

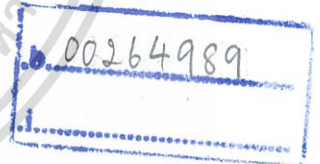
การกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษด้วย  
วิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชั่น

REMOVAL OF ORGANIC COMPOUNDS AND  
DECOLORIZATION FROM PAPER MILL EFFLUENT BY  
CHEMICAL COAGULATION COMBINED WITH OZONATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษด้วย  
วิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนชัน  
REMOVAL OF ORGANIC COMPOUNDS AND  
DECOLORIZATION FROM PAPER MILL EFFLUENT BY  
CHEMICAL COAGULATION COMBINED WITH OZONATION



TB 00050

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REMOVAL OF ORGANIC COMPOUNDS AND  
DECOLORIZATION FROM PAPER MILL EFFLUENT BY  
CHEMICAL COAGULATION COMBINED WITH OZONATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
(ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)

DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการ  
สร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนชั้น  
Removal of Organic Compounds and Decolorization from Paper  
Mill Effluent by Chemical Coagulation Combined with  
Ozonation

**ชื่อนักศึกษา** นายจักรีย์ อินตะ รหัสนักศึกษา 56050674  
นายฐานันดร สติตริก รหัสนักศึกษา 56050685  
นายณัฐพล หมดละ รหัสนักศึกษา 56050693

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

**ภาควิชา** เคมี

**ปีการศึกษา** 2559

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา  
เคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ประธานกรรมการ	
ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ กรรมการ	 
ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	 

ลิขสิทธิ์คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนชั้น		
ชื่อนักศึกษา	นายจักรีย์	อินตะ รหัสนักศึกษา	56050674
	นายฐานันดร	สดีตริก รหัสนักศึกษา	56050685
	นายณัฐพล	หมัดละ รหัสนักศึกษา	56050693
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน		

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนชั้น โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การสร้างตะกอนทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์และอะลูมิเนียมซัลเฟต ด้วยวิธีจาร์เทสต์ แปรค่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ 0, 100, 150, 200, 250, 300, 500, 700, 1,000, 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกคลอไรด์ที่ 0, 100, 150, 200, 250, 300 มิลลิกรัมต่อลิตร 2) เปรียบเทียบวิธีการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยวิธีสลายตัวด้วยแสง, วิธีสลายตัวด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และวิธีโอโซนชั้น 3) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโอโซนชั้น โดยแปรค่า พีเอชที่ 3, 5, 9, 11, พีเอชเริ่มต้น และระยะเวลาสัมผัสที่ 0, 5, 15, 30, 45, 60 นาที จากผลการทดลองพบว่าสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมคือ อะลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีคือ วิธีโอโซนชั้น โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมคือ ระยะเวลาสัมผัส 45 นาที พีเอช 11 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ซีไอดี และบีไอดี เท่ากับ 99.82%, 97.76% และ 80.12% ตามลำดับ และพีเอชน้ำทิ้งหลังการบำบัด เท่ากับ 9.49

**คำสำคัญ :** น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ การกำจัดสารอินทรีย์ การกำจัดสี โอโซนชั้น การสร้างตะกอนทางเคมี

<b>Title</b>	Removal of Organic Compounds and Decolorization from Paper Mill Effluent by Chemical Coagulation Combined with Ozonation		
<b>Students</b>	Mr. Jakkree	Inta	Student ID 56050674
	Mr. Tanandorn	Satitruk	Student ID 56050685
	Mr. Nattapon	Madla	Student ID 56050693
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2016		
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon		

### Abstract

The special project studied removal of organic compounds and decolorization from paper mill effluent by chemical coagulation combined with ozonation. The experiment was divided into 3 steps: 1) coagulation by aluminum sulfate and ferric chloride using Jar test. The concentrations of aluminum sulfate were varied in the range of 0, 100, 150, 200, 250, 300, 500 700 1,000, 1,200 mg/L and concentrations of ferric chloride were varied in the range of 0, 100, 150, 200, 250, 300 mg/L. 2) Comparison on methods for removal of organic compounds and decolorization from paper mill effluent after chemical coagulation treatment: photolysis, photocatalysis and ozonation. 3) Study optimum conditions for removal of organic compounds and decolorization using ozonation by varying pH at 3, 5, 9, 11, initial pH and exposure time at 0, 5, 15, 30, 45, 60 minutes. The experimental results showed that aluminum sulfate 200 mg/L was the optimum coagulant. The ozonation was the optimum method for removal of organic compounds and decolorization after chemical coagulation. The optimum conditions of ozonation were exposure time 45 minutes and pH 11. The removal efficiencies of color, COD and BOD were 99.82%, 97.76% and 80.12% respectively. pH of effluent after coagulation and ozonation treatment was 9.49

**Keywords:** Chemical coagulation, Decolorization, Ozonation, Paper mill effluent, Removal of organic compounds

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณาและความร่วมมือของ  
ทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้  
ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษและขอขอบพระคุณ  
กรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และ ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ ที่ให้  
ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท ควอลิตี้ คาร์ตอนส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งในการ  
ทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชา  
เคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน  
และเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งเพื่อนๆ  
และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการพิเศษขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

จักรีย์ อินตะ  
ฐานันดร สติตรีภ  
ณัฐพล หมดละ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 อุตสาหกรรมกระดาษ.....	3
2.2 กระบวนการผลิตกระดาษ.....	3
2.2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ.....	3
2.2.2 ขั้นตอนการผลิตกระดาษ.....	7
2.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมกระดาษ.....	12
2.4 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษ.....	14
2.4.1 วิธีการบำบัดทางชีวภาพ.....	14
2.4.2 วิธีการบำบัดทางเคมี.....	16
2.4.3 ข้อดีข้อด้อยวิธีการบำบัดน้ำเสีย.....	17
2.5 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	19
2.6 กระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี.....	22
2.6.1 หลักการของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน.....	22
2.6.2 กลไกของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน.....	22
2.6.3 สารสร้างตะกอนและสารรวมตะกอน.....	23
2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างและการรวมตะกอน.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 โอโซน.....	25
2.7.1 สมบัติของโอโซน.....	26
2.7.2 การผลิตก๊าซโอโซน.....	28
2.7.3 ปฏิกริยาของกระบวนการโอโซนเนชั่น.....	29
2.7.4 ปฏิกริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำ.....	33
2.7.5 การบำบัดสีในน้ำด้วยโอโซน.....	34
2.7.6 การวิเคราะห์หาปริมาณโอโซน.....	34
2.7.7 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชั่น.....	35
2.8 สี.....	35
2.8.1 สีของน้ำธรรมชาติ.....	35
2.8.2 ประเภทของสี.....	35
2.8.3 หลักเกณฑ์การวัดสีของน้ำ.....	36
2.8.4 หลักการตรวจวัดค่าสี.....	36
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>43</b>
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี.....	43
3.1.1 อุปกรณ์.....	43
3.1.2 สารเคมี.....	44
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	44
3.2.1 ตัวอย่างน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีใน น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี.....	48
3.2.3 ศึกษาการเปรียบเทียบวิธีโฟโตไลซิส โฟโตแคตตาไลซิส โอโซนเนชั่น.....	50
3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโอโซนเนชั่น ...	51
3.2.5 ศึกษาปริมาณโอโซนที่ใช้ในปฏิกริยาของการกำจัดสารอินทรีย์และสี.....	52
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>55</b>
4.1 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ.....	55
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสี ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี.....	56
4.2.1 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้เฟอริกคลอไรด์ .....	57
4.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสี ที่ผ่านการบำบัดโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับวิธี โฟโตไลซิส โฟโตแคทาไลซิส และโอโซนชั้น .....	59
4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจาก อุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีโอโซนชั้น.....	61
4.4.1 ผลของค่าพีเอช .....	61
4.4.2 ผลของระยะเวลาสัมผัส.....	62
4.4.3 ผลของปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทดลอง.....	63
4.5 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษหลังการ กำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนชั้น.....	64
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>66</b>
5.1 สรุปผลวิจัย .....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	66
เอกสารอ้างอิง .....	67
ภาคผนวก ก .....	70
ภาคผนวก ข .....	82
ภาคผนวก ค .....	93
ภาคผนวก ง .....	101

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของสีย้อม.....	5
2.2 ขั้นตอนการฟอกจะเรียงลำดับตามอักษรที่ใช้เรียก.....	8
2.3 จุดที่เกิดน้ำทิ้งในโรงงานเยื่อและกระดาษ.....	12
2.4 ลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานเยื่อกระดาษก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด.....	13
2.5 ลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานเยื่อและกระดาษก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด(มาตรฐานสแกนดิเนเวีย)..	14
2.6 วิธีการบำบัดสีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมกระดาษ.....	17
2.6 วิธีการบำบัดสีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมกระดาษ(ต่อ).....	18
2.7 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	19
2.7 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม(ต่อ).....	20
2.7 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม(ต่อ).....	21
2.8 สมบัติทางกายภาพของโอโซน.....	26
2.9 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารออกซิแดนต์ต่างๆ.....	27
2.10 ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	27
2.11 การเลือกความยาวคลื่นตามวิธีการวัดสีแบบ Spectrophotometric กำหนด.....	39
2.11 การเลือกความยาวคลื่นตามวิธีการวัดสีแบบ Spectrophotometric กำหนด (ต่อ).....	40
3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์.....	49
3.2 ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟต ที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.3 ความเข้มข้นเพอริกคลอไรด์ ที่ใช้ในการทดลอง.....	50
4.1 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ.....	55
4.2 คุณลักษณะของน้ำทิ้งหลังกำจัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี.....	58
4.3 คุณลักษณะของสีที่มองเห็นต่อค่าพีเอช.....	61
4.4 คุณลักษณะของสีที่มองเห็นต่อระยะเวลาสัมผัส.....	62
4.5 คุณลักษณะของน้ำทิ้งหลังการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี ร่วมกับวิธีโอโซนขั้น.....	64
4.5 คุณลักษณะของน้ำทิ้งหลังการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี ร่วมกับวิธีโอโซนขั้น(ต่อ).....	75
ก-1 ปริมาตรตัวอย่างน้ำและเติมสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ.....	74
ก-2 การเลือกเจือจางน้ำตัวอย่างให้เหมาะสมในการหาค่า.....	77
ก-3 การวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นต่างๆ.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-1.1 ผลของการหาช่วงวิธีการสร้างตะกอนเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต ความเข้มข้น 300-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร .....	83
ข-1.2 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต ความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	84
ข-1.2 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต ความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร(ต่อ) .....	85
ข-1.3 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	86
ข-1.3 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	87
ข-2 ผลของการเปรียบเทียบ .....	88
ข-3.1 ผลของการปรับพีเอช .....	88
ข-3.2 ผลของระยะเวลาสัมผัส.....	89
ข-4 ผลของปริมาณก๊าซโอโซน.....	89
ข-5 ผลของค่าบีโอดี .....	90
ข-6 ผลของการวัดซีโอดี .....	91
ข-7 ผลของความเข้มข้นในหน่วยเอดีเอ็มไอ .....	92
ค-1.1 การสร้างตะกอนทางเคมีด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต.....	94
ค-1.2 การสร้างตะกอนทางเคมีด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์.....	96
ค-2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการกำจัดสารอินทรีย์และสี ด้วยวิธี โฟโตแคทาไลซิส โฟโตไลซิสและ โอโซนเนชั่น.....	98
ค-3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยแปรค่าพีเอชด้วยวิธีโอโซนเนชั่น.....	99
ค-3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสด้วยวิธีโอโซนเนชั่น.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรมกระดาษ.....	10
2.1 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรมกระดาษ (ต่อ).....	11
2.2 รูปโครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACI และ Alum.....	23
2.3 การผลิตโอโซนด้วยวิธีอัลตราไวโอเล็ต.....	28
2.4 การผลิตโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดีสชาร์จ.....	29
2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซนชั้นทั้งทางตรงและทางอ้อม.....	30
2.6 ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับฟินอลแบบ Electrophilic Attack.....	31
2.7 ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ.....	34
2.8 Chromaticity Diagram.....	38
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการกำจัดสารอินทรีย์และสี ด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี.....	45
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการเปรียบเทียบวิธีการกำจัดสารอินทรีย์และสี.....	46
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทั้งด้วย วิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนชั้น.....	47
3.4 ขั้นตอนการหาปริมาณก๊าซโอโซนที่ทำปฏิกิริยากับน้ำทิ้ง.....	53
3.5 การวัดปริมาณโอโซนที่ใช้ในปฏิกิริยา.....	54
4.1 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมี โดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 300-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	56
4.2 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	57
4.3 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมี โดยใช้เฟอริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	57
4.4 ความยาวคลื่นสูงสุด (ก) ก่อนการกำจัด (ข) หลังการกำจัด.....	59
4.5 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสี ด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับ วิธีโฟโตไลซิส โฟโตแคทาไลซิส และโอโซนชั้น.....	60
4.6 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโอโซนชั้น.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโอโซนชั้น .....	62
4.8 ผลของการวัดปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำทิ้ง ....	63
ก-4 กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน.....	80
ง-1 ผลของการหาช่วงวิธีการสร้างตะกอนเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต.....	102
ง-2 ผลของอะลูมิเนียมซัลเฟตแปรค่าความเข้มข้นที่ 0, 100, 150, 200, 250, 300 มิลลิกรัมต่อลิตร .....	102
ง-3 ผลของเฟอร์ริกคลอไรด์แปรค่าความเข้มข้นที่ 0, 100, 150, 200, 250, 300 มิลลิกรัมต่อลิตร .....	103
ง-4 ผลการเปรียบเทียบอะลูมิเนียมกับเฟอร์ริกคลอไรด์.....	103
ง-5 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยปรับพีเอช 3 .....	104
ง-6 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยปรับพีเอช 5 .....	104
ง-7 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยปรับพีเอช 6.75.....	104
ง-8 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยปรับพีเอช 9 .....	105
ง-9 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยปรับพีเอช 11 .....	105
ง-10 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 0 นาที.....	105
ง-11 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 5 นาที.....	106
ง-12 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 15 นาที.....	106
ง-13 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 30 นาที.....	106
ง-14 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 45 นาที.....	107
ง-15 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 60 นาที.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
ADMI	หน่วยวัดปริมาณค่าสีจริงของน้ำ
COD	ความต้องการออกซิเจนทางเคมี
BOD	ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี
m <sup>3</sup>	ลูกบาศก์เมตร
µs/cm	ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร
°C	องศาเซลเซียส
mL	มิลลิลิตร
L/mol	ลิตรต่อโมล
g/L	กรัมต่อลิตร
g/cm <sup>3</sup>	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
mg	มิลลิกรัม
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
W	วัตต์
nm	นาโนเมตร
mg	มิลลิกรัม
NTU	หน่วยความขุ่น
N	นอร์มอล
กก.	กิโลกรัม
EC	ค่าการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญต่อเศรษฐกิจไทย และมีแนวโน้มการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งอุตสาหกรรมกระดาษยังเป็นอุตสาหกรรมเชื่อมโยงไปยังอุตสาหกรรมอื่นๆ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550) อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตกระดาษมีการใช้พลังงานและน้ำในปริมาณสูง ส่งผลให้มีน้ำทิ้งอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสีปริมาณมาก ก่อให้เกิดอันตรายต่อพืชและสัตว์ในแหล่งน้ำ และมีความเป็นพิษสูง อีกทั้งลดความสามารถของการส่องผ่านของแสงลงในแหล่งน้ำ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง

โดยทั่วไปน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษ นิยมบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต อย่างไรก็ตาม วิธีนี้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ แต่ไม่สามารถทำลายโครงสร้างของสี เนื่องจากสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษเป็นสารอินทรีย์ที่กำจัดได้ยาก จึงจำเป็นต้องบำบัดโดยใช้วิธีบำบัดอื่นควบคู่ด้วย วิธีที่ใช้ในการบำบัดสีในน้ำเสียมีหลายวิธี ได้แก่ การดูดซับ การตกตะกอน และเยื่อกรองเมมเบรน เป็นต้น การใช้โอโซน (Ozonation) เป็นกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีปนเปื้อน เนื่องจากไม่มีตะกอนเกิดขึ้นหลังการบำบัด จึงไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นพิษ มีศักยภาพทำลายโครงสร้างสีที่สูง

โครงการพิเศษนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษโดยใช้วิธีการสร้างตะกอนทางเคมี (Coagulation) ร่วมกับวิธีโอโซนเนชัน (Ozonation) โดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตและเพอริกคลอไรด์เป็นสารสร้างตะกอนทางเคมีเพื่อให้อนุภาคมีขนาดเล็กมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ตกตะกอนได้ง่าย ส่วนวิธีโอโซนเนชันเป็นการใช้โอโซนในการแตกพันธะทางเคมีของสารอินทรีย์และสี

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีโฟโตไลซิส โฟโตแคทาไลซิส และโอโซนเนชัน
- 2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชัน
- 3) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชัน

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1) วิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ ได้แก่ ค่าความขุ่น ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด เอดีเอ็มไอ ซีโอดี บีโอดี

2) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี โดยวิเคราะห์ที่ความยาวคลื่นสูงสุด ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ดังนี้

- ความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ 0, 300, 500, 700, 1,000, 1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ 0, 100, 150, 200, 250, 300 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ความเข้มข้นเพอริกคลอไรด์ที่ 0, 100, 150, 200, 250, 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

3) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษด้วยหลังผ่านกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยวิธีโฟโตไลซิส โฟโตแคทาไลซิส และโอโซนเนชัน

- 4) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งโดยวิธีโอโซนเนชัน โดยแปรค่า
- ระยะเวลาที่ใช้ในการสัมผัสโอโซน 0, 5, 15, 30, 45, 60 นาที
  - ค่าพีเอช 3, 5, 9, 11 และพีเอชเริ่มต้น

5) วิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษหลังการกำจัดสารอินทรีย์และสีโดยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชัน ได้แก่ ค่าความขุ่น ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด เอดีเอ็มไอ ซีโอดี บีโอดี

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ลดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ
- 2) สามารถประยุกต์ใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชันในกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 อุตสาหกรรมกระดาษ

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ เช่น น้ำ พลังงาน และต้นไม้ในปริมาณสูง นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำและทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หากขาดการจัดการอย่างถูกต้อง

แนวโน้มการผลิตเยื่อและกระดาษมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง คาดว่าแนวโน้มผลผลิตจะเพิ่มขึ้น จากความต้องการของอุตสาหกรรมภายในประเทศ ซึ่งขยายตัวตามมาตรการกระตุ้นเศรษฐกิจภายในของภาครัฐ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2558)

### 2.2 กระบวนการผลิตกระดาษ

#### 2.2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ (Holik, 2006)

กระบวนการผลิตกระดาษแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

##### 1) ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fibrous materials)

เยื่อกระดาษที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เยื่อบริสุทธิ์ (Virgin pulp) และเยื่อรีไซเคิล (Recycled pulp)

1.1 เยื่อบริสุทธิ์ (Virgin pulp) เป็นเยื่อที่ได้จากการแปรรูปพืชหรือต้นไม้ด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการทางกล กระบวนการทางเคมี และกระบวนการกึ่งเคมี เพื่อให้ได้เส้นใยหรือเยื่อกระดาษสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ เยื่อกระดาษที่ได้จะเรียกชื่อแตกต่างกันไป ตามกระบวนการผลิตเยื่อ เช่น เยื่อที่ผลิตจากการขัดสีหรือการแยกเส้นใยออกจากไม้โดยใช้พลังงานกลหรือกระบวนการทางกลจะเรียกว่า เยื่อเชิงกล (Mechanical pulp) ส่วนเยื่อที่ผลิตโดยใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเพื่อแยกเส้นใยออกจากเนื้อไม้หรือใช้ในทางเคมี เรียกว่า เยื่อเคมี (Chemical pulp)

1.2 เยื่อรีไซเคิล (Recycled pulp or secondary pulp) (Selke, 1994) เป็นเยื่อที่ได้จากการแปรรูปกระดาษที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์มาแล้ว หรือกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยนำกระดาษเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อแยกเส้นใยที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษออก แล้วนำกลับมาผลิตเป็นกระดาษเพื่อใช้ประโยชน์อีกครั้ง เยื่อกระดาษที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลแล้วจะมีขนาดสั้นลง ดังนั้นในกระบวนการผลิตกระดาษที่ใช้วัตถุดิบเป็นเยื่อกระดาษรีไซเคิลจึงจำเป็นต้องเติมเยื่อกระดาษบริสุทธิ์ลงไปด้วย เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ โดยปกติการนำ

กระดาษมารีไซเคิลจะสามารถทำได้สูงสุดประมาณ 4-6 ครั้ง ทั้งนี้เพราะเยื่อกระดาษที่ผ่านการรีไซเคิลแล้วจะมีขนาดและคุณภาพด้อยลงซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของกระดาษที่ผลิตได้

## 2) ส่วนที่ไม่ใช้เส้นใย (Non-fibrous materials) (Biermann, 1996)

นอกจากส่วนของเยื่อหรือเส้นใยแล้ว กระดาษยังประกอบด้วยองค์ประกอบหลักอีกประการหนึ่ง คือ สารเติมแต่ง ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้เติมลงไปในกระบวนการผลิตกระดาษเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

### 2.1 สารเติมแต่งเพื่อหน้าที่เฉพาะอย่าง (Functional additives)

สารเติมแต่งเพื่อหน้าที่เฉพาะอย่างหรือสารเติมแต่งหลัก เป็นสารเคมีที่เติมลงในกระบวนการผลิตกระดาษ เพื่อทำหน้าที่ในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ เช่น สารตัวเติม (filler) สารต้านการซึมน้ำ (sizing agent) สารเพิ่มความเหนียวเมื่อแห้ง (dry strength agent) สารเพิ่มความเหนียวเมื่อเปียก (wet strength agent) สีย้อม (dyes) และสารฟอกขาว (optical brightening agent)

1) สารตัวเติม (Filler) โดยทั่วไปสารตัวเติมจะเป็นสารอนินทรีย์หรือผงแร่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติด้านทัศนศาสตร์และปรับปรุงสมบัติด้านการพิมพ์ของกระดาษ นอกจากนี้การเติมสารตัวเติมลงในกระดาษจะสามารถลดปริมาณการใช้เยื่อกระดาษลงโดยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษไม่เปลี่ยนแปลงจึงจัดเป็นวิธีการลดต้นทุนการผลิตกระดาษวิธีหนึ่งเพราะสารตัวเติมส่วนมากจะมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใย สารตัวเติมที่ดีควรมีขนาดเล็กละเอียด เพื่อช่วยเพิ่มการกระเจิงแสงของกระดาษทำให้กระดาษมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมเป็นสารอนินทรีย์ที่มีค่าความทึบแสงสูง จึงทำให้กระดาษที่เติมสารประเภทนี้จะมีค่าความทึบแสงที่ดี นอกจากนี้สารตัวเติมยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านพื้นผิวของกระดาษทำให้กระดาษมีพื้นผิวที่เรียบมากขึ้น สารตัวเติมที่สำคัญซึ่งใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษได้แก่ ดินขาว (Kaolin or clay) ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใส่สารตัวเติมลงในกระดาษในปริมาณมากอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติบางประการของกระดาษ เช่น ค่าระยะยืดก่อนขาด (Elongation at break) ของกระดาษจะมีค่าลดลง เป็นต้น

2) สารต้านการซึมน้ำ (Sizing agent) เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านการต้านทานการซึมน้ำของกระดาษ ทำให้กระดาษต้านทานการเปียกน้ำได้ดีขึ้นเนื่องจากกระดาษทำจากเส้นใยเซลลูโลสซึ่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูง กระดาษที่ไม่เติมสารต้านการซึมน้ำจะดูดซับน้ำได้ง่าย เช่น กระดาษชำระและกระดาษซับน้ำ (Blotting paper) การเติมสารต้านการซึมน้ำลงไปจะช่วยลดพื้นที่ผิวของการตั้งคูระหว่างเส้นใยและโมเลกุลของน้ำทำให้ลดอัตราการซึมน้ำเข้าสู่เนื้อกระดาษ เมื่อกระดาษสัมผัสกับน้ำจะไม่เปียกหรือซับน้ำอย่างรวดเร็ว

3) สารเพิ่มความเหนียวเมื่อแห้ง (Dry strength agent) เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านความเหนียวของกระดาษ โดยเฉพาะความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงดันทะลุ นอกจากนี้ ยังช่วยลดการหลุดลอกของเส้นใยที่ผิวกระดาษและเพิ่มพันธะแรงยึดเหนี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างชั้นกระดาษแข็งซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญมากเพราะถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของกระดาษน้อยจะทำให้กระดาษแข็งเกิดการแยกชั้นในระหว่างการพิมพ์ได้ สารเพิ่มความเหนียวเมื่อแห้งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษที่สำคัญ ได้แก่ แป้งดัดแปร และสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น แป้งดัดแปรประจุบวก (cationic starch) และพอลิอะคริลเอไมด์ (polyacrylamide) เนื่องจากสารเหล่านี้มีประจุเป็นบวก จึงสามารถจับกันได้ดีกับพื้นผิวของเส้นใยซึ่งมีประจุเป็นลบทำให้เพิ่มพันธะระหว่างเส้นใยในกระดาษส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

4) สารเพิ่มความเหนียวเมื่อเปียก (wet strength agent) เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อรักษาความเหนียวของกระดาษให้คงไว้ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 15 ของความเหนียวเดิมเมื่อกระดาษเปียกน้ำ ปกติจะไม่ใส่สารประเภทนี้ลงในกระดาษสำหรับการพิมพ์และเขียนทั่วไป แต่อาจพบในกระดาษที่ต้องการความเหนียวเมื่อเปียกสูง เช่น กระดาษสำหรับทำแผนที่ กระดาษธนบัตร เป็นต้น สารเพิ่มความเหนียวเมื่อเปียกซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษที่สำคัญ ได้แก่ ยูเรียฟอรัมาลดีไฮด์ (urea-formaldehyde), เมลามีน (melamine-formaldehyde), พอลิเอไมด์ (polyamide) และพอลิเอมีน (polyamine) เป็นต้น

5) สารสีย้อม (Dyes) เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปในการบวนการผลิตกระดาษโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับแต่งสีของกระดาษโดยเฉพาะกระดาษสี (colored paper) โดยจะรักษาโทนสีของกระดาษให้สม่ำเสมอคงที่และปรับแต่งเฉดสีของกระดาษ เรียกว่า สีแต่ง (tinting dyes) เพื่อชดเชยสีของเยื่อกระดาษที่มีองค์ประกอบของลิกนินซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เมื่อสัมผัสกับความร้อนหรือแสงอาทิตย์ทำให้กระดาษมีสีเหลือง โดยการเติมสีย้อมลงในส่วนผสมของน้ำเยื่อเพื่อให้ได้สีของกระดาษตามที่ต้องการ สารสีย้อมที่ใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ 1) สีไดเร็ค (direct dyes) 2) สีเบสิค (basic dyes) และ 3) สีแอสิค (acid dyes) โดยสีแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่ต่างกันไป แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของสีย้อม

	สีไดเร็ค	สีแอสิค	สีเบสิค
สมบัติการกระจายน้ำ	ต่ำ	สูง	-
ความคงทนของสี (light fastness)	ดี	ดี	ไม่ดี
ความสดใสของสี (brightness)	น้อย	น้อย	มาก
การยึดติดเส้นใย	ดีมาก	ต้องใช้สารช่วยยึด	ต้องใช้สารช่วยยึด

ที่มา : รุ่งอรุณ, 2542

6) สารฟอกขาว (Optical brightening agent ; OBA) เป็นสารสีย้อมประเภทเรืองแสง (Fluorescent dye) เมื่อเติมลงไปจะช่วยให้กระดาษมีความขาวสว่าง (Brightness) เพิ่มมากขึ้นโดยปกติจะเติมลงในถังน้ำเยื่อ (Machine chest) ในขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อ

## 2.2 สารเติมแต่งเพื่อควบคุมการผลิต (Chemical processing aids)

สารประเภทนี้จะทำหน้าที่ช่วยเสริมให้สารเติมแต่งซึ่งทำหน้าที่เฉพาะอย่างหรือสารเติมแต่งหลักทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังช่วยในการดูแลรักษาความสะอาดของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตกระดาษเพื่อให้การทำงานของเครื่องจักรมีประสิทธิภาพการผลิตที่ดี สารเติมแต่งประเภทนี้แบ่งออกเป็น 6 ประเภท ตามลักษณะหน้าที่คือ

1) สารเพิ่มการตกค้าง (Retention aids) ช่วยให้เส้นใยละเอียดและสารตัวเติมตกค้างอยู่ในเยื่อกระดาษมาก ขึ้นลดการสูญเสียสารเติมแต่งหลักที่เติมลงในเยื่อกระดาษเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

2) สารต้านการเกิดฟอง (Defoamers) ช่วยป้องกันการเกิดฟองและช่วยให้เนื้อกระดาษมีความสม่ำเสมอดีขึ้นเนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อจะทำให้ความเข้มข้นของเยื่อกระดาษต่ำกว่าน้ำเยื่อที่ไม่มีฟองอากาศ ดังนั้นเมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่น กระดาษที่ได้จะมีปริมาณเยื่อกระดาษไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้สารประเภทนี้ยังช่วยให้น้ำแยกตัวออกจากเยื่อกระดาษได้เร็วยิ่งขึ้น

3) สารควบคุมจุลินทรีย์ (Microbiological control agent) ใช้ควบคุมการเกิดเมือก (slime) และการแพร่ขยายของจุลินทรีย์ในเครื่องจักรสำหรับการผลิตกระดาษและบนผลิตภัณฑ์กระดาษ เนื่องจากกระบวนการผลิตกระดาษต้องมีการเติมแป้งเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ ซึ่งแป้งที่เติมลงไปจะเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ทำให้ตะแกรงและสายพานที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นกระดาษเกิดเชื้อราและเมือกขึ้น ดังนั้น การเติมสารควบคุมจุลินทรีย์ลงในขั้นตอนการผลิตกระดาษนอกจากจะช่วยให้สามารถผลิตกระดาษที่มีคุณภาพดีแล้ว ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและช่วยดูแลรักษาเครื่องจักรสำหรับการผลิตกระดาษอีกด้วย

4) สารควบคุมการเกิดจุดต่าง (Pitch control agent) เป็นสารที่เติมลงในกระบวนการผลิตกระดาษเพื่อลดการเกิดจุดหรือรอยต่างบนกระดาษภายหลังการผลิต

5) สารช่วยแยกน้ำ (Drainage aids) ช่วยเพิ่มอัตราการแยกน้ำออกจากกระดาษในขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นกระดาษให้เร็วขึ้น ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานในขั้นตอนการกำจัดน้ำหรือการอบแห้งแผ่น กระดาษในกระบวนการผลิตกระดาษ

6) สารช่วยกระจายตัว (Formation aids) ช่วยให้เส้นใยกระจายตัวสม่ำเสมอและลดการจับเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยในขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นกระดาษทำให้เนื้อกระดาษมีความสม่ำเสมอทั่วแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 ขั้นตอนการผลิตกระดาษ

การทำกระดาษเริ่มต้นตั้งแต่การนำไม้ไปทำเยื่อเพื่อให้ได้เส้นใยออกมา แล้วจึงนำเยื่อที่ได้ไปผสมกับสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อปรับสมบัติกระดาษให้ได้ตรงความต้องการใช้งาน จากนั้นนำไปทำเป็นแผ่นโดยใช้เครื่องจักรผลิตกระดาษ แล้วจึงนำไปแปรรูปใช้งาน กระบวนการผลิตจะแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน (รูปที่ 2.1) โดยเรียงลำดับตามขั้นตอนการปฏิบัติการจริงภายในโรงงานได้ดังนี้

1) การผลิตเยื่อ (Pulping) เพื่อแยกเส้นใยออกมาจากองค์ประกอบอื่นของไม้การผลิตเยื่อสามารถทำได้หลายวิธีทั้งโดยวิธีเคมีหรือเชิงกลในบางกรณีอาจจะต้องนำไปผ่านการฟอกให้ขาวก่อนในการผลิตเยื่อจึงประกอบด้วยกรรมวิธีผลิตเยื่อ และการฟอกเยื่อ

### 1.1 กรรมวิธีผลิตเยื่อ (Pulping Process)

เยื่อมีหลายชนิด การเรียกชื่อขึ้นอยู่กับกรรมวิธีผลิต ประกอบด้วยรูปแบบต่างๆ ของพลังงานที่ใช้ ได้แก่ พลังงานความร้อน พลังงานเคมี และ พลังงานกล

การผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical Pulping Process) จะใช้พลังงานกลควบคู่ไปกับพลังงานความร้อนในการแยกเส้นใยออกมา โดยท่อนไม้หรือชิ้นไม้จะถูกส่งเข้าเครื่องบด ซึ่งทำหน้าที่บด และตัดจนชิ้นไม้ละเอียดเป็นเยื่อไม้ เยื่อที่ได้เรียกว่าเยื่อไม้บด หรือเยื่อเชิงกลให้ผลผลิตเยื่อในช่วงมากกว่าร้อยละ 85 เยื่อไม้บดมีเนื้อค่อนข้างหยาบกระด้าง เส้นใยที่ได้ส่วนใหญ่ไม่สมบูรณ์ มีการขาดและตัดเป็นท่อนๆ นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของเส้นใยปนอยู่ด้วย ในเยื่อไม้บดประกอบด้วย เส้นใยฝอย (fines) ซึ่งเกิดจากการฉีกขาดของเส้นใย, เส้นใยเดี่ยว (individual fiber) ไม่ค่อยสมบูรณ์, มัดขอเส้นใย (bundle of fiber) ประกอบด้วยเส้นใยหลายๆ เส้นเกาะติดกันเป็นมัด เยื่อชนิดนี้เมื่อนำมาเป็นวัตถุดิบในการทำกระดาษจะให้คุณสมบัติตามส่วนประกอบทั้ง 3 คือ เส้นใยฝอยจะเพิ่มคุณสมบัติด้านทึบแสง เส้นใยซึ่งไม่ค่อยสมบูรณ์ และยังคงมีลิกนินตกค้างอยู่มาก ทำให้พันธะระหว่างเส้นใยต่ำ การกลับสีเร็ว เยื่อชนิดนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำไปทำกระดาษที่ต้องรับแสงสูงหรือเก็บนานๆ มีราคาถูกเหมาะสมสำหรับทำสิ่งพิมพ์ราคาถูก เช่น หนังสือพิมพ์ หรือใช้เป็นเยื่อชั้นในกระดาษแข็ง

การผลิตเยื่อเคมี (Chemical Pulping Process) ใช้พลังงานเคมีและพลังงานความร้อนในการทำให้เส้นใยแยกจากกัน โดยชิ้นไม้จะถูกส่งเข้าหม้อต้มเยื่อ (digester) สารเคมีและความร้อนจะละลายลิกนินออกไป เหลือส่วนที่ไม่ละลายคือเยื่อ เยื่อเคมีมีหลายชนิดเรียกชื่อตามสารเคมีที่ใช้ในการผลิต เช่น เยื่อซัลเฟต เยื่อซัลไฟต์ และเยื่อโซดา เยื่อเคมีให้ผลผลิตเยื่อประมาณร้อยละ 40 มีลักษณะนุ่ม สีค่อนข้างคล้ำ เส้นใยที่ได้จะสมบูรณ์ เยื่อชนิดนี้มีปริมาณการใช้สูงมาก เพราะสามารถพัฒนาศักยภาพของเส้นใยให้สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เหมาะทั้งใช้ในงานรับแรง และเพื่อการสื่อสาร ถ้าใช้ในงานรับแรง เช่น นำไปทำกระดาษบรรจุภัณฑ์ไม่จำเป็นต้องฟอก แต่ถ้าใช้เพื่อการสื่อสารจะต้องนำไปฟอกให้ขาวก่อน

เยื่อและเศษกระดาษ (Secondary Pulp) ในปัจจุบันเศษกระดาษ (reclaimed and waste paper) จัดเป็นแหล่งเส้นใยที่สำคัญแหล่งหนึ่ง ได้มีการนำเส้นใยกระดาษที่ใช้แล้วทั้งภายในและภายนอกประเทศมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ เยื่อที่ได้จากเศษกระดาษที่ใช้แล้วเรียกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

secondary pulp ส่วยเยื่อที่ยังไม่เคยใช้ทำกระดาษเรียกว่า virgin pulp เส้นใยที่ได้จากเศษกระดาษชนิดนี้เรียกว่า recycled fiber เนื่องจากกระดาษที่ผ่านการใช้แล้วมีหลายประเภท เช่น ถ้าเป็นกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ต่าง ๆ ก่อนนำมาทำเป็นเยื่อต้องผ่านกระบวนการเอาหมึกออก (deinking) เสียก่อนแล้วจึงนำไปฟอก (bleaching) ให้ขาว สำหรับนำไปผลิตกระดาษสำหรับพิมพ์หรือกระดาษชำระ แต่ถ้าจะนำไปผลิตกระดาษเหนียวหรือกระดาษสีน้ำตาลก็ไม่จำเป็นต้องเอาหมึกออก เยื่อจากกระดาษหรือเศษกระดาษที่ได้ส่วนมากจะนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน ทำเป็นเยื่อชั้นในกระดาษแข็งหรือทำกระดาษชำระ เป็นต้น

1.2 การฟอกเยื่อ (Bleaching) แยกเป็น 2 วิธี คือ

- วิธีฟอกเยื่อเพื่อขจัดลิกนินออก (removing lignin)
- วิธีฟอกเยื่อเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี (bleaching lignin)

เยื่อเคมีจะฟอกโดยใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับลิกนินแล้วกำจัดลิกนินออก การฟอกแบบนี้มีหลายขั้นตอน โดยทั่วไปจะมีตั้งแต่ 3-6 ขั้นตอน (CEH CEDEP CEOP) เยื่อที่ได้มีความขาวสว่างสูงประมาณร้อยละ 80-95 เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดแบบ Elrepho ขั้นตอนในการฟอกจะมีชื่อเรียกตามสารเคมีที่ใช้ฟอก และ ขั้นตอนการฟอก จะเรียงลำดับตามอักษรที่ใช้เรียก เช่น การฟอกแบบ CEDED ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขั้นตอนการฟอกจะเรียงลำดับตามอักษรที่ใช้เรียก

สารเคมี	สัญลักษณ์	เรียกชื่อขั้นตอนการฟอก
Chlorine	C	ขั้นคลอรีเนชัน (chlorination stage)
Sodium hydroxide	E	ขั้นแอ็กซ์แทรกชัน (extraction stage)
Calcium hypochlorite	H	ขั้นไฮโปคลอไรต์ (hypochlorite stage)
Chlorine dioxide	D	ขั้นคลอรีนไดออกไซด์ (chlorine dioxide stage)
Hydrogen peroxide	P	ขั้นเปอร์ออกไซด์ (peroxide stage)
Oxygen	O	ขั้นออกซิเจน (oxygen stage)
Ozone	Z	ขั้นโอโซน (ozone stage)
Acid	A	ขั้นแอซิด (acid stage)

ที่มา : พงษ์วิภา และคณะ, 2550

2) การเตรียมน้ำเยื่อ (Stock Preparation) มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ เพื่อพัฒนาคุณภาพของเส้นใย โดยการนำเยื่อไปบด และปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งานโดยการผสมหรือใส่สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ตามอัตราส่วนที่กำหนด ส่วนผสมที่ได้นี้เรียกว่า “น้ำเยื่อ” หรือ “สต็อก” (stock) เยื่อที่นำมาทำกระดาษทุกชนิดจะต้องผ่านการบดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพของเยื่อ เยื่อบางชนิดไม่จำเป็นต้องบด เช่น เยื่อไม้บด และเยื่อเวียนทำใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นการเตรียมน้ำเยื่อประกอบด้วยส่วนต่างๆที่ทำหน้าที่มีขั้นตอนดังนี้

2.1 การกระจายเส้นใย (defibering) กระจายเยื่อเพื่อให้เส้นใยแยกออกจากกันเป็นอิสระในน้ำโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไฮดรอปัลเปอร์ (hydrapulper)

2.2 การบดเยื่อ (refining) เพื่อให้เส้นใยแตกแขนง เป็นการเพิ่มศักยภาพของพันธะระหว่างเส้นใยให้สูงขึ้น อุปกรณ์ที่ใช้ คือ รีไฟเนอร์ (refiner)

2.3 การผสมน้ำเยื่อ (blending) เป็นการเติมสารเติมแต่งลงไปผสมกับเยื่อที่ผ่านการบดแล้ว โดยผสมในถังใบพัดกวน เรียกว่า แมชชีนเชสเตอร์ (machine chest)

2.4 การแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำเยื่อ (screening and cleaning) โดยใช้ pressure screen หรือ flat screener เพื่อคัดวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยออก แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทำความสะอาด เรียกว่า เซนตริฟิวด์คลีนเนอร์ (centrifugal cleaner) คัดแยกวัสดุอื่นออกไป โดยใช้หลักการถ่วงจำเพาะ

2.5 การควบคุมความชื้นของน้ำเยื่อ (consistency regulator) เพื่อควบคุมให้น้ำเยื่อชื้นคงที่

3) การทำแผ่นกระดาษ (Papermaking) หลังการผสมน้ำเยื่อเรียบร้อยแล้ว น้ำเยื่อจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องจักรผลิตกระดาษ เพื่อทำเป็นแผ่นกระดาษที่ยาวต่อเนื่องกัน ซึ่งเรียกว่า เว็บเปเปอร์ (web paper) เครื่องจักรที่ใช้ผลิตกระดาษมีหลายแบบ ส่วนใหญ่เป็นแบบโฟร์ดรีนียร์ (fourdrinier) และแบบไซลินเดอร์ (cylinder)

เครื่องจักรผลิตกระดาษทุกแบบจะมีส่วนประกอบต่าง ๆ เพื่อทำหน้าที่หลัก 3 ประการคือ

1 การแยกน้ำออก (draining) ทำหน้าที่เป็นตะแกรงรองรับน้ำเยื่อ น้ำจะลอดผ่านตะแกรงทำให้เยื่อก่อตัวเป็นแผ่นเปียก (wet sheet forming)

2 การกดน้ำออก (pressing) ทำหน้าที่กดหรือบีบน้ำออกจากแผ่นเปียก ทำให้เกิดการยึดติดแน่นระหว่างเส้นใยภายในกระดาษ (consolidation of wet)

3 การอบกระดาษ (drying) แผ่นกระดาษจะถูกอบให้แห้งเพื่อไล่น้ำออกจนกระดาษแห้งเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 4-6

ส่วนประกอบหลักของเครื่องจักรผลิตกระดาษ ได้แก่

1 ถังจ่ายเยื่อ (head box) ทำหน้าที่จ่ายน้ำเยื่อเข้าสู่ตะแกรงลวดเดินแผ่น

2 ส่วนตะแกรงลวดแผ่น (wire section หรือ forming section) ทำหน้าที่คือการก่อตัวเป็นแผ่นกระดาษด้วยกระบวนการกรองและการแยกน้ำออก (dewatering) แผ่นเปียกที่ออกจากส่วนนี้จะมียังมีน้ำอยู่ร้อยละ 80

3 ส่วนกดกระดาษ (press section) ทำหน้าที่กดน้ำออกจากแผ่นเปียก ทำให้เกิดการยึดติดแน่นภายในเนื้อกระดาษ กระดาษที่ออกจากส่วนนี้จะมียังมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 55-60

4 ส่วนอบกระดาษ (drying section) จะมีลูกอบให้ความร้อนกับกระดาษ ทำให้กระดาษแห้ง โดยกระดาษที่ออกมาจากส่วนนี้จะมีความชื้นประมาณร้อยละ 4-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

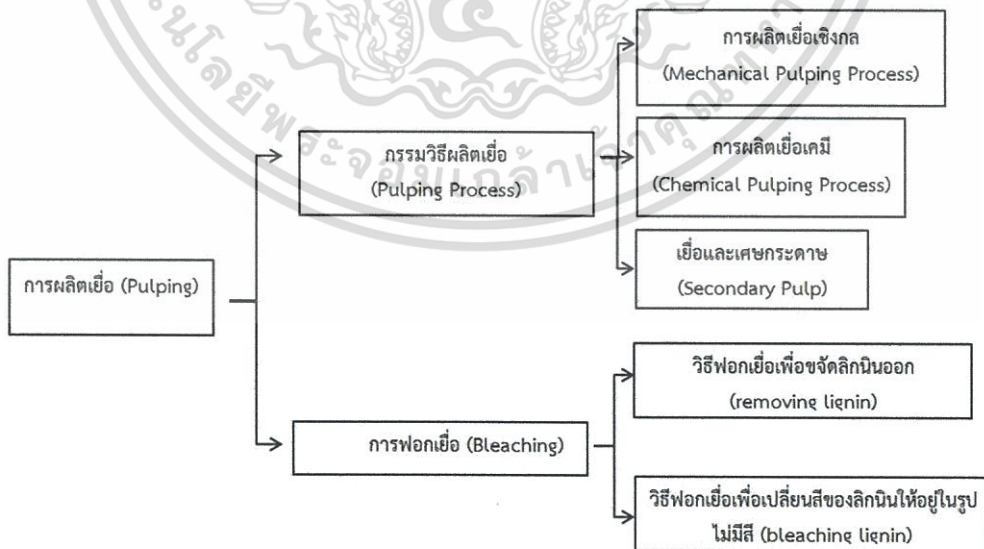
5 ส่วนรีดกระดาษ (calender) ทำหน้าที่ปรับแผ่นกระดาษให้เรียบและมีเนื้อแน่นขึ้น แต่ไม่จำเป็นต้องใช้สำหรับกระดาษบางชนิด เช่น กระดาษชำระ

4) การปรับปรุงสมบัติกระดาษขณะเดินแผ่น (Web Modification) ทำได้ 2 แบบ คือ

1 การปรับปรุงผิวกระดาษ (surface modification) กระดาษเมื่อผ่านลูกอบแห้งแล้วจะเข้าสู่ส่วนรีดกระดาษ เพื่อปรับปรุงกระดาษให้เรียบขึ้น และเพิ่มความหนาแน่นของเนื้อกระดาษ ส่งผลให้กระดาษบางลงนอกจากปรับปรุงผิวกระดาษยังสามารถทำการปรับปรุงผิวกระดาษในขณะที่เดินแผ่นด้วยวิธีการฉาบผิว (surface sizing) ซึ่งจะทำการที่เข้าลูกอบกระดาษ โดยใช้น้ำแป้งฉาบบนผิวกระดาษ ทำให้กระดาษมีผิวเรียบขึ้น นอกจากนี้ ยังเพิ่มความแข็งแรงของพันธะที่ผิวกระดาษ ทำให้ผิวกระดาษแข็งแรง สามารถต้านทานการขูดหรือการถูตึงผิวกระดาษได้ดี ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญมากสำหรับกระดาษที่ใช้พิมพ์ กระดาษที่ผ่านการปรับปรุงลักษณะนี้ ได้แก่ กระดาษออฟเซต นอกจากนี้ กระดาษทิชชูก็สามารถปรับปรุงกระดาษได้โดยเชิงกลโดยทำให้เกิดรอยย่น (creping) หรือพิมพ์ลายนูน (embossing) บนผิวกระดาษเพื่อให้กระดาษนุ่มมือขึ้น

2 การเปลี่ยนรูปร่างและม้วนกระดาษ (physical modification) เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่างของม้วนกระดาษในขณะที่เดินแผ่น เพื่อให้เหมาะกับม้วนขนาดที่ลูกค้าต้องการ โดยการคลายม้วน (rewinding) และ ตัดเป็นแผ่น (sheeting)

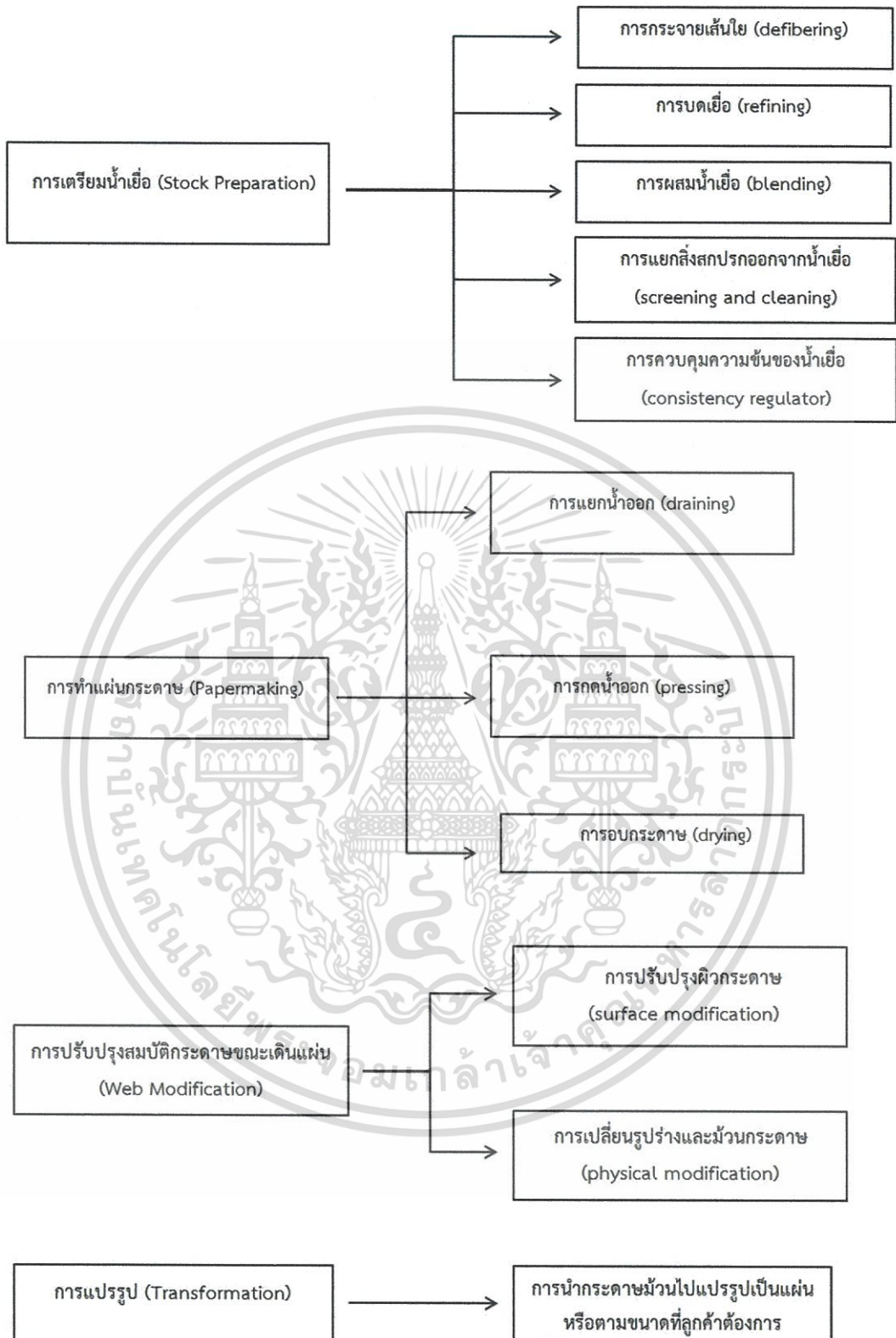
5) การแปรรูปกระดาษ (Transformation) เป็นขั้นตอนการนำกระดาษม้วนไปแปรรูปเป็นแผ่น โดยนำไปตัดขนาดให้ได้ตามที่ลูกค้าต้องการ โดยใช้เครื่องตัดแบ่งม้วนโฟลีโอ (folio sheeter) การแปรรูปเป็นแผ่นกระดาษจะเริ่มต้นด้วยการนำม้วนกระดาษ (roll) เข้าสู่เครื่องตัด ซึ่งจะตัดแบ่งกระดาษม้วนย่อย 4 ม้วน ม้วนกระดาษย่อยจะถูกส่งต่อเข้าสู่ชุดมีดตัด (rotary fly knife) ตัดกระดาษแต่ละม้วนให้เป็นแผ่น จนได้จำนวนที่ต้องการแล้วจึงส่งไปห่อ



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรมกระดาษ

(ดัดแปลงจาก กรมควบคุมมลพิษ, 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 (ต่อ) ขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรมกระดาษ

(ดัดแปลงจาก กรมควบคุมมลพิษ, 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมกระดาษ

อุตสาหกรรมกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำปริมาณสูง ซึ่งสิ้นเปลืองทั้งต้นทุนที่ใช้และค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ แม้ว่าในกระบวนการผลิตจะได้มีการนำน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้อีก รวมทั้งกระบวนการนำเคมีกลับคืนเพื่อลดภาวะในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อแล้วก็ตาม ปกติในโรงงานเยื่อและกระดาษทั่วไป ขั้นตอนการผลิตเยื่อ การล้างเยื่อ การร่อนเยื่อ การแยกเยื่อและการฟอกเยื่อ จะมีการเติมน้ำและเอาน้ำออกหลายครั้ง ประมาณ 1,200 ตันต่อน้ำการผลิตเยื่อเพียง 1 ตัน (UNEP/IE, 1996) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบริหารจัดการให้มีการหมุนเวียนใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ โรงงานเยื่อและกระดาษโดยเฉพาะโรงงานที่ใช้เทคโนโลยีเก่ามีแหล่งที่เกิดน้ำทิ้งหลายจุด ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 จุดที่เกิดน้ำทิ้งในโรงงานเยื่อและกระดาษ

ส่วนการผลิตและเครื่องจักร	จุดที่เกิดน้ำทิ้ง
การเตรียมวัตถุดิบเส้นใย	การแยกขุยออกโดยวิธีเปียก การลอกเปลือกไม้ การล้างฟางข้าวและหญ้า การล้างชิ้นไม้สับ
การต้มเยื่อ	คอนเดนเสทจากการลดความดัน น้ำดำที่ล้นจากหม้อต้ม น้ำหล่อเย็นของเครื่องบดเยื่อ น้ำล้างเยื่อไม่ฟอก น้ำจากส่วนที่เป็นกากและสิ่งสกปรก น้ำใสจากแผ่นเยื่อหนา
การฟอกเยื่อ	น้ำล้างเยื่อฟอกขาวที่มีคลอโรลิกนิน
การเตรียมเยื่อและเครื่องเดินแผ่น	น้ำที่ล้นจากการผสมเติมแต่ง น้ำล้างพื้น น้ำที่ล้นจากถังผสมเยื่อ น้ำจากส่วนที่เป็นกากและสิ่งสกปรก น้ำทิ้งที่มีเศษเยื่อปน น้ำขาวที่ล้นในกระบวนการผลิต
น้ำที่ใช้ทั่วไป	น้ำจากหม้อไอน้ำในช่วงลดความดัน น้ำทิ้งจากการล้างคอลัมน์ในกระบวนการทำน้ำอ่อน
ส่วนนำเคมีกลับคืน	คอนเดนเสทจาก Evaporator น้ำหล่อเย็นและคอนเดนเสท น้ำยาจากการล้างกากสารเคมีและ Lime Mud

ที่มา : Cleaner Production at Pulp and Paper Mill : A Guidance Manual UNEP/IE 1996

น้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนมากเกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อ ซึ่งขึ้นกับวัตถุดิบผลพลอยได้ และกากเหลือต่างๆ เช่น ในกระบวนการต้มเยื่อเคมีกว่าครึ่งหนึ่งของส่วนประกอบของวัตถุดิบจะถูกทำลายด้วยน้ำยาต้มเยื่อ ได้ผลผลิตเยื่อประมาณร้อยละ 45-50 เท่านั้น ค่าของบีโอดีและค่าซีโอดีขึ้นกับผลผลิตเยื่อดังกล่าวด้วย นอกเหนือจากชนิดของวัตถุดิบเส้นใยนอกจากการต้มเยื่อแล้ว

การฟอกเยื่อก็เป็นส่วนที่ใช้สารเคมีที่ก่อให้เกิดมลพิษสูง และน้ำทิ้งของขั้นตอนนี้จะมีส่วนของสีที่ไม่ต้องการละลายออกมาด้วย

สำหรับการผลิตกระดาษนั้นส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาทางกล จะมีการปนเปื้อนในส่วนของสารเคมีที่เติมแต่งเยื่อเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของกระดาษตามความต้องการเท่านั้น เช่น แปะ สี สารเคลือบผิว เป็นต้น ซึ่งทำให้บีโอดีและซีโอดีเพิ่มเช่นกัน

ปริมาณและคุณลักษณะของน้ำทิ้งก่อนบำบัดของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษทั้งจากไม้และกากเหลือในอุตสาหกรรมเกษตร แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานเยื่อกระดาษก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด

รายการ	โรงงานใหญ่ ทันสมัย	โรงงานขนาดกลางใช้ ไม้	โรงงานเล็กเก่า
ปริมาณน้ำ (ลบ.ม/ตันเยื่อแห้ง)	40-70	80-100	150-300
BOD (ลบ.ม/ตันเยื่อแห้ง)	10-20	30-60	90-330
COD (ลบ.ม/ตันเยื่อแห้ง)	30-50	80-200	-
SS (ลบ.ม/ตันเยื่อแห้ง)	10	15-30	30-50
AOX <sup>(1)</sup> (ลบ.ม/ตันเยื่อแห้ง)	0.5-1.5	2-4	4-6
ระบบการจัดการสารเคมี	นำสารเคมีกลับคืน ร้อยละ 80	โรงงานใช้กาก อุตสาหกรรมเกษตร นำสารเคมีกลับคืน ร้อยละ 10	ไม่มีการนำเคมี กลับคืน

(1)-ส่วนใหญ่เป็นไม้กว้าง เนื้อแข็ง (2)-ไม่มีการทำ lime กลับคืน (3)-ไม่มีการทำ lime กลับคืนและแยกขุยอ้อยโดยวิธีเปียก

AOX =Absorbable Organic Halogen หรือ Absorbable Halogenated Organic Compounds

ที่มา : Cleaner Production at Pulp and Paper Mill : A Guidance Manual UNEP/IE 1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานเยื่อและกระดาษก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด  
(มาตรฐานสแกนดิเนเวีย)

ประเภทโรงงาน	ปริมาณน้ำ (ลบ.ม)	SS (กก)	BOD (กก)	COD (กก)
กระดาษหนังสือพิมพ์ใช้เศษ กระดาษกำจัดหมึก	25-30	10-30	15-20	30-50
กระดาษหนังสือพิมพ์ใช้เยื่อไม้บด จากท่อนซุง	25-35	10-30	15-25	30-50
กระดาษ SC ใช้เยื่อบดร้อน	25-35	20-35	20-40	40-75
กระดาษ MFC ใช้เยื่อเคมีบดร้อน	25-45	20-35	30-50	50-85
กระดาษกราฟทรงพื้น	15-30	10-15	15	45
กระดาษลูกฟูกใช้เยื่อเคมีกึ่งซัลไฟต์	5-15	15-20	20	60
โรงงานกระดาษชนิดคุณภาพสูง (ไม่มีการผลิตเยื่อ)	20-30	15-30	5-10	10-20

ที่มา : Cleaner Production at Pulp and Paper Mill : A Guidance Manual UNEP/IE 1996

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการฟอกเยื่อมีมากเนื่องจากมีปริมาณของสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษจากขั้นตอนของการทำคลอรีนอื่น ซึ่งเปลี่ยนรูปของคลอรีนให้สกัดออกง่ายด้วยโซดาไฟ น้ำล้างเยื่อในขั้นตอนนี้จะมีสีคล้ำมากและมีสารประกอบจำพวกคลอโรลิกนินซึ่งเป็น Chlorinated aromatic compounds สารในกลุ่มนี้เป็นพิษ หรือ เป็นสารก่อมะเร็ง และมีผลต่อการกลายพันธุ์ได้ อันตรายรุนแรงและเกิดขึ้นโดยตรงจะมีการพุดถึงกันมาก แต่การสะสมของสารพิษดังกล่าวในปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ ยังไม่ค่อยมีการพุดถึงกันมากนัก (Casey, 1999)

## 2.4 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษ

น้ำเสียที่ออกมาจากอุตสาหกรรมกระดาษ ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของสีย้อมและสารเคมีต่างๆที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำจากการใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และไม่เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 2559 ดังนั้นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษจึงต้องมีการบำบัดเพื่อกำจัดสารต่างๆรวมทั้งสีที่ตกค้างก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำต่อไป

### 2.4.1 วิธีการบำบัดทางชีวภาพ

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสี โดยสีจะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อเจริญเติบโต จุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่จะมีการย่อยสลายสีไปด้วย ทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกลดลง ตัวอย่างกระบวนการบำบัดทางชีวภาพได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge, AS) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศโดยอาศัยจุลินทรีย์ที่มีปริมาณมากพอสำหรับการย่อยสลาย ทำลาย กิน ดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมวลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียทำให้มีค่าความสกปรกตกลง จุลินทรีย์เหล่านี้จะลอยอยู่ในตะกอนและขยายพันธุ์เพิ่มปริมาณเรียกว่า การเจริญเติบโตแบบแขวนลอย (Suspended growth) (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

2) ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon, AL) ตัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่ใช้อากาศและไม่ใช้อากาศรวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ จุลินทรีย์จึงสามารถนำอากาศไปใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เร็วขึ้นกว่าการปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่ง ต่างกันเพียงบ่อนี้จะมีข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่าบีโอดี ลดลงประมาณร้อยละ 30-50 (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

3) ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological, RBC) เป็นระบบที่ให้น้ำเสียไหลผ่านตัวกลางลักษณะทรงกระบอก ซึ่งวางจุ่มอยู่ในถังบำบัด ตัวกลางทรงกระบอกนี้จะหมุนอย่างช้าๆ เมื่อหมุนขึ้นพื้นน้ำและสัมผัสอากาศ จุลินทรีย์ที่อาศัยติดอยู่กับตัวกลางจะใช้ออกซิเจนจากอากาศย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่สัมผัสตัวกลางขึ้นมา และเมื่อหมุนจมลงก็จะนำน้ำเสียขึ้นมาบำบัดใหม่สลับกันเช่นนี้ตลอดเวลา (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

4) ระบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch, OD) เป็นระบบตะกอนเร่งอีกประเภทหนึ่งที่ใช้แบคทีเรียพวกที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic bacteria) เป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียและเจริญเติบโตเพิ่มจำนวน ก่อนที่จะถูกแยกออกจากน้ำทิ้งโดยวิธีการตกตะกอน จำเป็นจะต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพต่างๆ ให้เหมาะสมต่อการทำงานและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

5) ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) เป็นระบบที่ใช้แบคทีเรียเกาะที่ตัวกลางเป็นเมือกที่มีความหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ตัวกลางอาจทำด้วยก้อนกรวด อิฐ หรือพลาสติก แล้วนำน้ำทิ้งมาโปรยลงบนผิวหน้าของตัวกลาง แบคทีเรียที่ทำหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์และเจริญเติบโต เมื่อมาขึ้นจะหลุดออกและตกตะกอน ระบบนี้มีข้อดีคือ ค่าใช้จ่ายและค่าก่อสร้างถูกกว่าแบบอื่น และควบคุมได้ง่ายกว่า แต่มีข้อเสียคือประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำ มีกลิ่นและแมลง (มันสิน, 2547)

6) ระบบบำบัดน้ำเสีย (Stabilization Pond) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยธรรมชาติในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย แบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 3 รูปแบบ คือ บ่อแอนแอโรบิก (Anaerobic Pond) บ่อแฟคัลเททีฟ (Facultative Pond) บ่อแอโรบิก (Aerobic Pond) และหากมีบ่อหลายบ่อต่อเนื่องกัน บ่อสุดท้ายจะทำหน้าที่เป็นบ่อป่ม (Maturation Pond) เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม บ่อปรับเสถียรสามารถบำบัดน้ำเสียจากชุมชน หรือโรงงานบางประเภท เช่น โรงงานผลิตอาหาร โรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

7) ระบบยูเอเอสบี (Up flow Anaerobic Sludge Blank, UASB) ระบบนี้ต้องมีสารตัวกลางอยู่ในเครื่องกรองไม่ใช้อากาศ มีทิศทางไหลของน้ำเสียจากด้านล่างขึ้นด้านบนโดยไม่ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกลาง แต่แบคทีเรียจะถูกเลี้ยงให้จับตัวกันเป็นเม็ดขนาดใหญ่จนกระทั่งมีน้ำหนักมากและสามารถตกตะกอนได้ดี เม็ดสลัดจ์ขนาดใหญ่จะจมตัวอยู่ข้างล่าง ส่วนเม็ดขนาดเล็กจะอยู่ข้างบน เม็ดเล็กที่สุดจะลอยตัวอยู่เป็นชั้นสลัดจ์ บางส่วนอาจหลุดขึ้นถึงตอนบนของถัง (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

8) ระบบกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter, AF) เป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ เช่นเดียวกับบ่อกะชอน แต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดของเสียมากกว่าโดยภายในถังช่วงกลางจะมีชั้นตัวกลาง (media) บรรจุอยู่ ตัวกลางที่ใช้กันมีหลายชนิด เช่น หิน หลอดพลาสติก ลูกบอลพลาสติก กรงพลาสติกและวัสดุโปร่งอื่นๆ ตัวกลางเหล่านี้จะมีพื้นที่ผิวมากเพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะได้มากขึ้น จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศจะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเปลี่ยนสภาพให้กลายเป็นก๊าซกับน้ำ น้ำทิ้งที่ไหลล้นออกไปจะมีค่าบีโอดีลดลง (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

9) ระบบแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland, CW) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว ข้อดีของระบบ คือ ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีการบำบัดสูง (กรมควบคุมมลพิษ, 2551)

#### 2.4.2 วิธีการบำบัดทางเคมี

##### 1) การปรับพีเอชและการทำให้เป็นกลาง (pH adjustment and Neutralization)

การปรับพีเอชให้กับน้ำเสียใช้ในหลายกรณี เช่น การปรับพีเอชให้น้ำเสียเป็นกลางก่อนปล่อยน้ำทิ้งออกไป การปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.5-8.5 ก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพเพื่อไม่ให้ความเป็นกรด-เบสของน้ำไปรบกวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นช่วงที่สูงหรือต่ำกว่า 7.0 เล็กน้อย ไม่มากเกินไปกว่า buffer capacity ของน้ำในระบบบำบัดทางชีวภาพ การปรับพีเอชเพื่อกำจัดโลหะหนักโดยวิธีตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ เป็นต้น น้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีค่าพีเอชแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรมและช่วงการผลิต สารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ กรดซัลฟิวริก ใช้ปรับพีเอชให้เป็นกรด และ ปูนขาว ใช้ปรับพีเอชให้เป็นเบส เนื่องจากสารทั้งสองตัวมีราคาถูก แต่ข้อเสียของปูนขาวไม่สามารถปรับพีเอช ให้สูงมากๆได้ เนื่องจากค่าการละลายต่ำ การปรับพีเอชของน้ำเสียที่มีสมบัติเป็นกรดหรือเบสให้เป็นกลางเรียกว่า การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) (พรธรรม, 2556)

##### 2) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการการบำบัดที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์สซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้มทำให้เกิดตะกอนของสีจมลงในน้ำเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

##### 3) การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation)

โดยทั่วไปโมเลกุลสี้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ เป็นพวกวงเบนซินกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการบำบัดสีโดยใช้วิธีออกซิเดชันทางเคมี เป็นวิธีที่นิยมใช้ เนื่องจากสามารถบำบัดสีในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัด ซึ่งวิธีการออกซิเดชันทางเคมีมีอยู่หลายวิธี เช่น การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน การออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต และการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นต้น

### 2.4.3 ข้อดีข้อด้อยวิธีการบำบัดสีน้ำเสีย

การเลือกวิธีที่เหมาะสมกับน้ำเสียของโรงงานแต่ละประเภท ต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพ ค่าใช้จ่าย ฯลฯ ในทางปฏิบัติควรมีการนำน้ำเสียมาทดสอบก่อนเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวิธีที่เหมาะสมกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมนั้นๆ และเพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุดสามารถสรุปข้อดีและข้อด้อย เพื่อเป็นแนวทางการเลือกวิธีที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียของแต่ละอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 วิธีการบำบัดสีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมกระดาษ

วิธีการบำบัด	ข้อดี	ข้อด้อย
<b>กระบวนการบำบัดทางกายภาพ</b>		
การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง</li> <li>- สามารถกำจัดสีจริงและสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความร้อนสูง มีค่าใช้จ่ายสูง</li> <li>- มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของสีที่จะถูกดูดซับ</li> </ul>
การกรองผ่านเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าใช้จ่ายสูง</li> </ul>
การกรองผ่านเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีสูง</li> <li>- สามารถแยกสารพวกอิเล็กโตรไลต์ออกมาและนำกลับมาใช้ใหม่ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าใช้จ่ายสูง</li> </ul>
<b>กระบวนการบำบัดทางเคมี</b>		
การตกตะกอนเคมี	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัด</li> </ul>
กระบวนการเฟ้นต้น	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีประสิทธิภาพในการบำบัดทั้งสีที่ละลายน้ำและสีที่ไม่ละลายน้ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องควบคุมความเข้มข้นของเหล็ก ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง และระยะเวลาเกิดปฏิกิริยา</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) วิธีการบำบัดสีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมกระดาษ

วิธีการบำบัด	ข้อดี	ข้อด้อย
การใช้โอโซน/ การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถทำลายโมเลกุลของสี หมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้</li> <li>- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องควบคุม อุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดต่าง</li> <li>- สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า</li> </ul>
การใช้ไฟฟ้าเคมี	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสีย</li> <li>- สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้และใช้เวลาน้อย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และ ระยะเวลาการตกตะกอน</li> </ul>
<b>กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา</b>		
ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกำจัดสีย้อมกลุ่ม azo และ anthraquinone</li> <li>- เหมาะสมกับการใช้งานในโรงงาน</li> <li>- คุณภาพน้ำทิ้งได้มาตรฐาน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีอัตราเร็วในการกำจัดสีต่ำ</li> <li>- เป็นระบบที่ต้องการแหล่งพลังงาน</li> </ul>
ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสีย</li> <li>- อาจได้ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงาน</li> <li>- ใช้แบคทีเรียที่เป็น obligate และ facultative ในการกำจัดสีเอโซ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อาจเกิดสารที่เป็นพิษขึ้น</li> <li>- ต้องการระบบบำบัดขั้นที่สองต่อจากการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน</li> </ul>

ที่มา : ดัดแปลงจาก ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.7 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	-ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก.ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เกิน 300 เอตีเอ็มไอ	Tristimulus filter method
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate
7. ไซยาไนต์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 (ต่อ) มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วัน) ที่อุณหภูมิ 20 °C (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล.หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 (ต่อ) มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

16. โลหะหนัก (Heavy Metal)		
1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	Atomic Absorption Spectro Photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
2. โครเมียม ชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
3. โครเมียม ชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	
12.ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	Atomic Absorption Cold Vapour Techique

ที่มา : กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 กระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี (Chemical Coagulation and Flocculation) (กฤษดา, 2553)

### 2.6.1 หลักการของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

กระบวนการสร้างและรวมตะกอน คือ การทำให้คอลลอยด์หรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากสารแขวนลอยมีประจุเป็นลบจึงเกิดการผลักกัน ไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นจึงต้องสะเทินประจุของอนุภาคเหล่านั้น ขั้นตอน ในการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1) Coagulation คือ กระบวนการที่ทำให้สารแขวนลอยในน้ำมีประจุเป็นกลาง โดยการเติมสารเคมีที่มีประจุบวกหรือเรียกว่า coagulant เพื่อให้เกิดการสะเทินประจุที่ผิวของสารแขวนลอย ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงและรวมตัวกันเป็นตะกอนใหญ่ขึ้น

2) Flocculation คือ กระบวนการที่ทำให้สารแขวนลอยที่สะเทินประจุแล้วเกิดการรวมตัวกัน เป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเรียกว่า ฟล็อก (Floc) โดยการเติมสารเคมีที่เรียกว่า Flocculant เมื่อกลุ่มตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น น้ำหนักก็มากขึ้น ทำให้สามารถจมตัวลงสู่ก้นถังได้เร็วขึ้น

### 2.6.2 กลไกของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

กลไกการทำให้คอลลอยด์หรือสารแขวนลอยรวมตัวกันตกตะกอนออกจากน้ำได้ คือ

#### 1) การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

กลไกต่างๆ ของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ได้แก่

#### 1.1) กลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization)

เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนของสารสร้างตะกอนที่มีประจุบวก ทำลายเสถียรภาพ ของคอลลอยด์ที่มีประจุลบให้กลายเป็นกลาง (Neutralization) และเกิดการดูดติดผิว ทำให้อนุภาคของคอลลอยด์รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และแยกตัวออกจากน้ำได้

1.2) กลไกการสร้างผลึกเพื่อให้คอลลอยด์มาเกาะจับกันเป็นฟล็อก เป็นการเติมสารสร้างตะกอนที่มีความสามารถในการตกผลึกได้อย่างรวดเร็ว โดยเมื่อรวมตัวกับสารแขวนลอยจะมีน้ำหนัก มากยิ่งขึ้นและแยกตัวออกจากน้ำได้

1.3) กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) กลไกนี้เกิดขึ้นได้เมื่อมีการเติมสร้างตะกอนเกินพอ จนทำให้เกิดผลึกของสารสร้างตะกอนที่มีลักษณะเหนียวห่อหุ้มอนุภาคไว้เป็นผลทำให้ อนุภาคนั้นไม่สามารถแสดงอิทธิพลทางประจุออกมาได้ ทำหน้าที่สร้างคอลลอยด์ให้มีขนาดใหญ่และ ตกตะกอนได้

#### 2) การสร้างสะพานเชื่อมต่อกอลลอยด์

โดยใช้สารพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาเชื่อมต่อกับอนุภาคของคอลลอยด์ เข้าด้วยกัน เมื่อใส่น้ำจะเกาะกับคอลลอยด์และยังมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคอื่นๆ เพื่อทำให้เกิดฟล็อก ขนาดใหญ่และตกตะกอนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 สารสร้างตะกอน (Coagulation) และสารรวมตะกอน (Flocculation)

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ Coagulation หรือเรียกว่าสาร Coagulant ที่นิยมใช้ดังนี้

#### 1) สารส้ม (Aluminum Sulphate, Alum)

Alum มีสูตร  $Al_2(SO_4)_3 \times H_2O$  โดยที่ x มีค่าเท่ากับ 14.3 หรือ 18 ซึ่งแตกตัว ในน้ำได้เป็น ไอออนบวกดังสมการที่ (2.1)



เมื่อ Alum ละลายน้ำ อะลูมิเนียมไอออนจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $OH^-$  ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ  $Al^{3+}$  จะเกิดขึ้นทันทีที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน อะลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการที่ (2.2-2.4)

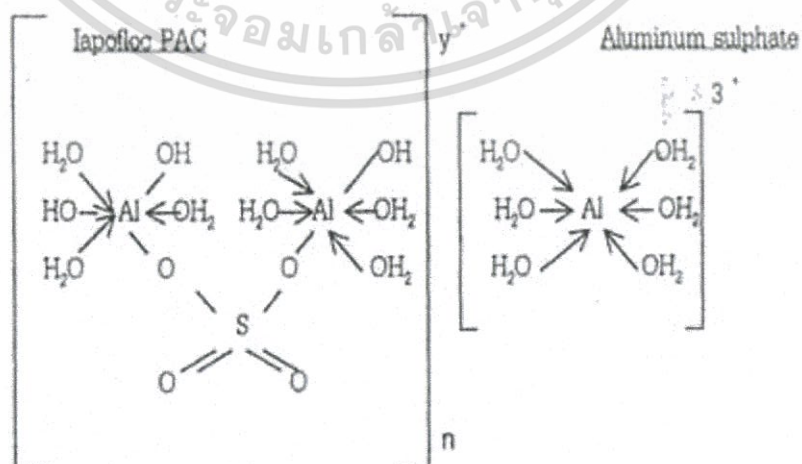


ในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นจุดอิ่มตัว (Saturation Point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก  $Al(OH)_3$  ดังสมการที่ (2.5)



#### 2) สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum Chloride, PACl)

PACl มีสูตรทั่วไปคือ  $Al_n(OH)_m Cl_{3n-m}$  ถูกเตรียมขึ้นโดยอะลูมิเนียมที่เป็น  $Al_2O_3$  ทำปฏิกิริยา HCl ที่อุณหภูมิสูงจนเป็น  $AlCl_3$  หลังจากนั้นทำปฏิกิริยากับเบสที่อุณหภูมิสูงและความดันสูงเกิดเป็นอะลูมิเนียมโพลิเมอร์และเติม Alum ลงไปจะได้  $Al_2O_3$  ที่ความเข้มข้น 10-11% จากนั้นเติม ซัลเฟตเพื่อเป็นตัวเชื่อมระหว่างอะตอมอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงโครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACl และ Alum



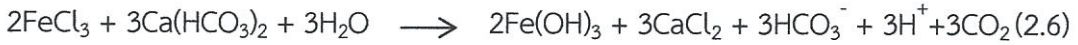
รูปที่ 2.2 รูปโครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACl และ Alum

ที่มา : Viraraghavan and Wimmer, 1988 อ้างโดย กฤษดา, 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) สารเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride, FeCl<sub>3</sub>)

FeCl<sub>3</sub> มีสูตรทั่วไปคือ FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O หรือ FeCl<sub>3</sub> anhydrous เป็นผลึกหรือสารละลายสีน้ำตาลแกมเหลือง สามารถละลายน้ำได้ดี สารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำจะได้ประจุบวก ซึ่งจะไปทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่เป็นประจุลบ จนเกิดเป็นตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์และทำปฏิกิริยากับ Alkalinity ดังสมการที่ (2.6-2.7)



### 4) ปูนขาว (Lime)

ช่วยแก้ปัญหาน้ำกระด้าง ปูนไลม์เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเคมี ที่เป็นสาเหตุให้เกิดน้ำกระด้าง กลายเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำแล้วตกตะกอนออกมา กรณีน้ำกระด้างชั่วคราวที่เกิดจากไปคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม ดังสมการที่ (2.8-2.9)



กรณีน้ำกระด้างถาวรที่เกิดจากสารประกอบคลอไรด์ สารประกอบซัลเฟต และสารประกอบไนเตรตของแคลเซียมและแมกนีเซียม ดังสมการที่ (2.10-2.11)



### 5) สารรวมตะกอน (Flocculant)

สารรวมตะกอนเป็นสารโพลิเมอร์ (Polymer) เกิดจากการรวมตัวกันของโมโนเมอร์เป็นสายโซ่ยาว โพลิเมอร์แบ่งได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่

5.1) โพลิเมอร์ประจุบวก (Cation Polymer) สามารถรวมตะกอนที่มีประจุลบได้ นิยมใช้ในการปรับสภาพตะกอน เช่น 1-trimethylammonium-2-hydroxypropylmethacrylate methosulfate และ 1-trimethylammonium-2-hydroxypropylacrylate methosulfate

5.2) โพลิเมอร์ประจุลบ (Anion Polymer) เป็นสารที่มีประจุลบเมื่อละลายน้ำ เช่น Polyacrylamide Acide (PAA), Hydrolyzed Polyacrylamide (HPAM) และ Polystyrene Sulfate (PSS)

5.3) โพลิเมอร์ไม่มีประจุ (Non-ion Polymer) ส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำแต่สามารถทำให้ตะกอนรวมกลุ่มกันได้ดีทำให้เกิดฟล็อกที่แข็งแรง และ Polyvinyl Pyrrolidone (PVP)

5.4) โพลิเมอร์ที่มีทั้งประจุบวกและลบ (Amphoteric Polymer) เป็นโพลิเมอร์ที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ เช่น Amphoteric Polyacrylamide (PAM)

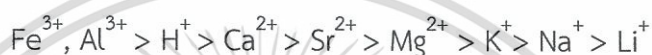
## 2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างและการรวมตะกอน

### 1. ลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ

เนื่องจากคุณภาพน้ำในแต่ละแห่งมีความแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดของต้นน้ำ สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศและปัจจัยภายนอกอื่นๆ ส่งผลให้ลักษณะของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำมีความแตกต่างกัน

### 2. ชนิดและปริมาณของสาร Coagulant

สารสร้างตะกอนที่ใช้ในการสร้างตะกอนมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการสร้างตะกอนกับสารอินทรีย์ได้แตกต่างกัน เนื่องจากประจุไฟฟ้าเคมีที่ต่างกันและสามารถในการสร้างตะกอนเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้



### 3. ค่าพีเอชของน้ำที่เหมาะสม

การสร้างตะกอนแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด ในพีเอชที่ต่างกัน ดังนั้นจะต้องมีการหาค่าพีเอชของน้ำก่อน เพื่อปรับสภาพการตกตะกอน ถ้าปฏิกิริยาไม่เกิดในพีเอชที่เหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้มีการใช้สารเคมีเกินกว่าจำเป็น และยังทำให้คุณภาพน้ำไม่ดีเท่าที่ควร

### 4. ชนิดและปริมาณของสาร Flocculant

ชนิดของ Flocculant ที่นิยมในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำคือ Cation Polymer เนื่องจากมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับ Coagulant คือ มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกแต่มีจำนวนมากกว่า เนื่องจากโพลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวเป็นสายยาวมีน้ำหนักโมเลกุลมาก เมื่อรวมตัวกับฟล็อกที่เกิดจากเกลือของเหล็กต่างๆ แล้ว ทำให้มีมวลโมเลกุลใหญ่มากขึ้นและตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าเป็น Anion Polymer หรือ Non-ion Polymer จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้น้อยกว่า

## 2.7 โอโซน (Ozone)

โอโซนถูกพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2383 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน C. F. Schonbein ต่อมา ปี พ.ศ. 2431 ได้ทำการจดลิขสิทธิ์ให้ชื่อว่าก๊าซโอโซน (O<sub>3</sub>) ที่มีสมบัติ ที่เรียกว่า “Deodorize sewer gases” โอโซนสามารถละลายน้ำได้ดีมากที่อุณหภูมิต่ำ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในรูปที่เป็นสารละลายโอโซน ที่มีสมบัติเป็นสารฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ที่เรียกว่า Polluted water disinfectant ต่อมาในปี พ.ศ. 2434 ได้รับการยอมรับว่าเป็นสารฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (Bactericidal agent) อีกประมาณ 2 ปี ต่อมา ชาวฮอลแลนด์ได้ผลิตโอโซนในเชิงการค้าเพื่อบำบัดน้ำเสียและน้ำดื่มในประเทศ และในปี พ.ศ. 2443 มีการใช้โอโซนกันอย่างกว้างขวางในทวีปยุโรป โดยเฉพาะในปี พ.ศ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2545 ประเทศเยอรมนีได้ผลิตโอโซนเพื่อใช้บำบัดน้ำดื่มน้ำใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม จนกระทั่งปี พ.ศ. 2483 มีการใช้โอโซนอย่างกว้างขวางในประเทศสหรัฐอเมริกาอย่างต่อเนื่อง และพบว่าในปีพ.ศ. 2530 มีการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำดื่มน้ำใช้ในโรงงาน มากกว่า 200 โรงงานในประเทศสหรัฐอเมริกา (Graham *et al.*, 1997)

### 2.7.1 สมบัติของโอโซน

โอโซน (Ozone) มีสูตรโมเลกุลคือ  $O_3$  และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 กรัมต่อโมล อยู่ในสถานะก๊าซที่อุณหภูมิและความดันปกติ เป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ มีความหนาแน่นประมาณ 1.6 เท่าของอากาศที่ความเข้มข้นน้อยๆ อาจกล่าวได้ว่าโอโซนเป็นก๊าซไร้สี ไร้กลิ่น และไม่เผาไหม้ที่ความเข้มข้นต่ำ แต่ที่ระดับความเข้มข้นสูงโอโซนจะมีสีน้ำเงินและมีกลิ่นฉุน ค่อนข้างรุนแรงโดยมีกลิ่นฉุนคล้ายคลาวปลา มีคุณสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2.8

โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงมากตัวหนึ่ง มีศักย์ออกซิเดชันเท่ากับ 2.07 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าคลอรีน 1.52 เท่า มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายกลิ่นสี และรสในน้ำ และสามารถละลายในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายในน้ำของออกซิเจนแต่จะไม่เสถียรในน้ำ โอโซนมีความเสถียรในอากาศมากกว่าในน้ำ มีความสามารถรับอิเล็กตรอนจากสารอื่นเพิ่มเข้ามาได้อีก ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยโอโซนทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ การเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารออกซิแดนซ์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพของโอโซน

จุดเดือด (ที่ความดัน 1บรรยากาศ)	-111.9 °C
จุดหลอมเหลว (ที่ความดัน 1บรรยากาศ)	-192.7 °C
อุณหภูมิวิกฤติ	-12.1 °C
ปริมาตรวิกฤติ	0.147 L/mol
ความดันวิกฤติ	54.6 atm
ความหนาแน่น (ก๊าซที่ 0°C)	2.144 g/L
ความหนาแน่น (ของเหลวที่ -183°C)	1.57 g/cm <sup>3</sup>
ความตึงผิว (ที่ -183°C)	38.4 Dyne/cm
ความหนืด (ของเหลวที่ -183°C)	1.55 centipoint
เอนทาลปีการระเหย (-122°C)	75.6 Cal/g
ความสามารถดูดกลืนรังสีได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น	254 nm

ที่มา : พรรวิชา และคณะ, 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 ความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารออกซิแดนต์ต่างๆ

Compound	Oxidation potential (Volts)	Relative power of chlorine
Fluorine	3.06	2.25
Hydroxyl radical*	2.80	2.05
Atomic oxygen	2.42	1.78
Ozone	2.07	1.52
Hydrogen peroxide	1.77	1.30
Permanganate	1.67	1.23
Chlorine oxide	1.50	1.10
Hypochlorous acid	1.49	1.10
Chlorine	1.36	1.00
Bromine	1.09	0.80
Iodine	0.54	0.40

หมายเหตุ \* เกิดจากการสลายตัวของโอโซน

ที่มา : (Lin and Yeh 1993)

การละลายน้ำของโอโซนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันย่อยของโอโซนในสถานะก๊าซดัง  
แสดงในตารางที่ 2.10 ความสามารถในการละลายของก๊าซในน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงดังนั้น  
ควรทำการบำบัดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า

ตารางที่ 2.10 ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	Busen Coefficient (B)	Henry Coefficient $KH \times 10^{-4}$
0	0.49	3.95
5	0.44	3.55
10	0.375	3.00
20	0.285	2.29
30	0.2	1.61
40	0.145	1.17
50	0.105	0.85

ที่มา : Weber, 1972

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ

$$(1) \quad B = \frac{\text{conc. of O}_3 \text{ in water}}{\text{Conc. of O}_3 \text{ in gas, reduce to STP}}$$

$$(2) \quad KH = \frac{\text{mole fraction of ozone in solution}}{\text{Partial pressure of O}_3 \text{ in gas phase, in atmospheres}}$$

ภาชนะบรรจุหรืออุปกรณ์ที่สัมผัสกับโอโซนต้องเป็นวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อน เช่น เซรามิกส์ แก้ว อลูมิเนียมหรือเทฟลอน เป็นต้น ทั้งนี้เพราะโอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ที่รุนแรงมากและปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซนจะปล่อยความร้อนออกมา

### 2.7.2 การผลิตก๊าซโอโซน

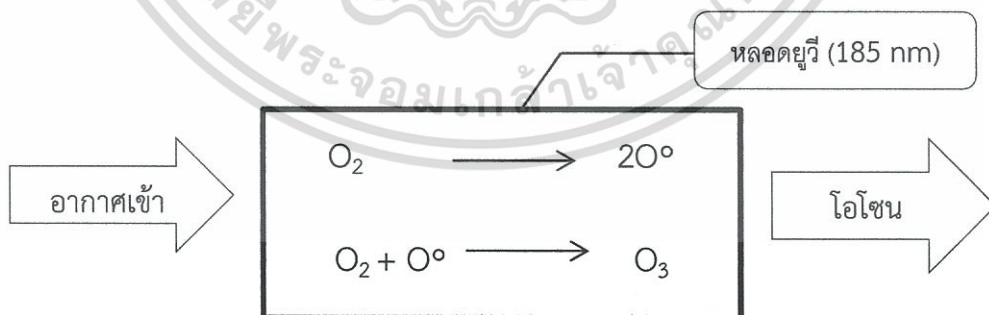
โอโซนเกิดตามธรรมชาติได้ 2 แบบ คือ

1) ปรากฏการณ์จากแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 2,400 อังสตรอม ทำให้รวมออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ที่ได้รับรังสีในช่วงดังกล่าวออกเป็นอะตอมของออกซิเจน ( $\text{O}^\circ$ ) และไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ใกล้ๆ เกิดเป็นก๊าซโอโซน

2) โคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) เกิดในเวลาที่มีฟ้าแลบ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า ขณะฝนตก ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สูงมาก ทำให้ก๊าซออกซิเจนแตกตัวเป็นอะตอมออกซิเจน และไปรวมตัวกับก๊าซออกซิเจนที่อยู่ใกล้ๆ เกิดเป็นก๊าซโอโซน

กระบวนการผลิตโอโซนในอุตสาหกรรมมี 3 แบบ คือ

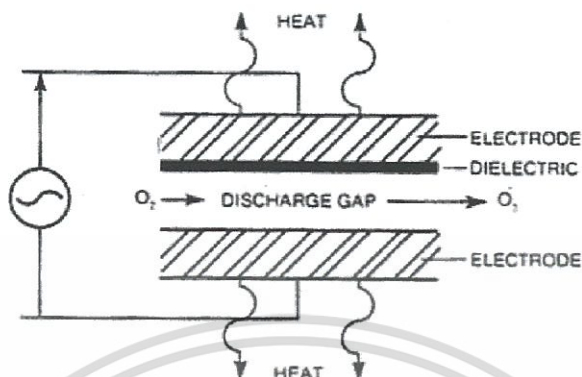
1. วิธีอัลตราไวโอเล็ต (UV Method) เป็นการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร ลงบนก๊าซออกซิเจน โดยใช้หลอดยูวี ขนาด 40 วัตต์ ซึ่งสามารถผลิตโอโซนได้ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การผลิตโอโซนด้วยวิธีอัลตราไวโอเล็ต

2. วิธีโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge) วิธีนี้ทำได้โดยผ่านอากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ เข้าไปในช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์สูงประมาณ 15,000–22,000 โวลต์ ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจน บางส่วนแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน โดยการวิ่งชนของอิเล็กตรอนจากนั้นอะตอมของออกซิเจน จะรวมตัวตัวกับโมเลกุลของออกซิเจนกลายเป็นโอโซน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงดังรูปที่ 2.4 อากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัมหรือเท่ากับ 1.4 % โดยปริมาตร ถ้าใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศแห้งอาจได้โอโซนเพิ่มเป็น 60-90 กรัม/ลบ.ม. โอโซนสามารถทำให้เป็นของเหลวได้แต่นิยมใช้ในรูปก๊าซมากกว่า (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)



รูปที่ 2.4 การผลิตโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดิสชาร์จ

สมการอธิบายปฏิกิริยาการผลิตโอโซน แสดงดังสมการ (2.12-2.13)



ความเข้มข้นของโอโซนที่ออกจากเครื่องผลิตโอโซน โดยปกติจะมีความเข้มข้น 1-10% โดยน้ำหนัก ถ้าใช้ออกซิเจนแทนอากาศจะทำให้ได้โอโซนที่มีคุณภาพดีกว่า

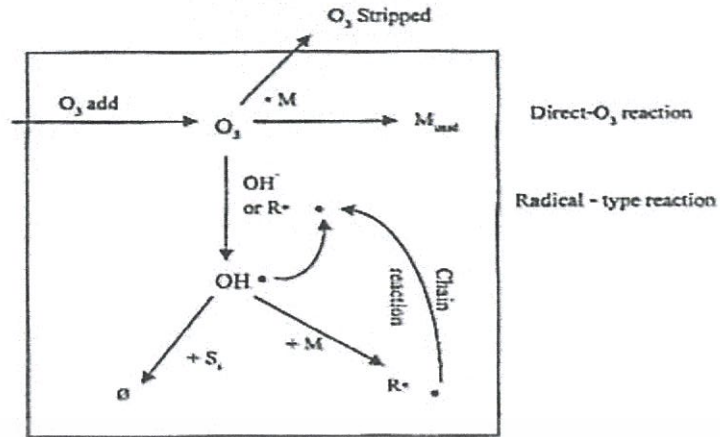
3. วิธีโคลด์พลาสมา (Cold Plasma Method) เป็นการฉายแสงพลาสมาลงบน ออกซิเจน โดยใช้แท่งแก้ว 2 แท่งที่บรรจุก๊าซเฉื่อยแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าแรงสูงลงบนแท่งแก้วทั้งสอง เพื่อทำให้เกิดสนามพลาสมา วิธีนี้สามารถผลิตโอโซนได้ถึง 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

วิธีการผลิตโอโซนในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องผลิตโอโซนที่อาศัยหลักการของวิธีโคโรนาดิสชาร์จ โดยใช้อากาศอัดเป็นวัตถุดิบในการผลิตโอโซน

### 2.7.3 ปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซนเนชั่น

โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ (Toxic Organic) ส่วนมากได้ดี และผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาส่วนมากจะมีพิษน้อยลง และถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ ค่าพลังงานอิสระ (Free Energy) ของโอโซนมีค่าถึง -400 kJ/mol ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโอโซนจะดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ ข้อเสียคือโอโซนสลายตัวให้ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ได้เร็วมากในบรรยากาศจึงต้องผลิตที่แหล่งบำบัดโดยตรง (on-site)

ปฏิกิริยาของโอโซนที่กระทำต่อสารอินทรีย์มี 2 แบบ คือ โมเลกุลของโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์โดยตรง (Direct) และโดยทางอ้อม (Indirect) ซึ่งโอโซนแตกตัวเป็น Radical ที่ว่องไวต่อการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



โดยที่ R = free radicals which catalyze the ozone decomposition  
 M = Solute  
 M<sub>oxid</sub> = Oxidized solute  
 S<sub>i</sub> = free radical Scavenger i  
 a = products which do not catalyze the ozone decomposition

รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซนชั้นทั้งทางตรงและทางอ้อม  
 ที่มา : Gottschalk et al., 2000

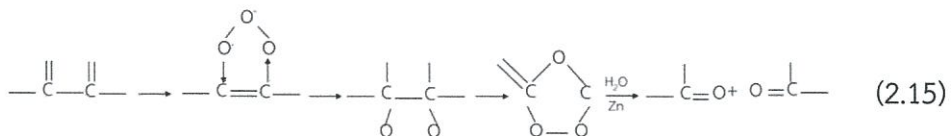
1) การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรง (Direct Oxidation)

โมเลกุลของโอโซน (O<sub>3</sub>) ไม่เป็นเส้นตรง มีพันธะระหว่างออกซิเจน 2 พันธะ ทำมุมระหว่างพันธะ 116° 45' ความยาวพันธะทั้งสองเท่ากันคือ 1.278 Å π อิเล็กตรอนเกิดเรโซแนนซ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.14



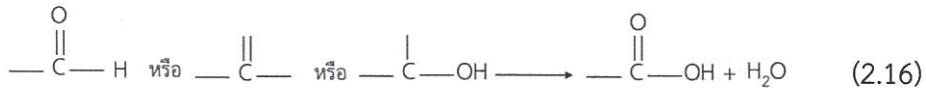
π อิเล็กตรอนจะถูกใช้ร่วมกันระหว่างออกซิเจนทั้ง 3 อะตอม จากโครงสร้างนี้จะเห็นได้ว่าโอโซนมีอิเล็กตรอนมากเกินพอ และเป็นโมเลกุลมีขั้ว จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงแบบ Dipole-mediate Attack หรือแบบ Electrophilic Attack

1.1) Dipole - media Attack โอโซนหันด้านขั้วลบของโมเลกุลเข้าหาพันธะคู่ของสารอินทรีย์เกิด Intermediate เป็นโมโนโอไซด์และโอไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.15



จากนั้นสลายตัวให้อัลดีไฮด์และคีโตน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนอัลดีไฮด์หรือคีโตนที่เกิดขึ้น รวมทั้งสารพวกแอลกอฮอล์จะถูกโอโซนออกซิไดซ์ต่อไปได้ กรดคาร์บอกซิลิก และน้ำ ดังแสดงสมการที่ 2.16

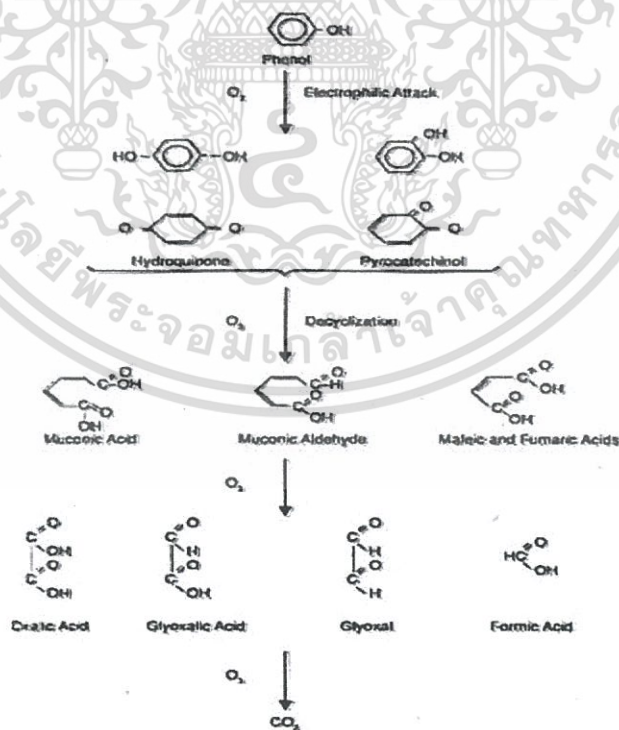
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1.2) Electrophilic Attack ไอโซนสามารถทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรไฟล์ (Electrophile) โดยหันด้านบวกของโมเลกุลเข้าหาบริเวณที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นของโมเลกุล สารอินทรีย์พวกอะโรมาติกซึ่งมีความว่องไวของปฏิกิริยา ขึ้นอยู่กับหมู่แทนที่ในวงเบนซีน (Benzene Ring) ว่าเป็นหมู่ที่ให้อิเล็กตรอน  $-\text{OCH}_3$ ,  $-\text{CH}_3$ , และ  $-\text{NO}_2$  ปฏิกิริยาจะว่องไวขึ้น ถ้าวางเบนซีนมีหมู่แทนที่เป็นหมู่ดึงอิเล็กตรอนเช่น  $-\text{COCH}_3$ ,  $-\text{COOC}_2\text{H}_5$ ,  $-\text{Cl}$ ,  $-\text{SO}_2\text{H}$  จะทำให้ความว่องไวของปฏิกิริยาแทนที่ Electrophilic ในวงเบนซีนลดลง ดังแสดงสมการที่ 2.17



การทำปฏิกิริยาโดยตรงจะเกิดขึ้นกับสารอินทรีย์ที่มีตำแหน่งเฉพาะเจาะจงหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่ไอโซนสามารถออกซิไดซ์ได้ ถ้าเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว และ Halogenated aliphatic compound โมเลกุลของไอโซนไม่สามารถออกซิไดซ์สารพวกนี้ได้ ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของไอโซนกับฟีนอลแบบ Electrophilic Attack แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการทำปฏิกิริยาของไอโซนกับฟีนอลแบบ Electrophilic Attack

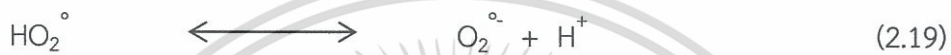
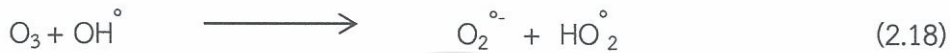
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเกิดผ่านแรดิคัล (Radical Mediate Oxidation)

การเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมเกี่ยวข้องกับแรดิคัล มีความซับซ้อน โดยขั้นแรกจะเกิดการสลายตัวของก๊าซโอโซน โดยถูกเร่งด้วยไฮดรอกไซด์ไอออนเพื่อให้เกิดเป็นตัวออกซิแดนท์ เช่น ไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งจะทำปฏิกิริยาทันทีกับสารอินทรีย์ กลไกการเกิดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

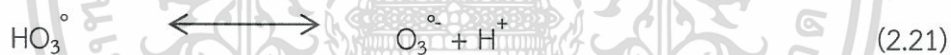
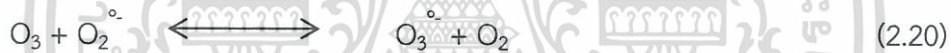
### 2.1) ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation Step)

ปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนกับก๊าซโอโซนทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคัล (Superoxide Anion,  $O_2^{\circ}$ ) และไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (Hydro peroxide Radical,  $HO_2^{\circ}$ ) ดังสมการที่ (2.18) ไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัลอยู่ในสมดุลกรด-เบส ดังสมการที่ (2.19)



### 2.2) ขั้นตอนลูกโซ่แรดิคัล (Radical Chain Step)

ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคัล ทำให้เกิดโอโซนไนด์แอนไอออนแรดิคัล (Ozonide Anion Radical,  $O_3^{\circ}$ ) ซึ่งจะสลายตัวทันทีเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ดังสมการที่ (2.20-2.22) ไฮดรอกซิลแรดิคัล ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับโอโซนดังสมการที่ (2.23-2.24)

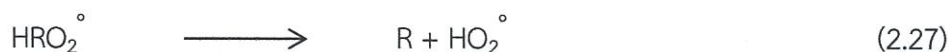
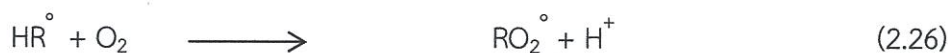


การสลายตัวของไฮโดรเตตระออกไซด์แรดิคัล (Hydrotetraoxide Radical,  $HO_4^{\circ}$ ) ไปเป็นออกซิเจนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แรดิคัล จะทำปฏิกิริยาลูกโซ่เริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ซึ่งสารใดก็ตามที่สามารถเปลี่ยนไฮดรอกซิลแรดิคัล ไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคัลหรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัล โดยทำหน้าที่เป็นตัวนำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ใหม่อีกครั้ง (Chain carrier) ถูกเรียกว่าตัวกระตุ้น (Promoter) โมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นได้และบางตัวของสารอินทรีย์จะมีกลุ่มฟังก์ชันซึ่งทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัลและทำให้เกิดแรดิคัลของสารอินทรีย์ ( $R^{\circ}$ ) ดังสมการที่ (2.25)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

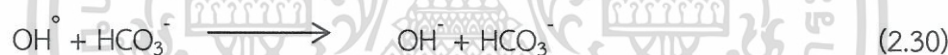
ถ้ามีออกซิเจนอยู่ในระบบสามารถเกิดออกแกนิคเปอร์ออกซีแรดิคอล (Organic Peroxy Radical, ROO<sup>•</sup>) ได้ ดังสมการที่ (2.26-2.28)



การสลายตัวของโอโซนถูกเริ่มต้นโดยไฮดรอกไซด์ไอออน นำไปสู่ปฏิกิริยาลูกโซ่และผลิตไฮดรอกซิลแรดิคอลที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แสดงถึงไฮดรอกซิลแรดิคอลมีครึ่งชีวิต (Half-Life) ที่สั้นมากๆ เช่น น้อยกว่า 10 ไมโครวินาที ( $\mu\text{s}$ ) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น  $10^{-4}$  โมลาร์

### 2.3) ขั้นตอนสุดท้าย

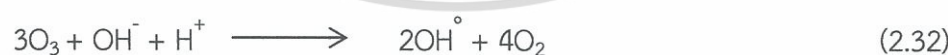
สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์บางตัว สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคอลทำให้เกิดแรดิคอลลำดับที่สอง (Secondary Radical) ซึ่งไม่สร้างซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอลหรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคอล จะเรียกสารเหล่านี้ว่า ตัวยับยั้ง (Inhibitor / Scavenger) ซึ่งสามารถหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่และยับยั้งการสลายตัวของโอโซนได้ ดังสมการที่ (2.29-2.30)



ความเป็นไปได้อื่นที่จะหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ คือการทำปฏิกิริยากันของแรดิคอลสองตัว ดังสมการที่ (2.31)

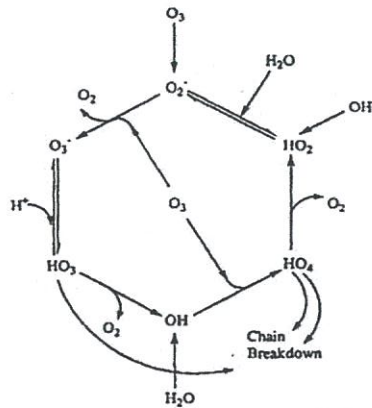


เมื่อรวมสมการทั้งหมดจะแสดงให้เห็นว่า 3 โมเลกุลของโอโซน จะให้ 2 โมเลกุลของไฮดรอกซิลแรดิคอล ดังสมการที่ (2.32)



### 2.7.4 ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำ

โอโซนเป็นก๊าซไม่เสถียรและอัตราการสลายตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและ pH เพิ่มขึ้นโอโซนจะสลายตัวเป็นออกซิเจนโดยแตกตัวให้ radical ต่างๆ ได้แก่ Hydroxyl radical ( $\text{OH}^{\bullet}$ ), Hydroperoxyl radical ( $\text{HO}_2^{\bullet}$ ), Hydrotrioxide radical ( $\text{HO}_3^{\bullet}$ ), Hydrotetraoxide radical ( $\text{HO}_4^{\bullet}$ ) ดังแสดงดังรูป 2.7 แรดิคอลต่างๆที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆจัดว่าเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรง



รูปที่ 2.7 ปฏิกริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ

ที่มา : Langlais *et al.*, 1991

การสลายตัวของโอโซนในน้ำเป็นลักษณะที่สำคัญที่นำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการโอโซนเนชัน เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแน่นอนสูงปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโอโซนคือ พีเอชของสารละลาย แสง UV ความเข้มข้นของโอโซน แรดิคคอลอิสระที่มีอยู่ในสารละลาย

### 2.7.5 การบำบัดสีในน้ำด้วยโอโซน

โอโซนเนชันเป็นการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโดยใช้โอโซน ( $O_3$ ) เป็นตัวออกซิไดซ์เชิงเอเจนต์ไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำซึ่งเช่นเดียวกับการใช้คลอรีน แต่โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีนเกือบ 1 เท่า (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

กลุ่มโมเลกุลที่ทำให้เกิดสีหรือเรียกว่า Chromophores โดยทั่วไปเป็น Polycyclic Organic Compounds ซึ่งมีทั้งพันธะเดี่ยวและพันธะคู่การบำบัดด้วยโอโซนทำให้พันธะคู่แตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงและเกิดการเปลี่ยนแปลงของสี

สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี เมื่อถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซน เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก โมเลกุลโอโซนทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี ทำให้สีของน้ำเสียลดต่ำลงสามารถบำบัดน้ำทิ้งที่มีปริมาณมากและสามารถลดค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่บำบัดได้ (วีรยา, 2549)

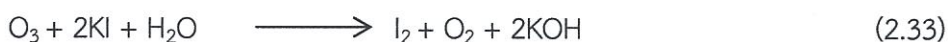
### 2.7.6 การวิเคราะห์หาปริมาณโอโซน

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโอโซนสามารถวัดได้ที่ Ozone generator, Contactor off-gases และปริมาณโอโซนที่เหลือใน Ozonized Water (Cheremisinoff, 1993)

วิธีการวัดปริมาณโอโซนโดยทั่วไป ได้แก่ Simple "sniff" test, Draeger-type detector tube, Wet chemistry potassium iodide method, Amperometric type instruments, Gas-phase chemiluminescence และ Ultraviolet radiation adsorption (255  $\mu\text{m}$ )

วิธี Wet chemistry potassium iodide method เป็นการวัดปริมาณโอโซนที่ผลิตจาก Ozone generator ในรูปสารละลาย (Solution phase) ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ทางเคมีอย่างง่าย อาศัยหลักการทำปฏิกิริยากันที่รวดเร็วระหว่างโอโซนและไอโอดด์ ดังสมการที่ (2.33)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากสมการที่ (2.33) สามารถวัดปริมาณโอโซนได้โดยการทำการไทเทรตไอโอดีนอิสระ (Liberated iodine ; KI) ด้วยโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate) และใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์

### 2.7.7 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชั่น (Gottschalk *et al.*, 2000)

#### 1) ค่าพีเอช

โอโซนสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่าพีเอช 2 สภาวะ คือค่าพีเอชเป็นกรด โอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ แต่ในพีเอชที่เป็นเบส โอโซนจะแตกตัวให้เป็นแรดิคัลซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าพีเอชเป็นกรด

#### 2) ค่าอัลคาไลน์ตี

น้ำเสียที่มีไอออนของ  $\text{HCO}_3^-$  และ  $\text{CO}_3^{2-}$  จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากไอออนดังกล่าวสามารถดักจับ  $\text{OH}^\circ$  ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าหรือสิ้นสุดลง

#### 3) อุณหภูมิ

โอโซนละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้โอโซนละลายน้ำได้น้อยลง ส่งผลให้โอโซนสลายตัวเป็นออกซิเจนได้รวดเร็ว แต่การเกิดแรดิคัล อุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการแตกตัวของโอโซนเป็นแรดิคัลเพิ่มมากขึ้น

#### 4) ปริมาณโอโซน

ปริมาณของโอโซนที่ป้อนเข้าไปในระบบ ถ้ามีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนมากทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซโอโซนก็มีมากขึ้น

## 2.8 สี (Color)

### 2.8.1 สีของน้ำธรรมชาติ

สีของน้ำเกิดจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่างๆที่ทั้งละลายและไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ อาจจะเกิดจากโลหะในธรรมชาติ หรือพวกแพลงตอน สีน้ำธรรมชาติมักจะมีสีเหลืองน้ำตาลหรือสีชา ซึ่งเกิดจากการเน่าเปื่อยของใบไม้ ใบหญ้า หรือพืชต่างๆ ที่มีสารประกอบลิกนิน (Lignin) เป็นส่วนประกอบย่อยสลายลิกนินจะทำให้เกิดสารแทนนิน (Tannin) สารประกอบประเภทฮิวมิก (Humic) และสารฟัลวิก (Fulvic) ซึ่งจะมีสีเหลืองชา ส่วนสีของน้ำเสียมักจะเกิดจากสารเคมีต่างๆที่ใช้ในอุตสาหกรรม (มันสิน, 2547)

### 2.8.2 ประเภทของสี (ไพฑูรย์, 2555)

สีจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. สีจริง (True color) คือสีของน้ำที่เป็นสีที่วัดได้หรือมองเห็นหลังจากที่แยกเอาสารแขวนลอยที่ทำให้น้ำขุ่นออกไปแล้ว นั่นคือ สีจริงเป็นสีที่เกิดจากสารที่ละลายในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สีปรากฏ (Apparent Color) คือสีของน้ำที่เป็นสีที่วัดได้หรือมองเห็นจริงๆ ในตัวอย่างน้ำโดยไม่มีการแยกเอาสารแขวนลอยที่ทำให้น้ำขุ่นออกไป นั่นคือสีปรากฏเป็นสีที่เกิดจากสารที่ละลายในน้ำและไม่ละลายได้ในน้ำรวมกัน

### 2.8.3 หลักเกณฑ์การวัดสีของน้ำ (ไพฑูริย์, 2555)

การวัดสีของน้ำควรจะทำกรวัดโดยทันที หากไม่สามารถวัดได้ทันทีที่ต้องเก็บตัวอย่างไว้ที่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เมื่อทำการวัดสีโดยทั่วไปจะทำการวัดจากสีจริง โดยต้องมีการกำจัด ตะกอนและสารแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่างก่อน การกำจัดสารแขวนลอยที่ใช้กันมี 2 วิธี คือ

1. วิธีการกรอง (Filtration System) โดยการกรองผ่าน Calcined filter aids และ Micrometallic filter crucible (ขนาดเฉลี่ยของรูพรุน 40 ไมครอน)

2. วิธีการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge System) โดยการหมุนเหวี่ยงที่ 1000 x g เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเนื่องจากสีของน้ำจะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของน้ำตัวอย่างมากโดยที่สีของน้ำจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปเมื่อวัดสีของน้ำแล้วจะรายงานผลการตรวจวัดสี พร้อมกับรายงานค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำนั้นไว้ด้วย เช่น สีของน้ำในบึงห้วยโจดเท่ากับ 15 หน่วย แพลตตินัมโคบอลต์ ที่ pH 7.8 เป็นต้น ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปมักจะตรวจวัดความเข้มสีของตัวอย่าง น้ำโดยกำหนดหลักเกณฑ์การวัดสีไว้ดังนี้ คือ

1. วัดความเข้มสีที่อุณหภูมิห้อง
2. วัดความเข้มสีที่สภาพตัวอย่างน้ำที่เป็นอยู่โดยแสดงค่าความเป็นกรด-ด่างของ ตัวอย่างน้ำขณะตรวจวัดสีไว้ในรายงานผลความเข้มสีด้วย
3. วัดความเข้มสีของตัวอย่างน้ำที่ปรับสภาพแล้วโดยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของตัวอย่างน้ำให้ได้เท่ากับค่ามาตรฐานที่กำหนด คือ 7.6 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก และ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วแต่กรณี แล้วรายงานผลความเข้มสีโดยกำหนดค่าพีเอชที่ 7.6

### 2.8.4 หลักการตรวจวัดค่าสี (ไพฑูริย์, 2555)

#### 1. Visual Comparison Method

เป็นวิธีการวัดค่าสีที่ง่ายที่สุด เป็นหลักการวัดค่าสีโดยใช้สายตา โดยนำตัวอย่างมาเทียบสีกับ สารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มสีที่แน่นอนหรืองานกระจกสี วิธีมาตรฐานคือการใช้สาร มาตรฐาน Platinum-cobalt ซึ่งมีเฉดสีเหลืองส้มถึงน้ำตาล สามารถทำการทดสอบโดยการเตรียม สารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆบรรจุลงในหลอด Nessler Tube จากนั้นนำหลอดไปวางบนพื้น สีขาว และนำน้ำตัวอย่างซึ่งบรรจุในหลอด Nessler Tube มาทำการเปรียบเทียบสีด้วยตาเปล่า และ รายงานผล โดยนิยมใช้เทียบสีกับน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเนื่องจากมีเฉดสีที่คล้ายคลึงกัน แต่จะไม่ นิยมใช้ในการตรวจวัดค่าสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมเนื่องจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมีเฉดสีที่แตกต่าง ออกไปหลายแบบ ทำให้การใช้สารมาตรฐาน Platinum-Cobalt ที่มีเฉดสี เป็นเหลืองอาจจะทำให้ การตรวจวัดไม่ครอบคลุมทุกเฉดสีการตรวจวัดวิธีนี้ทำได้ง่ายและสามารถหาอุปกรณ์ได้ไม่ยาก แต่ความแม่นยำค่อนข้างต่ำเนื่องจากการวัดด้วยสายตาของแต่ละคนย่อมไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. Spectrophotometric Method

เป็นวิธีการวัดค่าสีที่มีการนำเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์มาประยุกต์ใช้ เพื่อลดข้อด้อยของการวัดค่าสีในแบบ Visual Comparison Method โดยการใช้ชุดตรวจจับสัญญาณ (Detector) ของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำหน้าที่ตรวจวัดแทนการใช้สายตาของมนุษย์

การวัดค่าสีสามารถทำได้โดยนำน้ำตัวอย่างมากรองผ่าน Gooch filter ที่มีขนาด 40-60 ไมครอน ก่อนที่จะนำไปตรวจวัดค่าการส่องผ่านแสง (%Transmittance) ในช่วง 400-700 นาโนเมตร รวมทั้งสิ้น 10 หรือ 30 ความยาวคลื่น (Wave Length) ตามระบุในตารางที่ 2.11

การคำนวณทำได้โดยนำผลรวมของค่าการส่องผ่านที่ตรวจวัดได้ทั้งหมดไปคูณด้วยแฟคเตอร์ ก็จะได้ค่า X, Y และ Z ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้คำนวณค่า (x, y) ตามสมการที่ (2.34-2.35)

$$X = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2.34)$$

$$Y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2.35)$$

เมื่อได้ค่า (x, y) จะนำค่าที่ได้มาแปลผลผ่านกระดาษกราฟ (Chromaticity diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เพื่อรายงานออกมาเป็นค่าสี

## 3. Tristimulus Filter Method

เป็นการตรวจวัดค่าสีโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เช่นกัน แต่จะทำการตรวจสอบวัดค่าการส่องผ่านแสง (% Transmittance) เพียง 3 ความยาวคลื่นที่ 438, 540 และ 590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นตัวแทนของ Color Sensing Cone ในการรับรู้ค่าสีของตามมนุษย์เท่านั้น ทำให้หลักการนี้มีความยุ่งยากน้อยกว่าการ Spectrophotometric Method จากนั้น นำค่าการส่องผ่านแสงที่ได้มาคำนวณหาค่า X, Y และ Z ตามสมการที่ (2.36 - 2.38)

$$X = (T_3 \times 0.06) + (T_1 \times 0.25) \quad (2.36)$$

$$Y = T_2 \times 0.316 \quad (2.37)$$

$$Z = T_3 \times 0.374 \quad (2.38)$$

ค่า X, Y และ Z ที่ได้จะถูกนำมาคำนวณคู่อันดับ (x, y) เพื่อแปลผลผ่านกระดาษกราฟ (Chromaticity Diagram) เช่นเดียวกับกับหลักการ Spectrophotometer Method ต่อไป



ซึ่งค่า DE ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณค่า Calibration Factor (F) ดังสมการที่ (2.43)

$$F_n = (APHA)_n(b)/(DE)_n \quad (2.43)$$

b = ระยะทางเดินแสง (ความกว้างของคิวเวทท์, เซนติเมตร)

และนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณค่าสีในหน่วย ADMI ดังสมการที่ (2.44)

$$ADMI = (F)(DE)/b \quad (2.44)$$

วิธีทางเลือกของ Allen (Alternate Method)

เป็นหลักการทางเลือกที่ใช้ในการวัดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ โดยได้รวมวิธีการตรวจวัดตามหลักการ Spectrophotometric Method และ ADMI Tri-stimulus Method โดยได้ทำการเพิ่มจำนวนสำหรับคำนวณ โดยตรวจวัดค่าส่องผ่านแสง (% Transmittance) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ที่ค่าความละเอียด (Resolution) ทุกๆ 10 ความยาวคลื่น รวมทั้งสิ้น 31 ความยาวคลื่น ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลการตรวจวัดในปริมาณสูงกว่าและละเอียดการตรวจวัดเพียง 3 ความยาวคลื่นตามหลักการ ADMI Tri-stimulus Method

การคำนวณแบบ 30 ความยาวคลื่น เมื่อได้รับค่าการส่องผ่านแสงในแต่ละความยาวคลื่นตามตารางที่ 2.11 แล้วให้นำค่าในแต่ละแกนที่ท้ายตารางที่ 2.11 ค่าที่ได้จะเป็นค่า X, Y, Z ซึ่งจะนำค่านี้ไปแปลงค่า Munsell ตามตารางของ Adam – Nickerson (Wyszecki and Stiles, 2000) จะได้ค่าเป็น  $V_{xs}$ ,  $V_{ys}$  และ  $V_{zs}$  ดังสมการที่ (2.44) ต่อไป จะมีการวัดค่าส่องผ่านแสง เพิ่มเป็น 30 ความยาวคลื่นซึ่งมีความละเอียดมากกว่าการวิเคราะห์เพียง 3 ความยาวคลื่น

ตารางที่ 2.11 การเลือกความยาวคลื่นตามวิธีการวัดสีแบบ Spectrophotometric กำหนด

Ordinate	X	Y	Z
No.	Wavelength (nm)		
1	424.4	456.9	414.3
2*	435.5*	489.5	422.2*
3	443.9	500.4	426.3
4	452.1	508.7	429.4
5*	461.2*	515.2*	432.0*
6	474	520.6	434.3
7	531.2	525.4	436.5
8*	544.3*	529.8*	438.6*
9	522.4	533.9	440.6
10	558.7	537.7	442.5
11*	564.1*	541.4*	444.4*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 (ต่อ) การเลือกความยาวคลื่นตามวิธีการวัดสีแบบ Spectrophotometric

Ordinate No.	X	Y	Z
	Wavelength (nm)		
12	568.9	544.9	446.3
13	573.2	548.4	448.2
14*	577.4*	551.8*	450.1*
15	592.4	555.1	452.1
16	590.6	558.5	454
17*	599.6*	561.9*	455.9*
18	603.3	565.3	457.9
19	607	568.9	459.9
20*	610.9*	572.5*	462.0*
21	615	576.4	464.1
22	619.4	580.4	466.3
23*	624.2*	584.8*	468.7*
24	615	589.6	471.4
25	619.4	594.8	474.3
26*	624.2*	600.8*	477.7*
27	629.8	607.7	481.8
28	636.6	616.1	487.2
29*	645.9*	627.3*	495.2*
30	663	647.4	511.2
<b>Factors When 30 Ordinates Used</b>			
	0.03269	0.03333	0.03938
<b>Factors When 10 Ordinates Used</b>			
	0.09806	0.10000	0.11814

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bidhendi *et al.* (2006) ศึกษาผลของการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยใช้สารรวมตะกอนที่แตกต่างกันคือ สารส้ม ปูนขาว เพอริกคลอไรด์ เพอร์สซัลเฟต และแมกนีเซียมคลอไรด์ ประเมินประสิทธิภาพจากการบำบัดสี ความขุ่น ซีโอดี ค่าความขุ่น ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และปริมาณตะกอนจมน้ำ ทำการทดลองโดยใช้วิธีจาร์เทสในการหาค่าพีเอช และปริมาณสารรวมตะกอนที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ปริมาณน้ำเสยรวมกับปริมาณสารรวมตะกอนในการวิเคราะห์ 0.5 ลิตร ใช้เวลาปั่นกวนเร็ว 90 วินาที ต่อด้วยการปั่นกวนช้า 20 นาที แล้วปล่อยให้ตะกอนรวมตัวอีก 1 ชั่วโมง ซึ่งจากการทดลองพบว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม เพอริกคลอไรด์ เพอร์สซัลเฟต และแมกนีเซียมคลอไรด์ อยู่ที่ 8.2, 8.3, 9.4 และ 8.7 ตามลำดับ ปริมาณที่เหมาะสมอยู่ที่ 200 มิลลิลิตรต่อลิตร, 200 มิลลิลิตรต่อลิตร, 200 มิลลิลิตรต่อลิตร และ 500 มิลลิลิตรต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนปูนขาวพบว่าไม่เหมาะสมในการบำบัดสีโดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีเพียง 2.5 เปอร์เซ็นต์

Kreetacha T. *et al.* (2006) การศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ระบุสารประกอบต่างๆในน้ำเสียจากโรงงานเยื่อและกระดาษ (2) วัดผลการกำจัดสีและประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์โดยเครื่องปฏิกรณ์ฟองทั่วไป และ (3) วัดผลย่อยสลายทางชีวภาพในขั้นตอนของโอโซนเนชั่น โดยวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วย GS/MS ก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพและกระบวนการโอโซนเนชั่น ผลการทดลองพบว่า สารประกอบที่พบในน้ำเสียคือ สารประกอบกลีซินและสารประกอบอะลิฟาติก จากนั้นทำการวัดประสิทธิภาพการกำจัดสีและอัตราการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด นอกจากนี้ยังใช้ค่าสัมประสิทธิ์(k) และค่าบีโอดีต่อซีโอดีโดยทำการวัดการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียที่ผ่านโอโซน ผลการวิจัยพบว่า หลังจากเวลา 45 นาที น้ำเสียที่ผ่านโอโซนจะไม่มีสีมีประสิทธิภาพการกำจัดสีมากกว่า 90% และมีอัตราการผลิตโอโซน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการกำจัดสีอาจไม่สามารถกำจัดแร่ธาตุของสารอินทรีย์ได้ เพราะฉะนั้นโอโซนเนชั่นจึงไม่เกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด เพราะค่าบีโอดีต่อซีโอดีเพิ่มขึ้นจาก 0.10 ค่าสูงสุดเป็น 0.32 ที่อัตราการไหลโอโซน 4.0 ลิตรต่อนาที ยืนยันโดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์อันดับปฏิกิริยาสมการบีโอดีค่า K เพิ่มขึ้นจาก 0.21 day<sup>-1</sup> ค่าสูงสุดเป็น 0.47 day<sup>-1</sup> เวลาที่สัมผัสโอโซน 60 นาที ที่อัตราการไหล 4.0 ลิตรต่อนาที

Chen *et al.* (2009) ศึกษาเหตุผลของความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้โอโซน ในการลดสีในน้ำเสีย โดยใช้สีย้อมรีแอคทีฟเกรดการค้า 2 สี คือ Reactive Blue 19 และ Reactive Orange 13 โดยใช้ถังปฏิกริยาขนาด 14 ลิตร โดยแปรค่า ปริมาณโอโซน ระยะเวลา ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีสามารถลดจาก 2000 ADMI เป็น 200 ADMI โดยใช้เวลาในเกิดปฏิกิริยาที่ 30 นาที ใช้การให้โอโซนที่อัตรา 2.66 g/hr ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสี Reactive Blue 19 คือ พีเอช 3 และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสี Reactive Orange 13 คือ พีเอช 10 เนื่องจากผลของปฏิกิริยา ของโมเลกุลโอโซนและการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลจะเกิดได้ดีที่พีเอชต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**กฤษดา (2553)** ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วยสารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ สารส้ม ( $\text{Alum Al}(\text{SO}_4)_3$ ) โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เพอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) และใช้ Anion Polymer เป็นสารรวมตะกอน โดยใช้ตัวอย่างน้ำจากจุดสูบน้ำเข้าโรงงานประปาจากแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน พีเอชตั้งต้น รวมถึงชนิดและความเข้มข้นของพอลิเมอร์ พารามิเตอร์บ่งชี้ประสิทธิภาพการบำบัดคือ ความขุ่น TOC DOC  $\text{UV}_{254}$  และ THMFP ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณสารสร้างตะกอนทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นได้สูงขึ้น โดยการสร้างตะกอนและสภาวะที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ได้จริงในระบบประปาของน้ำจากแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน คือ Alum 40.0 mg/l Anion polymer 0.2 mg/l ที่ pH ตั้งต้น 7.0 และ Alum 60.0 mg/l Anion polymer 0.1 mg/l ที่ pH 6.0 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด พบว่าแม่น้ำแม่กลองมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าแม่น้ำท่าจีน เนื่องจากมีค่าความขุ่นน้อยกว่า

**ฉัฐวรรณ และชลอ (2558)** ศึกษาประสิทธิภาพการใช้กระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสี Reactive Red 2 เป็นองค์ประกอบ ผลการศึกษาพบว่า ก๊าซโอโซนสามารถกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีย้อม 100, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้อย่างรวดเร็ว ภายในช่วงเวลา 5 นาทีแรก สามารถกำจัดสีได้ถึง 99%, 90% และ 80% ตามลำดับ จากการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดสีย้อมพบว่าที่ค่าพีเอช 11 สามารถทำให้การกำจัดสีย้อมมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากการทดลองการใช้กระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนิกเกิล (Ni) ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดสีได้ถึง 99% ภายในเวลา 5 นาที ในขณะที่โอโซนอย่างเดียวกำจัดได้ภายในเวลา 9 นาที

**Achisa et al. (2016)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการสลายตัวด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งในการทำปฏิกิริยา และวิธีการโอโซนชั้น งานวิจัยนี้ทำการศึกษาไอออนของโลหะ Ag, Cu และ Fe ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่ใช้ในวิธีการสลายตัวด้วยแสงโดยใช้ตัวเร่งในการทำปฏิกิริยา ค่าความเข้มข้นของฟีนอลและการละลายอินทรีย์คาร์บอน (DOC) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) และการดูดกลืนแสงยูวี ( $\text{UV}_{254}$ ) ผลการทดลองพบว่าวิธีการโอโซนชั้นมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงกว่า เนื่องจากโอโซนสามารถแตกตัวเป็นเรดิคัลที่มีออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้มากกว่าการดูดซับของไทเทเนียมไดออกไซด์

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี

#### 3.1.1 อุปกรณ์

- 1) เครื่อง Jar test ยี่ห้อ Raypa รุ่น R. Espinar, S.L. บริษัท จรัญเอสโซซิเอทส์ จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2) เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Air Cleaner & Ozone) ยี่ห้อ Ozonic รุ่น Sunny บริษัท โอโซนิก กรุ๊ป จำกัด ประเทศไทย
- 3) เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH Meter) ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น UB-10 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 4) เครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo รุ่น Genesys 10S UV-Vis บริษัท Thermo Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 5) เครื่องวัดค่าออกซิเจนละลาย (DO Meter) ยี่ห้อ YSI รุ่น 5000-115Y ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 6) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler รุ่น ML204/01 ประเทศไทย
- 7) ชุดกรองสูญญากาศ ยี่ห้อ Eylea รุ่น Aspirator A-3S ประเทศไต้หวัน
- 8) เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) บริษัท Fisher scientific worldwide ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 9) ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UN Series ประเทศเยอรมัน
- 10) ตู้บ่ม (Incubator) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่  $20 \pm 2$  °C ยี่ห้อ JSR ประเทศเยอรมัน
- 11) เครื่องให้ความเย็น ยี่ห้อ Heto รุ่น CBN28-30 ประเทศเดนมาร์ก
- 12) เครื่องปั่นกวน ยี่ห้อ Harmony รุ่น HTS-1003 LMS บริษัท เมโทรเลีย เทคโนโลยีคอล ประเทศไทย
- 13) หลอดรังสี UV 18 W ประเทศ อินเดีย
- 14) หลอดย่อยสลาย (Digestion Vessels)
- 15) ขวดปิเอตีพร้อมจุก ขนาดมาตรฐาน 300 มิลลิลิตร
- 16) กระจาดขกรองใยแก้วและกระจาดขกรอง เบอร์ 42 บริษัท GE Healthcare Life Sciences ยี่ห้อ Whatman ประเทศสหราชอาณาจักร
- 17) เครื่องแก้วต่างๆ

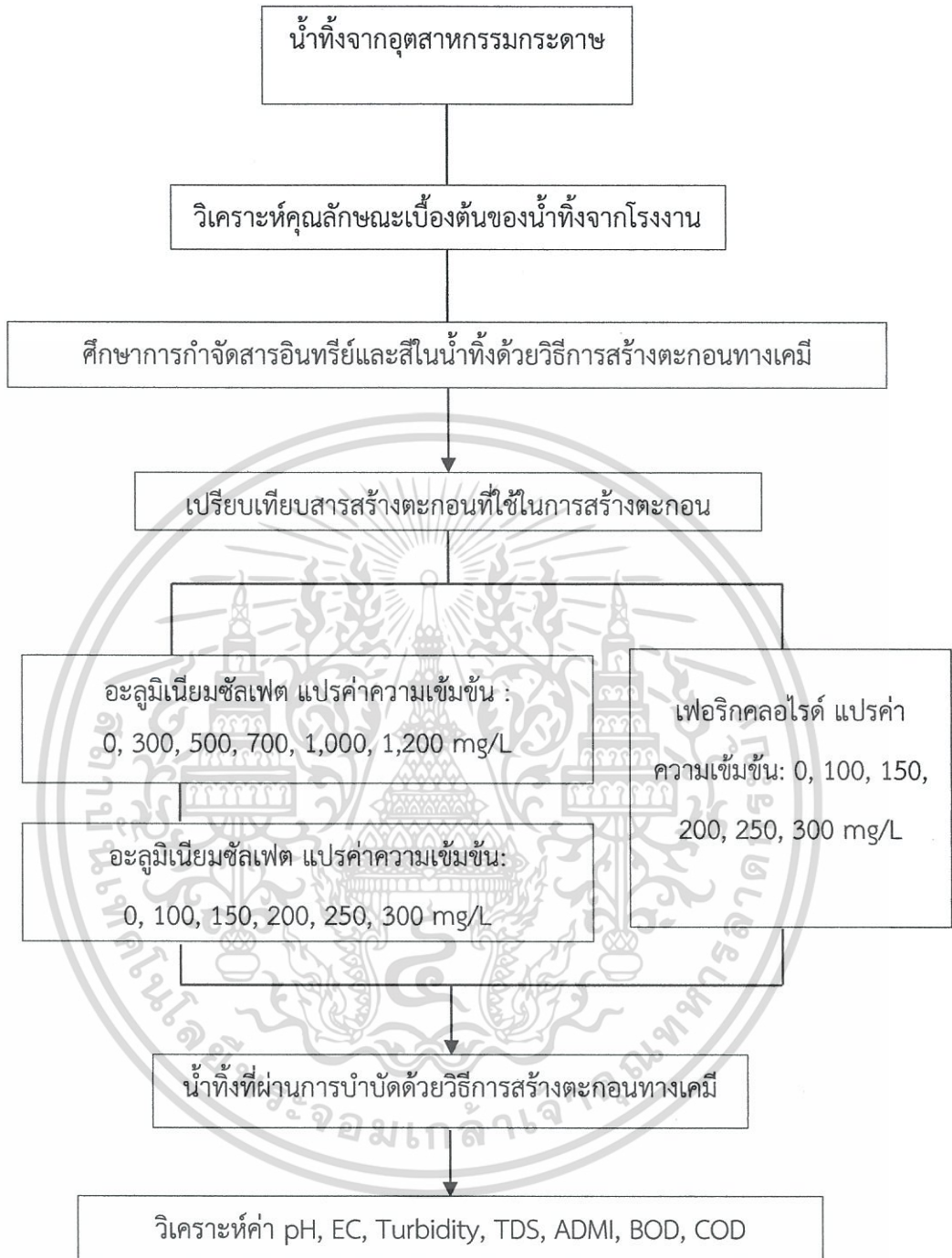
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 สารเคมี

- 1) เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) เกรดวิเคราะห์ ACS, Reag. Ph Eur ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2) อะลูมิเนียมซัลเฟต  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
- 3) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ของแข็งสีขาว, พื้นที่ผิว  $77.79 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  (ได้รับความอนุเคราะห์จาก วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)
- 4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent SpA, ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 5) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent SpA,
- 6) โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent SpA,
- 7) โพแทสเซียมไอโอเดต ( $\text{KIO}_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent SpA,
- 8) โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent SpA,
- 9) กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagent SpA,
- 10) โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 11) ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 12) น้ำแข็ง
- 13) น้ำกลั่น

### 3.2 การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยได้ศึกษาสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษ (รูปที่ 3.1) การเปรียบเทียบวิธีการกำจัดสารอินทรีย์และสี (รูปที่ 3.2) และศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีไอโซเนชัน ขั้นตอนการทำวิจัยสรุปดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการกำจัดสารอินทรีย์และสี  
ด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการเปรียบเทียบวิธีการกำจัดสารอินทรีย์และสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเซนชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 ตัวอย่างน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษแห่งหนึ่งใน  
นิคมอุตสาหกรรมบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ

### 3.2.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งโรงงานกระดาษ ด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี

#### 1. เตรียมสตั๊กสารละลาย

1.1 อะลูมิเนียมซัลเฟต โดยนำอะลูมิเนียมซัลเฟต จำนวน 5 กรัม ละลายน้ำกลั่นและ  
ปรับปริมาตรสุทธิให้เป็น 500 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.2 เฟอริกคลอไรด์ เตรียมโดยชั่งเฟอริกคลอไรด์ 16.65 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและ  
ปรับปริมาตรด้วยขวดวัดปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 2. การศึกษาประสิทธิภาพการสร้างตะกอนทางเคมี

2.1 วิเคราะห์คุณลักษณะน้ำทิ้งเริ่มต้นโดยใช้วิธีดังแสดงในตารางที่ 3.1

2.2 ปิเปตสารละลายอะลูมิเนียมซัลเฟตลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับ  
ปริมาตร บีกเกอร์ที่ 2-6 เป็นชุดทดลองและบีกเกอร์ที่ 1 เป็นชุดควบคุม ตามตารางที่ 3.2 จากนั้นนำ  
ตัวอย่างมาใส่เครื่องจลนศาสตร์โดยปั่นความเร็ว 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที และทำการปั่นวนซ้ำ  
ที่ความเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที บันทึกค่าปริมาตรตะกอน (mL) ทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา  
10 นาที และบันทึกต่อจนครบ 1 ชั่วโมง

2.3 นำตัวอย่างน้ำส่วนใส่ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความขุ่น ค่าพีเอช ค่าการนำ  
ไฟฟ้า ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด

2.4 เปลี่ยนสารสร้างตะกอนเป็นเฟอริกคลอไรด์โดยใช้ปริมาตรน้ำทิ้ง น้ำกลั่นและ  
ปริมาตรเฟอริกคลอไรด์ ตามตารางที่ 3.3 และบีกเกอร์ที่ 1 เป็นชุดควบคุม

3. นำตัวอย่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีที่ค่าความเข้มข้นของ  
อะลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอริกคลอไรด์ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองในข้อ 2

4. วิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำทิ้ง ได้แก่ ค่าความขุ่น  
ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด เอดีเอ็มไอ ซีไอดี บีไอดี (ดูรายละเอียดใน  
ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์	เอกสารอ้างอิง
pH	pH meter	-
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Closed reflux	APHA (2012) Part 5220 D
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	DO meter	APHA (2012) Part 5210 B
ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	Conductivity	APHA (2012) Part 2510
ปริมาณไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Iodometry	APHA (2012) Part 2350 E
ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	TDS meter	APHA (2012) Part 2540 C
ค่าความขุ่นสี (ADMI)	UV-Visible Spectrophotometry	APHA (2012) Part 2120 F
ค่าความขุ่น (NTU)	Turbidity meter	-

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟต ที่ใช้ในการทดลอง

บีกเกอร์ที่	ปริมาณ อะลูมิเนียม ซัลเฟต (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ปริมาตร น้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น ของอะลูมิเนียม ซัลเฟตใน น้ำตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	0	15	500	0
2	5	10	500	100
3	7.5	7.5	500	150
4	10	5	500	200
5	12.5	2.5	500	250
6	15	0	500	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.3 ความเข้มข้นเพอริกคลอไรด์ ที่ใช้ในการทดลอง

บีกเกอร์ที่	ปริมาณเพอริกคลอไรด์ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของเพอริกคลอไรด์ในน้ำตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	0	15	500	0
2	5	10	500	100
3	7.5	7.5	500	150
4	10	5	500	200
5	12.5	2.5	500	250
6	15	0	500	300

3.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีโรงงานกระดาษด้วยวิธีโฟโตไลซิส โฟโตแคทาไลซิส และโอโซนชัน

3.2.3.1 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโฟโตไลซิส

1. เติมน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีที่สภาวะเหมาะสม ที่ได้จากข้อ 3.2.2 ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
2. เปิดเครื่อง UV ในตู้ที่บรรจุหลอด UV-C หลอดละ 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด โดยอุ่นเครื่อง (Warm up) อย่างน้อย 10 นาที
3. นำตัวอย่างน้ำที่เตรียมไว้ใส่ในตู้ UV โดยวางบนเครื่องปั่นกวนทำการฉายรังสี UV เป็นเวลา 30 นาที
4. นำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการฉายรังสี UV ไปกรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 42 ขนาด 2.5 ไมโครเมตร จากนั้นวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
5. วิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้ง
6. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโฟโตแคทาไลซิส

1. เติมน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีที่สภาวะเหมาะสม ที่ได้จากข้อ 3.2.2 ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เติมน้ำ  $\text{TiO}_2$  40 มิลลิกรัม จากนั้นนำไปใส่ในเครื่อง Ultrasonic 48 เฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อให้  $\text{TiO}_2$  กระจายตัว
2. เปิดเครื่อง UV ในตู้ที่บรรจุหลอด UV-C หลอดละ 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด โดยอุ่นเครื่อง (Warm up) อย่างน้อย 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในนามของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำตัวอย่างน้ำที่เตรียมไว้ใส่ตู้ UV โดยวางบนเครื่องปั่นกวนในระนาบเดียวกัน ทำการฉายรังสี UV เป็นเวลา 30 นาที

4. นำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการฉายรังสี UV ทำการกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 mm จากนั้นวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

5. วิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้ง

6. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### 3.2.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโอโซนเช่น

1. เติมตัวอย่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีที่สภาวะเหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.2 ลงขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร.

2. หุ้มขวดรูปชมพู่ด้วยกระดาษฟลอยด์เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับแสง เติมโอโซนลงในตัวอย่างน้ำด้วยเครื่อง Ozone generator เป็นเวลา 30 นาที

3. นำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการเติมโอโซน ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ขนาด 2.5 ไมโครเมตร จากนั้นวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

4. คำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้ง

5. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### 3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโอโซนเช่น

#### 3.2.4.1 ศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้ง

1. เติมตัวอย่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร จำนวน 4 ใบ หุ้มขวดรูปชมพู่ด้วยกระดาษฟลอยด์เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับแสง

2. แปรค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำทิ้งเป็น 3, 5, 9, 11 และพีเอชเริ่มต้น โดยปรับค่าพีเอชด้วย NaOH 1 N หรือ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 N

3. นำตัวอย่างน้ำเติมโอโซนด้วยเครื่อง Ozone generator ขนาด 200 mg/hr เป็นเวลา 30 นาที

4. นำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการเติมโอโซน ทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 จากนั้นวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

5. ชุดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-4 แต่ไม่เติมโอโซน

#### 3.2.4.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเติมโอโซนที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้ง

1. เติมตัวอย่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตร 200 มล. จำนวน 4 ใบ หุ้มขวดรูปชมพู่ด้วยกระดาษฟลอยด์เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับแสง

2. โดยนำตัวอย่างน้ำเติมโอโซนด้วยเครื่อง Ozone generator แปรค่าระยะเวลาที่สัมผัสโอโซนเป็น 0, 5, 15, 30, 45, 60 นาที โดยกำหนดค่าพีเอชที่เหมาะสมตามข้อ 3.2.4.1
3. นำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการเติมโอโซน ทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 จากนั้นวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
4. ชุดควบคุมทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 แต่ไม่เติมโอโซน
5. คำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมดและสีในน้ำทิ้ง

### 3.2.5 ศึกษาปริมาณโอโซนที่ใช้ในปฏิกิริยาของการกำจัดสารอินทรีย์และสี

การวัดปริมาณก๊าซโอโซนที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสีโดยอาศัยการทำปฏิกิริยากับ KI 2 % มีขั้นตอนการทดลองดังนี้ (รูปที่ 3.4 )

#### 3.2.5.1 วัดปริมาณก๊าซโอโซนของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน

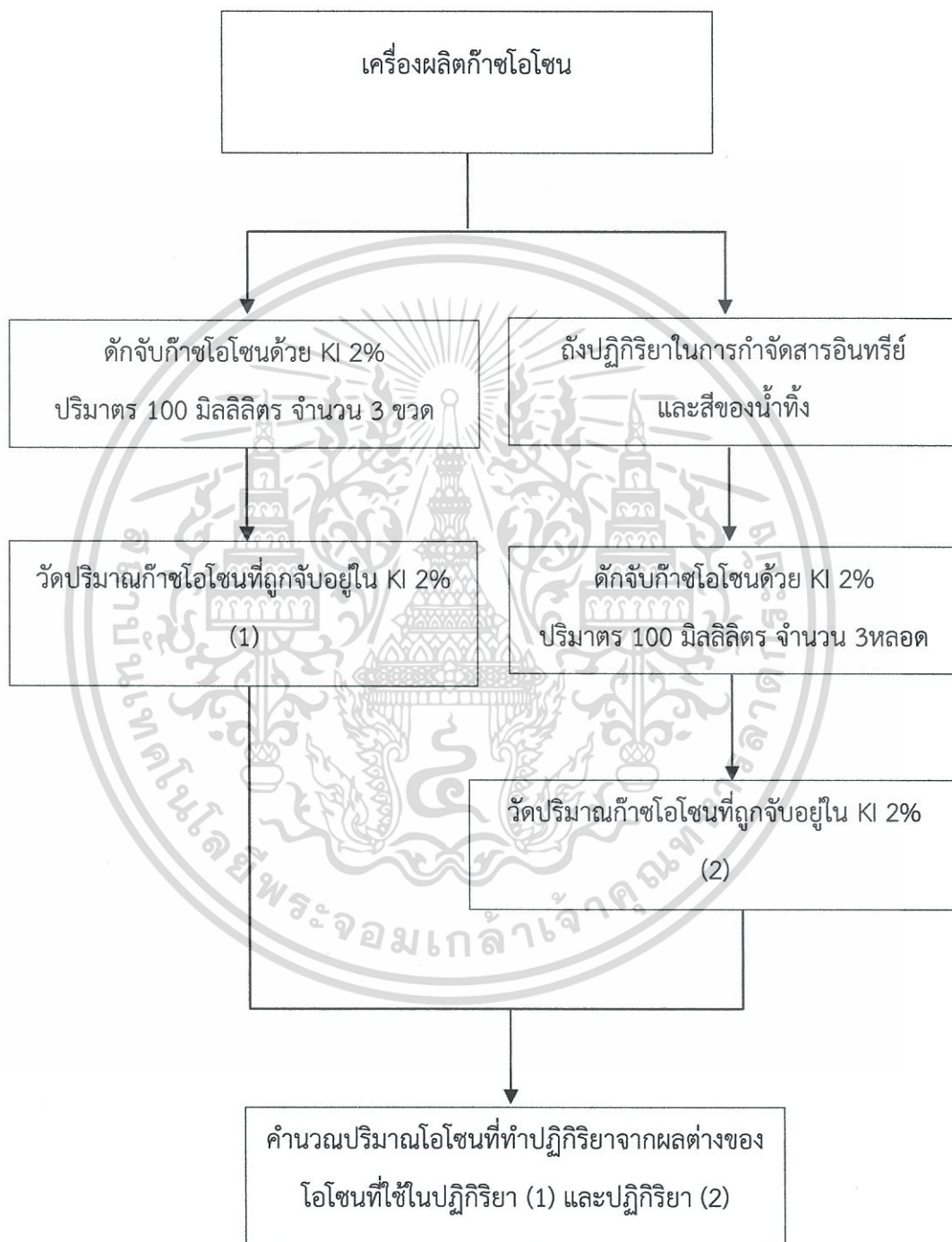
1. เติมน้ำละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ความเข้มข้น 2 % ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด ปิดฝาด้วยจุกยางสีดำที่ต่อด้วยท่อนำก๊าซ
2. ต่อเครื่องกำเนิดโอโซน นำขวดรูปชมพู่ที่บรรจุ KI 2% ดังรูปที่ 3.5 (ก)
3. เลือกระบบตั้งเวลาอัตโนมัติที่ฟังก์ชัน 40/20 นาที เป็นเวลา 45 นาที
4. เปิดเครื่องผลิตโอโซน
5. เมื่อครบกำหนดเวลา นำขวดรูปชมพู่ทั้ง 3 ใบ (มีสีเหลืองหรือส้ม) 100 มิลลิลิตร เติม 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ขวดละ 3 มิลลิลิตร
6. นำมาไทเทรตกับสารละลาย 0.1 N Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จนเป็นสีเหลืองอ่อน
7. เติมน้ำแบ่ง 1 มิลลิลิตร สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อไปจนสีน้ำเงินหายไป
8. บันทึกปริมาตรของสารละลาย 0.1 N Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณก๊าซโอโซนที่ผลิต
9. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

#### 3.2.5.2 วัดปริมาณก๊าซโอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับตัวอย่างน้ำทิ้ง

1. เติมน้ำละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ความเข้มข้น 2 % ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่จำนวน 3 ขวด ปิดฝาด้วยจุกยางสีดำที่ต่อด้วยท่อนำก๊าซ
2. เติมตัวอย่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.2.2 จำนวน 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ต่อเครื่องกำเนิดโอโซน นำขวดรูปชมพู่ที่บรรจุ KI 2% ดังรูปที่ 3.5 (ข)
4. เลือกระบบตั้งเวลาอัตโนมัติที่ฟังก์ชัน 40/20 นาที เป็นเวลา 45 นาที
5. เปิดเครื่องผลิตโอโซน
6. เมื่อครบกำหนดเวลา นำขวดรูปชมพู่ทั้ง 3 ใบ (มีสีเหลืองหรือส้ม) 100 มิลลิลิตร เติม 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ขวดละ 3 มิลลิลิตร
7. นำมาไทเทรตกับสารละลาย 0.1 N Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จนเป็นสีเหลืองอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

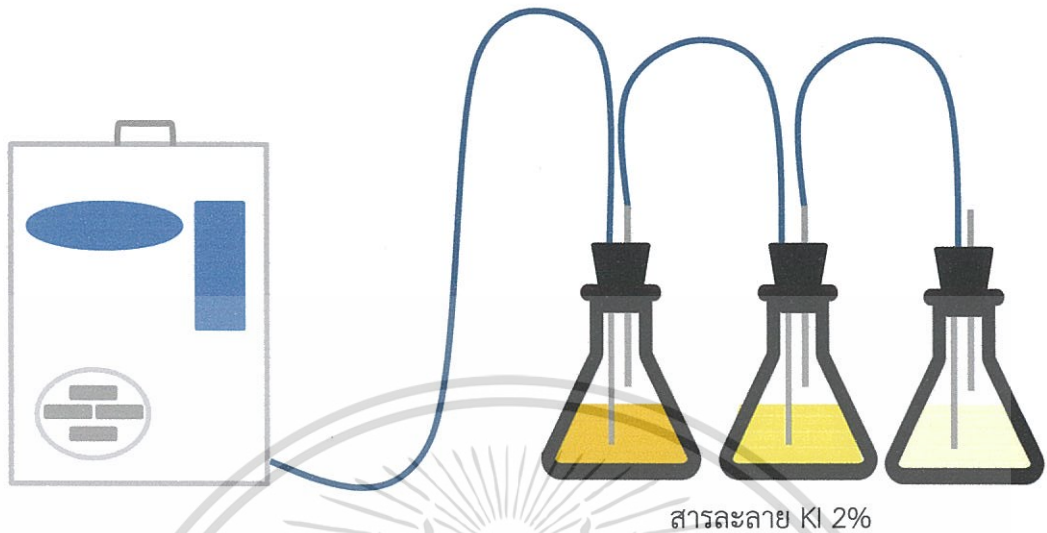
8. เติมน้ำแบ่ง 1 มิลลิลิตร สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อไปจนสีน้ำเงินหายไป
9. บันทึกปริมาตรของสารละลาย 0.1 N  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณก๊าซไอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา
10. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการหาปริมาณก๊าซไอโซนที่ทำปฏิกิริยากับน้ำทิ้ง

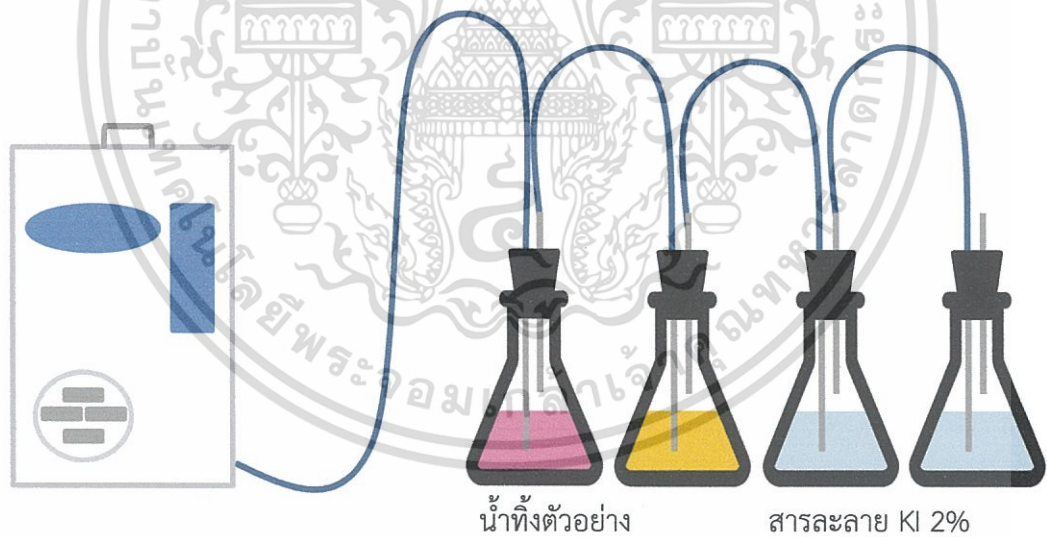
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)



สารละลาย KI 2%

(ข)



น้ำทิ้งตัวอย่าง

สารละลาย KI 2%

รูปที่ 3.5 การวัดปริมาณโอโซนที่ใช้ในปฏิกิริยา

(ก) ปริมาณโอโซนที่ผลิต

(ข) ปริมาณโอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ

คุณลักษณะน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษมีสารอินทรีย์และสีที่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ

พารามิเตอร์	ผลที่วิเคราะห์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม <sup>(1)</sup>
คุณลักษณะทางกายภาพ		
- สี (เอดีเอ็มไอ)	4,796.37	ไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ
- สีที่มองเห็น	สีดำ	ไม่มี
- กลิ่น	***	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
- ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$461.33 \pm 28.36$	ไม่มี
- ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$248.00 \pm 24.02$	กรณีระบายลงแหล่งน้ำไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าความขุ่น (NTU)	$10,166.67 \pm 230.94$	ไม่มี
คุณลักษณะทางเคมี		
- pH	$7.07 \pm 0.15$	5.5-9.0
- COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$1,973.33 \pm 805.32$	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
- BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	162.50	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

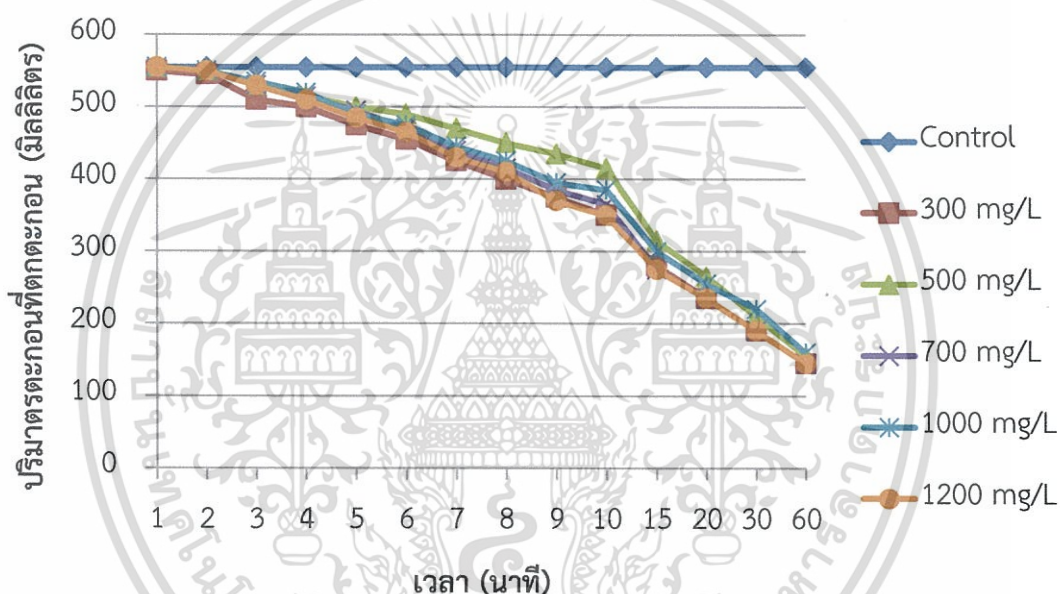
หมายเหตุ : \*\*\*เหม็นมาก, \*\*เหม็นปานกลาง, \*เหม็นเล็กน้อย

ที่มา : <sup>(1)</sup> ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมนิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม พ.ศ. 2559

## 4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี

### 4.2.1 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต

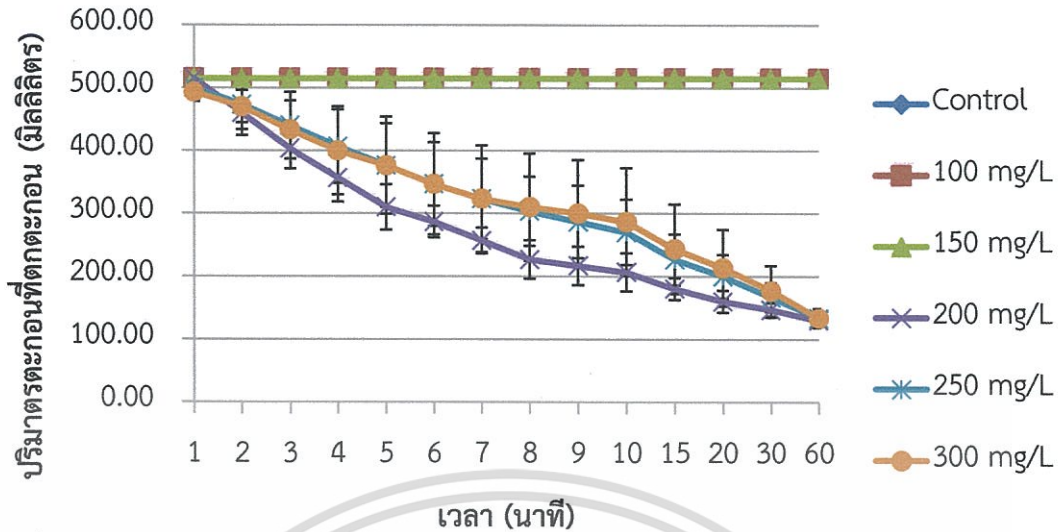
จากผลการศึกษาการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต โดยแปรค่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ 300-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกอนทางเคมีใกล้เคียงกับความเข้มข้นอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.1 ภาคผนวก ข) จากวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA พบว่าที่ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟต 300 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-1.1 ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.1 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมี โดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 300-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากนั้นศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.2 ภาคผนวก ข) จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA พบว่าที่ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟต 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-1.1 ภาคผนวก ค) เนื่องจากอะลูมิเนียมซัลเฟตมีประจุเป็นบวกที่เติมลงไป ทำให้เกิดการสะเทินประจุที่ผิวของสารแขวนลอยทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงและรวมตัวกันเป็นตะกอนใหญ่ขึ้นแล้วตกลง เมื่อมีการเติมอะลูมิเนียมซัลเฟตมากเกินไปประจุบวกมีการผลักรันส่งให้ประสิทธิภาพการสร้างและรวมตะกอนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กฤษดา (2553)

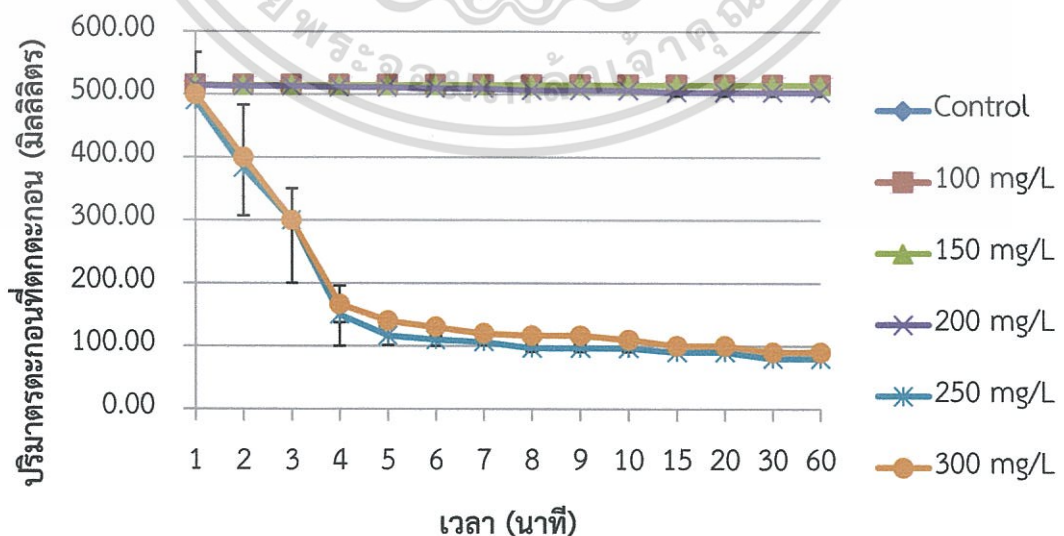
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้เอซอคลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100-300 mg/L

#### 4.2.2 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้เพอริกคลอไรด์

จากผลการศึกษาความเข้มข้นที่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้เพอริกคลอไรด์ ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเพอริกคลอไรด์ที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถตกตะกอนสารในน้ำทิ้งได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-1.3 ภาคผนวก ข) จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-1.2 ภาคผนวก ค) เนื่องจากเพอริกคลอไรด์มีประจุเป็นบวกที่เต็มลงไป ทำให้เกิดการสะเทินประจุที่ผิวของสารแขวนลอยทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงและรวมตัวกันเป็นตะกอนใหญ่ขึ้นแล้วตกลงเมื่อมีการเติมเพอริกคลอไรด์มากเกินไปทำให้ประจุบวกมีการปลั๊กกันส่งผลให้ประสิทธิภาพการสร้างและรวมตะกอนลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กฤษดา (2553)



รูปที่ 4.3 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้เพอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 100-300 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนทางเคมีโดยที่ความเข้มข้นเหมาะสมนี้การบำบัดด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟตสามารถกำจัดสีได้ดีกว่าการบำบัดด้วยเฟอริกคลอไรด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 นอกจากนี้อะลูมิเนียมซัลเฟตยังมีราคาถูกและมีความเป็นพิษน้อยกว่าเฟอริกคลอไรด์ จึงเลือกใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารสร้างตะกอนในการทดลองต่อไป ทั้งนี้ค่าการนำไฟฟ้าและค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังการบำบัดด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอริกคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเพราะสารสร้างตะกอนทางเคมี เมื่ออยู่ในน้ำจะแตกตัวให้ออออน (ionization) ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าและของแข็งละลายในน้ำทั้งหมด กรรณิการ์ (2544)

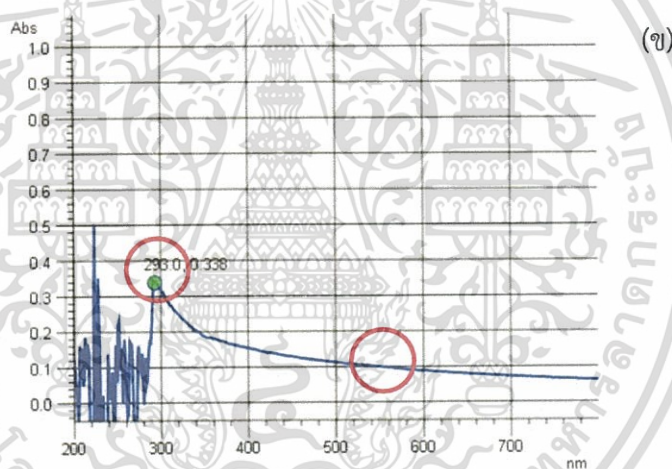
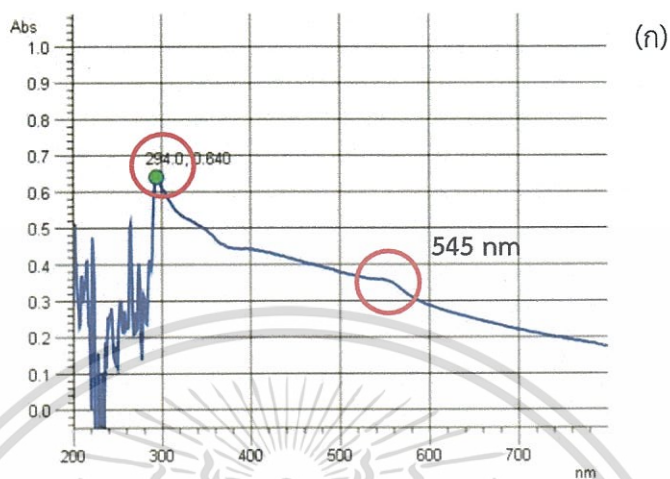
ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของน้ำทิ้งหลังกำจัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี

พารามิเตอร์	ก่อนการกำจัด	หลังการบำบัดด้วย		ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม <sup>(1)</sup>
		Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 200 mg/L	FeCl <sub>3</sub> 250 mg/L	
<b>คุณลักษณะทางกายภาพ</b>				
- สี (เอดีเอ็มไอ)	4,796.37	165.05	722.83	ไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ
- สีที่มองเห็น	ดำ	ชมพู	ม่วง	ไม่มี
- กลิ่น	***	**	**	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
- ค่าการนำไฟฟ้า (µS/cm)	461.33 ±28.36	529.33 ±82.57	563.00 ±39.40	ไม่มี
- ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	248.00 ±24.02	327.33 ±34.44	303.67 ±15.50	กรณีระบายลงแหล่งน้ำ ต้องไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าความขุ่น (NTU)	10,166.67 ±230.94	46.00 ±23.43	51.33 ±18.61	ไม่มี
<b>คุณลักษณะทางเคมี</b>				
- pH	7.07±0.15	5.73±0.48	5.75±0.45	5.5-9.0
- COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,973.33 ±805.32	192.00 ±69.74	170.67 ±24.44	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
- BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	162.50	26.75	37.05	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

หมายเหตุ : \*\*\*เหม็นมาก, \*\*เหม็นปานกลาง, \*เหม็นเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับวิธีโฟโตไลซิส โฟโตแคทาไลซิส และโอโซนชัน

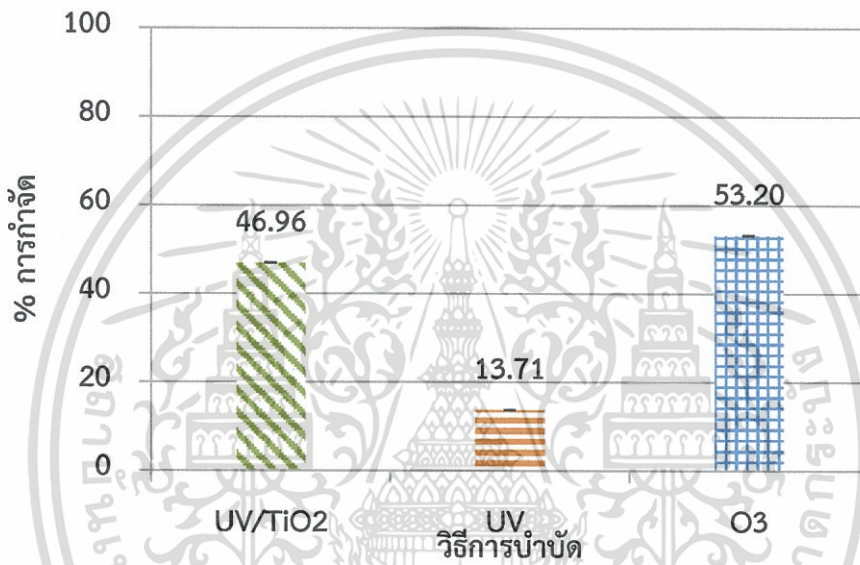


รูปที่ 4.4 ความยาวคลื่นสูงสุด (ก) ก่อนการกำจัด (ข) หลังการกำจัด

จากการวิเคราะห์หาความยาวคลื่นของน้ำทิ้งตัวอย่างจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษพบว่ามีความยาวคลื่นสูงสุดที่ 294 นาโนเมตร และมีพีคที่ความยาวคลื่นที่ 545 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) ที่ความยาวคลื่น 294 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นของสารอินทรีย์ ส่วนความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นของสีชมพู หลังการบำบัดด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 294 นาโนเมตร ลดลงและไม่พบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 545 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข) เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษมีปริมาณสารอินทรีย์สูงจึงพบค่าความยาวคลื่นสูงสุดในช่วงค่าการดูดกลืนแสงของสารอินทรีย์ งานวิจัยนี้จึงทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 294 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งที่ผ่านวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับวิธีโฟโตไลซิส โฟโตแคทาไลซิส และโอโซนชั้นเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำน้ำทิ้งที่ผ่านการกำจัดไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 294 นาโนเมตร ได้ผลการทดลองดังแสดงใน รูปที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-2 ภาคผนวก ข) จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA พบว่า วิธีโฟโตไลซิส โฟโตแคทาไลซิส และโอโซนชั้น มีประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพบว่าวิธี โอโซนชั้นเหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีร่วมกับวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chen *et al.* (2009)

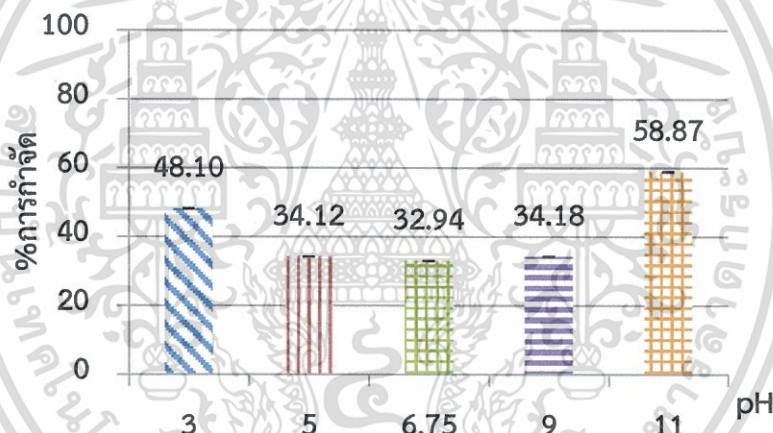


รูปที่ 4.5 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับวิธีโฟโตไลซิส โฟโตแคทาไลซิส และโอโซนชั้น

#### 4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการโอโซนชั้น

##### 4.4.1 ผลของค่าพีเอช

รูปที่ 4.6 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.1 ภาคผนวก ข) ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟตโดยแปรค่าพีเอช 3, 5, 9, 11 และไม่ปรับพีเอช (6.75) ผลการทดลองพบว่า พีเอช 11 เป็นพีเอชที่เหมาะสม สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ 58.87% และกำจัดสีได้ เนื่องจากโอโซนสามารถแตกตัวเป็นแรดิคอลได้ดีในสภาวะที่เป็นเบส ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA พบว่า พีเอช 11 และพีเอชอื่นๆ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-3.1 ภาคผนวก ค) เมื่อทำการบำบัดด้วยโอโซนแล้วค่าพีเอชจะลดลง เนื่องจากก๊าซโอโซนเข้าไปแตกโครงสร้างสีของน้ำทิ้งทำให้เกิดเป็นกรดอินทรีย์และกรดอินทรีย์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ธีญารรณ และชลอ (2559)



รูปที่ 4.6 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโอโซนชั้น

##### ตารางที่ 4.3 คุณลักษณะของสีที่มองเห็นต่อค่าพีเอช

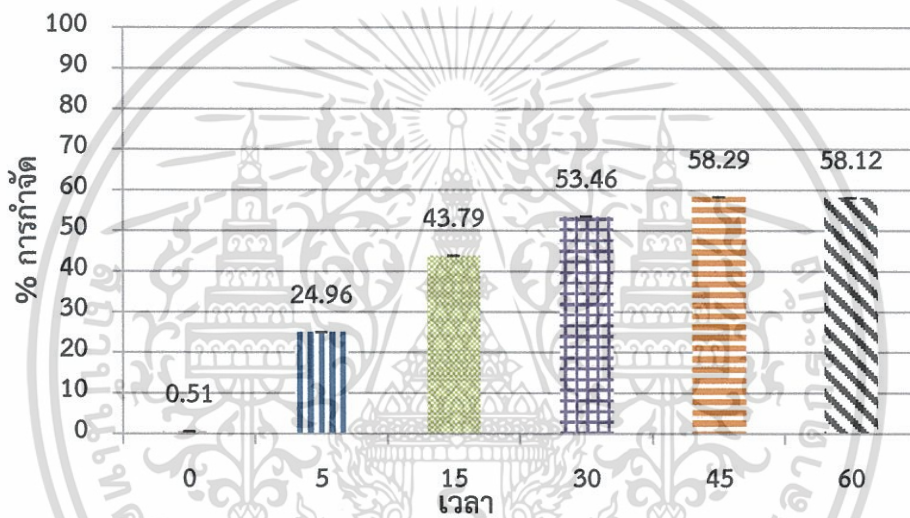
ค่าพีเอช	สีที่มองเห็น
3	+++
5	++++
6.75	++++
9	++++
11	+

หมายเหตุ : + ใส, +++ มีสีชมพูเล็กน้อย, ++++ มีสีชมพูเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 ผลของระยะเวลาสัมผัส

รูปที่ 4.7 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-3.2 ภาคผนวก ข) แสดงผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสี พบว่าเมื่อระยะเวลาในการสัมผัสมากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีจะมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยที่ระยะเวลาสัมผัส 45 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ 58.29% และกำจัดสีได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี ANOVA พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลา 45 และ 60 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ดูรายละเอียดในตารางที่ ค-3.2 ภาคผนวก ค ) จึงเลือกเวลาที่ 45 นาที ในการกำจัดเพราะใช้ระยะเวลาในการกำจัดน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ธีญวรรณ และชลอ (2559)



รูปที่ 4.7 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโอโซนชั้น

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะของสีที่มองเห็นต่อระยะเวลาสัมผัส

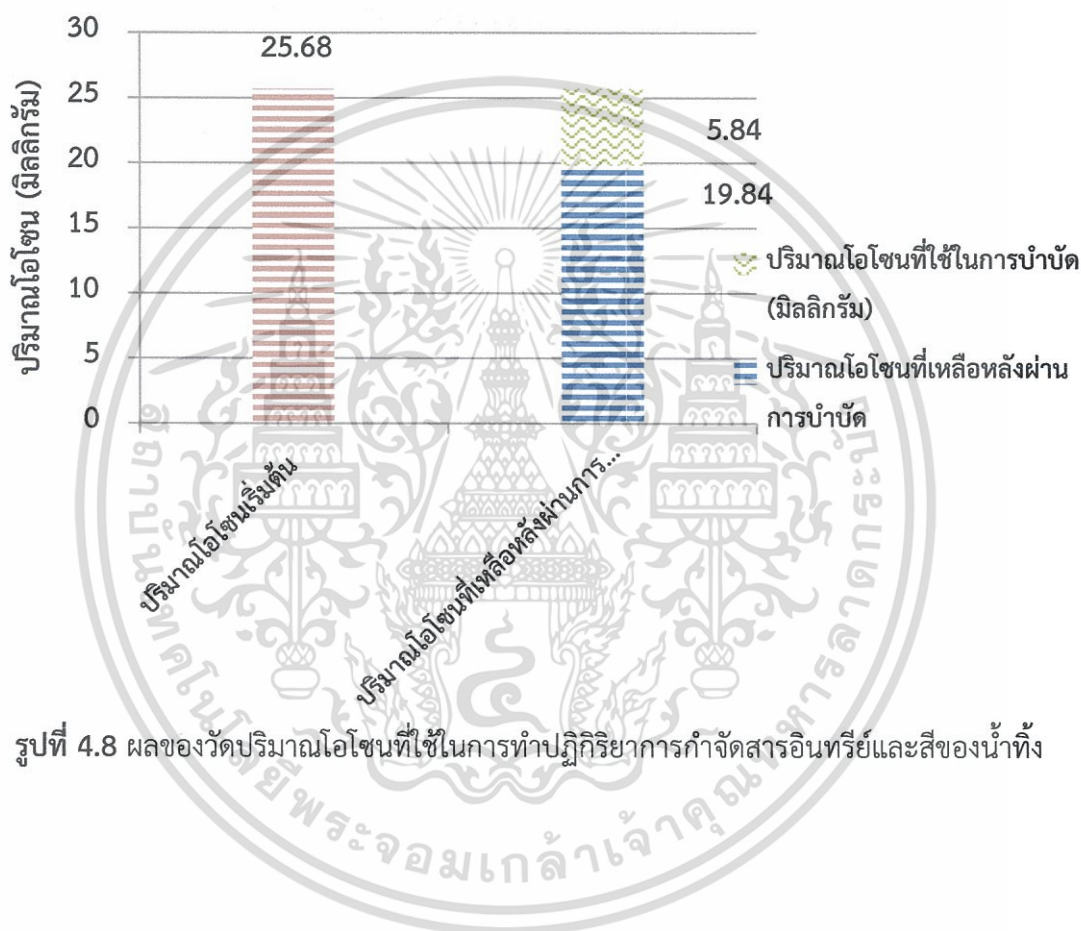
ระยะเวลา	สีที่มองเห็น
0	+++
5	+++
15	++
30	+
45	-
60	-

หมายเหตุ : +++ สีชมพูมาก, ++ สีชมพูปานกลาง, + สีชมพูน้อย, - ใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 ผลของปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทดลอง

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสี คือ พีเอช 11 และระยะเวลาสัมผัส 45 นาที จากนั้นทำการวัดปริมาณโอโซนที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยใช้ KI 2% ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในการดักจับก๊าซโอโซนที่ผ่านน้ำทิ้ง ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-4 ภาคผนวก ข) พบว่าปริมาณโอโซนก่อนผ่านน้ำทิ้ง เท่ากับ  $25.68 \pm 0.64$  มิลลิกรัม และเมื่อหลังผ่านน้ำทิ้ง เท่ากับ  $19.84 \pm 4.66$  มิลลิกรัม ดังนั้นปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 5.84 มิลลิกรัม



รูปที่ 4.8 ผลของวัดปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำทิ้ง

#### 4.5 คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษหลังการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชั่น

จากวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษหลังการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชั่น ผลการทดลองพบว่า น้ำทิ้งก่อนการกำจัดสารอินทรีย์และสีจะมีค่าสี ซีไอดี บีไอดี ที่สูงเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม เมื่อผ่านการบำบัดด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชั่นพบว่าสามารถกำจัดสีและซีไอดีให้ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน อย่างไรก็ตาม ค่าบีไอดียังคงสูงกว่าค่ามาตรฐานเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4.5 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข-6,ข-7 ภาคผนวก ข) ทั้งนี้เพราะโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เป็นพวกเบนซีนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อนซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาสามารถกำจัดได้ยาก กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khadhraoui *et al.* (2008)

ตารางที่ 4.5 คุณลักษณะของน้ำทิ้งหลังการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชั่น

พารามิเตอร์	ก่อนการกำจัด	หลังการบำบัดด้วย $Al_2(SO_4)_3$ ร่วมกับ $O_3$	% การกำจัด	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม <sup>(1)</sup>
คุณลักษณะทางกายภาพ				
- สี (เอดีเอ็มไอ)	4,796.37	8.78	99.82	ไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ
- สีที่มองเห็น	ดำ	ใส	-	-
- กลิ่น	***	**	-	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
- ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu S/cm$ )	461.33 $\pm 28.36$	1,520.0	-	ไม่มี
- ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	248.00 $\pm 24.02$	800.00	-	กรณีระบายลงแหล่งน้ำ ต้องไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าความขุ่น (NTU)	10,166.67 $\pm 230.94$	-	-	ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)คุณลักษณะของน้ำทิ้งหลังการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนชั้น

พารามิเตอร์	ก่อนการกำจัด	หลังการบำบัดด้วย $Al_2(SO_4)_3$ ร่วมกับ $O_3$	% การกำจัด	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม <sup>(1)</sup>
คุณลักษณะทางเคมี				
- pH	7.07±0.15	9.49	-	5.5-9.0
- COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,973.33 ±805.32	44.12 ±19.10	97.76	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
- BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	162.50	32.30	80.12	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

หมายเหตุ : \*\*\*เหม็นมาก, \*\*เหม็นปานกลาง, \*เหม็นเล็กน้อย

ที่มา : <sup>(1)</sup>ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมนิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลวิจัย

#### 1. การสร้างตะกอนทางเคมี

- สารเคมีที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนทางเคมีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ คือ อะลูมิเนียมซัลเฟตที่ค่าความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพอริกคลอไรด์ที่ค่าความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม อะลูมิเนียมซัลเฟต มีปริมาณการใช้ ราคาและความเป็นพิษต่ำกว่า จึงเลือกอะลูมิเนียมซัลเฟตใช้ในการทดลอง

#### 2. วิธีไอโซเนชั่น

- การศึกษาค่าพีเอชที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษที่เหมาะสม คือ พีเอช 11

- ระยะเวลาสัมผัสไอโซนที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ เท่ากับ 45 นาที

- เครื่องผลิตก๊าซไอโซนที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสี อัตราการผลิต 200 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ตั้งเวลาอัตโนมัติที่ฟังก์ชัน 40/20 นาที ปริมาณไอโซนที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมดและสี คือ 5.84 มิลลิกรัม

การกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามด้วยการเติมไอโซน 5.84 มิลลิกรัม ที่พีเอช 11 เป็นเวลา 45 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมโดยสามารถกำจัดสีและซีไอได้ดีให้ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน แต่ค่าบีโอดียังคงสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมเล็กน้อย

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการวิเคราะห์ชนิดของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ
2. ควรมีการวิเคราะห์โลหะหนักในการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ

## เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2539. มาตรฐานคุณภาพน้ำ. [Online] Available: [http://www.pcd.go.th/Info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html](http://www.pcd.go.th/Info_serv/reg_std_water04.html) เข้าถึงวันที่ 6 ตุลาคม 2559
- กรมควบคุมมลพิษ. 2543. โครงการจัดทำดัชนีด้านสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม. ม.ป.ป. กรุงเทพฯ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
- กรมควบคุมมลพิษ. 2544. โครงการสาธิตเทคโนโลยีการลดของเสียในอุตสาหกรรมกระดาษ. เล่มที่ 1/2. กรุงเทพฯ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2554. อุตสาหกรรมกระดาษ. [Online] Available: [http://www2.diw.go.th/Standard/Web/pane\\_files/Industry15.asp](http://www2.diw.go.th/Standard/Web/pane_files/Industry15.asp) เข้าถึง วันที่ 2 กันยายน 2559
- กฤษฎา ทองนาค. (2553). การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในระบบน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนกรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน. วิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยศิลปากร
- เจตนิพิฐ สุดทองคง, ณัฐพงศ์ ไพรยสุรินทร์ และนายยา สุขประเสริฐ. 2552. “การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมรีแอคทีฟด้วยระบบโอโซนเนชั่น.” วิทยาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ณัฐกร ราชบุตร, นิชชา แก้วเสียง, นิชา มุริจันทร์, น้ำเพชร สุวรรณประเสริฐ. 2555. “การบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีสีรีแอคทีฟด้วยวิธีการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชั่น.” วิทยาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- พรชวรณ ศรีนาค. 2556. การควบคุมมลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ มินเซอร์วิสซ์พพลาย
- พรวิษา แกสมาน, ภัทรา คงภักดี, ภาณุพงศ์ เพ็งวัน. 2551. “การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์.” วิทยาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. 2555. สี กลิ่นและรส. [Online] Available: [www2.diw.go.th/research/เอกสารเผยแพร่/6-ColorOdorTaste-w.pdf](http://www2.diw.go.th/research/เอกสารเผยแพร่/6-ColorOdorTaste-w.pdf) เข้าถึงวันที่ 7 ตุลาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พรวิษา แกสมาน, ภัทรา คงภักดี, ภาณุพงศ์ เพ็งวัน. (2551). การกำจัดสีย้อมรีแอททีฟในน้ำเสีย สังกะสีด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้น. ปรินทอนิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ยุทธ ไกยวรรณ. 2553. **หลักสถิติวิจัยและการใช้โปรแกรม SPSS**. กรุงเทพฯ : แอคทีฟพริ้นท์ จำกัด. หน้า230-239.

มันสิน ตันจุลเวศม์ และ มันรัก ตันจุลเวศม์. (2547).เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย.พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.หน้า 6/3-6/7

วีรยา อางองค์.(2549).การบำบัดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเบียร์โดยกระบวนการ โอโซนเข้มข้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,หน้า 57

ธัญวรรณ กฤษณะพุกต์ และ ชลอ จารุสุทธิรักษ์. 2559. การบำบัดสีในน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ด้วย กระบวนการโอโซนเข้มข้นที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. หน้า 1107-11044.

APHA, AWWA and WEF.2012.Standard Method for the Examination of Water and Wastewater.22<sup>th</sup> Edition. USA : American Public HealthAssociation.

Chen, T.Y., Kao, C.M., Hong, A., Lin, C.E., Liang, S.H.2009. Application of ozone on the decolorization of reactive dyes-Orang-13 and Blue-19.*Desalination*, 249, 1238- 1242.

Cardoso, J.C., Bessegato, G.G., Zanoni, M.V.B., 2016. Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. *Water Research*. 98, 39-46.

Cheremisinoff, N.P. and Cheremisinoff, P.N. (1993). *Water Treatment and Waste Recovery : Advanced Technology and Applications*. New Jeersey.Prentice-Hall.

Eaton A.D., Clesceri L.S., Greenberg, A.E. 1995. *Stand Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington DC. American Public Health Association.

Gottschalk, Libra, J.A. and Saupe, A. (2000). *Ozonation of Water and Waste Water*. Wiley-vch.

Khadhraoui, M., Trabelsi, H., Ksibi, M., Bouguerra, S., and Elleuch, B. 2008. "Discoloration and detoxification of a Congo red dye solution bymean of ozone treatment for a possible water reuse." *Journal of Hazadous Materials*. In press.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Konsowa, A.H. 2003. Decolorization of wastewater containing direct dye by ozonation in a batch bubble column reactor. **Desalination**. 158, 233-240.
- Langlais, B., Reckhow, D.A., and Brink, D.R.(1991). **Ozone in Water Treatment: Application and Engineering: Cooperative Research Report**. Chelsea, MI : Lewis
- Lin, S.H. and K.L. Yeh. (1993). Looking of Treat Wastewater? Try Ozone. **Chem. Eng.** 28:112-116.
- Olívia Salomé. Soares G.P., Jose O' rfaõ J.M. , Dion'isia Portela . 2006. Ozonation of textile effluents and dye solutions under continuous operation: Influence of operating parameters. **Journal of Hazardous Materials**. B137 : 1664–1673.
- Preethi, V., Parama Kalyani, K.S. Iyappan, K., 2008. Ozonation of tannery effluent for removal of cod and color. **Hazardous Materials**. 166, 150–154.
- Srinivasan, S.V., Rema, T., Chitra, K. 2007. Decolourisation of leather dye by ozonation. **Desalination**. 235, 88–92.
- Tehrani-Bagha A.R., Mahmoodi N.M., and Menger F.M. 2010. Degradation of a persistent organic dye from colored textile wastewater by ozonation. **Desalination**, 260, 34–38.
- US Environmental Protection Agency. 2016. **Ozone Pollution**. [Online] Available: <https://www.epa.gov/ozone-pollution> เข้าถึงวันที่ 8 ตุลาคม 2559
- Wijannarong, S., Aroonsrimorakot,S., Thavipoke, P.,Kumsopa, A. and Sangjan, S., 2013. Removal of Reactive Dyes from Textile Dyeing Industrial Effluent by Ozonation Process. **APCBEE Procedia**, 5, 279 – 282.
- Wyszcki, G. and Stiles, W.S. (2000).**Color Science**. (2<sup>nd</sup> ed.). Pp. 831-836. Wiley Inter Science.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ก-1 การวัดปริมาณไอโชนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

การวัดปริมาณไอโชนสามารถวัดด้วยวิธีไอโอดิเมทรี (Iodometry) โดยอัตราการผลิตก๊าซไอโชนสามารถวัดได้ดังนี้

#### 1) สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2% ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต 0.1 M ซังโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไดไฮเดรต ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) จำนวน 7.8 กรัม ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) 7.1 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 20.0 กรัม ละลายให้เข้ากันด้วยน้ำกลั่น เติมน้ำกลั่นวัดปริมาตร ปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วัน ก่อนใช้ วัดค่าพีเอชและปรับค่าพีเอชให้เป็น 7 เก็บไว้ในขวดสีชาป้องกันการสัมผัสกับแสงแดด

2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) 0.1000 N ละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) 24.8 กรัม ในน้ำกลั่น ต้มและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เติมน้ำกลั่นโรฟอร์ม ( $\text{CHCl}_3$ ) ลงไป 5 มิลลิลิตร หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม ปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร

3. สารละลายปฐมภูมิโพแทสเซียมไอโอเดต ( $\text{KIO}_3$ ) 0.1000 N นำโพแทสเซียมไอโอเดต ( $\text{KIO}_3$ ) ออบที่อุณหภูมิ  $103 \pm 2$  °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่ง  $\text{KIO}_3$  3.567 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 0.1000 N

4. น้ำแป้ง ชั่งแป้งมัน 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดเป็นเวลา 2-3 นาที ตั้งทิ้งไว้ 1 วัน นำส่วนที่ใสแยกออกมา เติมนครดซาลิซิลิก ( $\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$ ) 1.25 กรัม เพื่อรักษาได้นาน ทำการเก็บในตู้เย็นรักษาอุณหภูมิ 4 °C

#### 2) การทดลอง

##### 2.1 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

- ชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1.00 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร
- เติมสารละลาย  $\text{KIO}_3$  หรือ  $\text{KH}(\text{IO}_3)_2$  ความเข้มข้น 0.1000 N 10.00 มิลลิลิตร เติมนครดซาลิซิลิกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร
- นำไปไทเทรตด้วย 0.1 N  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  จนกระทั่งสารละลายสีเหลืองอ่อน จากนั้นเติมน้ำแป้ง 1 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ไทเทรตต่อจนสารละลายสีน้ำเงินหายไป บันทึกปริมาตรของสารละลาย 0.1 N  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่ใช้

## 2.2 การหาปริมาณไอโชนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

- นำสารละลาย KI 2% ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด ปิดฝาด้วยจุกยางดำ ที่มีท่อแก้วนำก๊าซ 2 ท่อ
- ผ่านก๊าซไอโชนจากเครื่องกำเนิดไอโชน ลงในขวดดักก๊าซที่มีบรรจุสารละลาย KI 2%
- เติม 1 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$  3 มิลลิลิตร ลงในสารละลาย KI 2% (มีสีเหลืองหรือส้ม) 100 ml เพื่อปรับพีเอช
- นำมาไทเทรตกับสารละลาย 0.1 N  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  จนสีเหลืองค่อยๆหายไป
- เติมน้ำแฉ่ง 1 มิลลิลิตร สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อไปจนสีน้ำเงินหายไป
- บันทึกปริมาตรของสารละลาย 0.1 N  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณก๊าซไอโชนที่มีอยู่ในระบบ
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 อีก 3 ข้อ
- ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่มีชุดทดลองต่อกับเครื่องกำเนิดไอโชนแล้วจึงต่อเข้ากับขวดรูปชมพู่ที่บรรจุสารละลาย
- คำนวณผลต่างของปริมาณไอโชนที่ได้จากการทดลอง จะได้ปริมาณไอโชนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

### 3) การคำนวณหาปริมาณก๊าซไอโชน

$\text{O}_3$  1 โมล เกิด  $\text{I}_2$  1 โมล จากนั้น  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  2 โมล ทำปฏิกิริยากับ  $\text{I}_2$  1 โมล จาก  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ปริมาตร  $x$  ml ความเข้มข้น 0.1 N จะเท่ากับ 0.1 M จะได้เนื้อสารของ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เท่ากับ  $[(0.1 \text{ mol}) / 1000 \text{ mL}] \times x \text{ mL}$

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	2	โมล	ต้องใช้ $\text{O}_3$	=	1	โมล
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	$(0.1 x)/1000$	โมล	ต้องใช้	=	$\frac{0.05x}{1000}$	โมล
$\text{O}_3$	1	โมล	มีน้ำหนัก	=	48	กรัม
$\text{O}_3$	$(0.05 x / 1000)$	โมล	จะมีน้ำหนัก	=	$\frac{48(0.05x)}{1000}$	กรัม
ดังนั้นปริมาณไอโชนที่เกิดขึ้น				=	$0.0024 x$	กรัม
$\text{O}_3$ (mg)				=	$2.4 \times \text{ปริมาตร}\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (ml)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-2 การวิเคราะห์หาซีโอไซด์ด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux, Titrimetric Method) (APHP, 2012)

1) เครื่องมือและอุปกรณ์

1 หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ใช้แก้วที่ทำด้วยโบโรซิลิเกต (Borosilicate culture tubes) ขนาด 16×100 มิลลิเมตร ที่มีฝาเกลียว ชนิดที่เอพี (Tetrafluoroethylene)

2 บล็อกฮีตเตอร์ (Block heater) หรือตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่  $150 \pm 2$  °C การใช้ตู้อบต้องแน่ใจว่าการอบ 2 ชั่วโมงที่ 150 °C จะไม่ทำให้ฝาหลอดแก้วถูกทำให้เสียหาย

2) สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium digestion solution) 0.1 N

- นำ  $K_2Cr_2O_7$  ออบแห้งใน 130 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก  $K_2Cr_2O_7$  มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และเติมปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นแล้วจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร ให้ได้ 1000 มิลลิลิตร

2. สารละลายกรดซัลฟิวริกที่เติมซิลเวอร์ซัลเฟต

- ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) 22 กรัม ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) ทิ้งไว้ 1-2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงละลาย

3. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

- ละลาย (1, 10 phenan throline monohydrate  $C_{12}H_{18}N_2H_2O$ ) 1.485 กรัม และไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) 0.695 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์ริสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.05 N

- ต้องนำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้งก่อนใช้ โดยเติมสารเคมีทุกชนิดตามตาราง ก-1 ลงในหลอดแก้วที่ต้องการโดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ ทิ้งให้เย็น เติมเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลาย FAS จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

ตารางที่ ก-1 ปริมาตรตัวอย่างน้ำและเติมสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ

ขนาดหลอดย่อยสลาย	ปริมาตร น้ำ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรสารละลาย โพแทสเซียม ไดโครเมตสำหรับ ย่อยสลาย (มิลลิลิตร)	สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิลิตร)	ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)
หลอดแก้ว				
16×100 มม.	2.5	1.5	13.5	7.5
20×150 มม.	5.0	3.0	7.0	15.0
25×150 มม.	10.0	6.0	14.0	30.0
หลอดมาตรฐาน 1 มล.	2.5	1.5	3.5	7.5

#### การทดลอง

- ล้างหลอดแก้วและฝาด้วยกรดซัลฟิวริก 20% ก่อนใช้ทุกครั้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อน
- หลอดแก้วที่ใช้หาซีโอดีมีหลายขนาด การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับค่าซีโอดีที่มีในตัวอย่างน้ำ ในกรณีค่าซีโอดีต่ำ (<50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ให้ใช้หลอดแก้วขนาด (25×150 มิลลิเมตร) ถ้าค่าซีโอดีสูง ใช้ตัวอย่างน้ำในปริมาณน้อยจึงใช้หลอดแก้วขนาดเล็ก (16×100 มิลลิเมตร) โดยปกติจะใช้หลอดมาตรฐานที่มีความจุสูงสุด 10 มิลลิลิตร หรือ ขนาด (16×100 มิลลิเมตร) เพราะใช้สารเคมีน้อยที่สุด ดังนั้นตัวอย่างน้ำที่มีค่าซีโอดีต่ำมากๆ มักจะมีค่าผิดพลาดเนื่องจากตัวอย่างน้ำน้อยเกินไป
- เมื่อเลือกขนาดหลอดแก้วแล้วให้ใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 5 มิลลิลิตร โดยเติมตัวอย่างน้ำลงหลอดแก้วแล้วเติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 3 มิลลิลิตร สำหรับย่อยสลายสารละลาย ค่อยเติมสารละลายกรดซัลฟิวริก 7 มิลลิลิตร ให้เกิดขึ้นกรดอยู่ในแก้ว ปิดฝาให้แน่นพอดี แล้วกลับไปมาเพื่อให้สารละลายผสมกันดี
- นำหลอดแก้วใส่ลงในฮีทติ้งบล็อกหรือตู้อบที่อบ 150 °C แล้วอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิแล้วนำหลอดแก้ววางลงในขวด
- เปิดฝาหลอดแก้วใส่แท่งแก้วแม่เหล็กวงขนาดเล็กที่หุ้ม TFE แล้วเติมเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด คนอย่างรวดเร็วบนเครื่องกวนแม่เหล็กแล้วไทเทรตกับ FAS 0.05 N จนกระทั่งเปลี่ยนสีเป็นน้ำตาลแดง หรือเทสารละลายจากหลอดแก้วลงขวดรูปกรวยก็ได้เพื่อความสะดวกในการไทเทรต แต่ต้องใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในการไทเทรต แต่ต้องใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมด
- ทำแบลนด์ด้วยทุกครั้งโดยใช้สารเคมีและน้ำกลั่นปริมาตรเท่ากับตัวอย่างน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี(mgO}_2\text{/L)} = \frac{(B-S) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ml)}}$$

โดยที่ B	=	ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลงค์ (ml)
S	=	ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างน้ำ (ml)
N	=	ความเข้มข้นของ FAS (N)

ตัวอย่างการคำนวณ

สมมติปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์เท่ากับ 3.40 มิลลิลิตร

สมมติปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำเท่ากับ 2.17 มิลลิลิตร

ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้ 2.5 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS เท่ากับ 0.05 นอร์มัล

$$\text{COD} = \frac{(3.40 - 2.17) \times 0.05 \times 8000}{5 \text{ ml}}$$

$$= 1,120 \text{ mg O}_2$$

## ก-3 การวิเคราะห์หาปริมาณบีโอดี (APHP, 2012)

## 1) สารเคมี

1. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เตรียมโดยละลาย Anhydrous  $\text{CaCl}_2$  27.5 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร
2. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ เตรียมโดยละลาย  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.25 กรัมในน้ำและปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร
3. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เตรียมโดยละลาย  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  22.5 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร
4. น้ำกลั่น 2 ครั้ง (ต้องมีทองแดงน้อยกว่า 0.1 มิลลิลิตรต่อลิตร)  
กรณีที่ต้องเจือจางน้ำตัวอย่าง ต้องทำการเจือจางน้ำตัวอย่าง โดยน้ำกลั่นมาแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20 °C และพ่นอากาศก่อนทำการเจือจางอย่างน้อย 1 ชั่วโมง และเติมสารเคมีข้อ 1-3 อย่างละ 1 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร
5. สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต พีเอช 7.2 ละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  8.50 กรัม  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  21.75 กรัม  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  33.40 กรัม และ  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1.70 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
6. หัวเชื้อที่ต้องเตรียม ใช้น้ำจากบ่อดกตะกอนโรงงานกระดาษเป็นหัวเชื้อ
7. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เตรียมโดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ เตรียมโดยละลาย  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  1.575 กรัม แล้วปรับปริมาตรสารละลายเป็น 1 ลิตร

9. สารละลายกลูโคสและกรดกลูตามิก นำกลูโคส และกรดกลูตามิกไปอบแห้งที่  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  นาน 1 ชั่วโมง นำไปใส่เดซิเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เมื่อเย็นซึ่งอย่างละ 150 มิลลิกรัม นำไปละลายและใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

## 2) การทดลอง

นำน้ำที่ใช้ในการเจือจาง ชุดควบคุม (Blank set)

1. บรรจุน้ำที่ใช้ในการเจือจางลงขวดบีโอดี 2 ขวด ให้เต็มขวดด้วยวิธีกาลักน้ำ และให้ไหลรินลงตามคอขวด ไม่ให้มีฟองอากาศตกค้างในขวด แล้วปิดจุกแก้ว
2. ขวดที่ 1 ทำการวัดค่าดีไอทันที เป็นค่า  $\text{DO}_0$
3. ขวดที่ 2 นำไปบ่มที่  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 วัน แล้ววัดค่า  $\text{DO}$  เป็น  $\text{DO}_5$  ขณะที่บ่มต้องมีน้ำหล่อบนฝาจุกแก้วและปิดจุกพลาสติกครอบที่จุกแก้วอีกครั้ง เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำที่หล่อเหนือจุกแก้ว
4. ค่า  $\text{DO}_0 - \text{DO}_5$  ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ามากกว่าแสดงว่ามีผลต่อความถูกต้องในการวัด

### สารละลายมาตรฐานกลูโคสและกรดกลูตามิก

1. ใช้ในการเจือจางโดยตรง บีเปิดสารละลายกลูโคสและกรดกลูตามิกมา 5 มิลลิลิตร ลงในขวดบีโอดี เติมน้ำที่ใช้ในการเจือจางลงไป 3 ขวด ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศภายใน เช่นเดียวกับการบรรจุน้ำที่ใช้ในการเจือจาง
2. คว่ำขวดสลับหลายขวดให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกันทั่วทั้งขวด เติมน้ำที่สำหรับการเจือจางหล่อไว้ที่จุกแก้วด้วย
3. วัดค่าดีไอขวดที่ 1 ทันทีเป็นค่า  $\text{DO}_0$
4. ขวดที่ 2 และ 3 นำไปบ่มที่  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 วัน แล้ววัดค่า  $\text{DO}$  เป็น  $\text{DO}_5$
5. คำนวณหาค่าบีโอดี

### น้ำตัวอย่าง

1. เก็บน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มายังห้องปฏิบัติการ แล้วบันทึกข้อมูลแหล่งที่เก็บตัวอย่างน้ำโดยละเอียด
2. ตรวจสอบคุณภาพน้ำทางกายภาพ เช่น สี ความขุ่น กลิ่น ค่าพีเอช ข้อมูลของแหล่งน้ำเพื่อตัดสินใจเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเจือจางว่าควรเจือจางเท่าไร
3. เตรียมน้ำตัวอย่างตามทฤษฎี เช่น การปรับพีเอช การกำจัดคลอรีนตกค้าง การเจือจางหรืออื่นๆจากนั้นจึงถ่ายน้ำลงขวดบีโอดีตามวิธี ชุดละ 3 ขวด โดยขวดที่ 1 หาค่า  $\text{DO}_0$  ทันที อีก 2 ขวดนำไปบ่มที่  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ไว้สำหรับหาค่า  $\text{DO}_5$  กรณีที่ไม่ต้องเจือจาง

4. กรณีที่ต้องทำเจือจางต้องทำ 3 ชุดความเข้มข้น ดูจากตารางที่ ก-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 การเลือกเจือจางน้ำตัวอย่างให้เหมาะสมในการหาค่า

เมื่อใช้ % ของผสม		เมื่อใช้การเจือจางโดยตรง	
% ของผสม	ช่วงค่าบีโอดี	ปริมาณน้ำตัวอย่าง	ช่วงค่าบีโอดี
0.01	20000 - 70000	0.01	30000 - 105000
0.02	10000 - 35000	0.02	12000 - 42000
0.05	4000 - 14000	0.1.	6000 - 21000
0.1	2000 - 7000	0.2	3000 - 10500
0.2	1000 - 3500	0.5	1200 - 4200
0.5	400 - 1400	1.0	600 - 2100
1.0	200 - 700	2.0	300 - 1050
2.0	100 - 350	5.0	120 - 420
5.0	40 - 140	10.0	60 - 210
10.0	20 - 70	20.0	30 - 105
20.0	10 - 35	50.0	12 - 42
50.0	4 - 14	100	6 - 21
100	0 - 7	300	0 - 7

ที่มา : Sawyer , *et al.* , 1994.

- ให้เติมน้ำสำหรับที่ใช้เจือจางลงในกระบอกตวงขนาด 1 ลิตรด้วยวิธีกัลกน้ำลง ประมาณ 500 มิลลิลิตร ปิดน้ำตัวอย่างตามตารางด้านบน โดยจุ่มปลายปิเปตลงใต้ผิวน้ำ
  - ทำการเติมน้ำสำหรับเจือจางให้ไหลรินตามข้างกระบอกตวงจนถึง 1 ลิตร
  - ใช้แท่งแก้วคนขึ้นลงเบาๆให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เทลงขวดบีโอดีให้ไหลรินลงตามคอขวดจนเต็ม ห้ามให้มีฟองอากาศ เมื่อปิดจุกต้องมีน้ำหล่อค้างอยู่
5. กรณีที่ต้องเติมหัวเชื้อในน้ำตัวอย่างและต้องเจือจาง
- ทำเช่นเดียวกับข้อ 4 แต่ให้เติมหัวเชื้อ 2 มิลลิลิตร ลงน้ำก่อนปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ผสมให้เข้ากันและบรรจุลงขวดบีโอดีด้วยวิธีเช่นเดียวกัน
  - ทำชุดควบคุมที่มีหัวเชื้อเพิ่มขึ้นอีก 1 ชุด โดยใส่หัวเชื้อ 2 มิลลิลิตร กับน้ำที่ใช้เจือจางจนได้ 1 ลิตร แต่ไม่ต้องมีน้ำตัวอย่างเช่นกัน
  - วัดค่าดีไอขวดที่ 1 ของแต่ละชุดทันทีเป็นค่า DO
6. การคำนวณหาค่าบีโอดี กรณีที่มีการเจือจาง ชุดความเข้มข้นที่เจือจางนั้น ค่า DO<sub>5</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{บีโอดี (มก.O}_2\text{/ล.)} = \frac{(D_1 - D_2) - (B_1 - B_2)}{P}$$

เมื่อ  $D_1 = DO_0$  ของตัวอย่าง

$D_2 = DO_5$  ของตัวอย่าง

$B_1 = DO_0$  ของน้ำกลั่น

$B_2 = DO_5$  ของน้ำกลั่น

#### ตัวอย่างการคำนวณ

สมมติ  $DO_0$  ของตัวอย่างเท่ากับ 9.13 mg/L

$DO_5$  ของตัวอย่างเท่ากับ 4.27 mg/L

$DO_0$  ของน้ำกลั่นเท่ากับ 9.23 mg/L

$DO_5$  ของน้ำกลั่นเท่ากับ 6.83 mg/L

สัดส่วนที่ทำการเจือจางคือใช้น้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร

จะได้

$$\begin{aligned} \text{ค่าบีโอดี} &= \frac{(9.13 - 4.27) - (9.23 - 6.83)}{(50/100)} \\ &= \frac{(4.86 - 2.40)}{0.05} \\ &= 49.2 \text{ mg O}_2\text{/L} \end{aligned}$$

#### ก-4 การตรวจวัดค่าสีในหน่วยเอตีเอ็มไอ และการสร้างกราฟมาตรฐาน

##### 1) เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี วิสิเบิล
2. ฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอนเมตร
3. เซลล์วัดแสงที่มีช่วงแสง 10 มิลลิเมตร

##### 2) สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเจือจาง สำหรับปรับพีเอช
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง สำหรับปรับพีเอช

##### 3) วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งโพแทสเซียมคลอโรแพลตตินเนตจำนวน 1.246 กรัม ละลายในน้ำกลั่น
2. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร
3. เติมโคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซีไฮเดรต 1.0 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดวัดปริมาตรจะได้สารละลายที่มีหน่วยสีเท่ากับ 500 เอตีเอ็มไอ

5. เจือจางสารละลายสต็อกจากข้อที่ 4 โดยปิเปต 20, 25, 30, 40 และ 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 50 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร จะได้เป็นสารละลายมาตรฐานที่มีค่าหน่วยสีเท่ากับ 200, 250, 300, 400, และ 500 เอตีเอ็มไอ ตามลำดับ

6. ทำการกรองสารละลายมาตรฐานด้วยฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$

7. วัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง (%T) ที่ความยาวคลื่นตามตารางที่ ก-4 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี วิสิเบิล

8. นำค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง (%T) ในแต่ละแแกนมารวมกัน แล้วคูณด้วยค่าเฟคเตอร์ของแต่ละแแกนจะได้ค่าที่คูณแฟคเตอร์ของแแกน X, Y, และ Z แทนด้วยสัญลักษณ์  $X_s$ ,  $Y_s$ , และ  $Z_s$  ตามลำดับ และให้ค่าของน้ำกลั่นเป็น  $X_c$ ,  $Y_c$ , และ  $Z_c$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 98.06, 100.00 และ 118.14 ตามลำดับ นำค่า  $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$ ,  $X_c$ ,  $Y_c$ , และ  $Z_c$  มาแปลงค่าของ Munsell ตามตาราง Adam-Nickerson (Wyszecki, G and Stile, W.S., 2000) จะได้ค่าแทนสัญลักษณ์เป็น  $V_{xs}$ ,  $V_{ys}$ ,  $V_{zs}$ ,  $V_{xc}$ ,  $V_{yc}$ , และ  $V_{zc}$

9. เมื่อได้ค่าแล้วนำมาค่า DE ของแต่ละตัวจากสมการ Bridgeman

$$DE = \{(0.23\Delta V_y)^2 + [\Delta(V_x - V_y)]^2 + [0.4\Delta(V_y - V_z)]^2\}^{0.5}$$

$$\text{เมื่อ } V_y = V_{ys} - V_{yc}$$

$$\Delta(V_x - V_y) = (V_{xs} - V_{ys}) - (V_{yc} - V_{yc})$$

$$\Delta(V_y - V_z) = (V_{ys} - V_{zs}) - (V_{yc} - V_{zc})$$

10. นำค่า DE ที่ได้จากการคำนวณค่าสีในหน่วย ADMI จากสมการ

$$ADMI = \frac{(F)(DE)}{b}$$

F = ค่า calibration factor ที่ได้จากความชันของการพล็อตกราฟมาตรฐานของค่า ADMI กับ ค่า DE ที่คำนวณได้

b = ระยะทางเดินแสง (ความกว้างของควิเวทท์ เซนติเมตร)

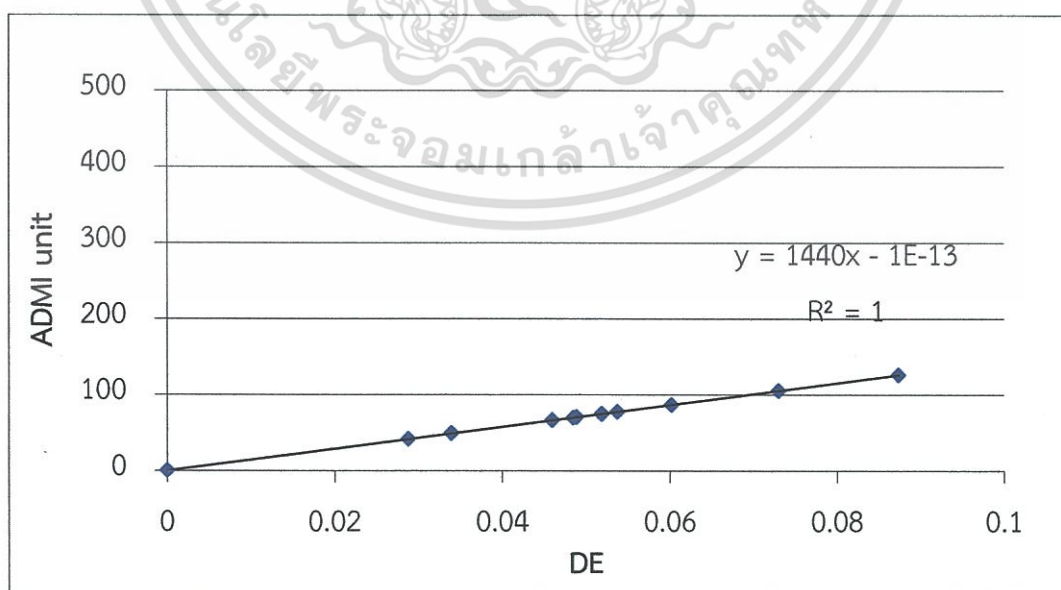
ตารางที่ ก-3 การวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

Ordinate No.	X	Y	Z
	Wavelength (nm)		
2	435.5	489.5	422.2
5	461.2	515.2	432.0
8	544.3	529.8	438.6
11	564.1	541.4	444.4
14	577.4	551.8	450.1
17	588.7	561.9	455.9
20	599.6	572.5	462.0
23	610.9	584.8	468.7
26	624.2	600.8	477.7
29	645.9	627.3	495.2
Factor when 10 ordinate used	0.09806	0.10000	0.11814

## 4) การคำนวณและการแปลผล

## 1.การคำนวณ Calibration factor (f)

เป็นการนำค่าเอดีเอ็มไอของสีมาตรฐานที่เตรียมได้จากภาคผนวก ก-4 มาพล็อตเทียบกับค่า DE ที่คำนวณได้ จะได้ Calibration factor (f) จากความชันของกราฟ ดังรูปที่ ก-4



รูปที่ ก-4 กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน (%T) ในแต่ละความยาวคลื่นดังตารางที่ ก-4  
จะได้ค่าดังตัวอย่าง

X	95.1	95.2	92.3	93.9	97.5	98.5	98.8	98.9	99.0	99.1
Y	94.7	94.1	93.6	92.6	91.8	93.3	96.4	98.3	98.8	99.0
Z	95.2	95.4	95.4	95.4	95.4	95.5	95.4	95.4	95.2	94.7

3. นำค่าที่ได้จากแต่ละแกนมารวมกัน

$$X = 95.1+95.2+92.3+93.9+97.5+98.5+98.8+98.9+99.0+99.1 \quad X = 968.3$$

$$Y = 94.7+94.1+93.6+92.6+91.8+93.3+96.4+98.3+98.8+99.0 \quad Y = 952.6$$

$$Z = 95.2+95.4+95.4+95.4+95.4+95.4+95.5+95.4+95.4+95.2+94.7 \quad Z = 953$$

4. นำผลรวมที่ได้แต่ละแกนคูณกับแฟคเตอร์จากตาราง ก-1

$$X_s = 968.3 \times 0.09806 \quad X_s = 94.95$$

$$Y_s = 952.6 \times 0.1 \quad Y_s = 95.26$$

$$Z_s = 953 \times 0.11814 \quad Z_s = 112.59$$

5. นำค่า  $X_c$   $Y_c$   $Z_c$   $X_s$   $Y_s$  และ  $Z_s$  ( $X_c$   $Y_c$  และ  $Z_c$  ได้มาจากการนำน้ำกลั่นไปวัดและคำนวณเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง) แปลงเป็นค่า Munsell จาก ตารางของ Adam –Nickerson (Wyszecki, G. and Stiles, W.S., 2000) จะได้เป็นค่า เป็น  $V_{xc}$ ,  $V_{yc}$ ,  $V_{zc}$ ,  $V_{xs}$ ,  $V_{ys}$  และ  $V_{zs}$  ตามลำดับจะได้  $V_{xc} = 9.78$   $V_{yc} = 9.72$   $V_{zc} = 9.72$   $V_{xs} = 9.9$   $V_{ys} = 9.9$   $V_{zs} = 9.9$

6. นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า DE

แทนค่าลงสูตร

$$DE = \{[(0.23\Delta V_y)^2 + [\Delta(V_x - V_y)]^2 + [0.4\Delta(V_y - V_z)]^2]\}^{0.5}$$

$$DE = 0.0729$$

$$ADMI = \frac{(0.0729)(1440)}{1} = 104.98$$

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสี

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100$$

โดยที่  $C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้น (ADMI)

$C_1$  = ความเข้มข้นที่ถูกกำจัดในเวลาต่างๆ (ADMI)

สมมติความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 22451 ADMI

สมมติความเข้มข้นที่ 10 นาทีเท่ากับ 459.10 ADMI

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = ((22451 - 459.10)) / 22451 \times 100$$

$$= 98 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ข-1 ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี

ตารางที่ ข-1.1 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต ความเข้มข้น 300-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)		ความเข้มข้น $Al_2(SO_4)_3$ mg/L						
		Control	300	500	700	1000	1200	
1	ปริมาตรตะกอน (mL)	555	550	555	555	555	555	
2		555	545	550	550	550	550	
3		555	510	530	530	535	530	
4		555	500	515	515	520	510	
5		555	475	500	495	490	485	
6		555	455	490	470	475	465	
7		555	425	470	440	445	430	
8		555	400	450	415	425	410	
9		555	375	435	385	395	370	
10		555	350	415	365	385	350	
15		555	280	315	275	300	275	
20		555	235	265	235	255	235	
30		555	190	210	190	220	190	
60		555	145	155	145	160	145	
pH		7.05	5.57	4.77	4.3	4.15	4.16	
EC ( $\mu$ s/cm)		520	629	703	816	925	1,080	
TDS (mg/L)		275	336	370	422	499	590	
Turbidity (NTU)		99,000	18	16	17	15	18	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1.2 ผลของวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)		ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟต (มิลลิกรัม)														
		Control					100					150				
		ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD
		1	2	3			1	2	3			1	2	3		
1	ปริมาตรตะกอน (mL)	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
2		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
3		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
4		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
5		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
6		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
7		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
8		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
9		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
10		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
15		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
20		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
30	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	
60	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	
pH		7.22	7.07	6.93	7.07	0.15	6.65	6.48	6.7	6.61	0.12	6.62	6.42	6.24	6.43	0.19
EC (µs/cm)		473	482	429	461.33	28.36	645	512	516	557.67	75.66	680	555	559	598.00	71.04
TDS (mg/L)		256	267	221	248.00	24.02	346	274	275	298.33	41.28	362	295	559	405.33	137.23
Turbidity (NTU)		9,900	10,300	10,300	10,166.67	230.94	8,800	8,700	7,300	8,266.67	838.65	6,200	4,500	3,100	4,600.00	1,552.42

ตารางที่ ข-1.2 ผลของวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)		ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมซัลเฟต (มิลลิกรัม)														
		200				250				300						
		ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD
		1	2	3			1	2	3			1	2	3		
ปริมาณตะกอน (mL)	1	515	515	515	515.00	0.00	500	500	500	500.00	0.00	490	510	480	493.33	15.28
	2	430	500	450	460.00	36.06	490	490	440	473.33	28.87	480	500	430	470.00	36.06
	3	390	440	380	403.33	32.15	480	460	380	440.00	52.92	460	460	380	433.33	46.19
	4	340	400	330	356.67	37.86	450	430	340	406.67	58.59	450	430	320	400.00	70.00
	5	300	350	280	310.00	36.06	420	410	300	376.67	66.58	440	400	290	376.67	77.67
	6	290	310	260	286.67	25.17	390	380	270	346.67	66.58	420	360	260	346.67	80.83
	7	250	280	240	256.67	20.82	370	350	250	323.33	64.29	410	320	240	323.33	85.05
	8	200	260	220	226.67	30.55	340	330	240	303.33	55.08	400	300	230	310.00	85.44
	9	190	250	210	216.67	30.55	320	320	220	286.67	57.74	390	290	220	300.00	85.44
	10	180	240	200	206.67	30.55	300	300	210	270.00	51.96	380	270	210	286.67	86.22
	15	170	200	170	180.00	17.32	250	250	180	226.67	40.41	320	230	180	243.33	70.95
	20	150	180	150	160.00	17.32	220	220	160	200.00	34.64	280	200	160	213.33	61.10
	30	140	160	140	146.67	11.55	180	180	140	166.67	23.09	220	170	140	176.67	40.41
60	140	130	120	130.00	10.00	140	140	120	133.33	11.55	150	130	120	133.33	15.28	
pH		5.19	6.09	5.92	5.73	0.48	5.97	5.53	5.47	5.66	0.27	5.52	5.11	5.19	5.27	0.22
EC ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )		434	578	576	529.33	82.57	702	598	585	628.33	64.13	706	617	614	645.67	52.27
TDS (mg/L)		367	305	310	327.33	34.44	368	313	313	331.33	31.75	380	322	327	343.00	32.14
Turbidity (NTU)		73	31	34	46.00	23.43	35	18	22	25.00	8.89	22	18	26	22.00	4.00

ตารางที่ ข-1.3 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้เฟอริกคลอไรด์ความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)		ความเข้มข้นของเฟอริกคลอไรด์ (มิลลิกรัม)														
		Control					100					150				
		ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD
		1	2	3			1	2	3			1	2	3		
1	ปริมาณตะกอน (mL)	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
2		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
3		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
4		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
5		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
6		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
7		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
9		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
10		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
15		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
20		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
30		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
60		515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00	515	515	515	515.00	0.00
pH		7.06	7.10	7.10	0.04	6.70	6.38	6.54	6.54	0.16	6.28	6.64	6.36	6.43	0.19	
EC (µs/cm)	399.00	356.00	374.00	376.33	21.59	463.00	473.00	431.00	455.67	21.94	507.00	446.00	478.00	477.00	30.51	
TDS (mg/L)	203.00	188.00	200.00	197.00	7.94	240.00	250.00	226.00	238.67	12.06	266.00	238.00	256.00	253.33	14.19	
Turbidity (NTU)	3020.	2890.	2950.	2953.3	65.1	2140	2220.0	2260.00	2206.67	61.10	1460.00	2650.00	1690.00	1933.33	631.22	

ตารางที่ ข-1.3 ผลของการสร้างตะกอนทางเคมีโดยใช้เฟอริกคลอไรด์ความเข้มข้น 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)		ความเข้มข้นของเฟอริกคลอไรด์ (มิลลิกรัม)														
		200					250					300				
		ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	SD
		1	2	3			1	2	3			1	2	3		
1	ปริมาตรตะกอน (mL)	515	515	515	515.00	0.00	480	490	500	490.00	10.00	500	500	500	500.00	0.00
2		515	510	515	513.33	2.89	300	400	450	383.33	76.38	400	400	400	400.00	0.00
3		515	510	515	513.33	2.89	200	300	400	300.00	100.00	300	300	300	300.00	0.00
4		510	510	515	511.67	2.89	100	200	150	150.00	50.00	150	200	150	166.67	28.87
5		510	510	515	511.67	2.89	100	120	130	116.67	15.28	140	140	140	140.00	0.00
6		510	510	510	510.00	0.00	100	120	110	110.00	10.00	130	130	130	130.00	0.00
7		510	510	510	510.00	0.00	100	110	110	106.67	5.77	120	120	120	120.00	0.00
8		500	510	510	506.67	5.77	90	100	100	96.67	5.77	120	110	120	116.67	5.77
9		500	510	510	506.67	5.77	90	100	100	96.67	5.77	120	110	120	116.67	5.77
10		500	510	510	506.67	5.77	90	100	100	96.67	5.77	110	110	110	110.00	0.00
15		500	500	510	503.33	5.77	90	90	90	90.00	0.00	100	100	100	100.00	0.00
20		500	500	510	503.33	5.77	90	90	90	90.00	0.00	100	100	100	100.00	0.00
30		500	500	510	503.33	5.77	80	80	80	80.00	0.00	90	90	90	90.00	0.00
60		500	500	510	503.33	5.77	80	80	80	80.00	0.00	90	90	90	90.00	0.00
pH		6.24	6.02	6.02	6.09	0.13	6.27	5.50	5.49	5.75	0.45	5.14	4.89	4.87	4.97	0.15
EC (µs/cm)		551.00	502.00	501.00	518.00	28.58	607.00	531.00	551.00	563.00	39.40	636.00	534.00	551.00	573.67	54.65
TDS (mg/L)		294.00	263.00	266.00	274.33	17.10	315.00	310.00	286.00	303.67	15.50	337.00	280.00	286.00	301.00	31.32
Turbidity (NTU)		570.00	1290.00	1,280.00	1,046.67	412.84	49.00	71.00	34.00	51.33	18.61	46.00	31.00	34.00	37.00	7.94

## ข-2 ผลการทดลองการเปรียบเทียบวิธี โฟโตแคตตาไลซิส โฟโตไลซิส และโอโซนเนชัน

ทำการทดลองที่สภาวะพีเอชเริ่มต้น ระยะเวลาในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้ง เท่ากับ 30 นาที และทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด คือ 294 นาโนเมตร

ตารางที่ ข-2 ผลของการเปรียบเทียบ

วิธีการ	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	SD	ชุดควบคุม	% การกำจัด
	1	2	3				
UV/TiO <sub>2</sub>	0.215	0.225	0.206	0.215	0.010	0.406	46.962
UV	0.346	0.350	0.355	0.350	0.005	0.406	13.711
O <sub>3</sub>	0.190	0.198	0.182	0.190	0.008	0.406	53.202

## ข-3 ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์และสีน้ำทิ้งด้วยวิธีโอโซนเนชัน

ทำการทดลองที่สภาวะพีเอช ระยะเวลาในการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำทิ้ง เท่ากับ 30 นาที และทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด คือ 294 นาโนเมตร

ตารางที่ ข-3.1 ผลของการปรับพีเอช

pH	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	SD	ชุดควบคุม	% การบำบัดจากวิธีโอโซนเนชัน	% การกำจัดจากการปรับพีเอชและวิธีโอโซนเนชัน
	1	2	3					
3	0.151	0.151	0.148	0.150	0.002	0.289	48.097	62.963
5	0.200	0.184	0.199	0.194	0.009	0.295	34.124	52.016
6.75	0.216	0.223	0.245	0.228	0.015	0.340	32.941	43.704
9	0.220	0.195	0.205	0.207	0.013	0.314	34.183	48.971
11	0.087	0.088	0.094	0.090	0.004	0.218	58.869	77.860
non	0.404	0.401	0.410	0.405	0.005	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสน้ำ

เวลา	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	SD	ชุดควบคุม	% การกำจัดจากวิธีไอโซเนซัน	%การกำจัดจากการปรับพีเอชและวิธีไอโซเนซัน
	1	2	3					
0	0.198	0.193	0.194	0.195	0.003	0.196	0.510	51.733
5	0.154	0.153	0.150	0.152	0.002	0.203	24.959	62.294
15	0.130	0.108	0.106	0.115	0.013	0.204	43.791	71.617
30	0.098	0.095	0.096	0.096	0.002	0.207	53.462	76.155
45	0.083	0.075	0.086	0.081	0.006	0.195	58.291	79.868
60	0.103	0.100	0.096	0.100	0.004	0.238	58.123	75.330
non	0.396	0.410	0.405	0.404	0.007	-	-	-

## ข-4 ผลของการวัดปริมาณก๊าซไอโซน

ตารางที่ ข-4 ผลของปริมาณก๊าซไอโซน

ตัวอย่าง	ปริมาณไอโซน (mg)			ค่าเฉลี่ย	SD
	1	2	3		
ปริมาณไอโซนเริ่มต้น	26.16	24.96	25.92	25.68	0.635
ปริมาณไอโซนที่เหลือหลังจากกำจัด	24.96	18.72	15.84	19.84	4.662
ปริมาณไอโซนที่ใช้ในการกำจัด (mg)				5.84	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-5 ผลของการวัดค่าบีโอดี

ตารางที่ ข-5 ผลของค่าบีโอดี

การวิเคราะห์ค่าบีโอดีหลังการกำจัดด้วยวิธีการสร้างตะกอน						
ตัวอย่าง	ปริมาณน้ำทิ้ง (mL)	DO <sub>0</sub>	DO <sub>5</sub>	DO <sub>0</sub> -DO <sub>5</sub>	BOD (O <sub>2</sub> mg/L)	ค่าเฉลี่ย BOD (O <sub>2</sub> mg/L)
Blank	-	8.82	8.72	0.1	-	-
C1	0.5	8.96	8.44	0.52	252	162.5
C2	1	8.99	8.54	0.45	105	
C3	2	8.92	7.95	0.97	130.5	
A1	5	9.03	8.56	0.47	22.2	26.75
A2	10	9.00	7.58	1.42	39.6	
A3	20	8.98	7.65	1.33	18.45	
F1	5	9.09	8.33	0.76	39.6	37.05
F2	10	8.82	7.29	1.53	42.9	
F3	20	8.92	6.91	2.01	28.65	
Glucose Glutamic	6	8.88	7.47	1.41	65.5	-

การวิเคราะห์ค่าบีโอดีหลังการกำจัดด้วยวิธีโอโซนชั้น						
ตัวอย่าง	ปริมาณน้ำทิ้ง (mL)	DO <sub>0</sub>	DO <sub>5</sub>	DO <sub>0</sub> -DO <sub>5</sub>	BOD (O <sub>2</sub> mg/L)	ค่าเฉลี่ย BOD (O <sub>2</sub> mg/L)
Blank	-	13.11	9.52	3.59	-	32.3
O1	5	13.72	9.29	4.43	50.4	
O2	10	14.05	9.39	4.66	32.1	
O3	20	14.39	9.84	4.55	14.4	

หมายเหตุ : เลือกเจือจางน้ำตัวอย่างให้เหมาะในการค่าค่าบีโอดี (ตาราง ก-2 ภาคผนวก ก)

### ข-6 ผลของการวัดซีโอดี

#### ตารางที่ ข-6 ผลของค่าซีโอดี

ตัวอย่าง	ปริมาตร FAS ที่ใช้ (mL)	เฉลี่ย	COD (mg O <sub>2</sub> /L)	ค่าเฉลี่ย	SD	%การบำบัด
Blank1	3.5	3.40	-	-	-	-
Blank2	3.3		-	-	-	-
Control เจือจาง 10 เท่า						
Control1	2.7	2.17	1,120.00	1,973.33	805.32	-
Control2	2.1		2,080.00			
Control3	1.7		2,720.00			
Spike1	1	1.15	768.00	720.00	67.88	-
Spike2	1.3		672.00			
B spike1	2.2	2.05	-	-	-	-
B spike2	1.9		-	-	-	-
KHP1	0.2	0.30	512.00	496.00	22.63	-
KHP2	0.4		480.00			
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>						
A1	1.7	2.20	272.00	192.00	69.74	90.27
A2	2.4		160.00			
A3	2.5		144.00			
FeCl <sub>3</sub>						
F1	2.5	2.33	144.00	170.67	24.44	91.35
F2	2.2		192.00			
F3	2.3		176.00			
O <sub>3</sub>						
Blank1	2.1	2.10	-	-	-	-
O1	1.9	1.833	33.09	44.12	19.10	97.76
O2	1.7		66.18			
O3	1.9		33.09			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข-7 ผลของความเข้มข้นในหน่วยเอดีเอ็มไอ

ตารางที่ ข-7 ผลของความเข้มข้นในหน่วยเอดีเอ็มไอ

ตัวอย่าง	ADMI	% การบำบัด
Control	4,796.37	
Coagulation $Al_2(SO_4)_3$	165.05	96.56
Coagulation $FeCl_3$	722.83	84.93
$O_3$	8.78	99.82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ค-1 สถิติเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีโดยเครื่องจาร์เทสต์

ตารางที่ ค-1.1 การสร้างตะกอนทางเคมีด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต

### ANOVA

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: yield

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	4342657.440 <sup>a</sup>	83	52321.174	42.491	.000
Intercept	42373500.893	1	42373500.893	34412.253	.000
trt	2831259.226	5	566251.845	459.863	.000
trt2	743350.496	13	57180.807	46.438	.000
trt * trt2	768047.718	65	11816.119	9.596	.000
Error	206866.667	168	1231.349		
Total	46923025.000	252			
Corrected Total	4549524.107	251			

a. R Squared = .955 (Adjusted R Squared = .932)

### Post Hoc Tests

#### Homogeneous Subsets

Duncan	trt	N	Subset		
			1	2	3
			200	42	275.3571
250	42		318.0952		
300	42		321.9048		
0	42			515.0000	
100	42			515.0000	
150	42			515.0000	
Sig.			1.000	.619	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.  
Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1231.349.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 42.000

b. Alpha = 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Post Hoc Tests

### Homogeneous Subsets

trt2	N	Subset																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						
60	1	323.6																
	8	1																
30	1	339.1	339.1															
	8	6	6															
20	1		353.0	353.0														
	8		5	5														
15	1			365.8	365.8													
	8			3	3													
10	1				384.7	384.7												
	8				2	2												
9	1					391.3												
	8					8												
8	1					397.5	397.5											
	8					0	0											
7	1					408.0	408.0											
	8					5	5											
6	1						420.8	420.8										
	8						3	3										
5	1							434.7	434.722									
	8							2	2									
4	1								451.38									
	8									451.3								
3	1									470.2	470.2							
	8									7	7							
2	1										491.3	491.3						
	8										8	8						
1	1											508.8	508.8					
	8											8	8					
Sig		.185	.237	.276	.108	.069	.060	.237	.156	.108	.073	.136						

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 3447.421.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 18.000.

b. Alpha = 0.05.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1.2 การสร้างตะกอนทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์

ANOVA

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: yield

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	7633712.996 <sup>a</sup>	83	91972.446	26.679	.000
Intercept	40588445.337	1	40588445.337	11773.569	.000
trt	6205848.115	5	1241169.623	360.028	.000
trt2	453556.052	13	34888.927	10.120	.000
trt * trt2	974308.829	65	14989.367	4.348	.000
Error	579166.667	168	3447.421		
Total	48801325.000	252			
Corrected Total	8212879.663	251			

a. R Squared = .929 (Adjusted R Squared = .895)

Post Hoc Tests

trt

Homogeneous Subsets

Duncan		yield		
trt	N	Subset		
		1	2	3
250	42	161.4286		
300	42		198.5714	
200	42			502.9762
0	42			515.0000
100	42			515.0000
150	42			515.0000
Sig.		1.000	1.000	.400

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 3447.421.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 42.000.

b. Alpha = 0.05.

trt2

## Homogeneous Subsets

yield

Duncan

trt2	N	Subset				
		1	2	3	4	5
30	18	369.1667				
60	18	369.1667				
20	18	372.5000				
10	18	374.1667				
8	18	376.3889				
9	18	376.3889				
7	18	376.9444				
6	18	380.2778				
5	18	382.5000	382.5000			
4	18	393.6111	393.6111			
15	18		422.5000	422.5000		
3	18			443.0556	443.0556	
2	18				473.6111	473.6111
1	18					508.3333
Sig.		.307	.054	.295	.120	.078

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 3447.421.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 18.000.

b. Alpha = 0.05.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-2 สถิติเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธี โฟโตแคทาไลซิส โฟโตไลซิส และ โอโซนเนชั่น

ตารางที่ ค-2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีโฟโตแคทาไลซิส โฟโตไลซิส และโอโซนเนชั่น

### ANOVA

yield

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.045	2	.022	382.788	.000
Within Groups	.000	6	.000		
Total	.045	8			

### Post Hoc Tests

#### Multiple Comparisons

Dependent Variable: yield  
Tukey HSD

(I) trt	(J) trt	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1.0	2.0	-.135000	.006230	.000	-.15412	-.11588
	3.0	.025333	.006230	.016	.00622	.04445
2.0	1.0	.135000	.006230	.000	.11588	.15412
	3.0	.160333	.006230	.000	.14122	.17945
3.0	1.0	-.025333	.006230	.016	-.04445	-.00622
	2.0	-.160333	.006230	.000	-.17945	-.14122

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

### Homogeneous Subsets

		yield		
		Tukey HSD <sup>a</sup>		
trt	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
3.0	3	.19000		
1.0	3		.21533	
2.0	3			.35033
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

หมายเหตุ : (1)วิธีโฟโตแคทาไลซิส (2)วิธีโฟโตไลซิส (3)วิธีโอโซนเนชั่น

ค-3 สถิติเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนเนชั่น

ตารางที่ ง-3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีโดยแปรค่าพีเอชด้วยวิธีโอโซนเนชั่น

### Oneway

#### ANOVA

yeild

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.036	4	.009	93.435	.000
Within Groups	.001	10	.000		
Total	.037	14			

### Post Hoc Tests

#### Homogeneous Subsets

yeild

Student-Newman-Keuls<sup>a</sup>

trt	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
11	3	.08967			
3	3		.15000		
5	3			.19433	
9	3			.20667	
7	3				.22800
Sig.		1.000	1.000	.156	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีโดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสด้วยวิธี  
โอโซนชั้น

## Oneway

### ANOVA

yield

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.027	5	.005	139.090	.000
Within Groups	.000	12	.000		
Total	.028	17			

## Post Hoc Tests

### Homogeneous Subsets

Student-Newman-Keuls<sup>a</sup>

yield

trt	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
45	3	.08133				
30	3		.09633			
60	3		.09967			
15	3			.11467		
5	3				.15233	
0	3					.19500
Sig.		1.000	.527	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3,000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

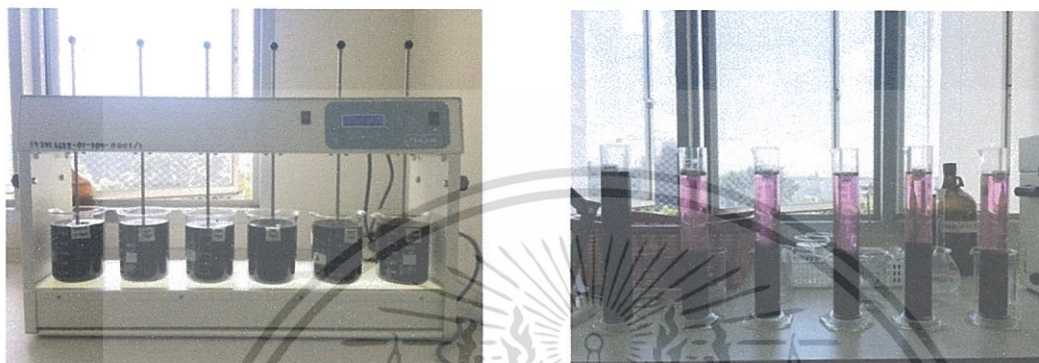


ภาคผนวก ง  
รูปภาพการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมดและสีด้วยวิธีการสร้างตะกอน  
ทางเคมีร่วมกับวิธีไอโซเนชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

รูปภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีด้วยวิธีการสร้างตะกอนทางเคมี



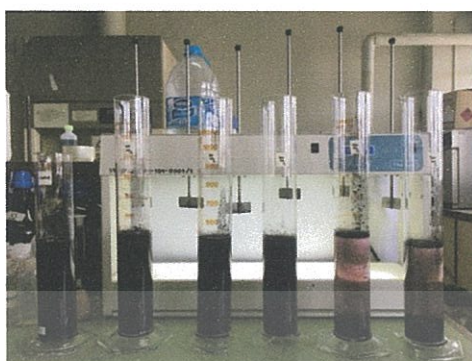
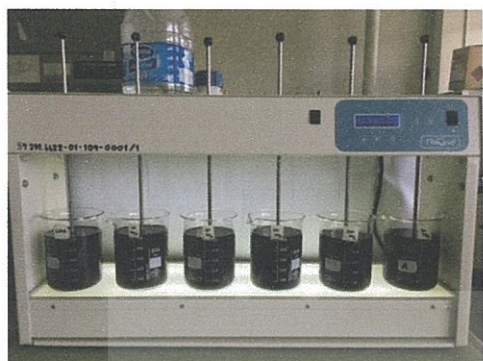
รูปที่ ง-1 ผลของการหาช่วงวิธีการสร้างตะกอนเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต



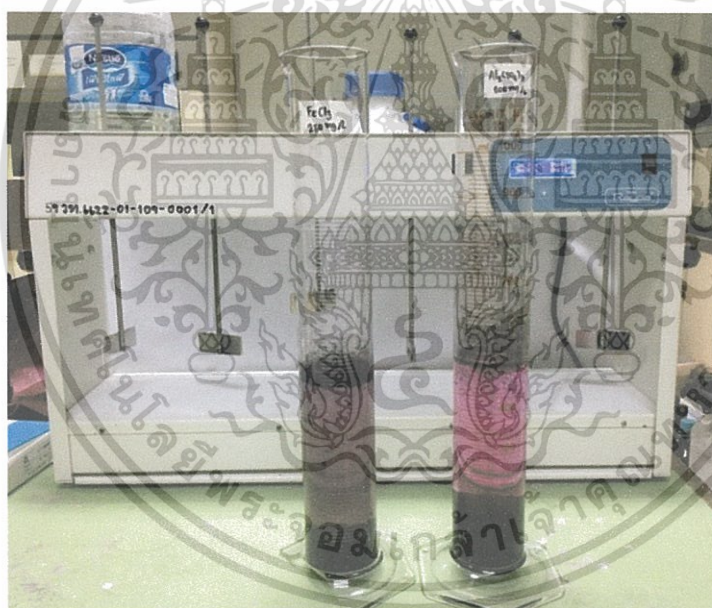
รูปที่ ง-2 ผลของอะลูมิเนียมซัลเฟต

แปรค่าความเข้มข้นที่ 0, 100, 150, 200, 250, 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

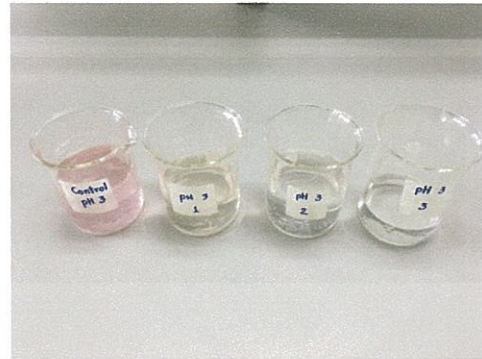
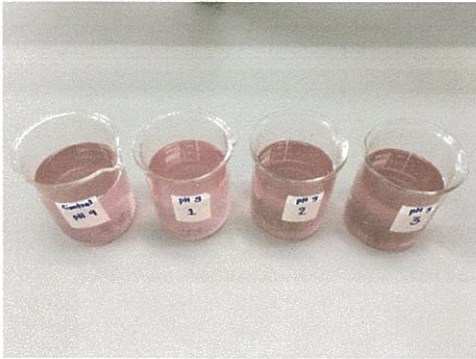


รูปที่ ๓-3 ผลของเฟอร์ริกคลอไรด์ แปรค่าความเข้มข้นที่ 0, 100, 150, 200, 250, 300 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ ๓-4 ผลการเปรียบเทียบอะลูมิเนียมเหนียวกับเฟอร์ริกคลอไรด์

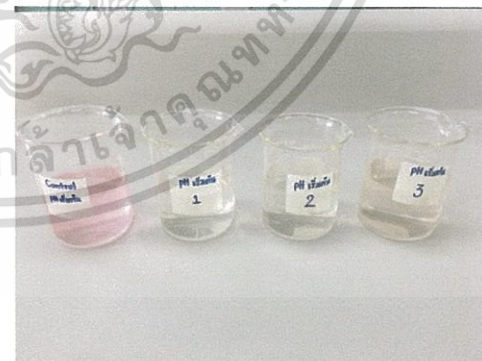
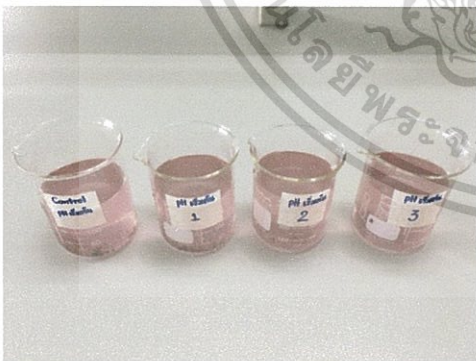
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-5 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยปรับพีเอช 3

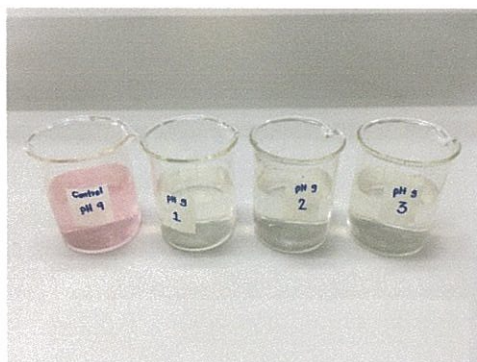
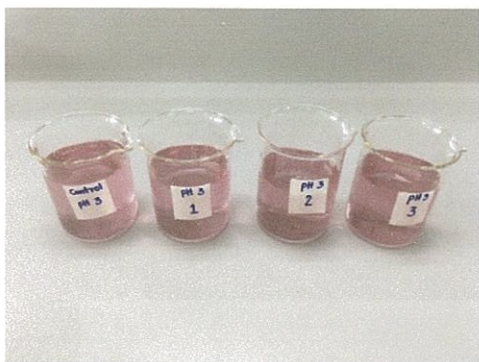


รูปที่ ง-6 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยปรับพีเอช 5

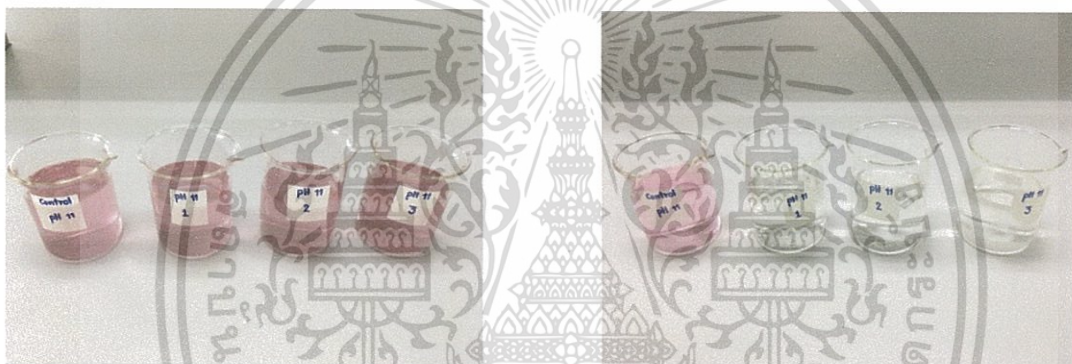


รูปที่ ง-7 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยปรับพีเอช 6.75

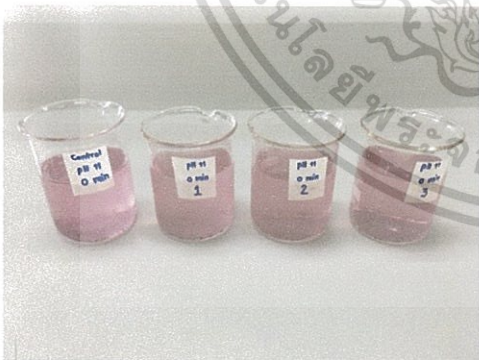
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-8 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยปรับพีเอช 9

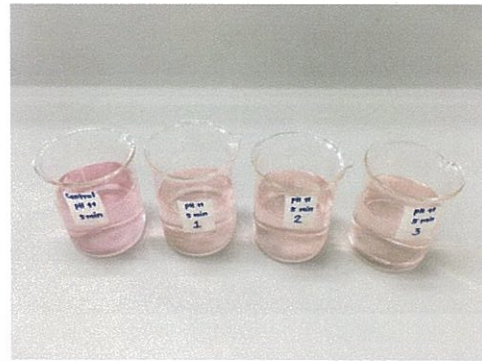
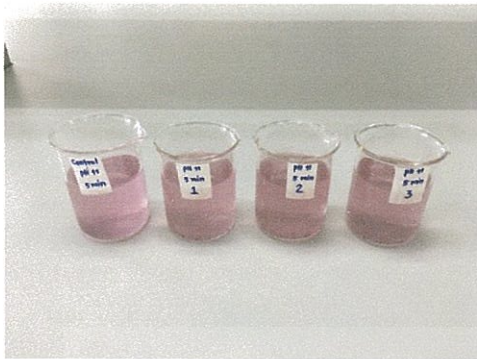


รูปที่ ง-9 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยปรับพีเอช 11



รูปที่ ง-10 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 0 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-11 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 5 นาที

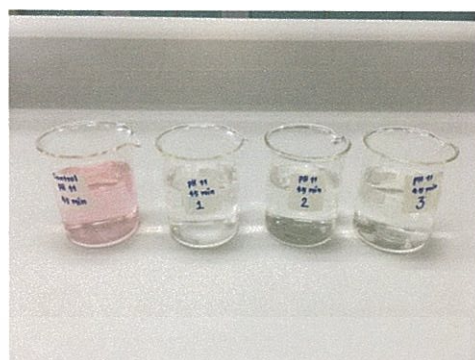
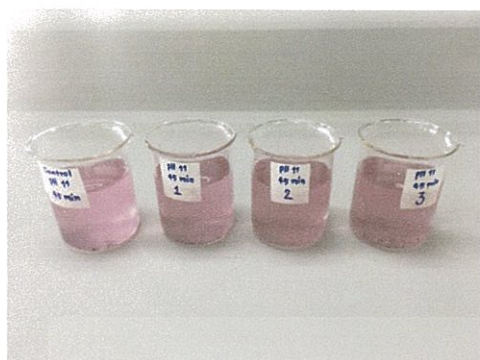


รูปที่ ง-12 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 15 นาที

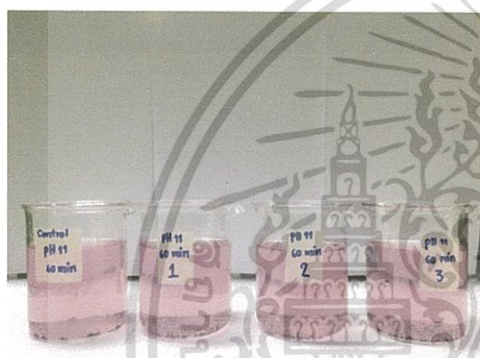


รูปที่ ง-13 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-14 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 45 นาที



รูปที่ ง-15 น้ำทิ้งก่อนและหลังผ่านการกำจัดสารอินทรีย์และสี โดยระยะเวลาสัมผัส 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้