

การบำบัดสารละลายลิกนินด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน

TREATMENT OF LIGNIN SOLUTION BY OZONE-
OXIDATION PROCESS



พิชดา พูลคุณานุกร
วัชรพงษ์ บัวทอง
โสภิตา เพ็ชรล้ำ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ปีการศึกษา 2562

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TREATMENT OF LIGNIN SOLUTION BY OZONE-
OXIDATION PROCESS



PITCHADA

POONKUNANUKUL

WATCHARAPONG

BUATHONG

SOPITA

PHETLAM

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

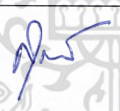
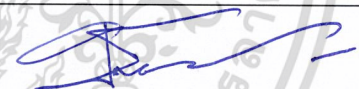
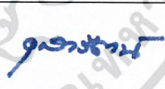
เอกสารนี้ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ACADEMIC YEAR 2019

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดสารละลายลิกนินด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน
 TREATMENT OF LIGNIN SOLUTION BY OZONE-
 OXIDATION PROCESS

ชื่อนักศึกษา นางสาวพิชดา พูลคุณานุกร รหัสนักศึกษา 59050592
 นายวัชรพงษ์ บัวทอง รหัสนักศึกษา 59050611
 นางสาวโสภิตา เพ็ชรล้ำ รหัสนักศึกษา 59050629

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
 ภาควิชา เคมี
 ปีการศึกษา 2562
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี
 สิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชวาลย์ ศรีวิงษ์ กรรมการ	
รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดสารละลายลิกนินด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพิชดา พูลคุณานุการ รหัสนักศึกษา 59050592
	นายวัชรพงษ์ บัวทอง รหัสนักศึกษา 59050611
	นางสาวโสภิตา เพ็ชรล่ำ รหัสนักศึกษา 59050629
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการกำจัดสีและซีไอดีของลิกนินด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน ในถึงปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่มีโอโซนป้อนเข้าระบบในอัตราคงที่เท่ากับ 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ทำการทดสอบและยืนยันความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดีของระบบบำบัดด้วยโอโซนโดยใช้สารละลายเมทธิลีนบลู ผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายด้วยสายตาพบว่าสีของสารละลายลิกนินที่มีซีไอดีต่างกันทั้ง 4 ระดับมีสีจางลงจนใสตามเวลาในการทำปฏิกิริยา ผลการวัดสีในสารละลายลิกนินที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนนาน 30 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลงจาก 63.3% เป็น 30.3% และ 18.5% เมื่อสารละลายมีค่าซีไอดีเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 65.0 ± 8.63 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 187 ± 9.24 และ 357 ± 18.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โอโซนสามารถกำจัดซีไอดีในสารละลายลิกนินที่ทดสอบได้ แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความสามารถในการกำจัดสีของลิกนินด้วยโอโซน การบำบัดสารละลายลิกนินที่มีค่าสีและซีไอดีเริ่มต้นเท่ากับ 188 ± 38 ADMI และ 65.0 ± 8.6 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยโอโซนนาน 60 นาที พบว่าโอโซนสามารถกำจัดสีและซีไอดีได้ 77% และ 39% ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 80% ในทางกลับกันประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมีค่าลดลงเหลือ 28% เมื่อเพิ่มเวลาในการบำบัดเป็น 120 นาที

คำสำคัญ : ลิกนิน, โอโซน, การกำจัดสี, การกำจัดซีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	TREATMENT OF LIGNIN SOLUTION BY OZONE- OXIDATION PROCESS
Students	Miss Pitchada Poonkunanukul Student ID 59050592 Mr. Watcharapong Buathong Student ID 59050611 Miss Sopita Phetlam Student ID 59050629
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2562
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Usarat Thawornchaisit

Abstract

COD and color removal from lignin solution by ozone oxidation was investigated in this special project using batch reactor with constant ozone feeding rate of 158 mg/h. COD and color removal efficiency of ozone treatment system was tested and verified using methylene blue as surrogate solution. Visual inspection on solution color revealed that color of lignin solutions with four different initial COD concentrations was faded and became clear with increasing reaction time. Color determination in the 30 min-ozone treated solutions showed that discolorization efficiency decreased from 63.3% to 30.3% and 18.5% when initial COD concentration increased from 65.0 ± 8.63 mg/L to 187 ± 9.24 and 357 ± 18.5 mg/L, respectively. Ozone also remove COD in the tested lignin solutions, however, treatment efficiency was lower than discolorization efficiency using ozone. Discolorization and COD removal efficiency of 77% and 39% were observed when a lignin solution with initial color and COD of 188 ± 38 ADMI and 65.0 ± 8.6 mg/L was treated with ozone for 60 min. Increase in color removal efficiency up to 80% was observed while COD removal efficiency reduced to 28% when reaction time with ozone increased to 120 min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Keywords : Lignin, Ozone, Color removal, COD removal.
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความร่วมมือและความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยให้คำปรึกษา และแนะนำ ทั้งในด้านการวางแผนงาน การให้ความรู้ทางวิชาการ อีกทั้งยังให้ความช่วยเหลือเสนอแนวทางที่ดีในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษ และขอขอบคุณ คณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษ ได้แก่ รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ผศ.ดร.ชาลย์ ศรีวงษ์ ที่กรุณาสละเวลาเข้ามาเข้าร่วมรับฟัง ให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะโครงการพิเศษนี้ ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ นักวิทยาศาสตร์ประจำภาคเคมีที่คอยให้คำปรึกษา ดูแล และให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาสารเคมี ด้านอุปกรณ์ อีกทั้งยังสอนการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ในการทำโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวก และให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือในการทำโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการสาขาวิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการจัดการด้านการเงิน ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เป็นส่วนหนึ่งของสถาบันการศึกษา

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้ได้รับการศึกษา คอยให้กำลังใจ คอยอบรมสั่งสอน และเป็นแรงผลักดันในการดำเนินงานวิจัย รวมถึง รุ่นพี่ และเพื่อน ๆ ในสาขาวิชาเคมี สิ่งแวดล้อมทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือ และแนะนำ ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

พิชดา	พุลคุณานุกร
วัชรพงษ์	บัวทอง
โสภิตา	เพ็ชรล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.....	4
2.1.1 อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ.....	5
2.1.2 อุตสาหกรรมกระดาษ.....	9
2.1.3 อุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์.....	10
2.2 ลิกนิน.....	10
2.2.1 โครงสร้างและสมบัติของลิกนิน.....	11
2.2.2 ประเภทของลิกนิน.....	12
2.2.3 ลิกนินจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ.....	12
2.2.4 ผลกระทบของลิกนิน.....	12
2.3 เมทิลีนบลู.....	13
2.4 กระบวนการไอโซนออกซิเดชัน.....	13
2.4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไอโซน.....	13
2.4.2 การผลิตไอโซน.....	14
2.4.3 กลไกการสลายตัวของไอโซน.....	15
2.4.4 การประยุกต์ใช้ประโยชน์ไอโซน.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 American Dye Manufacturers Institute (ADMI).....	24
2.5.1 ความแตกต่างระหว่างการวัดค่าสีในหน่วย ADMI กับการวัดค่าสีในหน่วย Platinum-Cobalt	24
2.5.2 หลักการตรวจวัดค่าสีในหน่วย ADMI.....	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	31
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	31
3.1.2 สารเคมี.....	31
3.2 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษา	32
3.2.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ทดสอบเพื่อยืนยันความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดี ด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน	32
3.2.2 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดี ด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน	32
3.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำตัวอย่าง.....	33
3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน	33
3.4.1 การเดินระบบโอโซน	33
3.4.2 การศึกษาอัตราการผลิตก๊าซโอโซน	34
3.4.3 การทดสอบยืนยันความสามารถของระบบโอโซนเนชั่นในการกำจัดสี และซีโอดีในสารละลายตัวอย่าง.....	34
3.4.4 การศึกษาผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อความสามารถในการ บำบัดสารละลายอัลคาไลน์ลิควิน	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	36
4.1 ลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษา	36
4.2 ผลการศึกษาการผลิตโอโซนและการทดสอบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพการกำจัดสี และซีโอดีของกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน	37
4.2.1 อัตราการผลิตก๊าซโอโซน.....	37
4.2.2 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดี ด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน	38
4.3 ผลการศึกษาการกำจัดสีและซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิควินด้วยโอโซน	43
4.3.1 สารละลายอัลคาไลน์ลิควิน ก	44
4.3.2 สารละลายอัลคาไลน์ลิควิน ข, ค และ ง	48

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง	54
5.2 วิจารณ์ผลและข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก.....	60
ภาคผนวก ข	86
ภาคผนวก ค.....	96



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างข้อมูลวัตถุดิบและปริมาณการใช้น้ำในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประเภทต่าง ๆ	8
2.2 ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประเภทต่าง ๆ.....	8
2.3 เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารออกซิแดนซ์ต่าง ๆ.....	21
2.4 การเทียบค่าความเป็นกรดต่างเมื่อใช้ไอโซนร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะต่าง ๆ	23
3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้	33
4.1 สมบัติของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา.....	37
ก.1 การวัดค่าหา %T ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	65
ก.2 Munsell Value Vx as a Function of CIE Tristimulus Value (luminance factor) X.....	68
ก.3 Munsell Value Vy as a Function of CIE Tristimulus Value (luminance factor) Y	73
ก.4 Munsell Value Vz as a Function of CIE Tristimulus Value (luminance factor) Z.....	78
ก.5 ปริมาณน้ำตัวอย่างและสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่าง ๆ.....	84
ข.1 ลักษณะสมบัติของสารละลายเมทธิลีนบลู.....	86
ข.2 ลักษณะสมบัติของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก	86
ข.3 ลักษณะสมบัติของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ข	87
ข.4 ลักษณะสมบัติของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ค	87
ข.5 ลักษณะสมบัติของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ง.....	87
ข.6 การวัดปริมาณไอโซนจากเครื่องผลิตไอโซน.....	88
ข.7 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าสีที่บำบัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการของสารละลาย เมทธิลีนบลู.....	88
ข.8 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าซีโอดีที่บำบัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ ของสารละลายเมทธิลีนบลู	89
ข.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีของสารละลายเมทธิลีนบลู.....	89
ข.10 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าสีที่บำบัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการของสารละลาย อัลคาไลน์ลิทมิ้น ก.....	90
ข.11 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าซีโอดีที่บำบัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ ของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก.....	90
ข.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก.....	91

ข.13 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าสีที่บับัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการของสารละลาย อัลคาไลน์ลิกันิน ข.....	91
ข.14 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าซีไอดีที่บับัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ ของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ข.....	92
ข.15 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ข.....	92
ข.16 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าสีที่บับัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการของสารละลาย อัลคาไลน์ลิกันิน ค.....	93
ข.17 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าซีไอดีที่บับัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ ของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ค.....	93
ข.18 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ค.....	94
ข.19 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าสีที่บับัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการของสารละลาย อัลคาไลน์ลิกันิน ง.....	94
ข.20 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าซีไอดีที่บับัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ ของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ง.....	95
ข.21 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ง.....	95
ค.1 ข้อมูลค่าสีของสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้วิธีทดสอบด้วย One-way Anowa.....	96
ค.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลค่าสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ละคู่ โดยใช้วิธี LSD.....	97
ค.3 ข้อมูลปริมาณซีไอดีของสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้วิธีทดสอบด้วย One-way Anowa	98
ค.4 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลปริมาณซีไอดีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ละคู่ โดยใช้วิธี LSD.....	99
ค.5 ข้อมูลค่าสีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ก โดยใช้วิธีทดสอบด้วย One-way Anowa	100
ค.6 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลค่าสีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ก ที่ละคู่ โดยใช้วิธี LSD.....	101
ค.7 ข้อมูลปริมาณซีไอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ก โดยใช้วิธีทดสอบด้วย One-way Anowa	102
ค.8 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลปริมาณซีไอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ก ที่ละคู่ โดยใช้วิธี LSD.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ....	4
2.2 ประเภทของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ	5
2.3 แผนผังการจัดเรียงตัวของลิกนิน เซลลูโลส และฮิมิเซลลูโลส.....	10
2.4 โครงสร้างการเชื่อมต่อพันธะของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน	11
2.5 สูตรโครงสร้างของหน่วยย่อยของลิกนิน	11
2.6 สูตรโครงสร้างของเมทิลีนบลู	13
2.7 การเกิดโอโซนตามธรรมชาติ	14
2.8 แผนภาพแสดงกระบวนการสร้าง O ₃ ด้วยวิธี Corona Discharge.....	14
2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซนชั้นทั้งทางตรงและทางอ้อม	15
2.10 การเกิดเรโซแนนซ์ของโมเลกุลโอโซน	16
2.11 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Dipole-mediate attack.....	16
2.12 การสลายตัวของอัลดีไฮด์และคีโตนด้วยก๊าซโอโซน	17
2.13 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Electrophilic attack	17
2.14 ปฏิกิริยาการแตกตัวโอโซนในน้ำ	20
2.15 ปฏิกิริยาโอโซนในการออกซิไดซ์สารฟีนอล	22
2.16 ปฏิกิริยาโอโซนในการออกซิไดซ์สารเนฟทาลีน	22
3.1 แผนผังการบำบัดน้ำตัวอย่างด้วยโอโซน	33
4.1 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในการทดสอบระบบ	36
4.2 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายอัลคาลีนลิกนินที่มีค่าซีโอดีเริ่มต้นต่างกัน ที่ใช้ในการศึกษา	37
4.3 ปริมาณการผลิตก๊าซโอโซนที่เวลาต่าง ๆ.....	38
4.4 สีของสารละลายเมทิลีนบลูหลังบำบัดด้วยโอโซนที่เวลาแตกต่างกัน เทียบกับสีของ สารละลายเมทิลีนบลูก่อนบำบัด	39
4.5 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสีสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง.....	40
4.6 ผลของค่าสีสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับ โอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง	41
4.7 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง.....	42

4.8 ผลของปริมาณซีไอดีสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง	43
4.9 สีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก หลังบำบัดด้วยโอโซนที่เวลาแตกต่างกัน เทียบกับสีของสารละลายลิทมิ้นก่อนบำบัด	44
4.10 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสีสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง	45
4.11 ผลของค่าสีสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซน ที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง	46
4.12 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ใน การทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง	47
4.13 ผลของปริมาณซีไอดีสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง.....	48
4.14 สีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ข หลังบำบัดด้วยโอโซนนาน 30 นาที เทียบกับสีของสารละลายลิทมิ้นก่อนบำบัด.....	49
4.15 สีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ค หลังบำบัดด้วยโอโซนที่เวลาแตกต่างกัน เทียบกับสีของสารละลายลิทมิ้นก่อนบำบัด	49
4.16 สีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ง หลังบำบัดด้วยโอโซนนาน 30 นาที เทียบกับสีของสารละลายลิทมิ้นก่อนบำบัด.....	50
4.17 ผลของค่าสีสารละลายลิทมิ้น ข และ ง ที่ผ่านการบำบัดที่เวลา 30 นาที ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง	51
4.18 ผลของปริมาณซีไอดีสารละลายลิทมิ้น ข ค และ ง ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง	52
4.19 ผลของประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายลิทมิ้น ข ค และ ง ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง.....	52
ก.1 กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ จัดเป็นอุตสาหกรรมหลักที่เชื่อมต่อกับภาคการเกษตรเข้ากับภาคอุตสาหกรรม ด้วยการใช้วัตถุดิบจากภาคการเกษตร เช่น ไม้ยูคาลิปตัส ไม้ไผ่ ปอ ฟางข้าว และชานอ้อย เป็นต้น มาผ่านกระบวนการผลิตและแปรรูปให้เป็นเยื่อ (pulp) เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิตกระดาษ เช่น กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษกราฟ เป็นต้น อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษจึงเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตกระดาษของประเทศและมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก นอกจากนี้การรณรงค์ ลด ละ เลิกใช้พลาสติก ทำให้บรรจุภัณฑ์ทดแทน รวมถึงบรรจุภัณฑ์กระดาษ เช่น หลอดกระดาษ กล่องกระดาษ ได้รับความนิยมนำมาใช้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมกลางน้ำ และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่น กล่องกระดาษ ถุงกระดาษ รวมไปถึงอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ที่เป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำ มีแนวโน้มขยายตัวตามไปด้วย ดังจะเห็นได้จากปริมาณการผลิตที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 188,386 ตันในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561 เป็น 190,720 ตัน ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2562 หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.72 เปอร์เซ็นต์ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2562)

อุตสาหกรรมกระดาษ โดยเฉพาะในส่วนการผลิตเยื่อกระดาษ จัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้น้ำสูง ทำให้กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมีน้ำเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้การผลิตเยื่อกระดาษ 1 ตัน ทำให้เกิดน้ำเสียสูงถึง 9.05 ลูกบาศก์เมตร (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, มปป.) น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีลิกนิน อนุพันธ์ของลิกนิน และโพลีเมอร์ของลิกนิน เป็นส่วนประกอบ ทำให้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมีสีน้ำตาลปนเหลืองไปจนถึงสีน้ำตาลเข้ม (ชมพูนุทและสุกัญญา, 2560) นอกจากนี้ยังมีค่าซีโอดี บีโอดี และของแข็งสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ ซึ่งหากไม่ได้รับการบำบัดหรือการจัดการที่เหมาะสมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม สามารถทำให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำได้ต่อไป

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ Activated Sludge เป็นกระบวนการทางชีวภาพที่จัดว่าเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด (วรารักษ์และคณะ, 2550) อย่างไรก็ตามพบว่า น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดยังมีสีน้ำตาลค่อนข้างเข้ม วิธีการลดสีที่โรงงานส่วนใหญ่ใช้คือ การตกตะกอนด้วยสารส้ม ซึ่งสามารถช่วยลดสีน้ำทิ้งลงได้ในระดับหนึ่ง แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดสำคัญคือการใช้สารส้มมากเกินไปจะทำให้เกิดฟองและมีปริมาณสารเคมีตกค้างในน้ำ นอกจากนี้ยังมีพบปัญหาการรีดน้ำออกจากกาก

ตะกอน (วรารักษ์และคณะ, 2550) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs) จัดเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการกำจัดสีในน้ำ สารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิแดนต์ อย่างเช่น สารเคมีเฟนต์ัน (Fenton's reagents) สามารถออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Yang and James, 2006 อ้างถึงในวนิดา, 2555) งานวิจัยของ ชมพูนุทและสุกัญญา (2560) ได้ศึกษาการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนต์ัน(Photo-Fenton) ซึ่งเป็นการใช้สารเคมีเฟนต์ันร่วมกับรังสียูวี พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถบำบัดสีและซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าซีโอดีและบีโอดีเป็นไปตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนด ข้อจำกัดที่สำคัญของกระบวนการ Photo-Fenton คือเกิดกากตะกอนของเหล็กเฟอร์รัสแม้ว่าน้อยลงเมื่อเทียบกับกระบวนการเฟนต์ันทั่วไป นอกจากนี้การใช้รังสียูวีร่วมในปฏิกิริยา ทำให้ต้องใช้ถังปฏิกิริยาที่มีการออกแบบเป็นพิเศษ ส่งผลให้วิธีการนี้ยังคงอยู่ในขั้นทดสอบแบบต้นแบบ (pilot scale) (Zhang et al., 2019)

กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน จัดเป็น AOPs อีกวิธีการหนึ่งได้รับความนิยม โอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสีในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายในน้ำของออกซิเจน โดยเฉพาะสีแท้หรือสีจริงที่กำจัดได้ยาก เนื่องจากมีความคงตัวสูงมากจนไม่สามารถย่อยสลายและแยกออกโดยการกรองได้ (วนิดา, 2555) โมเลกุลโอโซนสามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับกลุ่มโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (chromophore) ในน้ำ โดยทั่วไปเป็น Polycyclic organic compounds ซึ่งมีทั้งพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ ด้วยการทำให้พันธะคู่ของสารประกอบดังกล่าวแตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงและสีหายไป (วราภรณ์และคณะ, 2550) ข้อดีที่สำคัญอีกประการของการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำเสีย คือไม่มีกากตะกอนที่เกิดขึ้นการทำปฏิกิริยาของโอโซน แต่เนื่องจากการประยุกต์ใช้กระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษยังมีไม่มากนัก โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและ ซีโอดีในน้ำเสียที่มีลักษณะเป็นส่วนประกอบด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดลิกนินในน้ำด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน พร้อมทั้งศึกษาผลของระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนต่อความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษาคือ สารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน
- 2) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่างน้ำก่อนการบำบัดโดยพารามิเตอร์ที่ศึกษา

ได้แก่ พีเอช, สี และซีโอดี

- 3) ระบบบำบัดด้วยโอโซน ประกอบด้วยเครื่องผลิตโอโซนที่มีอัตราการไหลคงที่ และถังปฏิกิริยาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีนำไปใช้ทรงกรบอกทำจากอะคริลิกใส

- 4) การทดสอบเพื่อยืนยันความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดีของระบบบำบัดด้วยโอโซน
- ตัวอย่างน้ำที่ใช้ทดสอบคือ สารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมให้มีค่าซีโอดีประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - ปัจจัยที่ศึกษาหรือตัวแปรต้น คือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับโอโซน แปรค่าที่ 0, 10, 30, 60 และ 120 นาที
 - ตัวแปรตาม ได้แก่ สี และ ซีโอดี
- 5) การศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำตัวอย่าง
- ตัวอย่างน้ำที่ใช้ทดสอบคือ สารละลายลิกนินที่เตรียมให้มีค่าซีโอดีแตกต่างกัน 4 ระดับ โดยซีโอดีที่เตรียมได้มีค่าระหว่าง 50-300 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - ปัจจัยที่ศึกษาหรือตัวแปรต้น คือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับโอโซน (0, 10, 30, 60, 120 และ 150 นาที)
 - ตัวแปรตาม ได้แก่ สี และ ซีโอดี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

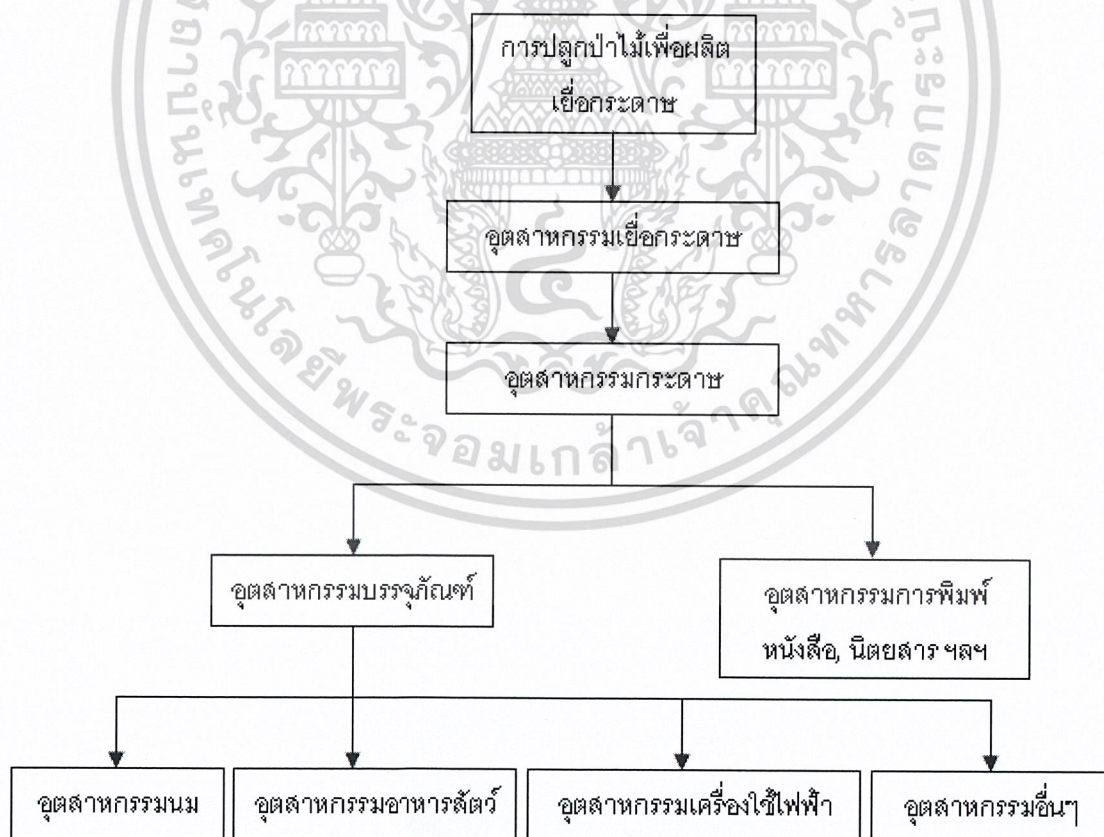
- 1) ได้ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีโอดีของระบบบำบัดด้วยโอโซน
- 2) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ
- 3) ได้เรียนรู้วิธีการดำเนินงานเป็นขั้นตอน และสามารถนำไปปรับใช้ได้ในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

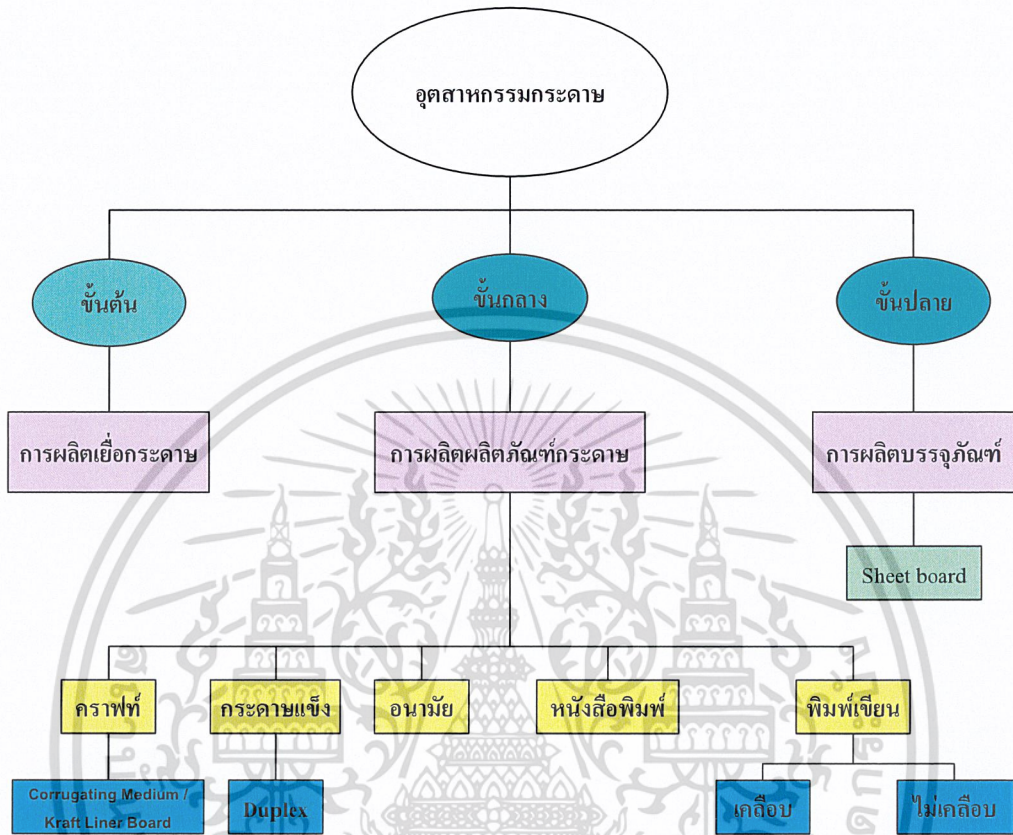
2.1 อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องที่เชื่อมโยงภาคการเกษตรเข้าสู่อุตสาหกรรม ได้แก่ การปลูกป่าไม้เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเยื่อกระดาษ นอกจากนี้ยังเป็นอุตสาหกรรมที่มีความเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่สำคัญคืออุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับอีกหลาย ๆ อุตสาหกรรมดังแสดงในรูปที่ 2.1 รวมถึงเข้ามาเกี่ยวข้องกับการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์เรา เช่น การใช้กระดาษในการจดบันทึก การเขียนติดต่อด้านต่าง ๆ ใช้ในอุตสาหกรรมการพิมพ์เพื่อผลิตเป็นหนังสือ นิตยสาร ภาพสินค้าและบริการเพื่อการโฆษณา เป็นต้น อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ จึงยังจัดเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศถึงแม้ว่าความต้องการกระดาษโดยส่วนรวม โดยเฉพาะกระดาษที่ใช้พิมพ์หนังสือพิมพ์และสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ ลดลง



เอกสารรูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษกับอุตสาหกรรมอื่น ๆ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง: กระทรวงพลังงาน (มปป.)เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ สามารถจำแนกตามลักษณะการใช้พลังงานออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ประเภทของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ
ที่มา : กระทรวงพลังงาน (มปป.)

2.1.1 อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมที่มีการลงทุนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอุตสาหกรรมกระดาษ (กระทรวงพลังงาน, มปป.) จัดเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมขั้นต้นที่นำผลผลิตทางการเกษตรมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเยื่อกระดาษ เยื่อกระดาษนำไปใช้ต่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นกระดาษประเภทต่าง ๆ วัตถุดิบหลักที่นำมาใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษภายในประเทศ ได้แก่ ไม้ยูคาลิปตัส นอกจากนี้ยังพบการใช้ไม้ไผ่ ปอ ฟางข้าวและชานอ้อยสำหรับเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษด้วย

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษประกอบด้วย 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ การผลิตเยื่อ การผลิตแผ่นเยื่อ และกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ (ศิวาพร, 2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) กระบวนการผลิตเยื่อ (Pulp Mill Process)

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจะมีวิธีการผลิตเยื่อ แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการหลัก ๆ ได้แก่ กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical Pulping) กระบวนการผลิตเยื่อเคมี (Chemical Pulping) และกระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี (Semi-Chemical Pulping) (ตลฤดี, 2552)

การผลิตเยื่อ มีหน่วยการทำงานอยู่ 7 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

1.1 หน่วยสับชิ้นไม้ (Chipping) เป็นการเตรียมวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อกระดาษ โดยการคัดแยกส่วนที่ไม่ต้องการออก แล้วนำไปแปรรูปและลดขนาดวัตถุดิบให้เป็นชิ้นไม้ที่มีขนาดตามที่ต้องการ ซึ่งในขั้นตอนนี้ยังไม่ได้มีการใช้สารเคมีเข้ามาช่วยในกระบวนการ จะใช้เพียงแค่เครื่องจักรเท่านั้น

1.2 หน่วยต้มเยื่อ (Cooking) เป็นการนำชิ้นไม้สับและคัดขนาด มาต้มในสารเคมีเพื่อย่อยสลายลิกนินและสารประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในเยื่อไม้ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่กำหนด ด้วยหม้อต้มที่เรียกว่า Kamyr ซึ่งจะใช้สารเคมีจำพวกโซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) เพื่อเป็นน้ำยาเริ่มต้นในการต้มเยื่อ นอกจากนี้ยังมีการเติมโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) อีกด้วย จึงเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการแบบซัลเฟต เยื่อที่ได้หากไม่นำไปฟอกจะนำไปทำเป็นกระดาษห่อหรือกระดาษผิวกล่อง (Kraft Paper and Kraft Liner board) หรือเรียกว่า กระบวนการคราฟท์ (Kraft Process)

1.3 การแยกเยื่อ เป็นการแยกเยื่อและน้ำยาต้มเยื่อออกจากกันในถังต้มเยื่อ จะทำได้โดยการลดความดันลง ไอน้ำจะถูกดันเข้าสู่ถังปล่อยลม (Blow Tank) หลังจากนั้นไอน้ำจะเกิดการควบแน่นที่ Condenser ซึ่งเยื่อจะถูกแยกในถัง Blow Tank และเยื่อที่ถูกแยกออกมาจะถูกส่งไปยังหน่วยล้างเยื่อ

1.4 การล้างและทำความสะอาดเยื่อ เป็นการใช้ตะแกรงหยาบ (Johnson Knotter Screen) เพื่อทำการคัดแยกวัตถุดิบที่ต้มไม่สุกหรือมีขนาดใหญ่ออก เยื่อที่ผ่านการคัดแยกแล้วจะถูกส่งต่อไปยังหน่วยล้างเยื่อ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่หนึ่ง Brown Stack Washer หรือ Drum Washer จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนที่สองโดยนำไปล้างด้วย Counter Current เป็นการใช้น้ำร้อนในการล้างจะเอาน้ำยาต้มเยื่อออกมา และในขั้นตอนที่สามจะนำน้ำที่ได้จากขั้นตอนที่สองไปเก็บไว้ที่ถัง Seal Tank ซึ่งจะนำกลับไปปรับปรุงให้เป็นน้ำยาต้มเยื่อที่สะอาด เยื่อที่ผ่านการล้างแล้วนั้น อาจจะยังมีสิ่งเจือปนอื่น ๆ เช่น เส้นไม้ เปลือกไม้ กวาดทราย เป็นต้น ดังนั้นเยื่อจะต้องถูกส่งไปยังตะแกรงร่อนก่อน เช่น Hopper Screen, Primary Centricleaner, Vibration Screen และ Centricleaner ซึ่งจะทำหน้าที่แยก ดิน ทราย กวาด ออกจากเยื่อ เยื่อที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว จะถูกส่งไปยังหน่วยสกัดลิกนินต่อ

1.5 การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (O₂ Delignification) เยื่อจะถูกรวมเข้ากับออกซิเจน โซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 90-130 °C โดยเยื่อก่อนทำการสกัดจะมีค่า

Kappa Number 10-12 และมีอัตราการใช้ออกซิเจนประมาณ 2% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เมื่อเยื่อผ่านการสกัดลิกนินออกแล้ว จะส่งไปล้างด้วยเครื่อง Wash Pass และส่งไปยังหน่วยฟอกเยื่อ

1.6 การฟอกเยื่อ (Bleaching) ขั้นตอนนี้เป็น การเพิ่มความสว่าง (Brightness) ของเยื่อกระดาษ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความต้องการความสว่างของเยื่อ ซึ่งสามารถทำการฟอกเยื่อแบบหลายขั้นตอนหรือขั้นตอนเดียวก็ได้ โดยการฟอกเยื่อด้วยการใช้ก๊าซคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีน แบ่งเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 (Chlorination : C) เป็นการทำให้ลิกนินละลายออกจากเยื่อให้ได้มากที่สุด โดยจะยังไม่ทำการฟอกสีแต่จะทำปฏิกิริยาให้เกิดเป็นสาร Chlorolignin ในช่วง pH 1-2

ขั้นตอนที่ 2 (Caustic Extraction and Oxygen : E) เป็นการสร้างหรือละลาย Chlorolignin ที่เกิดจากปฏิกิริยา Chlorination ซึ่ง Chlorolignin จะละลายน้ำได้ดีในน้ำร้อนที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่

ขั้นตอนที่ 3 (Hypochlorite Bleaching : Hor Chlorinedioxide : D) เป็นการใส่สารเคมี คลอรีนไดออกไซด์ แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ เพื่อทำให้สีของเยื่อที่มีลิกนิน ตกค้างอยู่ลดลงตามความต้องการ โดยเยื่อที่ผ่านการฟอกแล้วยังคงมีสีคล้ำ

ขั้นตอนที่ 4 (Chlorine Dioxide Bleaching : C) เป็นการฟอกสีเยื่อโดยใช้คลอรีนไดออกไซด์ ในการทำให้เยื่อมีสีขาวสว่างและมีความแข็งแรง เมื่อผ่านการฟอกเยื่อในทุกขั้นตอนด้วยสารเคมีแล้วจะทำการล้างเยื่อด้วยน้ำร้อน

1.7 การทำความสะอาดเยื่อภายหลังการฟอกเยื่อ (Bleached Stock Screening) เป็นการทำความสะอาดเยื่อที่มีสิ่งสกปรกตกค้างอยู่ออก เพื่อให้เยื่อนั้นมีคุณภาพที่สูงขึ้น โดยผ่านการ Centrifugal Cleaner โดยเยื่อที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจะเข้าสู่ Decker เพื่อทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นก่อน แล้วจึงส่งไปยังหน่วยทำแผ่น (Sheeting Plant)

ในแต่ละกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประเภทต่าง ๆ จะมีวัตถุประสงค์ ปริมาณการใช้น้ำ และลักษณะของน้ำเสียที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างข้อมูลวัตถุดิบและปริมาณการใช้น้ำในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประเภทต่าง ๆ

กระบวนการผลิต	วัตถุดิบ	ปริมาณการใช้น้ำ (ลบ.ม./ตันเยื่อ)
1.กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบซัลเฟต	ไม้ยูคาลิปตัส	50
2. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบโซดา	ไม้ยูคาลิปตัส	55
3. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบโซดาและเยื่อกิ่งเคมี	ไม้ยูคาลิปตัส, ชานอ้อย	34.2
4.กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกและผลิตกระดาษพิมพ์เขียน	ไม้ยูคาลิปตัส	22
5. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบไม่ฟอก	ไม้ยูคาลิปตัส	50
6. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีที่ใช้ทำกระดาษสา	ปอสา	225-1,000
7. กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลที่ใช้ทำกระดาษหิ้วเจ้า	ไม้ไผ่	60-47

ที่มา : ฉลาด และชูลิทธิ์ (2548)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประเภทต่าง ๆ

วิธีการผลิต	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./ตันเยื่อ)	ซีโอดี (มก./ล.)	บีโอดี (มก./ล.)	ระดับสี (Pt-Co)	ของแข็ง แขวนลอย (มก./ล.)
1.กระบวนการผลิตเยื่อฟอกขาวกิ่งเคมี	27.37	5,180.0	2,060.0	456.0	2,190.0
2.กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบซัลเฟต	40.0	2,058.0	460.0	958.0	340.0
3.กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบโซดา	53.9	1,300.0	400.0	535.0	400.0

ที่มา : ฉลาด และชูลิทธิ์ (2548)

2) กระบวนการทำแผ่นเยื่อ (Sheeting Process)

เยื่อที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจะมีความเข้มข้นประมาณ 3% จะถูกส่งไปยัง Head Box เพื่อทำการเจือจางเยื่อให้สามารถป้อนกระจายออกสู่ตะแกรงลวดเดินแผ่น ซึ่งน้ำจะซึมผ่านตะแกรงลงด้านล่างแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ที่ Head Box อีกครั้ง ส่วนเยื่อที่ผ่านตะแกรงลวดนั้นจะถูกชุดลูกกด (Pass) เพื่อทำการบีบน้ำออกแล้วนำเข้าสู่ชุดลูกอบ (Cylinder Dryer) โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อน แผ่นเยื่อที่ผ่านเครื่องเดินแผ่นแล้วจะมีความชื้นประมาณ 10% จากนั้นก็จะส่งไปเก็บไว้ที่เก็บผลิตภัณฑ์ (Warehouse)

3) กระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ (Recovery Process)

เป็นระบบที่นำสารเคมีที่เหลืออยู่หลังจากต้มเยื่อแล้วกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของโรงงานและลดปัญหามลภาวะ

3.1 โรงระเหย (Evaporator) เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำดำที่เจือจางที่ได้จากการล้างในกระบวนการผลิตเยื่อ ซึ่งประกอบด้วย สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบเพื่อทำให้น้ำมีความเข้มข้นที่สูงก่อนนำไปเตาเผา เพื่อนำสารเคมีกลับคืน (Recovery Boiler) ในระหว่างที่ทำการระเหยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นนั้น น้ำจะถูกกำจัดออกและนำกลับมาใช้ในขั้นตอนการผลิต Caustic Soda (Causticizing)

3.2 เตาเผานำสารเคมีกลับคืน (Recovery Boiler) เป็นการเผาน้ำดำเข้มข้น (Black Liquor) ความร้อนที่ได้จะนำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า และไอน้ำที่ได้จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป ส่วนน้ำเขียว (Green Liquor) ที่เป็นผลพลอยได้จากหน่วยการผลิตนี้จะใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตน้ำขาว (White Liquor) ในหน่วยการผลิต Caustic Soda แต่จะต้องควบคุมความเข้มข้นของกำมะถันในน้ำขาว ซึ่งจะมีการผลิตโซเดียมซัลเฟตและเถ้าจากเครื่องบำบัดมลพิษทางอากาศภายในเตาเผานำสารเคมีกลับคืน

3.3 หน่วยการผลิต Caustic Soda (Causticizing) จะมีน้ำเขียวซึ่งได้มาจากเตาเผานำสารเคมีกลับคืน ประกอบด้วย Smelt และ Weak Liquor ซึ่งมีโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ในหน่วยของการผลิตนี้จะนำปูนขาวมาผสมกับน้ำเขียว (Green Liquor) ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงรูปเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในการต้มเยื่ออีกครั้ง

2.1.2 อุตสาหกรรมกระดาษ

อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นกลุ่มอุตสาหกรรมชั้นกลางที่ต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อ โดยจะเป็นการนำเยื่อกระดาษ (เยื่อบริสุทธิ์) มาใช้ในการผลิตเป็นกระดาษประเภทต่าง ๆ ซึ่งเยื่อกระดาษมาจากอุตสาหกรรมขั้นต้นจะถูกนำมาผสมกับเยื่อที่ได้มาจากกระดาษรีไซเคิล และเยื่อกระดาษใยยาวที่นำเข้าจากต่างประเทศ เนื่องจากประเทศไทยนั้นยังไม่สามารถผลิตเยื่อกระดาษใยยาวได้ ประเภทของกระดาษที่ผลิตในประเทศไทยประกอบด้วยกระดาษกราฟท์ กระดาษพิมพ์เขียน กระดาษแข็ง กระดาษอนามัย และกระดาษหนังสือพิมพ์ (รูปที่ 2.2)

ขั้นตอนในการผลิตกระดาษประเภทต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมชั้นกลางนั้นมีความคล้ายคลึงกันมาก ซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมเยื่อ (Stock Preparation) และขั้นตอนการผลิตกระดาษ (Papermaking) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเปียก (Wet End) ซึ่งจะครอบคลุมตั้งแต่ Machine Chest ซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำการเก็บน้ำเยื่อ จนถึงส่วนที่ทำการกดรีดน้ำออก (Pressing) และช่วงแห้ง (Dry End) ประกอบด้วยส่วนที่ทำการอบแห้งกระดาษ (Drying) ส่วนการขัดมันกระดาษ (Calendering) และส่วนการรอกแบ่งม้วนกระดาษ และตกแต่งผลิตภัณฑ์ (Reel and Finishing or Converting)

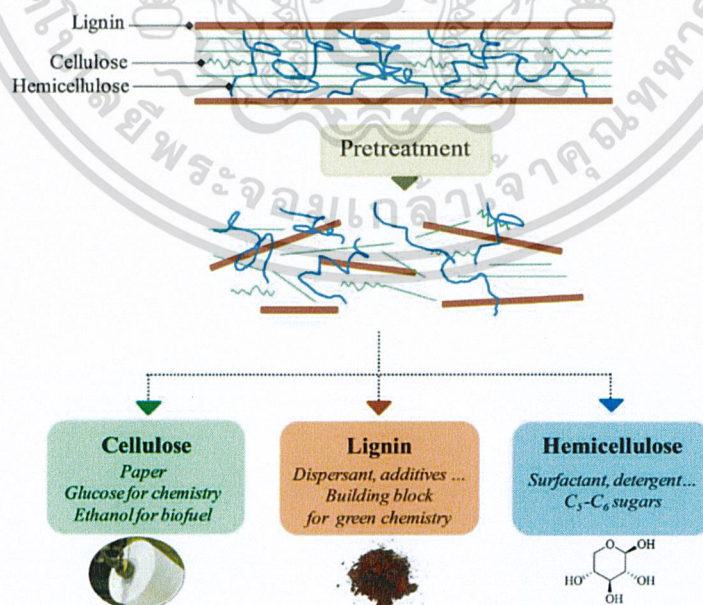
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 อุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์

อุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์ จัดเป็นอุตสาหกรรมชั้นปลายหรืออุตสาหกรรมปลายน้ำ ที่นำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมกลางน้ำ เช่น กระดาษกราฟ มาผลิตเป็นกล่องลูกฟูก เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ของสินค้าต่าง ๆ เช่น กล่องใส่ผลไม้ กล่องใส่ของ กล่องใส่เครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักคือ การผลิตแผ่นลูกฟูก (Corrugating) และการผลิตกล่องลูกฟูก (Converting) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย มีทั้งผลิตแผ่นลูกฟูกและกล่อง หรือมีการผลิตกล่องเพียงอย่างเดียว

2.2 ลิกนิน

ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของของเปลือก ชัง หรือส่วนที่เป็นเยื่อใยของรากและลำต้นของพืช พบได้ในส่วนของผนังเซลล์และบริเวณระหว่างเซลล์ของพืช โดยพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเซลล์ของพืช ทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสให้ติดกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงดังแสดงในรูปที่ 2.3 นอกจากนี้ยังช่วยลดการระเหยของน้ำที่อยู่ระหว่างเนื้อเยื่อไซเลมและผนังเซลล์ และทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันการทำลายเนื้อเยื่อของพืชจากจุลินทรีย์ ลิกนินจะถูกสร้างจากส่วนโคนต้น ไปสู่ยอด โดยปริมาณจะเพิ่มมากขึ้นตามเมื่อพืชมีอายุมากขึ้น และชนิดของเนื้อไม้ ปริมาณที่มีในเนื้อไม้ขึ้นกับชนิดของไม้ โดยไม้เนื้ออ่อนจะมีองค์ประกอบของลิกนินประมาณร้อยละ 23 ถึง 33 ของน้ำหนัก ส่วนไม้เนื้อแข็งจะมีปริมาณร้อยละ 16 ถึง 25 ของน้ำหนัก (รวีศ, 2548)

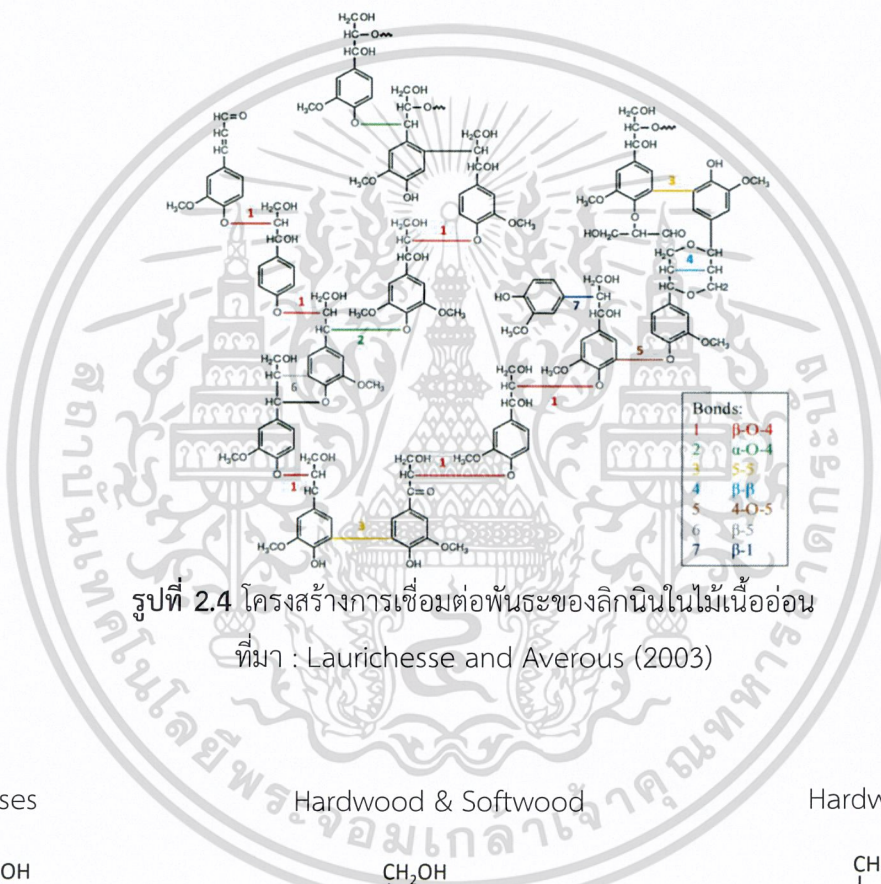


รูปที่ 2.3 แผนผังการจัดเรียงตัวของลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

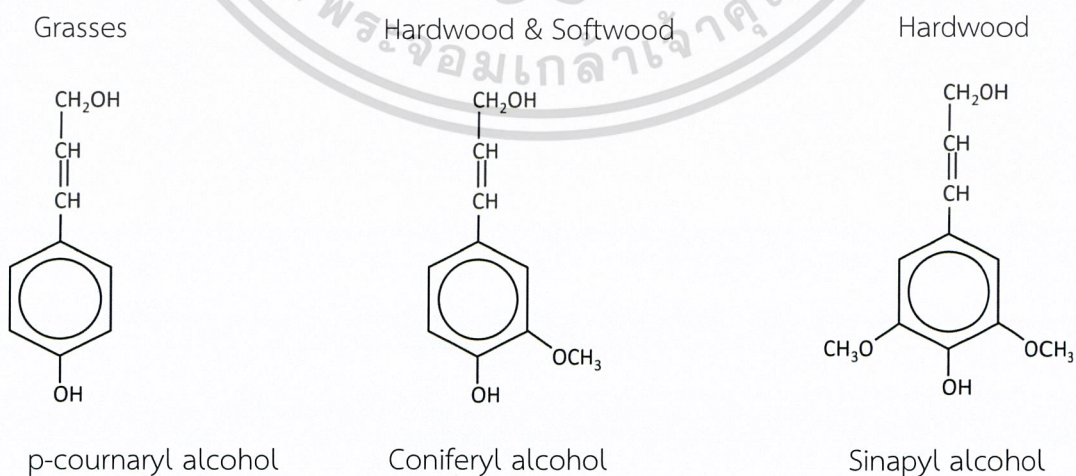
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ขอขออนุญาต
 ที่มา : Laurichesse and Averous (2003)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 โครงสร้างและสมบัติของลิกนิน

ลิกนิน (lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินประกอบด้วยมอนอเมอร์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมาเชื่อมต่อกันข้างกันเกิดเป็นมีโครงสร้างเป็นร่างแหหรือโพลิเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ (รวิต, 2548) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4 (Laurichesse and Averous, 2003) มอนอเมอร์หรือหน่วยย่อยของลิกนินมักพบได้ในธรรมชาติมีอยู่ 3 ชนิด คือ *p*-Counaryl alcohol, Coniferyl alcohol และ Sinapyl alcohol ที่มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.5 (สารชัย, 2548)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างการเชื่อมต่อพันธะของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน
ที่มา : Laurichesse and Averous (2003)



รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของหน่วยย่อยของลิกนิน
ที่มา : สารชัย (2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลของลิกนินจะมีการเชื่อมต่อกันในรูปแบบของอีเทอร์ และคาร์บอน-คาร์บอน จะส่งผลให้การย่อยสลายทางชีวภาพและทางเคมีทำได้ยาก เนื่องจากมีองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายแต่โดยทั่วไปจะประกอบด้วยกลุ่มฟีนอลิกไฮดรอกซิลจับตัวกับกลุ่มฟีนิลพรเพน กลุ่มแอลิฟาติกไฮดรอกซิล และกลุ่มเมทอกซิลกับกลุ่มคาร์บอนิล (รวีศ, 2548)

2.2.2 ประเภทของลิกนิน

ลิกนินสามารถแบ่งตามวิธีการเตรียมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้ (วิชา, 2545)

1. ซัลไฟต์ลิกนิน (*Sulfite lignin*) หรือจะเรียกว่าลิกโนซัลโฟเนต ผลิตได้จากกระบวนการทำเยื่อแบบซัลไฟต์ ซึ่งในกระบวนการนี้จะได้น้ำดำออกมามีลิกโนซัลโฟเนตอยู่ประมาณร้อยละ 40 ถึง 60 และมีมวลโมเลกุลประมาณ 250 ต่อหนึ่งหน่วยมอนอเมอร์ ลิกโนซัลโฟเนตจะสามารถละลายในน้ำได้แต่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

2. อัลคาไลน์ลิกนิน (*Alkaline lignin*) ได้มาจากกระบวนการคราฟท์ น้ำดำที่ออกมาจากกระบวนการนี้จะเรียกว่า Soda black liquor และ Sulfate black liquor หรือ kraft black liquor ซึ่งอัลคาไลน์ลิกนินจะประกอบได้ด้วยหมู่กรด ได้แก่ หมู่ฟีนอลิก และหมู่คาร์บอกซิลิก มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล จะละลายในเบส และตัวทำละลายอินทรีย์

2.2.3 ลิกนินจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

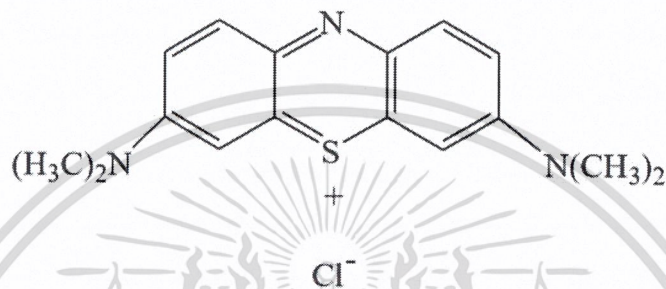
น้ำเสียจากอุตสาหกรรมจะมีองค์ประกอบตามสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ น้ำเสียจะถูกปล่อยมาจากกระบวนการฟอกเยื่อ ต้มเยื่อ ล้างเยื่อ และส่วนการนำสารเคมีกลับคืน เช่น ในกระบวนการผลิตเยื่อเคมี (Chemical Pulping) ในกระบวนการนี้เยื่อที่ได้จะมีปริมาณลิกนินอยู่น้อยมาก มีความแข็งแรงสูง หากใช้กระบวนการแบบอัลคาไลน์ ลิกนินจะเปลี่ยนไปเป็น thio- และ alkali-lignin ส่วนในกระบวนการแบบซัลไฟต์ ลิกนินจะเปลี่ยนไปเป็น lignosulfates และในกระบวนการฟอกเยื่อที่ใช้คลอรีนสารที่จะเกิดขึ้นคือ chlorolignin และในกระบวนการต้มเยื่อจะมีน้ำดำออกมาจากกระบวนการทางเคมีซึ่งน้ำดำจะมีปริมาณของลิกนินมากที่สุด องค์ประกอบของน้ำดำก็จะเปลี่ยนไปตามวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเยื่อ และวิธีที่ใช้ในการผลิต (วิชา, 2545)

2.2.4 ผลกระทบของลิกนิน

รสสุคนธ์ และคณะ (2553) กล่าวว่าเมื่อปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนลิกนินลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรงในปริมาณที่สูงนั้น จะทำให้เกิดการบดบังของการส่งผ่านของแสงอาทิตย์ในน้ำ ทำให้พืชใต้น้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้และทำให้แหล่งน้ำขาดออกซิเจน และอีกกรณีหนึ่งคือลิกนินบางประเภทนั้นเมื่ออยู่ในน้ำอาจจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เช่น ปรมาณูที่ได้รับน้ำเสียจากการฟอกสีของโรงงานเยื่อกระดาษ พบว่าจะทำให้กระดุกของปลาเสียชีวิตได้ และทำให้เกิดแผลในตับ ไต ม้าม และทางเดินอาหาร ทำให้สุดท้ายอาจจะตายได้

2.3 เมทิลีนบลู (Methylene blue)

เมทิลีนบลู มีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.6 มีลักษณะเป็นผงสีเขียวเข้ม สามารถละลายในน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม (ชำนาญ, 2544) เมทิลีนบลูเป็นสารเคมีที่ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (Chemically inert) มีความเสถียร และมีความเป็นพิษ ในสิ่งแวดล้อมไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Non-biodegradable) (อดิพล, 2557)



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของเมทิลีนบลู (ชำนาญ, 2544)

เมทิลีนบลูเป็นสารอินทรีย์ที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้าน เช่น ใช้ในทางการแพทย์ ทำเป็นยารักษาโรคในมนุษย์ และยารักษาโรคในปลา นอกจากนี้ เมทิลีนบลูยังนิยมใช้เป็นสีย้อมในอุตสาหกรรม อยู่ในประเภทสีเบสสิก (Basic Dyes) จะมีโครงสร้างเป็นแคทไอออนใน ส่วนประกอบที่ให้สี บางครั้งจะเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) (พัฒนศักดิ์ และคณะ, 2557)

เมทิลีนบลูนั้นมีความเป็นพิษ หากได้รับเข้าไปอาจจะทำให้เกิดอาการไม่พึงประสงค์ เช่น อาเจียน หัวใจเต้นเร็ว ช็อค ผิวน้ำเป็นสีเขียว เนื่องจากการขาดออกซิเจน (Cyanosis) เป็นอัมพาต (Quadriplegia) เกิดดีซ่านหรือตับเหลือง (Jaundice) และการตายของเนื้อเยื่อในมนุษย์ (Necrosis) ได้ (ฐิติกร และคณะ, 2562)

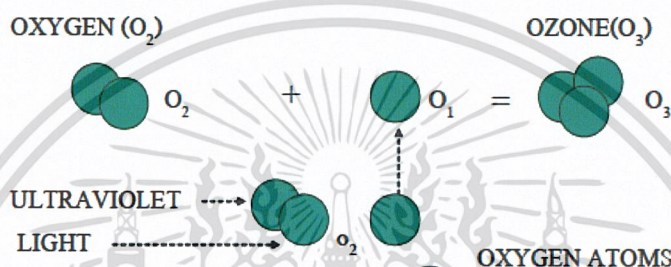
2.4 กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone – Oxiation Process)

กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน จัดเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes) ที่ใช้โอโซน (O_3) ทำหน้าที่เป็นสารออกซิเดชันในระบบ เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์ โดยเฉพาะสารที่ทำให้เกิดสีในน้ำ

2.4.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโอโซน

โมเลกุลของโอโซนประกอบไปด้วยออกซิเจน 3 อะตอม สัญลักษณ์ทางเคมีคือ O_3 มีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิและความดันปกติ ความสามารถในการละลายน้ำขึ้นกับอุณหภูมิและความดันไม่มากนักใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูดซับแสงและต้องอาศัยพลังงานของแสงหรือความร้อนในการนำไปใช้ รวมถึงค่าความเป็นกรดต่างหรือพีเอชของน้ำ (วนิดา, 2555) โอโซนที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติจะมี

2 แบบ คือ ปรากฏการณ์จากแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 400 นาโนเมตร จะเกิดจากการที่รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่อยู่ในแสงอาทิตย์ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์แตกตัวออกเป็นอะตอมออกซิเจน และไปทำปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนที่อยู่ใกล้ ๆ กลายเป็นโอโซน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552) และอีกแบบหนึ่งก็คือ ปรากฏการณ์การจากฟ้าแลบ ฟ้าร้อง ฟ้าผ่า ขณะที่ฝนตก หรือเรียกอีกอย่างว่า โคโรนาดีสชาร์จ ปรากฏการณ์นี้จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สูงมาก ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนแตกตัวเป็นอะตอมออกซิเจน และไปทำปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนที่อยู่ใกล้ ๆ กลายเป็นโอโซน

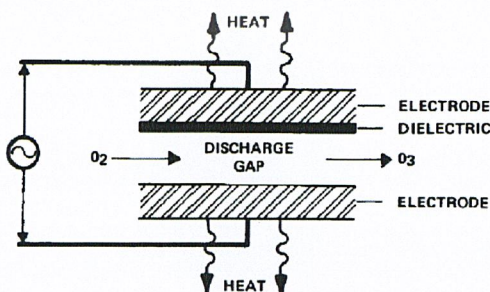


รูปที่ 2.7 การเกิดโอโซนตามธรรมชาติ
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2552)

2.4.2 การผลิตโอโซน

การผลิตโอโซนในปัจจุบันทำได้ 4 วิธี ดังนี้ (อาลักษณ์, 2561)

1) *Corona Discharge* เป็นวิธีจำลองการเกิด O_3 ตามปรากฏการณ์ฟ้าแลบและฟ้าผ่าในธรรมชาติ โดยใช้กระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ทำลายโมเลกุลของ O_2 แล้วลดพลังงานโมเลกุลลงเพื่อทำให้เกิดการจับกันของโมเลกุลออกซิเจนอิสระ และได้เป็น O_3 ดังแสดงในรูปที่ 2.8 วิธีนี้นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากต้นทุนต่ำและสร้าง O_3 ได้มากพอในการใช้ประโยชน์เชิงการค้า



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงกระบวนการสร้าง O_3 ด้วยวิธี Corona Discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ที่มา : อาลักษณ์ (2561)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

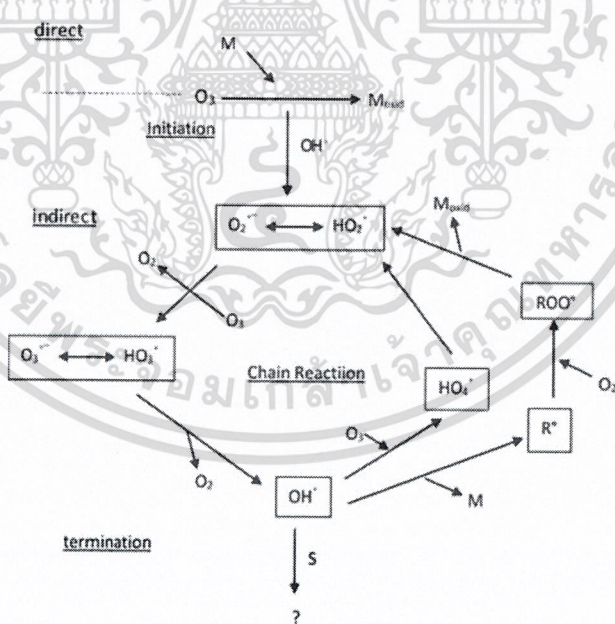
2) UV radiation เป็นวิธีจำลองการเกิด O_3 ในธรรมชาติ ซึ่งก็คือการใช้รังสี UV ความยาวคลื่นสั้น โดยเฉพาะที่ 254 nm จะมีพลังงานมากพอที่จะทำให้โมเลกุลของ O_2 ไม่เสถียรและจะได้เป็นโมเลกุลออกซิเจนอิสระ แล้วจึงสร้าง O_3 ได้ใหม่ ข้อจำกัดที่สำคัญของวิธีนี้คือ มีต้นทุนสูง และผลิต O_3 ได้น้อย

3) Electrolysis วิธีนี้ทำโดยให้กระแสไฟฟ้าวิ่งในตัวนำไฟฟ้า ที่มีสถานะเป็นของเหลว (Electrolyte) เช่น น้ำ หรือ H_2SO_4 วิธีนี้มีประสิทธิภาพในการผลิต O_3 ยังไม่ดีพอ ทำให้ยังต้องมีการพัฒนาต่อไป

4) Radiochemical จะใช้สารกัมมันตรังสี (Radioactive) เป็นแหล่งพลังงาน เพื่อแยกโมเลกุล O_2 เป็นวิธีที่ผลิต O_3 ได้ปริมาณมาก ต้นทุนต่ำ แต่ต้องมีการควบคุมความปลอดภัยที่ดีมากพอ

2.4.3 กลไกการสลายตัวของโอโซน (เจตนิพิฐ และคณะ, 2552)

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่เป็นพิษได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะมีความเป็นพิษน้อยลง แต่ข้อเสียของโอโซนคือโอโซนจะสลายตัวเป็นออกซิเจนได้เร็วมากในบรรยากาศ โอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์มี 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาทางตรง (direct) และปฏิกิริยาทางอ้อม (indirect) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

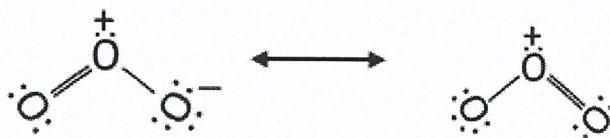


รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซนขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อม
ที่มา : เจตนิพิฐ และคณะ (2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันทางตรง (direct reaction)

โอโซนมีพันธะระหว่างออกซิเจน 2 พันธะ ทำมุมระหว่างพันธะ $116^{\circ} 45'$ ความยาวพันธะทั้งสองเท่ากันคือ 1.278 \AA อิเล็กตรอนเกิดเรโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10

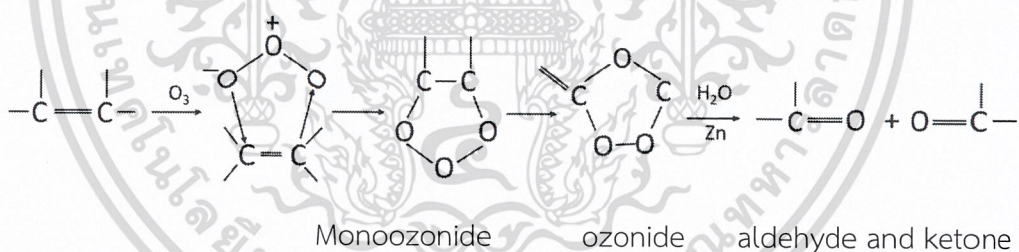


รูปที่ 2.10 การเกิดเรโซแนนซ์ของโมเลกุลโอโซน

ที่มา : เจตนิพิฐ และคณะ (2552)

อิเล็กตรอนจะถูกใช้ร่วมกันระหว่างออกซิเจนทั้ง 3 อะตอม จากโครงสร้างเห็นได้ว่าโอโซนเป็นโมเลกุลมีขั้ว และมีอิเล็กตรอนมากพอจึงสามารถที่จะเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงแบบ Dipole - mediate attack หรือแบบ Electrophilic attack

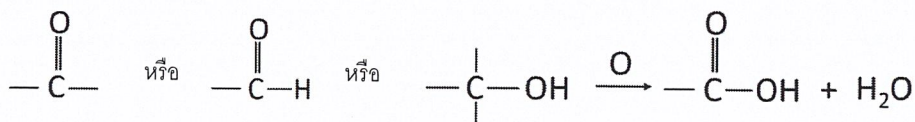
1.1 Dipole - mediate attack โอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยการหันด้านขั้วลบของโมเลกุลเข้าหาพันธะคู่ของสารอินทรีย์เกิด intermediate เป็นโมโนโอไซด์ และโอไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Dipole - mediate attack

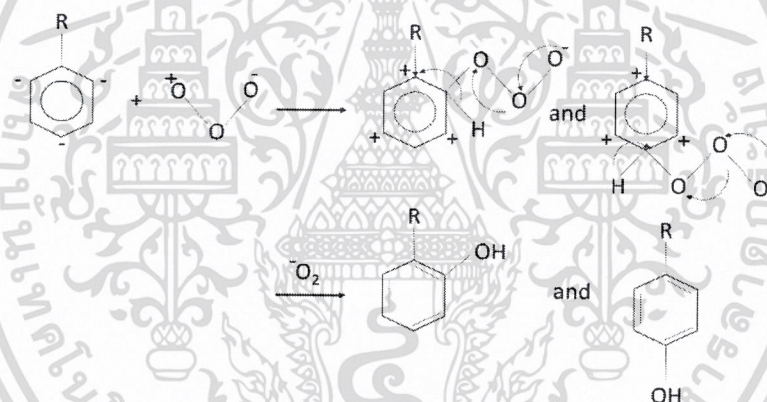
ที่มา : เจตนิพิฐ และคณะ (2552)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ อัลดีไฮด์และคีโตน รวมทั้งสารพวกแอลกอฮอล์จะถูกโอโซนออกซิไดซ์ต่อ ได้กรดคาร์บอกซิลิกและน้ำ ดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 การสลายตัวของอัลดีไฮด์และคีโตนด้วยก๊าซโอโซน
ที่มา : เจตนิพิฐ และคณะ (2552)

1.2 Electrophilic attack โอโซนทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรไฟล์ จะทำปฏิกิริยาโดยหันด้านข้างบวกของโมเลกุลเข้าหาบริเวณที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นของสารอินทรีย์พวกวงอะโรมาติก ซึ่งความว่องไวในการทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับหมู่แทนที่ในวงเบนซีนดังแสดงในรูปที่ 2.13 ถ้าเป็นหมู่ที่ให้อิเล็กตรอน $-\text{OCH}_3$, $-\text{CH}_3$ และ $-\text{NO}_2$ จะมีความว่องไวมาก ส่วนที่เป็นหมู่ดึงอิเล็กตรอน เช่น $-\text{COCH}_3$, $-\text{COOC}_2\text{H}_5$, $-\text{Cl}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ จะทำให้ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาลดลง



รูปที่ 2.13 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบ Electrophilic attack
ที่มา : เจตนิพิฐ และคณะ (2552)

ในการทำปฏิกิริยาทางตรงนั้น จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่มีตำแหน่งเฉพาะเจาะจงหรือมีหมู่ฟังก์ชันที่โอโซนสามารถออกซิไดซ์ได้ หากเป็นพวกไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว และ halogenated aliphatic compound โมเลกุลของโอโซนจะไม่สามารถออกซิไดซ์สารพวกนี้ได้

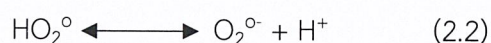
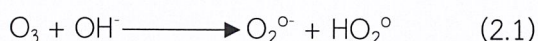
2) การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันทางอ้อม (indirect reaction)

เป็นการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยจะเกิดผ่านเรดิคอลซึ่งจะมีความซับซ้อน กลไกการเกิดปฏิกิริยาจะแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

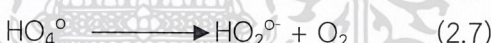
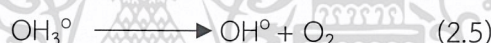
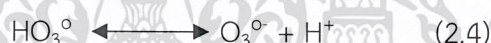
ก. ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation step)

ก๊าซโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคัล และไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัล ดังสมการที่ 2.1 ซึ่งไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัลจะอยู่ในสมดุล กรด-เบส ดังสมการที่ 2.2

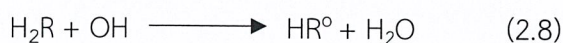


ข. ขั้นตอนลูกโซ่แรดิคัล (Radical Chain Step)

ก๊าซโอโซนจะทำปฏิกิริยากับซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคัล ทำให้เกิดโอโซนไนด์แอนไอออนแรดิคัล ซึ่งจะสลายตัวได้ทันทีกลายเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ดังสมการ 2.3, 2.4, 2.5 และไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับโอโซนดังสมการ 2.6 และ 2.7



การสลายตัวของไฮโดรเตตระออกไซด์แรดิคัล (HO_4^\ominus) ไปเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัล และออกซิเจน จะทำให้ปฏิกิริยาเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ซึ่งก๊าซโอโซนทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นในการเปลี่ยนไฮดรอกซิลแรดิคัลไปเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคัลหรือซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคัล จะทำหน้าที่เป็นตัวนำในการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ใหม่อีกครั้ง ส่วนในโมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) ก็สามารรถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นได้ และฟังก์ชันบางกลุ่มในสารอินทรีย์จะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคัลทำให้เกิดแรดิคัลของสารอินทรีย์ (R^\ominus) ดังสมการ 2.8



หากมีออกซิเจนอยู่ในระบบสามารถเกิดออร์แกนิกเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (ROO^\ominus) ได้ ดังสมการ 2.9, 2.10 และ 2.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้วนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ขั้นตอนสุดท้าย (Terminal Step)

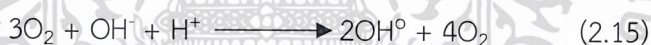
สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์บางชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดิคอล จะเกิดแรดิคอลลำดับที่สอง ซึ่งไม่สามารถสร้างซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนแรดิคอลหรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์แรดิคอล สามารถเรียกสารเหล่านี้ได้ว่าตัวยับยั้ง ทำให้ปฏิกิริยาถูกชะหยุดและยังยับยั้งการสลายตัวของโอโซนได้ ดังแสดงในสมการ 2.12 และ 2.13



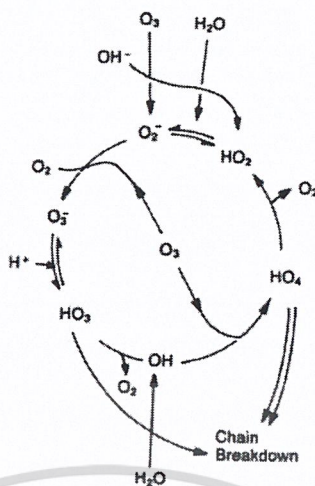
อีกกรณีที่จะสามารถหยุดปฏิกิริยาถูกชะ คือ การทำปฏิกิริยากันของแรดิคอลสองตัว ดังสมการ 2.14



ดังนั้น หากรวมสมการทั้งหมดจะเห็นว่า 3 โมเลกุลของโอโซนจะให้ 2 โมเลกุลของไฮดรอกซิลแรดิคอล ดังแสดงในสมการ 2.15



กลไกการสลายตัวของโอโซนในน้ำธรรมชาติจะมีความซับซ้อนกว่าในน้ำบริสุทธิ์ เพราะในน้ำธรรมชาติจะมีสารประกอบที่สามารถยับยั้งการสลายตัวของโอโซนได้ ซึ่งอนุมูล hydroxide ion จะเป็นตัวกระตุ้นการสลายตัวของโอโซน ในสภาพต่างครึ่งชีวิตของโอโซนค่อนข้างสั้น โดยที่พีเอช 10 ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 30 นาที สารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติจะเป็นตัวทำลายโอโซน ซึ่งจะสามารถทำปฏิกิริยากับ $^\circ\text{OH}$ ดังนั้นจึงมีการหยุดปฏิกิริยาของ radical chain reaction ที่ทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคอล ($^\circ\text{OH}$) และสารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติยังเป็นตัวยับยั้งและตัวกระตุ้นของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนด้วย (Langlais et al., 1991)



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาการแตกตัวโอโซนในน้ำ
ที่มา : Langlais. et al. (1991)

ปฏิกิริยาของโอโซนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือ hydroperoxide ion (OH_2^-) เริ่มจากการเกิดเป็น hydroxy radical ก่อน และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ H_2O_2 กับโอโซนจะมีประโยชน์ในการเพิ่ม $^{\circ}OH$ สำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เองจะเกิดปฏิกิริยาซ้ำกับโอโซน แต่ conjugate bas, OH_2^- จะว่องไวในการทำปฏิกิริยากับโอโซนมากกว่า ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการสลายตัวของโอโซนในสถานะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพีเอช Staehelin et al. (1993) ค้นพบว่าภายในสถานะที่เป็นด่างหรือเป็นกลาง อัตราการสลายตัวของโอโซนในสารละลายที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถแสดงได้จาก

$$\frac{d [O_3]}{dt} = k [O_3] [OH_2^-]$$

เมื่อ $k = (5.5 \pm 1.0) \times 10^6 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$

ส่วนกลไกการสลายตัวของโอโซนโดยใช้แสง มีนักวิทยาศาสตร์ได้ตรวจสอบและพบว่าเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หลังจากนั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยาต่อไปโดย direct photolysis หรือ conjugate base ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาทำให้เกิดเป็น ไฮดรอกซิลแรดิคอล (Langlais. et al., 1991)

แรดิคอลต่าง ๆ จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามาก (Strong Oxidant) จากตารางที่ 2.3 ที่แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารออกซิแดนท์ต่าง ๆ ซึ่งจากตารางจะแสดงให้เห็นว่าความสามารถของโอโซนในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีนถึง 1.5 เท่า และยิ่งสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ถึง 1.3 เท่า (Langlais. Et al., 1991)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารออกซิแดนท์ต่าง ๆ

Compound	Oxidation potential (volts)	Relative power of chlorine
Fluorine	3.06	2.25
Hydroxyl radical ($^{\circ}\text{OH}$)*	2.80	2.05
Atomic oxygen	2.42	1.78
Ozone	2.07	1.52
Hydrogen peroxide	1.77	1.30
Perhydroxyl radical	1.70	1.25
Permanganate	1.67	1.23
Chlorine oxide	1.50	1.10
Hypochlorous acid	1.49	1.10
Chlorine	1.36	1.00
Bromine	1.09	0.80
Hydrogen peroxide	0.87	0.64
Iodine	0.54	0.40
Oxygen	0.40	0.29

ที่มา : Lin and Yeh (1993)

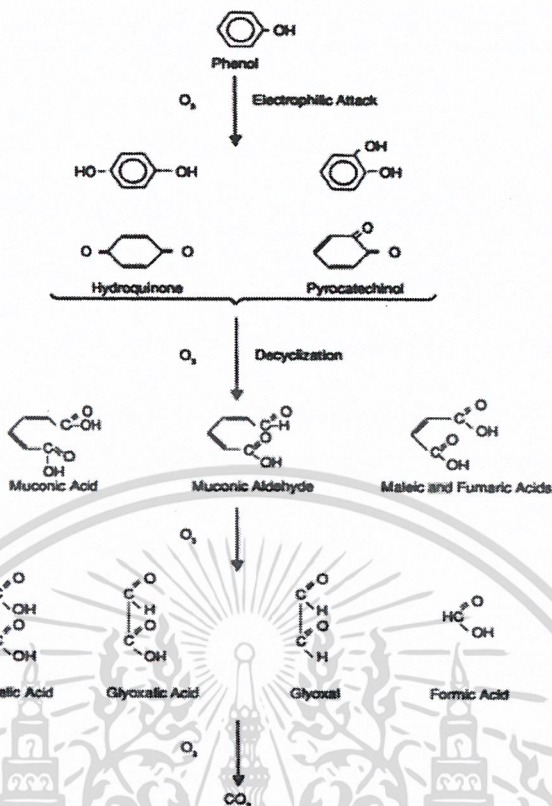
2.4.4 การประยุกต์ใช้ประโยชน์โอโซน

โอโซนสามารถนำมาใช้ประยุกต์ด้านต่าง ๆ ได้ ดังนี้

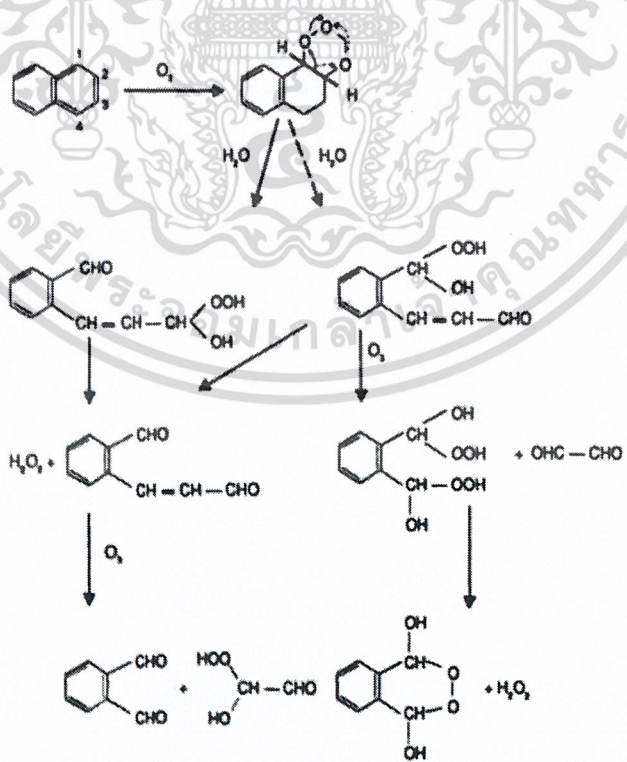
1) การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (Oxidation of Organics)

จากที่กล่าวมาโอโซนเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวได้แรดิคอลต่าง ๆ ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างกัน ซึ่งการออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยใช้โอโซนจะสมบูรณ์หรือไม่ นั้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างสารเคมีของสารอินทรีย์ ยกตัวอย่างเช่น โอโซนสามารถออกซิไดซ์ฟีนอล (Phenol) ได้อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยฟีนอลถูกออกซิไดซ์จะได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีโครงสร้างที่ซับซ้อน จะไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนได้อย่างสมบูรณ์ เช่น สารเนฟทาลีน (Naphthalene) เมื่อถูกออกซิไดซ์โดยโอโซนจะได้ Cyclic peroxide, Oxalic acid, Oxomalonic acid, Formic acid, Orthophathalaldehyde acid, Phthalaldehydic acid, Hydrogen peroxide, Phthalic acid และ 1,4-Naphthaquinone

ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (Langlais et al., 1991) การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



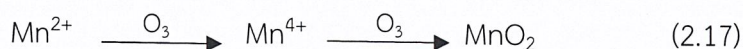
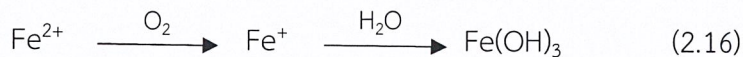
รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาไอโซนในการออกซิไดซ์สารฟีนอล
ที่มา : Langlais et al. (1991)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาไอโซนในการออกซิไดซ์สารเนฟทาลีนไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปใช้
ที่มา : Langlais, et al. (1991). จำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การออกซิไดซ์สารอนินทรีย์ (Oxidation of Inorganics)

โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำ โดยการเปลี่ยนจาก Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} ซึ่งจะทำให้เหล็กและแมงกานีสตกตะกอนได้ แสดงในสมการที่ 2.16 และ 2.17 ดังนี้



โอโซนสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ให้เป็นไซยาเนต จากนั้นไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ไดโนโตรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงในสมการที่ 2.18 และ 2.19 ดังนี้



การใช้โอโซนร่วมกับกับต่างในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย จะสามารถลดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ในการตกตะกอนให้ต่ำลงได้ ซึ่งจะช่วยให้การประหยัดการใช้กรดในการปรับสภาพให้เป็นกลางลงได้ ตารางที่ 2.4 จะแสดงการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างที่ลดต่ำลงเมื่อประยุกต์ใช้โอโซนร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะหนักต่าง ๆ (Langlais et al., 1991)

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างเมื่อใช้โอโซนร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะต่าง ๆ

Metal	pH	
	Lime	Lime and Ozonation
Cadmium	10.0	10.0
Chromium	9.0	7.0
Cobalt	11.0	9.0
Copper	9.0	7.0
Iron	4.0	4.0
Manganese	9.0	6.1
Nickel	11.0	10.0
Silver	11.0	10.0
Zinc	10.0	9.0

3) การควบคุมสาหร่าย (Algae Control)

ปัญหาสาหร่ายมักจะพบในการใช้น้ำแบบหมุนเวียนในอุตสาหกรรม เช่น น้ำหล่อเย็น ซึ่งการใช้คลอรีนเพื่อทำลายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายพบว่าใช้ไม่ได้ผลมากนัก เนื่องจากสาหร่ายมีการปรับตัวคุ้นเคยกับคลอรีน ดังนั้นการใช้โอโซนจะให้ผลที่ดีกว่า เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงกว่าคลอรีน (Lin and Yeh, 1993)

4) การบำบัดสีในน้ำเสียด้วยโอโซน

โอโซนจะทำการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโดยใช้โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์เชิงเอเจนต์ และไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้งเช่นเดียวกับการใช้คลอรีน แต่โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีน กลุ่มโมเลกุลที่ทำให้เกิดสีหรือที่เรียกกันว่า Chromophores โดยทั่วไปแล้วจะเป็น Polycyclic Organic Compound ซึ่งมีทั้งพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ การบำบัดด้วยโอโซนจะทำให้พันธะคู่แตกออกจากกันกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง และจะทำให้สีหายไป สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี เมื่อถูกออกซิไดซ์โดยโอโซนที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก โมเลกุลของโอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี ทำให้สีของน้ำเสียลดลง สามารถบำบัดน้ำทิ้งที่มีปริมาณมาก และยังสามารถลดค่า COD ของน้ำทิ้งที่บำบัดได้อีกด้วย (ณัฐกร และคณะ, 2555)

2.5 American Dye Manufacturers Institute (ADMI)

ADMI ย่อมาจาก American Dye Manufacturers Institute ถือเป็นหน่วยมาตรฐานในการวัดค่าสีเพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนของสีย้อม (Dye) และเม็ดสี (Pigment) ในน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ (textile), กระดาษ, อาหาร, พลาสติก และเครื่องสำอางค์ เนื่องจากกลุ่มเหล่านี้มีการใช้สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dye) และเม็ดสี (Pigment) จำนวนมาก (ญาดา, 2555)

2.5.1 ความแตกต่างระหว่างการวัดค่าสีในหน่วย ADMI กับการวัดค่าสีในหน่วย Platinum-Cobalt

การวัดค่าสีในหน่วย Platinum-Cobalt จะวัดค่าสีเฉพาะหน่วยสีที่เป็นโทนสีเหลือง (Yellow) เท่านั้น ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดค่าสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติมักจะมีเฉดเป็นสีเหลืองถึงสีส้ม ในขณะที่การวัดค่าสีในหน่วย ADMI จะตรวจวัดปริมาณของสี (Color Value) ในทุกหน่วยสี ไม่เน้นที่สีใดสีหนึ่ง โดยการตรวจวัดจะเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน EPA เลขที่ 110.1 (ญาดา, 2555)

2.5.2 หลักการตรวจวัดค่าสีในหน่วย ADMI

เนื่องจากการวัดค่าสีในหน่วย ADMI มีการตรวจวัดค่าสีในทุก ๆ หน่วยสี ดังนั้น จึงมีความสลับซับซ้อนกว่าการวัดค่าสีในหน่วย Platinum-Cobalt การวัดค่าสีในหน่วย ADMI ใน Standard Method for Examination of Water & Wastewater คือ มี 2 วิธีมาตรฐาน ดังนี้

1. APHA 2120E ADMI Tristimulus Filter method
2. APHA 2120F ADMI Weighted-Ordinate Spectrophotometer

โดยวิธีมาตรฐานดังกล่าว เป็นการวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400-700nm ซึ่งเป็นการวัดค่าสีที่แท้จริง โดยวัดปริมาณเม็ดสีตั้งแต่เฉดสีม่วงถึงเฉดสีแดง (ห่างหุนส่วนจำกัด เอส พี ซายด์, มปป.)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รวีศ (2548) ทำการศึกษาการกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบท่อแนวระนาบ พบว่าในช่วงต้นของปฏิกิริยากับโอโซน สารละลายลิกนินจะมีความเข้มสีสูงขึ้น แล้วจึงค่อย ๆ จางลง เนื่องจากโอโซนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ในโครงสร้างของลิกนิน ตามปฏิกิริยา Darkin เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะแบบควิโนโนซึ่งมีสีน้ำตาล และทำให้ค่า chromophore index สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสีที่วัดได้จากสารละลายมีค่ามากขึ้น และเมื่อโครงสร้างควิโนโนถูกออกซิไดซ์ความเข้มสีของสารละลายจึงเริ่มลดลง ในขณะที่ค่าซีโอดีมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นการยืนยันถึงการสลายตัวของโครงสร้างโมเลกุลลิกนิน และในการพิจารณาถึงโครงสร้างหมู่ฟังก์ชันพบว่าหมู่โครงสร้างที่ก่อให้เกิดสีของลิกนินจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง จึงส่งผลให้ปริมาณการลดของสีแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายลิกนิน นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการลดสีของกระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมระหว่างของไหลทั้งสองเฟส และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส โดย static mixer เป็นอุปกรณ์สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของการลดสีในระบบท่อแนวระนาบ

สุพิชฌาย์ (2550) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในสารละลายสีและน้ำตัวอย่างจากโรงงานบรรจุภัณฑ์กระดาษด้วยโอโซน ในการทดลองใช้เครื่องผลิตโอโซนซึ่งวัดอัตราการผลิตได้เท่ากับ 0.28 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของเครื่องป้อนอากาศเท่ากับ 120 ลิตรต่อนาที และใช้ถังปฏิกรณ์คือท่อพีวีซีความยาว 90 เซนติเมตร การทดลองเริ่มจากนำน้ำสีมาบำบัดด้วยโอโซน และเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 120 วินาที มาวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การขจัดสีปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำค่าการนำไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งโอโซนสามารถขจัดสีได้ดีในระดับหนึ่งโดยที่ระดับความเจือจาง 1,500 เท่า ประสิทธิภาพในการขจัดสีสูงสุดคือสีดำ รองลงมา

คือสีฟ้า-ม่วงและสีเขียวตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการขจัดสีระหว่างน้ำทิ้งจากบ่อน้ำทิ้งรวมและน้ำทิ้งจากบ่อน้ำบำบัดที่ 1 ที่ระดับความเจือจาง 10 เท่า เปอร์เซ็นต์การขจัดสีในน้ำทิ้งไม่ต่างกันเท่าไร ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

จากบ่อบำบัดที่ 1 จะสูงกว่าน้ำทิ้งจากบ่อน้ำทิ้งรวมเล็กน้อยส่วนในน้ำสีแดงที่ความเงา 1,000 เท่า ประสิทธิภาพการขจัดสีหลังบำบัดด้วยโอโซนเท่ากับ 85% สำหรับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ และ ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่าที่วัดได้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างนั้น พบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าพีเอชเป็นกลางหรือกรดอ่อน ๆ

วราภรณ์ และคณะ (2550) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดสีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน โดยศึกษาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดสี คือ ค่าพีเอช ปริมาณโอโซน และระยะเวลาสัมผัสโอโซนของน้ำทิ้งก่อนผ่านระบบบำบัดของโรงงาน พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชั่นมีความสามารถลดค่าสีได้ 66.98% ในหน่วย ADMI และลดค่า COD ได้ 8.16% ในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร ในสภาวะที่เหมาะสม คือ ค่าพีเอชเท่ากับ 12.0 ± 0.1 อัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 158.2 มิลลิกรัมโอโซนต่อนาที่ และระยะเวลาสัมผัสโอโซน 40 นาที

สุรัชย์ (2553) ในการศึกษาใช้น้ำตัวอย่างที่นำมาทดลอง 2 ตัวอย่าง ตัวอย่างแรกนำมาจากบ่อบรรวมน้ำเสีย (Sump tank) ซึ่งเป็นน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด และตัวอย่างที่สองเป็นน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยระบบยูเอเอสบี (UASB) และระบบแอกติเวเตดสลัดจ์(AS) มาแล้ว เครื่องผลิตก๊าซโอโซนมีกำลังการผลิตเฉลี่ย 20.41 มิลลิกรัมโอโซนต่อนาที่ ผลิตโอโซนด้วยอากาศที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยอุปกรณ์ทำลมแห้ง (Air dryer) ก๊าซโอโซนทำปฏิกิริยากับน้ำตัวอย่าง 30 ลิตร ภายในถังปฏิกรณ์แบบ batch ที่ทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 104 มิลลิเมตร สูง 5 เมตร ระดับน้ำภายในถังปฏิกรณ์สูงประมาณ 3.5 เมตร ทำการเติมโอโซนแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 60 นาที พารามิเตอร์ที่ติดตามได้แก่ ความเข้มข้น ปริมาณโอโซนละลาย (Dissolved ozone) BOD₅ COD TOC pH และ FT-IR จากการทดลองพบว่าโอโซนที่เติมถูกใช้หมด โดยให้ผลในการกำจัดสีได้ 100% สำหรับตัวอย่างจากบ่อบรรวมน้ำเสีย และ 93.36% สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดโดยระบบ UASB-AS ในขณะที่ COD และ BOD ถูกกำจัดได้เพียง 18.62 และ 5.06% ตามลำดับในน้ำ จากบ่อบรรวม และ 57.43 และ 28.95% ในตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดโดยระบบ UASB-AS ทั้งนี้ TOC มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ลดลงเพียง 3.46% ในน้ำจากบ่อบรรวมน้ำเสีย และ 1.4% ในตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดโดยระบบ UASB-AS แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดโดยไม่สมบูรณ์ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ซึ่งให้ผลคล้ายกันในทั้ง 2 ตัวอย่าง โดย พบว่ากลุ่มคาร์บอนิล(C=O) มีปริมาณลดลง Hydroxyl group ถูกกำจัดไป ในขณะที่พันธะ C-H มีการเลื่อนตำแหน่งยอดไปจากจุดเดิมหลังเติมโอโซนเป็นการยืนยันว่ากระบวนการโอโซนเนชั่น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ค่า pH ของทั้ง 2 ตัวอย่างเพิ่มขึ้นจากการเติมโอโซน โดยมีค่า 8.1 และ 8.6 ตามลำดับสำหรับตัวอย่างจากบ่อบรรวมน้ำเสีย และตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดโดยระบบ UASB-AS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นุชนกาญจน์ (2550) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากบ่อน้ำเสียรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษระดับอุตสาหกรรมในครัวเรือนด้วยกระบวนการเติมโอโซน จากการทำการทดลองที่ไม่มี การปรับค่าพีเอชของน้ำ (พีเอชน้ำเสียอยู่ในช่วง 7.7-7.9) และทำการปรับพีเอชน้ำเสียเป็นพีเอช 7 โดยทดลองที่ระยะเวลาเติมโอโซน 5 10 15 20 25 และ 30 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังทำการทดลองกับน้ำเสียที่มีการปรับพีเอชเป็นพีเอช 4 และพีเอช 11 ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 5 10 15 และ 20 ชั่วโมง โดยใช้ความเข้มข้นโอโซน 0.53 0.42 และ 0.33 กรัมต่อชั่วโมงต่อลิตร เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดซีโอดี บีโอดี เจลดาล์ไนโตรเจน ของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และสี จะใช้แบบจำลองถึงปฏิกิริยาโอโซนระดับห้องปฏิบัติการ สูง 1.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร จำนวน 1 ถัง เดินระบบแบบกึ่งเท ทำการทดลองกับน้ำเสียตัวอย่างครั้งละ 1 ลิตร พบว่าค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาบำบัดบ่งบอกถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาขั้นที่หนึ่งของกระบวนการบำบัดด้วยโอโซน โดยที่น้ำเสียมีการปรับค่าพีเอชเป็นพีเอช 4 มีประสิทธิภาพการกำจัดสีและของแข็งแขวนลอยมากที่สุด โดยมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสี และของแข็งแขวนลอย 92.2% และ 98.0% ตามลำดับ และที่น้ำเสียที่มีการปรับค่าพีเอชเป็น 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และบีโอดี มากที่สุด โดยมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและบีโอดี 39.2% และ 74.8% ตามลำดับ รวมทั้งประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี บีโอดี และสีมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเติมโอโซน และอัตราส่วนระหว่างบีโอดีต่อซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเติมโอโซนเช่นเดียวกัน ส่วนผลการบำบัดค่าเจลดาล์ไนโตรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดในทุกค่าพีเอช และผลจากการปรับค่าพีเอชด้วยกรดกำมะถันและโซดาไฟ ทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชเป็น พีเอช 4 และพีเอช 11

วิชา (2545) การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกกลินินออกจากน้ำดำที่ได้จากกระบวนการทำเยื่อกระดาษจากไม้ยูคาลิปตัส โดยการตกตะกอนด้วยกรดซัลฟิวริก ในการศึกษาได้ใช้วิธีการตกตะกอน 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการตกตะกอนที่พีเอช 6 เพื่อกำจัดสารที่เกิดจากการย่อยสลายโพลีแซคคาไรด์ เพื่อไม่ให้ปนเปื้อนกับตกตะกอนกลินิน น้ำดำหลังแยกตะกอนกลินินออก นำมาวิเคราะห์ค่าซีโอดี และสี ส่วนตะกอนกลินินนำมาวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างโดย GPC, ¹³C-NMR และ IR ผลการศึกษาพบว่าการตกตะกอนกลินินในน้ำดำมีแนวโน้มการตกตะกอนเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลง แต่ที่ พีเอช 3 2 และ 1 ตะกอนกลินินที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นที่พีเอช 3 จึงเหมาะสมกับการตกตะกอนกลินินในน้ำดำ โดยที่พีเอช 3 สามารถแยกกลินินได้ 93.51% และค่าซีโอดี สีของน้ำหลังแยกตะกอนกลินิน ลดลง 80.45% และ 98.20% ตามลำดับส่วนตะกอนกลินินที่แยกได้มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยระหว่าง 1,348-1,540 ดัลตัน

เจตนิพิฐ และคณะ (2552) ได้ศึกษาการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมรีแอคทีฟด้วยกระบวนการโอโซนชั้น สีย้อมที่ใช้คือ Reactive Blue 19 และ Reactive Black 5 ทำการทดลองแบบครั้ง (Batch) ด้วยเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซนที่มีอัตราการผลิตเท่ากับ 7.63 กรัมต่อชั่วโมง การศึกษาพบว่าก๊าซโอโซนสามารถกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีย้อม 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้อย่างรวดเร็ว ภายในช่วง 5 นาทีแรก สามารถกำจัดสีได้ถึง 90%

เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 40 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ 99% การศึกษาผลของพีเอช พบว่า พีเอชไม่มีผลต่อการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 19 แต่สำหรับสีย้อม Reactive Black 5 ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีค่าสูงขึ้น เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น การเพิ่มปริมาณเกลือโซเดียมซัลเฟตในสารละลาย ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีลดลง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยก๊าซโอโซน มีค่าอัตราส่วน BOD₅:COD เพิ่มขึ้น แสดงถึงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของสีย้อมมีมากขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.113 เป็น 0.281 และเพิ่มจาก 0.122 เป็น 0.414 สำหรับสีย้อม ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 19 และ Reactive Black 5 ตามลำดับ

นันทพงษ์ (2548) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการบำบัดสีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เยื่อและกระดาษ โดยกระบวนการโอโซนเนชั่น ทำการทดลองศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการบำบัดสี คือ พีเอช ปริมาณโอโซน และระยะเวลาสัมผัสโอโซน ของน้ำเสียบริเวณก่อนและหลังผ่านการบำบัด น้ำเสียชนิดระบบตะกอนเร่ง เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่นในการบำบัด ขั้นต้นและขั้นสุดท้าย จากนั้นนำน้ำเสียที่ผ่านสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการโอโซนเนชั่นมาศึกษา ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ การถ่ายเทโอโซนในน้ำเสีย และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ สารประกอบฟีนอลิกในน้ำเสีย โดยใช้เทคนิค GC/MS จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิห้อง น้ำเสีย บริเวณหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียมีความเหมาะสมในการบำบัดโดยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ พีเอชเท่ากับ 7.5 ± 0.5 อัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 9.0 กรัมต่อชั่วโมง และระยะเวลาสัมผัสโอโซน 30 นาที สามารถลดปริมาณสีในหน่วย PtCO และหน่วย ADMI ได้เท่ากับ 91.54 และ 95.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และลดปริมาณ COD BOD และ TOC ได้เท่ากับ 62.00 27.26 และ 37.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบ ฟีนอลิก พบว่ากระบวนการโอโซนเนชั่นสามารถที่จะสลายโมเลกุลของสารประกอบ ฟีนอลิกได้แต่ยังคงมี สารประกอบฟีนอลิกตกค้างอยู่ภายหลังจากกระบวนการโอโซนเนชั่น และกระบวนการโอโซนเนชั่น จะช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยที่ระยะเวลาการสัมผัส 30 นาที อัตราส่วน ระหว่าง BOD:COD มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.16 ถึง 0.31 และค่า K_r มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.21 ถึง 0.35 ตามวิธีการของ Thomas slope method

De los Santos Ramos et al. (2009) ในงานวิจัยนี้จะทำการย่อยสลายลิกนิน และ อนุพันธ์ของลิกนิน ในน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมกระดาษ โดยใช้กระบวนการโอโซน การบำบัดลิกนินจะ ใช้การปรับสภาพและการตกตะกอนด้วยสารเคมีร่วมกัน โดยจะใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ที่ pH 1 และ 3 และกรองน้ำทิ้งในกระบวนการโอโซน จะอยู่ที่ pH 1 3 8 และ 12 หากปริมาณสารตกค้างสูง (ปริมาณ COD 70,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในการทดลองจะใช้ตัวอย่างที่ทำการเจือจาง (1:10) การเกิด ตะกอนก่อนหน้านั้นแสดงให้เห็นว่ามีผลกระทบต่ออัตราการลดลงของ COD 77% และสี 96.1% กากตะกอนซัลไฟลิกนินจะทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก ในกระบวนการโอโซนของน้ำทิ้งที่ผ่าน การกรองในระยะเวลา 25 นาที ที่ pH 1 3 8 และ 12 จะเกิดผลพลอยได้ คือ กรดฟูมาริก กรดมาเลอิก กรดมาลิก และกรดฟอรั่มิก ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัด

โดยกระบวนการโอโซนเพิ่มขึ้น 0.067-0.29 สรุปได้ว่าผลของการตกตะกอนและสถานะของโอโซนมีผลต่อการลดลงของสี

Nemat et al. (2016) ได้ศึกษาการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (EC) ตามด้วยระบบ UV/oxidant ในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์จากน้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าปรับให้มีความเหมาะสมโดยการออกแบบ Box-Behnken ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (ที่ค่า pH ปกติ เวลาเท่ากับ 33.7 นาที และความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 5.55 mA / cm²) สามารถกำจัดซีโอไซด์ได้ประมาณ 61% ส่วนน้ำทิ้งที่บำบัดโดยวิธี UV/persulfate (PS) และ วิธี UV/peroxymonosulfate (PMS) ผลการศึกษาคือ UV/PS มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่ค่า pH ปกติ (ค่า pH ของน้ำทิ้งที่ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเท่ากับ = 8.2) ในขณะที่ UV/PMS จำเป็นต้องปรับ pH = 4.0 จะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และยังพบว่าผลต่อการขับออกซิเดชันของอนุภาคมูลอิสระใน UV/PS ในขณะที่ UV/PMS ปริมาณ PMS ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์ออกซิเดชันบางส่วนพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการเกิดออกซิเดชันเป็นกลไกสำคัญ กระบวนการ EC ไม่ได้มีผลกระทบต่อปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ แต่ทว่า EC พร้อมกับ UV/oxidant นั้นจะทำให้ BOD₅:COD ratio เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การฉายรังสีจากแสงอาทิตย์ได้รับการทดสอบเป็นทางเลือกสำหรับแหล่ง UV และผลลัพธ์ที่ได้ไม่มีความสำคัญกับการบำบัด มีการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และประสิทธิภาพปัจจุบัน

Kreetachat et al (2006) ศึกษาผลกระทบของกระบวนการโอโซนของน้ำทิ้งโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1.ระบุสารประกอบต่าง ๆ ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ 2.ประเมินการลดสีและประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์โดยเครื่องปฏิกรณ์ และ 3.ประเมินความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพระยะต่าง ๆ ในกระบวนการโอโซน ทำการวิเคราะห์ GC/MS เชิงคุณภาพก่อนและหลังการบำบัดด้วยชีวภาพและกระบวนการโอโซน พบสารสองกลุ่มในน้ำเสีย คือ สารประกอบที่ได้จากลิกนิน และสารประกอบอะลิฟาติกที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ (เช่น อัลเคน แอลกอฮอล์ไขมัน กรดไขมัน และ เอสเตอร์) ประสิทธิภาพการบำบัดถูกวัดโดยการลดสีและอัตราการกำจัดสาร TOC นอกจากนี้ ยังมีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ (k) และอัตราส่วน BOD:COD เพื่อสังเกตความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการโอโซน ผลการศึกษาพบว่าหลังจากผ่านไป 45 นาที กระบวนการโอโซนจะให้น้ำทิ้งที่ไม่มีสีเกือบ 90% มีประสิทธิภาพในการลดสีและความจุโอโซนเท่ากับ 20.0 mg O₃ L⁻¹ การลดสีนี้ไม่ได้ทำให้เกิดแร่ของสารอินทรีย์เสมอไป ดังนั้นกระบวนการโอโซนจึงไม่เกี่ยวข้องกับการกำจัด TOC อัตราส่วน BOD:COD เพิ่มขึ้นจาก 0.10 เป็นค่าสูงสุด 0.32 พร้อมอัตราการไหลโอโซน (O/F) 4.0 L min⁻¹ ได้รับการยืนยัน โดยค่า k เป็นสมการ BOD อันดับแรก ค่า k เพิ่มขึ้นจาก 0.21 day⁻¹ เป็น 0.47 day⁻¹ เนื่องจากเวลาโอโซนเพิ่มขึ้นเป็น 60 นาที

เอกสารด้วย O/F 4.0 L min⁻¹ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pokhrel et al (2004) โรงงานผลิตเยื่อและกระดาษสร้างมลพิษหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับประเภทของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษและประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดที่มีอยู่ นำเสนอการเปรียบเทียบกระบวนการรักษาทั้งหมด การรวมกันของกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนและใช้ออกซิเจนพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ละลายน้ำได้ สีสามารถลดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการใช้เชื้อรา, การตกตะกอนออกซิเดชันทางเคมี และโอโซน ส่วนสารประกอบฟีนอลคลอรีนและอินทรีย์ฮาไลด์ (AOX) สามารถลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิคการกรองการดูดซับด้วยเมมเบรนและโอโซน

Wang et al. (2019) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากถ่านโค้ก ในระบบ Oxic-Anoxic-Oxic ในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน ไนโตรเจนทั้งหมด และซีโอดี ได้ทั้งหมด 91.5%-93.3% , 91.3%-92.6% และ 89.1%-93.8% ตามลำดับ ค่าซีโอดีของน้ำขาออกจากระบบ Oxic-Anoxic-Oxic ยังมีค่าสูงกว่า 260 มิลลิกรัมต่อลิตร เหตุผลหลักก็คือ น้ำเสียนี้มีคุณสมบัติที่กำจัดได้ยากทำให้มีสารประกอบหลงเหลืออยู่ตอนปล่อยออกในระบบตกตะกอน ได้ทำการพ่นโอโซน ให้ผลการกำจัดซีโอดีได้ 91.5%-93.3% และลดการเกิดสารโมเลกุลขนาดใหญ่ (มากกว่า 1 kDa) จาก 55.8% ไป 20.93% โดยใช้โอโซน พีเอเอ็ม และพีเอซี ลงไป 100 150 และ 4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขนี้ ค่าซีโอดี และ PAHs ในน้ำที่ปล่อยออกมาน้อยกว่า 80 และ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการปล่อยออกของจีน ผลลัพธ์ที่ได้บ่งบอกได้ว่าการรวมเทคโนโลยี Oxic-Anoxic-Oxic ระบบตกตะกอน และโอโซน สามารถนำมาใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากถ่านโค้ก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องผลิตโอโซน (Ozone Generator) รุ่น OZ-A1-FT บริษัท OZZON ประเทศไทย
- 2) เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น UV5300 บริษัท.ฮิตาชิ เอเชีย (ประเทศไทย) จำกัด
- 3) เครื่องปั่นเหวี่ยงพร้อมหลอด (Centrifuge) ยี่ห้อ Benehtop Centrifuge รุ่น XZ-6GQB
- 4) เครื่องวัดพีเอช (pH Meter) ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น UB-10 ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 5) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Metter Toledo รุ่น MS204TS
- 6) ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UN 55 ประเทศ เยอรมนี
- 7) เตาย่อยวิเคราะห์ซีไอดี (COD digester) ยี่ห้อ Velp รุ่น ECO25 ประเทศอิตาลี
- 8) หลอดย่อยสลาย (Digestion Vessels) ขนาด 16 x 100 มิลลิเมตร หรือมีความจุ 10 มิลลิลิตร มีฝาเกลียวชนิดที่เอพที
- 9) โถดูดความชื้น (Dessicator)
- 10) ถังปฏิกิริยาทำจากอะคริลิกใส โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร
- 11) หัวกระจายอากาศ
- 12) เครื่องแก้วต่าง ๆ

3.1.2 สารเคมี

- 1) ลิกนิน, อัลคาลีน ($C_{30}H_{25}ClN_6$) เกรตวิเคราะห้ บริษัท Aldrich Chemistry ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2) สีย้อมเมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}N_3SCL \cdot 3H_2O$) เกรตวิเคราะห้ บริษัท Fisher Scientific ประเทศอังกฤษ
- 3) โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรตวิเคราะห้ บริษัท Carlo Erba ประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.H₂SO₄) 98% เกรตวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
- 5) แอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
- 6) กลูโคส (Glucose) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Kemaus ประเทศออสเตรเลีย
- 7) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
- 8) โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
- 9) โซเดียมไธโอซัลเฟต (Na₂S₂O₃) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
- 10) เฟอโรอิน อินดิเคเตอร์ (Ferroun indicator))
- 11) น้ำแ่่ง
- 12) น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ทดสอบเพื่อยืนยันความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดีด้วยกระบวนการไอโซนออกซิเดชัน

สารละลายที่ใช้ในการทดสอบคือ สารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นซีไอดีประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้โดยชั่งสี้อมเมทิลีนบลู 0.063 กรัม ละลายน้ำกลั่นและเจือจางในขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร

3.2.2 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดีด้วยกระบวนการไอโซนออกซิเดชัน

1) สารละลายสต่ออัลคาไลน์ลิกนินที่มีความเข้มข้นซีไอดีประมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ชั่งลิกนิน 1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร เก็บในขวดแก้วสีชาเพื่อใช้ในสารละลายสต่อสำหรับเตรียมสารละลายอัลคาไลน์ลิกนินเพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป

2) สารละลายอัลคาไลน์ลิกนินที่มีค่าซีไอดีเริ่มต้นต่างกัน

เตรียมโดยการเจือจางสารละลายสต่ออัลคาไลน์ลิกนินในข้อ 1) ให้ได้สารละลายอัลคาไลน์ลิกนินที่มีค่าซีไอดีแตกต่างกัน 4 ระดับ และมีค่าโดยประมาณอยู่ในช่วง 50-300 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำตัวอย่าง

ทำการวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษาและน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

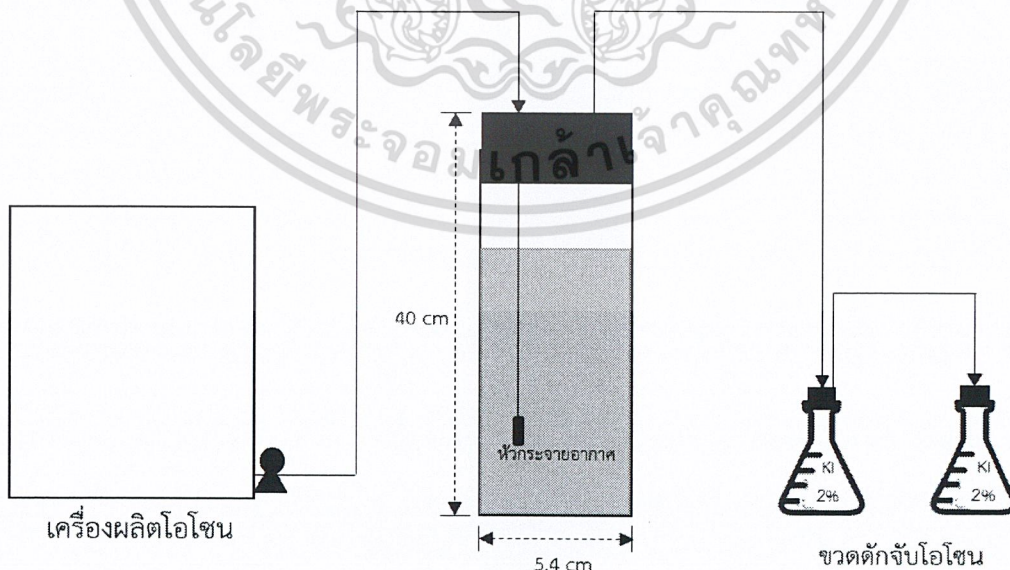
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้

สมบัติที่วิเคราะห์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
พีเอช (pH)	pH meter
อุณหภูมิ (Temperature)	Thermometer
สี (color)	Method 2120F ADMI Weighted-Ordinate Spectrophotometric Method (APHA et al., 2012)
ซีโอดี (COD)	Methods 5220C Closed Reflux, Titrimetric Method (APHA et al., 2012)

3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน

3.4.1 การเดินระบบโอโซน

แผนผังการเดินระบบโอโซนเพื่อบำบัดน้ำตัวอย่างในโครงการพิเศษนี้แสดงดังรูปที่ 3.1 ทำการทดลองแบบแบทช์จำนวน 3 ชั่วโมงต่อปัจจัยที่ศึกษา



ถึงปฏิกรณ์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์บริการวิชาการ
รูปที่ 3.1 แผนผังการบำบัดน้ำตัวอย่างด้วยโอโซน

3.4.2 การศึกษาอัตราการผลิตก๊าซโอโซน

- 1) จัดเตรียมระบบการทดลองดังรูปที่ 3.1 แต่ให้ทำการต่อเครื่องผลิตโอโซนเข้ากับขวดดักจับโอโซนโดยตรง ไม่ต้องผ่านถังปฏิกิริยา
- 2) ตวงสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% (2% KI) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรเพื่อดักจับก๊าซโอโซน (T1,T2)
- 3) เปิดเครื่องผลิตก๊าซโอโซน และเริ่มเดินระบบเป็นเวลา 10 นาที
- 4) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลาย 2% KI ในขวดดักจับก๊าซโอโซน T1 และ T2 ไปวิเคราะห์หาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ก.1
- 5) ทำการทดลองซ้ำ 2-5 ครั้ง แต่เปลี่ยนระยะเวลาเดินระบบเป็น 30, 60, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ
- 6) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.4.3 การทดสอบยืนยันความสามารถของระบบโอโซนเนชันในการกำจัดสีและซีโอดีในสารละลายตัวอย่าง

- 1) จัดเตรียมระบบการทดลองดังรูปที่ 3.1
- 2) ตวงสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมไว้ในหัวข้อ 3.2.1 ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ใส่ลงในถังปฏิกิริยา
- 3) ตวงสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% (2% KI) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรเพื่อดักจับก๊าซโอโซน (T1,T2)
- 4) เปิดเครื่องผลิตก๊าซโอโซน และเริ่มเดินระบบเป็นเวลา 10 นาที
- 5) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำไปวิเคราะห์ สีและซีโอดีด้วยวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.1
- 6) ทำการทดลองซ้ำ 2-5 ครั้ง แต่เปลี่ยนระยะเวลาเดินระบบเป็น 10, 30, 60, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ

3.4.4 การศึกษาผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อความสามารถในการบำบัดสารละลายอัลคาไลน์ลิกัน

- 1) จัดเตรียมระบบการทดลองดังรูปที่ 3.1
- 2) ตวงสารละลายอัลคาไลน์ลิกันที่เตรียมให้มีค่าซีโอดีต่ำสุด (ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ใส่ลงในถังปฏิกิริยา
- 3) ตวงสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% (2% KI) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรเพื่อดักจับก๊าซโอโซน (T1,T2) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- 4) เปิดเครื่องผลิตก๊าซโอโซน และเริ่มเดินระบบเป็นเวลา 10 นาที ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ที่เกินนี้

- 5) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำไปวิเคราะห์ สีและซีไอดีด้วยวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.1
- 6) ทำการทดลองข้อ 2-5 ซ้ำ แต่เปลี่ยนระยะเวลาเดินระบบเป็น 10, 30, 60, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ
- 7) ทำการทดลองข้อ 2-6 ซ้ำ แต่เปลี่ยนตัวอย่างน้ำที่เตรียมให้มีค่าซีไอดีต่างกันอีก 3 ระดับ มาทดสอบตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการกำจัดสีและซีไอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกนินที่มีค่าซีไอดีต่างกัน 4 ระดับ ด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาการสัมผัสโอโซนและความเข้มข้นเริ่มต้นของลิกนิน ได้ผลการทดลองเป็นดังนี้

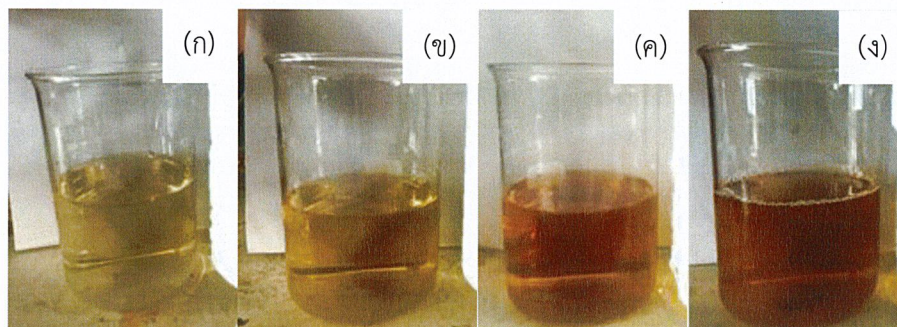
4.1 ลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการทดสอบเพื่อยืนยันว่าระบบบำบัดด้วยโอโซนมีความสามารถในการบำบัดสีและซีไอดีในน้ำตัวอย่างได้ โดยใช้สารละลายเมทธิลีนบลูที่มีค่าซีไอดีประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นตัวอย่างในการทดสอบ เนื่องจากว่าเมทธิลีนบลูเป็นสีย้อมที่มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างของลิกนิน แต่โครงสร้างจะไม่ซับซ้อนเท่าลิกนิน และยังมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำในการทดสอบความสามารถของระบบจึงเลือกใช้สีย้อมเมทธิลีนบลู ลักษณะทางกายภาพของสารละลายที่ใช้ทดสอบระบบแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายเมทธิลีนบลูที่ใช้ในการทดสอบระบบ

สำหรับตัวอย่างสารละลายอัลคาไลน์ลิกนินที่ใช้ในการทดลอง เตรียมขึ้นโดยการเจือจางสารละลายสต็อกอัลคาไลน์ลิกนินให้มีค่าซีไอดีแตกต่างกัน 4 ระดับ ตัวอย่างน้ำที่เตรียมได้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายของสารละลายอัลคาไลน์ลิกนินที่มีค่าซีโอดีเริ่มต้นต่างกันที่ใช้ในการศึกษา

ผลการวิเคราะห์สมบัติน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าสารละลายเมทธิลีนบลูและสารละลายอัลคาไลน์ลิกนินที่ใช้ในการศึกษามีสภาพเป็นกรด มีค่าพีเอชระหว่าง 3.5-5.5 อัลคาไลน์ลิกนินเป็นลิกนินที่ผลิตจากน้ำดำด้วยวิธีการตกตะกอน โครงสร้างของลิกนินมีหมู่กรดอ่อนได้แก่หมู่ฟีนอลิก (phenolic group) และหมู่กรดแก่คือหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group) เป็นส่วนประกอบ (วิชา, 2545) เมื่อนำมาละลายน้ำ สารละลายที่เตรียมได้จึงมีฤทธิ์เป็นกรด นอกจากนี้พบว่าพีเอชและสีของสารละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัลคาไลน์ลิกนินในสารละลายหรือซีโอดีที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ประเภทของตัวอย่าง	พีเอช	อุณหภูมิ	สี (ADMI)	ซีโอดี (mg/L)
เมทธิลีนบลู	5.10 ± 0.04	29.33 ± 0.289	4,118 ± 32.3	109 ± 9.03
อัลคาไลน์ลิกนิน ก	3.51 ± 0.02	30.00 ± 0.000	188 ± 37.8	65.0 ± 8.63
อัลคาไลน์ลิกนิน ข	4.36 ± 0.10	28.83 ± 0.289	255 ± 0.27	187 ± 9.24
อัลคาไลน์ลิกนิน ค	4.72 ± 0.27	28.83 ± 0.289	n/a	217 ± 58.6
อัลคาไลน์ลิกนิน ง	5.46 ± 0.11	29.83 ± 0.289	646 ± 0.00	357 ± 18.5

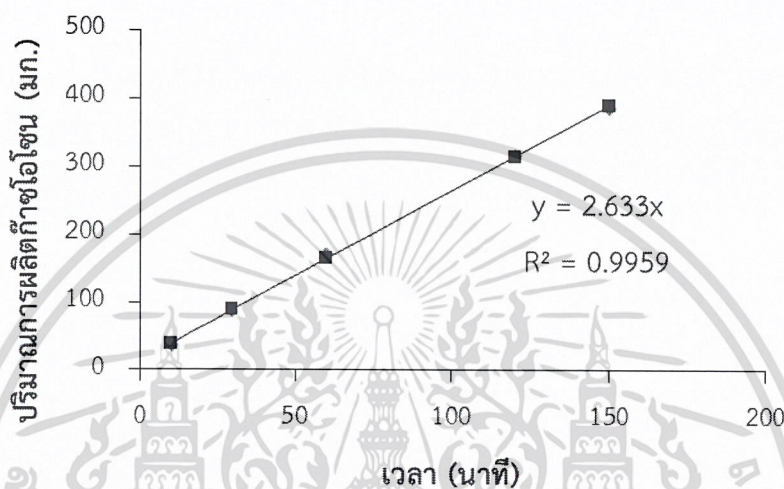
n/a : ไม่มีข้อมูล

4.2 ผลการศึกษาการผลิตโอโซนและการทดสอบเพื่อยืนยันประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีของกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน

4.2.1 อัตราการผลิตก๊าซโอโซน

ในการศึกษาอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องผลิตโอโซน OZZON รุ่น OZ-A1-FT จะทำการวัด โดยการเติมโอโซนลงไปในช่วงตกจับก๊าซโอโซน จำนวน 2 ชุด (T1 และ T2) ซึ่งบรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดต์ ความเข้มข้น 2% (2% KI) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทั้ง 2 ชุด ทำการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ่นก๊าซโอโซนตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายหลังพ่นไปวิเคราะห์ปริมาณโอโซนด้วยวิธีการไทเทรตแบบย้อนกลับกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตจะถูกนำมาคำนวณหาปริมาณโอโซน (รายละเอียดการวิเคราะห์และคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ก.1) พบว่าปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ของแต่ละช่วงเวลานั้น ๆ จะแสดงดังกราฟในรูปที่ 4.3 (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.6)



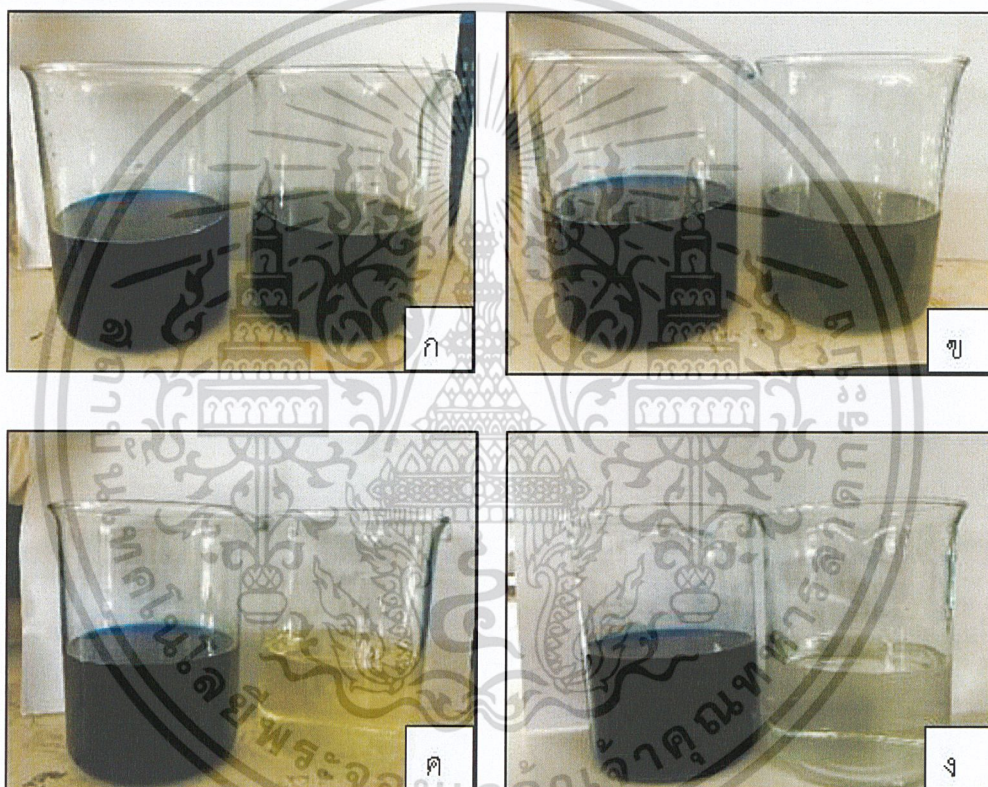
รูปที่ 4.3 ปริมาณการผลิตก๊าซโอโซนที่เวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อระยะเวลาการพ่นโอโซนลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เพิ่มขึ้น ณ อัตราการไหลของอากาศคงที่จะเกิดปริมาณโอโซนในระบบเพิ่มมากขึ้น ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากการทดลองในช่วงเวลาที่ใช้ทดสอบนาน 150 นาทีที่มีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเติมก๊าซโอโซนของระบบ จากการพล็อตกราฟและหาฟังก์ชันสมการถดถอยเชิงเส้นด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Ordinary least square fit) โดยใช้คำสั่ง Regression ในโปรแกรม EXCEL จะได้ฟังก์ชันสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.3 ผลการหาอัตราการผลิตโอโซน ซึ่งคำนวณจากค่าความชันของฟังก์ชันสมการเส้นตรง พบว่าเครื่องผลิตโอโซน OZZON รุ่น OZ-A1-FT ผลิตก๊าซโอโซนได้ 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

4.2.2 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดีด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน

เมื่อนำสารละลายเมทิลีนบลูปริมาตร 300 มิลลิลิตร มีค่าสีเริ่มต้นประมาณ $4,118 \pm 32.3$ ADMI มีค่าซีโอดี คือ 109 ± 9.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชตามสภาพ คือประมาณ 5 มาบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน โดยจะแปรค่าระยะเวลาการสัมผัสโอโซนเป็น 4 เวลา คือ 10, 30, 60, และ 120 นาที ตามลำดับ พบว่าสีของเมทิลีนบลูจางลงตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดังแสดงใน

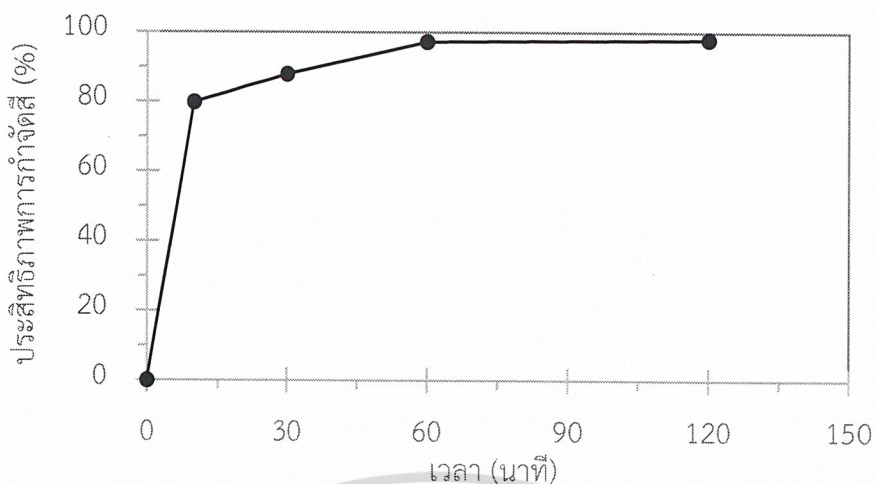
รูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลจากความเข้มข้นของโอโซนที่มากขึ้น โดยสีของเมทิลีนบลูมีค่าลดลงจาก $4,118 \pm 32.3$ ADMI เป็น 88.8 ± 43.6 ADMI ภายในระยะเวลาสัมผัสนาน 120 นาที คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงถึง 97.8% (รูปที่ 4.5, แสดงรายละเอียดในตารางที่ ข.7) การกำจัดสีเมทิลีนบลูเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 10 นาทีแรกของการทำปฏิกิริยา คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับ 79.8% ตามลำดับ น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 60 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 97.2% เป็น 97.8% เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 60 นาที เป็น 120 นาที (รูปที่ 4.5, รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ข.9)



รูปที่ 4.4 สีของสารละลายเมทิลีนบลู หลังบำบัดด้วยโอโซนที่เวลาแตกต่างกัน

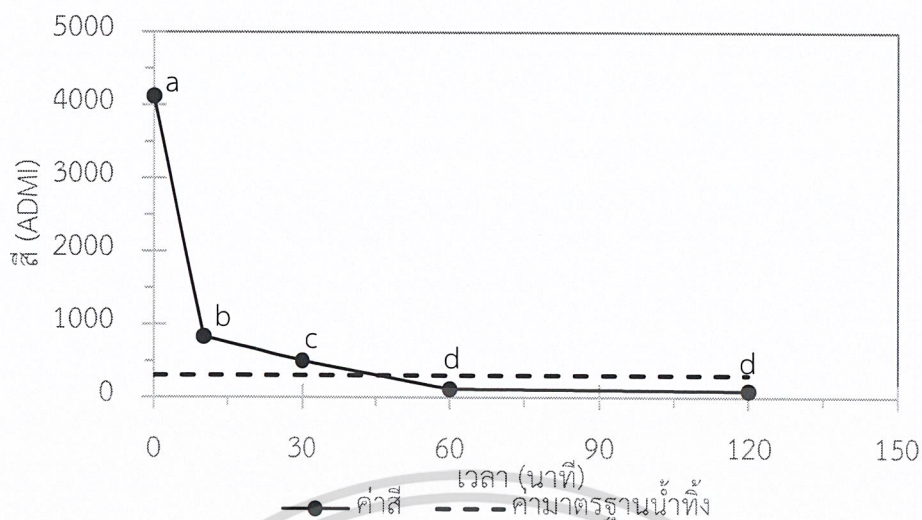
(ก) 10 นาที (ข) 30 นาที (ค) 60 นาที และ (ง) 120 นาที เทียบกับสารละลายเมทิลีนบลูก่อนบำบัด (ปีกเกอร์ทางด้านซ้ายมือของรูป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



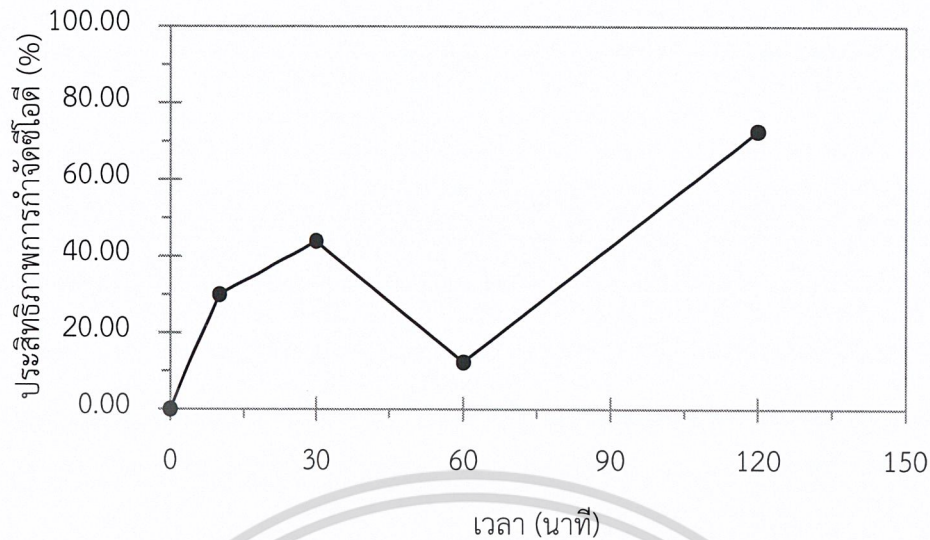
รูปที่ 4.5 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดโปรตีนละลายเมทธิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

จากการทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (แสดงรายละเอียดในตารางที่ ค.1) พบว่าช่วงเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากับโอโซนต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอของสารละลายเมทธิลีนบลู ที่มีค่า p-value (0.000) มากกว่า α (0.05) นั่นคือช่วงเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากับโอโซนมีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไออย่างมีนัยสำคัญ และจากการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลทีละคู่ โดยใช้วิธี LSD พบว่าเวลาที่มีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ โดยสีของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนตั้งแต่ 90 นาที มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4.6, รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ค.2)



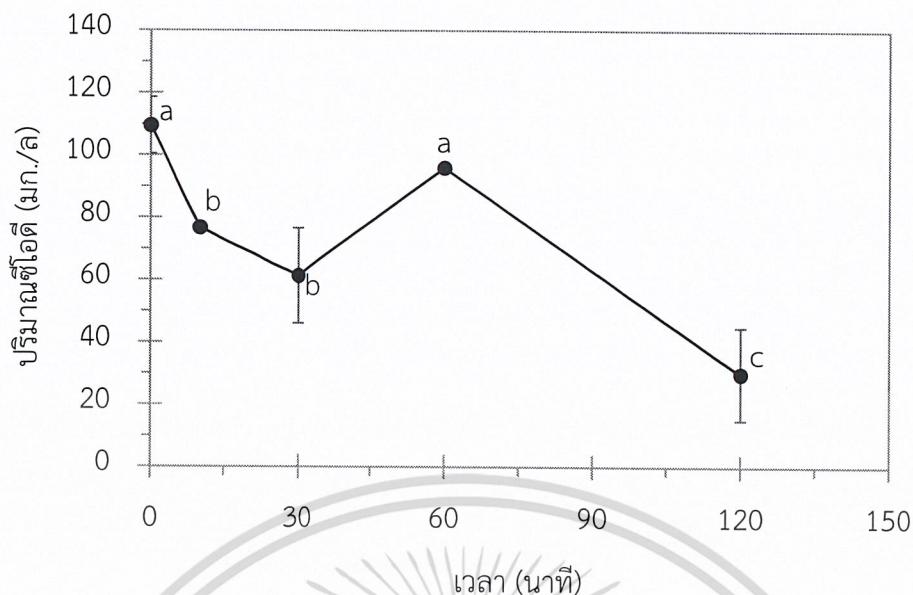
รูปที่ 4.6 ผลของค่าสีสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยตัวอักษรกำกับที่ต่างกัน หมายถึง ค่าสีที่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ผลการวิเคราะห์ซีไอของสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน พบว่าค่าซีไอที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับโอโซน ยกเว้นที่เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 60 นาที สันนิษฐานได้ว่า โอโซนจะทำลายโครงสร้างของเมทิลีนบลูในระยะเวลาเริ่มต้น และที่เวลา 60 นาที เกิดการรวมตัวกันของโมเลกุลใหม่ทำให้มีค่าซีไอเพิ่มสูงขึ้น และในระยะเวลาต่อมาโอโซนจะย่อยสลายโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลง โดยตัวอย่างน้ำมีค่าซีไอลดลงจากค่าเริ่มต้นคือ 109 ± 9.03 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 29.9 ± 14.9 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 72.6 % เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยากับโอโซนนาน 120 นาที (รูปที่ 4.7, รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ข.8)



รูปที่ 4.7 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสารละลายเมทธิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ใน การทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

จากการทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (แสดงรายละเอียดในตารางที่ ค.3) พบว่าเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากับโอโซนมีผลต่อการกำจัดซีโอดีของสารละลายเมทธิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ และจากการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลทีละคู่ โดยใช้วิธี LSD พบว่าซีโอดีของสารละลายหลังการบำบัดด้วยโอโซนนาน 10, 30 และ 120 นาที มีค่าแตกต่างจากค่าซีโอดีเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนซีโอดีของสารละลายหลังการบำบัดด้วยโอโซน 60 นาที แม้ว่าจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น แต่ค่าที่ลดลงมีค่าไม่แตกต่างจากค่าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4.8, รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ค.4)



รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณซีโอดีสารละลายเมทิลีนบลูที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยตัวอักษรกำกับที่ต่างกันแสดงซีโอดีหมายถึงค่าสีที่วัดได้มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโอโซนในการกำจัดสีและซีโอดีในเวลากำหนดที่เท่ากัน หรืออีกนัยหนึ่งคือความเข้มข้นของโอโซนเท่ากัน (รูปที่ 4.5 และ 4.7) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยโอโซนมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในทุกช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าโอโซนมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับส่วนประกอบหรือหมู่โครงสร้างของสารที่ทำให้เกิดสีในน้ำ แต่มีประสิทธิภาพไม่สูงนักในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์เพื่อลดปริมาณซีโอดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ El-din and Smith (2002 อ้างถึงในรวีต, 2548) ที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโอโซนในการกำจัดสี (color), Adsorbable Organic Halides (AOX), COD และ TOC ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ พบว่าการใช้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นหนึ่ง ๆ สามารถกำจัดสีได้มีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงไปคือ AOX, COD และ TOC ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้น ยืนยันได้ว่าการใช้โอโซนในระบบบำบัดที่ใช้ในโรงงานพิเศษนี้สามารถกำจัดสีและซีโอดีในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับหนึ่ง

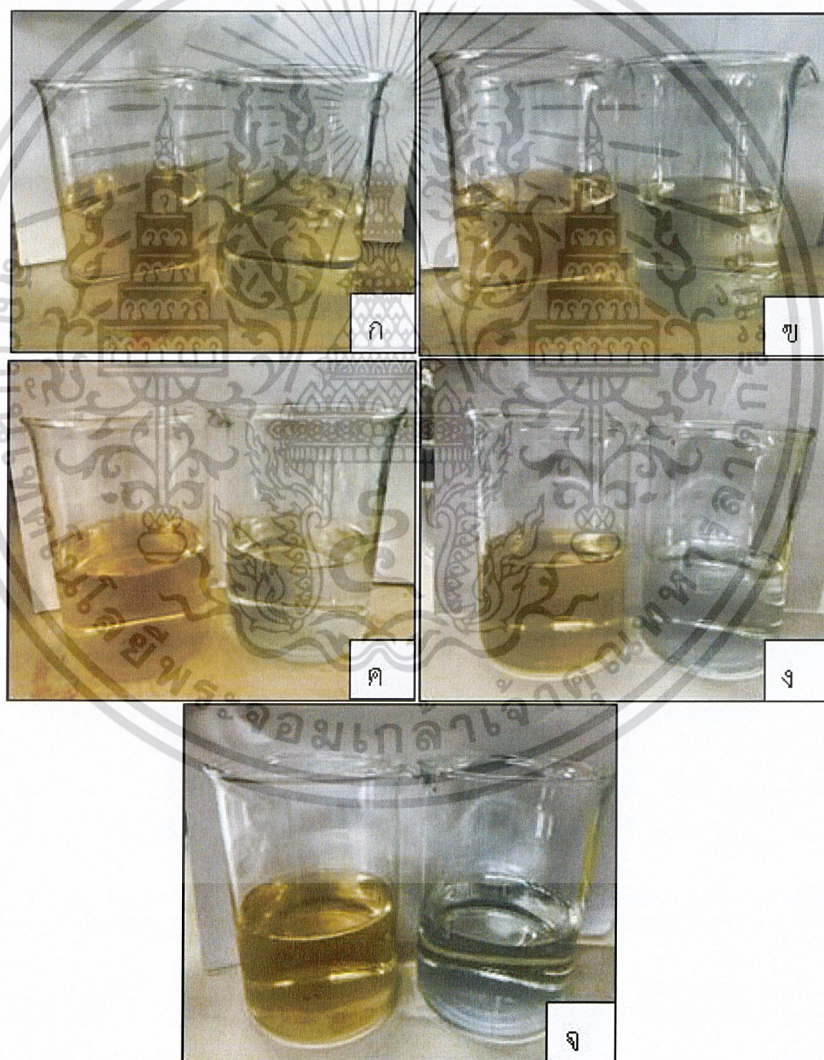
4.3 ผลการศึกษาการกำจัดสีและซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิควินด้วยโอโซน

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิควินโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซโอโซนในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ ทำการทดสอบโดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ลิควินที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของลิควินแตกต่างกัน 4 ระดับ เรียกชื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่จนกว่าการคัดลอกเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ลิกนิน ง ตามลำดับ ทั้งนี้สมบัติของสารละลายลิกนินทั้ง 4 ชนิดแสดงในตารางที่ 4.1 นำสารละลายดังกล่าวมาบำบัดด้วยการแปรผันเวลาในการทำปฏิกิริยากับโอโซนให้มีค่าระหว่าง 10-150 นาที ด้วยผลกระทบจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของ COVID-19 ทำให้การรายงานผลในหัวข้อนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามความสมบูรณ์ของข้อมูลที่ผู้วิจัยสามารถเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ได้เป็นดังนี้

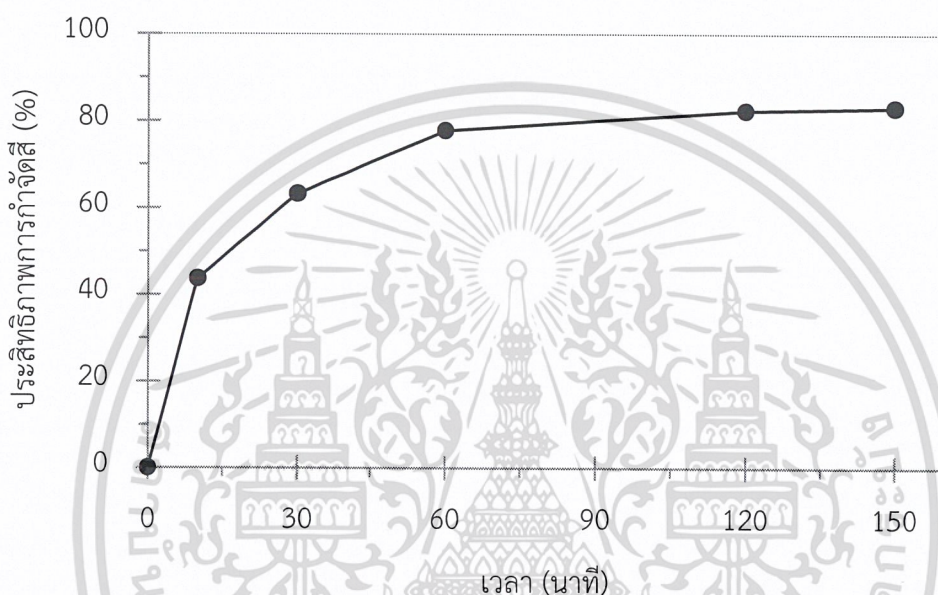
4.3.1 สารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ก

ผลการบำบัดสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ก ซึ่งมีค่าสีเริ่มต้นเท่ากับ 188 ± 37.8 ADMI และมีพีเอชตามสภาพ คือ ประมาณ 3 – 4 ด้วยการใช้อโซน พบว่าสีของสารละลายจางอย่างรวดเร็วตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (รูปที่ 4.9) สีปรากฏมีสภาพค่อนข้างใสเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 30 นาทีเป็นต้นไป



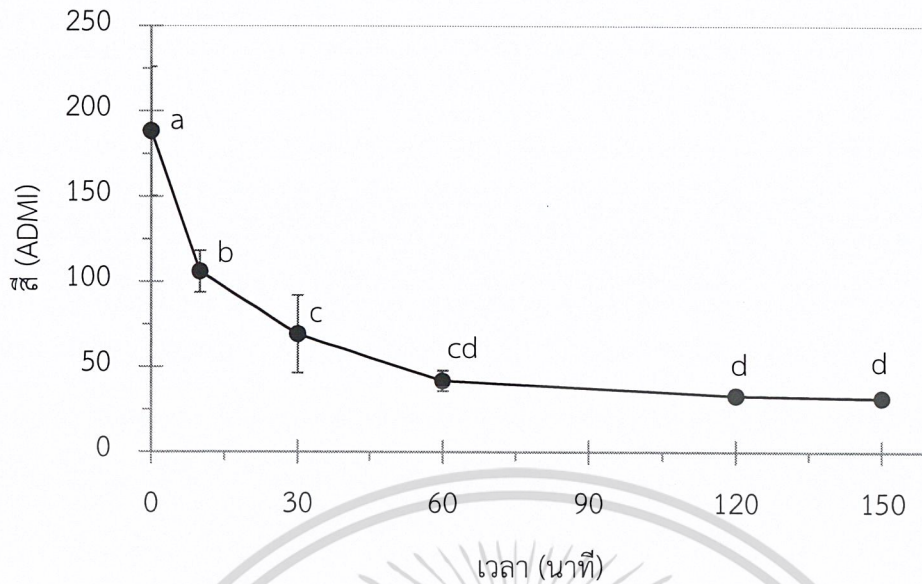
รูปที่ 4.9 สีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ก หลังบำบัดด้วยโอโซนที่เวลาแตกต่างกัน เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่(ก) 10 นาที (ข) 30 นาที (ค) 60 นาที (ง) 120 นาที และ(จ) 150 นาทีที่ระโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งเทียบกัสีของสารละลายลิกนินก่อนบำบัด (บีกเกอร์ทางด้านซ้ายมือของรูป) มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์สีในหน่วยเอดีเอ็มไอพบว่าสีมีค่าลดลงเหลือ 106 ± 12.2 ADMI เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยากับโอโซนนาน 10 นาที คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 45.3% (รูปที่ 4.10) เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นเป็น 30 นาที และ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าสูงขึ้นเป็น 63.3% และ 77.7% ที่สภาวะดังกล่าวสีของสารละลายมีค่าลดลงเหลือ 69.2 ± 22.8 ADMI และ 41.8 ± 6.00 ADMI ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีค่าสูงสุดประมาณ 80% เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 120 นาทีเป็นต้นไป (แสดงรายละเอียดในตารางที่ ข.12)



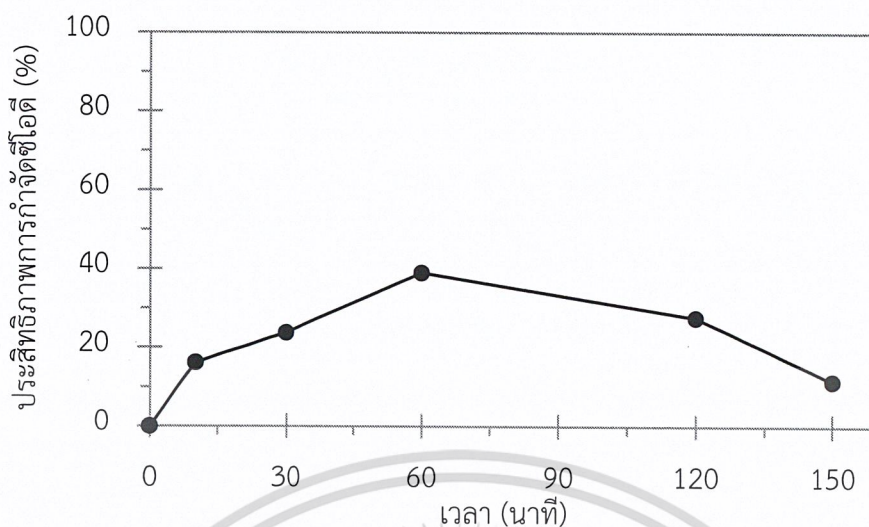
รูปที่ 4.10 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสีสารละลายอัลคาไลนิกนิน ก ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

จากการทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (แสดงรายละเอียดในตารางที่ ค.5) พบว่าเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากับโอโซนมีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไออย่างมีนัยสำคัญ และจากการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลทีละคู่ โดยใช้วิธี LSD พบว่าสีของสารละลายลิกนินหลังการบำบัดด้วยโอโซนมีค่าแตกต่างจากค่าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ความสามารถในการกำจัดสีด้วยโอโซนมีแนวโน้มคงที่ ดังจะเห็นได้จากสีของสารละลายหลังบำบัดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำปฏิกิริยากับโอโซนตั้งแต่ 60 นาทีเป็นต้นไป (รูปที่ 4.11, รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ค.6)



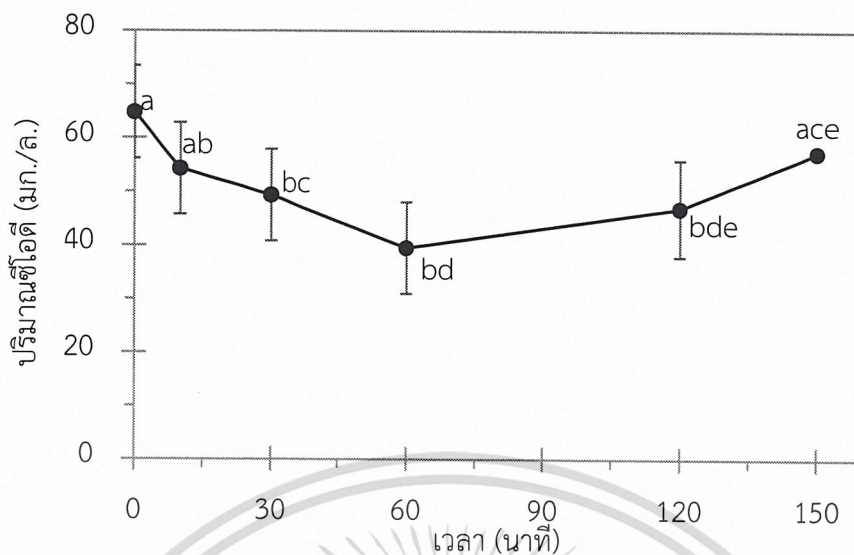
รูปที่ 4.11 ผลของค่าสีสารละลายอัลคาไลน์ลิคินิน ก ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยตัวอักษรกำกับที่ต่างกัน หมายถึงค่าสีที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิเคราะห์ซีไอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิคินิน ก ที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน พบว่า ค่าซีไอดีที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงจนถึงเวลาที่ 60 นาที โดยสารละลายมีค่าซีไอดีลดลงจากค่าเริ่มต้นคือ 65.0 ± 8.63 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 39.5 ± 8.55 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 39.0% ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเวลาการทำปฏิกิริยานานขึ้นเป็น 120 และ 150 นาที ที่ระยะเวลาดังกล่าว โอโซนสามารถกำจัดซีไอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิคินิน ก ได้ 27.6% และ 11.5% ตามลำดับ (รูปที่ 4.12, รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ข.11)



รูปที่ 4.12 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดคลอโรฟิลล์สารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ก ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

จากการทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วย One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (แสดงรายละเอียดในตารางที่ ค.7) พบว่าเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากับโอโซนมีผลต่อการลดปริมาณคลอโรฟิลล์อย่างมีนัยสำคัญ และจากการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลทีละคู่ โดยใช้วิธี LSD พบว่าคลอโรฟิลล์ของตัวอย่างหลังบำบัดด้วยโอโซนนาน 30-120 นาที มีค่าแตกต่างจากค่าคลอโรฟิลล์เริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่คลอโรฟิลล์ของตัวอย่างที่บำบัดด้วยโอโซนนาน 150 นาที มีค่าไม่แตกต่างจากค่าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Subha and Muthukumar (2012) ที่พบว่าระยะเวลาในการฟ้นโอโซนในการบำบัดน้ำเสียที่นานเกินไป สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดคลอโรฟิลล์ (รูปที่ 4.13, รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ ค.8)



รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณซีโอดีสารละลายอัลคาไลน์ลิคนิน ก ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยตัวอักษรกำกับที่ต่างกัน หมายถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีของสารละลายลิคนินด้วยโอโซน พบว่าผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกับผลการบำบัดสีเมทิลีนบลูด้วยโอโซนกล่าวคือ โอโซนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีกว่าซีโอดี แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของโอโซนสามารถกำจัดสีด้วยการออกซิไดซ์พันธะของโครโมฟอร์ (Chromophores) ซึ่งเป็นส่วนของโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่และสามารถดูดซับแสงที่มองเห็นได้ เมื่อพันธะนั้น ๆ ถูกทำลาย จะทำให้โมเลกุลสูญเสียความสามารถในการดูดซับแสงที่มองเห็น (พันธกานต์, 2558) ส่งผลให้เกิดการลดลงของสีในสารละลาย นอกจากนี้ บางส่วนของโมเลกุลอาจเกิดการแตกออกเป็นโมเลกุลที่เล็กลงและถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซน ส่งผลให้ซีโอดีลดลง ซึ่งเป็นการยืนยันถึงการสลายตัวของโครงสร้างโมเลกุลลิคนิน (พันธกานต์, 2558; วัช, 2548)

4.3.2 สารละลายอัลคาไลน์ลิคนิน ข, ค และ ง

ลักษณะทางกายภาพของสารละลายอัลคาไลน์ลิคนิก ข, ค และ ง แสดงดังรูปที่ 4.14-4.16 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.14-4.16 พบว่าโอโซนมีประสิทธิภาพในการทำให้สีของสารลิคนินจางลงเมื่อเทียบกับสีของสารละลายเริ่มต้น นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยากับสารละลายลิคนินที่มีค่าซีโอดีเท่ากับ 217 ± 58.6 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำให้สีค่อย ๆ จางลงจนมีสภาพใสได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เป็นการยืนยันถึงความสามารถของโอโซนในการออกซิไดซ์โมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดสีในลิคนิน สอดคล้องกับงานวิจัยของเจตนิพิฐและคณะ (2552) งานวิจัยของวัช (2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยของสุพิชฌาย์ (2550) และงานวิจัยของนนทพงษ์ (2548) ที่พบว่าสีของน้ำตัวอย่างมีลักษณะจางลงเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยากับโอโซน



รูปที่ 4.14 สีของสารละลายอัลคาไลน์ลิคนิน ข หลังบำบัดด้วยโอโซนนาน 30 นาที เทียบกับสีของสารละลายลิคนินก่อนบำบัด (ปักเกอร์ทางด้านซ้ายของรูป)

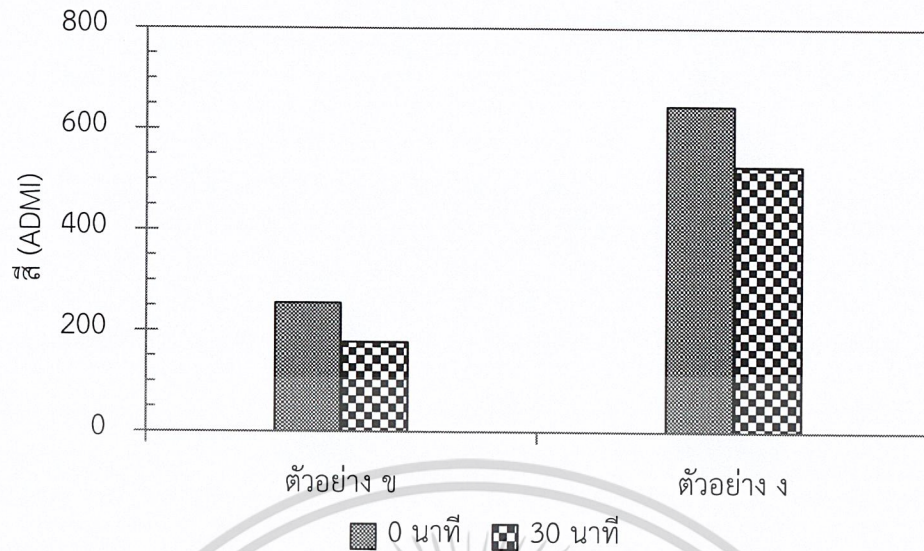


รูปที่ 4.15 สีของสารละลายอัลคาไลน์ลิคนิน ค หลังบำบัดด้วยโอโซนที่เวลาแตกต่างกัน เมื่อเอกสารนี้(ก) 10 นาที (ข) 30 นาที (ค) 60 นาที (ง) 120 นาที และ(จ) 150 นาที เทียบกับสีของสารละลายการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม ลิคนินก่อนบำบัด (ปักเกอร์ทางด้านซ้ายของรูป)เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



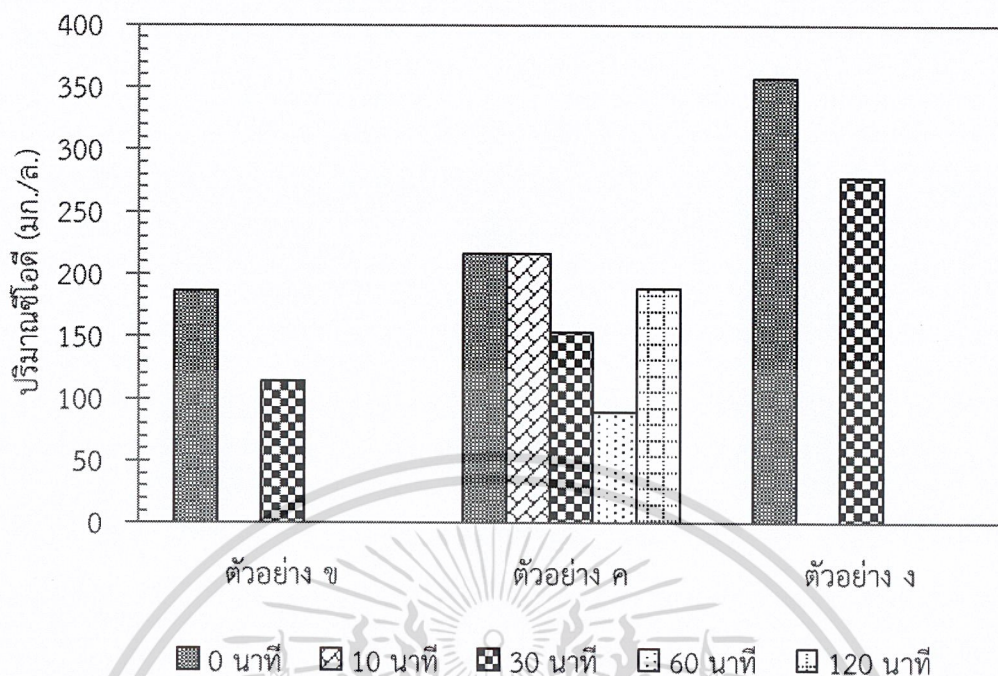
รูปที่ 4.16 สีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ง หลังบำบัดด้วยโอโซนที่เวลา 30 นาที เทียบกับสีของสารละลายลิกนินก่อนบำบัด (ปีกเกอร์ทางด้านซ้ายของรูป)

ผลการวิเคราะห์สีในหน่วยเอดีเอ็มไอ ของสารละลายลิกนินหลังบำบัดด้วยโอโซน พบว่าสีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ข ที่มีค่าซีโอดีเริ่มต้น 187 ± 9.24 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าลดลงจาก 255 ± 0.27 ADMI เหลือ 177 ± 23 ADMI เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 30 นาที (รูปที่ 4.17) คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 30.3% เช่นเดียวกับการบำบัดสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ง ซึ่งมีค่าซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 357 ± 18.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยโอโซนนาน 30 นาที พบว่าสีของสารละลายมีค่าลดลงจาก 646 ± 0.05 ADMI เหลือ 526 ± 64.8 ADMI (รูปที่ 4.17) คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 18.5% ในขณะที่สีของสารละลายลิกนินอัลคาไลน์ ค ในหน่วยเอดีเอ็มไอ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ที่ได้ จึงไม่มีผลแสดงในรูปที่ 4.17 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารละลาย อัลคาไลน์ลิกนิน ข กับสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ง ซึ่งมีค่าซีโอดีเริ่มต้นแตกต่างกัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของลิกนินด้วยโอโซนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของลิกนินมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณลิกนินในน้ำกับปริมาณโอโซนที่มีในระบบ ในขณะที่ระบบบำบัดมีปริมาณโอโซนป้อนเข้าระบบในอัตราคงที่ การเพิ่มปริมาณลิกนินในน้ำส่งผลให้ปริมาณโอโซนที่เติมลงสู่ระบบไม่เพียงพอต่อการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ จึงทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มลดลง

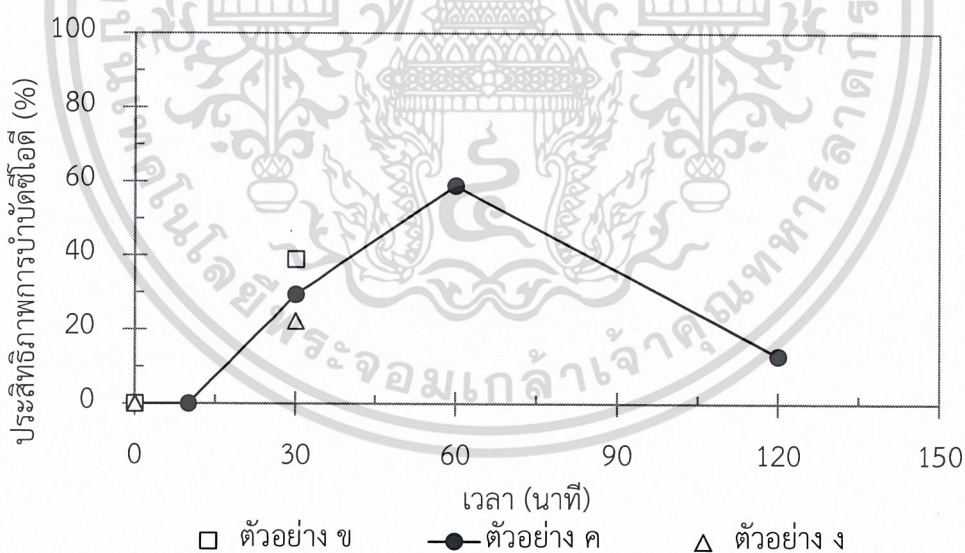


รูปที่ 4.17 ผลของค่าสีสารละลายลิกนิน ข และ ง ที่ผ่านการบำบัดที่เวลา 30 นาที ในการทำปฏิกิริยากับโอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์ซีไอทีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ข, ค และ ง ที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซน พบว่าโอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ทำให้เกิดการลดลงของซีไอทีในสารละลายลิกนินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 30 นาที โดยค่าซีไอทีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ข มีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นคือ 187 ± 9.24 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 114 ± 12.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ค มีค่าซีไอทีลดลงจากค่าเริ่มต้นคือ 217 ± 58.6 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 153 ± 79.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่สารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ง มีค่าลดลงจาก 357 ± 18.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 278 ± 9.56 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.18) คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 38.3%, 29.4 % และ 22.3% ตามลำดับ (รูปที่ 4.19, รายละเอียดดังแสดงตารางที่ ข.15, ข.18 และ ข.21) ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอทีที่ลดลงอาจเป็นผลมาจากปริมาณโอโซนซึ่งถูกป้อนเข้าระบบในอัตราคงที่ อาจมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับลิกนินที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณซีโอดีสารละลายลิกนิน ข ค และ ง ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับไอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.19 ผลของประสิทธิภาพการบำบัดสารละลายลิกนิน ข ค และ ง ที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ ในการทำปฏิกิริยากับไอโซนที่ผลิตในอัตรา 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ค มีแนวโน้มเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 60 นาที ความสามารถในการกำจัดซีโอดีมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา (รูปที่ 4.19) ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกับสารละลายอัลคาไลน์ลิกนิน ก

ที่พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดใช้เวลา 60 นาที สันนิษฐานว่าโอโซนทำให้ลิกนิน ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ขนาดใหญ่เกิดการแตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง โมเลกุลเหล่านี้ อาจเกิดการรวมตัวกัน เกิดเป็นสารอินทรีย์ที่ออกซิไดซ์ได้ยาก และบางส่วนจะไม่ถูกออกซิไดซ์ ส่งผลให้ซีโอต์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรวีศ (2548) งานวิจัยของเจตนิพิฐ (2552) และงานวิจัยของนันทพงษ์ (2548) ที่บอกว่าเป็นไปได้ที่อาจจะมีสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถออกซิไดซ์ได้ด้วยกระบวนการโอโซน ออกซิเดชัน อีกทั้งระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนสั้น และเครื่องผลิตโอโซนมีอัตราการผลิตต่ำ ส่งผลให้ค่าซีโอต์ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้ ทำการศึกษาการกำจัดสีและซีไอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทินที่มีซีไอดีเริ่มต้นแตกต่างกัน 4 ระดับด้วยโอโซนในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ที่มีการป้อนโอโซนเข้าระบบในอัตราคงที่ที่ 158 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง พร้อมทั้งศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดี สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผลการทดสอบความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดีของสารละลายเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน ยืนยันว่าระบบบำบัดที่ใช้ในการศึกษามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีของตัวอย่างน้ำที่ใช้ทดสอบได้

2. ผลการศึกษาการกำจัดสีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทิน พบว่าโอโซนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีของลิทินในน้ำ ความสามารถในการกำจัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับโอโซน ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่ 120 นาที โดยสามารถกำจัดสีของลิทินที่มีค่าเริ่มต้นระหว่าง 150-225 ADMI ให้เหลือประมาณ 39-47 ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดได้ 80% การเพิ่มความเข้มข้นของลิทินในน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลง

3. โอโซนสามารถลดค่าซีไอดีของลิทินในน้ำ แต่มีประสิทธิผลต่ำกว่าเมื่อเทียบกับความสามารถของโอโซนในการกำจัดสีในน้ำ นอกจากนี้พบว่าความสามารถในการกำจัดซีไอดีมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณลิทินในน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้ผลิตโอโซนในอัตราค่อนข้างต่ำ ดังนั้นตัวอย่างที่ใช้จึงจำเป็นต้องเตรียมให้มีความเข้มข้นซีไอดีเริ่มต้นต่ำเพื่อให้เหมาะสมกับระบบโอโซนออกซิเดชัน

2. ควรทำการทดลองเพิ่มเติมต่อให้ครบแผนที่ยาวไว้

3. ควรศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชันเพิ่มเติม เช่น พีเอช

4. ควรศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีไอดีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

5. ควรมีการคำนวณค่าใช้จ่ายของระบบบำบัดด้วยโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงพลังงาน. มปป. โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมกระดาษ. [Online].

Available : <http://www2.dede.go.th/kmberc/datacenter/page/paper.html>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2552. เทคโนโลยีการบำบัด

และปรับสภาพน้ำด้วยโอโซน. [Online]. Available : <http://www2.dede.go.th/kmberc/downloads/menu4/>

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. มปป. อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ. [Online]. Available : http://www2.ded.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry6.asp#2

เจตนิพิฐ สุดทองคง, ณัฐพงศ์ โปฤษสุนทร และนัตยา สุขประเสริฐ. 2552. “การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมรีแอคทีฟด้วยกระบวนการโอโซนชั้น.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. 2548. “การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ชมพูนุท ไชยรักษ์ และสุกัญญา โป่งรักษ์. 2560. “การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เพนตันและโซโนเพนตัน” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีธรรมศาสตร์*. 25(3) : 401-411.

ชำนาญ ราญภูร (2544). การศึกษาสมบัติทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอินทรีย์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ญาดา มุขแจ้. 2555. *Color Measurement in ADMI*. [Online]. Available : <http://yadaidea.blogspot.com/2012/03/colormeasurement-in-admi-authorinfo.html>

ฐิติกร พรหมบรรจง, ธนากรณ ดำสุด, เขมมิการ์ โขมพัตร และสุวรรณ ผลใหม่. 2557. “การสลายสีเมทิลีนบลูของเม็ดปีที่ตรึงสารสกัดหยาบใบรางจืด.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ*. 5(2) : 48-59.

ณัฐกร ราชบุตร, นิชชา แก้วเสียง, นิชา มุริจันทร์ และน้ำเพชร สุวรรณประเสริฐ. 2555. “การบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีสีรีแอคทีฟด้วยวิธีการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับวิธีโอโซนชั้น.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดลฤดี ยนต์สุวรรณ. 2552. “การหาตัวแปรสำคัญเพื่อแยกกลินินจากน้ำดำโดยกระบวนการเคมีไฟฟ้าและกายภาพ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นุชนกาญจน์ พรหมมาเทย์. 2550. “การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษสาด้วยกระบวนการเติมโอโซน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัย เชียงใหม่.

นนทพงษ์ ภาณุคุณกิตติ. 2548. “การบำบัดสีน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษโดยใช้กระบวนการโอโซนเนชัน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พัฒนศักดิ์ แดงบุตรดี, ขนิษฐา แก้วอิน, รวิรินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิทย์ ปิยะมั่งคลา. 2557. “การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบแบบตรึงในคอลัมน์.” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 24(2) : 398-408.

พันธกานต์ ยนต์ฉิมพลี. 2558. “การบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ใช้ซ้ำในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

รวิศ เจียสกุล. 2548. “การกำจัดสีด้วยโอโซนจากสารละลายกลินินในท่อแนวระนาบ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รสสุคนธ์ เกษมณี และศิวาพร ชูเรือง. 2553. “การลดสีโอดีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วนิดา ชูอักษร. 2555. “เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม.” *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 17(1) : 181-191.

วราภรณ์ อภิวัฒนาภิวัด, ต่อพงษ์ กริธาชาติ และพิลาณี ไวกนอมสัตย์. 2550. “การลดสีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษด้วยโอโซนออกซิเดชัน.” หน้า 825-834. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิชา พิชัยณรงค์. 2545. “การแยกกลินินออกจากน้ำดำในกระบวนการทำเยื่อกระดาษจากยูคาลิปตัส.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิวาพร ชูเรือง. 2556. “การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะผสม Fe-Ce.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- สารชัย เวรซ์ชต์พิมล. 2548. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระดาษห่ออาหารเพื่อใช้สำหรับเตาอบแบบ ไมโครเวฟ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2562. **ฐานข้อมูลอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์.** [Online]. Available: https://packaging.oie.go.th/new/admin_control_new/html-demo/analysis_file/96_03248175.pdf
- สุพิชฌาย์ วิจารณ์รงค์. 2550. “ผลของโอโซนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี.” ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตร์ บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุรัชย์ จอดพิมาย. 2553. “การกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเบียร์ด้วยกระบวนการโอโซนขั้น.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอส พี ซายด์. มปป. **เครื่องวัดค่าสี ADMI.** [Online]. Available : <https://www.spscience.com/16823306/admi>
- อดิพล สว่างอารมณ์. 2557. “การศึกษาประสิทธิภาพของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบ อนุภาคทองคำต่อการเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลูโดยกระบวนการโฟโตแคตาไลติก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- อาลักษณ์ ทิพย์รัตน์, (ผู้รวบรวม). 2561. **โครงการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี UV/Ozone ในการ กำจัดเชื้อ E. Coli/Coliforms ในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารและสินค้าระหว่างผลิตเพื่อ ลดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตอาหารและนำวัตถุดิบระหว่างผลิตกลับมาใช้ใหม่.** ชลบุรี : มหาวิทยาลัยบูรพา
- APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** Washington DC : American Public Health Association
- De los Santos Ramos, W., Poznyak, T., Chairez, I. and Cordova, R. 2009. “Remediation of lignin and its derivatives from pulp and paper industry wastewater by the combination of chemical precipitation and ozonation.” *Journal of Hazardous Materials.* 169(2009) : 428-434.
- Jaafarzadeh, N., Omidinasab, M. and Ghanbari, F. 2016. “Combined electrocoagulation and UV-based sulfate radical oxidation processes for treatment of pulp and paper wastewater.” *Process Safety and Environment Protection.* 751(2016) : 1-30.
- Judd, D. B., and Wyszecski, G. (1975). *Color in Business, Science and Industry* (3rd ed.). New York: Wiley

- Kreetachat, T., Damrongsri, M., Punsuwon, V., Vaithanomat, P., Chiemchaisri, C. and Chomsurin, C. 2006. "Effects of ozonation process on lignin-derived compounds in pulp and paper mill effluents." *Journal of Hazardous Materials*. 142(2007) : 250-257.
- Langlais, B., Reckhow, D.A., A. and Brink, D.R, R. 1991. **Ozone in Water Treatment : Application and Engineering.** Chelsea : Lewis.,C.
- Laurichesse, S. and Averous, L. 2003. "Chemical modification of lignin : Towards biobased polymers." *Progress in Polymer Science*. xxx(2013) : xxx-xxx.
- Lin, S.H. and Yeh, K.L. 1993. "Looking to Treat Wastewater ? Try Ozone" *Chemical Engineering*. p. 112-116.
- Pokhrel, D. and Viraraghavan, T. 2004. "Treatment of pulp and paper mill wastewater." *Science of the Total Environment*. 333(2004) : 37-58.
- Stahelin J., Bader J. and Geipke V. (1993) Trend analysis of the longterm Swiss ozone measurements. In Proc. Quadr. Ozone Symp., Charlottesville, 1992 (in press).
- Subha, B. and Muthukumar, M. 2012. "Optimization of Ozonation Process for the Reduction of Excess Sludge Production from Activated Sludge Process of Sago Industry Wastewater Using Central Composite Design" *The Scientific World Journal*. xxx(2012) : xxx-xxx
- Wang, J., Ji,Y., Zhang, F., Wang, D., He,X. and Wang, C. 2016. "Treatment of coking wastewater using oxic-anoxic-oxic process followed by coagulation and ozonation." *Carbon Resources Conversion*. 2(1019) : 151-156.
- Zhang, M.H., Dong, H., Zhao, L., Wang, D., Meng, D. 2019 "A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective." *Science of The Total Environment*. 670(2019) : 110-121.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์

ก.1 การวัดปริมาณไอโชน

การวัดปริมาณไอโชนสามารถทำได้โดยวิธีไอโอดิเมตรี (Iodometry) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้
เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดไอโชน
2. อุปกรณ์ไทเทรต

สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 2% (2% KI)
 - ชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ 20 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น
3. น้ำแป้ง
 - ต้มน้ำกลั่น 700 มิลลิลิตรใส่ในบีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร จนเดือด ในระหว่างที่รอน้ำเดือดให้ชั่งแป้งมัน 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร คนให้ละลาย พอน้ำเดือดแล้วใส่สารละลายแป้งที่เตรียมไว้พร้อมทั้งใส่น้ำให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร คน 3-4 ครั้ง ปล่อยให้เดือด (ประมาณ 30 วินาที) ปิดภาชนะแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 วัน เติมโทลูอีน หยด จึงจะนำไปใช้ได้ เก็บในตู้เย็น
4. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.1 N

หมายเหตุ การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยนำสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 N มาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไอโอเดต

- ชั่งโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 25 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม ละลายให้เข้ากัน แล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 N
- ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จำนวน 0.3567 กรัม มาละลายน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1000 N

- เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 1% (1% KI) โดยชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกระใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำสารละลาย 1% KI มา 80 มิลลิลิตร ลงใน Erlenmeyer flask ปิเปตสารละลาย KIO_3 10 มิลลิลิตร และเติม H_2SO_4 เข้มข้น 1 มิลลิลิตร นำไปไทเทรตด้วย 0.1 N $Na_2S_2O_3$ จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองฟางข้าว จากนั้นเติมน้ำแบ่ง 1 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงินไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไปเป็นสารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลาย 0.1 N $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ $Na_2S_2O_3$

การคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอน

$$C_{Na_2S_2O_3} (N) = \frac{C_{KIO_3} (N) \times V_{KIO_3} (ml)}{V_{Na_2S_2O_3} (ml)}$$

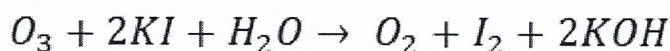
การทดลอง

1. การดูดซึมก๊าซไอโอดีน โดยพนัก๊าซไอโอดีนลงในขวดตักก๊าซจะใช้ Erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด บรรจุ 2% KI ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. นำสารละลาย KI ที่ผ่านการพนัก๊าซไอโอดีนแล้ว (จะมีสีเหลืองส้ม) มาเติม H_2SO_4 เข้มข้น 1 มิลลิลิตร เพื่อปรับพีเอช
3. นำมาไทเทรตกับสารละลาย $Na_2S_2O_3$ ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (0.1 N) จนสีเหลืองส้มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองฟางข้าว
4. เติมน้ำแบ่ง 1 มิลลิลิตร สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไปเป็นสารละลายใสไม่มีสี
5. บันทึกปริมาตร $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

หมายเหตุ ข้อ 1 และ 2 ทำในตู้ดูดควัน และสวมถุงมือเพื่อป้องกันความร้อนจากกรด

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น คือ

- การดูดซึมไอโอดีนโดยใช้สารละลาย KI



ไม่มีสี

สีเหลืองส้ม

- การไทเทรตโดยใช้ 0.1 N $Na_2S_2O_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีน้ำเงิน

ไม่มีสี

การคำนวณหาปริมาณก๊าซโอโซน

- การคำนวณหาความเข้มข้นของโอโซน

ในกรณีที่ความเข้มข้น $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 0.1 N

O_3 1 โมล เกิด I_2 1 โมล

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 2 โมล ทำปฏิกิริยากับ I_2 1 โมล

เพราะฉะนั้น $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ปริมาตร X มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.1 N = 0.1 M

จะได้เนื้อสารของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เท่ากับ $[(0.1 \text{ mol})/1,000\text{ml}] \cdot X \text{ ml}$

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	2	โมล	ต้องใช้ O_3	1	โมล
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	$[(0.1 \text{ mol})/1,000\text{ml}] \cdot X \text{ ml}$	โมล	ต้องใช้ O_3	$0.05X/1,000$	โมล
O_3	1	โมล	มีน้ำหนัก	48	กรัม
O_3	$0.05X/1000$	โมล	มีน้ำหนัก	$48 \cdot (0.05X/1,000)$	กรัม

ดังนั้นความเข้มข้นของโอโซนที่เกิดขึ้น เท่ากับ $0.0024X$ กรัม ($2.4X$ มิลลิกรัม)

$$[\text{O}_3](\text{mg}) = 2.4 \times (A + B) \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{ml})$$

ในกรณีที่ความเข้มข้น $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ไม่เท่ากับ 0.1 N

$$[\text{O}_3](\text{mg}) = (A + B) \times N \times 24$$

เมื่อ A,B คือ ปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ของขวดที่ 1 และขวดที่ 2 (มิลลิลิตร)

N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)

- คำนวณหาปริมาณก๊าซโอโซน

1. สามารถค่าได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนในสารละลายเทียบกับเวลา
จะได้

$$\text{ปริมาณก๊าซโอโซน} = \text{slope} = \frac{Dy}{Dx} \text{ หน่วยคือ } \text{mgO}_3/\text{h}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หาอัตราการผลิตก๊าซโอโซนได้จากสมการ

$$\text{Ozone Production Rate (OPR)} = \frac{(A+B) \times N \times 24}{\text{time}} \text{ หน่วยคือ mgO}_3/\text{h}$$

- เมื่อ A,B คือ ปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ของขวดที่ 1 และขวดที่ 2 (มิลลิลิตร)
 N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)
 Time คือ เวลาที่ใช้สัมผัสโอโซน (นาที)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 การวัดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องปั่นเหวี่ยง
2. เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer
3. โปรแกรม UVWin5 Software v5.1.1

สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับปรับพีเอช
2. สารมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेट (K_2PtCl_6)
 - ชั่งโพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेट (K_2PtCl_6) จำนวน 1.246 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรด HCl เข้มข้น 100 มิลลิลิตร และใส่คลอไรด์เฮกซีไฮเดรต ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) 1.000 กรัม แล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร จะมีหน่วยสีเท่ากับ 500 ADMI

การทดลอง

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานที่มีสี 200, 250, 300, 400 และ 500 ADMI ทำการเจือจางสารละลายต็อกโพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेटจากข้อ 2 โดยปิเปตมา 20, 25, 30, 40, และ 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าทราบดีทแดนซ์ (%T) แต่ละความยาวคลื่นดังตาราง
2. นำไปวัดค่า %T ที่ทราบความยาวคลื่นดังตาราง ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ตามตารางที่ ก.1
3. นำตัวอย่างไปวัดค่า %T หากตัวอย่างมีตะกอนให้นำมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสไปวัดค่า %T

ตารางที่ ก.1 การวัดค่าหา %T ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

Coordinate No.	Wavelength (nm)		
	X	Y	Z
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	654.9	627.3	495.2
Factor when 10 Ordinate Used	0.09806	0.10000	0.11814

การคำนวณ

- ในกรณีใช้แบบคำนวณมือ
- 1. สมการคำนวณหาค่าสีในหน่วย ADMI

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

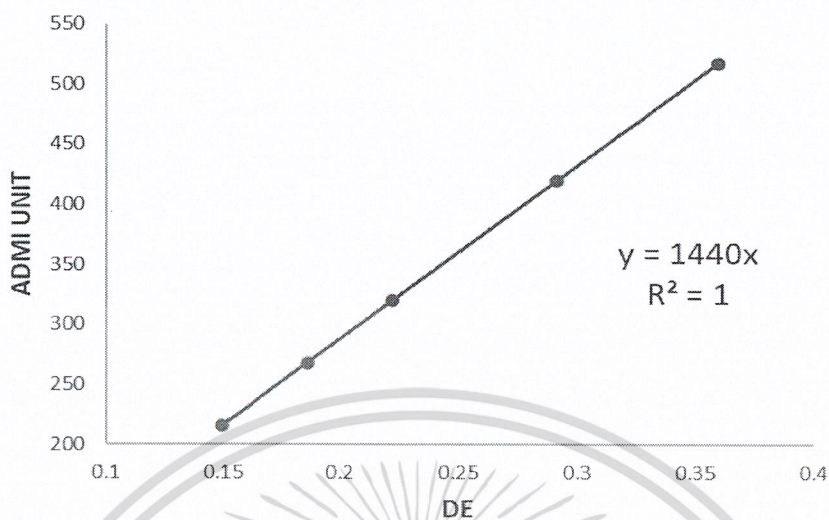
โดยที่

- F คือ Calibration factor ที่ได้จากความชันของการสร้างกราฟสารละลายสีมาตรฐาน
- DE คือ Intermediate value ของน้ำตัวอย่าง
- b คือ ความกว้างของเซลล์ (cm)

2. คำนวณ Calibration factor (F) จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ของค่าหน่วยสี ADMI กับค่า DE ของสารละลายสีมาตรฐาน จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \text{Slop} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta ADMI \text{ unit}}{\Delta DE}$$



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน

- นำค่า %T ที่วัดได้ของแต่ละความยาวคลื่นให้นำค่ามารวมกันในแต่ละแกน หลังจากนั้นคูณด้วย Factor ของแกนนั้น ๆ จะได้ค่าที่คุณ Factor ของแกน Xs, Ys และ Zs เป็นค่า Tristimulus

หมายเหตุ โดยค่า Tristimulus จะให้สัญลักษณ์ของตัวอย่างเป็น Xs, Ys, และ Zs ให้สัญลักษณ์ของสารมาตรฐานเป็น Xr, Yr และ Zr และให้สัญลักษณ์ของแบงค์ (น้ำกลั่น) เป็น Xc, Yc, Zc ซึ่งมีค่าเท่ากับ 98.06, 100.00 และ 118.14 ตามลำดับ

- นำค่า Tristimulus X, Y และ Z ไปแปลงเป็นค่าของ Munsell เป็น Vx, Vy และ Vz จากตาราง Munsell Value (ตารางที่ ก.2-ก.4) จะได้เป็น Vxs, Vys, Vzs, Vxr, Vyr, Vzr, Vxc, Vyc และ Vz
- นำค่า Munsell ที่ได้ไปหาค่า DE ของน้ำตัวอย่างจากสมการของ

$$DE = [(0.23\Delta Vy)^2 + (\Delta(Vx - Vy))^2 + (0.4\Delta(Vy - Vz))^2]^{1/2}$$

โดยที่

$$\Delta Vy = Vyc - Vys$$

$$\Delta(Vx - Vy) = (Vxc - Vyc) - (Vxs - Vys)$$

$$\Delta(Vy - Vz) = (Vyc - Vzc) - (Vys - Vzs)$$

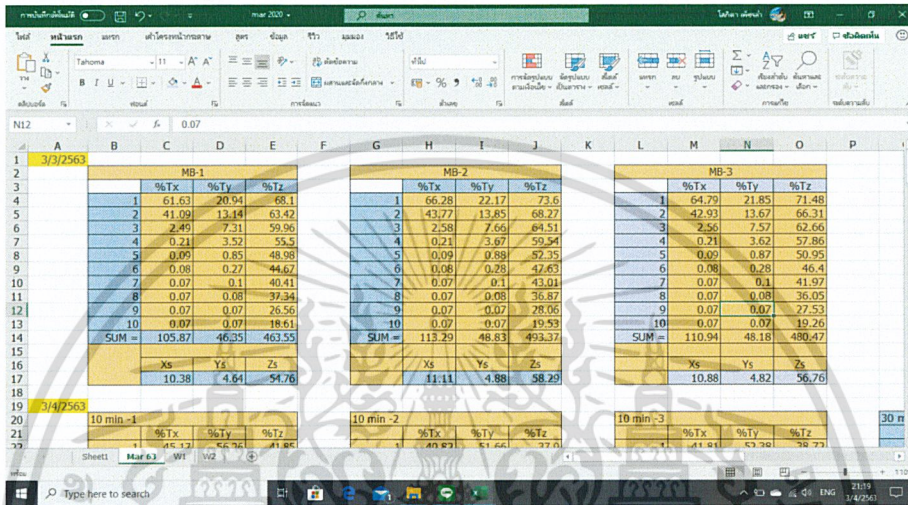
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หมายเหตุ ค่า DE ของสารมาตรฐานให้เปลี่ยนค่า Munsell ของน้ำตัวอย่างเป็นสารมาตรฐาน

6. นำไปคำนวณหาค่าหน่วยสีจากสมการ

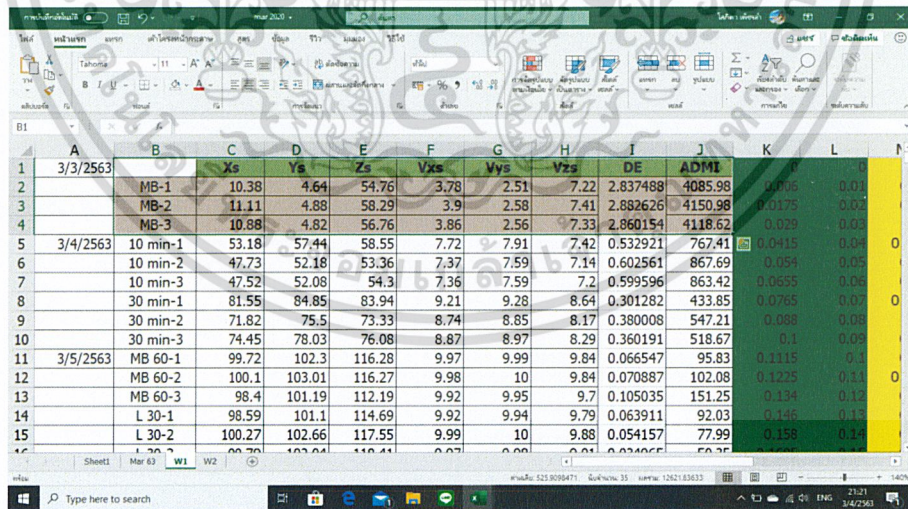
- ในกรณีที่ใช้โปรแกรมช่วยในการคำนวณค่า ADMI

เพื่อสะดวกในการคำนวณจะใช้โปรแกรม Microsoft Excel (เจตนิพิฐ, 2552) ดำเนินการโดยคอมพิวเตอร์ตามขั้นตอนดังนี้

1. เข้าโปรแกรมบนหน้าจอ กรอก %T ที่วัดได้จากเครื่อง UV vis spectrophotometer



2. นำค่า Xs, Ys และ Zs มาใส่ในไฟล์คำนวณ (W1) จะได้ค่าความเข้มสีในหน่วย ADMI



$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี (\%)} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยที่สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (FDA) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง C_0 คือ ความเข้มสีเริ่มต้น (ADMI unit) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และ C_t คือ ความเข้มสีที่ถูกกำจัดในเวลาต่าง ๆ (ADMI unit) สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 Munsell Value V_x as a Function of CIE Tristimulus Value (luminance factor) X (from Judd and Wyszecki, 1975)

V_x	X	V_x	X	V_x	X	V_x	X	V_x	X	V_x	X	V_x	X	V_x	X	V_x	X	V_x	X
10.00	100.56																		
9.99	100.30	8.99	76.91	7.99	57.77	6.99	42.08	5.99	29.35	4.99	19.29	3.99	11.701	2.99	6.383	1.99	3.039	0.99	1.173
8	100.04	8	76.70	8	57.59	8	41.93	8	29.24	8	19.21	8	11.637	8	6.341	8	3.015	8	1.159
7	99.79	7	76.49	7	57.42	7	41.79	7	29.13	7	19.12	7	11.574	7	6.299	7	2.990	7	1.145
6	99.53	6	76.28	6	57.25	6	41.65	6	29.01	6	19.03	6	11.510	6	6.257	6	2.966	6	1.131
5	99.27	5	76.07	5	57.08	5	41.51	5	28.90	5	18.94	5	11.446	5	6.215	5	2.941	5	1.119
9.94	99.01	8.94	75.86	7.94	56.91	6.94	41.37	5.94	28.79	4.94	18.85	3.94	11.383	2.94	6.173	1.94	2.917	0.94	1.106
3	98.76	3	75.65	3	56.74	3	41.24	3	28.68	3	18.77	3	11.321	3	6.131	3	2.892	3	1.092
2	98.50	2	75.44	2	56.56	2	41.10	2	28.56	2	18.69	2	11.258	2	6.090	2	2.868	2	1.079
1	98.25	1	75.24	1	56.39	1	40.95	1	28.45	1	18.60	1	11.195	1	6.049	1	2.844	1	1.066
0	97.99	0	75.03	0	56.22	0	40.81	0	28.34	0	18.51	0	11.133	0	6.008	0	2.821	0	1.053
9.89	97.74	8.89	74.82	7.89	56.05	6.89	40.68	5.89	28.23	4.89	18.42	3.89	11.071	2.89	5.967	1.89	2.797	0.89	1.039
8	97.49	8	74.62	8	55.88	8	40.54	8	28.12	8	18.34	8	11.009	8	5.926	8	2.774	8	1.026
7	97.24	7	74.41	7	55.72	7	40.40	7	28.01	7	18.26	7	10.947	7	5.885	7	2.750	7	1.014
6	96.98	6	74.21	6	55.55	6	40.27	6	27.89	6	18.17	6	10.886	6	5.845	6	2.727	6	1.001
5	96.73	5	74.00	5	55.38	5	40.13	5	27.78	5	18.08	5	10.826	5	5.805	5	2.704	5	0.988
9.84	96.48	8.84	73.80	7.84	55.21	6.84	39.99	5.84	27.68	4.84	18.00	3.84	10.765	2.84	5.766	1.84	2.681	0.84	0.976
3	96.23	3	73.59	3	55.04	3	39.85	3	27.57	3	17.91	3	10.704	3	5.726	3	2.658	3	0.963
2	95.98	2	73.38	2	54.87	2	39.72	2	27.46	2	17.83	2	10.643	2	5.686	2	2.635	2	0.950
1	95.73	1	73.18	1	54.71	1	39.58	1	27.35	1	17.75	1	10.583	1	5.647	1	2.613	1	0.937
0	95.48	0	72.98	0	54.54	0	39.44	0	27.24	0	17.67	0	10.524	0	5.608	0	2.590	0	0.925
9.79	95.23	8.79	72.78	7.79	54.37	6.79	39.30	5.79	27.13	4.79	17.58	3.79	10.464	2.79	5.569	1.79	2.568	0.79	0.913

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X
8	94.98	8	72.57	8	54.21	8	39.17	8	27.02	8	17.50	8	10.404	8	5.530	8	2.547	8	0.900
7	94.74	7	72.37	7	54.04	7	39.04	7	26.91	7	17.41	7	10.344	7	5.492	7	2.525	7	0.888
6	94.49	6	72.17	6	53.87	6	38.90	6	26.80	6	17.33	6	10.285	6	5.454	6	2.503	6	0.876
5	94.25	5	71.96	5	53.71	5	38.77	5	26.70	5	17.25	5	10.227	5	5.416	5	2.481	5	0.864
9.74	94.00	8.74	71.76	7.74	53.55	6.74	38.63	5.74	26.59	4.74	17.17	3.74	10.168	2.74	5.378	1.74	2.460	0.74	0.851
3	93.76	3	71.56	3	53.38	3	38.50	3	26.49	3	17.09	3	10.109	3	5.340	3	2.438	3	0.839
2	93.51	2	71.36	2	53.22	2	38.36	2	26.38	2	17.00	2	10.051	2	5.302	2	2.417	2	0.827
1	93.27	1	71.16	1	53.05	1	38.23	1	26.27	1	16.92	1	9.993	1	5.265	1	2.395	1	0.815
0	93.02	0	70.96	0	52.89	0	38.10	0	26.17	0	16.84	0	9.935	0	5.228	0	2.375	0	0.803
9.69	92.78	8.69	70.77	7.69	52.73	6.69	37.96	5.69	26.06	4.69	16.76	3.69	9.878	2.69	5.191	1.69	2.354	0.69	0.791
8	92.53	8	70.57	8	52.56	8	37.83	8	25.96	8	16.68	8	9.821	8	5.154	8	2.333	8	0.779
7	92.29	7	70.37	7	52.40	7	37.70	7	25.85	7	16.60	7	9.764	7	5.118	7	2.313	7	0.768
6	92.05	6	70.17	6	52.24	6	37.57	6	25.75	6	16.52	6	9.707	6	5.081	6	2.292	6	0.756
5	91.81	5	69.97	5	52.08	85	37.43	5	25.64	5	16.44	5	9.650	5	5.045	5	2.272	5	0.744
9.64	91.57	8.64	69.78	7.64	51.91	6.64	37.30	5.64	25.54	4.64	16.36	3.64	9.593	2.64	5.009	1.64	2.251	0.64	0.732
3	91.33	3	69.58	3	51.75	3	37.17	3	25.43	3	16.28	3	9.537	3	4.973	3	2.231	3	0.721
2	91.09	2	69.38	2	51.59	2	37.04	2	25.33	2	16.21	2	9.482	2	4.937	2	2.212	2	0.709
1	90.85	1	69.19	1	51.43	1	36.91	1	25.23	1	16.13	1	9.426	1	4.902	1	2.192	1	0.697
0	90.61	0	68.99	0	51.27	0	36.78	0	25.12	0	16.05	0	9.370	0	4.867	0	2.173	0	0.685
9.59	90.37	8.59	68.80	7.59	51.11	6.59	36.65	5.59	25.02	4.59	15.97	3.59	9.315	2.59	4.831	1.59	2.153	0.59	0.674
8	90.13	8	68.60	8	50.95	8	36.52	8	24.91	8	15.89	8	9.260	8	4.796	8	2.133	8	0.662
7	89.89	7	68.41	7	50.79	7	36.39	7	24.81	7	15.81	7	9.205	7	4.762	7	2.114	7	0.650

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X
6	89.66	6	68.22	6	50.63	6	36.27	6	24.71	6	15.74	6	9.150	6	4.728	6	2.094	6	0.638
5	89.42	5	68.02	5	50.47	5	36.14	5	24.61	5	15.66	5	9.095	5	4.693	5	2.075	5	0.627
9.54	89.19	8.54	67.83	7.54	50.31	6.54	36.00	5.54	24.51	4.54	15.58	3.54	9.041	2.54	4.659	1.54	2.056	0.54	0.616
3	88.95	3	67.64	3	50.16	3	35.87	3	24.40	3	15.50	3	8.987	3	4.624	3	2.037	3	0.605
2	88.72	2	67.44	2	50.00	2	35.75	2	24.30	2	15.43	2	8.933	2	4.590	2	2.019	2	0.593
1	88.48	1	67.25	1	49.84	1	35.62	1	24.20	1	15.35	1	8.880	1	4.557	1	2.000	1	0.581
0	88.25	0	67.06	0	49.69	0	35.49	0	24.10	0	15.26	0	8.827	0	4.524	0	1.981	0	0.570
9.49	88.01	8.49	66.87	7.49	49.53	6.49	35.36	5.49	24.00	4.49	15.18	3.49	8.774	2.49	4.490	9.49	1.963	9.49	0.559
8	87.78	8	66.68	8	49.37	8	35.24	8	23.90	8	15.11	8	8.721	8	4.457	8	1.944	8	0.548
7	87.55	7	66.48	7	49.22	7	35.11	7	23.80	7	15.04	7	8.668	7	4.424	7	1.926	7	0.536
6	87.32	6	66.29	6	49.06	6	34.98	6	23.70	6	14.96	6	8.615	6	4.391	6	1.909	6	0.525
5	87.08	5	66.11	5	48.90	5	34.86	5	23.60	5	14.88	5	8.563	5	4.359	5	1.891	5	0.514
9.44	86.85	8.44	65.92	7.44	48.75	6.44	34.74	5.44	23.50	4.44	14.81	3.44	8.511	2.44	4.327	1.44	1.873	0.44	0.503
3	86.62	3	65.73	3	48.59	3	34.61	3	23.40	3	14.74	3	8.459	3	4.294	3	1.855	3	0.491
2	86.39	2	65.54	2	48.44	2	34.48	2	23.30	2	14.67	2	8.407	2	4.261	2	1.837	2	0.479
1	86.16	1	65.35	1	48.29	1	34.35	1	23.21	1	14.59	1	8.356	1	4.229	1	1.820	1	0.468
0	85.93	0	65.16	0	48.13	0	34.23	0	23.11	0	14.52	0	8.305	0	4.198	0	1.802	0	0.458
9.39	85.70	8.39	64.97	7.39	47.97	6.39	34.11	5.39	23.01	4.39	14.44	3.39	8.254	2.39	4.167	1.39	1.785	0.39	0.446
8	85.47	8	64.79	8	47.82	8	33.98	8	22.91	8	14.37	8	8.203	8	4.135	8	1.768	8	0.435
7	85.25	7	64.60	7	47.67	7	33.86	7	22.81	7	14.29	7	8.153	7	4.104	7	1.751	7	0.424
6	85.02	6	64.41	6	47.52	6	33.74	6	22.72	6	14.22	6	8.102	6	4.073	6	1.734	6	0.413
5	84.79	5	64.23	5	47.36	5	33.61	5	22.62	5	14.15	5	8.052	5	4.042	5	1.718	5	0.401

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X
9.34	84.56	8.34	64.04	7.34	47.21	6.34	33.49	5.34	22.52	4.34	14.08	3.34	8.002	2.34	4.011	1.34	1.701	0.34	0.390
3	84.33	3	63.85	3	47.06	3	33.36	3	22.42	3	14.00	3	7.952	3	3.980	3	1.684	3	0.378
2	84.10	2	63.67	2	46.91	2	33.24	2	22.33	2	13.93	2	7.902	2	3.950	2	1.668	2	0.367
1	83.88	1	63.49	1	46.76	1	33.12	1	22.24	1	13.86	1	7.853	1	3.920	1	1.651	1	0.356
0	83.66	0	63.31	0	46.61	0	33.00	0	22.14	0	13.79	0	7.804	0	3.890	0	1.634	0	0.345
9.29	83.44	8.29	63.12	7.29	46.45	6.29	32.88	5.29	22.04	4.29	13.72	3.29	7.755	2.29	3.860	1.29	1.618	0.29	0.334
8	83.22	8	62.93	8	46.30	8	32.76	8	21.94	8	13.65	8	7.706	8	3.830	8	1.602	8	0.323
7	82.99	7	62.75	7	46.15	7	32.64	7	21.85	7	13.58	7	7.658	7	3.801	7	1.586	7	0.312
6	82.77	6	62.57	6	46.00	6	32.51	6	21.76	6	13.51	6	7.610	6	3.772	6	1.570	6	0.300
5	82.54	5	62.38	5	45.85	5	32.39	5	21.66	5	13.43	5	7.562	5	3.742	5	1.554	5	0.289
9.24	82.32	8.24	62.20	7.24	45.71	6.24	32.28	5.24	21.57	4.24	13.36	3.24	7.514	2.24	3.713	1.24	1.538	0.24	0.277
3	82.10	3	62.02	3	45.56	3	32.16	3	21.47	3	13.29	3	7.466	3	3.684	3	1.523	3	0.266
2	81.88	2	61.84	2	45.41	2	32.03	2	21.38	2	13.23	2	7.419	2	3.656	2	1.507	2	0.255
1	81.66	1	61.66	1	45.27	1	31.91	1	21.29	1	13.16	1	7.372	1	3.628	1	1.491	1	0.243
0	81.44	0	61.48	0	45.12	0	31.79	0	21.20	0	13.09	0	7.325	0	3.599	0	1.476	0	0.232
9.19	81.22	8.19	61.30	7.19	44.97	6.19	31.68	5.19	21.10	4.19	13.02	3.19	7.278	2.19	3.571	1.19	1.461	0.19	0.221
8	81.00	8	61.12	8	44.82	8	31.56	8	21.21	8	12.95	8	7.231	8	3.542	8	1.446	8	0.210
7	80.78	7	60.94	7	44.68	7	31.44	7	20.91	7	12.88	7	7.184	7	3.514	7	1.430	7	0.198
6	80.56	6	60.76	6	44.53	6	31.32	6	20.82	6	12.81	6	7.138	6	3.487	6	1.416	6	0.187
5	80.34	5	60.58	5	44.38	5	31.21	5	20.73	5	12.75	5	7.092	5	3.460	5	1.401	5	0.175
9.14	80.12	8.14	60.40	7.14	44.24	6.14	31.09	5.14	20.64	4.14	12.68	3.14	7.046	2.14	3.432	1.14	1.385	0.14	0.164
3	79.90	3	60.23	3	44.09	3	30.97	3	20.55	3	12.61	3	7.000	3	3.405	3	1.370	3	0.152

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X
2	79.69	2	60.05	2	43.94	2	30.85	2	20.45	2	12.55	2	6.955	2	3.378	2	1.356	2	0.140
1	79.47	1	59.87	1	43.79	1	30.74	1	20.36	1	12.48	1	6.910	1	3.351	1	1.341	1	0.128
0	79.26	0	59.69	0	43.65	0	30.62	0	20.27	0	12.41	0	6.865	0	3.325	0	1.327	0	0.117
9.09	79.04	8.09	59.51	7.09	43.51	6.09	30.50	5.09	20.18	4.09	12.34	3.09	6.820	2.09	3.298	1.09	1.313	0.09	0.106
8	78.82	8	59.34	8	43.36	8	30.38	8	20.09	8	12.28	8	6.776	8	3.272	8	1.298	8	0.094
7	78.61	7	59.17	7	43.22	7	30.27	7	20.00	7	12.22	7	6.731	7	3.245	7	1.284	7	0.082
6	78.40	6	58.99	6	43.08	6	30.15	6	19.91	6	12.15	6	6.687	6	3.219	6	1.270	6	0.071
5	78.19	5	58.81	5	42.93	5	30.04	5	19.82	5	12.08	5	6.643	5	3.192	5	1.256	5	0.060
9.04	77.97	8.04	58.64	7.04	42.79	6.04	29.92	5.04	19.74	4.04	12.02	3.04	6.599	2.04	3.166	1.04	1.242	0.04	0.048
3	77.76	3	58.46	3	42.65	3	29.80	3	19.65	3	11.95	3	6.556	3	3.141	3	1.228	3	0.035
2	77.55	2	58.29	2	42.50	2	29.69	2	19.56	2	11.88	2	6.513	2	3.116	2	1.214	2	0.023
1	77.33	1	58.12	1	42.36	1	29.58	1	19.47	1	11.82	1	6.470	1	3.090	1	1.200	1	0.012
0	77.12	0	57.94	0	42.22	0	29.46	0	19.38	0	11.76	0	6.427	0	3.064	0	1.186	0	0.000

ตารางที่ ก.3 Munsell Value V_y as a Function of CIE Tristimulus Value (luminance factor) Y (from Judd and Wyszecki, 1975)

V_y	Y	V_y	Y	V_y	Y	V_y	Y	V_y	Y	V_y	Y	V_y	Y	V_y	Y	V_y	Y	V_y	Y
10.00	102.57																		
9.99	102.30	8.99	78.45	7.99	58.92	6.99	42.92	5.99	29.94	4.99	19.68	3.99	11.935	2.99	6.551	1.99	3.100	0.99	1.196
8	102.04	8	78.23	8	58.74	8	42.77	8	29.82	8	19.59	8	11.870	8	6.468	8	3.075	8	1.182
7	101.78	7	78.02	7	58.57	7	42.63	7	29.71	7	19.50	7	11.805	7	6.425	7	3.050	7	1.168
6	101.52	6	77.80	6	58.39	6	42.49	6	29.59	6	19.41	6	11.740	6	6.382	6	3.025	6	1.154
5	101.25	5	77.59	5	58.22	5	42.34	5	29.48	5	19.32	5	11.675	5	6.339	5	3.000	5	1.141
9.94	100.99	8.94	77.38	7.94	58.04	6.94	42.20	5.94	29.36	4.94	19.23	3.94	11.611	2.94	6.296	1.94	2.975	0.94	1.128
3	100.73	3	77.16	3	57.87	3	42.06	3	29.25	3	19.14	3	11.547	3	6.254	3	2.950	3	1.114
2	100.47	2	76.95	2	57.69	2	41.92	2	29.13	2	19.06	2	11.483	2	6.212	2	2.925	2	1.101
1	100.21	1	76.74	1	57.52	1	41.77	1	29.02	1	18.97	1	11.419	1	6.170	1	2.901	1	1.087
0	99.95	0	76.53	0	57.35	0	41.63	0	28.90	0	18.88	0	11.356	0	6.128	0	2.877	0	1.074
9.89	99.69	8.89	76.32	7.89	57.17	6.89	41.49	5.89	28.79	4.89	18.79	3.89	11.292	2.89	6.086	1.89	2.853	0.89	1.060
8	99.44	8	76.11	8	57.00	8	41.35	8	28.68	8	18.70	8	11.229	8	6.045	8	2.829	8	1.047
7	99.18	7	75.90	7	56.83	7	41.21	7	28.57	7	18.62	7	11.167	7	6.003	7	2.805	7	1.034
6	98.92	6	75.69	6	56.66	6	41.07	6	28.45	6	18.53	6	11.104	6	5.962	6	2.781	6	1.021
5	98.66	5	75.48	5	56.48	5	40.93	5	28.34	5	18.44	5	11.042	5	5.921	5	2.758	5	1.008
9.84	98.41	8.84	75.27	7.84	56.31	6.84	40.79	5.84	28.23	4.84	18.36	3.84	10.980	2.84	5.881	1.84	2.735	0.84	0.995
3	98.15	3	75.06	3	56.14	3	40.65	3	28.12	3	18.27	3	10.918	3	5.841	3	2.712	3	0.982
2	97.90	2	74.85	2	55.97	2	40.51	2	28.01	2	18.19	2	10.856	2	5.800	2	2.688	2	0.969
1	97.64	1	74.64	1	55.80	1	40.37	1	27.90	1	18.10	1	10.795	1	5.760	1	2.665	1	0.956

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y
0	97.39	0	74.44	0	55.63	0	40.23	0	27.78	0	18.02	0	10.734	0	5.720	0	2.642	0	0.943
9.79	97.14	8.79	74.23	7.79	55.46	6.79	40.09	5.79	27.67	4.79	17.93	3.79	10.673	2.79	5.680	1.79	2.620	0.79	0.931
8	96.88	8	74.02	8	55.29	8	39.95	8	27.56	8	17.85	8	10.612	8	5.641	8	2.598	8	0.918
7	96.63	7	73.82	7	55.12	7	39.82	7	27.45	7	17.76	7	10.551	7	5.602	7	2.575	7	0.906
6	96.38	6	73.61	6	54.95	6	39.68	6	27.34	6	17.68	6	10.491	6	5.563	6	2.553	6	0.893
5	96.13	5	73.40	5	54.78	5	39.54	5	27.23	5	17.60	5	10.431	5	5.524	5	2.531	5	0.881
9.74	95.88	8.74	73.20	7.74	54.62	6.74	39.40	5.74	27.12	4.74	17.51	3.74	10.371	2.74	5.485	1.74	2.509	0.74	0.868
3	95.63	3	72.99	3	54.45	3	39.27	3	27.02	3	17.43	3	10.311	3	5.447	3	2.487	3	0.856
2	95.38	2	72.79	2	54.28	2	39.13	2	26.91	2	17.34	2	10.252	2	5.408	2	2.465	2	0.844
1	95.13	1	72.59	1	54.11	1	39.00	1	26.80	1	17.26	1	10.193	1	5.370	1	2.443	1	0.832
0	94.88	0	72.39	0	53.94	0	38.86	0	26.69	0	17.18	0	10.134	0	5.332	0	2.422	0	0.819
9.69	94.63	8.69	72.18	7.69	53.78	6.69	38.72	5.69	26.58	4.69	17.10	3.69	10.075	2.69	5.295	1.69	2.401	0.69	0.807
8	94.38	8	71.98	8	53.61	8	38.59	8	26.48	8	17.02	8	10.017	8	5.257	8	2.380	8	0.795
7	94.14	7	71.78	7	53.45	7	38.45	7	26.37	7	16.93	7	9.959	7	5.220	7	2.359	7	0.783
6	93.89	6	71.57	6	53.28	6	38.32	6	26.26	6	16.85	6	9.901	6	5.183	6	2.338	6	0.771
5	93.64	5	71.37	5	53.12	5	38.18	5	26.15	5	16.77	5	9.843	5	5.146	5	2.317	5	0.759
9.64	93.40	8.64	71.17	7.64	52.95	6.64	38.05	5.64	26.05	4.64	16.69	3.64	9.785	2.64	5.109	1.64	2.296	0.64	0.747
3	93.15	3	70.97	3	52.79	3	37.92	3	25.94	3	16.61	3	9.728	3	5.072	3	2.276	3	0.735
2	92.91	2	70.77	2	52.62	2	37.78	2	25.84	2	16.53	2	9.671	2	5.036	2	2.256	2	0.723
1	92.66	1	70.57	1	52.46	1	37.65	1	25.73	1	16.45	1	9.614	1	5.000	1	2.236	1	0.711
0	92.42	0	70.37	0	52.30	0	37.52	0	25.62	0	16.37	0	9.557	0	4.964	0	2.216	0	0.699
9.59	92.18	8.59	70.10	7.59	52.12	6.59	37.38	5.59	25.52	4.59	16.29	3.59	9.501	2.59	4.928	1.59	2.196	0.59	0.687

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y
8	91.93	8	69.97	8	51.97	8	37.25	8	25.41	8	16.21	8	9.445	8	4.892	8	2.176	8	0.875
7	91.69	7	69.78	7	51.81	7	37.12	7	25.31	7	16.13	7	9.389	7	4.857	7	2.156	7	0.663
6	91.45	6	69.58	6	51.64	6	36.99	6	25.20	6	16.05	6	9.333	6	4.822	6	2.136	6	0.651
5	91.21	5	69.38	5	51.48	5	36.86	5	25.10	5	15.97	5	9.277	5	4.787	5	2.116	5	0.640
9.54	90.97	8.54	69.18	7.54	51.32	6.54	36.72	5.54	25.00	4.54	15.89	3.54	9.222	2.54	4.752	1.54	2.097	0.54	0.628
3	90.73	3	68.99	3	51.16	3	36.59	3	24.89	3	15.81	3	9.167	3	4.717	3	2.078	3	0.617
2	90.49	2	68.79	2	51.00	2	36.46	2	24.79	2	15.74	2	9.112	2	4.682	2	2.059	2	0.601
1	90.25	1	68.59	1	50.84	1	36.33	1	24.69	1	15.66	1	9.058	1	4.648	1	2.040	1	0.593
0	90.01	0	68.40	0	50.68	0	36.20	0	24.58	0	15.57	0	9.003	0	4.614	0	2.021	0	0.581
9.49	89.77	8.49	68.20	7.49	50.52	6.49	36.07	5.49	24.48	4.49	15.49	3.49	8.949	2.49	4.580	1.49	2.002	0.49	0.570
8	89.53	8	68.01	8	50.36	8	35.94	8	24.38	8	15.42	8	8.895	8	4.546	8	1.983	8	0.559
7	89.30	7	67.81	7	50.20	7	35.81	7	24.28	7	15.34	7	8.841	7	4.512	7	1.965	7	0.547
6	89.06	6	67.62	6	50.04	6	35.68	6	24.17	6	15.26	6	8.787	6	4.479	6	1.947	6	0.535
5	88.82	5	67.43	5	49.88	5	35.56	5	24.07	5	15.18	5	8.734	5	4.446	5	1.929	5	0.524
9.44	88.59	8.44	67.23	7.44	49.72	6.44	35.43	5.44	23.97	4.44	15.11	3.44	8.681	2.44	4.413	1.44	1.910	0.44	0.513
3	88.35	3	67.04	3	49.56	3	35.30	3	23.87	3	15.03	3	8.628	3	4.380	3	1.892	3	0.501
2	88.12	2	66.85	2	49.41	2	35.17	2	23.77	2	14.96	2	8.575	2	4.347	2	1.874	2	0.489
1	87.88	1	66.66	1	49.25	1	35.04	1	23.67	1	14.88	1	8.523	1	4.314	1	1.856	1	0.478
0	87.65	0	66.46	0	49.09	0	34.92	0	23.57	0	14.81	0	8.471	0	4.282	0	1.838	0	0.467
9.39	87.41	8.39	66.27	7.39	48.93	6.39	34.79	5.39	23.47	4.39	14.73	3.39	8.419	2.39	4.250	1.39	1.821	0.39	0.455
8	87.18	8	66.08	8	48.78	8	34.66	8	23.37	8	14.66	8	8.367	8	4.218	8	1.803	8	0.444
7	86.95	7	65.89	7	48.62	7	34.54	7	23.27	7	14.58	7	8.316	7	4.186	7	1.786	7	0.432

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y
6	86.72	6	65.70	6	48.47	6	34.41	6	23.17	6	14.51	6	8.264	6	4.154	6	1.769	6	0.421
5	86.48	5	65.51	5	48.31	5	34.28	5	23.07	5	14.43	5	8.213	5	4.123	5	1.752	5	0.409
9.34	86.25	8.34	65.32	7.34	48.16	6.34	34.16	5.34	22.97	4.34	14.36	3.34	8.162	2.34	4.092	1.34	1.735	0.34	0.398
3	86.02	3	65.13	3	48.00	3	34.03	3	22.87	3	14.28	3	8.111	3	4.060	3	1.718	3	0.386
2	85.79	2	64.94	2	47.85	2	33.91	2	22.78	2	14.21	2	8.060	2	4.029	2	1.701	2	0.375
1	85.56	1	64.76	1	47.69	1	33.78	1	22.68	1	14.14	1	8.010	1	3.998	1	1.684	1	0.363
0	85.33	0	64.57	0	47.54	0	33.66	0	22.58	0	14.07	0	7.960	0	3.968	0	1.667	0	0.352
9.29	85.10	8.29	64.38	7.29	47.38	6.29	33.54	5.29	22.48	4.29	13.99	3.29	7.910	2.29	3.938	1.29	1.650	0.29	0.341
8	84.88	8	64.19	8	47.23	8	33.41	8	22.38	8	13.92	8	7.860	8	3.907	8	1.634	8	0.329
7	84.65	7	64.01	7	47.08	7	33.29	7	22.29	7	13.85	7	7.811	7	3.877	7	1.618	7	0.318
6	84.42	6	63.82	6	46.92	6	33.16	6	22.19	6	13.78	6	7.762	6	3.847	6	1.601	6	0.306
5	84.19	5	63.63	5	46.77	5	33.04	5	22.09	5	13.70	5	7.713	5	3.817	5	1.585	5	0.295
9.24	83.97	8.24	63.45	7.24	46.62	6.24	32.92	5.24	22.00	4.24	13.63	3.24	7.664	2.24	3.787	1.24	1.569	0.24	0.283
3	83.74	3	63.26	3	46.47	3	32.80	3	21.90	3	13.56	3	7.615	3	3.758	3	1.553	3	0.272
2	83.52	2	63.08	2	46.32	2	32.67	2	21.81	2	13.49	2	7.567	2	3.729	2	1.537	2	0.260
1	83.29	1	62.89	1	45.17	1	32.55	1	21.71	1	13.42	1	7.519	1	3.700	1	1.521	1	0.248
0	83.07	0	62.71	0	45.02	0	32.43	0	21.62	0	13.35	0	7.471	0	3.671	0	1.506	0	0.237
9.19	82.84	8.19	62.52	7.19	45.87	6.19	32.31	5.19	21.52	4.19	13.28	3.19	7.423	2.19	3.642	1.19	1.490	0.19	0.225
8	82.62	8	62.34	8	45.72	8	32.19	8	21.43	8	13.21	8	7.375	8	3.613	8	1.475	8	0.214
7	82.39	7	62.16	7	45.57	7	32.07	7	21.33	7	13.14	7	7.328	7	3.585	7	1.459	7	0.202
6	82.17	6	61.98	6	45.42	6	31.95	6	21.24	6	13.07	6	7.281	6	3.557	6	1.444	6	0.191
5	81.95	5	61.79	5	45.27	5	31.83	5	21.14	5	13.00	5	7.234	5	3.529	5	1.429	5	0.179

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y
9.14	81.73	8.14	61.61	7.14	45.12	6.14	31.71	5.14	21.05	4.14	12.93	3.14	7.187	2.14	3.501	1.14	1.413	0.14	0.167
3	81.50	3	61.43	3	44.97	3	31.59	3	20.96	3	12.86	3	7.140	3	3.473	3	1.398	3	0.155
2	81.28	2	61.25	2	44.82	2	31.47	2	20.86	2	12.80	2	7.094	2	3.445	2	1.383	2	0.143
1	81.06	1	61.07	1	44.67	1	31.35	1	20.77	1	12.73	1	7.048	1	3.418	1	1.368	1	0.131
0	80.84	0	60.88	0	44.52	0	31.23	0	20.68	0	12.66	0	7.002	0	3.391	0	1.354	0	0.120
9.09	80.62	8.09	60.70	7.09	44.38	6.09	31.11	5.09	20.59	4.09	12.59	3.09	6.956	2.09	3.364	1.09	1.339	0.09	0.108
8	80.40	8	60.52	8	44.23	8	30.99	8	20.49	8	12.52	8	6.911	8	3.337	8	1.324	8	0.096
7	80.18	7	60.35	7	44.08	7	30.87	7	20.40	7	12.46	7	6.866	7	3.310	7	1.310	7	0.084
6	79.97	6	60.17	6	43.94	6	30.75	6	20.31	6	12.39	6	6.821	6	3.283	6	1.295	6	0.073
5	79.75	5	59.99	5	43.79	5	30.64	5	20.22	5	12.32	5	6.776	5	3.256	5	1.281	5	0.061
9.04	79.53	8.04	59.81	7.04	43.64	6.04	30.52	5.04	20.13	4.04	12.26	3.04	6.731	2.04	3.230	1.04	1.267	0.04	0.049
3	79.31	3	59.63	3	43.50	3	30.40	3	20.04	3	12.19	3	6.687	3	3.204	3	1.253	3	0.036
2	79.10	2	59.45	2	43.35	2	30.28	2	19.95	2	12.12	2	6.643	2	3.178	2	1.238	2	0.024
1	78.88	1	59.28	1	43.21	1	30.17	1	19.86	1	12.06	1	6.599	1	3.152	1	1.224	1	0.012
0	78.66	0	59.10	0	43.06	0	30.05	0	19.77	0	12.00	0	6.555	0	3.126	0	1.210	0	0.000

ตารางที่ ก.4 Munsell Value Vz as a Function of CIE Tristimulus Value (luminance factor) Z (from Judd and Wyszecki, 1975)

Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z
10.00	121.14																		
9.99	120.82	8.99	92.65	7.99	69.59	6.99	50.69	5.99	35.36	4.99	23.24	3.99	14.096	2.99	7.690	1.99	3.661	0.99	1.1413
8	120.51	8	92.39	8	69.38	8	50.52	8	35.22	8	23.14	8	14.019	8	7.639	8	3.631	8	1.396
7	120.21	7	92.14	7	69.17	7	50.35	7	35.09	7	23.03	7	13.942	7	7.588	7	3.602	7	1.379
6	119.90	6	91.89	6	68.96	6	50.18	6	34.95	6	22.92	6	13.865	6	7.537	6	3.573	6	1.363
5	119.58	5	91.64	5	68.76	5	50.01	5	34.82	5	22.82	5	13.789	5	7.487	5	3.543	5	1.348
9.94	119.27	8.94	91.39	7.94	68.55	6.94	49.84	5.94	34.68	4.94	22.71	3.94	13.713	2.94	7.436	1.94	3.514	0.94	1.332
3	118.97	3	91.13	3	68.35	3	49.67	3	34.55	3	22.60	3	13.637	3	7.386	3	3.484	3	1.316
2	118.66	2	90.88	2	68.14	2	49.50	2	34.41	2	22.50	2	13.562	2	7.337	2	3.455	2	1.300
1	118.35	1	90.63	1	67.93	1	49.33	1	34.27	1	22.40	1	13.486	1	7.287	1	3.426	1	1.284
0	118.04	0	90.38	0	67.73	0	49.17	0	34.13	0	22.30	0	13.412	0	7.237	0	3.398	0	1.268
9.89	117.74	8.89	90.14	7.89	67.52	6.89	49.00	5.89	34.00	4.89	22.19	3.89	13.336	2.89	7.188	1.89	3.369	0.89	1.252
8	117.44	8	89.89	8	67.32	8	48.84	8	33.87	8	22.09	8	13.262	8	7.139	8	3.341	8	1.237
7	117.13	7	89.64	7	67.12	7	48.67	7	33.74	7	21.99	7	13.188	7	7.090	7	3.312	7	1.221
6	116.83	6	89.39	6	66.92	6	48.50	6	33.60	6	21.88	6	13.114	6	7.041	6	3.284	6	1.206
5	116.52	5	89.14	5	66.71	5	48.34	5	33.47	5	21.78	5	13.041	5	6.993	5	3.257	5	1.190
9.84	116.22	8.84	88.90	7.84	66.50	6.84	48.17	5.84	33.34	4.84	21.68	3.84	12.968	2.84	6.946	1.84	3.230	0.84	1.175
3	115.92	3	88.65	3	66.30	3	48.01	3	33.21	3	21.58	3	12.894	3	6.898	3	3.203	3	1.160
2	115.62	2	88.40	2	66.10	2	47.84	2	33.08	2	21.48	2	12.821	2	6.850	2	3.175	2	1.144
1	115.32	1	88.15	1	65.90	1	47.68	1	32.95	1	21.38	1	12.749	1	6.803	1	3.147	1	1.129
0	115.02	0	87.91	0	65.70	0	47.51	0	32.81	0	21.28	0	12.677	0	6.755	0	3.120	0	1.114
9.79	114.72	8.79	87.67	7.79	65.50	6.79	47.35	5.79	32.68	4.79	21.18	3.79	12.605	2.79	6.708	1.79	3.094	0.79	1.099

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z
8	114.42	8	87.42	8	65.30	8	47.19	8	32.55	8	21.08	8	12.533	8	6.662	8	3.068	8	1.084
7	114.12	7	87.18	7	65.10	7	47.03	7	32.42	7	20.98	7	12.461	7	6.616	7	3.041	7	1.070
6	113.83	6	86.94	6	64.90	6	46.86	6	32.29	6	20.88	6	12.390	6	6.570	6	3.015	6	1.055
5	113.53	5	86.69	5	64.70	5	46.70	5	32.16	5	20.78	5	12.319	5	6.524	5	2.989	5	1.040
9.74	113.24	8.74	86.45	7.74	64.51	6.74	46.54	5.74	32.03	4.74	20.68	3.74	12.248	2.74	6.478	1.74	2.963	0.74	1.025
3	112.94	3	86.21	3	64.31	3	46.38	3	31.91	3	20.58	3	12.178	3	6.433	3	2.937	3	1.011
2	112.65	2	85.97	2	64.11	2	46.21	2	31.78	2	20.48	2	12.108	2	6.387	2	2.911	2	0.997
1	112.35	1	85.73	1	63.91	1	46.05	1	31.65	1	20.38	1	12.038	1	6.342	1	2.885	1	0.982
0	112.06	0	85.49	0	63.71	0	45.89	0	31.52	0	20.29	0	11.969	0	6.297	0	2.860	0	0.967
9.69	111.76	8.69	85.25	7.69	63.51	6.69	45.73	5.69	31.39	4.69	20.20	3.69	11.899	2.69	6.253	1.69	2.836	0.69	0.953
8	111.47	8	85.01	8	63.32	8	45.57	8	31.27	8	20.10	8	11.830	8	6.209	8	2.811	8	0.939
7	111.18	7	84.77	7	63.13	7	45.41	7	31.14	7	20.00	7	11.762	7	6.165	7	2.786	7	0.925
6	110.89	6	84.53	6	62.93	6	45.25	6	31.01	6	19.90	6	11.693	6	6.121	6	2.761	6	0.911
5	110.59	5	84.29	5	62.74	5	45.09	5	30.88	5	19.81	5	11.624	5	6.078	5	2.736	5	0.896
9.64	110.30	8.64	84.05	7.64	62.54	6.64	44.94	5.64	30.76	4.64	19.71	3.64	11.556	2.64	6.034	1.64	2.712	0.64	0.882
3	110.01	3	83.82	3	62.35	3	44.78	3	30.64	3	19.62	3	11.489	3	5.990	3	2.688	3	0.868
2	109.72	2	83.58	2	62.15	2	44.62	2	30.52	2	19.52	2	11.422	2	5.947	2	2.664	2	0.854
1	109.43	1	83.35	1	61.96	1	44.47	1	30.39	1	19.43	1	11.354	1	5.905	1	2.641	1	0.840
0	109.15	0	83.11	0	61.77	0	44.31	0	30.26	0	19.33	0	11.287	0	5.863	0	2.617	0	0.826
9.59	108.87	8.59	82.87	7.59	61.57	6.59	44.15	5.59	30.14	4.59	19.24	3.59	11.221	2.59	5.820	1.59	2.594	0.59	0.811
8	108.58	8	82.64	8	61.38	8	43.99	8	30.01	8	19.14	8	11.155	8	5.778	8	2.570	8	0.797
7	108.29	7	82.41	7	61.19	7	43.84	7	29.89	7	19.05	7	11.089	7	5.736	7	2.546	7	0.783

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z
6	108.01	6	82.18	6	60.99	6	43.69	6	29.76	6	18.96	6	11.022	6	5.695	6	2.522	6	0.769
5	107.71	5	81.94	5	60.80	5	43.53	5	29.64	5	18.86	5	10.956	5	5.654	5	2.499	5	0.756
9.54	107.44	8.54	81.71	7.54	60.61	6.54	43.37	5.54	29.51	4.54	18.77	3.54	10.891	2.54	5.612	1.54	2.477	0.54	0.742
3	107.55	3	81.48	3	60.42	3	43.21	3	29.40	3	18.67	3	10.826	3	5.571	3	2.454	3	0.729
2	106.87	2	81.24	2	60.23	2	43.06	2	29.28	2	18.58	2	10.762	2	5.530	2	2.432	2	0.715
1	106.59	1	81.01	1	60.04	1	42.91	1	29.16	1	18.49	1	10.698	1	4.489	1	2.409	1	0.700
0	106.30	0	80.78	0	59.85	0	42.75	0	29.03	0	18.39	0	10.633	0	5.449	0	2.387	0	0.686
9.49	106.02	8.49	80.55	7.49	59.67	6.49	42.60	5.49	28.91	4.49	18.29	3.49	10.569	2.49	5.409	1.49	2.364	0.49	0.673
8	105.74	8	80.32	8	59.48	8	42.45	8	28.79	8	18.20	8	10.505	8	5.369	8	2.342	8	0.660
7	105.46	7	80.09	7	59.29	7	42.29	7	28.67	7	18.11	7	10.441	7	5.329	7	2.321	7	0.646
6	105.18	6	79.86	6	59.10	6	42.14	6	28.55	6	18.02	6	10.378	6	5.290	6	2.299	6	0.632
5	104.90	5	79.63	5	58.91	5	41.99	5	28.43	5	17.93	5	10.315	5	5.251	5	2.278	5	0.619
9.44	104.62	8.44	79.40	7.44	58.72	6.44	41.84	5.44	28.31	4.44	17.84	3.44	10.253	2.44	5.212	1.44	2.256	0.44	0.606
3	104.34	3	79.18	3	58.53	3	41.69	3	28.19	3	17.75	3	10.190	3	5.173	3	2.235	3	0.592
2	104.07	2	78.95	2	58.35	2	41.54	2	28.07	2	17.67	2	10.127	2	5.134	2	2.213	2	0.578
1	103.79	1	78.72	1	58.17	1	41.39	1	27.95	1	17.58	1	10.065	1	5.095	1	2.192	1	0.565
0	103.52	0	78.49	0	57.98	0	41.24	0	27.84	0	17.49	0	10.004	0	5.057	0	2.171	0	0.551
9.39	103.24	8.39	78.27	7.39	57.79	6.39	41.09	5.39	27.72	4.39	17.40	3.39	9.943	2.39	5.019	1.39	2.150	0.39	0.537
8	102.96	8	78.04	8	57.61	8	40.93	8	27.60	8	17.31	8	9.882	8	4.982	8	2.129	8	0.524
7	102.69	7	77.82	7	57.42	7	40.79	7	27.48	7	17.22	7	9.821	7	4.944	7	2.109	7	0.510
6	102.42	6	77.59	6	57.24	6	40.64	6	27.36	6	17.14	6	9.760	6	4.906	6	2.089	6	0.497
5	102.14	5	77.37	5	57.06	5	40.49	5	27.25	5	17.05	5	9.700	5	4.869	5	2.069	5	0.483

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z
9.34	101.86	8.34	77.14	7.34	56.88	6.34	40.34	5.34	27.13	4.34	16.96	3.34	9.640	2.34	4.832	1.34	2.049	0.34	0.470
3	101.59	3	76.92	3	56.69	3	40.19	3	27.01	3	16.87	3	9.579	3	4.795	3	2.029	3	0.456
2	101.32	2	76.70	2	56.51	2	40.05	2	26.90	2	16.78	2	9.519	2	4.758	2	2.009	2	0.443
1	101.05	1	76.48	1	56.32	1	39.90	1	26.79	1	16.70	1	9.460	1	4.722	1	1.989	1	0.429
0	100.78	0	76.26	0	56.15	0	39.75	0	26.67	0	16.62	0	9.401	0	4.686	0	1.969	0	0.416
9.29	100.51	8.29	76.03	7.29	55.96	6.29	39.61	5.29	26.55	4.29	16.53	3.29	9.342	2.29	4.650	1.29	1.949	0.29	0.403
8	100.24	8	75.81	8	55.78	8	39.46	8	26.43	8	16.44	8	9.283	8	4.614	8	1.930	8	0.389
7	99.97	7	75.60	7	55.60	7	39.32	7	26.33	7	16.36	7	9.225	7	4.579	7	1.911	7	0.375
6	99.70	6	75.37	6	55.42	6	39.17	6	26.21	6	16.27	6	9.167	6	4.543	6	1.891	6	0.361
5	99.43	5	75.15	5	55.24	5	39.02	5	26.09	5	16.18	5	9.109	5	4.508	5	1.872	5	0.348
9.24	99.17	8.24	74.93	7.24	55.06	6.24	38.88	5.24	25.98	4.24	16.10	3.24	9.051	2.24	4.473	1.24	1.853	0.24	0.334
3	98.90	3	74.71	3	54.88	3	38.74	3	25.86	3	16.01	3	8.994	3	4.438	3	1.834	3	0.321
2	98.64	2	74.50	2	54.71	2	38.59	2	25.75	2	15.93	2	8.987	2	4.404	2	1.815	2	0.307
1	98.37	1	74.28	1	54.53	1	38.44	1	25.64	1	15.85	1	8.880	1	4.370	1	1.796	1	0.293
0	98.11	0	74.06	0	54.35	0	38.30	0	25.53	0	15.77	0	8.823	0	4.336	0	1.778	0	0.280
9.19	97.84	8.19	73.84	7.19	54.17	6.19	38.16	5.19	25.42	4.19	15.68	3.19	8.766	2.19	4.301	1.19	1.760	0.19	0.266
8	97.58	8	73.63	8	54.00	8	38.02	8	25.31	8	15.60	8	8.710	8	4.267	8	1.742	8	0.253
7	97.31	7	73.41	7	53.82	7	37.88	7	25.19	7	15.52	7	8.655	7	4.234	7	1.723	7	0.239
6	97.05	6	73.20	6	53.64	6	37.73	6	25.08	6	15.44	6	8.599	6	4.201	6	1.705	6	0.225
5	96.79	5	72.98	5	53.46	5	37.59	5	24.97	5	15.35	5	8.544	5	4.168	5	1.688	5	0.211
9.14	96.53	8.14	72.76	7.14	53.29	6.14	37.45	5.14	24.86	4.14	15.27	3.14	8.488	2.14	4.135	1.14	1.669	0.14	0.197
3	96.26	3	72.55	3	53.11	3	37.31	3	24.75	3	15.19	3	8.433	3	4.102	3	1.651	3	0.183

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z	Vz	Z
2	95.99	2	72.34	2	52.93	2	37.17	2	24.64	2	15.11	2	8.378	2	4.069	2	1.633	2	0.169
1	96.73	1	72.13	1	52.76	1	37.03	1	24.53	1	15.03	1	8.324	1	4.037	1	1.616	1	0.155
0	95.47	0	71.91	0	52.58	0	36.88	0	24.42	0	14.95	0	8.269	0	4.005	0	1.599	0	0.142
9.09	95.21	8.09	71.69	7.09	52.41	6.09	36.74	5.09	24.31	4.09	14.87	3.09	8.215	2.09	3.973	1.09	1.581	0.09	0.128
8	94.95	8	71.48	8	52.24	8	36.60	8	24.20	8	14.79	8	8.162	8	3.941	8	1.564	8	0.113
7	94.69	7	71.20	7	52.06	7	36.46	7	24.09	7	14.71	7	8.109	7	3.909	7	1.547	7	0.099
6	94.44	6	71.06	6	51.89	6	36.32	6	23.99	6	14.63	6	8.056	6	3.877	6	1.529	6	0.086
5	94.19	5	70.85	5	51.72	5	36.18	5	23.88	5	14.55	5	8.003	5	3.845	5	1.512	5	0.072
9.04	93.93	8.04	70.64	7.04	51.54	6.04	36.04	5.04	23.77	4.04	14.48	3.04	7.950	2.04	3.814	1.04	1.496	0.04	0.058
3	93.67	3	70.42	3	51.37	3	35.90	3	23.67	3	14.40	3	7.898	3	3.784	3	1.479	3	0.043
2	93.42	2	70.21	2	51.20	2	35.76	2	23.56	2	14.32	2	7.846	2	3.753	2	1.462	2	0.028
1	93.16	1	70.01	1	51.03	1	35.63	1	23.46	1	14.24	1	7.794	1	3.723	1	1.445	1	0.014
0	92.90	0	69.80	0	50.86	0	35.49	0	23.35	0	14.17	0	7.742	0	3.692	0	1.429	0	0.000

ก.3 การวิเคราะห์หาซีโอดีด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux, Titrimetric Method)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ภาชนะที่ใช้ย่อยสลายจะเลือกใช้หลอดย่อยสลายมาตรฐาน ที่ทำด้วยโบโรซิลิเกต มีความจุสูงสุด 10 มิลลิลิตร หรือขนาด 16 x 100 มิลลิเมตร ที่มีฝาเกลียวชนิดที่เอพท์
2. เครื่อง heating block ควบคุมอุณหภูมิที่ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
3. อุปกรณ์ไทเทรต

สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย ($K_2Cr_2O_3$) 0.1 N
 - ชั่งสารมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_3$) อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ จำนวน 1.2283 กรัม ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 125 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 41.75 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวริซัลเฟตจำนวน 8.3250 กรัม ทิ้งให้ละลายและปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาเก็บไว้
2. กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ (H_2SO_4 reagent)
 - ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$) จำนวน 4.4 กรัม ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) 500 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 1-2 วัน ให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลาย
3. สารละลายมาตรฐานหัตถิภูมิเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.1 N
 - ชั่งแอมโมเนียมไอรอน(II)ซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) จำนวน 9.8 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร

หมายเหตุ หากความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS (ต้องเทียบกับโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้งที่ใช้) ทำได้โดย ปิเปต $K_2Cr_2O_3$ มา 5 มิลลิลิตร ลงใน Erlenmeyer flask เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น หลังจากนั้นใส่เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด นำไปไทเทรตกับ FAS สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง บันทึกปริมาตรที่ใช้ ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

4. สารละลายมาตรฐานกลูโคสความเข้มข้น 500 mg/L
 - ชั่งกลูโคส อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ จำนวน 48.66 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 500 mg/L

หมายเหตุ การนำมาใช้ต้องเจือจางให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 mg/L ทำได้โดย ปิเปต สารละลายกลูโคส 500 mg/L มา 20 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด

100 มิลลิลิตร จะให้ความเข้มข้นเท่ากับ 100 mg/L (สารละลายกลูโคสไม่คงตัวเพราะย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงไม่ควรเตรียมทิ้งไว้นาน)

5. กรดซัลฟิวริก 20% สำหรับล้างหลอดย่อย

- นำน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรใส่บีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) 204.08 มิลลิลิตร ใส่ น้ำกลั่นให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร

6. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

- ชั่งฟีแนนโทรีนโมโนไฮเดรตมา 1.485 กรัม และ ชั่งเฟอร์รัส(II)ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมา 0.695 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ก่อนจะนำมาใช้ให้นำไปละลายน้ำกลั่นต่อในปริมาตร 1:4

การทดลอง

1. ล้างหลอดย่อยและฝาจากด้วยกรดซัลฟิวริก 20% ทุกครั้งก่อนการใช้งาน เพื่อป้องกันการปนเปื้อน
2. เลือกหลอดแก้วขนาด 16x100 มม. เนื่องจากใช้สารเคมีน้อยที่สุด และน้ำตัวอย่างมีค่าซีไอดีที่สูง

ตารางที่ ก.5 ปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่าง ๆ

	ปริมาตรน้ำ (มล.)	ปริมาตร สารละลาย $K_2Cr_2O_3$ (มล.)	กรดซัลฟิวริก เข้มข้น (มล.)	ปริมาตร รวม (มล.)
16x100 มม. (10 มล.)	2.5	1.5	3.5	7.5
20x150 มม.	5.0	3.0	7.0	15.0
25x150 มม.	10.0	6.0	14.0	30.0

3. นำตัวอย่างน้ำมาใส่หลอดย่อยสลายที่เตรียมไว้ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร
4. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 1.5 มิลลิลิตร สำหรับย่อยสลาย ใส่ในหลอดย่อยสลาย
5. ค่อย ๆ เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ 3.5 มิลลิลิตร ลงในหลอดย่อยโดยให้ไหลลงก้นหลอดย่อย ปิดฝาให้สนิท แล้วผสมให้เข้ากัน

หมายเหตุ ข้อ 3 ถึง 5 ต้องทำให้ตู้ดูดควัน สวมถุงมือเพื่อป้องกันความร้อน และควรผสมสารละลายให้เข้ากันดีเพื่อไม่ให้เกิดความร้อนสะสมเฉพาะที่ก้นหลอด เพราะอาจจะทำให้ระเบิดได้

6. นำหลอดย่อยไปใส่ heating block ที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เย็นที่อุณหภูมิต่ำ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำสารละลายไปไทเทรตกับ FAS ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน บันทึกปริมาตรที่ใช้ ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
8. ทำแบลงค์โดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ และทำสารละลายมาตรฐานกลูโคส ทุกครั้งที่ทำการทดลอง

การคำนวณ

$$\text{ซีไอที (mg. O}_2\text{/L)} = \frac{(B - S) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (ml)}}$$

- โดยที่ B คือ ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลงค์ (ml)
 S คือ ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างน้ำ (ml)
 N คือ ความเข้มข้นของ FAS (N)
 8000 คือ milliequivalent weight of oxygen x 1000 ml/L

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอที (\%)} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100$$

- โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นซีไอทีเริ่มต้น (mg.O₂/L)
 C_t คือ ความเข้มข้นซีไอทีที่ถูกกำจัดในเวลาต่าง ๆ (mg.O₂/L)

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ข.1 ลักษณะของสารละลายตัวอย่าง

ตารางที่ ข.1 ลักษณะสมบัติของสารละลายเมทิลีนบลู

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH	5.13	5.12	5.06	5.10	0.04
อุณหภูมิ (°C)	29.50	29.00	29.50	29.33	0.289
สี (ADMI)	4087	4151	4119	4118	32.3
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (mg/L)	120	104	104	109	9.03

ตารางที่ ข.2 ลักษณะสมบัติของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH	3.53	3.50	3.51	3.51	0.02
อุณหภูมิ (°C)	30.00	30.00	30.00	30.00	0.00
สี (ADMI)	149	224	192	188	37.8
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (mg/L)	74.8	59.8	59.8	64.8	8.64

ตารางที่ ข.3 ลักษณะสมบัติของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ข

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH	4.24	4.41	4.43	4.36	0.10
อุณหภูมิ (°C)	29.00	28.50	29.00	29.00	0.289
สี (ADMI)	255	255	255	255	0.27
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (mg/L)	192	176	192	187	9.24

ตารางที่ ข.4 ลักษณะสมบัติของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ค

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH	4.65	4.49	5.02	4.72	0.27
อุณหภูมิ (°C)	29.00	28.50	29.00	28.83	0.289
สี (ADMI)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (mg/L)	281	204	166	217	58.5

n/a : ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ ข.5 ลักษณะสมบัติของสารละลายอัลคาไลน์ลิกันิน ง

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH	5.36	5.44	5.58	5.46	0.11
อุณหภูมิ (°C)	29.50	30.00	30.00	30.00	0.289
สี (ADMI)	646	646	646	646	0.05
ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (mg/L)	336	368	368	357	18.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 อัตราการผลิตโอโซน

ตารางที่ ข.6 การวัดปริมาณโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน

เวลา (นาที)	ปริมาณโอโซน (มิลลิกรัม)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	35.77	37.39	36.93	36.70	0.837
30	85.94	88.95	87.10	87.33	1.523
60	165.6	181.6	169.4	172.2	8.365
120	324.2	311.5	311.3	315.7	7.405
150	391.5	388.1	381.5	387.0	5.098

ข.3 ผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อการกำจัดสีและซีไอดีของสารละลายตัวอย่าง

1. ผลการบำบัดสารละลายเมทิลีนบลู

ตารางที่ ข.7 ผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อค่าสีที่บำบัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ

เวลา (นาที)	ค่าสี (ADMI)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	767	868	863	834	56.8
30	434	547	519	500	59.0
60	95.8	102	151	116	30.3
120	41.7	128	96.8	88.8	43.6
150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ ข.8 ผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อค่าซีโอดีบำบัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ

เวลา (นาที)	COD (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	76.7	76.7	76.7	76.7	0.00
30	61.3	46.0	76.7	61.3	15.3
60	96.0	96.0	96.0	96.0	0.00
120	14.9	29.9	44.9	29.9	14.9
150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ ข.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีของสารละลายเมทิลีนบลู

เวลา (นาที)	ค่าสี (ADMI)	ประสิทธิภาพในการ บำบัดสี (%)	COD (mg/L)	ประสิทธิภาพในการ บำบัดซีโอดี (%)
10	833	79.8	76.7	29.9
30	500	87.9	61.3	44.0
60	116	97.2	96.0	12.3
120	88.8	97.8	29.9	72.6
150	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

2. ผลการบำบัดสารละลายอัลคาไลน์ลิทินิน ก

ตารางที่ ข.10 ผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อค่าสีที่บำบัดได้ ณ เวลาดำเนินการ

เวลา (นาที)	ค่าสี (ADMI)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	111	115	92.0	106	12.2
30	57.4	95.5	54.7	69.2	22.8
60	35.1	43.9	46.5	41.8	6.00
120	33.1	33.1	33.1	33.1	0.00
150	33.1	33.1	28.9	31.7	2.44

ตารางที่ ข.11 ผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อค่าซีโอดีที่บำบัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ

เวลา (นาที)	COD (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	59.3	59.3	44.4	54.3	8.55
30	44.4	44.4	59.3	49.4	8.55
60	44.4	29.6	44.4	39.5	8.55
120	41.7	41.7	57.3	46.9	9.03
150	57.3	57.3	57.3	57.3	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอทีในสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก

เวลา (นาทีก)	ค่าสี (ADMI)	ประสิทธิภาพในการ บำบัดสี (%)	COD (mg/L)	ประสิทธิภาพในการ บำบัดซีไอที (%)
10	103	45.3	54.3	16.2
30	69.0	63.3	49.4	23.8
60	42.0	77.7	39.5	39.0
120	33.0	82.5	46.9	27.6
150	31.7	83.2	57.3	11.5

3. ผลการบำบัดสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ข

ตารางที่ ข.13 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าสีที่บำบัดได้ ณ เวลาดำเนินการ

เวลา (นาทีก)	ค่าสี (ADMI)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
30	175	149	208	177	23
60	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
120	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ ข.14 ผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อค่าซีโอดีบำบัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ

เวลา (นาที)	COD (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
30	124	100	118	114	12.4
60	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
120	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ ข.15 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในสารละลายอัลคาไลน์ลิคนิน ข

เวลา (นาที)	ค่าซี (ADMI)	ประสิทธิภาพในการบำบัดซี (%)	COD (mg/L)	ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี (%)
10	n/a	n/a	n/a	n/a
30	177	30.3	114	38.9
60	n/a	n/a	n/a	n/a
120	n/a	n/a	n/a	n/a
150	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

4. ผลการบำบัดสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ค

ตารางที่ ข.16 ผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อค่าสีที่บำบัดได้ ณ เวลาดำเนินการ

เวลา (นาที)	ค่าสี (ADMI)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
30	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
60	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
120	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ ข.17 ผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อค่าซีโอดีที่บำบัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ

เวลา (นาที)	COD (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	166	243	243	217	44.2
30	128	243	89.4	153	79.7
60	89.4	127	51.1	89.4	38.3
120	204	204	158	189	26.5
150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ ข.18 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิน ค

เวลา (นาทีก)	ค่าสี (ADMI)	ประสิทธิภาพในการ บำบัดสี (%)	COD (mg/L)	ประสิทธิภาพในการ บำบัดซีโอดี (%)
10	n/a	n/a	217	0.00
30	n/a	n/a	153	29.4
60	n/a	n/a	89.4	58.8
120	n/a	n/a	189	12.9
150	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

5. ผลการบำบัดสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิน ง

ตารางที่ ข.19 ผลของระยะเวลาการสัมผัสไอโซนต่อค่าสีที่บำบัดได้ ณ เวลาดำเนินการ

เวลา (นาทีก)	ค่าสี (ADMI)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
30	582	455	541	526	64.8
60	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
120	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ ข.20 ผลของระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่อค่าซีโอดีบำบัดได้ ณ เวลาที่ดำเนินการ

เวลา (นาที)	COD (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
30	267	282	285	278	9.56
60	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
120	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ ข.21 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้ง

เวลา (นาที)	ค่าสี (ADMI)	ประสิทธิภาพในการ บำบัดสี (%)	COD (mg/L)	ประสิทธิภาพในการ บำบัดซีโอดี (%)
10	n/a	n/a	n/a	n/a
30	526	18.5	278	22.3
60	n/a	n/a	n/a	n/a
120	n/a	n/a	n/a	n/a
150	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a : ไม่มีข้อมูล

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ค.1 ช่วงเวลาที่ทำปฏิกริยากับโอโซนมีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอของสารละลายเมทิลีนบลูหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

1. ตั้งสมมติฐาน

H_0 = ช่วงเวลาที่ทำปฏิกริยากับโอโซนไม่มีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอของสารละลายเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

H_1 = ช่วงเวลาที่ทำปฏิกริยากับโอโซนมีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอของสารละลายเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ (อย่างน้อย 1 คู่)

2. ทดสอบสมมติฐานด้วย IBM SPSS Statistics Version 25 โดยวิธี One-way Anova

2.1 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบด้วยวิธี One-way Anova ใช้ค่าสีในภาคผนวก ข ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข.1 และ ข.7

2.2 ค่าจากการทดสอบสมมติฐานด้วย IBM SPSS Statistics Version 25 โดยวิธี One-way Anova

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลค่าสีของสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้วิธีทดสอบด้วย One-way Anova

ANOVA					
ADMI	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	34593306.76	4	8648326.689	4098.240	.000
Within Groups	21102.540	10	2110.254		
Total	34614409.30	14			

ผลการวิเคราะห์ ค่าสถิติ $F = 4098.240$ และมีค่า $Sig. = 0.000$ ซึ่งน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ช่วงเวลาที่ทำปฏิกริยากับโอโซนมีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอของสารละลายเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ (อย่างน้อย 1 คู่)

เนื่องจากการทดสอบสมมติฐานในการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ผลการทดสอบเป็นปฏิเสธ H_0 ดังนั้นจึงต้องเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลแต่ละคู่ ในที่นี้จะเปรียบเทียบโดยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ผลการวิเคราะห์ดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลค่าสีของสารละลายเมทิลีนบลูที่ละลาย
โดยใช้วิธี LSD

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ADMI

	(I) TIME	(J) TIME	Mean	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
			Difference (I-J)			Lower Bound	Upper Bound
LSD	0	10	3286.3333 [*]	37.5078	.000	3202.761	3369.906
		30	3619.0000 [*]	37.5078	.000	3535.427	3702.573
		60	4002.7333 [*]	37.5078	.000	3919.161	4086.306
		120	4030.1667 [*]	37.5078	.000	3946.594	4113.739
	10	0	-3286.3333 [*]	37.5078	.000	-3369.906	-3202.761
		30	332.6667 [*]	37.5078	.000	249.094	416.239
		60	716.4000 [*]	37.5078	.000	632.827	799.973
		120	743.8333 [*]	37.5078	.000	660.261	827.406
	30	0	-3619.0000 [*]	37.5078	.000	-3702.573	-3535.427
		10	-332.6667 [*]	37.5078	.000	-416.239	-249.094
		60	383.7333 [*]	37.5078	.000	300.161	467.306
		120	411.1667 [*]	37.5078	.000	327.594	494.739
	60	0	-4002.7333 [*]	37.5078	.000	-4086.306	-3919.161
		10	-716.4000 [*]	37.5078	.000	-799.973	-632.827
		30	-383.7333 [*]	37.5078	.000	-467.306	-300.161
		120	27.4333	37.5078	.481	-56.139	111.006
120	0	-4030.1667 [*]	37.5078	.000	-4113.739	-3946.594	
	10	-743.8333 [*]	37.5078	.000	-827.406	-660.261	
	30	-411.1667 [*]	37.5078	.000	-494.739	-327.594	
	60	-27.4333	37.5078	.481	-111.006	56.139	

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 ช่วงเวลาที่ทำปฏิกิริยากับโอโซนมีผลต่อการลดปริมาณซีโอดีของสารละลายเมทิลีนบลูหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

1. ตั้งสมมติฐาน

H_0 = ช่วงเวลาที่ทำปฏิกิริยากับโอโซนไม่มีผลต่อการลดปริมาณซีโอดีของสารละลายเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ

H_1 = ช่วงเวลาที่ทำปฏิกิริยากับโอโซนมีผลต่อการลดปริมาณซีโอดีของสารละลายเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ (อย่างน้อย 1 คู่)

2. ทดสอบสมมติฐานด้วย IBM SPSS Statistics Version 25 โดยวิธี One-way Anova

2.1 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบด้วยวิธี One-way Anova ใช้ค่าสีในภาคผนวก ข ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข.1 และ ข.8

2.2 ค่าจากการทดสอบสมมติฐานด้วย IBM SPSS Statistics Version 25 โดยวิธี One-way Anova

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลปริมาณซีโอดีของสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้วิธีทดสอบด้วย One-way Anova

ANOVA					
COD	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	11528.564	4	2882.141	26.395	.000
Within Groups	1091.913	10	109.191		
Total	12620.477	14			

ผลการวิเคราะห์ ค่าสถิติ $F = 26.395$ และมีค่า $Sig. = 0.000$ ซึ่งน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ช่วงเวลาที่ทำปฏิกิริยากับโอโซนมีผลต่อการลดปริมาณซีโอดีของสารละลายเมทิลีนบลูอย่างมีนัยสำคัญ (อย่างน้อย 1 คู่)

เนื่องจากการทดสอบสมมติฐานในการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ผลการทดสอบเป็นปฏิเสธ H_0 ดังนั้นจึงต้องเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลแต่ละคู่ ในที่นี้จะเปรียบเทียบโดยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ผลการวิเคราะห์ดังตาราง

ตารางที่ ค.4 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลปริมาณซีไอดีของสารละลายเมทิลีนบลู
ทีละคู่ โดยใช้วิธี LSD

Multiple Comparisons

Dependent Variable: COD

	(I) TIME	(J) TIME	Mean	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
			Difference (I-J)			Lower Bound	Upper Bound
LSD	0	10	32.6333*	8.5320	.003	13.623	51.644
		30	48.0000*	8.5320	.000	28.990	67.010
		60	13.3333	8.5320	.149	-5.677	32.344
		120	79.4333*	8.5320	.000	60.423	98.444
10	0	30	-32.6333*	8.5320	.003	-51.644	-13.623
		60	15.3667	8.5320	.102	-3.644	34.377
		120	-19.3000*	8.5320	.047	-38.310	-.290
		30	46.8000*	8.5320	.000	27.790	65.810
30	0	60	-48.0000*	8.5320	.000	-67.010	-28.990
		120	-15.3667	8.5320	.102	-34.377	3.644
		60	-34.6667*	8.5320	.002	-53.677	-15.656
		120	31.4333	8.5320	.004	12.423	50.444
60	0	120	-13.3333	8.5320	.149	-32.344	5.677
		10	19.3000*	8.5320	.047	-.290	38.310
		30	34.6667*	8.5320	.002	-15.656	53.677
		120	66.1000*	8.5320	.000	47.090	85.110
120	0	10	-79.4333	8.5320	.000	-98.444	-60.423
		30	-46.8000*	8.5320	.000	-65.810	-27.790
		60	-31.4333*	8.5320	.004	-50.444	-12.423
		120	-66.1000*	8.5320	.000	-85.110	-47.090

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.3 ช่วงเวลาที่ทำปฏิกริยากับโอโซนมีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอของสารละลายอัลคาไลน์ลิทิน ก หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

1. ตั้งสมมติฐาน

H_0 = ช่วงเวลาที่ทำปฏิกริยากับโอโซนไม่มีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอของสารละลายอัลคาไลน์ลิทิน ก อย่างมีนัยสำคัญ

H_1 = ช่วงเวลาที่ทำปฏิกริยากับโอโซนมีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอของสารละลายอัลคาไลน์ลิทิน ก อย่างมีนัยสำคัญ (อย่างน้อย 1 คู่)

2. ทดสอบสมมติฐานด้วย IBM SPSS Statistics Version 25 โดยวิธี One-way Anova

2.1 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบด้วยวิธี One-way Anova ใช้ค่าสีในภาคผนวก ข ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข.2 และ ข.10

2.2 ค่าจากการทดสอบสมมติฐานด้วย IBM SPSS Statistics Version 25 โดยวิธี One-way Anova

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลค่าสีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทิน ก โดยใช้วิธีทดสอบด้วย One-way Anova

ANOVA					
ADMI	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	55505.489	5	11101.098	31.278	.000
Within Groups	4258.993	12	354.916		
Total	59764.483	17			

ผลการวิเคราะห์ ค่าสถิติ $F = 31.278$ และมีค่า $\text{Sig.} = 0.000$ ซึ่งน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ช่วงเวลาที่ทำปฏิกริยากับโอโซนมีผลต่อการลดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอของสารละลายอัลคาไลน์ลิทิน ก อย่างมีนัยสำคัญ (อย่างน้อย 1 คู่)

เนื่องจากการทดสอบสมมติฐานในการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ผลการทดสอบเป็นปฏิเสธ H_0 ดังนั้นจึงต้องเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลแต่ละคู่ ในที่นี้จะเปรียบเทียบโดยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ผลการวิเคราะห์ดังตาราง

ตารางที่ ค.6 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลค่าสี่ของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิ้น ก
ทีละคู่ โดยใช้วิธี LSD

Multiple Comparisons

Dependent Variable: ADMI

	(I) TIME	(J) TIME	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	0	10	82.3333*	15.3822	.000	48.818	115.848
		30	119.1333*	15.3822	.000	85.618	152.648
		60	146.5000*	15.3822	.000	112.985	180.015
		120	155.2333*	15.3822	.000	121.718	188.748
		150	156.6333*	15.3822	.000	123.118	190.148
	10	0	-82.3333*	15.3822	.000	-115.848	-48.818
		30	36.8000*	15.3822	.034	3.285	70.315
		60	64.1667*	15.3822	.001	30.652	97.682
		120	72.9000*	15.3822	.000	39.385	106.415
		150	74.3000*	15.3822	.000	40.785	107.815
	30	0	-119.1333*	15.3822	.000	-152.648	-85.618
		10	-36.8000*	15.3822	.034	-70.315	-3.285
		60	27.3667	15.3822	.101	-6.148	60.882
		120	36.1000*	15.3822	.037	2.585	69.615
		150	37.5000*	15.3822	.031	3.985	71.015
60	0	-146.5000*	15.3822	.000	-180.015	-112.985	
	10	-64.1667*	15.3822	.001	-97.682	-30.652	
	30	-27.3667	15.3822	.101	-60.882	6.148	
	120	8.7333	15.3822	.581	-24.782	42.248	
	150	10.1333	15.3822	.522	-23.382	43.648	
120	0	-155.2333*	15.3822	.000	-188.748	-121.718	
	10	-72.9000*	15.3822	.000	-106.415	-39.385	
	30	-36.1000*	15.3822	.037	-69.615	-2.585	
	60	-8.7333	15.3822	.581	-42.248	24.782	
	150	1.4000	15.3822	.929	-32.115	34.915	
150	0	-156.6333*	15.3822	.000	-190.148	-123.118	
	10	-74.3000*	15.3822	.000	-107.815	-40.785	
	30	-37.5000*	15.3822	.031	-71.015	-3.985	
	60	-10.1333	15.3822	.522	-43.648	23.382	
	120	-1.4000	15.3822	.929	-34.915	32.115	

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.4 ช่วงเวลาที่ทำปฏิกิริยากับโอโซนมีผลต่อการลดปริมาณซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิท ก หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

1. ตั้งสมมติฐาน

H_0 = ช่วงเวลาที่ทำปฏิกิริยากับโอโซนไม่มีผลต่อการลดปริมาณซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิท ก อย่างมีนัยสำคัญ

H_1 = ช่วงเวลาที่ทำปฏิกิริยากับโอโซนมีผลต่อการลดปริมาณซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิท ก อย่างมีนัยสำคัญ (อย่างน้อย 1 คู่)

2. ทดสอบสมมติฐานด้วย IBM SPSS Statistics Version 25 โดยวิธี One-way Anova

2.1 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบด้วยวิธี One-way Anova ใช้ค่าสีในภาคผนวก ข ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ ข.2 และ ข.11

2.2 ค่าจากการทดสอบสมมติฐานด้วย IBM SPSS Statistics Version 25 โดยวิธี One-way Anova

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลปริมาณซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิท ก โดยใช้วิธีทดสอบด้วย One-way Anova

ANOVA					
COD	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1162.196	5	232.439	3.698	.029
Within Groups	754.280	12	62.857		
Total	1916.476	17			

ผลการวิเคราะห์ ค่าสถิติ $F = 3.698$ และมีค่า $\text{Sig.} = 0.029$ ซึ่งน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่า ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ช่วงเวลาที่ทำปฏิกิริยากับโอโซนมีผลต่อการลดปริมาณซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์ลิทมิท ก อย่างมีนัยสำคัญ

เนื่องจากการทดสอบสมมติฐานในการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ผลการทดสอบเป็นปฏิเสธ H_0 ดังนั้นจึงต้องเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลแต่ละคู่ ในที่นี้จะเปรียบเทียบโดยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ผลการวิเคราะห์ดังตาราง

ตารางที่ ค.8 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยข้อมูลปริมาณซีโอดีของสารละลายอัลคาไลน์
 ลิกนิน ก ที่ละคู่ โดยใช้วิธี LSD

Multiple Comparisons

Dependent Variable: COD

	(I) TIME	(J) TIME	Mean	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
			Difference (I-J)			Lower Bound	Upper Bound
LSD	0	10	10.4667	6.4734	.132	-3.638	24.571
		30	15.4333*	6.4734	.035	1.329	29.538
		60	25.3333*	6.4734	.002	11.229	39.438
		120	17.9000*	6.4734	.017	3.796	32.004
		150	7.5000	6.4734	.269	-6.604	21.604
	10	0	-10.4667	6.4734	.132	-24.571	3.638
		30	4.9667	6.4734	.458	-9.138	19.071
		60	14.8667*	6.4734	.040	.762	28.971
		120	7.4333	6.4734	.273	-6.671	21.538
		150	-2.9667	6.4734	.655	-17.071	11.138
	30	0	-15.4333*	6.4734	.035	-29.538	-1.329
		10	-4.9667	6.4734	.458	-19.071	9.138
		60	9.9000	6.4734	.152	-4.204	24.004
		120	2.4667	6.4734	.710	-11.638	16.571
		150	-7.9333	6.4734	.244	-22.038	6.171
	60	0	-25.3333*	6.4734	.002	-39.438	-11.229
		10	-14.8667*	6.4734	.040	-28.971	-.762
		30	-9.9000	6.4734	.152	-24.004	4.204
		120	-7.4333	6.4734	.273	-21.538	6.671
		150	-17.8333*	6.4734	.017	-31.938	-3.729
120	0	-17.9000*	6.4734	.017	-32.004	-3.796	
	10	-7.4333	6.4734	.273	-21.538	6.671	
	30	-2.4667	6.4734	.710	-16.571	11.638	
	60	7.4333	6.4734	.273	-6.671	21.538	
	150	-10.4000	6.4734	.134	-24.504	3.704	
150	0	-7.5000	6.4734	.269	-21.604	6.604	
	10	2.9667	6.4734	.655	-11.138	17.071	
	30	7.9333	6.4734	.244	-6.171	22.038	
	60	17.8333*	6.4734	.017	3.729	31.938	
	120	10.4000	6.4734	.134	-3.704	24.504	

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้