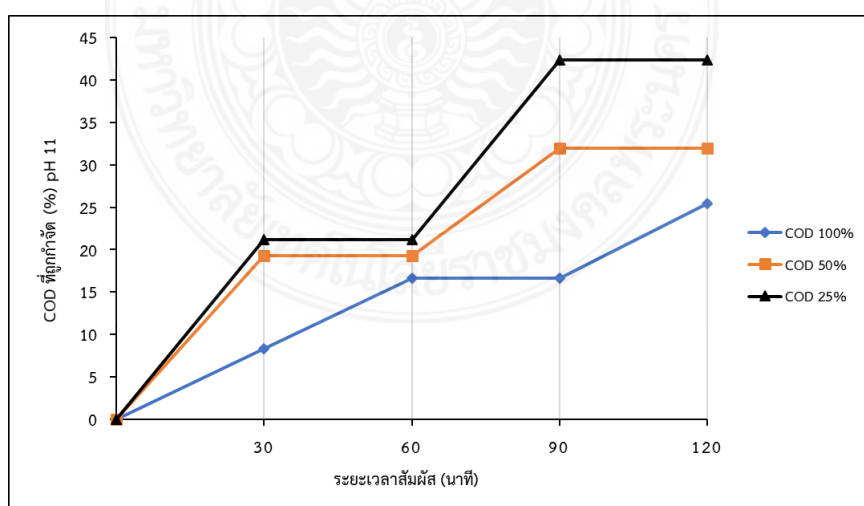
ภาพ 4.2 การศึกษาหาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน

4.4.2 ปัจจัยของความเข้มข้น COD เริ่มต้นที่มีผลต่อกระบวนการโอโซน

จากการทดลองหาค่า COD เริ่มต้นที่ใช้ในการบำบัด ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซนในค่า pH ที่เหมาะสม คือ pH 11 ที่ความเข้มข้น COD เริ่มต้น 1,000 500 และ 250 mg/l พบว่าค่าความเข้มข้นของ COD เริ่มต้น ที่ 250 mg/l มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด โดยความเข้มข้น 1,000 และ 500 mg/l เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพการบำบัดรองลงมา ในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 42.4, 32.0 และ 25.1 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.6 และภาพ 4.3

ตาราง 4.6 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนที่ pH 11

ค่า COD เริ่มต้น	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
100% (COD เริ่มต้น 240 mg/l)	0.0	8.3	16.6	16.6	25.1
50% (COD เริ่มต้น 197 mg/l)	0.0	19.3	19.3	32.0	32.0
25% (COD เริ่มต้น 170 mg/l)	0.0	21.	21.2	42.4	42.4



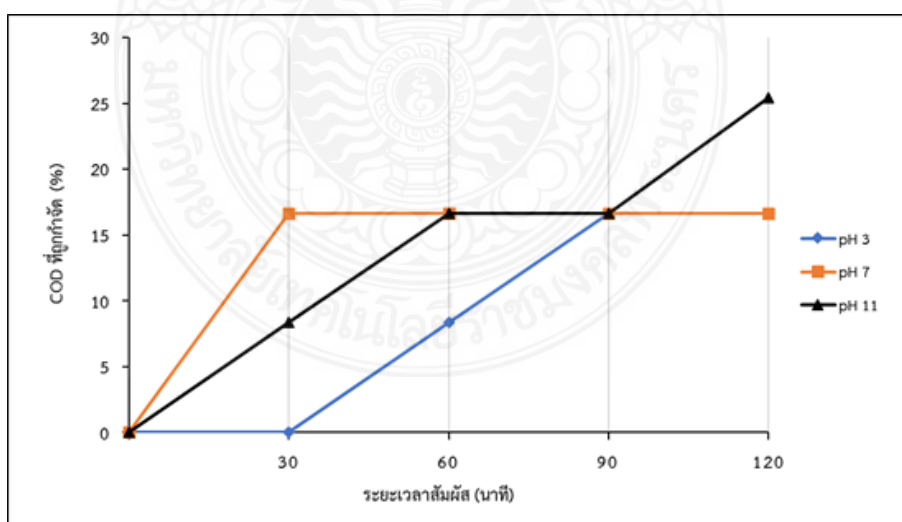
ภาพ 4.3 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนที่ pH 11

4.4.3 ปัจจัยของระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่มีผลต่อกระบวนการโอโซน

จากการทดลองหาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการโอโซน พบว่าเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลในประสิทธิภาพในการลดค่า COD เพิ่มขึ้นโดย pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้ดีที่สุดใน pH 7 และ pH 3 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมา ดังแสดงในตาราง 4.7 และภาพ 4.4

ตาราง 4.7 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD น้ำสีย้อมผ้า ด้วยกระบวนการโอโซน

ค่า pH	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (COD เริ่มต้น 240 mg/l)	0.0	0.0	8.3	16.6	16.6
pH 7 (COD เริ่มต้น 240 mg/l)	0.0	16.6	16.6	16.6	16.6
pH 11 (COD เริ่มต้น 240 mg/l)	0.0	8.3	16.6	16.6	25.4



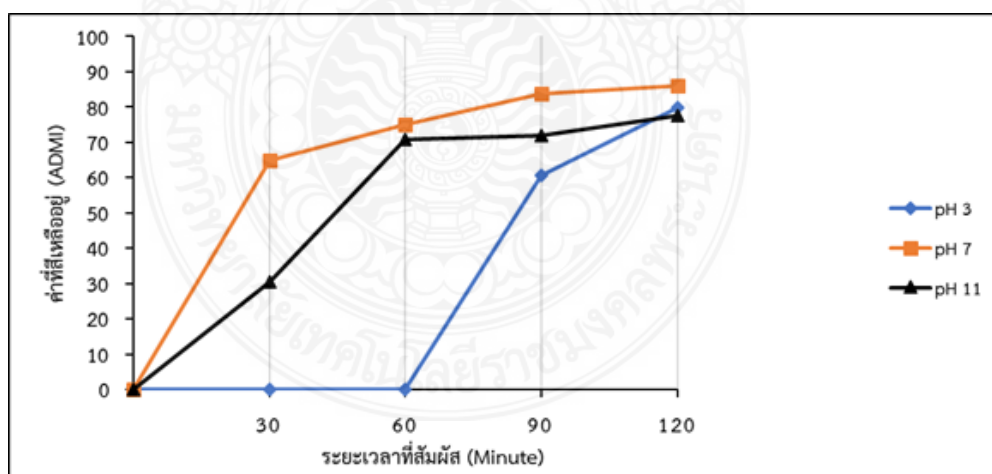
ภาพ 4.4 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำสีด้วยกระบวนการโอโซน

4.4.4 อัตราการลดสีในน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซน

ผลการทดลองความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำสีย้อมผ้าที่บำบัดด้วยกระบวนการโอโซน ในระยะเวลาเต็มโอโซน 120 นาที ที่สภาวะ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าสีรองลงมา คือ pH 11 และ pH 3 คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 86.0, 77.6 และ 79.8 ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.8 และภาพ 4.5

ตาราง 4.8 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน

ค่า pH	สีที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (สีเริ่มต้น 550 ADMI)	0.0	0.0	0.0	60.7	79.8
pH 7 (สีเริ่มต้น 550 ADMI)	0.0	64.9	74.7	83.8	86.0
pH 11 (สีเริ่มต้น 550 ADMI)	0.0	30.4	70.7	72.0	77.6



ภาพ 4.5 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน

4.5 ประสิทธิภาพการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

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

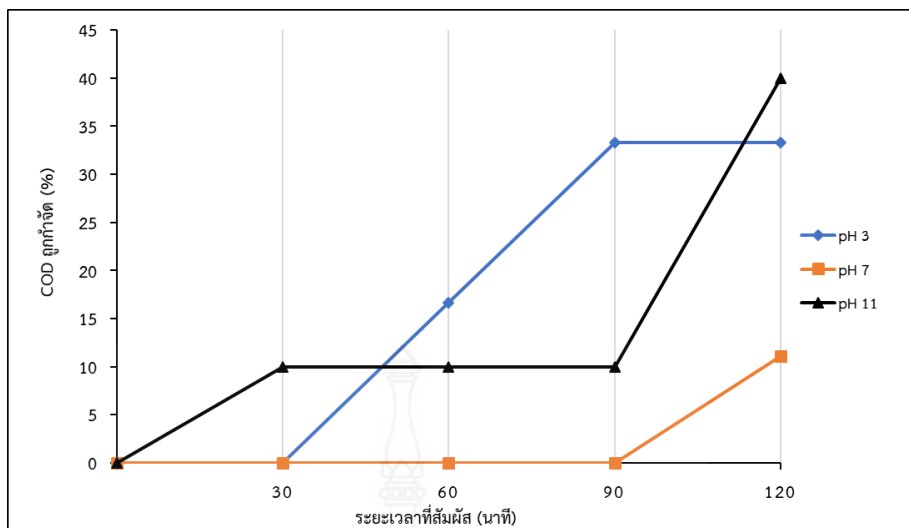
4.5.1 ปัจจัยของค่าพีเอชที่มีผลต่อกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.5.1.1 ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4 ml/l

จากการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โอโซนปริมาณ 4 ml/l พบว่า pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้ดีที่สุด โดย pH 3 และ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมาในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 40.0, 33.3 และ 11.1 ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.9 และภาพ 4.6

ตาราง 4.9 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H₂O₂ 4 ml

ค่า pH	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (COD เริ่มต้น 201.6 mg/l)	0.0	0.0	16.6	33.3	33.3
pH 7 (COD เริ่มต้น 302.4 mg/l)	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1
pH 11 (COD เริ่มต้น 168 mg/l)	0.0	10.0	10.0	10.0	40.0



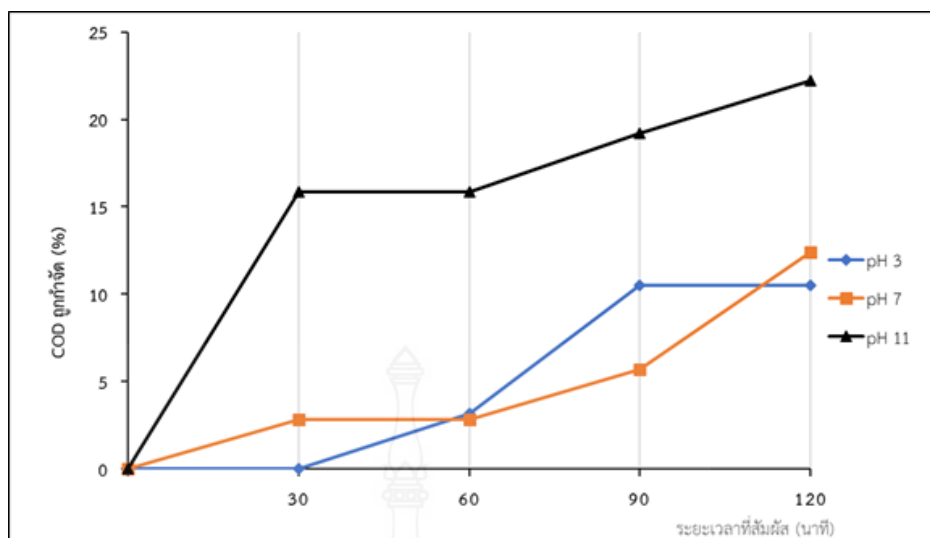
ภาพ 4.6 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 4 ml

4.5.1.2 ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8 ml/l

จากการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณสาร 8 ml/l พบว่า pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุด โดย pH 7 และ pH 3 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมาในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 22.2, 12.4 และ 10.5 ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.10 และภาพ 4.7

ตาราง 4.10 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H_2O_2 8 ml

ค่า pH	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (COD เริ่มต้น 319.2 mg/l)	0.0	0.0	3.1	10.5	10.5
pH 7 (COD เริ่มต้น 352.8 mg/l)	0.0	2.8	2.8	5.7	12.4
pH 11 (COD เริ่มต้น 299.4 mg/l)	0.0	15.8	15.8	19.2	22.2



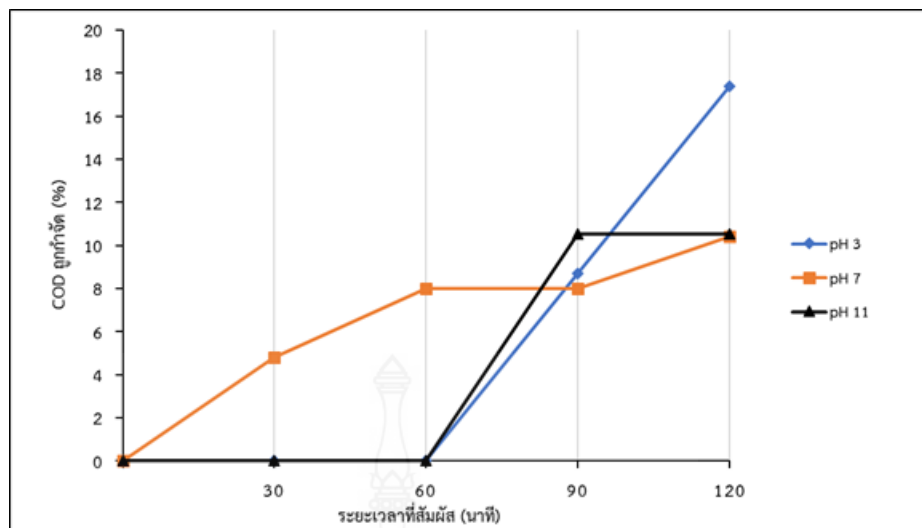
ภาพ 4.7 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 8 ml

4.5.1.3 ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 12 ml/l

จากการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณสาร 12 ml /l พบว่า pH 3 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้ดีที่สุดในค่าที่ทดสอบ โดย pH 11 และ pH7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมาในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 17.4, 10.5 และ 10.4 ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.11 และภาพ 4.8

ตาราง 4.11 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณสาร H_2O_2 12 ml

ค่า pH	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (COD เริ่มต้น 386.4 mg/l)	0.0	0.0	0.0	8.7	17.4
pH 7 (COD เริ่มต้น 420 mg/l)	0.0	4.8	8.0	8.0	10.4
pH 11 (COD เริ่มต้น 319.2 mg/l)	0.0	0.0	0.0	10.5	10.5



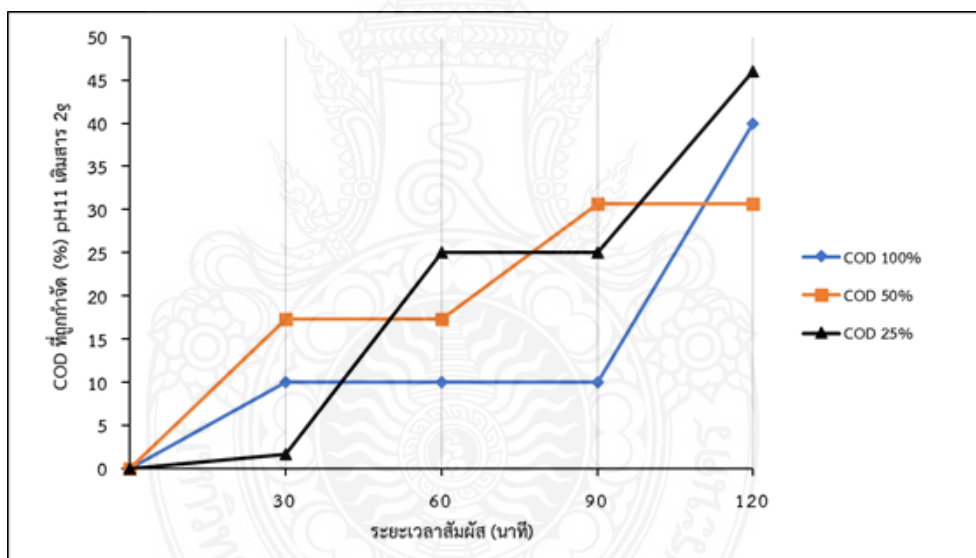
ภาพ 4.8 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 12 ml

4.5.2 ปัจจัยของความเข้มข้น COD เริ่มต้นที่มีผลต่อกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากการทดลองหาค่า COD เริ่มต้นที่ใช้ในการบำบัด ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 12 ml/L ในค่า pH ที่เหมาะสม คือ pH 11 ซึ่งเป็นสถานะที่ดีที่สุดในการบำบัด ในความเข้มข้น COD เริ่มต้น 1,000, 500 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่าความเข้มข้นของ COD เริ่มต้น ที่ 250 mg/L มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด โดยความเข้มข้น 1,000 และ 500 ml/L เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพการบำบัดรองลงมา ในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 46.0, 40.0 และ 30.7 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.12 และภาพ 4.9

ตาราง 4.12 การศึกษาค่าความเข้มข้น COD เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ pH 11

ค่า COD เริ่มต้น	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
100% (COD เริ่มต้น 168 mg/l)	0.0	10.0	10.0	10.0	40.0
50% (COD เริ่มต้น 288 mg/l)	0.0	17.3	17.3	30.7	30.7
25% (COD เริ่มต้น 230.4 mg/l)	0.0	1.6	25.0	25.0	46.0



ภาพ 4.9 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำสีขมผ้าด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4 ml

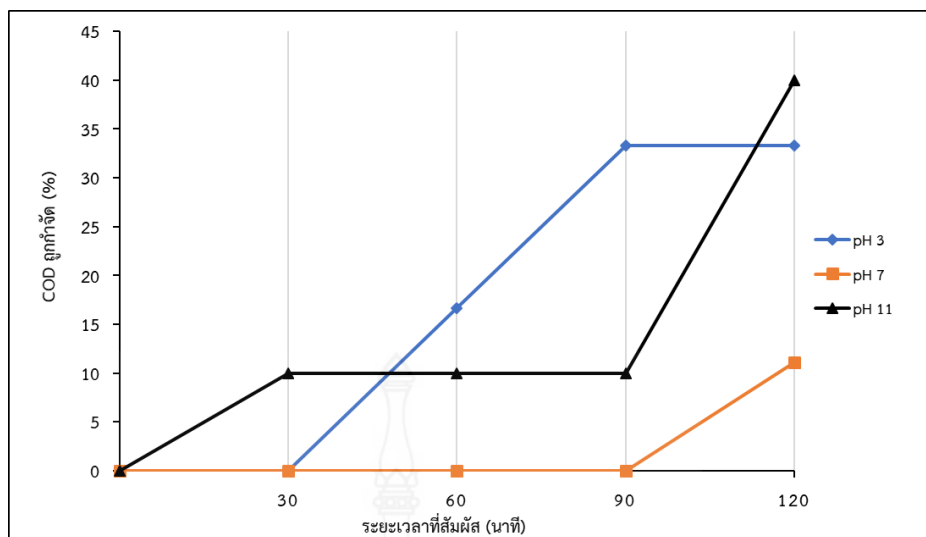
4.5.3 ปัจจัยของระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่มีผลต่อกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.5.3.1 ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4 ml/l

จากการทดลองหาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 4 ml/l พบว่าเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลในประสิทธิภาพในการลดค่า COD เพิ่มขึ้นโดย pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุดซึ่ง pH 3 และ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมา ดังแสดงในตาราง 4.13 และภาพ 4.10

ตาราง 4.13 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสีย ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H₂O₂ 4 ml

ค่า pH	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (COD เริ่มต้น 201.6 mg/l)	0.0	0.0	16.6	33.3	33.3
pH 7 (COD เริ่มต้น 302.4 mg/l)	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1
pH 11 (COD เริ่มต้น 168 mg/l)	0.0	10.0	10.0	10.0	40.0



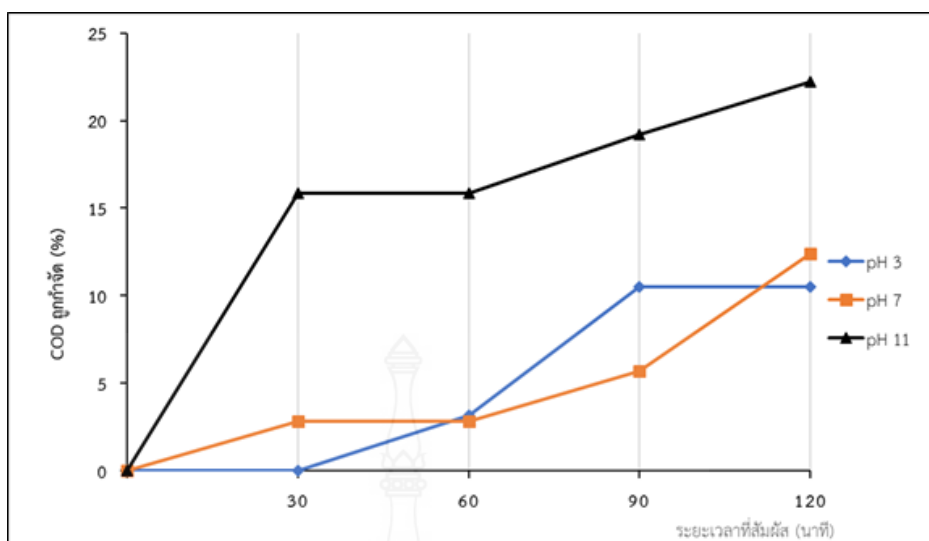
ภาพ 4.10 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 4 ml

4.5.3.2 ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8 ml/l

จากการทดลองหาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 8 ml/l พบว่าเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลในประสิทธิภาพในการลดค่า COD เพิ่มขึ้นโดย pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้ดีที่สุด ซึ่ง pH 7 และ pH 3 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมา ดังแสดงในตาราง 4.14 และภาพ 4.11

ตาราง 4.14 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H_2O_2 8 ml

ค่า pH	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (COD เริ่มต้น 319.2 mg/l)	0.0	0.0	3.1	10.5	10.5
pH 7 (COD เริ่มต้น 352.8 mg/l)	0.0	2.8	2.8	5.7	12.4
pH 11 (COD เริ่มต้น 299.4 mg/l)	0.0	15.8	15.8	19.2	22.2



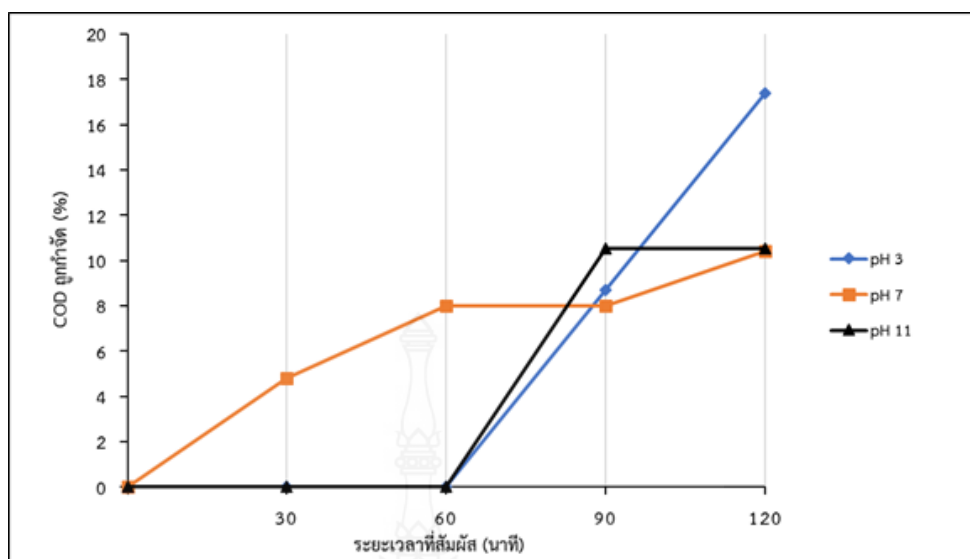
ภาพ 4.11 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 8 ml

4.5.3.3 ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 12 ml/l

จากการทดลองหาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน ต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 12 ml/l พบว่าเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลในประสิทธิภาพในการลดค่า COD เพิ่มขึ้นโดย pH 3 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้ดีที่สุด ซึ่ง pH 11 และ pH7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมา ดังแสดงในตาราง 4.15 และภาพ 4.12

ตาราง 4.15 การศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดค่า COD ของน้ำเสีย ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H_2O_2 12 ml

ค่า pH	COD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (COD เริ่มต้น 386.4 mg/l)	0.0	0.0	0.0	8.7	17.4
pH 7 (COD เริ่มต้น 420 mg/l)	0.0	4.8	8.0	8.0	10.4
pH 11 (COD เริ่มต้น 319.2 mg/l)	0.0	0.0	0.0	10.5	10.5



ภาพ 4.12 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD ของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใน 12 ml

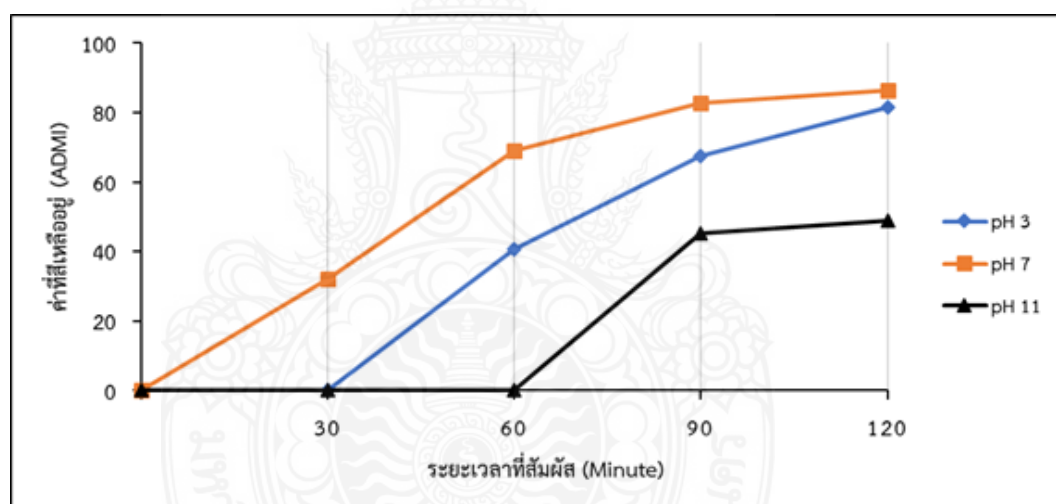
4.5.4 อัตราการลดสีในน้ำสีฟอกย้อมด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.5.4.1 ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4 ml/l

ผลการทดลองความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมที่บำบัดด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 4 ml/l ในระยะเวลาเต็มโอโซน 120 นาที ที่สภาวะ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าสี รองลงมา คือ pH 3 และ pH 11 คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 86.5, 81.6 และ 48.9 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.16 และภาพ 4.13

ตาราง 4.16 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H_2O_2 4 ml

ค่า pH	สีที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (550 ADMI)	0.0	0.0	40.7	67.5	81.6
pH 7 (473 ADMI)	0.0	32.1	68.9	82.6	86.5
pH 11 (550 ADMI)	0.0	0.0	0.0	45.3	48.9



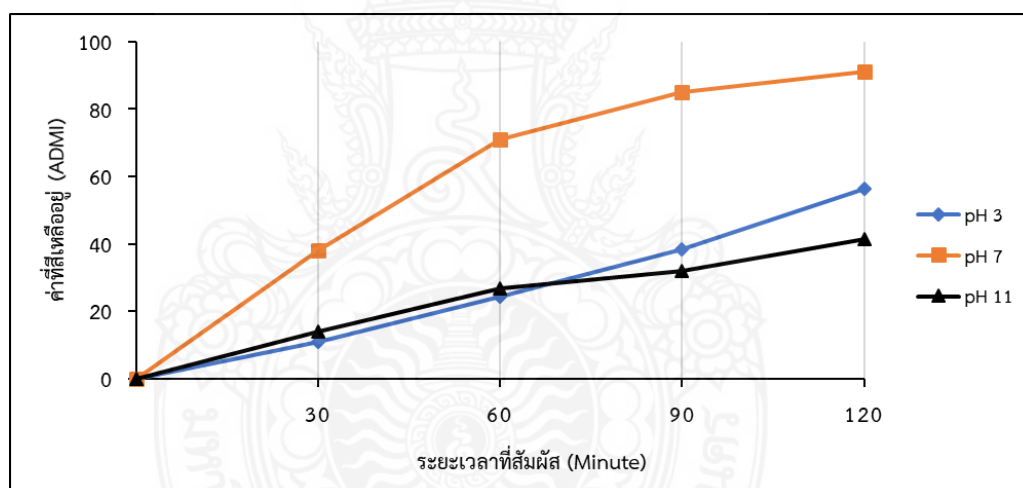
ภาพ 4.13 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H_2O_2 4 ml

4.5.4.2 ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8 ml/l

ผลการทดลองความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมที่บำบัดด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 8 ml/l ในระยะเวลาเต็มโอโซน 120 นาที ที่สภาวะ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าสีรองลงมา คือ pH 3 และ pH 11 คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 91.2, 56.4 และ 41.3 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.17 และภาพ 4.14

ตาราง 4.14 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H_2O_2 8 ml

ค่า pH	สีที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (473 ADMI)	0.0	10.9	24.3	38.3	56.4
pH 7 (433 ADMI)	0.0	38.1	71.1	84.9	91.2
pH 11 (550 ADMI)	0.0	14.0	26.7	31.8	41.3



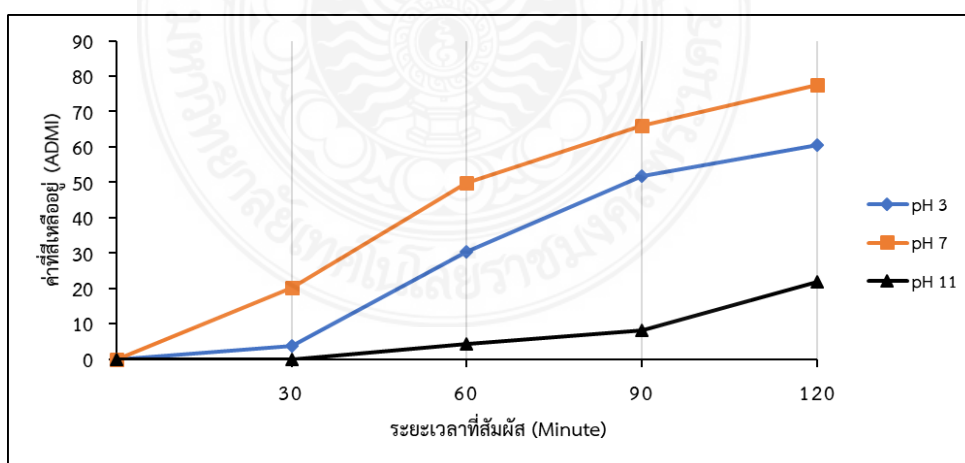
ภาพ 4.14 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H_2O_2 8 ml

4.5.4.3 ปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 12 ml/l

ผลการทดลองความเปลี่ยนแปลงของสีในน้ำเสียจากสีฟอกย้อมที่บำบัดด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 12 ml/l ในระยะเวลาเต็มโอโซน 120 นาที ที่สภาวะ pH 7 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่าสีรองลงมา คือ pH 3 และ pH 11 คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 77.6, 60.6 และ 21.8 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.18 และภาพ 4.15

ตาราง 4.18 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H₂O₂ 12 ml

ค่า pH	สีที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3 (518 ADMI)	0.0	3.7	30.3	51.7	60.6
pH 7 (411 ADMI)	0.0	20.2	49.9	65.9	77.6
pH 11 (500 ADMI)	0.0	0.0	4.4	8.2	21.8



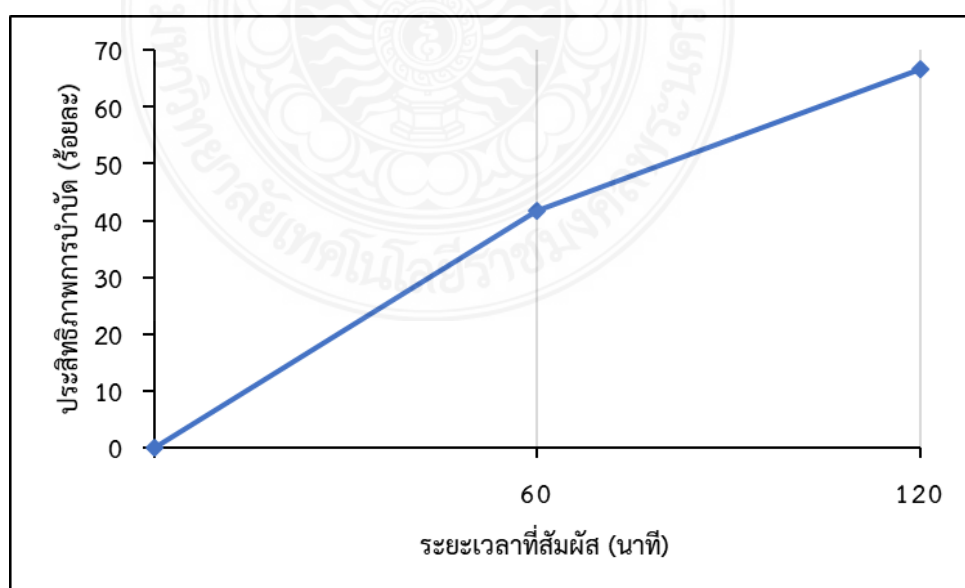
ภาพ 4.15 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดสีของน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณสาร H₂O₂ 12 ml

4.6 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ในสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซน

จากการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซน โดยนำสีย้อมผ้าที่สังเคราะห์ขึ้นซึ่งมีค่า BOD 180 mg/l และหลังตกตะกอนเคมีซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นก่อนการบำบัด พบว่ามีค่า BOD เท่ากับ 24.0 mg/l โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพเพื่อกำจัดสีปรากฏที่อยู่ในน้ำ พบว่ามีค่า BOD 24.0 mg/l ที่เป็นค่าเริ่มต้นก่อนการบำบัด โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ในค่า pH ที่เหมาะสม คือ pH 11 ที่ความเข้มข้น COD เริ่มต้น 250 mg/l ซึ่งเป็นสถานะที่ดีที่สุดในการบำบัด ระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 60 นาที สามารถลดค่า BOD ได้เท่ากับ 14.0 และ 8.0 mg/l ในช่วงเวลา 60 และ 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 41.66 และ 66.66 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.19 และภาพ 4.16

ตาราง 4.19 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการโอโซน ที่ pH 11

ค่า pH	BOD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัด ในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)			ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (ร้อยละ)
	0 นาที	60 นาที	120 นาที	
pH 11 (BOD เริ่มต้น 24 mg/l)	0	41.66	66.66	66.66



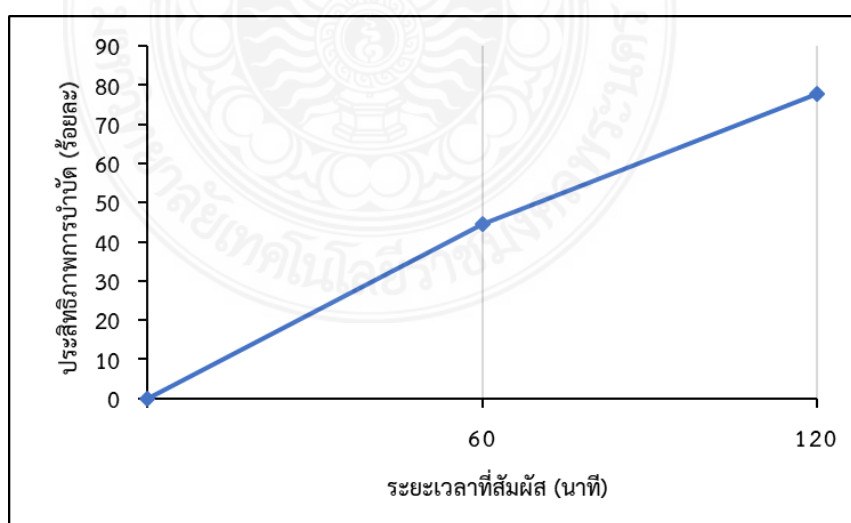
ภาพ 4.16 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการโอโซน ที่ pH 11

4.7 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ในสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยน้ำสีย้อมผ้าที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่า BOD 180 mg/l และหลังตกตะกอนเคมีเพื่อกำจัดสีปรากฏที่อยู่ในน้ำ พบว่ามีค่า BOD 27 mg/l ที่เป็นค่าเริ่มต้นก่อนการบำบัด โดยทำศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่า BOD ในค่า pH ที่เหมาะสม คือ pH 11 ที่ความเข้มข้น COD เริ่มต้น 250 mg/l ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการบำบัด ระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 60 นาที สามารถลดค่า BOD ได้เท่ากับ 15 และ 6.06 mg/l ในช่วงเวลา 60 และ 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 44.44 และ 77.77 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.20 และภาพ 4.17

ตาราง 4.20 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ pH 11

ค่า pH	BOD ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัด ในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)			ประสิทธิภาพ ในการบำบัด (ร้อยละ)
	0 นาที	60 นาที	120 นาที	
pH 11 (BOD เริ่มต้น 27 mg/l)	0	44.44	77.77	77.77



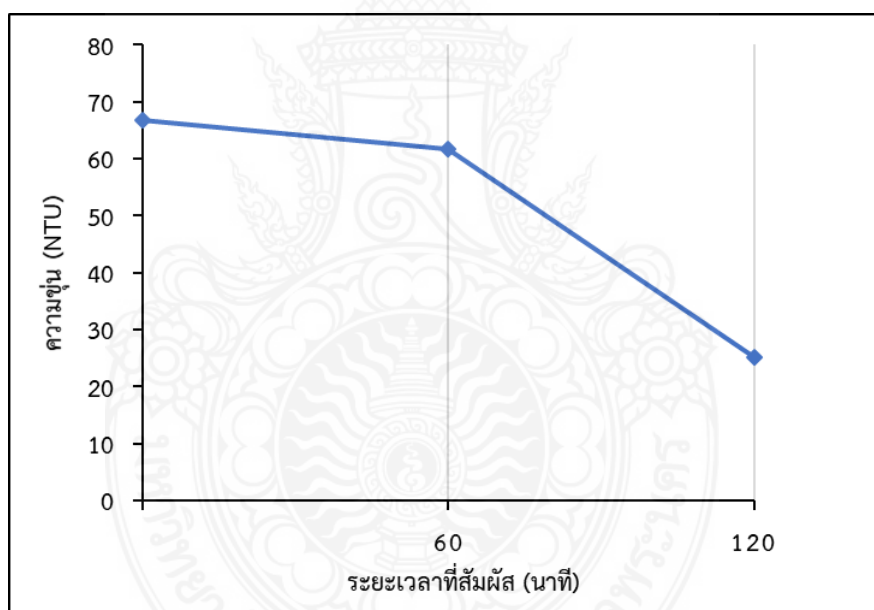
ภาพ 4.17 ประสิทธิภาพการลดค่า BOD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ pH 11

4.8 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ในสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซน

จากการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซน ยังพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเติมโอโซนเพิ่มมากขึ้น ความขุ่นของน้ำสีย้อมผ้าจะลดตามลำดับ เกิดจากกระบวนการโอโซนซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดอนินทรีย์จึงมีผลให้ค่าความขุ่นของน้ำสีย้อมผ้าผ่านกระบวนการโอโซน ดังแสดงในตารางที่ 4.21 และภาพที่ 4.18

ตาราง 4.21 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ด้วยกระบวนการโอโซน ที่ pH 11

ค่า pH	ความขุ่นที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)		
	0 นาที	60 นาที	120 นาที
pH 11 (NTU)	66.84	61.64	25.19



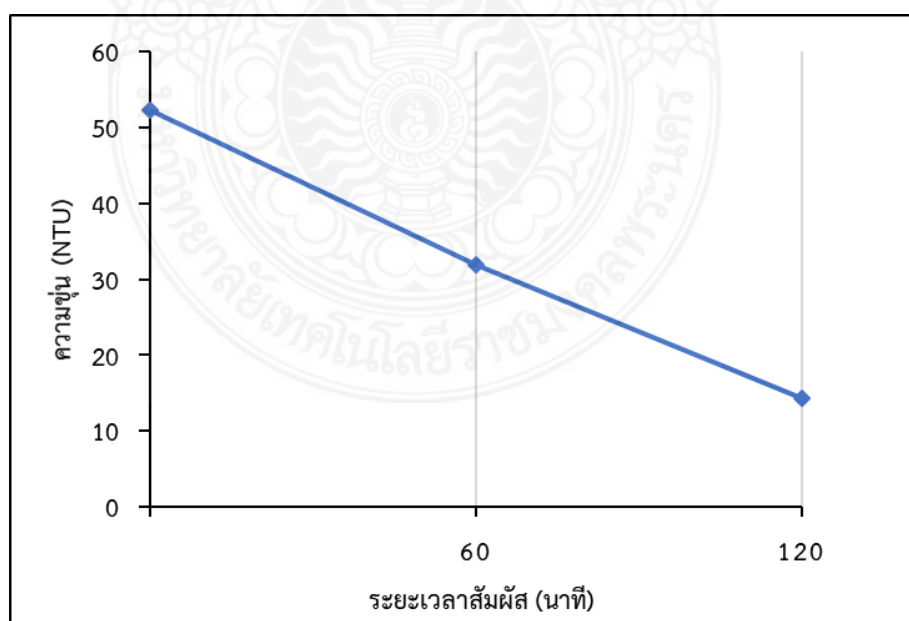
ภาพ 4.18 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ด้วยกระบวนการโอโซน ที่ pH 11

4.9 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ในสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ยังพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเติมโอโซนกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ความขุ่นของน้ำสีย้อมผ้าจะลดตามลำดับ เกิดจากกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดอินทรีย์และเป็นสารออกซิไดซิงเอเจนต์ที่แรง จึงมีผลให้ค่าความขุ่นของน้ำสีย้อมผ้าผ่านกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงในตาราง 4.22 และภาพ 4.19

ตาราง 4.22 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ pH 11

ค่า pH	ความขุ่น ที่ถูกกำจัดหลังจากผ่านการบำบัดในระยะเวลาต่างๆ (ร้อยละ)		
	0 นาที	60 นาที	120 นาที
pH 11 (NTU)	52.19	31.94	14.29



ภาพ 4.19 ประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ pH 11

4.10 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการโอโซน

จากการทดลองพบว่าปริมาณโอโซน 1 g สามารถกำจัด COD ได้ 12.65 mg/l ด้วยปริมาณโอโซน 5.96 g ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดมีค่าเฉลี่ยที่ 0.0496 g/min ต่อน้ำสีย้อมผ้า 7 l ดังแสดงตาราง 4.23

ตาราง 4.23 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโอโซน

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
0	0.0	0.0	0.0
30	1.49	36.0	24.16
60	2.98	36.0	12.08
90	4.47	72.0	16.10
120	5.96	72.0	12.65

4.11 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัด COD ด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากการทดลองพบว่าปริมาณโอโซน 1 g สามารถกำจัด COD ได้ 17.90 mg/l ด้วยปริมาณโอโซน 5.92 g ร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 4 ml/l ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดมีค่าเฉลี่ยที่ 0.0493 g/min ต่อน้ำสีย้อมผ้า 7 l ดังแสดงในตาราง 4.24

ตาราง 4.24 ปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/l)	อัตราส่วนการบำบัด
0	0.0	0.0	0.0
30	1.48	3.84	2.59
60	2.96	57.6	19.45
90	4.44	57.6	12.97
120	5.92	106.0	17.90

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเปรียบเทียบกับกระบวนการโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการบำบัด ซึ่งประกอบด้วย พีเอช ระยะเวลาสัมผัสโอโซน และความเข้มข้นเริ่มต้นของ COD และปริมาณการเติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าหลังจากการนำน้ำที่ใช้ในการทดลองมาตกตะกอนทางเคมีแล้วนำมาบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนและกระบวนการโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าที่พีเอช 11 ของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสาร H_2O_2 และเติมสาร H_2O_2 ปริมาณ 4 มิลลิลิตรต่อลิตร ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที สามารถลดค่า COD ได้ดีที่สุดในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมก่อนการบำบัดมีค่า COD เริ่มต้นจริงเท่ากับ 230 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการบำบัดแล้วค่า COD จะลดลงเหลือ 124 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการกำจัด COD 96 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของซีโอดีเริ่มต้นที่สูงขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง ซึ่งผลทดลองสามารถบำบัดซีโอดีได้สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 46 ทั้งนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น เป็น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีลดลงเหลือร้อยละ 30.7 และ 40 ตามลำดับ

สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดสีด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ พีเอช 7 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดและตามด้วย พีเอช 3 และ พีเอช 11 ตามลำดับ นอกจากนี้ในการบำบัดความขุ่นและบีโอดีจะมีแนวโน้มการลดลงของค่าความสกปรกเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป จากผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีข้อเสนอแนะสำหรับผู้ที่ต้องการทำการศึกษาเพิ่มเติมในแง่ต่าง ๆ ในครั้งต่อไปดังนี้

- 5.2.1 ศึกษาปัจจัยของลักษณะอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ที่มีผลต่อการผลิตโอโซน
- 5.2.2 ศึกษาการกำจัดสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือจากการบำบัดด้วยโอโซน
- 5.2.3 ศึกษาการเปลี่ยนสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนเป็นสารชนิดอื่นให้มีความหลากหลาย
- 5.2.4 ศึกษาระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนให้นานขึ้นและเก็บตัวอย่างน้ำให้มีความถี่มากขึ้น

เช่น เก็บทุก 15 นาที เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2560. **มาตรฐานควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงาน.** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.pcd.go.th/water04.html>. 25 กุมภาพันธ์ 2563.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. **สีย้อมในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://infofile.pcd.go.th/water/water_fokyom.pdf, 3 ธันวาคม 2562
- กุนทรหายน ยามิรุเตง 2551. “การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดย **โอโซนเนชั่น.**” ปรินูญานิพนธ์. (ภาควิชาวิศวกรรมโยธา). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชนิษฐา ภูมิจักร. 2550. **สีของน้ำทิ้ง.** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.tpa.or.th>, 29 พฤศจิกายน 2562
- ดวงตา กิจแก้ว. 2546 “การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. (เทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม). สิ่งแวดล้อมและทรัพยากร. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- นวพรรษ ลักษณะานูรักษ์. 2545. “การบำบัดน้ำชะมูลฝอยขั้นต้นด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น.” ปรินูญวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. (ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม). คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นัดดา เวชกุล. 2555. **การสร้างไฮดรอกซิลเรดิคอลล.** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/269_25-30.pdf
- นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์. 2555. **การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ปิยะวิทย์ ทิพรส. 2551. **โอโซน.** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.dpu.ac.th/dpurc/assets/uploads/magazine/3pzbp2agxyc40w.pdf>, 24 กุมภาพันธ์ 2563.
- เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ. 2542. “การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกระดาษโดยโอโซนร่วมกับไฮโดรเจน **เปอร์ออกไซด์.**” ปรินูญานิพนธ์. (ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภาณุมาศ พวงแก้ว 2548. “กระบวนการโอโซนเนชั่นในการย่อยสลายฟนอล.” ปรินูญานิพนธ์. (ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- มันสิน ตันทุลเวศม์ 2551. **คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**. 5. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
- มันสิน ตันทุลเวศม์ 2547. **ความขุ่น**. 1. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
- มันสิน ตันทุลเวศม์ 2540. **การบำบัดน้ำเสีย**. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
- ยุพดี วัลย์คุณา. 2541. **การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี**. สถาบันราชภัฏสวนสุนันทา, กรุงเทพฯ
- รัตน์ระพันธ์ แสงพิทักษ์. 2556. “การศึกษาการบำบัดสีและ COD จากโรงงานผลิตกล่องกระดาษลูกฟูกด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น.” ปริญญาทิพนธ์. (ภาควิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ). คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- วนิดา ชูอักษร. 2555. “เทคโนโลยีการกำจัดสี.” **คณะวิทยาศาสตร์**. 17, 2 (กรกฎาคม) : 185
- วรารณณ์ กัลยาเลิศ. 2540 “การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยโอโซน.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. (สาขาวิชาสิ่งแวดล้อม). สาธารณสุขศาสตร์. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ศุภวรรณ นุ่มพล. 2556. “การบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยกระบวนการโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม). คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สุบัณฑิต นิมรัตน์. 2548. **การบำบัดสี**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ
- อรชุดา ชันดีกุล. 2550. “การหาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์โดยกระบวนการโอโซนเนชั่น.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. (ภาควิชาวิศวกรรมเคมี). คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- อรุณี คงดี. 2562. **ประเภทของสีย้อม**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/a_kongdee, 13 ธันวาคม 2562
- อาทิตย์พันธ์ สัยยะนิฐี. **ประโยชน์ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.vali-tech.net/home/article-read.php?ArticleId=7>
- อาลักษณ์ ทิพย์รัตน์. 2561. **กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://dSPACE.lib.buu.ac.th/bitstream/1234567890/3616/1/2563_108.pdf
- Thpanorama. (n.d.) **Hydrogenperoxide**. [Online] Available : <https://th.thpanorama.com/articles/qumica/perxido-de>

ภาคผนวก

ตารางบันทึกผลการทดลอง



ภาคผนวก

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางภาคผนวก 1 แสดงค่าร้อยละการกำจัดซีโอดีของกระบวนการโอโซน

ค่า pH	ค่าร้อยละการกำจัดซีโอดี				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3	0.00	0.00	8.33	16.66	16.66
pH 7	0.00	16.66	16.66	16.66	16.66
pH 11	0.00	8.33	16.66	16.66	25.41

ตารางภาคผนวก 2 แสดงค่าร้อยละการกำจัดซีโอดีของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เติมสาร H_2O_2 ความเข้มข้น 50% ปริมาณ 4 ml/l

ค่า pH	ค่าร้อยละการกำจัดซีโอดี				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3	0.00	0.00	16.66	33.33	33.33
pH 7	0.00	0.00	0.00	0.00	11.11
pH 11	0.00	10.00	10.00	10.00	40.00

ตารางภาคผนวก 3 แสดงค่าร้อยละการกำจัดซีโอดีของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เติมสาร H_2O_2 ความเข้มข้น 50% ปริมาณ 8 ml/

ค่า pH	ค่าร้อยละการกำจัดซีโอดี				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3	0.00	0.00	3.15	10.52	10.52
pH 7	0.00	2.85	2.85	5.71	12.38
pH 11	0.00	15.83	15.83	19.20	22.23

ตารางภาคผนวก 4 แสดงค่าร้อยละการกำจัดซีโอดีของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เติมสาร H_2O_2 ความเข้มข้น 50% ปริมาณ 12 ml/

ค่า pH	ค่าร้อยละการกำจัดซีโอดี				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
pH 3	0.00	0.00	0.00	8.69	17.39
pH 7	0.00	4.80	8.00	8.00	10.40
pH 11	0.00	0.00	0.00	10.52	10.52

ตารางภาคผนวก 5 แสดงค่าร้อยละการกำจัดซีโอดีแต่ละความเข้มข้นของกระบวนการโอโซน

ค่าความเข้มข้นซีโอดี pH 11	ค่าร้อยละการกำจัดซีโอดี				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
1000 mg/l	0.00	8.33	16.66	16.66	25.41
500 mg/l	0.00	19.29	19.29	31.97	31.97
250 mg/l	0.00	21.17	21.17	42.35	42.35

ตารางภาคผนวก 6 แสดงค่าร้อยละการกำจัดซีโอดีแต่ละความเข้มข้นของกระบวนการแอดวานซ์ ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เติมสาร H₂O₂ ความเข้มข้น 50% ปริมาณ 4 ml/l

ค่าความเข้มข้นซีโอดี pH 11	ค่าร้อยละการกำจัดซีโอดี				
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
1000 mg/l	0.00	10.00	10.00	10.00	40.00
500 mg/l	0.00	17.33	17.33	30.66	30.66
250 mg/l	0.00	1.67	25.00	25.00	46.01

ตารางภาคผนวก 7 แสดงค่าร้อยละการกำจัดบีโอดีของกระบวนการโอโซนจากค่า pH และความเข้มข้นที่เหมาะสมกับกระบวนการ

ค่า pH	ค่าร้อยละการกำจัดบีโอดี		
	0 นาที	60 นาที	120 นาที
pH 11	0.00	41.66	66.66

ตารางภาคผนวก 8 แสดงค่าร้อยละการกำจัดบีโอดีของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากค่า pH, ความเข้มข้น และปริมาณการเติมสารที่เหมาะสมกับกระบวนการ

ค่า pH	ค่าร้อยละการกำจัดบีโอดี		
	0 นาที	60 นาที	120 นาที
pH 11	0.00	44.44	77.77

ตารางภาคผนวก 9 แสดงค่าการลดลงของความขุ่นของกระบวนการโอโซนจากค่า pH และความเข้มข้นที่เหมาะสมกับกระบวนการ

ค่า pH	ค่าร้อยละการกำจัดความขุ่น		
	0 นาที	60 นาที	120 นาที
pH 11	66.84	61.64	25.19

ตารางภาคผนวก 10 แสดงค่าการลดลงของความชุ่มของกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วย
โอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากค่า pH และ ความเข้มข้น
ที่เหมาะสมกับกระบวนการ

ค่า pH	ค่าร้อยละการกำจัดความชุ่ม		
	0 นาที	60 นาที	120 นาที
pH 11	52.19	31.94	14.29



ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล นางสาววิญดา สุขสมบุญ
 วัน เดือน ปีเกิด 5 กันยายน 2540
 ภูมิลำเนา เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีการศึกษาที่สำเร็จ
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2562
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนศิลาจารพิพัฒน์	2558
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนวัดมัชฌันติการาม	2554
ประถมศึกษา	โรงเรียนวัดมัชฌันติการาม	2551

ทุนการศึกษา

ทุนสถาบันวิจัยและพัฒนาจากโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ประจำปี
 งบประมาณ 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล นางสาวศิรินันท์ อภิรัมย์

วัน เดือน ปีเกิด 15 พฤษภาคม 2541

ภูมิลำเนา เขตจอมทอง กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีการศึกษาที่สำเร็จ
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2562
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนวันอินทาราม	2558
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนเลิศพัฒนาศึกษา	2554
ประถมศึกษา	โรงเรียนวัดหน้าจวรวิหาร	2551

ทุนการศึกษา

ทุนสถาบันวิจัยและพัฒนาจากโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ประจำปี

งบประมาณ 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล นางสาวฉवलจุฑา ทองอำไพ
 วัน เดือน ปีเกิด 6 เมษายน 2540
 ภูมิลำเนา เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีการศึกษาที่สำเร็จ
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2562
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนวัดราชาธิวาส	2558
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนวัดราชาธิวาส	2554
ประถมศึกษา	โรงเรียนวัดสร้อยทอง	2551

ทุนการศึกษา

ทุนสถาบันวิจัยและพัฒนาจากโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่ ประจำปี
 งบประมาณ 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม



การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Treatment of Fabric dye by Advance Oxidation using Ozone with Hydrogen Peroxide

บทคัดย่อ



ขวัญตา สุขสมบูรณ์ ศิริรัตน์ อภิรมย์ ณวลจุฑา ทองอำไพ กิตติยศ ตั้งสัจจวงศ์
055950202042-8 055950202018-8 055950202035-2 อ.ที่ปรึกษา*

ผลการศึกษา (ต่อ)

การทดลองที่ 1 กระบวนการโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากการทดลองพบว่าปริมาณโอโซน 1 g สามารถกำจัด COD ได้ 17.90 mg/L ด้วยปริมาณโอโซน 5.92 g ร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 4 ml/L ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดมีค่าเฉลี่ยที่ 0.0493 g/min ต่อน้ำเสีย 7 l ดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 1 ปริมาณโอโซนที่ใช้ในการกำจัดซีไอดีที่เหมาะสมต่อการบำบัดกระบวนการโอโซน

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/L)	อัตราส่วนการบำบัด
0	0.0	0.0	0.0
30	1.49	36.0	24.16
60	2.98	36.0	12.08
90	4.47	72.0	16.10
120	5.96	72.0	12.65

ตาราง 2 ปริมาณโอโซนที่ใช้ในการกำจัดซีไอดีที่เหมาะสมต่อการบำบัดกระบวนการโอโซนร่วมกับสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ระยะเวลา (min)	ปริมาณโอโซน (g) ระยะเวลา X ปริมาณโอโซน	COD ที่ถูกกำจัด (mg/L)	อัตราส่วนการบำบัด
0	0.0	0.0	0.0
30	1.48	3.84	2.59
60	2.96	57.6	19.45
90	4.44	57.6	12.97
120	5.92	106.0	17.90



ภาพ 1 ก่อนการบำบัด ภาพ 2 หลังเป่าโอโซนได้ระยะหนึ่ง ภาพ 3 หลังเป่าโอโซนครบ 2 ชม.

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนเปรียบเทียบกับกระบวนการโอโซนร่วมกับสาร H₂O₂ การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการบำบัด ซึ่งประกอบด้วย พีเอช ระยะสัมผัสโอโซน และความเข้มข้นเริ่มต้นของ COD และปริมาณการเติมสาร H₂O₂ พบว่าที่พีเอช 11 และเติมสาร H₂O₂ ปริมาณ 4 ml/L ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที สามารถลดค่า COD ได้ดีที่สุด โดยก่อนการบำบัดมีค่า COD เริ่มต้นจริงเท่ากับ 230 mg/L เมื่อผ่านการบำบัดแล้วค่า COD ลดลงเหลือ 124 mg/L มีการกำจัด COD 96 mg/L นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของซีไอดีเริ่มต้นที่ สูงขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง สำหรับการบำบัดซีไอดีที่ พีเอช 7 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด นอกจากนี้ในการบำบัดความขุ่นและบีโอดีมีแนวโน้มการลดลงของค่าความสกปรกเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันด้วยโอโซนร่วมกับสาร H₂O₂ ทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการบำบัด โดยปรับสภาพน้ำเสียให้มี พีเอช 3, 7 และ 11 เป่าโอโซน 120 min และเติมสาร H₂O₂ ที่ 4, 8 และ 12 ml/L จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี ซึ่งในการทดลองที่ พีเอช 11 ทำการบำบัดโดยใช้โอโซนและเติมสาร H₂O₂ ในปริมาณ 4 ml/L จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีสูงสุด เมื่อเทียบกับพีเอช 3, พีเอช 7 และเมื่อเติมสาร H₂O₂ ในปริมาณที่มากขึ้นก็ไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าความเข้มข้นของซีไอดีเริ่มต้น ที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง ซึ่งจากการทดลองความสามารถในการบำบัดซีไอดีมีค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 46 ที่ค่าความเข้มข้นของซีไอดี มีค่าเท่ากับ 250 mg/L สำหรับการบำบัดซีไอดีที่ พีเอช 7 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจะพบว่าพีเอช 11 สามารถบำบัดได้ทั้งซีไอดีและสี ซึ่งทำให้คุณภาพน้ำทิ้ง ผ่านมาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนด นอกจากนี้ในการบำบัดความขุ่นและบีโอดี พบว่าการลดลงของค่าความสกปรกมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการบำบัดซีไอดี

วิธีการทดลอง

- ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆโดยต่อสายจากเครื่องผลิต ozone มายังชุดกระบอกทดลองที่ทำด้วยท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร สูง 130 เซนติเมตรและต่อสายจากชุดกระบอกทดลองมายังขวดเก็บปริมาณโอโซนส่วนเกิน
- นำน้ำสีสังเคราะห์ปรับ pH และเติมสาร H₂O₂ ตามปริมาณที่ใช้ในกระบวนการ ทำการเทลงในชุดกระบอกทดลองปริมาณ 7,000 ml ทำการเปิดเครื่องโอโซนโดยมีระยะเวลาสัมผัสโอโซน 120 นาที และเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาที ปริมาณ 250 ml จากนั้นนำไปวิเคราะห์ ค่าสีและค่าซีไอดี เพื่อหา pH ที่มีสภาวะเหมาะสมกับกระบวนการ
- นำน้ำสีสังเคราะห์ที่ปรับ pH และเติมสาร H₂O₂ ตามปริมาณที่มีสภาวะเหมาะสมกับกระบวนการมาปรับค่าความเข้มข้นของ COD เป็น 1000 mg/L, 500 mg/L, 250 mg/L ทำการสัมผัสโอโซนเป็นระยะเวลา 120 นาที และเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 30 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์ ค่าสีและค่าซีไอดี เพื่อหาค่า COD loading
- นำน้ำสีสังเคราะห์ที่ปรับ pH ค่าความเข้มข้น COD และเติมสาร H₂O₂ ตามปริมาณที่มีสภาวะเหมาะสมกับกระบวนการ ทำการสัมผัสโอโซนเป็นระยะเวลา 120 นาที และเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 30 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์ ค่าสี, ค่าความขุ่น, ค่าซีไอดี และค่าบีโอดี
- เปรียบเทียบผลลัพธ์กับกระบวนการโอโซน

* วิธีการทดลองกระบวนการโอโซนทำตามขั้นตอนข้างต้นไม่ต้องเติมสาร H₂O₂

ผลการศึกษา

การทดลองที่ 1 กระบวนการโอโซน
จากการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมในการลดค่า COD พบว่า pH 11 มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้มากที่สุด โดย pH 7 และ pH 3 เป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD รองลงมาในระยะเวลาเติมโอโซน 120 นาที คิดเป็นร้อยละในการกำจัดเท่ากับ 25.4, 16.6 และ 16.6 ตามลำดับ
จากการทดลองพบว่าปริมาณโอโซน 1 g สามารถกำจัด COD ได้ 12.65 mg/L ด้วยปริมาณโอโซน 5.96 g ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าปริมาณโอโซนที่เหมาะสมต่อการบำบัดมีค่าเฉลี่ยที่ 0.0496 g/min ต่อน้ำเสีย 7 l ดังแสดงตาราง 1