

การบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซีกิ่งเหล็ก
เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซนเนชั่น

REMOVAL OF REACTIVE DYE IN SYNTHETIC
WASTEWATER USING IRON BORINGS AS A CATALYST
IN OZONATION PROCESS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2565
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REMOVAL OF REACTIVE DYE IN SYNTHETIC
WASTEWATER USING IRON BORINGS AS A CATALYST
IN OZONATION PROCESS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2022
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กิ้งเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซนชั้น

Removal of Reactive Dye in Synthetic Wastewater using Iron Borings as a Catalyst in Ozonation Process

ชื่อนักศึกษา

นางสาวฟ้าใส ยินดีสังข์ รหัสนักศึกษา 62050421

นางสาวศุทธิณี วิเชียรวรรณ รหัสนักศึกษา 62050452

นายสันหนัญ พรหมประเสริฐ รหัสนักศึกษา 62050458

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2565

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.บรรจง บุญชม ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชาวลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ซึ้กลึงเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซนชั้น			
ชื่อนักศึกษา	นางสาวฟ้าใส	ยินดีสังข์	รหัสนักศึกษา	62050421
	นางสาวศุทธิณี	วิเชียรวรรณ	รหัสนักศึกษา	62050452
	นายสัมพันธ์	พรหมประเสริฐ	รหัสนักศึกษา	62050458
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)			
ภาควิชา	เคมี			
คณะ	วิทยาศาสตร์			
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)			
ปีการศึกษา	2565			
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุวรรณี จรรย์ยาพูน			

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการนำซึ้กลึงเหล็กมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสี้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้น โดยศึกษาอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องผลิตโอโซนที่เวลา 20, 30, 40, 60, 90, 120 และ 150 นาที วิเคราะห์ความเข้มข้นโอโซนเริ่มต้นและสุดท้ายที่ถูกดักจับในโพแทสเซียมไอโอไดต์ 2 % ด้วยการไทเทรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มอล และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมรีแอกทีฟที่พบ โดยเติมซึ้กลึงเหล็กขนาด 200 เมช 0.1 กรัมต่อลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์สี้อมรีแอกทีฟที่พบเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 500 มิลลิลิตร โดยแปรค่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี ได้แก่ ระยะเวลาการเติมโอโซน (20, 40, 60, 90 และ 120 นาที) และค่าพีเอชของสารละลาย (3, 7 และ 9) จากผลการวิเคราะห์กำลังผลิตของเครื่องผลิตโอโซนพบว่า มีกำลังผลิต 65 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการเติมโอโซนและพีเอชของสารละลายส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีสูงขึ้น พบว่ากระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับการเติมซึ้กลึงเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาพ่นโอโซน 90 นาที และค่าพีเอช 9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีเท่ากับ 83.41% และ 51.82% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : กระบวนการโอโซนชั้น สี้อมรีแอกทีฟ การบำบัดสี ซึ้กลึงเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Removal of Reactive Dye in Synthetic Wastewater using Iron Borings as a Catalyst in Ozonation Process
Students	Miss Fasai Yindeesang Student ID 62050421 Miss Sudthinee Wichenwan Student ID 62050452 Mr. Sanhanat Promprasert Student ID 62050458
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
School	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2022
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suwannee Junyapoon

Abstract

This special project studied the use of iron borings as a catalyst in an ozonation process to remove reactive dyes in synthetic wastewater. The ozone generation rate of ozone generator was measured at 20, 30, 40, 60, 90, 120 and 150 min. Initial and final concentrations of ozone were trapped in 2% KI and then analyzed with 0.1 N of sodium thiosulfate. The removal efficiency of reactive dye in synthetic wastewater using iron borings as a catalyst in ozonation process was investigated. 0.1 g/L of 200 mesh iron borings was added into the synthetic wastewater containing 500 ml of 500 mg/L of reactive blue. Factors affecting on the dye removal efficiency were examined such as contact time (20, 40, 60, 90, 120 min) and pH of solution (3, 7, 9). Ozone generator produced 65 milligrams per hour of ozone. The experimental results found that the increase of contact time and pH tended to increase the removal efficiency of color and COD. Ozonation process coped with iron borings as catalyst; purging ozone for 90 min at pH 9, the removal efficiencies of color and COD were 83.41% and 51.82%, respectively which is significantly higher than those using ozone alone.

Keywords: Ozonation process, Reactive dyes, Color treatment, Iron Borings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากคามกรุณาและความร่วมมือของบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ดังนี้ ขอขอบคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ รศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำที่ดี และตรวจสอบชี้แนะข้อบกพร่องอันเป็นประโยชน์ในการทำโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอดและขอขอบพระคุณกรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ รศ.ดร.บรรจง บุญชม และ ผศ.ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัททกุลธรเคอร์บี (จำกัด) มหาชน ที่ให้ความอนุเคราะห์ชั่งกึ่งเหล็กในการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ขอขอบพระคุณ บุคลากร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ให้คำปรึกษา ตลอดจนเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ฟ้าใส ยินดีสังข์
ศุทธิณี วิเชียรวรรณ
สัณห์รัฐ พรหมประเสริฐ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ญ
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 อุตสาหกรรมฟอกย้อม	4
2.1.1 การเตรียมผ้า (preparation).....	4
2.1.1.1 การเผาขน (Singeing).....	4
2.1.1.2 การลอกแป้ง (Desizing).....	4
2.1.1.3 การกำจัดสิ่งสกปรก (Scouring).....	6
2.1.1.4 การฟอกขาว (Bleaching).....	6
2.1.1.5 การซุบมัน (Mercerization).....	6
2.1.2 การย้อมสี (Textile Dyeing)	6
2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing).....	6
2.2 ประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำ.....	6
2.2.1 สีย้อม	7
2.2.2 สารเคมีที่ใช้ช่วยในการฟอกย้อม และสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ	7
2.2.3 สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย.....	7
2.2.4 เศษเส้นใย.....	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.2.5	สิ่งสกปรกอื่นๆ.....	8
2.3	ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	8
2.3.1	ความเป็นกรดต่าง (pH).....	8
2.3.2	BOD (Biochemical Oxygen Demand).....	8
2.3.3	COD (Chemical Oxygen Demand).....	8
2.3.4	ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids).....	9
2.3.5	สี (Color).....	9
2.4	สี.....	9
2.4.1	สีแท้หรือสีจริง (True Color).....	9
2.4.2	สีปรากฏ (Apparent Color).....	9
2.4.3	หน่วยของสี.....	9
2.4.3.1	การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ (Platinum-Cobalt unit).....	10
2.4.3.2	การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI unit).....	10
2.5	สีย้อม.....	10
2.5.1	สีสังเคราะห์หรือสีเคมี.....	11
2.5.2	สีย้อมธรรมชาติ.....	11
2.5.3	ประเภทสีย้อม.....	11
2.6	สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dyes).....	12
2.6.1	โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟ.....	12
2.6.2	การกำจัดสีย้อม.....	13
2.7	กระบวนการโอโซนชั้น (Ozonation).....	14
2.7.1	การเกิดโอโซน.....	14
2.7.2	การสลายตัวของโอโซนในน้ำ.....	14
2.7.3	ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน.....	15
2.7.3.1	การทำปฏิกิริยาทางตรง (Direct Attack).....	15
2.7.3.2	การทำปฏิกิริยาทางอ้อม (Indirect Attack).....	16
2.7.4	ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซน.....	17
2.7.4.1	อุณหภูมิ.....	17
2.7.4.2	ค่าพีเอช.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่รับผิดชอบต่อสิ่งผิดและต้งยังอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.7.4.3	ระยะเวลาการเติมโอโซน.....	18
2.7.4.4	สารอินทรีย์ในน้ำ.....	18
2.8	กระบวนการโอโซนชั้นแบบมีตัวเร่ง.....	18
2.8.1	ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	19
2.8.1.1	ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous Catalysts).....	19
2.8.1.2	ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalysts).....	19
2.9	เศษเหล็ก.....	20
2.9.1	เศษชิ้นเหล็ก.....	20
2.9.1.1	เศษชิ้นเหล็กกล้า (Machine shop turnings).....	20
2.9.1.2	เศษชิ้นเหล็กหล่อ (Iron borings).....	20
2.9.2	กระบวนการในการได้เศษชิ้นเหล็ก.....	20
2.9.3	การใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ.....	21
2.9.3.1	เทคโนโลยีชีวภาพ.....	21
2.9.1.2	ทำโลหะผสม.....	22
2.9.1.3	กรองสียอม.....	22
2.10	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1	อุปกรณ์และสารเคมี.....	25
3.1.1	อุปกรณ์.....	25
3.1.2	สารเคมี.....	25
3.2	วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	26
3.3	ตัวอย่างน้ำที่ใช้ศึกษา.....	26
3.4	การหาอัตราการผลิตโอโซน.....	27
3.5	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีโอดีด้วยวิธีการโอโซนชั้น.....	27
3.5.1	การศึกษาผลของระยะเวลาการพ่นโอโซน.....	27
3.5.2	การศึกษาผลของพีเอช.....	28
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	29
4.1	ลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามและตีพิมพ์โดยกองการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์หากมีการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีที่มีเหตุอันสมควรและต้องขออนุญาตจากกองการศึกษาทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

4.2 อัตราการผลิตโอโซน.....	30
4.3 ความสามารถในการบำบัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้น ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	31
4.3.1 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซน.....	31
4.3.2 ผลของพีเอช.....	34
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
เอกสารอ้างอิง.....	40
ภาคผนวก.....	44
ภาคผนวก ก.....	45
ภาคผนวก ข.....	73
ภาคผนวก ค.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกประเภทสีย้อม.....	12
2.2 แสดงการเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆในการเร่งปฏิกิริยาเอกพจน์และวิวิธพจน์.....	19
3.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำตัวอย่าง.....	26
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของซีกิ้งเหล็ก.....	29
ก-1 การวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นต่างๆ.....	48
ก-2 ตารางแปลงค่าของ Munsell.....	50
ก-3 ตารางค่าของ Munsell.....	51
ก-4 ตารางตัวอย่างการเทียบค่า ADMI.....	53
ก-5 ตารางการเทียบค่าของ Munsell (X).....	54
ก-6 ตารางการเทียบค่าของ Munsell (Y).....	59
ก-7 ตารางการเทียบค่าของ Munsell (Z).....	63
ก-8 อัตราส่วนของปริมาณน้ำตัวอย่างกับสารเคมีที่ใช้สำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ.....	71
ข-1 การวัดปริมาณโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน.....	73
ข-2.1 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซน.....	74
ข-2.2 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา.....	74
ข-2.3 ผลของค่าพีเอชที่มีต่อการบำบัดด้วยโอโซน.....	75
ข-2.4 ผลของค่าพีเอชที่มีต่อการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา.....	75
ค-1 ผลของอัตราการผลิตโอโซนต่อมิลลิกรัมต่อลิตรในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี One-way ANOVA.....	76
ค-2.1 ผลของการบำบัดโดยโอโซนโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี Two-way ANOVA.....	77
ค-2.2 ผลของค่าพีเอชที่ใช้ในการบำบัดโดยโอโซนโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี Two-way ANOVA.....	80
ค-2.3 ผลของภาวะสารอินทรีย์ของสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี Two-way ANOV.....	81
ค-2.4 ผลของภาวะสารอินทรีย์แต่ละค่าเอชของสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยไม่มีตัวเร่ง ปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม	5
2.2 โครงสร้างสีย้อม Reactive Red 11 (A) โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5 (B).....	13
2.3 กระบวนการเกิดโอโซน.....	14
2.4 แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ.....	15
2.5 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบโดยตรง.....	16
2.6 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์.....	17
2.7 แสดงกระบวนการในการได้เศษซึ่กลิ้งเหล็ก.....	21
3.1 แผนผังการทำงานของระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	27
4.1 ลักษณะของซึ่กลิ้งเหล็กที่ใช้ในการศึกษา.....	29
4.2 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่เวลาต่างๆ.....	30
4.3 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซนต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้น ในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัมต่อลิตร เทียบกับไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	31
4.4 ลักษณะของสีของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซนที่เวลาต่างๆ.....	32
4.5 ลักษณะของสีของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซนในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลา 20,40,60,90 และ 120 นาที.....	32
4.6 ซีโอดีของน้ำตัวอย่างเมื่อบำบัดด้วย (ก) กระบวนการโอโซนชั้น และ (ข) กระบวนการ โอโซนชั้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ.....	33
4.7 พีเอชของน้ำตัวอย่าง เมื่อบำบัดด้วย (ก) กระบวนการโอโซนชั้น และ (ข) กระบวนการ โอโซนชั้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา.....	33
4.8 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโอโซน และโอโซนร่วมกับซึ่กลิ้งเหล็ก.....	34
4.9 ลักษณะของสีของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดที่พีเอชต่างๆ เมื่อใช้เวลา บำบัดนาน 90 นาที.....	35
4.10 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยโอโซน และโอโซนร่วมกับซึ่กลิ้งเหล็ก	36
4.11 พีเอชของน้ำตัวอย่าง เมื่อบำบัดด้วย (ก) กระบวนการโอโซนชั้น และ (ข) กระบวนการ โอโซนชั้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา.....	37
ก-1 กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
ลบ.ม.	ลูกบาศก์เมตร
มล./ล.	มิลลิกรัมต่อลิตร
ADMI	American Dye Manufacturers Institute
C°	องศาเซลเซียส
min ⁻¹	รอบต่อนาที
ml	มิลลิลิตร
g/l	กรัมต่อลิตร
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
C	Catalyst
Mg	มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ การย้อมผ้า-การพิมพ์ผ้า การผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ การสกัดน้ำมันปาล์ม ฯลฯ มักมีปัญหาเรื่องสีของน้ำ การขยายตัวของภาคเศรษฐกิจและความต้องการบริโภคสินค้าที่มีมากขึ้น เช่น ความต้องการเสื้อผ้าที่สีสันสดใสหรือหลากหลายสีสัน ทำให้มีความนิยมใช้สีย้อม โดยเฉพาะสีสังเคราะห์หรือสีเคมีในโรงงานอุตสาหกรรมมีเพิ่มมากขึ้น (อุษา, 2560) สีย้อมจึงเป็นมลพิษหลักของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิด ซึ่งไม่เพียงก่อให้เกิดปัญหาทางด้านทัศนียภาพต่อผู้พบเห็นหรือผู้ใช้น้ำ สีของน้ำยังมีผลต่อการส่องผ่านของแสงซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถลดอัตราการถ่ายเทออกซิเจนจากผิวน้ำลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง (นิตยา, 2558) ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ การกำจัดสีของน้ำเสียจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นเพื่อป้องกันปัญหาสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้นกับแหล่งรองรับน้ำทิ้ง

กระบวนการโอโซนเนชัน (Ozonation) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำมาใช้กำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ จัดเป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้โอโซน ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงในการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารประกอบที่ทำให้เกิดสี หรือที่เรียกว่าโครโมฟอร์ (Chromophore) (วนิดา, 2555) ทำให้เกิดการสลายตัวของพันธะ โดยเฉพาะพันธะคู่นโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กและช่วยกำจัดสีให้หายไป (วนิดา, 2555) งานวิจัยของรัตนระพันธ์และคณะ (2556) ได้ศึกษาการบำบัดสีและซีไอดีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษลูกฟูกด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน พบว่า ในช่วงระยะเวลาที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที กระบวนการโอโซนเนชันสามารถลดค่าสีได้ร้อยละ 2.83, 4.72, 7.55 และ 10.38 ตามลำดับ โดยน้ำเสียก่อนบำบัดมีค่าเท่ากับ 0.106 Color unit และช่วงระยะเวลาที่ 120 นาที กระบวนการโอโซนเนชันสามารถลดค่า COD ได้ดีที่สุดในโดยน้ำเสียก่อนการบำบัดมีค่าเท่ากับ 200 mg/L เมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการบำบัดแล้วลดลงเหลือ 36.8 mg/L คิดเป็นร้อยละ 81.6% ผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากระบวนการโอโซนเนชันเพียงอย่างเดียวอาจเกิดปฏิกิริยาได้ไม่สมบูรณ์ การนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาประยุกต์ใช้ในกระบวนการโอโซนเนชัน เพื่อการบำบัดน้ำเสียเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการโอโซนเนชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysts) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานะต่างจากสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยา จัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียร่วมกับกระบวนการโอโซนเนชัน เนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogenous catalysts)

(ศศิธร, 2564) โดยมักใช้ออกไซด์ของโลหะ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และ ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของโลหะบนตัวรองรับ (supported metal oxides) เช่น Cu-TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (ศศิธร, 2564) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งการย่อยสลายตัวโอโซน ก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^\bullet) ที่มีประสิทธิภาพการออกซิเดชันดีกว่าโอโซน ผลที่ตามมาคือการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัด ยูพาพรและซัซวาลย์ (2563) ศึกษาการบำบัดสีย้อม C.I. Reactive Green 19 ด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้นร่วมกับคอปเปอร์ออกไซด์เทียบกับกระบวนการโอโซนเข้มข้น พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นเมื่อใช้กระบวนการโอโซนเข้มข้นเพียงอย่างเดียว

ซึ้กึ่งเหล็ก เป็นเศษเหล็กที่เกิดขึ้นจากการตัดขอบ การเจียร กลึง ใส การเจาะรูเหล็ก จัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่พบได้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนประกอบเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น อุตสาหกรรมผลิตมอเตอร์คอมเพรสเซอร์สำหรับเครื่องทำความเย็น ที่ต้องมีการส่งไปกำจัด จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าซึ้กึ่งเหล็กมีออกไซด์ของเหล็กในรูป Fe_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลัก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซนเข้มข้น โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟบลูในน้ำด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้นโดยใช้ซึ้กึ่งเหล็กหล่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการนำซึ้กึ่งเหล็กหล่อมานำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสีรีแอคทีฟบลูในน้ำด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษา คือซึ้กึ่งเหล็กหล่อ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตมอเตอร์คอมเพรสเซอร์สำหรับเครื่องทำความเย็น
2. ศึกษาสมบัติของวัสดุ ได้แก่ ขนาดอนุภาค องค์ประกอบ
3. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้นในสภาวะที่มีซึ้กึ่งเหล็กหล่อมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
 - ตัวอย่างน้ำที่ใช้ศึกษา คือ สีรีแอคทีฟบลู (Reactive Blue) ละลายในน้ำกลั่น
 - ตัวแปรต้นหรือปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาเติมโอโซนเข้มข้น (20, 40, 60, 90 และ 120 นาที) และพีเอชของน้ำ (3, 7 และ 9)
 - ตัวแปรตาม ได้แก่ pH1 , สี (Color) และ CODของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซนชั้น
2. สามารถนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบ ทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอ ในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายดิบหรือผ้าดิบ ให้เป็นเป็นวัสดุสำเร็จที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรง หรือนำไปใช้ทำเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมชั้นปลายได้ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใย โดยการใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้น้ำมาก กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ 3 กระบวนการ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) ดังแสดงในภาพที่ 2.1

2.1.1 การเตรียมผ้า (Preparation)

กระบวนการเตรียมผ้าเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เพื่อเตรียมให้ผ้านั้นอยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อม พิมพ์หรือตกแต่งสำเร็จให้มีประสิทธิภาพที่สุด โดยขั้นตอนของการเตรียมผ้าจะช่วยขจัดสิ่งสกปรกที่เจือปนในเส้นใย ทำให้เส้นใยขาวสะอาดสามารถดูดติดสีย้อมและสารเคมีต่างๆ อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผ้า ขั้นตอนการเตรียมผ้าแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

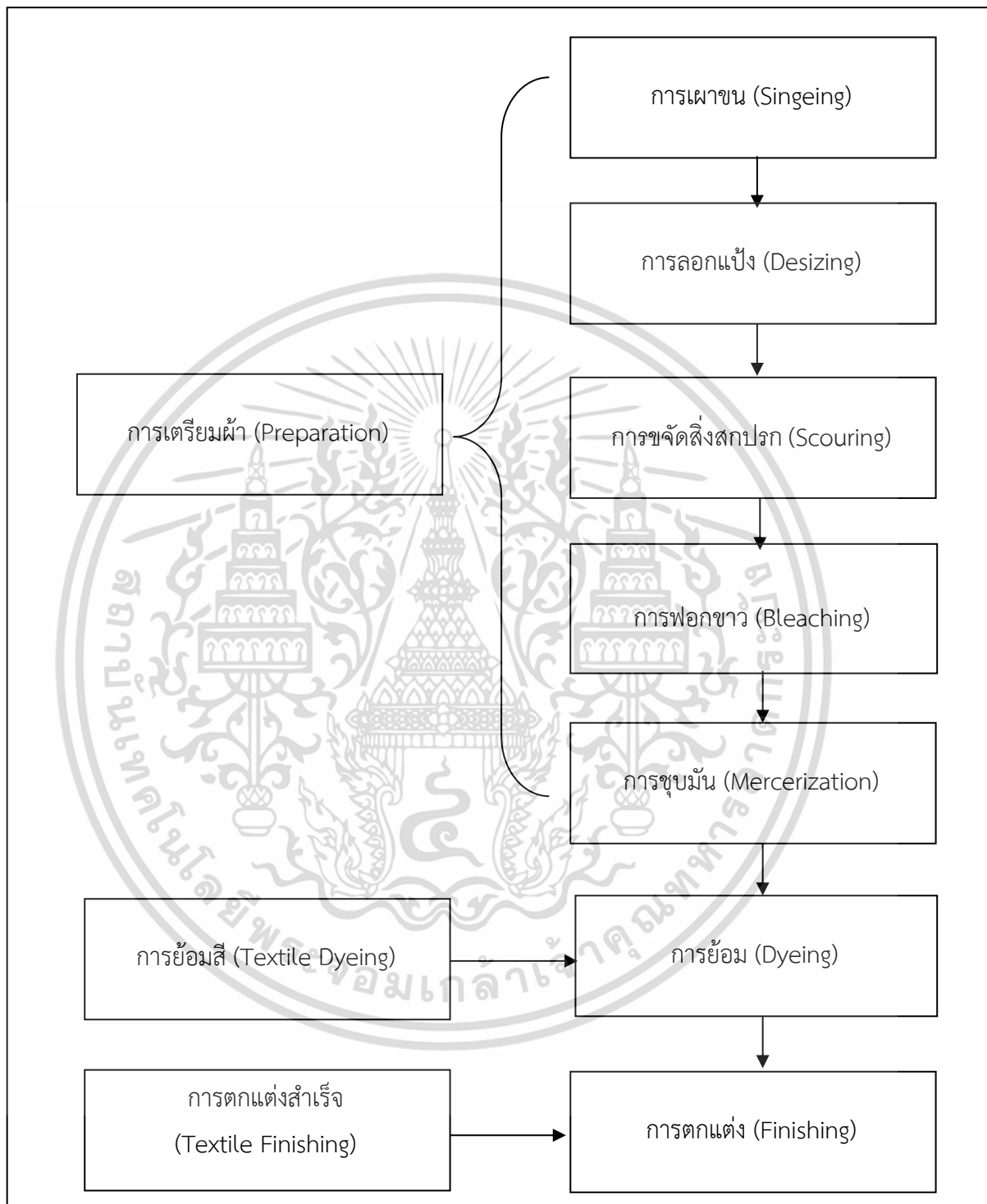
2.1.1.1 การเผาขน (Singeing)

ขั้นตอนการเผาขนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับผ้าพิมพ์ เพื่อให้ได้ลายที่คมชัดและละเอียดการใช้ความร้อนเผาทำลายจะช่วยกำจัดปลายเส้นใยที่โผล่อยู่เหนือพื้นผิวผ้า ส่วนมากจะกระทำกับผ้าฝ้ายชนิดผ้าฝ้าย ผ้าใยผสมที่มีฝ้ายเป็นส่วนผสมและเส้นด้ายที่จะนำไปทำการชุบมัน ในปัจจุบันวิธีการเผาโดยใช้เปลวแก๊ส ถูกนำมาใช้อย่างมากหลาย

2.1.1.2 การลอกแป้ง (Desizing)

การทอผ้าจะต้องมีการลงแป้งให้กับเส้นด้ายยืน เพื่อให้ขั้นตอนในการทอผ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แป้งที่เคลือบอยู่บนเส้นด้ายจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย ดังนั้นก่อนที่จะนำผ้าที่ทอสำเร็จไปทำการตกแต่งในขั้นตอนต่อไปจึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องทำการลอกแป้งที่เคลือบอยู่บนเส้นด้ายออกให้หมด เพื่อให้ผ้ามีคุณสมบัติในการเปียกน้ำได้ดีและสม่ำเสมอทั่วทั้งผืน



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.3 การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

การขจัดสิ่งสกปรกคือขั้นตอนในการกำจัดไขมัน สิ่งสกปรกเจือปนและสารปนเปื้อนต่างๆ ที่ติดมากับเส้นใยผ้า ซึ่งจำเป็นสำหรับวัสดุสิ่งทอทุกประเภท เพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี และสามารถดูดติดสีและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ

2.1.1.4 การฟอกขาว (Bleaching)

เป็นขั้นตอนในการกำจัดสารมีสีในธรรมชาติที่ติดมากับวัสดุสิ่งทอ โดยมีการใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น ซึ่งขั้นตอนการฟอกขาวจำเป็นสำหรับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาว และผ้าที่จะถูกนำไปย้อมสีอ่อนเพื่อให้ได้สีที่สดใสและไม่ผิดไปจากสีย้อมที่ใช้

2.1.1.5 การซบมัน (Mercerization)

เป็นขั้นตอนในการกำจัดสิ่งฝืดและไขมันที่อยู่ในเส้นใยผ้าที่ไม่ถูกกำจัดออก ทำให้เส้นใยฝอยพองตัว มีความสามารถดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น เพิ่มความสดใส เงามัน และความสามารถในการดูดติดสี

2.1.2 การย้อมสี (Textile Dyeing)

การย้อมสีเป็นการใช้สารประกอบเคมีที่ละลายเป็นสารละลายหรือกระจายตัวอยู่ในสารละลายไปทำให้เกิดสีบริเวณผิวหน้าและบริเวณบนผิวรอบตัดขวางของวัสดุเพื่อให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมอย่างถาวร โดยทั่วไปสีย้อมจะต้องทำให้อยู่ในรูปของสารละลาย และให้มีการดูดซึมสารละลายสีย้อม แรงที่ทำให้เกิดการดูดซึมและเกาะติดบนเส้นใยของโมเลกุลสีย้อม อาจเป็นแรงทางเคมี เช่น แรงโควาเลนต์ หรือแรงดึงดูดทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาล ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอของสีย้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการย้อม ค่าความเป็นกรด-ด่าง และสารช่วยย้อม

2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

เป็นการตกแต่งสิ่งทอในขั้นตอนสุดท้าย เพื่อทำการปรับปรุงเปลี่ยนแปลง หรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์ เช่น เพื่อเพิ่มความนุ่มให้ผืนผ้า และความมันเงา เป็นต้น

2.2 ประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำเสีย

การใช้สารเคมีในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้น มีทั้งสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้สารเคมีหลายชนิดในปริมาณต่างๆ โดยน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการฟอกย้อมนั้นจะมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งอาจจะจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญๆ ได้ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 สีย้อม

สีย้อมที่เหลือจากการย้อมเส้นใยมีการดูดซึมแค่บางส่วน ทำให้สีย้อมที่เหลือถูกปล่อยออกมากับน้ำเสีย ปริมาณสีที่คงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2.2.2 สารเคมีที่ใช้ช่วยในการฟอกย้อม และสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ

สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมและการตกแต่ง มีอยู่หลายประเภท แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

- 1) สารช่วยย้อม ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก สารช่วยเปียก และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้สม่ำเสมอ
- 2) สารเคมีพื้นฐาน เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ต่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง
- 3) สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา และสารกันไฟ

สารเคมีต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่สารเคมีเหล่านี้จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อม หรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมากับน้ำเสีย

2.2.3 สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย

วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมจะมีสิ่งสกปรกเจือปนมาในระหว่างกระบวนการผลิต และติดมากับธรรมชาติ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารซีผึ้ง ไชมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตยังมีการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พวกสารหล่อลื่น และแบ่งที่ใช้ในการลงแป้งเส้นด้ายยืน เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนเตรียมผ้าก่อนการมาฟอกย้อม และหลุดติดตามในน้ำเสีย

2.2.4 เศษเส้นใย

น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งหากมีในปริมาณที่มากก็จะทำให้เครื่องย้อมเกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียภายในเครื่อง นอกจากนี้ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ยังมีการปนเปื้อนสารโอลิโกเมอร์ที่อาจจะหลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนไปกับน้ำเสียด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 สิ่งสกปรกอื่นๆ

น้ำเสียในกระบวนการฟอกย้อมยังมีสิ่งสกปรกเจือปนชนิดอื่นๆ อีก เช่น สารประกอบในกลุ่มคลอรีเนตเตทเบนซีน สารเคมีที่ใช้ในการรอยเปื้อนบนผ้า และสารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่อง เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวอาจส่งผลในภายหลังอย่างมากต่อลักษณะน้ำเสียนี้

2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ลักษณะสมบัติน้ำเสียในโรงงานฟอกย้อมประเภทต่างๆ จะมีความแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และสารเคมีที่ใช้ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของลักษณะสมบัติน้ำเสียในแต่ละโรงงานยังขึ้นอยู่กับเวลาและฤดูกาล แต่โดยทั่วไปมลพิษในน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานฟอกย้อมมีดังนี้

2.3.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH เป็นตัวบ่งชี้ค่าจำกัดของสารอันตรายที่มีผลกระทบต่อผู้บริโภค ระหว่างการย้อมจะมีค่า pH สูงมากประมาณ 9.0 – 12.0 ซึ่งเกิดจากสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ดังนั้น จึงต้องควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วง pH 4.0-9.0 และทั่วไปคือ 5.5-7.0 ค่าโดยมาตรฐานตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้คือ 5.5-9.0

2.3.2 BOD (Biochemical Oxygen Demand)

ปริมาณของออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งแบคทีเรียจะใช้เวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ 5 วัน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณความสกปรกของน้ำเสีย ในโรงงานฟอกย้อมค่าความสกปรกของน้ำเสียเกิดจากกระบวนการลอกแป้งสูงถึงร้อยละ 50 ของกระบวนการทั้งหมด โดยมาตรฐานตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้คือ ไม่เกิน 60 มก./ล.

2.3.3 COD (Chemical Oxygen Demand)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณความสกปรกของน้ำเสียคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งถ้าค่าซีโอดีสูง แสดงถึงว่าน้ำเสียมีความสกปรกมาก ในกระบวนการฟอกย้อมค่าซีโอดีเกิดจากสีย้อม สารช่วยย้อม สารตกแต่งและสารซักฟอก โดยมาตรฐานตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้คือ ไม่เกิน 400 มก./ล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)

ของแข็งแขวนลอยมีผลทำให้ค่าบีโอดี และซีโอดีสูงขึ้น ซึ่งเกิดมาจากปริมาณของแข็งที่กรองได้ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว แล้วนำไปอบให้แห้ง โดยในโรงงานฟอกย้อมของแข็งแขวนลอยเกิดมาจากเศษเส้นใย โดยมาตรฐานตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้คือไม่เกิน 50 มก./ล.

2.3.5 สี (Color)

แม้ว่าค่าซีโอดีของน้ำทิ้งหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดจนมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานแล้ว แต่เมื่อมองด้วยตาเปล่าสีของน้ำทิ้งก็ยังจัดว่าเป็นน้ำเสีย โดยในปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดค่ามาตรฐานของปริมาณสีที่ปล่อยสู่แหล่งน้ำ

2.4 สี

สีที่พบในแหล่งน้ำแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

2.4.1 สีแท้หรือสีจริง (True Color) หมายถึง สีที่เกิดจากสารต่างๆ ในน้ำและละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ โดยสารประเภทของกรดฮิวมิก และฟัลเวอิก ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต และผลิตภัณฑ์จากการเผาผลาญของสิ่งมีชีวิต จะมีความเสถียรมากจนไม่สามารถย่อยสลายละลายออกได้โดยการกรอง การกำจัดสีแท้จึงทำได้ยาก

2.4.2 สีปรากฏ (Apparent Color) หมายถึง สีที่เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่สะท้อนให้มองเห็นได้ตา เช่น แพลงก์ตอนพืช และแพลงก์ตอนสัตว์ ตะกอนดินและทรายที่เป็นซากพืชซากสัตว์สามารถกำจัดออกได้ด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การตกตะกอนหรือการกรอง

สำหรับสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมีทั้งสีแท้และสีปรากฏ โดยสีปรากฏมักจะเป็นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมทอผ้า ฟอกย้อม เกิดจากการแขวนลอยในน้ำ ซึ่งสีของน้ำเสียมาจากการปนเปื้อนสารเคมีในกระบวนการผลิต โดยอาจจะแบ่งประเภทตามการแตกตัวให้ประจุ โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยที่ซับซ้อน และหมู่ช่วยละลาย เป็นต้น

2.4.3 หน่วยของสี

หน่วยสีที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมีหลากหลายหน่วย เช่น หน่วยแพลตินัมโคบอลต์(Platinum-Cobalt unit) และหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI unit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.1 การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ (Platinum-Cobalt unit)

วิธีนี้กำหนดโดย American Public Health Association (APHA) โดยแพลตินัมโคบอลต์มาตรฐาน เป็นการวัดสีของน้ำตัวอย่างเทียบกับสารละลายสีมาตรฐาน ซึ่งสารละลายมาตรฐานจะมีสีเหลืองคล้ายกับสีของแหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดยเตรียมได้จากสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะคลอโรแพลตินิก (K₂PtCl₆) และ โคบอลต์ (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (CoCl₂ · 6H₂O) ที่ความเข้มข้นต่างๆ (สายรุ้ง นพขุนทด (วิทยานิพนธ์) 2554) กล่าวไว้ว่าโดยสารละลาย มาตรฐาน 1 หน่วยสี (แพลตินัมโคบอลต์) หมายถึง ความเข้มข้นสีของสารละลายมาตรฐานแพลตินัมโคบอลต์ซึ่งมีความเข้มข้นของแพลตินัมเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของคลอโรแพลตินิก การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ ไม่เหมาะแก่การใช้วัดค่าความเข้มข้นสีของน้ำเสียอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความเข้มข้นสูง และเกิดสารอนินทรีย์ต่างๆ

2.4.3.2 การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI unit)

ADMI ย่อมาจาก American Dye Manufacturers Institute เป็นหน่วยมาตรฐานในการวัดค่าสี นิยมใช้อุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากมีการปนเปื้อนของสีย้อมสังเคราะห์และเม็ดสีในน้ำเสีย ซึ่งการวัดค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอจะตรวจวัดปริมาณของสีในทุกหน่วยสี จึงมีวิธีการที่ซับซ้อนมากกว่าการวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ โดยวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอจะวัดโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิSSION (%Transmission) ของตัวอย่างน้ำในทุกๆ 10 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร วัดปริมาณเม็ดสีตั้งแต่เฉดสีม่วงถึงเฉดสีแดง ซึ่งเป็นการวัดค่าสีที่แท้จริง วิธีหาค่าสีจะใช้สมการของ Adam-Nickerson Chromatic Value คือ ถ้าเรานำสี ก และ ข มาละลายในน้ำโดยให้ความเข้มข้นที่มองเห็นด้วยตาเปล่ามีค่าเท่ากันค่าสีทั้งสองสีนี้จะมีค่าเอดีเอ็มไอเท่ากัน ปัจจุบันหน่วยงานของรัฐได้มีการและบังคับใช้โดยการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานค่าสีของน้ำทิ้ง ต้องไม่เกิน 300 ADMI

2.5 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารสีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน มีความสามารถในการละลายน้ำได้ แต่ในบางชนิดที่ไม่สามารถละลายน้ำได้จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์แทน สีย้อมที่มีการผลิตขึ้นมา มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมสีโมเลกุลของสีย้อมจะแทรกซึมเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยทำให้โครงสร้างผลึกของวัตถุทำลายชั่วคราว สามารถสร้างพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ได้โดยตรงกับวัตถุที่ต้องการจะย้อม สีที่เห็นในสีย้อมเกิดจากช่วงการดูดกลืนพลังงานที่แตกต่างกันของอิเล็กตรอนในพันธะคู่ในโมเลกุลของสีย้อม ช่วงความยาวคลื่นของพลังงานที่มองเห็นได้คือ 400-700 นาโนเมตร ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีย้อมที่มีโครงสร้างโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน และดวงตามนุษย์สามารถรับพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต่างกันได้ ดังนั้นโมเลกุลของสีย้อมที่แตกต่างกันจึงแสดงสีที่ต่างกันต่อดวงตาของเรา นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งสีย้อมออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามแหล่งที่มา ดังนี้

2.5.1 สีสั่งเคราะห์หรือสีเคมี

เป็นสีที่เกิดจากกระบวนการทางเคมี มนุษย์มีการสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อให้ได้สีที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สีสั่งเคราะห์หรือสีเคมีนิยมใช้ในการย้อมเส้นใยแต่ละประเภท เนื่องจากเป็นสีที่มีเม็ดสีเข้มข้นสูงมาก จึงสามารถนำใช้ที่ปริมาณน้อยได้ แต่สีสั่งเคราะห์หรือสีย้อมก็ยังคงมีผลเสียอยู่มาก เช่น น้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการปนเปื้อนสารเคมีของสีสั่งเคราะห์ที่ใช้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้ง น้ำ และดิน เป็นต้น นอกจากนี้ อาจจะทำให้เกิดมลพิษสูงในระหว่างกระบวนการผลิต

2.5.2 สีย้อมธรรมชาติ

เป็นสีย้อมที่ได้มาจากแหล่งธรรมชาติ ได้แก่ ส่วนประกอบของพืช สัตว์ และแร่ธาตุ เช่น สีน้ำเงินได้จากต้นคราม สีแดงหรือสีเหลืองจากรากของต้นเข็ม เป็นต้น นอกจากนี้ข้อดีของสีธรรมชาติ ได้แก่ น้ำทิ้งที่ได้ก็จะประกอบด้วยสารธรรมชาติที่ย่อยสลายง่าย และผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวมีความเป็นพิษต่ำ หรือไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่ข้อด้อยของสีธรรมชาติ ได้แก่ เม็ดสีไม่เข้มข้นเท่าสีสั่งเคราะห์ส่งผลให้การนำไปใช้ต้องใช้ในปริมาณที่มาก จึงทำให้เกิดการคลาดแคลน

2.5.3 ประเภทของสีย้อม

ปัจจุบันมีการผลิตสีสั่งเคราะห์มากมาย การจำแนกประเภทของสีย้อมที่นิยมที่สุดคือ การจำแนกสีตามการนำไปใช้ เพราะต้องมีความทนทานต่อการซัก ทนแสง และต้องทนความร้อน โดยสีแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติของสีย้อม มีสูตรโครงสร้างทางเคมี รวมถึงวิธีการใช้ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้สีจึงมีความสำคัญมากต่อการย้อมกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมแบ่งสีย้อมตามวิธีใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทของสีย้อม

ประเภทของสีย้อม	สมบัติทางกายภาพเคมี	กลไกในการติดทนของสี
1. สีเอซิด (acid dye)	เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ ละลายน้ำได้ดี กระจุก	พันธะไอออนิก
2. สีเบสิก (basic or cationic dye)	เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ ละลายน้ำ ได้ดี กระจุก	พันธะไอออนิก
3. สีดีสเพอร์ส (Disperse Dyes)	ไม่ละลายน้ำ แต่แขวนลอยตัวในน้ำ เมื่อมีสารช่วยกระจาย	คอลลอยด์ของสีย้อมดูดซับ เส้นใย
4. สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)	ละลายน้ำได้ดี กระจุก ติดทนใน ทุกสภาวะ	พันธะโควาเลนต์
5. สีไดเรกต์ (Direct Dyes)	ละลายน้ำได้ดี กระจุก ใช้ย้อมเส้น ใยเซลลูโลส	พันธะไฮโดรเจน

2.6 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)

สีย้อมรีแอคทีฟ เป็นสารสีที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับตำแหน่งที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใย ทำให้สีรีแอคทีฟติดอยู่บนเส้นใยด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมีความคงทนสูงต่อการซักล้างและขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH-) และหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ หมู่อะมิโน หมู่ไทออล หมู่ไฮดรอกซิลในขนสัตว์ หรือหมู่อะมิโนในโพลีเอไมด์ สีย้อมรีแอคทีฟได้รับความนิยมในการนำไปใช้ เนื่องจาก มีความคงทนต่อการซัก และทนต่อแสงแดด ใช้ย้อมได้ง่าย ให้สีที่ชัดและให้ความสดใส นอกจากนี้ยังมีหลากหลายสีให้เลือกใช้

2.6.1 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟ

มีโครงสร้างพื้นฐาน 2 ส่วน ดังนี้

- 1) เป็นกลุ่มสารหรือกลุ่มเคมีหลักที่ทำให้เกิดสี (Color Substance)
- 2) หมู่พันธะที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีกับเส้นใย

จากโครงสร้างพื้นฐานทั้ง 2 ส่วนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้สารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างสูตรทางเคมีของสีรีแอคทีฟจะแสดง

ได้ดังภาพที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

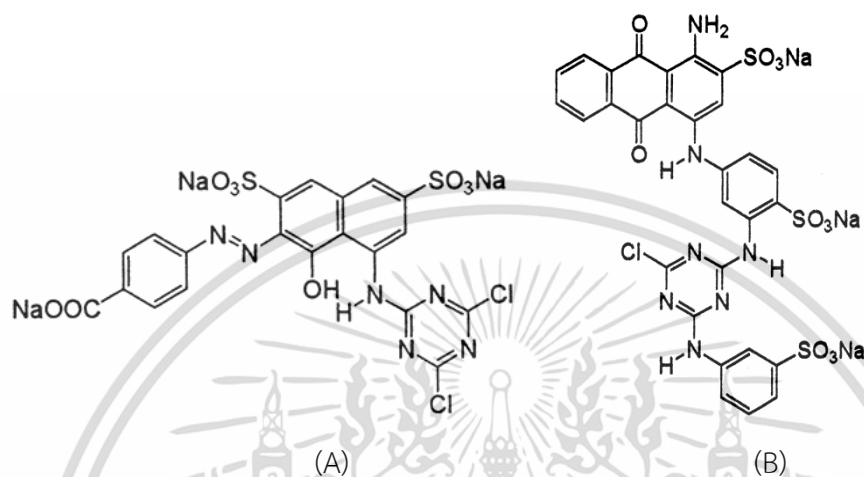
R - B - X - F

R = Chomegen

B = Bridging group (linkage group)

X = Reactive group

F = Fiber macromolecule



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างสีย้อม Reactive Red 11 (A) โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5 (B)

2.6.2 การกำจัดสีย้อม

สาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำมาจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยน้ำทิ้งสูงส่งแวล้อมซึ่งหากไม่มีการบำบัดก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิตของประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น และในปัจจุบันมีการใช้สีย้อมสังเคราะห์หรือสีย้อมเคมีในอุตสาหกรรมฟอกย้อมอย่างมาก สีย้อมส่วนใหญ่ได้ถูกพัฒนาขึ้นให้มีความคงทนสูง ทำให้ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ ทำให้น้ำที่ผ่านออกจากระบบบำบัดยังคงมีความเข้มข้นของสีสูง ด้วยเหตุนี้ทำให้ต้องมีการพัฒนาระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเพื่อรับมือกับปัญหาน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เพิ่มมากขึ้น

Pham,H,Young,S.and,Ngoc,H. 2022. ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟ C.I. Reactive Blue 160 ด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้นควบคู่กับโหมดปฏิบัติการแบบแบทช์โดยนำน้ำทิ้งจากการย้อมผ้าที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 200 มก./ล. นำไปให้โอโซนที่ระยะเวลา 25 นาที พบว่าหลังจากมีการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนสามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างสมบูรณ์ โดยความเข้มข้นของสีย้อมคงเหลือ = 0.53 มก./ล. คิดเป็น 99.62% ของการกำจัด

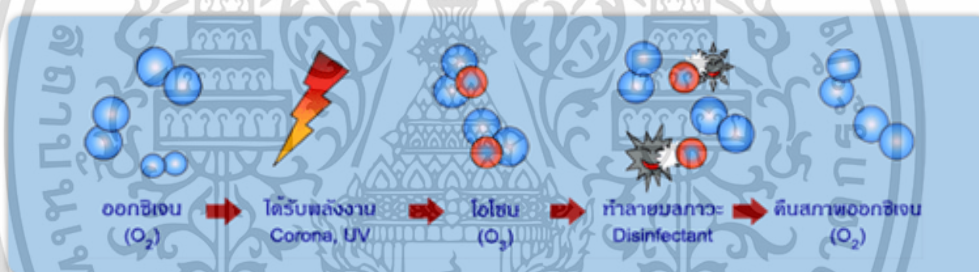
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 กระบวนการโอโซนเนชั่น (Ozonation)

กระบวนการโอโซนเนชั่นเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม กระบวนการโอโซนเนชั่น เป็นกระบวนการทางเคมีที่โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการเป็นสารฆ่าเชื้อโรคในน้ำ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในด้านอื่นๆอีก เช่น ใช้เพื่อควบคุม รส สี และกลิ่นในน้ำ และมีการพัฒนาเพื่อนำโอโซนมาใช้มาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงจึงสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก

2.7.1 การเกิดโอโซน

โอโซนเกิดจาก อะตอมของออกซิเจน 3 อะตอมรวมกันเป็น 1 โมเลกุลของโอโซน(O₃) ตามปกติออกซิเจนจะประกอบกันในลักษณะ 2 อะตอม เป็น 1 โมเลกุล(O₂) ซึ่งมีความสมบัติต่างกันมากคือ O₂ จะสามารถคงสภาพอยู่ได้หลายสภาวะหรือกล่าวได้ว่ามีความเสถียร แต่ก๊าซโอโซน (O₃) จะไม่คงตัวหรือไม่เสถียร เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความร้อน ความดัน และการสัมผัสกับสารที่มีพลังงานต่ำกว่าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็ว ซึ่ง O₃ มีปฏิกิริยาสูงถึง 2.07 Volt (พรทิพย์, 2560) ดังแสดงในภาพที่ 2.3



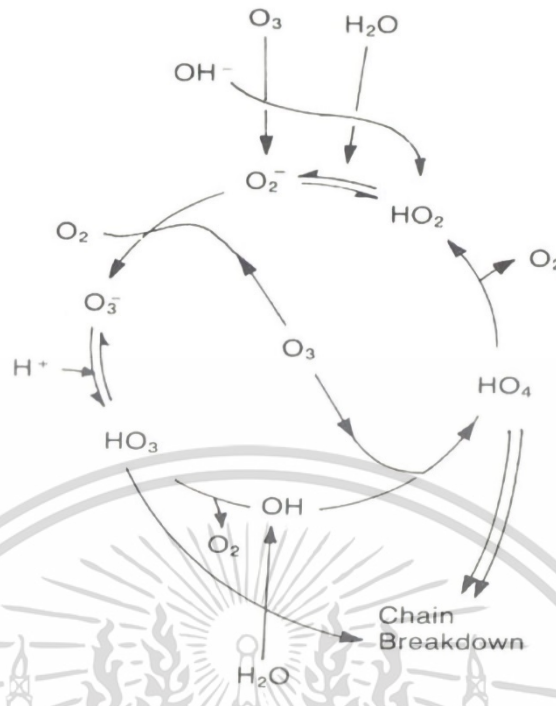
ภาพที่ 2.3 กระบวนการเกิดโอโซน (คลังความรู้SciMath, 2560)

2.7.2 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรสามารถสลายตัวเป็นออกซิเจนโดยแตกตัวให้

อนุมูลต่าง ๆ ซึ่งอนุมูลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารมลพิษในน้ำเสีย โดยปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโอโซน อาทิ ค่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำเสีย ความเข้มข้นของสารตัวกลางในน้ำเสีย ความเข้มข้นของโอโซน เป็นต้น โดยการสลายตัวของโอโซนจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเป็นด่าง (Alkalinity) เพิ่มขึ้น ทำให้ โอโซนทำปฏิกิริยากับน้ำและไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ในปริมาณมาก โดยในการสลายตัวของโอโซนในน้ำจะมีไฮดรอกไซด์ไอออนเป็น Promoter ของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนเมื่อสลายในน้ำเป็นอนุมูลอิสระชนิดต่างๆ (ต่อพงศ์, 2562) ดังแสดงในภาพที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งการเข้าถึงเอกสารนี้จำเป็นต้องใช้บัญชีผู้ใช้และรหัสผ่านที่ถูกต้อง ไม่อย่างนั้นจะไม่สามารถเข้าถึงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ (Langlais, 1991)

2.7.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน

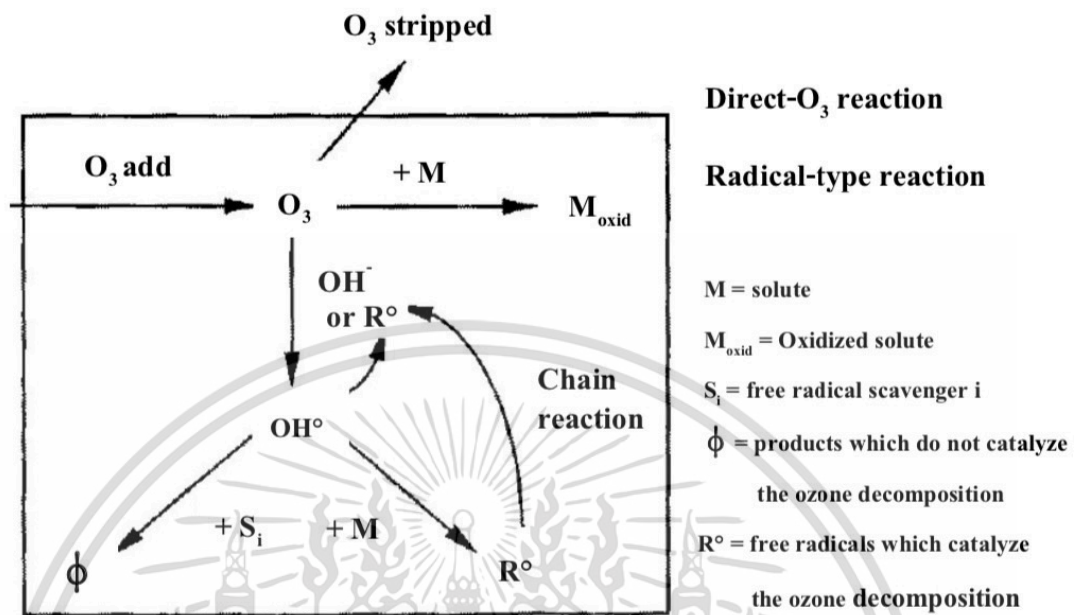
กลไกในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซนเนชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน (ต่อพงศ์, 2562) ซึ่งผลลัพธ์ในแต่ละเส้นทางของปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิเดชันที่แตกต่างกัน และปฏิกิริยาจะมีชนิดของจลศาสตร์ที่ไม่เหมือนกัน

2.7.3.1 การทำปฏิกิริยาทางตรง (Direct Attack) สารอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของโอโซนโดยตรง (ปฏิกิริยา Electrophilic หรือ Dipolar Cycloaddition) โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์บริเวณพันธะคู่ ($C=C$, $C=C-O-R$, $C=C-X$) หรืออะตอมที่มีประจุลบ (N, P, O, S และ Nucleophilic C) สาร Aromatics ที่มีหมู่ OH, CH_3 หรือ OCH_3 อยู่ตรงตำแหน่ง Ortho จะทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ดี (High Reactivity) แต่ถ้ามีหมู่ NO_2 , COO หรือ CHO ปฏิกิริยาจะเกิดช้า ดังปฏิกิริยาที่ 1 ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ M คือสารอินทรีย์ ภาพที่ 2.5 และ 2.6 แสดงการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์ทั้งโดยตรงและโดยอ้อม ทั้งนี้ขึ้นค่า pH เป็นสำคัญในการกำหนดปริมาณการทำปฏิกิริยาดังกล่าว



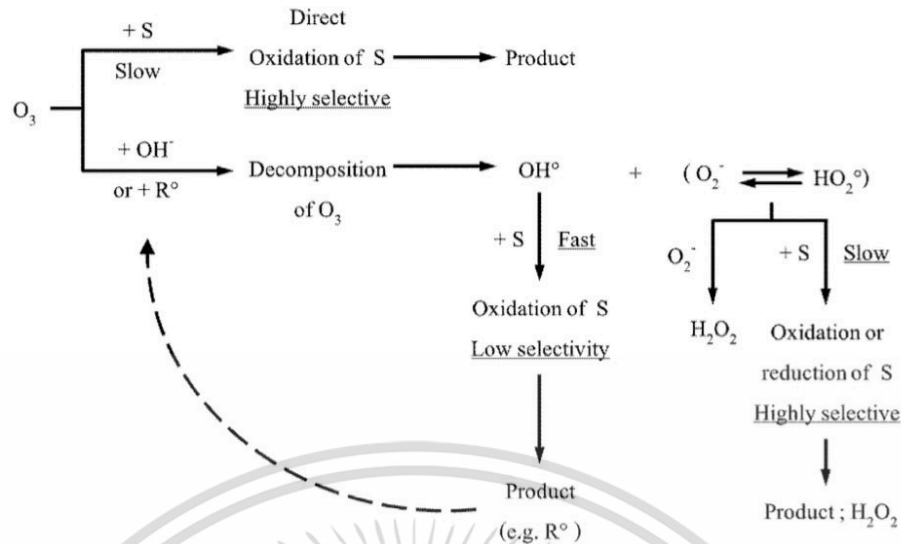
ภาพที่ 2.5 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์แบบโดยตรง (จันทร์อนงค์, 2561)

2.7.3.2 การทำปฏิกิริยาทางอ้อม (Indirect Attack) สารอินทรีย์จะถูก

ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาขั้นที่ 1 ได้แก่ OH° และ OH₂° ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้ จะทำ ปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้อย่างว่องไว โดยประจุเหล่านี้ จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์อีกที่ หนึ่ง และสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ประเภท Acid, Aldehydes, Ketones และพวก Less Highly Activated Aromatic ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังปฏิกิริยาที่ 2 ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์ (จันทรณรงค์, 2561)

2.7.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนเนชัน

1. อุณหภูมิ

โอโซนจะสามารถละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิต่ำแต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้นโอโซนจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยลง เนื่องจากอุณหภูมิต่ำจะทำให้โมเลกุลของโอโซนสลายตัวเป็นออกซิเจนได้อย่างรวดเร็วหรือมีการแตกตัวเพิ่มมากขึ้น (Atav, 2013 ; Okafo, 2.011) งานวิจัยของ Dehouli *et al.* (2010) ได้ศึกษาอิทธิพลของสมบัติของค่า pH, อุณหภูมิและ activated carbon เกี่ยวกับปฏิกิริยาของโอโซน activated carbon เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็น $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่งผลให้ โอโซนเกิดการสลายตัว โดยมีค่าคงที่ของอัตราการสลายตัวของโอโซน (k_D) เพิ่มจาก 0.030 min^{-1} เป็น 0.097 min^{-1}

2. ค่าพีเอช

โอโซนสามารถบำบัดน้ำเสียได้ทั้งในสภาวะที่ค่าพีเอชของน้ำเสียเป็นกรดและเบสซึ่งที่พีเอชเป็นกรดโอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ แต่ในพีเอชที่เป็นเบสโอโซนจะแตกตัวเป็นแตรดิคอลล เข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดพีเอชเป็นกรด (Gottschalk, 2000; Atav, 2013) โดยงานวิจัยของ Parsa and Negahdar (2012) ได้ทำการศึกษาค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารแต่งสีหรือสารสีย้อมของกรดสีน้ำเงิน 92 (Acid Blue 92) โดยกระบวนการโอโซนเนชัน การใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(O_3/H_2O_2) และ การใช้โอโซนร่วมกับถ่านกัมมันต์ จากการเผ่าสังเกตและทดลองพบว่ากรดสีน้ำเงิน 92 (Acid Blue 92) มีอัตราการย่อยสลายที่ค่อนข้างดีในกระบวนการโอโซน โดยการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (O_3/H_2O_2) ที่ค่าพีเอชสูง มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดและ ในขณะที่ค่าพีเอช 4 การใช้โอโซนร่วมกับถ่านกัมมันต์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่า ผลสรุปของงานวิจัยคือค่าพีเอชสูงสามารถกำจัดสีได้ดีกว่าค่าพีเอชที่ต่ำ

3. ระยะเวลาในการเติมโอโซน

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระบวนการเติมโอโซนจะเกิดจากโมเลกุลโอโซนหรือแรดิคอลลต่าง ๆ ที่เกิดจากการสลายตัวของโอโซน ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณโอโซนเข้าไปในระบบหรือเพิ่มระยะเวลาการเติมโอโซนจะส่งผลให้มีโมเลกุลโอโซนหรือแรดิคอลลเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในระบบเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยของอรชุดาและอนรรักษ์ (2550) ได้ศึกษาการหาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน ผลการวิเคราะห์พบว่าในเวลาที่มากขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4. สารอินทรีย์ในน้ำ

สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการเติมโอโซน น้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์มากจะส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณโอโซนที่เพิ่มขึ้นหรืออาจใช้เวลาในการบำบัดที่นานขึ้น งานวิจัยของ Turhan (2012) ได้ทำการศึกษาลดสีของสีย้อมพื้นฐานในสิ่งทอโดยกระบวนการโอโซน สารละลายเริ่มต้นของสีเมทิลีน บลู (Methylene Blue) ที่ 2000 mL ค่าความเข้มข้นที่ 400 mg/L ทำการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน หลังจากบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมลดลงจาก 1136 mg/L เหลือ 817 mg/L และเมื่อบำบัดในระยะเวลา 120 นาที ค่า COD ลดลงเหลือ 398 mg/L

2.8 กระบวนการโอโซนเนชันแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Ozonation)

การเร่งปฏิกิริยาโอโซนสามารถพิจารณาได้สองประการ ประการแรกโอโซนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งขึ้นอยู่กับการกระตุ้นโอโซนโดยไอออนโลหะที่มีอยู่ในสารละลายที่เป็นน้ำและ ประการที่สองโอโซนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันในที่มีโลหะออกไซด์หรือโลหะ ซึ่งออกไซด์ของโลหะเป็นตัวรองรับการเร่งปฏิกิริยาของโอโซนพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดออกจากน้ำดื่มและน้ำเสีย (Hordern *et al.*, 2003) ซึ่งในปัจจุบันจึงมีการนิยมนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับการเติมโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท(มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ม.ป.ป) คือ

2.8.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalysts) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลวตัวอย่างเช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ด้วยเอนไซม์ และปฏิกิริยาในสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจนทำให้ง่ายต่อการศึกษา แต่ก็มีข้อเสียคือมักสลายตัวหรือเสียสภาพในสภาวะที่ใช้ความร้อน หรือความดันสูง

2.8.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalysts) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์พบได้ในอุตสาหกรรมหลายๆ อย่าง เช่น ปุ๋ย ผลิตภัณฑ์ยา เชื้อเพลิง เส้นใยสังเคราะห์ ตัวทำละลาย เนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกมา จากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือนำไปใช้ได้ง่ายกว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ดังตาราง 2.2 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติและปัจจัยต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธ์

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆ ในการเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และวิวิธพันธ์

ปัจจัย	การเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์	การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์
ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อเข้าสู่สมดุลเมื่อเทียบปริมาณโลหะที่เท่ากัน	สูง	แปรค่าได้
สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา	สูง	แปรค่าได้
สภาวะของปฏิกิริยา	ไม่รุนแรง	รุนแรง
อายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา	แปรค่าได้	นาน
ความไวของตัวเร่งปฏิกิริยา	ต่ำ	สูง
การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่	แพง	สามารถทำได้ง่าย
การปรับสมบัติเชิงโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเปลี่ยนอะตอมที่เป็นองค์ประกอบ	อาจทำได้	ทำไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ทางการค้า
ที่มา : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (ม.ป.ป)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 เศษเหล็ก

เนื่องจากเศษเหล็กถือเป็นวัตถุพิษรุนแรงที่สามารถนำกลับมาหลอมและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กหรือเหล็กกล้าได้อีก ดังนั้นคุณลักษณะของเศษเหล็กที่เป็นที่ต้องการจึงเกี่ยวข้องกับสภาพของเศษเหล็กทั้งในเชิงกายภาพและเชิงเคมี กระบวนการหลอมเศษเหล็กนิยมใช้เตาไฟฟ้าทั้งชนิดที่ใช้เตาอาร์คไฟฟและชนิดเหนี่ยวนำ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่, 2553) ซึ่งเศษเหล็กบางชนิดมีธาตุผสมในเหล็กสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆได้

2.9.1 เศษขี้กิ้ง

สามารถแบ่งลักษณะและความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้ดังนี้

2.9.1.1 เศษขี้กิ้งเหล็กกล้า (Machine shop turnings)

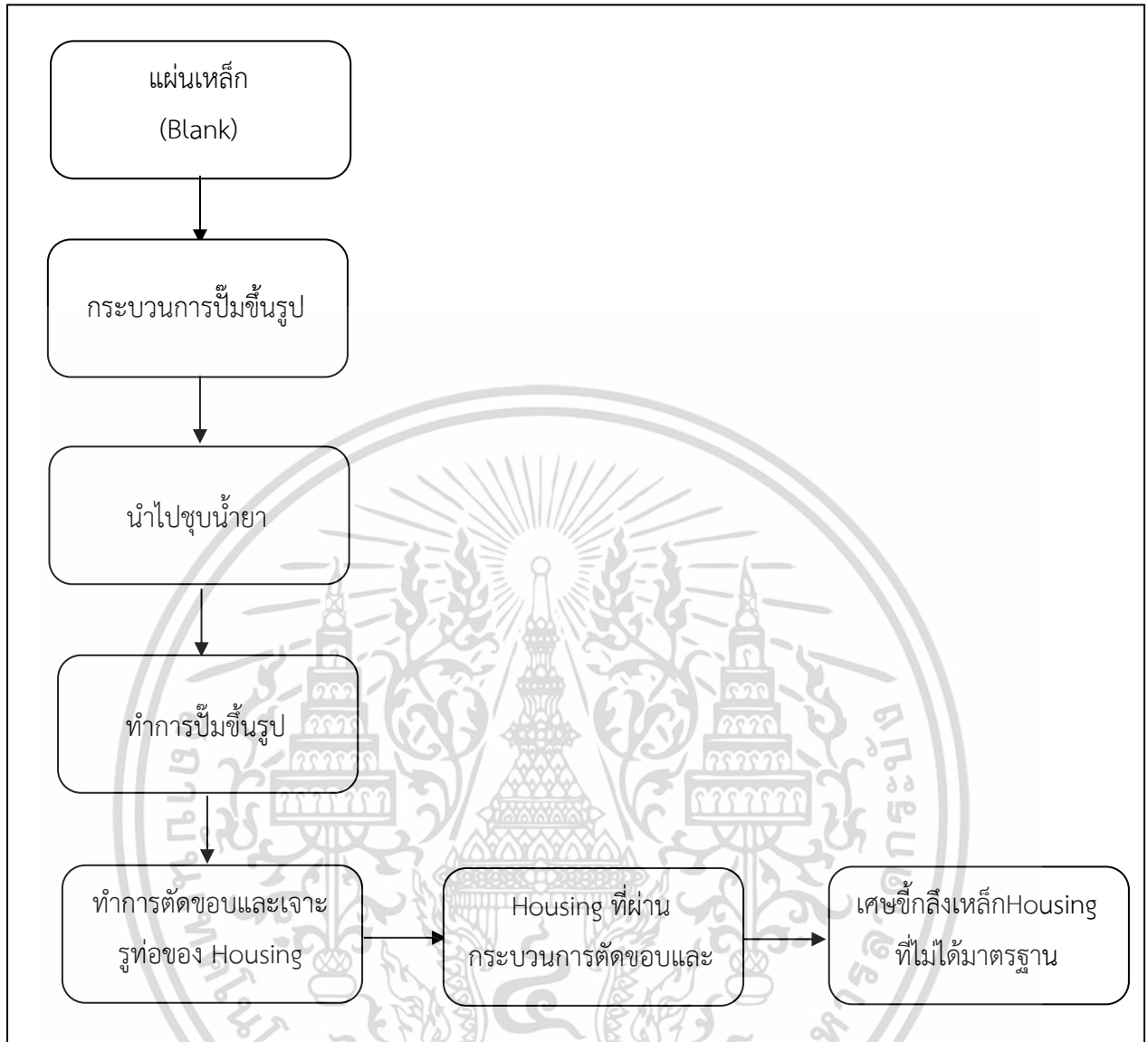
เศษเหล็กประเภทนี้ เป็นเศษเหล็กที่ได้จากการตกแต่งชิ้นส่วนเหล็กกล้าด้วยเครื่องมือกล อาทิเช่น การเจาะ การกัด หรือการกลึง เป็นต้น เศษขี้กิ้งเหล็กนั้นจะต้องเป็นเศษใหม่ที่ไม่มีการเติมธาตุผสมด้วยเครื่องมือกล อาทิเช่น การเจาะ การกัด หรือการกลึง เศษขี้กิ้งนั้นจะต้องเป็นเศษใหม่ที่ไม่มีการเติมธาตุผสมด้วยเครื่องมือกล อาทิเช่น การเจาะ การกัด หรือการกลึง เศษขี้กิ้งนั้นจะต้องเป็นเศษใหม่ที่ไม่มีการเติมธาตุผสมด้วยเครื่องมือกล อาทิเช่น การเจาะ การกัด หรือการกลึง

2.9.1.2 เศษขี้กิ้งเหล็กหล่อ (Iron borings)

เศษเหล็กประเภทนี้เป็นเศษเหล็กที่ได้จากการตกแต่งชิ้นส่วนเหล็กหล่อชนิดที่ไม่มีการเติมธาตุผสมด้วยเครื่องมือกล อาทิเช่น การเจาะ การกัด การกลึง เศษขี้กิ้งนั้นจะต้องเป็นเศษใหม่ที่ไม่มีการเติมธาตุผสมด้วยเครื่องมือกล อาทิเช่น การเจาะ การกัด หรือการกลึง เศษขี้กิ้งนั้นจะต้องเป็นเศษใหม่ที่ไม่มีการเติมธาตุผสมด้วยเครื่องมือกล อาทิเช่น การเจาะ การกัด หรือการกลึง

2.9.2 กระบวนการในการได้เศษขี้กิ้ง

มาจากกระบวนการในการผลิตคอมเพรสเซอร์ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากชิ้นงานในขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 กระบวนการในการได้เศษซีคิ่งเหล็ก

2.9.3 การใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ

2.9.3.1 เทคโนโลยีชีวภาพ

การเคลือบผิวผนังคาร์บอนด้วยผงนาโนเหล็กแล้วใช้สนามแม่เหล็กที่ความถี่สูงทำให้ผงนาโนเหล็กเกิดการสั่นและร้อนขึ้นจนสามารถทำให้เซลล์ของเนื้อที่มีผงนาโนกระจายอยู่ถูกทำลายได้ จึงสามารถนำมาใช้ทำลายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของเนื้องอกหรือเซลล์ที่มีการแบ่งตัวผิดปกติได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3.2 ทำโลหะผสม

ใช้อุณหภูมิโนเหล็กผสมกับอุณหภูมิของโลหะอื่นได้เป็นโลหะผสมที่มีโครงสร้างเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบทำให้มีความแข็งแรง ทนต่อแรงกระแทกและการทำงานหนักได้มากกว่าเหล็กปกติไม่น้อยกว่า 2 เท่ามีน้ำหนักเบาจึงสามารถนำไปผลิตอุปกรณ์กีฬา เช่น ไม้กอล์ฟ

2.9.3.3 กรองสีย้อม

เนื่องจากอนุภาคนาโนเหล็ก มีพื้นที่ผิวมากกว่าเหล็กปกติ ประมาณ 10 – 1000 เท่า จึงนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยผ่านน้ำทิ้งไปบนอนุภาคนาโนเหล็กก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ เนื่องจากอนุภาคนาโนเหล็กช่วยรีดิวซ์สารอินทรีย์ที่มีสี ทำให้โมเลกุลของสีมีขนาดเล็กลง หรือทำให้สารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นอันตราย เช่น chlorinated compound เกิดปฏิกิริยาได้เป็นสารประกอบที่กำจัดได้ง่ายขึ้น

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ัญญกนต์ และชลอ (2565) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระโถโซเนชันกับการใช้ตะกรันเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ก 5 ที่ทำปฏิกิริยาออกจากน้ำเสีย มีการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าพีเอช และความเข้มข้นของสีย้อมเนื่องจากส่งผลกับประสิทธิภาพในการกำจัด ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ค่า pH และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งผลการศึกษาแสดงผลลัพธ์ดังนี้ การบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียในรูปแบบของซีโอดีที่ระยะเวลา 30 นาที ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม 84.17% และ 62.5% ตามลำดับ ซึ่งดีกว่ากระบวนการโอโซนเนชันเพียงอย่างเดียว และสถานะที่เหมาะสมต่อการบำบัดคือคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 g/L , ค่าพีเอช9 และความเข้มข้นเริ่มต้น 300 mg/L ผลการศึกษาจลนศาสตร์พบว่า การบำบัดโดยกระบวนการโอโซนเนชันเพียงอย่างเดียวและกระบวนการโอโซนเนชันแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองเป็นไปตามรูปแบบของการเกิดปฏิกิริยา

วีรยา (2549) ในงานวิจัยนี้มีการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีในน้ำทิ้งจากโรงเบียร์ที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแล้ว จากการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโอโซนเนชันในการกำจัดสีพบว่าที่ค่า pH 10, อัตราการผลิตโอโซน 200 mg/L/hr และเวลาสัมผัส 25 นาที เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุด ผลการวิจัยพบว่า ทำให้ค่า BOD/COD เพิ่มขึ้น 77.78% ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเพิ่มขึ้น 92.15% และประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้น 74.26% เมื่อนำสถานะที่เหมาะสมข้างต้นไปทำการทดลองในกระบวนการโอโซนเนชันในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ดีขึ้น 74.12% ค่า BOD/COD เพิ่มขึ้น 44.44% และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเพิ่มขึ้น 77.01% ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ BOD/COD แสดงให้เห็นว่าสีบางส่วนในน้ำทิ้งซึ่งก่อนหน้านี้เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากได้ถูกเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์สีที่ง่ายต่อการย่อยสลายได้มาก

ขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอนุภาคแขวนลอยแสดงให้เห็นว่าส่วนหนึ่งของสีในน้ำทิ้งถูกออกซิไดซ์ เป็นของแข็งแขวนลอยที่สามารถกรองออกจากน้ำทิ้งได้ สำหรับกระบวนการผลิตโอโซนค่าไฟฟ้า ประมาณ 70 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลบ.ม.

Hu (2019) ในงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นปัญหาของน้ำทิ้งจากสิ่งทอที่มีการปล่อยน้ำทิ้งเป็น ปริมาณมากซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการศึกษาในที่กระบวนการ โอโซนชั้นและกระบวนการโอโซนชั้นแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อมาช่วยในการกำจัดสีย้อมที่ตกค้างอยู่ ในน้ำทิ้งเพื่อนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแม่เหล็กถูกเตรียมขึ้นเพื่อส่งเสริมการย่อย สลายสีย้อมโดยการกระตุ้นปฏิกิริยาโอโซน ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลอนุภาคแมงกานีสเพอร์ไรต์ แม่เหล็กสูง ($MnFe_2O_4$) ถูกโหลดลงบนวัสดุคาร์บอนแอโรเจล (CA) ได้เป็นวัสดุตัวเร่งที่สมบูรณ์คือ $MnFe_2O_4@CA$ ผลการวิจัยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่พัฒนาขึ้นได้ส่งเสริมการย่อยสลายของสารปนเปื้อน สีย้อมในน้ำทิ้ง โดยการกระตุ้นโอโซนในแง่ของการกำจัดสีและการลดความต้องการออกซิเดชันทาง เคมี และมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ในกระบวนการโอโซนชั้นแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 25% เมื่อเทียบกับการบำบัดที่กระบวนการโอโซนชั้นเพียงอย่างเดียวภายใต้เงื่อนไขการรักษาสภาวะต่างๆ แบบเดียวกัน และการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้นแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถนำน้ำทิ้ง กลับมาใช้ใหม่เพื่อทดแทนน้ำจืดได้โดยไม่ลดทอนคุณภาพสีของผ้าอย่างชัดเจน

Pham, H, Young, S. and, Ngoc, H. 2022. งานวิจัยนี้ศึกษาเพื่อประเมินความ สามารถในการบำบัดสีย้อมและ ค่า COD ในน้ำเสียที่มีสีย้อม C.I Reactive Blue 160 ปนเปื้อน โดย กระบวนการโอโซนชั้น โดยทำการทดสอบทั้งกระบวนการทำงานแบบแบทช์ และกระบวนการทำงาน แบบไหลต่อเนื่อง ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการโอโซนชั้น คือ ค่าพีเอช อุณหภูมิความเข้มข้นของ Na_2CO_3 ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น ความสามารถในการกำจัดสีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม และความสามารถในการลดค่า COD ผลการวิจัยพบว่า กระบวนการโอโซนชั้นมีประสิทธิภาพสูงใน การบำบัดน้ำเสียจากการย้อมสีที่มี C.I Reactive Blue 160 ในน้ำเสีย ในกระบวนการแบบแบทช์ ที่ ระยะเวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดของสีย้อมและ COD คือ 98.04%, 99.84% ตามลำดับ และ 87.31% สำหรับการรักษาความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 200 mg/L และใน กระบวนการทำงานแบบไหลแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดของสีย้อมและ COD คือ 98.04%, 99.84% ตามลำดับ และ 87.31% สำหรับการรักษาความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 200 mg/L

Turhan,K and Ozturkcan, A. 2011. งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการลดสีของสีย้อม พื้นฐานของสิ่งทอในสารละลายน้ำโดยกระบวนการโอโซนชั้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราความต้องการ ออกซิเจนทางเคมี (COD) ของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมพื้นฐานคือเมทิลีนบลู (Methylene Blue) การลดสีของสีย้อมทำได้โดยการเติมโอโซน การวิจัยได้ดำเนินการโดยใช้คอลัมน์ ฟองสบู่แบบแบทช์เพื่อใช้ประโยชน์จากการผสมกลับอย่างเข้มข้นที่มีอยู่ในคอลัมน์ฟองสบู่ เป็นผลให้ ค่า COD ของน้ำเสียที่มีสีย้อมพื้นฐาน ลดลงเหลือ 64.96% และพบว่ามี การลดลงของสีย้อมภายใต้

สภาวะพื้นฐาน ที่ pH 12 การย่อยสลายสีย้อมเมทิลีน บลู ที่สมบูรณ์ใช้ระยะเวลา 12 นาที และมีการบำบัดโดยกระบวนการ โอโซนขั้นตอนเป็นระยะเวลาอีก 16 นาที หลังจากนั้นปฏิกิริยาการย่อยสลายส่วนใหญ่เสร็จสมบูรณ์ การศึกษาทางจลนศาสตร์แสดงให้เห็นว่า ค่าคงที่ของอัตราซึ่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณโอโซนที่ใช้และ ค่า pH ที่สูงขึ้นลดลงแบบลอการิทึมด้วยความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องผลิตโอโซน (Ozone Generator) รุ่น OZ-A1-FT บริษัท OZZON ประเทศไทย
2. ถังปฏิกิริยา (Ozone reactor) เส้นผ่าศูนย์กลาง 5.4 เซนติเมตร ความสูง 40 เซนติเมตร
3. เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น UV1498 บริษัทโปรวิชั่น ไซแอนติฟิก จำกัด ประเทศไทย
4. เครื่องวัด pH ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น UB-10 ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Metter Toledo รุ่น MS204TS
6. เตาย่อยวิเคราะห์ซีโอดี (heating block) ยี่ห้อ Velp รุ่น ECO25 ประเทศอิตาลี
7. หลอดย่อยสลาย (Digestion Vessels) ขนาด 16 x 100 มิลลิเมตร มีฝาถูกเกลียวชนิดที่เอพที
8. สายยางซิลิโคน
9. หัวกระจายอากาศ
10. เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.2 สารเคมี

1. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
2. โซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
3. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) 98% เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย
4. โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
5. เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ferro Construction Products Company Limited ประเทศไทย
6. เฟอร์ไรน อินดิเคเตอร์ ($\text{C}_{36}\text{H}_{24}\text{FeN}_2^{2+}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ferro Construction Products Company Limited ประเทศไทย
7. เมอร์คิวริกซัลเฟต (HgSO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เอสเอ็มเคมิคอลเอ็นจิเนียริง จำกัด ประเทศไทย
8. . ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท อิตัลมาร์(ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮ (FeSO₄) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

10. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท (C₈H₅KO₄) เกรตวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie ประเทศอินเดีย

11. น้ำแป้ง

12. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)

3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ซึ่กลิ่งเหล็กหล่อ ได้รับมาจากโรงงานผลิตมอเตอร์คอมเพรสเซอร์สำหรับเครื่องทำความเย็น นำมาทำความสะอาด

- การเตรียมซึ่กลิ่งเหล็กหล่อ

1. นำซึ่กลิ่งเหล็กมาล้างคราบน้ำมันด้วย Hexane ในตู้ดูดควัน (ใส่ถุงมือยางเพื่อความปลอดภัย)

2. นำมาตากให้แห้ง และ บดละเอียด

3. ร้อนด้วยตะแกรง 200 เมช และนำมาเก็บไว้ในถุงซิปล็อก

ทำการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ หรือ เอ็กซ์เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) พบว่าซึ่กลิ่งเหล็กที่ใช้มี ออกไซด์ของเหล็กในรูป Fe₂O₃ เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูงถึง 97.5%

3.3 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ศึกษา

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง เตรียมโดยละลายสีรีแอกทีฟ REMAZOL BLUE SAM 500 มิลลิกรัมในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรจนถึงขีดวัดในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์สมบัติของน้ำตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.1

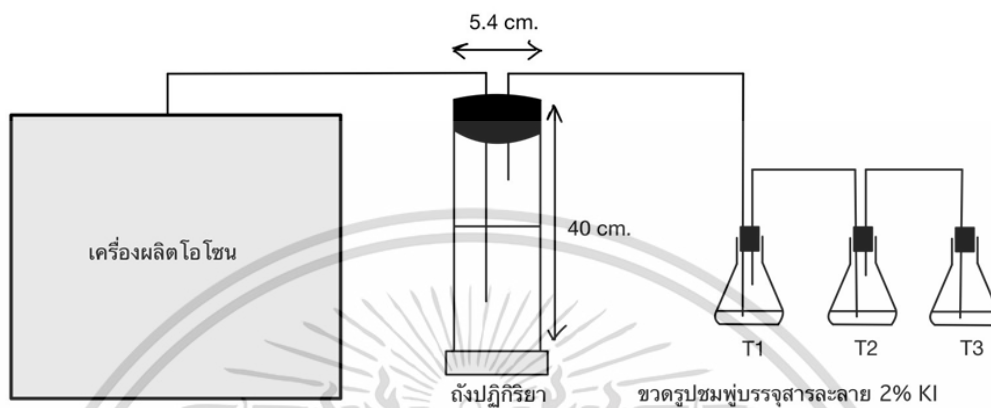
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำตัวอย่าง

สมบัติที่วิเคราะห์	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
พีเอช (pH)	pH meter
สี (color)	ADMI ตามวิธี standard Methods 2120E (APHA, 2005; Wyzzecki and Stiles, 2000)
ซีโอดี (COD)	Closed Reflux, Titriard metric Method ตามวิธี Standard Methods 5220 (APHA, 1992)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ไม่ใช่การค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การหาอัตราการผลิตโอโซน

การศึกษานี้เป็นการทดลองแบบแบทช์ (Batch test) มีแผนผังการทำงานของระบบบำบัดแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังการทำงานของระบบที่ใช้ในการทดลอง

วิธีการหาอัตราการผลิตโอโซนของเครื่องผลิตโอโซน รุ่น OZ-A1-FT (OZZON, Thailand) มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ เข้มข้น 2% ใส่ในถังปฏิกรณ์ และใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL (T1, T2, T3) อย่างละ 100 มิลลิลิตร
2. ต่อหัวกระจายอากาศด้วยสายยางซิลิโคนที่ออกจากเครื่องผลิตโอโซนเข้ากับถังปฏิกรณ์ ทำการปิดจุกยางขวดรูปชมพู่ (T1, T2 และ T3) และต่อแบบอนุกรมดังภาพที่ 3.1
3. เปิดเครื่องผลิตโอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบเป็นเวลา 20 นาที
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลาย 2% KI ในถังปฏิกรณ์และขวดรูปชมพู่ที่สารละลาย KI มีการเปลี่ยนสีจากใสเป็นสีเหลือง ไปวิเคราะห์ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ด้วยวิธีการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (รายละเอียดวิธีการดังแสดงในภาคผนวก ก)
5. ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนเวลาเป็น 30 ,40 ,60, 90, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีและซีไอต์ด้วยวิธีการโอโซนเนชั่น

3.5.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการพ่นโอโซน

1. จัดเตรียมระบบดังภาพที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมขึ้นในข้อ 3.3 ลงในถังปฏิกริยาปริมาตร 500 mL และเติมสารละลาย 2% KI ลงในขวดดักจับไอโซน (T1,T2, T3) ขวดละ 200 mL
3. เปิดเครื่องผลิตไอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบบำบัดน้ำเสียเป็นเวลา 20 นาที เมื่อครบตามกำหนดเวลาที่กำหนด ทำการวิเคราะห์สมบัติน้ำตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.1
4. ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนเวลาในการบำบัดเป็น 20 , 40 ,60, 90 และ120 นาทีตามลำดับ
5. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้ซีลิ่งเหล็กเป็นตัวเร่ง เตรียมในข้อ 3,4 ลงในถังปฏิกริยา ปริมาณ 0.1 กรัม

3.5.2 การศึกษาผลของพีเอช

1. จัดเตรียมระบบดังภาพที่ 3.1
2. เติมน้ำตัวอย่างที่เตรียมขึ้นในข้อ 3.3 ซึ่งปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 3 ลงในถังปฏิกริยาปริมาตร 500 mL และเติมสารละลาย 2% KI ลงในขวดดักจับไอโซน (T1,T2, T3) ขวดละ 200 mL
3. เปิดเครื่องผลิตไอโซนเพื่อเริ่มเดินระบบด้วยระยะเวลาที่ได้จากข้อ 3.5.1 เมื่อครบตามกำหนดเวลาที่กำหนด ทำการวิเคราะห์สมบัติน้ำตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.1
4. ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนเป็นน้ำตัวอย่างที่ปรับให้มีพีเอชเท่ากับ 7 และ 9 ตามลำดับ
5. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ใช้ซีลิ่งเหล็กเป็นตัวเร่ง เตรียมในข้อ 3,4 ลงในถังปฏิกริยา ปริมาณ 0.1 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการนำขี้กิ้งเหล็กมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนชันและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดได้แก่ ระยะเวลาในการบำบัด และ pH ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 ลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือ ขี้กิ้งเหล็กซึ่งได้รับมาจากโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์แห่งหนึ่งในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ขี้กิ้งเหล็กเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเจียรขอบและเจาะรูคอมเพรสเซอร์ ซึ่งบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช มีลักษณะดังแสดงในภาพ 4.1



ภาพที่ 4.1 ลักษณะของขี้กิ้งเหล็กที่ใช้ในการศึกษา

ผลการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ หรือ เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence) พบว่าขี้กิ้งเหล็กที่มีออกไซด์ของเหล็กในรูป Fe_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูงถึง 97.5% ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของขี้กิ้งเหล็ก

Element	Concentration(%)
Fe_2O_3	97.50
Na_2O	0.618
SiO_2	0.605
MnO	0.560
CuO	0.235
Al_2O_3	0.150

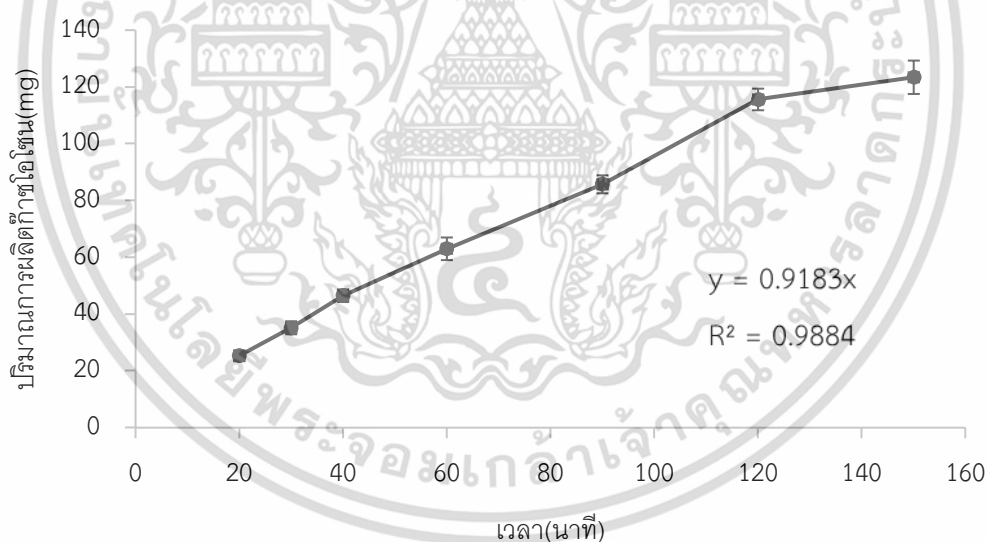
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่าการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของซึ่กลึงเหล็ก(ต่อ)

Element	Concentration(%)
CaO	0.144
Cl	0.0642
SO ₃	0.0598
Cr ₂ O ₃	0.0451
K ₂ O	0.0223
P ₂ O ₅	0.0137

4.2 อัตราการผลิตโอโซน

จากการศึกษาอัตราการผลิตโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซนของ OTEC เพื่อหาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ในเวลาต่างๆ โดยการเดินระบบให้โอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตเข้าสู่ถังปฏิกิริยาและขวดดักจับโอโซนจำนวนสามขวด (T1 T2 และ T3) ซึ่งภายในถังปฏิกิริยาและขวด T1 T2 และ T3 บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 2% (KI 2%) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เมื่อเวลาผ่านไป 150 นาที พบว่าปริมาณโอโซนที่ผลิตได้แต่ละช่วงเวลาเป็นไปดังภาพที่ 4.2



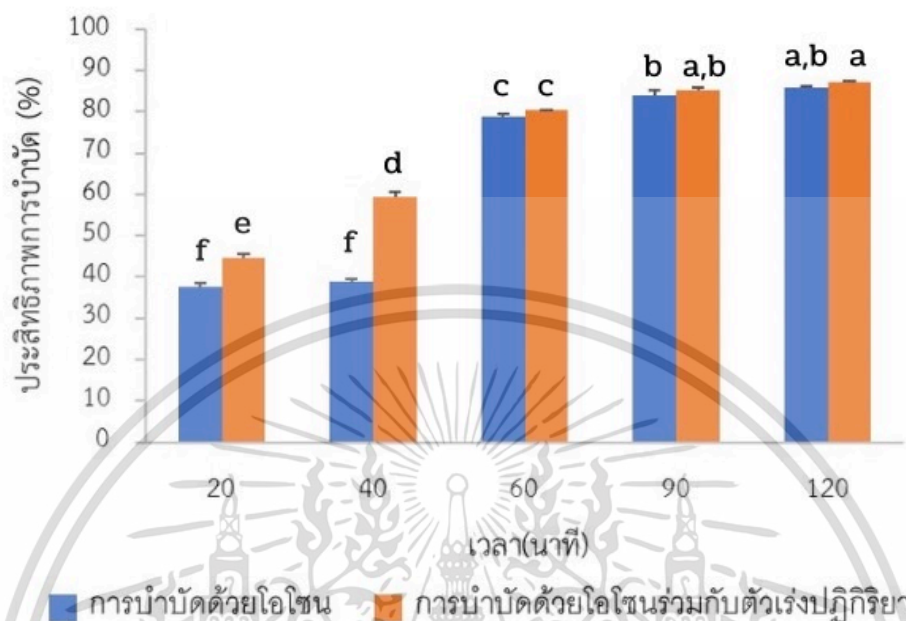
ภาพที่ 4.2 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้ที่เวลาต่างๆ

จากภาพที่ 4.2 พบว่าภายในระยะเวลา 150 นาที เวลาที่ใช้ในการเดินระบบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงกับปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิต ทำให้สามารถหาอัตราการผลิตจากความชันของเส้นตรงได้โดยมีค่าเท่ากับ 65 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความสามารถในการบำบัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.1 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซน

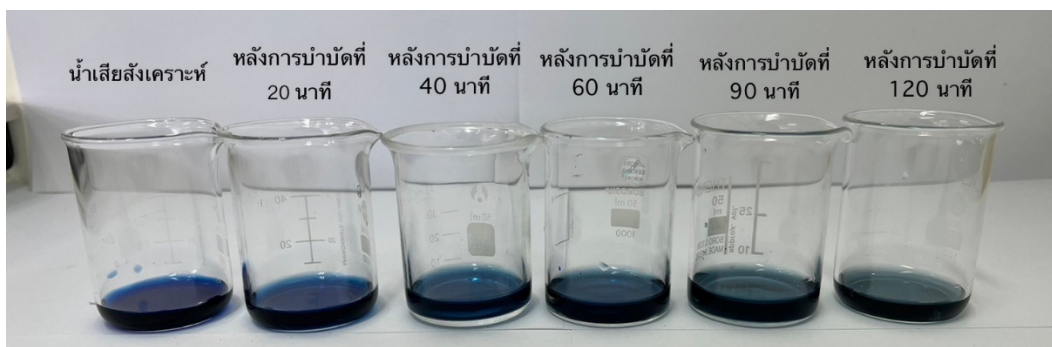


ภาพที่ 4. 3 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซนต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการโอโซนชั้นในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัมต่อลิตร (●) เทียบกับไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (●)

จากภาพที่ 4.3 พบว่า ความสามารถในการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาโอโซนชั้นในสถานะที่มีซึ่กิ้งเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการพ่นโอโซน โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $44.61 \pm 0.95\%$ ที่เวลา 20 นาที เป็น $59.40 \pm 1.23\%$, $80.36 \pm 0.22\%$, และ $85.14 \pm 0.79\%$ เมื่อระยะเวลาในการพ่นโอโซนจาก 20 นาที เป็น 90 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีค่าสูงสุดเท่ากับ $87.27 \pm 0.30\%$ เมื่อใช้เวลาในการบำบัดนาน 120 นาที ผลการเติมซึ่กิ้งเหล็กในปริมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากความสามารถในการกำจัดสีด้วยการเติมโอโซนในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าสูงกว่าการกำจัดสีด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว โดยที่ระยะเวลาการเติมโอโซนนาน 20, 40, 60, 90 และ 120 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดสีเท่ากับ $37.61 \pm 0.95\%$, $39.01 \pm 0.6\%$, $78.93 \pm 0.63\%$, $83.88 \pm 1.32\%$ และ $86.01 \pm 0.27\%$ ตามลำดับ ทั้งนี้สีของน้ำหลังบำบัดทั้งสองวิธีมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ แม้ว่ายังมีสีปรากฏอยู่ในตัวอย่างน้ำหลังบำบัด แต่พบว่าการบำบัดด้วยวิธีการทั้งสองวิธี ทำให้ความเข้มข้นของสีน้ำเงินมีแนวโน้มลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เพิ่มขึ้นในสถานะที่มีการใช้โอโซนร่วมกับซึ่กิ้งเหล็ก อาจเป็นผลมาจากซึ่กิ้งเหล็ก มีเหล็กออกไซด์ช่วยรีดิวซ์สารอินทรีย์ที่มีสี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือขนาดของโมเลกุล (เบญญาทิพย์และตุลวิทย์, 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



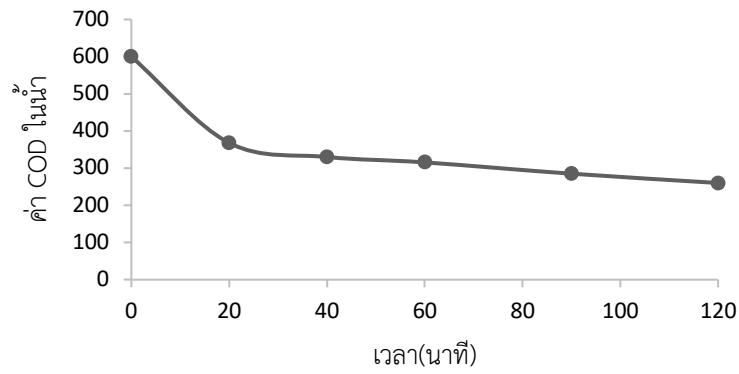
ภาพที่ 4.4 ลักษณะของสีของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซนที่เวลาต่างๆ



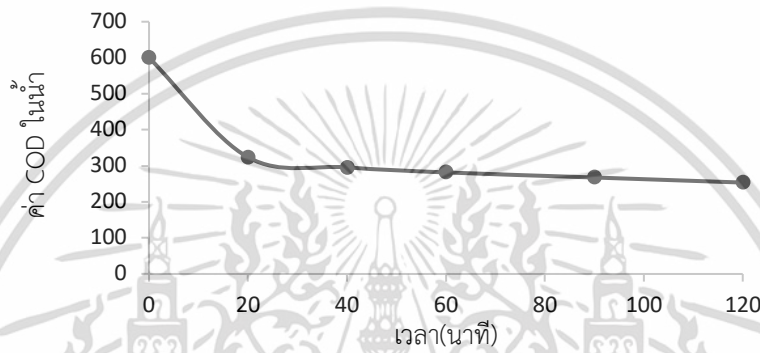
ภาพที่ 4.5 ลักษณะของสีของน้ำก่อนและหลังการบำบัดด้วยโอโซนในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลา 20,40,60,90 และ 120 นาที

ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของน้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า การบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับซึ๊กกิ่งเหล็กสามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว (ภาพที่ 4.6ก และ 4.6ข) ซีโอดีของตัวอย่างน้ำหลังบำบัดด้วยโอโซนในสถานะที่มีซึ๊กกิ่งเหล็กมีค่าลดลงจาก 600 mg/L เหลือ 243.51 ± 16.04 mg/L เมื่อใช้เวลาการเติมโอโซนนาน 120 นาที คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ $59.41 \pm 2.67\%$ ในขณะที่ซีโอดีของน้ำตัวอย่างที่บำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวมีค่าลดลงจาก 600 mg/L เหลือ 264.08 ± 34 mg/L เมื่อใช้เวลาการเติมโอโซนนาน 120 นาที คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ $55.95 \pm 5.63\%$ (รูปที่ 4.6) การลดลงของค่าซีโอดี แสดงให้เห็นว่าโอโซน และโอโซนร่วมกับซึ๊กกิ่งเหล็กสามารถช่วยกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ ผลการวัดพีเอชของน้ำตัวอย่างพบว่า ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังบำบัดมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นและหลังบำบัดร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.4 ± 0.2 และค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.83 ± 0.13 ส่วนค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่บำบัดด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 3.86 ± 0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

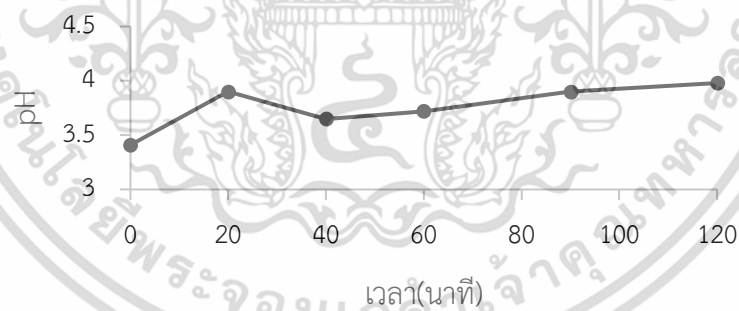


(ก)

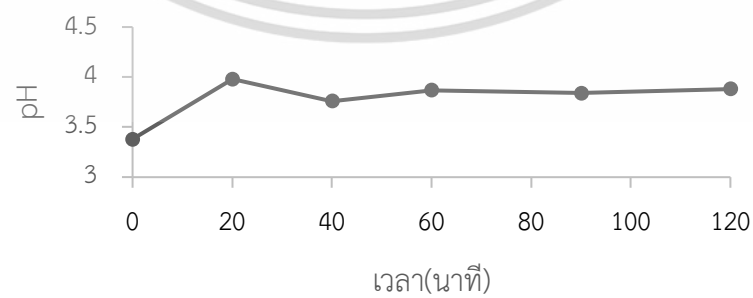


(ข)

ภาพที่ 4.6 ซีโอดีของน้ำตัวอย่างเมื่อบำบัดด้วย (ก) กระบวนการโอโซนชั้น และ (ข) กระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ



(ก)



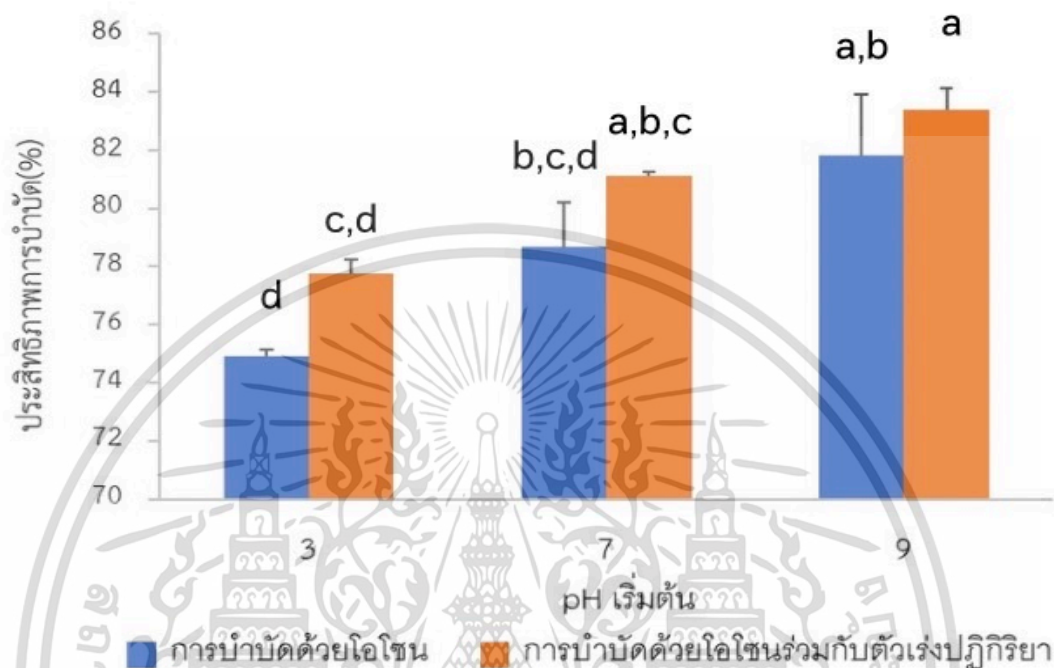
(ข)

ภาพที่ 4.7 พีเอชของน้ำตัวอย่าง เมื่อบำบัดด้วย (ก) กระบวนการโอโซนชั้น และ (ข) กระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโครงการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารฉบับนี้มีความสำคัญหรือไม่ควรเปิดเผยให้ผู้อื่นได้โปรดแจ้งให้ทราบและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลของค่าพีเอช

ความสามารถของโอโซน และโอโซนในสภาวะที่มีซึ่กึ่งเหล็ก ในการกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำที่พีเอชต่างๆ ทำการศึกษาโดยบำบัดสารละลายสีรีแอกทีฟที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างกัน คือ 3,7 และ 9 ได้ผลการศึกษาดังนี้

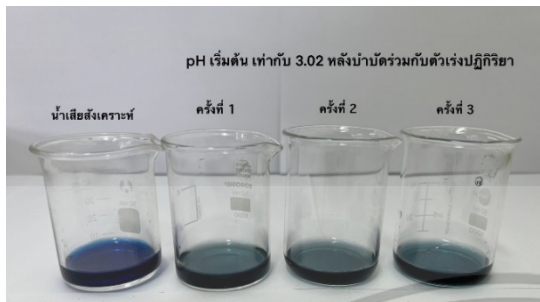


ภาพที่ 4.8 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยโอโซน และโอโซนร่วมกับซึ่กึ่งเหล็ก

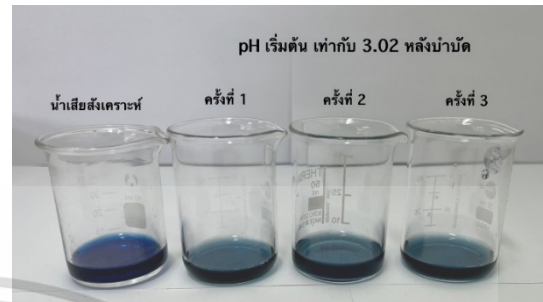
จากภาพที่ 4.8 พบว่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยโอโซน และโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความสามารถในการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อบำบัดในสภาวะที่เป็นต่าง (พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 9 โดยสามารถบำบัดสีเริ่มต้นจาก 26,701 ADMI เหลือ $4,848.68 \pm 775.65$ ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดสีเท่ากับ $81.83 \pm 2.90\%$ เมื่อบำบัดโดยใช้โอโซนในสภาวะที่มีซึ่กึ่งเหล็กที่พีเอชเดียวกันพบว่าโอโซนเพียงอย่างเดียวสามารถบำบัดสีเริ่มต้นจาก 26,701 ADMI เหลือ $4,428 \pm 195.22$ ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดสีเท่ากับ $83.41 \pm 0.73\%$ ยืนยันให้เห็นว่าซึ่กึ่งเหล็กสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกำจัดสีด้วยโอโซน เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำที่พีเอช 7 และพีเอช 3 พบว่าได้ผลในทำนองเดียวกัน โดยที่พีเอช 3 การบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถบำบัดสีจาก 20,389 ADMI เหลือ $4,534.95 \pm 98.52$ ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดสีเท่ากับ $77.75 \pm 0.48\%$ ในขณะที่การบำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวสามารถบำบัดสีเริ่มต้นจาก 20,389 ADMI เหลือ $5,109 \pm 43.2$ ADMI คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดสีเท่ากับ $74.93 \pm 0.21\%$ สีของน้ำหลังการบำบัดที่พีเอชต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 ทั้งนี้ความสามารถใน

การกำจัดสีที่เกิดขึ้นได้ดีในสภาวะเบส อาจเป็นผลมาจากการสลายตัวของก๊าซโอโซนจะเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล(OH) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีและรวดเร็ว ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

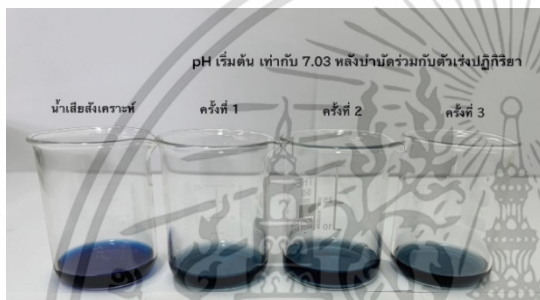
กว่าก๊าซโอโซน สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารได้หลายประเภท มีความไม่เฉพาะเจาะจง (Parsa and Negahdar. (2012) และ Turhan (2012)) จึงสามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมได้ดีกว่าที่สภาวะกรด



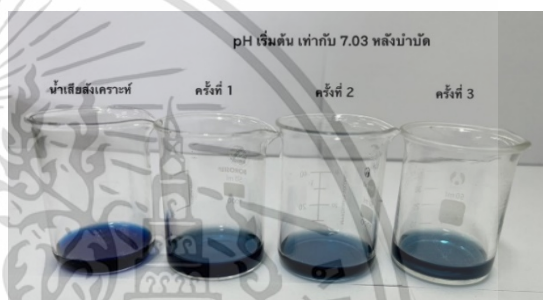
(ก) โอโซนเข้มข้น+ซีกิ่งเหล็ก, pH 3



(ข) โอโซนเข้มข้น, pH 3



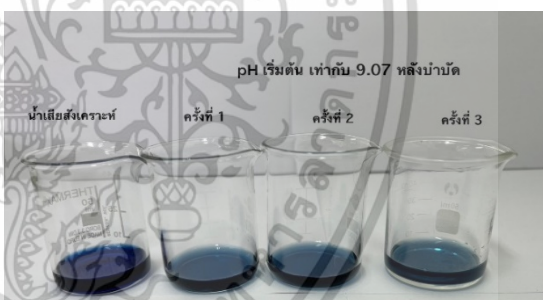
(ค) โอโซนเข้มข้น+ซีกิ่งเหล็ก, pH 7



(ง) โอโซนเข้มข้น, pH 7



(จ) โอโซนเข้มข้น+ซีกิ่งเหล็ก, pH 9



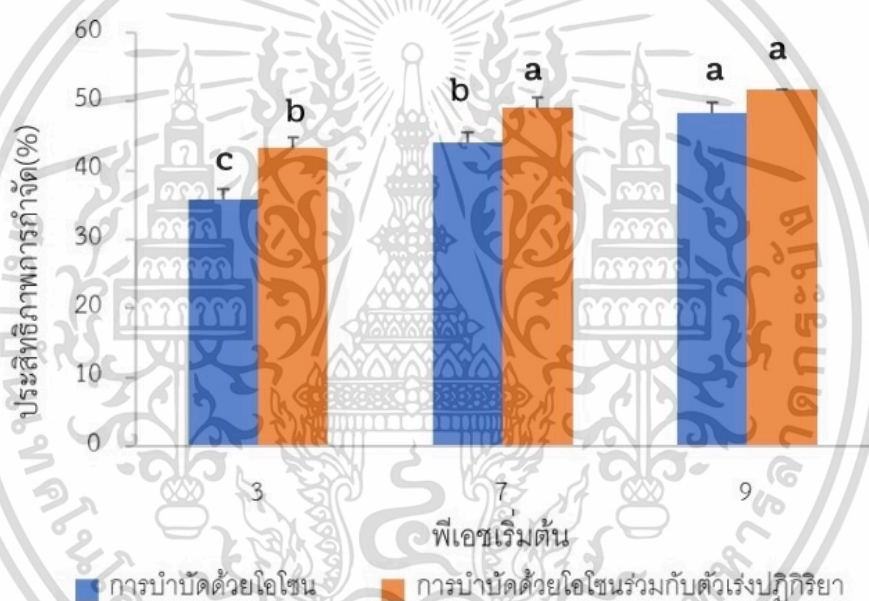
(ฉ) โอโซนเข้มข้น, pH 9

ภาพที่ 4.9 ลักษณะของสีของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดที่พีเอชต่างๆ เมื่อใช้เวลาดำเนินการ 90 นาที

ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอของน้ำหลังการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่พีเอชต่างๆ พบว่า พีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำของทั้งสองกระบวนการ โดยการบำบัดเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่พีเอช 9 นอกจากนี้พบว่าซีกิ่งเหล็กช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโอโซนในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำดังจะเห็นได้จากการบำบัดสารละลายสีย้อมที่มีพีเอช 9 ด้วยโอโซนในสภาวะที่มีซีกิ่งเหล็กสามารถลดค่าซีไอของน้ำจาก 540.85 mg/L เหลือ 260.55 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 51.82% ในขณะที่ซีไอของน้ำตัวอย่างที่บำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวมีค่าลดลงจากจาก 540.85 mg/L เหลือ 278.84±7.91 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 18.8% ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณำไปใช้

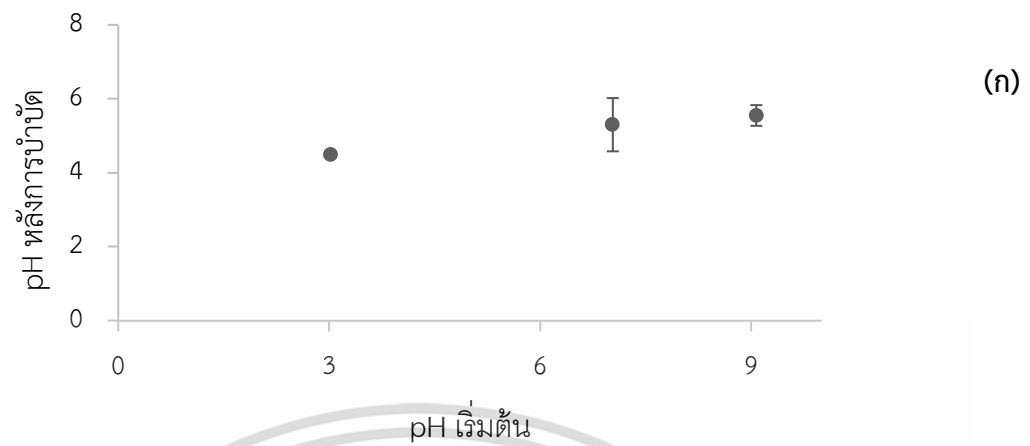
48.44±1.46% ในขณะที่การบำบัดสารละลายสีย้อมที่พีเอช 3 (ภาพที่ 4.10) ด้วยโอโซนร่วมกับซึ้กลิ่งเหล็กสามารถลดซีไอดีของตัวอย่างน้ำจาก 581.76 mg/L เหลือ 329.66±8.39 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 43.33±1.44% สำหรับซีไอดีของน้ำตัวอย่างที่บำบัดด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวมีค่าลดลงจากจาก 581.76 mg/L เหลือ 373.29±8.39 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 35.83±1.44%

ผลการวัดพีเอชในน้ำของน้ำตัวอย่างพบว่า ค่าพีเอชหลังการบำบัดในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าค่อนข้างเป็นเบส หลังจากบำบัดด้วยโอโซนจะทำให้น้ำมีค่าเป็นกลางหรือกรดอ่อนๆ ซึ่งการลดลงของค่าพีเอชอาจมาจากการทำปฏิกิริยาโอโซนชั้นที่เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรด หรือเกิดจากการสลายตัวในน้ำของโอโซนกลายเป็นออกซิเจน โดยแตกตัวให้ ไฮดรอกซิลแรดดิคอล(OH) แต่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอชเป็นกรดหลังจากบำบัดด้วยโอโซนแล้วค่าพีเอชที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.10 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยโอโซน และโอโซนร่วมกับซึ้กลิ่งเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 พีเอชของน้ำตัวอย่าง เมื่อบำบัดด้วย (ก) กระบวนการโอโซนชั้น และ (ข) กระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการนำซึ้กสิ่งเหล็กมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้น และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ ระยะเวลาในการบำบัด และ pH ได้ผลสรุปดังนี้

1. ซึ้กสิ่งเหล็ก ที่ได้นำมาทำการทดลองมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำซึ่งบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่า ซึ้กสิ่งเหล็กที่ใช้มีออกไซด์ของเหล็กในรูปของ Fe_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูงถึง 97.5%

2. ที่ความเข้มข้นโอโซน 65 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ผลของระยะเวลาการเติมโอโซน ความสามารถในการกำจัดสี และ COD ด้วยปฏิกิริยาโอโซนเข้มข้นและโอโซนเข้มข้นในสถานะที่มีซึ้กสิ่งเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาที่มากขึ้น โดยที่เวลา 120 นาทีมีประสิทธิภาพการกำจัดสี และ COD สูงที่สุดเท่ากับ $86.01 \pm 0.27\%$ และ $55.98 \pm 5.67\%$ ผลการเติมซึ้กสิ่งเหล็กในปริมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีและ COD มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบการกำจัดสี และ COD ด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียว โดยที่ระยะเวลา 120 นาทีมีประสิทธิภาพการกำจัดสีและ COD เท่ากับ $87.27 \pm 0.3\%$ และ $59.41 \pm 2.67\%$ ค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์หลังบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้น และหลังบำบัดร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าพีเอชที่ใกล้เคียงกัน

3. พีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำด้วยโอโซนและโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความสามารถในการกำจัดสีและสารอินทรีย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อบำบัดในสถานะที่เป็นด่าง โดยที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 9 มีประสิทธิภาพการกำจัดสีเท่ากับ 81.84% และความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเท่ากับ 48.44% เมื่อบำบัดโดยใช้โอโซนในสถานะที่มีซึ้กสิ่งเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำได้มากกว่าการบำบัดโดยใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว โดยที่พีเอช 9 มีประสิทธิภาพการกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเท่ากับ 83.41% และ 51.82% ค่า pH ที่มีค่าค่อนข้างเป็นเบส หลังการบำบัดด้วยโอโซนและโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้น้ำมีค่าเป็นกลางหรือกรดอ่อนๆ ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าเป็นกรดหลังบำบัดด้วยโอโซนและโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้พีเอชมีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสีรีแอกทีฟด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเติม เช่น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเข้มข้นสีเริ่มต้น
2. ควรมีการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) และ Transmission Electron Microscope (TEM) เพิ่มเติม
3. ควรประเมินความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับกระบวนการโอโซนชั้น เช่น ค่าไฟฟ้า ต้นทุนเครื่องผลิตโอโซน ค่าดำเนินการ เป็นต้น
4. ควรศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่กระทรวงอุตสาหกรรม.คู่มือการกำหนดลำดับชั้นคุณภาพ
เศษเหล็ก, (2553). [จุลสาร]. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ชนิษฐา.2007.สีย้อมในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.[Online] เข้าถึงได้จาก
[https://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=1
&read=true&count=true](https://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=1&read=true&count=true)
- ชนิษฐา.2550..อุตสาหกรรมฟอกย้อม.[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :[https://www.tpa.or.th/writer/
/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=4&read=true&count=true](https://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=4&read=true&count=true)
- คณิตตา ธรรมจริยวงศา. 2007. น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
- คลังความรู้ SciMath.2555.การพัฒนาสีย้อมผ้าและผ้าที่ต้านทานแบคทีเรีย.[Online] เข้าถึงได้จาก
<https://www.scimath.org/article->
- จันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม. 2561. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงพยาบาลด้วยกระบวนการโอโซนชั้นเพื่อการ
นำกลับมาใช้ใหม่. วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม.
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- จันทิมา ชั่งสิริพรและจรรยา อินทมณี. 2556. รายงานการวิจัยการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอก
ย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดพื้นฟูสภาพได้. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์.
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ต่อพงศ์ กริธาชาติ. การบำบัดน้ำเสียและปรับสภาพน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน. [Online]. เข้าถึง
ได้จาก <http://www.seen.up.ac.th>
- ธัญกานต์ รัตนวรรณและชลอ จารุสุทธิรักษ์. 2021.การใช้ตะกรันเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใน
กระบวนการโอโซนชั้นเพื่อบำบัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสีย. การประชุมทางวิชาการ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 60 กรุงเทพฯ
- ธรณินทร์ สัมเกิด และ ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา.2561.การศึกษากระบวนการโอโซนชั้นร่วมกับตัวเร่ง
ปฏิกิริยาในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.มหาลัย
วิทยาเกษตรศาสตร์
- เบญญาทิพย์ ไพบูลย์ และ ตุลวิทย์ สถาปนจารุ “การกำจัดสีย้อมด้วยวิธีการกรองผ่านอนุภาคเหล็ก
ขนาดนาโนสเกล,”[Online]. Available : [http://www.irpus.org/project_file/2549_
2007-06-05_I24912013.pdf](http://www.irpus.org/project_file/2549_2007-06-05_I24912013.pdf) (Retrieved 8/8/2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงาน. [Online]. เข้าได้ถึงจาก <https://assist-impact.net/th/articles/>
- ปิลันธน์ ธรรมมงคล.2017.การประยุกต์ใช้ไบโอเทคโนโลยีกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม. [Online].เข้าถึงได้จาก https://www.atdp-textiles.org/blog_biotech_environment/
- ปรีชาพัฒน์ พัวสุวรรณ.2561.การบำบัดมันหล่อเย็นใช้แล้วด้วยกระบวนการฟenton ประยุกต์โดยใช้ของเสียอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์.สทสาขาสหวิทยาการสิ่งแวดล้อมบัณฑิตวิทยาลัย.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- พันธกานต์ ยนต์ฉิมพลี.2558.การบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ใช้ไว้ในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราด้วยกระบวนการโอโซนขั้น.วิทยาสตรมหาบัณฑิต(เคมีสิ่งแวดล้อม).สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- พรทิพย์ สวัสดิ์พานิช.2560.ใครๆก็อยากได้โอโซน.[Online] เข้าถึงได้จาก <https://www.scimath.org/article-science/item/7425-2017-08-08-02-38>
- พงษ์ศักดิ์ ชาวอินทร์. 2555. การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดพื้นฟูสภาพได้.วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ภัทรพล กล่ำเสื่อ. 2560. การบำบัดสีและกลิ่นของน้ำเสียจากห้องฟนสีด้วยโอโซน. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- ยุวรัตน์ เงินเย็น, ชนิษฐา คำวิสัยศักดิ์, ไศรดา ชะโนและพรนิภา เขียมดำรง.2562.การกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยถ่านกัมมันต์.วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา) 2:2-26.
- รัตน์ระพินทร์ แสงพิทักษ์, หลุทัย แก้วคำและภาณุวัฒน์ สายชล.2556.การศึกษาการบำบัดและ COD จากโรงงานผลิตกล่องกระดาษลูกฟูกด้วยกระบวนการโอโซนขั้น.วิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
- วรพจน์ กนกกันชนักพงษ์.2562.การควบคุมค่า BOD COD ในโรงงานอุตสาหกรรม. ศัพท์บัญญัติ การศึกษา.[Online]. เข้าได้ถึงจาก https://www.entech.co.th/wp-content/uploads/2019/01/1-Entech-BOD-COD-control-Jan_2019_S.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- วนิดา ชูอักษร.2555.เทคโนโลยีกำจัดสีในน้ำอุตสาหกรรม.ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมคณะ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- ศศิธร จิตติมา.2564.การบำบัดเมโทรรนิดาโซลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นที่มีถ่าน
ชีวภาพแม่เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.วิทยาสตรมหาบัณฑิต(เทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม).
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สายรุ้ง รพขุนทด. 2554. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน. วิทยาศาสตร์มหา
บัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- อรชุตตา ชันตีกุลและอนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล.2550.การหาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียจาก
โรงงานหมักพิมพ์โดยกระบวนการโอโซนชั้น.วารสารบทความวิจัยวิศวกรรมสาร
มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 34:177-188
- อุษา ชัยจำนงค์,นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์.2560.การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟใน
น้ำเสียจากโรงงานทอผ้าพื้นเมืองขนาดครัวเรือนด้วยถังกรองประดิษฐ์ที่มีตัวดูดซับถ้ำลอยลิก
ไนต์.ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- Hu, E , Shang, S and Chiu, K .2019. Molecules. Removal of Reactive Dyes in Textile
Effluents by Catalytic Ozonation Pursuing on-Site Effluent Recycling. 24(15),
2755; <https://doi.org/10.3390/molecules24152755>
- Hung Doung, P ,T.Huynh, N , Yoon, P .2021. Earth and Environmental Science.
Treatment of C.I Reactive Blue 160 by ozonation system. IOP Publishing Ltd. ;
doi:10.1088/1755-1315/964/1/012030
- INDADIXC.2019.สีย้อมผ้า รีแอคทีฟ.[Online] เข้าถึงได้จาก
<https://www.indafix.com/%e0%b8%aa%e0%b8%b5%e0%b8%a2%e0%b9%89%e0%b8%ad%e0%b8%a1%e0%b8%9c%e0%b9%89%e0%b8%b2-%e0%b8%a3%e0%b8%b5%e0%b9%81%e0%b8%ad%e0%b8%84%e0%b8%97%e0%b8%b5%e0%b8%9f-reactive-dyes/>
- Kabdaşlı, I , Ölmez, T and Tünay, O. 2002. Water Science and Technology,
Factors affecting colour removal from reactive dye bath
by ozonation. 45(12):261-270.
- Mohammad, M. . 1977. Advanced oxidation processes for water treatment: Reactor
design and case studies. The academic degree of doctoral engineer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญาตเหนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Branddenburg Technical University of Cottbuss.
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- Parsa, J.B. and S.H. Negahdar. 2012. Treatment of wastewater containing Acid Blue 92 dye by advanced ozone-based oxidation methods. Separation and Purification Technology 98:315– 320
- Turhan, K , Ilknur, D , S. Arda , O and Zuhal, T .2011. Dyes and Pigments. Decolorization of textile basic dye in aqueous solution by ozone. 92(3). 898-901.<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2011.07.012>
- World Dye Variety.2013.Reactive Blue 5.[Online] เข้าถึงได้จาก <https://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive-blue-5.html>
- World Dye Variety.2012.Reactive Blue 11.[Online] เข้าถึงได้จาก <https://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive-red-11.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารเคมีและวิธีการวิเคราะห์

ก-1 การวัดปริมาณไอโอดีน

การวัดปริมาณไอโอดีนสามารถทำได้ด้วยวิธีไอโอดิเมตรี (Iodometry) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดไอโอดีน
2. อุปกรณ์สำหรับไทเทรต

สารเคมี

1. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2%
 - ชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ 20 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
3. น้ำแป้ง
4. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.1 N

หมายเหตุ การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยนำสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 N มาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไอโอไดด์

- 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 1000 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 N
- ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) จำนวน 0.3567 กรัม มาละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1000 N
- เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ความเข้มข้น 1% (1% KI) โดยชั่งโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร
- นำสารละลาย 1% มา 80 มิลลิลิตร ลงใน Erlenmeyer flask ปิดสารละลาย KIO_3 10 มิลลิลิตร และเติม 1 M H_2SO_4 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำไปไทเทรตกับ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมไว้ จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองฟางข้าว จึงเติมน้ำแป้งลงไป 2 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงินไทเทรตต่อจนเป็นสารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต และทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_{titrant} คือ ปริมาณของโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 นอร์มอล (0.1 N $\text{Na}_2\text{S}_4\text{O}_6$) ที่ใช้ไทเทรตกับสารละลาย 2% KI

N คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไทโอซัลเฟต

Time คือ ระยะเวลาที่สัมผัสไอโอดีน (min)

ก-2 การวัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง UV-Vis NIR spectrophotometer

2. โปรแกรม UWin5 Software v.5.1.1

สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับปรับ pH
2. สารละลายมาตรฐานสีรีแอคทีฟ REMAZOL BLUE SAM
 - ชั่งสีรีแอคทีฟ REMAZOL BLUE SAM 500 มิลลิกรัมละลายละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตร 1000 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับปรับ pH

การทดลอง

1. เตรียมสารละลายสีมาตรฐานสี 200, 250, 300, 400 และ 500 ADMI ทำการเจือจางสารละลายสีรีแอคทีฟ REMAZOL BLUE SAM จากข้อ 2 โดยปิเปตมา 1,5 และ 10 มิลลิลิตรแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าสีทรานส์มิตแตนซ์ (%T) แต่ความยาวคลื่นดังตาราง ก.1
2. นำไปวัดค่า %T ที่ทราบยาวคลื่นดังตาราง ก.1 ด้วยเครื่อง UV-Vis NIR spectrophotometer

ตาราง ก-1 การวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

Standard	200 ADMI										Sum	
X	90.35	88.34	98.04	98.94	99.23	99.33	99.33	99.34	99.36	99.32	971.55	$X_s = 95.27$
Y	91.06	95.00	96.81	97.94	98.65	99.02	99.33	99.47	99.51	99.49	976.30	$Y_s = 97.63$
Z	89.44	90.50	90.34	89.70	89.05	88.59	88.45	88.75	89.76	92.05	896.65	$Z_s = 105.93$
	250 ADMI											
X	88.88	86.19	97.80	98.95	99.32	99.45	99.49	99.48	99.48	99.41	968.49	$X_s = 94.97$
Y	89.22	94.06	96.31	97.61	98.50	98.94	99.33	99.47	99.53	99.44	972.40	$Y_s = 97.24$
Z	97.42	88.44	88.13	87.33	86.43	85.85	85.69	86.02	87.19	89.90	872.44	$Z_s = 103.07$
	300 ADMI											
X	86.76	83.77	97.64	99.05	99.58	99.77	99.88	99.90	99.88	99.90	966.14	$X_s = 94.74$
Y	87.68	93.38	96.07	97.42	98.50	99.08	99.61	99.83	99.98	99.99	971.50	$Y_s = 97.15$
Z	85.10	88.61	86.37	85.45	84.46	83.82	83.60	84.02	85.41	88.68	853.48	$Z_s = 100.83$
	400 ADMI											
X	81.66	78.01	96.65	98.66	99.37	99.65	99.81	99.87	99.85	99.90	953.39	$X_s = 93.49$
Y	83.20	90.78	94.41	96.29	97.82	98.65	99.41	99.76	99.99	100.07	960.40	$Y_s = 96.04$
Z	79.73	81.89	81.59	80.48	79.23	78.41	78.23	78.78	80.62	84.93	803.88	$Z_s = 94.97$
	500 ADMI											
X	80.24	75.69	97.46	99.83	100.66	100.94	101.07	101.11	101.09	101.11	959.21	$X_s = 94.06$
Y	81.23	90.09	94.41	96.28	97.82	98.65	99.41	99.76	101.25	101.26	965.40	$Y_s = 96.54$
Z	77.92	80.42	80.01	78.64	77.11	76.08	75.84	76.47	78.56	83.57	784.66	$Z_s = 92.70$

ตาราง ก-1 (ต่อ) การวัดค่า %T ที่ความยาวคลื่นต่างๆ (ต่อ)

	Blank										Sum	
X	99.89	99.90	100.0	100.0	99.97	99.99	99.98	99.97	99.97	99.96	999.49	X _c =98.02
Y	100.0	100.0	100.0	100.01	100.01	100.0	100.1	100.01	99.99	99.99	1000.0	Y _c =100.0
Z	102.02	99.82	99.84	99.82	99.82	99.83	99.78	99.78	99.78	99.80	998.31	Z _c =117.94
	Sample (250 ADMI)											
X	85.16	81.72	97.36	98.85	99.35	99.48	99.51	99.54	83.75	87.40	932.08	X _c =91.40
Y	78.12	84.53	95.54	97.10	98.54	99.45	100.24	100.62	83.51	87.15	924.80	Y _c =92.48
Z	83.53	85.33	84.97	83.92	82.67	81.93	81.77	82.24	83.79	87.50	837.65	Z _c =98.96

การคำนวณค่าสีในหน่วยเอทีเอ็มไอ (APHA, 2005)

- การคำนวณมือ

1. เมื่อได้ค่า % T ของแต่ละความยาวคลื่นแล้วให้นำค่ามารวมกันในแต่ละแกน จากนั้นคูณด้วย Factor ของแกนนั้นๆ ซึ่งแกน X= 0.09806, Y = 0.10000 และ Z = 0.11814 จะได้ค่าที่คูณ Factor ของแกน X, Y, Z โดยจะให้สัญลักษณ์เป็น Xs, Ys และ Zs ตามลำดับและให้ค่าของน้ำกลั่นเป็น Xc, Yc, และ Zc ตามลำดับ

2. นำค่า Xs, Ys, Zs, Xc, Yc, และ Zc แปลงเป็นค่าของ Munsell คือเป็น Vxs, Vys, Vzs, Vxc, Vyc และ Vzc ตามค่าของตารางของ Adam – Nickerson (Wyszecki, G. and Stiles, w.S.,2000)

ตาราง ก-2 ตารางแปลงค่าของ Munsell

Blank	Xc	Yc	Zc	Vxc	Vyc	Vzc
0	98.02	100.00	117.94	9.90	9.90	9.89
Std.	Xs	Ys	Zs	Vxs	Vys	Vzs
200	95.27	97.63	105.93	9.79	9.80	9.48
250	94.97	97.24	103.07	9.78	9.79	9.38
300	94.74	97.15	100.83	9.77	9.79	9.30
400	93.49	96.04	94.97	9.71	9.74	9.08
500	94.06	96.54	92.70	9.74	9.76	8.99
Sample	91.40	92.48	98.96	9.63	9.60	9.23

3. เมื่อได้ค่าแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า DE ของแต่ละตัวจากสมการของ Bridgeman

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

เมื่อ

$$\Delta Vy = Vyc - Vys$$

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

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

เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 ตารางค่าของ Munsell

Blank	Vxc	Vyc	Vzc	DE
0	9.90	9.90	9.89	0
Std.	Vxs	Vys	Vzs	DE
200	9.79	9.80	9.48	0.126511
250	9.78	9.79	9.38	0.162296
300	9.77	9.79	9.30	0.194690
400	9.71	9.74	9.08	0.264299
500	9.74	9.76	8.99	0.306354
Sample	9.63	9.60	9.23	0.162471
Blank	Vxc	Vyc	Vzc	
0	9.90	9.90	9.89	
Std.	Vxs	Vys	Vzs	
200	9.79	9.80	9.48	

$$\Delta V_y = V_{yc} - V_{ys} = 9.90 - 9.80$$

$$\Delta(V_x - V_y) = (V_{xc} - V_{yc}) - (V_{xs} - V_{ys}) = (9.90 - 9.90) - (9.79 - 9.80)$$

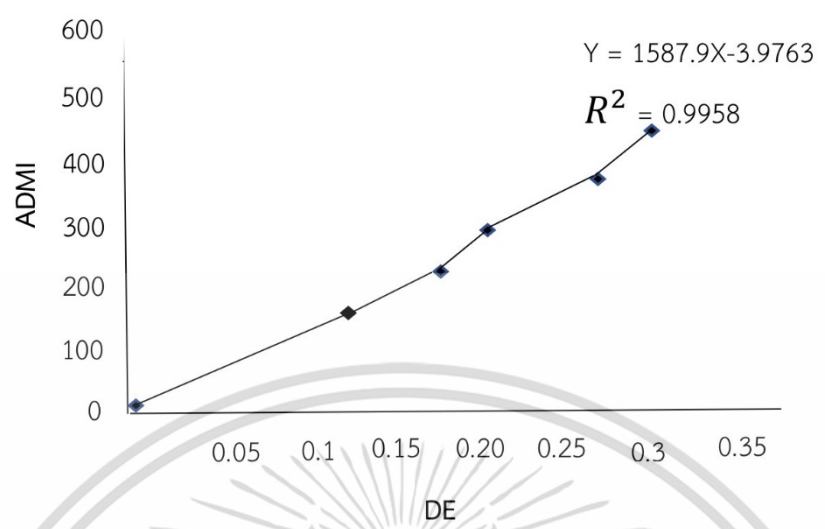
$$\Delta(V_y - V_z) = (V_{yc} - V_{zc}) - (V_{ys} - V_{zs}) = (9.90 - 9.89) - (9.80 - 9.48)$$

$$DE = [(0.23 \times (9.90 - 9.80))^2 + ((9.90 - 9.90) - (9.79 - 9.80))^2 + (0.4 \times ((9.90 - 9.89) - (9.80 - 9.48)))^2]^{1/2}$$

$$DE = 0.126511$$

4. การหาค่า Calibration Factor (F) ซึ่งเป็นการนำค่าเอดีเอ็มไอของสีมาตรฐานที่เตรียมได้มา พล็อตเทียบกับค่า DE ที่คำนวณได้ จะได้ค่า Calibration Factor (F) จากความชันของกราฟดังภาพที่ ก-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก-1 กราฟมาตรฐานของตัวอย่างสีมาตรฐาน

5. จากนั้นนำค่า DE ที่ได้มาคำนวณค่า ADMI จากสมการ

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

เมื่อ

F คือ ค่า Calibration factor ที่ได้จากความชันของการพลอตกราฟของค่า ADMI กับค่า DE ของตัวอย่างสีมาตรฐาน

B คือ ความกว้างของเซลล์วัดแสง (cm)

คำนวณค่า ADMI ของตัวอย่าง

$$ADMI = \frac{(1587.9)(0.162471)}{1} = 257.98$$

ตาราง ก-4 ตารางตัวอย่างการเทียบค่า ADMI

Blank	Vxc	Vyc	Vzc	DE	ADMI
0	9.90	9.90	9.89	0	0
Std.	Vxs	Vys	Vzs	DE	ADMI
200	9.79	9.80	9.48	0.126511	200.88
250	9.78	9.79	9.38	0.162296	257.70
300	9.77	9.79	9.3	0.194690	309.15
400	9.71	9.74	9.08	0.264299	419.68
500	9.74	9.76	8.99	0.306354	486.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-5 ตารางการเทียบค่าของ Munsell X

Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X	Vx	X
10.00	100.56																		
9.99	100.30	8.99	76.91	7.99	57.77	6.99	42.08	5.99	19.29	4.99	19.29	3.99	11.701	2.99	6.383	1.99	2.039	0.99	1.173
8	100.04	8	76.70	8	57.59	8	41.93	8	19.21	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	19.12	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	19.03	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	18.94	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	18.85	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	18.77	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	18.69	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	18.60	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	18.51	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	18.42	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	18.34	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	18.26	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	18.17	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	18.08	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	18.00	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	17.91	3	17.91	3	10.704	3	5.726	3	2.658	3	0.963

ตาราง ก-5 ตารางการเทียบค่าของ Munsell X (ต่อ)

2	95.98	2	73.38	2	54.87	2	39.72	2	17.86	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	17.75	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	17.67	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	17.58	4.79	17.58	3.79	10.464	2.79	5.569	1.79	2.568	0.79	0.913
8	94.98	8	72.57	8	54.21	8	39.17	8	17.50	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	17.41	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	17.33	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	17.25	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	17.17	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	17.09	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	17.00	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	16.92	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	16.84	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	16.76	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	16.68	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	16.60	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	16.52	6	16.52	6	9.707	6	5.081	6	2.292	6	0.756
5	91.81	5	69.97	5	52.08	5	37.43	5	16.44	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	16.36	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	16.28	3	16.28	3	9.537	3	4.979	3	2.231	3	0.721
2	91.09	2	69.38	2	51.59	2	37.04	2	16.21	2	16.21	2	9.482	2	4.937	2	2.212	2	0.709

ตาราง ก-5 ตารางการเทียบค่าของ Munsell X (ต่อ)

1	90.85	1	69.19	1	51.43	1	36.91	1	16.13	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	16.05	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	15.97	4.59	15.97	3.59	9.915	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	15.89	8	15.89	8	2.60	8	4.796	8	2.133	8	0.622
7	89.89	7	68.41	7	50.79	7	36.39	7	15.81	7	15.81	7	9.205	7	4.762	7	2.114	7	0.650
6	89.66	6	68.22	6	50.63	6	36.27	6	15.74	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	15.66	5	15.66	5	9.095	5	4.693	5	2.075	5	0.627
9.54	89.19	8.54	67.89	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	67.83	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	67.64	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	67.44	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	67.25	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	67.06	7.49	49.53	6.49	35.36	5.49	24.00	4.49	15.18	3.49	8.774	2.49	4.490	1.49	1.963	0.49	0.559
8	87.78	8	66.87	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	66.68	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	8.56	1	4.229	1	1.820	1	0.468

ตาราง ก-5 ตารางการเทียบค่าของ Munsell X (ต่อ)

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
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	0.56
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

ตาราง ก-5 ตารางการเทียบค่าของ Munsell X (ต่อ)

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	21.01	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
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	10.65	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

ตาราง ก-6 ตารางการเทียบค่าของ Munsell Y

Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	Y	Vy	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	6.511	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	28.00	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	56.86	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	4.841	3	2.712	3	0.982

ตาราง ก-6 ตารางการเทียบค่าของ Munsell Y (ต่อ)

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
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	72.38	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	9.67	2	5.036	2	2.256	2	0.723

ตาราง ก-6 ตารางการเทียบค่าของ Munsell Y (ต่อ)

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	70.17	7.59	52.13	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
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	0.675
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	24.51	4.54	15.58	3.54	9.041	2.54	4.659	1.54	2.056	0.54	0.616
3	90.73	3	68.99	3	51.16	3	36.59	3	24.40	3	15.50	3	8.987	3	4.624	3	2.037	3	0.605
2	90.49	2	68.79	2	51.00	2	36.46	2	24.30	2	15.43	2	8.933	2	4.590	2	2.019	2	0.593
1	90.25	1	68.59	1	50.84	1	36.33	1	24.20	1	15.35	1	8.880	1	4.557	1	2.000	1	0.581
0	90.01	0	68.40	0	50.68	0	36.20	0	24.10	0	15.26	0	8.827	0	4.524	0	1.981	0	0.570
9.49	89.77	8.49	68.20	7.49	50.52	6.49	36.07	5.49	24.00	4.49	15.18	3.49	8.774	2.49	4.4980	1.49	1.963	0.49	0.559
8	89.53	8	68.01	8	50.36	8	35.94	8	23.90	8	15.11	8	8.721	8	4.457	8	1.944	8	0.548
7	89.30	7	67.81	7	50.20	7	35.81	7	23.80	7	15.04	7	8.668	7	4.424	7	1.926	7	0.536
6	89.06	6	67.62	6	50.04	6	35.68	6	23.70	6	14.96	6	8.615	6	4.391	6	1.909	6	0.525
5	88.82	5	67.43	5	49.88	5	35.56	5	23.60	5	14.88	5	8.563	5	4.359	5	1.891	5	0.514
9.44	88.59	8.44	67.23	7.44	49.72	6.44	35.43	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	88.35	3	67.04	3	49.56	3	35.30	3	23.40	3	14.74	3	8.459	3	4.294	3	1.855	3	0.491
2	88.12	2	66.85	2	49.41	2	35.17	2	23.30	2	14.67	2	8.407	2	4.261	2	1.837	2	0.479
1	87.88	1	66.66	1	49.25	1	35.04	1	23.21	1	14.59	1	8.356	1	4.229	1	1.820	1	0.468

ตาราง ก-6 ตารางการเทียบค่าของ Munsell Y (ต่อ)

0	87.65	0	66.46	0	49.09	0	34.92	0	23.11	0	14.52	0	8.305	0	4.198	0	1.802	0	0.458
9.39	87.41	8.39	66.27	7.39	48.93	6.39	34.79	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	87.18	8	66.08	8	48.78	8	34.66	8	22.91	8	14.37	8	8.203	8	4.135	8	1.768	8	0.435
7	86.95	7	65.89	7	48.62	7	34.54	7	22.81	7	14.298	7	8.153	7	4.104	7	1.751	7	0.424
6	86.72	6	65.70	6	48.47	6	34.41	6	22.72	6	14.22	6	8.102	6	4.073	6	1.734	6	0.413
5	86.48	5	65.51	5	48.31	5	34.28	5	22.62	5	14.15	5	8.052	5	4.042	5	1.718	5	0.401
9.34	86.25	8.34	65.32	7.34	48.16	6.34	34.16	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	86.02	3	65.13	3	48.00	3	34.03	3	22.42	3	14.00	3	7.952	3	3.980	3	1.684	3	0.378
2	85.79	2	64.94	2	47.85	2	33.91	2	22.33	2	13.93	2	7.902	2	3.950	2	1.668	2	0.367
1	85.56	1	64.76	1	47.69	1	33.78	1	22.24	1	13.86	1	7.853	1	3.920	1	1.651	1	0.356
0	85.33	0	64.57	0	47.54	0	33.66	0	22.14	0	13.79	0	7.804	0	3.890	0	1.634	0	0.345
9.29	85.10	8.29	64.38	7.29	47.38	6.29	33.54	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	84.88	8	64.19	8	47.23	8	33.41	8	21.94	8	13.65	8	7.706	8	3.830	8	1.602	8	0.323
7	84.65	7	64.01	7	47.08	7	33.29	7	21.85	7	13.58	7	7.658	7	3.801	7	1.586	7	0.312
6	84.42	6	63.82	6	46.92	6	33.16	6	21.76	6	13.51	6	7.610	6	3.772	6	1.570	6	0.300
5	84.19	5	63.63	5	46.	5	33.04	5	21.66	5	13.43	5	7.562	5	3.742	5	1.554	5	0.289
9.24	83.97	8.24	63.45	7.24	46.62	6.24	32.92	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	83.74	3	63.26	3	46.47	3	32.80	3	21.47	3	13.29	3	7.466	3	3.684	3	1.523	3	0.266
2	83.52	2	63.08	2	46.32	2	32.67	2	21.38	2	13.23	2	7.419	2	3.656	2	1.507	2	0.255
1	83.29	1	62.89	1	46.17	1	32.55	1	21.29	1	13.16	1	7.372	1	3.628	1	1.491	1	0.243
0	83.07	0	62.71	0	46.02	0	32.43	0	21.20	0	13.09	0	7.325	0	3.599	0	1.476	0	0.232

ตาราง ก-7 ตารางการเทียบค่าของ Munsell Z

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	1.413
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	3.69	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	58.50	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	6.693	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

ตาราง ก-7 ตารางการเทียบค่าของ Munsell Z (ต่อ)

2	115.62	2	88.41	2	66.10	2	47.84	2	33.09	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
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	2.6464	2	0.854

ตาราง ก-7 ตารางการเทียบค่าของ Munsell Z (ต่อ)

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
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	107.15	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	5.489	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	2.397	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	0.661
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

ตาราง ก-7 ตารางการเทียบค่าของ Munsell Z (ต่อ)

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
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	107.15	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	5.489	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	2.397	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	0.661
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

ตาราง ก-7 ตารางการเทียบค่าของ Munsell Z (ต่อ)

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
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	75.50	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

ตาราง ก-7 ตารางการเทียบค่าของ Munsell Z (ต่อ)

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	8.776	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
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	95.73	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	8.1069	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 การวิเคราะห์หาซีโอดีโดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed-Reflux, Titrimetric Method)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย (Digest Vessel) ควรเลือกใช้หลอดทดลองแก้วชนิดบอโรซิลิเกต ความจุ 10 มิลลิลิตร หรือขนาด 16×100 มิลลิเมตร พร้อมทั้งฝาจุกชนิดที่เอพี
2. เครื่องให้ความร้อน heating block หรือเตาอบ ควบคุมอุณหภูมิ 150 ± 2 องศาเซลเซียส
3. อุปกรณ์สำหรับการไทเทรต

สารเคมี

1. น้ำยาย่อยสลายสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_3$) ความเข้มข้น 0.0167 โมลาร์ - ชั่งสารมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_3$) หนัก 2.4565 กรัม ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 250 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 83.5 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวรีซัลเฟต 16.65 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดสีชาเก็บไว้

2. กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์ (H_2SO_4 reagent)

- ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) จำนวน 2.2 กรัมต่อกรดซัลฟิวริก 400 กรัม หรือ สารละลายซิลเวอร์ฟอสเฟตจำนวน 8.8 กรัมในกรดซัลฟิวริก 1.6 กิโลกรัม (1.6 ลิตร) ทิ้งไว้ 1-2 วันเพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลาย

3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) หรือสารละลายมาตรฐานไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

- ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต $[Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O]$ 19.6 กรัม ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 250 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็นในอุณหภูมิ แล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร สารละลายนี้ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่น่ามาใช้

หมายเหตุ การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารทุติยภูมิ FAS ทำได้โดย เติมน้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 25 มิลลิลิตร เติม $K_2Cr_2O_3$ 1.5 มิลลิลิตร เติม H_2SO_4 3.5 มิลลิลิตร

เขย่าให้เข้ากัน ระวังร้อน จากนั้นทิ้งให้เย็น หลังจากนั้นใส่เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 2 – 3 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับ FAS 0.1 โมลาร์ เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง บันทึกปริมาตรที่ใช้ ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{Mole of FAS} &= \text{Mole of K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \\ N_1 V_1 &= N_2 V_2 \\ N_1 &= \frac{0.1000 N \times 1.5 \text{ ml}}{V_1 (\text{ml})} \end{aligned}$$

โดย N_1 คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

V_1 คือ ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรต

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ที่เติม

4. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท (KHP)

- ละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส หนัก 0.2125 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจาง จนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร สารละลายนี้จะมีค่าซีไอดี 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในทางทฤษฎีสารละลาย KHP มีค่าซีไอดี 1.176 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อมิลลิกรัม

5. กรดซัลฟิวริก 20% สำหรับล้างหลอดย่อย

- นำน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์ขนาด 2000 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 204.8 มิลลิลิตร ใส่ในน้ำกลั่นจนได้ 1000 มิลลิลิตร

6. เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

- ชั่งฟีนอล์ฟทาเลอินโมโนไฮเดรตมา หนัก 1.48 กรัม และชั่งเฟอร์รัส(II)ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมา 0.7 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

การทดลอง

1. ล้างหลอดย่อยสลายและฝาจุกด้วยกรดซัลฟิวริก 20% ทุกครั้งก่อนใช้งาน เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารอินทรีย์

2. เลือกหลอดแก้วความจุ 10 มิลลิลิตร หรือขนาด 16 × 100 มิลลิเมตร นำมาใส่ปริมาตรของน้ำตัวอย่างและสารเคมีที่เหมาะสม ตามตาราง ก-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-8 อัตราส่วนของปริมาณน้ำตัวอย่างกับสารเคมีที่ใช้สำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ

หลอดย่อยสลาย (มม.)	ปริมาตรน้ำ ตัวอย่าง (มล.)	ปริมาตร สารละลาย $K_2Cr_2O_3$ (มล.)	กรดซัลฟิวริก เข้มข้น (มล.)	ปริมาตรรวม (มล.)
16 × 100	2.5	1.5	3.5	7.5
20 × 150	5.0	3.0	7.0	15.0
25 × 150	10.0	6.0	14.0	30.0

3. นำน้ำตัวอย่างมาใส่หลอดย่อยสลายที่เตรียมไว้ ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร
4. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 1.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดย่อยสลาย
5. ค่อยๆเติมกรดซัลฟิวริกเอเจนต์ 3.5 มิลลิลิตร ลงไปในหลอดย่อยสลายโดยให้ไหลลงก้นของหลอดย่อย
6. ปิดจุกหลอดแก้วให้สนิท แล้วคว่ำหลอดแก้วไปมา จนสารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
7. นำหลอดย่อยใส่ที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
8. เปิดฝาจุก เทสารลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 25 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายบริเวณปากของหลอดย่อยให้หมด หยดเพอร์โรอินอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียวกลายเป็นสีน้ำตาลแดง บันทึกปริมาตรที่ใช้ ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
9. ทำแปลงค์โดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ และทำการวิเคราะห์ตั้งขึ้นตอนที่ 3-8
10. ใช้สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท (KHP) แทนตัวอย่างน้ำ โดยใช้ อัตราส่วนของปริมาณน้ำตัวอย่างกับสารเคมี เหมือนกับที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ แล้วนำไปคำนวณหาค่าซีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าซีโอดี

$$\text{COD (mg O}_2\text{/l)} = \frac{(a - b) \times N \times 8,000}{V \text{ (ml)}}$$

- เมื่อ a คือ ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลงค์ (ml)
 b คือ ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตกับน้ำตัวอย่าง (ml)
 N คือ ความเข้มข้นของ FAS (N)
 V คือ ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ml)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ข-1 อัตราการไหลของโอโซนปริมาณและโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องโอโซน

ตารางที่ ข-1 การวัดปริมาณโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน

เวลา (นาที)	ปริมาณโอโซน (มิลลิกรัม)			อัตราการผลิตโอโซนที่ได้จาก เครื่องผลิต (มก./นาที)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
20	25.29	23.41	27.25	1.26±0.09
30	35.31	39.74	36.51	1.23±0.07
40	44.0	47.11	48.29	1.16±0.05
60	61.66	67.49	59.84	1.04±0.06
90	86.69	88.24	82.14	0.95±0.03
120	115.34	119.53	111.91	0.96±0.05
150	129.91	129.87	118.44	0.82±0.03
180	130.70	128.40	135.20	0.73±0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-2 ความสามารถในการบำบัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซนชั้นและโอโซนชั้นในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ข-2.1 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซน

เวลา (นาที)	สมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์					
	pH		ความเข้มข้น (ADMI)		ภาระสารอินทรีย์ที่วัดในรูป COD (mg/L)	
	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด
20	3.41±0.31	3.9±0.01	27,300	17,065.66±77.88	600	341.08±29.3
40	3.41±0.31	3.65±0.02	27,300	166,55.33±157.09	600	307.57±52.36
60	3.41±0.31	3.72±0.03	27,300	5,676.6±81.07	600	297.71±43.89
90	3.41±0.31	3.9±0.01	27,300	4,696.33±152.64	600	273.21±36.53
120	3.41±0.31	3.98±0.01	27,300	3,819.66±70.40	600	264.08±34.06

ตารางที่ ข-2.2 ผลของระยะเวลาการเติมโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

เวลา (นาที)	สมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์					
	pH		ความเข้มข้น (ADMI)		ภาระสารอินทรีย์ที่วัดในรูป COD (mg/L)	
	ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัด	ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัด	ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัด
20	3.38±0.11	3.87±0.02	28,872.17	15,990.53±275.64	600	322.94±7.53
40	3.38±0.11	3.98	28,872.17	11,720.61±356.53	600	298.56±15.20
60	3.38±0.11	3.76±0.01	28,872.17	5,729.72±230.14	600	283.86±15.12
90	3.38±0.11	3.84±0.01	28,872.17	4,288.06±230.14	600	267.64±12.70
120	3.38±0.11	3.61±0.01	28,872.17	3,673.18±86.78	600	243.51±16.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2.3 ผลของค่าพีเอชที่มีต่อการบำบัดด้วยโอโซน

pH เริ่มต้น ของน้ำ เสีย สังเคราะห์	สมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์					
	pH		ความเข้มข้น (ADMI)		ภาระสารอินทรีย์ที่วัดใน รูป COD (mg/L)	
	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อน บำบัด	หลังบำบัด
3	3.02±0.01	4.49±0.01	20,389.25	5,109.9±43.2	581.76	373.296±8.39
7	7.03±0.01	5.3±0.72	21,690.56	4,621.86±325.86	581.76	324.81±8.40
9	9.07±0.02	5.55±0.28	26,701.8	4,848.68±775.65	540.85	278.84±7.91

ตารางที่ ข-2.4 ผลของค่าพีเอชที่มีต่อการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

pH เริ่มต้น ของน้ำ เสีย สังเคราะห์	สมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์					
	pH		ความเข้มข้น (ADMI)		ภาระสารอินทรีย์ที่วัดใน รูป COD (mg/L)	
	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อน บำบัด	หลังบำบัด
3	3.02±0.01	4.72±0.1	20,389.25	4,534.95±98.52	581.76	329.66±8.34
7	7.03±0.01	5.02±0.18	21,690.56	4,096.58±35.95	581.76	295.72±8.39
9	9.07±0.02	5.24±0.07	26,701.8	4,428.5±195.22	540.85	260.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ค-1 อัตราการผลิตโอโซน

ตารางที่ ค-1 ผลของอัตราการผลิตโอโซนต่อมิลลิกรัมต่อลิตรในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี One-way ANOVA

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	7	20, 30, 40, 60, 90, 120, 150

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
time	6	27846.3	4641.06	561.55	0.000
Error	14	115.7	8.26		
Total	20	27962.0			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอัตราการผลิตโอโซนต่อมิลลิกรัมต่อลิตรโรสารละลายโพแทสเซียมไฮไดรด์ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping				
150	3	123.41	A				
120	3	115.59	A				
90	3	86.690		B			
60	3	60.663			C		
40	3	43.800				D	
30	3	35.187					E
20	3	24.317					F

ค-2 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อโอโซนในการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ ตารางที่ ค-2.1 ผลของการบำบัดโดยโอโซนโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี Two-way ANOVA

ANOVA: Color versus method, time

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
method	Fixed	3	1, 2, 3
time	Fixed	10	20, 20+C, 40, 40+C, 60, 60+C, 90, 90+C, 120, 120+C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Variance for Color

Source	DF	SS	MS	F	P
method	2	0.6	0.32	0.46	0.641
time	9	11696.4	1299.60	1827.97	0.000
Error	18	12.8	0.71		
Total	29	11709.8			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
0.843180	99.89%	99.82%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟที่ผ่านการบำบัดโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ โดยวิธี Tukey Pairwise Comparisons

Comparisons for Color

Tukey Pairwise Comparisons: time

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping					
120+C	3	87.2778	A					
120	3	86.0195	A	B				
90+C	3	85.1481	A	B				
90	3	83.8816		B				
60+C	3	80.3606			C			
60	3	78.9380			C			
40+C	3	59.4051				D		
20+C	3	44.6161					E	
40	3	39.0134						F
20	3	37.6129						F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2.2 ผลของค่าพีเอชที่ใช้ในการบำบัดโดยโอโซนโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี Two-way ANOVA

ANOVA: Result versus pH, method

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
pH	Fixed	6	3, 7, 9, 3+C, 7+C, 9+C
method	Fixed	3	1, 2, 3

Analysis of Variance for Result

Source	DF	SS	MS	F	P
pH	5	143.25	28.649	23.63	0.000
method	2	10.95	5.476	4.52	0.040
Error	10	12.12	1.212		
Total	17	166.32			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
1.10107	92.71%	87.61%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าพีเอชที่ใช้ในการบำบัดโดยโอโซนโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี Tukey Pairwise Comparisons

Comparisons for Result

Tukey Pairwise Comparisons: pH

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

pH	N	Mean	Grouping			
9+C	3	83.4150	A			
9	3	81.8414	A	B		
7+C	3	81.1135	A	B	C	
7	3	78.6918		B	C	D
3+C	3	77.7581			C	D
3	3	74.9451				D

ตารางที่ ค-2.3 ผลของภาวสารอินทรีย์ของสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี Two-way ANOVA

ANOVA: cod versus time, method

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
time	Fixed	10	20, 20+C, 40, 40+C, 60, 60+C, 90, 90+C, 120, 120+C
method	Fixed	3	1, 2, 3

Analysis of Variance for cod

Source	DF	SS	MS	F	P
time	9	646.3	71.82	6.85	0.000
method	2	302.9	151.47	14.45	0.000
Error	18	188.7	10.48		
Total	29	1138.0			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
3.23792	83.42%	73.28%

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของภาระสารอินทรีย์ของสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่างๆ โดยวิธี Tukey Pairwise Comparisons Comparisons for COD

Tukey Pairwise Comparisons: time

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping	
120+C	3	59.4144	A	
120	3	55.9862	A	B
90+C	3	55.3933	A	B
90	3	54.4640	A	B
60+C	3	51.0222	A	B
60	3	50.3810	A	B
40+C	3	50.2400	A	B
40	3	48.7372	A	B
20+C	3	46.1756	A	B
20	3	43.1520		B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2.4 ผลของภาวะสารอินทรีย์แต่ละค่าเอชของสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยวิธี Two-way ANOVA

ANOVA: result versus COD ของ pH

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
COD ของ pH	Fixed	6	pH3, pH7, pH9, pH3+c, pH7+c, pH9+c

Analysis of Variance for result

Source	DF	SS	MS	F	P
COD ของ pH	5	484.75	96.951	59.68	0.000
Error	12	19.49	1.625		
Total	17	504.25			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
1.27456	96.13%	94.52%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของภาระสารอินทรีย์แต่ละค่าเอชของสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธี Tukey Pairwise Comparisons

Tukey Pairwise Comparisons: COD ของ pH

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

COD ของ pH	N	Mean	Grouping		
pH9+c	3	51.8216	A		
pH7+c	3	49.1667	A		
pH9	3	48.4439	A		
pH7	3	44.3282		B	
pH3+c	3	43.3333		B	
pH3	3	35.8333			C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 2 เดือน มีนาคม พ.ศ 2566

ข้าพเจ้า นางสาว ฟ้าใส ยินดีสังข์ รหัสประจำตัว 62050421

นางสาว ศุภธินี วิเชียรวรรณ รหัสประจำตัว 62050452

นาย สันหนัฐ พรหมประเสริฐ รหัสประจำตัว 62050458

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชา เคมี ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การบำบัดสี้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กิ้งเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซนชัน

ชื่อภาษาอังกฤษ Removal of Reactive Dye in Synthetic Wastewater using Iron Borings as a Catalyst in Ozonation Process

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 4.84 % หรือโปรแกรม Turnitin %

ลงชื่อ ฟ้าใส ลงชื่อ ศุภธินี ลงชื่อ สันหนัฐ

(ฟ้าใส ยินดีสังข์)

(ศุภธินี วิเชียรวรรณ)

(สันหนัฐ พรหมประเสริฐ)

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ศ. / (รศ.) / ผศ. / (ดร.) / อ. สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ลงชื่อ อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ลงชื่อ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม